



**AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS
BASEADOS NA TEORIA DE ONDAS VIAJANTES**

MARX VINICIUS DE SOUSA CERQUEIRA

**TRABALHO DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Elétrica

**AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS
BASEADOS NA TEORIA DE ONDAS VIAJANTES**

MARX VINICIUS DE SOUSA CERQUEIRA

Trabalho final de graduação submetido ao Departamento de Engenharia Elétrica da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

APROVADA POR:

Prof. Felipe Vigolvino Lopes, D.Sc. (ENE-UnB)
(Orientador)

Prof. Kleber Melo e Silva, D.Sc. (ENE-UnB)
(Examinador Interno)

Eduardo Jorge Silva Leite Junior, M.Sc. (ENE-UnB)
(Examinador Interno)

Brasília/DF, Julho de 2018.

FICHA CATALOGRÁFICA

CERQUEIRA, MARX VINICIUS DE SOUSA

Avaliação de Métodos de Localização de Faltas Baseados na Teoria de Ondas Viajantes. [Distrito Federal] 2018.

xiii, 74p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Engenheiro Eletricista, Engenharia Elétrica, 2018).

Trabalho de Graduação – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Elétrica

- | | |
|--|---|
| 1. Transmissão de energia em linhas muito longas | 2. Localização de faltas baseada na teoria de ondas viajantes |
| 3. Differentiator-Smoother | 4. Interpolação por parábola |
| I. ENE/FT/UnB | II. Título (série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

CERQUEIRA, M. V. S. (2018). Avaliação de Métodos de Localização de Faltas Baseados na Teoria de Ondas Viajantes, Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica, Publicação 2018, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 74p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Marx Vinicius de Sousa Cerqueira

TÍTULO: Avaliação de métodos de localização de faltas baseados na teoria de ondas viajantes, Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica.

GRAU: Engenheiro Eletricista ANO: 2018

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste trabalho de graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desse trabalho de graduação pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Marx Vinicius de Sousa Cerqueira

Departamento de Eng. Elétrica (ENE) - FT

Universidade de Brasília (UnB)

Campus Darcy Ribeiro

CEP 70919-970 - Brasília - DF - Brasil

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço em especial à minha mãe, Maria Olivia, e ao meu pai Sebastião Andrade, pelo apoio incondicional nos momentos mais difíceis, por toda educação e dedicação à minha formação e apoio ao estudo independente das circunstâncias.

Aos meus familiares, pela paciência e compreensão, os quais sempre me apoiaram e ajudaram em todas minhas conquistas.

A todos os professores que contribuíram à minha formação, em especial ao meu orientador Felipe Lopes, por seus ensinamentos, paciência e confiança ao longo da supervisão do meu trabalho.

A todos os meus amigos, e à minha namorada Natália, que me motivaram a continuar e não desistir, e por todo apoio que me deram para que eu pudesse concluir meu curso.

RESUMO

A localização de falta em linhas de transmissão (LTs) baseada em Ondas Viajantes (OVs) se destaca pela precisão e confiabilidade na localização de faltas independente do comprimento da linha. Neste trabalho, apresenta-se uma análise do desempenho de diferentes métodos de localização de faltas baseados em ondas viajantes considerando diferentes abordagens de filtragem, a exemplo dos Filtros *Differentiator Smoother* (DS), com e sem interpolação por parábola, a fim de identificar as potencialidades de cada método. Para tal análise, o software *Alternative Transients Program* (ATP) é utilizado para simular as faltas em uma linha de transmissão de 500 kV/60 Hz com 200 km de comprimento, com variações do ângulo de incidência e distância da falta. Para cada método estudado, realiza-se registro e aquisição de sinais de corrente, transformação modal, detecção e localização da falta. Os resultados obtidos comprovam a eficiência do filtro DS e da interpolação para melhor estimativa do local de falta.

Palavras-chave: Localização de faltas, ondas viajantes, interpolação por parábola, *Differentiator Smoother*.

ABSTRACT

The fault location in transmission lines based on traveling waves stands out due to its accuracy and reliability in fault location procedures regardless of the line length. In this paper, an analysis on the performance of different fault location methods based on traveling waves, considering different filtering approaches, such as the Differentiator Smoother filter, with and without parabola interpolation is performed in order to identify the potentialities of each method. For this analysis, the software Alternative Transients Program (ATP) is used to simulate faults in a transmission line 200 km long, considering variations of the inception angle and fault distance. For each studied method, current signals are recorded and, then modal transformation, detection and fault location estimation are accomplished. The results obtained prove the efficiency of the *DS* filter and the interpolation to better estimate the fault location.

Keywords: Fault Location, Traveling waves, Interpolation by Parabola, *Differentiator Smoother*

SUMÁRIO

Sumário	i
Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas	v
Lista de Símbolos	vii
Glossário	ix
Capítulo 1 – Introdução	1
1.1 Contextualização do Tema	1
1.2 Objetivos do Trabalho	2
1.3 Organização do Texto	3
Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica	4
2.1 Visão Geral das Técnicas de Localização de Faltas	4
2.2 Localização de Faltas Baseada na Teoria de Ondas Viajantes	7
Capítulo 3 – Fundamentação Teórica	10
3.1 Faltas em Linhas de Transmissão	10
3.2 Teoria da Localização de Faltas por Ondas Viajantes	11
3.2.1 Teoria Sobre Ondas Viajantes	11
3.2.2 Classificação dos Métodos Baseados na Teoria de Ondas Viajantes	15
3.2.3 Análise Modal	17
3.2.3.1 Transformada de Clarke	17
3.2.4 Detecção de Ondas Viajantes	22
3.2.4.1 Processamento e Aquisição dos Sinais	22
3.2.4.2 Detecção de Ondas Viajantes Refletidas	24
3.2.5 Fontes de Erros	25

Capítulo 4 – Descrição dos Métodos Analisados	27
4.1 Método I: Método de Dois Terminais Clássico (GALE <i>et al.</i> , 1993)	27
4.2 Método II: Método de Dois Terminais com Terra Lopes (LOPES, 2016)	30
4.3 Método III: Método de Dois Terminais Lopes (LOPES <i>et al.</i> , 2017)	31
4.4 Método IV: Método de Dois Terminais Gilany (GILANY <i>et al.</i> , 2007)	33
4.5 Método V: Método de um Terminal Clássico	35
4.6 Método VI: Método de um Terminal com Terra (LIU <i>et al.</i> , 2012)	36
Capítulo 5 – Apresentação e Análise do Desempenho dos Métodos Implementados	38
5.1 Sistema Analisado	38
5.2 Casos Avalidos	39
5.3 Análise do Desempenho do filtro <i>Differentiator-Smoother</i>	40
5.4 Análise da Influência da Interpolação por Parábola	44
5.4.1 Influência da Interpolação por Parábola no filtro de Butterworth	45
5.4.2 Influência da Interpolação por Parábola no Filtro DS	47
Capítulo 6 – Conclusão e Propostas Para Trabalhos Futuros	53
Referências Bibliográficas	56

LISTA DE FIGURAS

3.1	Digrama de reflexões de uma falta no pronto F de uma LT de comprimento l (LOPES, 2014).	12
3.2	Circuito equivalente de um segmento de uma linha de transmissão com dois condutores. (SCHWEITZER III; MARX., 2014).	12
3.3	Diagrama simplificado de aquisição de dados para os algoritmos de proteção baseados em ondas viajantes (SCHWEITZER <i>et al.</i> , 2015).	22
3.4	Filtro Differentiator-Smoother: (a) Janela de dados; (b) Resposta a um degrau. (SCHWEITZER <i>et al.</i> , 2015).	23
3.5	Extração das ondas viajantes por meio do filtro <i>differentiator-smoother</i> . (LOPES <i>et al.</i> , 2016).	23
3.6	Janela de busca de ondas viajantes refletidas do ponto de falta.	25
4.1	Operação de localização de falha de OV's com base no tempo de chegada transmitido via canal de microondas.(MARIHART; HAAGENSON, 1972)	27
4.2	Operação de localização de faltas com base no tempo de chegada transmitido via canal de microondas.(SCHWEITZER III; MARX., 2014)	28
4.3	Operação de localização de falha de OV's com base no tempo de chegada transmitido via canal de microondas.(SCHWEITZER III; MARX., 2014)	29
4.4	Diagrama de espaço de tempo para uma linha monitorada em dois terminais.(LOPES, 2016)	30
4.5	Diagrama de espaço de tempo mostrando ondas viajantes incidente, refletidas e refratadas, assim como seus tempos de chegada nos terminais monitorados(LOPES <i>et al.</i> , 2017).	32

4.6	Diagrama de espaço de tempo mostrando ondas viajantes incidente, refletidas, assim como seus tempos de chegada em apenas um dos terminais monitorados (SCHWEITZER III; MARX., 2014).	35
4.7	Diagrama de espaço de tempo mostrando ondas viajantes faltas com terra que desencadeiam velocidades diferentes para o modo aéreo e modo terra, v_0 e v_1 .(LIU <i>et al.</i> , 2012)	36
5.1	Modelo do sistema analisado.	38
5.2	Comparação entre os filtros DS e de Butterworth para extração e detecção das Ondas Viajantes do Modo Aéreo.	41
5.3	Comparação entre os filtros DS e de Butterworth para extração e detecção das Ondas Viajantes do Modo Terra.	41
5.4	Comparação entre os filtros DS e de Butterworth para extração e detecção das Ondas Viajantes Refletidas no Terminal Local.	42
5.5	Comparação entre os filtros DS e de Butterworth para extração e detecção das Ondas Viajantes por Interpolação por Parábola nos Modos Aéreo e Terra.	45
5.6	Análise comparativa dos sinais interpolados:DS Interpolado e Butter Interpolado.Método I: Dois terminais Clássico.	48
5.7	Análise comparativa dos sinais interpolados:DS Interpolado e Butter Interpolado.Método II: Dois terminais com terra Lopes.	49
5.8	Análise comparativa dos sinais interpolados:DS Interpolado e Butter Interpolado.Método III: Dois terminais Lopes.	49
5.9	Análise comparativa dos sinais interpolados:DS Interpolado e Butter Interpolado.Método IV: Dois terminais Gilany.	49
5.10	Análise comparativa dos sinais interpolados:DS Interpolado e Butter Interpolado.Método V: Um terminal clássico.	50
5.11	Análise comparativa dos sinais interpolados:DS Interpolado e Butter Interpolado.Método VI: Um terminal com terra LIU	50
5.12	Análise da Influência do Filtro DS e da Interpolação por Parábola.	51

LISTA DE TABELAS

5.1	Dados da linha de transmissão de 500 kV modelada no ATP.	39
5.2	Casos de falta analisados	39
5.3	Análise comparativa com filtros DS e de Butterworth	42
5.4	Análise comparativa com filtros DS e de Butterworth	43
5.5	Análise comparativa com filtros DS e de Butterworth	43
5.6	Análise comparativa com filtros DS e de Butterworth	43
5.7	Análise comparativa com filtros DS e de Butterworth	43
5.8	Análise comparativa com filtros DS e de Butterworth	44
5.9	Análise comparativa dos sinais interpolados: Butterworth e Butterworth Interpolado	45
5.10	Análise comparativa dos sinais interpolados: Butter e Butter Interpolado	46
5.11	Análise comparativa dos sinais interpolados: Butter e Butter Interpolado	46
5.12	Análise comparativa dos sinais interpolados: Butter e Butter Interpolado	46
5.13	Análise comparativa dos sinais interpolados: Butter e Butter Interpolado	46
5.14	Análise comparativa dos sinais interpolados: Butter e Butter Interpolado	46
5.15	Análise comparativa dos sinais interpolados: DS e DS Interpolado	47
5.16	Análise comparativa dos sinais interpolados: DS e DS Interpolado	47
5.17	Análise comparativa dos sinais interpolados: DS e DS Interpolado	47
5.18	Análise comparativa dos sinais interpolados: DS e DS Interpolado	47
5.19	Análise comparativa dos sinais interpolados: DS e DS Interpolado	48

5.20 Análise comparativa dos sinais interpolados: DS e DS Interpolado	48
---	----

LISTA DE SÍMBOLOS

l	Comprimento da linha de transmissão.
f	Frequência fundamental em Hz.
Z_C	Impedância característica da linha de transmissão.
Z_S	Impedância de surto da linha de transmissão.
R	Resistência série da linha de transmissão em Ω/m .
L	Indutância série da linha de transmissão em H/m.
C	Capacitância em derivação da linha de transmissão em F/m.
G	Condutância em derivação da linha de transmissão em S/m.
Δx	Comprimento do segmento infinitesimal do modelo elétrico de uma linha de transmissão monofásica.
i	Corrente de linha no domínio do tempo.
v	Tensão de fase no domínio do tempo.
V_F	Tensão no ponto de falta.
R_S	Resistência da fonte S.
L_S	Indutância da fonte S.
R_R	Resistência da fonte R.
L_R	Indutância da fonte R.
v	Velocidade de propagação da onda.
v_S	Tensão no terminal emissor da linha no domínio do tempo.
i_S	Corrente no terminal emissor da linha no domínio do tempo.

v_R	Tensão no terminal receptor da linha no domínio do tempo.
i_R	Corrente no terminal receptor da linha no domínio do tempo.
Θ	Ângulo de incidência da falta.
v_P	Velocidade de propagação das ondas viajantes.
T_{DS}	Tamanho da janela de dados do filtro diferenciador.
V_L	Tensão no terminal L.
I_L	Corrente no terminal L.
d	Estimativa da localização da falta.
R_f	Resistência de falta.

GLOSSÁRIO

ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
LT	Linha de Transmissão
SIR	<i>Source Impedance Ratio</i>
TC	Transformador de corrente
DS	<i>Differentiator-Smoother</i>

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

Para o desenvolvimento da sociedade atual, é indispensável o fornecimento de energia elétrica, o qual deve ser suficiente para suprir todas as necessidades tecnológicas, industriais, comerciais e de bem-estar da população, o que implica no crescimento da demanda de energia (MAMEDE, 2011). Isso ocorre porque a eletricidade é um bem essencial para a civilização e uma grande parcela da demanda por esta se encontra em locais onde há maior desenvolvimento industrial. Assim, a sociedade acompanha esse crescimento, consumindo tecnologias e, conseqüentemente, requisitando ainda mais energia. Dessa maneira, os índices obtidos por concessionárias e empresas do setor elétrico são indicativos de crescimento de um país.

Atualmente, para que a energia elétrica chegue ao consumidor final, demanda-se uma sequência de processos. O primeiro destes se dá pela geração de energia elétrica, a qual pode ser obtida através de geração eólica, solar, termoelétricas, geração geotérmica, geração hidráulica, entre outros. Cada país adota suas principais formas de geração de energia dependendo de diversos fatores dentre climáticos, geográficos, econômicos, políticos e estruturais (KINDERMANN, 2005). Em seguida, tem-se a transmissão da energia produzida, que se dá através de linhas de transmissão (LT) de alta tensão até os centros consumidores finais.

Em se tratando de transmissão de energia, o Brasil, por apresentar tamanho continental e possuir recursos hidráulicos dispersos ao longo do território, possui suas principais usinas distantes dos grandes centros consumidores e, como consequência, é necessário a utilização de longas LTs, as quais, devido às grandes extensões, são mais susceptíveis à distúrbios por causas naturais, como curto-circuitos, também chamados de faltas. Nesse contexto, os sistemas elétricos de potência têm como função garantir que a energia gerada seja distribuída nos diversos pontos onde há população, com o menor número de interrupções possíveis, tendo então uma alta

confiabilidade. Nas últimas décadas, para garantir tal confiabilidade, a detecção, classificação e localização de faltas nos sistemas elétricos de potência têm sido um procedimento importante nos setores de distribuição e transmissão de energia elétrica. Com o aumento da demanda por eletricidade, complexidade e tamanho dos sistemas elétricos, sistemas automatizados capazes de detectar, classificar e localizar faltas na LT têm sido requisitados e estão em constante estudo, a fim de viabilizar a localização de faltas de forma rápida, precisa e confiável (SAHA *et al.*, 2010).

O interesse em minimizar a duração de desligamentos decorrentes de faltas em um sistema elétrico de potência vem motivando o desenvolvimento de métodos de localização de faltas. Atualmente, métodos baseados em componentes fundamentais são os mais utilizados pelas concessionárias devido ao baixo custo e à fácil implementação (SAHA *et al.*, 2010). Porém, sabe-se que essas técnicas apresentam uma lista de fontes de erros grande, as quais são relacionadas a fenômenos que provocam distorções na forma de onda da componente fundamental. Por isso, métodos baseados na teoria de ondas viajantes vêm se destacando dentre os outros existentes, sendo bastante estudados na última década, com destaque aos métodos de dois terminais, os quais apresentam um maior custo benefício dentre outras técnicas dessa categoria. Apesar disso, ainda há algumas dificuldades relacionadas a esses métodos, as quais são tratadas como desafios a serem solucionados.

Diante do exposto, é notório que a localização de faltas é um procedimento indispensável para minimizar a duração de desligamentos de LTs após a ocorrência de faltas, sendo a localização baseada na teoria das ondas viajantes uma forma eficaz para tal processo. É imprescindível, portanto, a utilização de técnicas confiáveis de filtragem dos sinais avaliados durante o processo de análise de ondas viajantes, sendo de suma importância o entendimento de diferentes técnicas de filtragem tipicamente empregadas em dispositivos de localização reais.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

O principal objetivo do trabalho consiste em avaliar diferentes abordagens para filtragem de sinais no âmbito da análise de ondas viajantes, visando identificar limitações e potencialidades de cada um. Dentre as técnicas avaliadas, considera-se o uso de filtros passa altas digitais do

tipo Butterworth e o filtro Differentiator-Smoother, considerando em ambas as aplicações o procedimento de detecção de ondas com e sem o processo de interpolação por parábolas. Para tanto, são definidos como objetivos específicos:

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre métodos de localização de faltas baseados na teoria de ondas viajantes;
- Apresentar os principais conceitos acerca da localização de faltas baseada na teoria das ondas viajantes;
- Simular diversas condições de falta em linhas de transmissão de tamanho convencional via *Alternative Transients Program* (ATP) e implementar métodos de localização de faltas baseados na teoria de ondas viajantes;
- Analisar e comparar o efeito da utilização de diferentes filtros e da interpolação por parábola em cada método.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este trabalho encontra-se organizado com a seguinte estrutura:

- No capítulo 2, é realizado um levantamento do estado da arte dos diferentes métodos de localização de faltas já estudados;
- No capítulo 3, são abordados os conceitos teóricos da localização de falta por ondas viajantes;
- No capítulo 4, é feita uma análise comparativa entre os métodos analisados, verificando vantagens e desvantagens de cada um;
- No capítulo 5, são apresentados os resultados obtidos a partir da simulação de diferentes condições de falta com o intuito de avaliar o desempenho do filtro Butterworth, do filtro DS e da interpolação por parábola;
- Por fim, no capítulo 6, são apresentadas as conclusões e propostas para futuros trabalhos que possam dar continuidade a este estudo.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 VISÃO GERAL DAS TÉCNICAS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS

A localização precisa de faltas em LTs apresenta um papel crítico para a operação do sistema elétrico, uma vez que quanto mais rápida e precisa a localização é feita, tanto em casos de faltas temporárias quanto em casos de faltas permanentes, maior a economia, segurança e confiabilidade do sistema de transmissão, minimizando a inconveniência causada aos consumidores (SAHA *et al.*, 2010). Este tipo de procedimento tem sido cada vez mais importante, visto que a necessidade e consumo por energia elétrica vem aumentando.

O estudo de localização de faltas teve início em torno dos anos 40 (SCHWEITZER, 1988). Um dos primeiros métodos de localização de faltas consiste em inspeção visual de acordo com Stevens & Stringfield. (1948), a qual pode ser feita com verificações a pé, por rondas feitas utilizando transportes como helicópteros, e até mesmo por testemunhas e consumidores que podem denunciar e avisar a concessionária sobre tal ocorrência.

Inspeções visuais tiveram melhorias, pois informações importantes podem ser obtidas através de indicadores de faltas, instalados em subestações ou até mesmo em torres de transmissão (SAHA *et al.*, 2010), como mostrado em Rorden (1957), onde um alvo que seria ativado por pólvora de uma arma comum foi instalado em torres de transmissão. Assim, à medida que a corrente da falta atravessa a LT até a terra, passando pela torre, o alvo é aquecido e indicaria a localização aproximada da falta. Essa abordagem foi de suma importância para que a equipe de inspeção visual pudesse identificar os isoladores danificados.

Técnicas não convencionais ainda evoluíram, com o uso adicional de links de rádio, o que possibilitou obter informações dos indicadores de faltas mesmo em condições climáticas difíceis, utilizando *Very Low Frequency* e *Very High Frequency* para monitorar transitórios de radiação induzida de faltas de arco no sistema de transmissão de energia e foi testada experimentalmente

por Vaughan (1999).

Em Holbeck (1999), dispositivos eletromecânicos foram implementados para tentar deixar o sistema de localização de faltas mais confiável, onde um amperímetro anunciador media a corrente de falta, e uma localização da falta aproximada era calculada baseada nos parâmetros da linha, com um erro estimado na faixa de 20 % do comprimento da linha.

Já em Dupuis & Jacobs (1946) com a utilização de osciloscópios automáticos, foi possível ter uma melhora sobre os amperímetros anunciadores, pois começou-se a utilizar sinais de corrente e de tensão, fornecendo precisão em torno de 10 % do comprimento da linha.

Em 1935 Allen & Cross (1935) apresentaram um método de ressonância para localização de faltas utilizando altas frequências, onde uma série de frequências eram aplicadas para medição da resposta em frequência da linha com falta. A localização da falta era deduzida pelo gráfico de resposta em frequência, apresentando uma precisão de 2 % a 5 %. Uma outra abordagem, feita por Zimmerman & Costello (2006), utilizou-se de pulsos de radar, onde pequenos pulsos de 1 μ s, 10 kV, eram enviados para a linha onde tivesse ocorrido a falta após o disjuntor desarmar. Na sequência, media-se o tempo em que este pulso demoraria para chegar vindo da falta, sendo este tempo convertido para distância física com uma precisão esperada de 1 % do comprimento da linha.

Com o advento da tecnologia digital, métodos de localização com uma melhor implementação foram desenvolvidos, como por exemplo métodos de localização de faltas baseados na impedância do sistema de transmissão (SAHA *et al.*, 2010). Técnicas de localização de faltas que utilizam a frequência fundamental, também conhecidas como métodos de localização baseados na impedância, extraem a frequência fundamental dos sinais de tensão e corrente para calcular a distância da ocorrência da falta. Estes métodos melhoraram drasticamente a precisão comparados com os métodos mais antigos (SCHWEITZER III; MARX., 2014) e são amplamente usados em relés de proteção modernos por conta da fácil implementação, sendo classificados tipicamente como um terminal ou dois terminais, dependendo de quantos terminais de corrente e tensão são requeridos (ZIMMERMAN; COSTELLO., 2006).

Em 1979, Sant & Paithankar (1979) , introduziram o método de um terminal baseado em reatância. O método emprega um dispositivo eletrônico inteligente em uma das extremidades da linha para calcular a reatância entre o dispositivo e a localização da falta. O método proposto

não depende de canal de comunicação, facilitando a implementação, porém não foi considerado o efeito da resistência das faltas.

Takagi *et al.* (1982) calcularam a reatância da linha com falta capturando estes dados de tensão e corrente em uma extremidade da LT. O efeito do fluxo de carga foi eliminado, subtraindo a corrente de carga de pré-falta da corrente de falta adquirida. A resistência de falta também foi removida assumindo que os ângulos de fase da corrente de falta total e da corrente de falta lida no terminal são iguais. No entanto o método é limitado à homogeneidade do sistema, considerando a impedância de falta puramente resistiva.

No ano de 1985, Eriksson *et al.* (1985) propuseram uma solução visando superar problemas decorrentes da resistência de falta. Em resumo, a resistência de falta é tratada como variável a ser calculada em conjunto com a distância do curto-circuito. No entanto, o efeito da resistência de falta permanece relevante em casos de sistema não homogêneos, podendo comprometer as estimativas calculadas. Em 1998, Novosel D. Hart & Myllymaki. (1998) modificou o algoritmo de Eriksson *et al.* (1985), para ser aplicado em linhas curtas e radiais de transmissão.

Algoritmos baseados em impedância de dois terminais vieram com o propósito de superar as limitações apresentadas pelos métodos de um terminal (SAHA *et al.*, 2010). Em 1988, Sachdev & Agarwal. (1988) calcularam a localização de falta utilizando dados de falta não-sincronizados provenientes de dois terminais. Neste contexto, sabe-se que a falta de sincronismo pode decorrer de um possível mal funcionamento do GPS, desajuste entre os instantes de amostragem dos dispositivos localizados em ambos os terminais, e até mesmo variações da latência dos canais de comunicação usados na transmissão de dados entre os terminais da LT. Outros métodos de dois terminais também são citados em GOPALAKRISHNAN *et al.* (2000); BRAHMA & GIRGIS (2004); WANG *et al.* (2008).

Os métodos baseados em componentes fundamentais estão sujeitos a erros uma vez que encontram limitações na precisão, como a não homogeneidade da linha de transmissão, imprecisão ao adquirir dados de impedância, acoplamento mútuo, compensação em série e dados limitados de tensão e corrente entre a falta e o relé em operação (SCHWEITZER, 1988). Mesmo com certa precisão, esses métodos resultam em erros da ordem 2 % do comprimento das LTs monitoradas, de modo que, para uma linha de 300 km, uma zona de 6 km para ser patrulhada pelos métodos não convencionais, cerca de vinte torres de transmissão (SCHWEITZER, 1988).

2.2 LOCALIZAÇÃO DE FALTAS BASEADA NA TEORIA DE ONDAS VIAJANTES

A formalização dos estudos da teoria das ondas viajantes ocorreu no início na década de 1930 com o BEWLEY (1931), onde a fundamentação teórica da propagação de ondas viajantes em linhas foi detalhada apresentando para a academia o diagrama de Bewley Lattice. Tal diagrama foi de suma importância pois serviu de base para o desenvolvimento dos algoritmos de localização de faltas baseados em ondas viajantes. Além disso, serviu de motivação para estudos posteriores como o de Stevens & Stringfield. (1948), com a Bonneville Power Administration (BPA) sendo uma das pioneiras em localização de faltas por ondas viajantes, com suas primeiras implementações nos anos 40. Inicialmente, localização por ondas viajantes requeriam poucas tecnologias que eram relativamente fáceis de serem implementadas, como filtros simples, amplificadores, habilidades para medição, medição do tempo com precisão em microssegundos e comunicação de latência constante (SCHWEITZER III; MARX., 2014).

Em 1957, T.W. Marihat D.J. (1957) e depois em 1993 GALE *et al.* (1993) classificaram os métodos baseados nas ondas viajantes em quatro diferentes tipos, a saber tipos A, B, C, D, diferenciados de acordo com seu modo de operação, número de terminais monitorados, uso ou não de ondas viajantes refletidas no ponto de falta, uso de transitórios do sistema ou pelo uso de pulsos elétricos. Ainda por GALE *et al.* (1993) foi verificado que os métodos que utilizam apenas um terminal tem maior probabilidade de erros, uma vez que estes dependem da detecção de ondas refletidas no ponto de falta, enquanto os métodos de dois terminais baseados em ondas viajantes incidentes são mais simples, com menor predisposição a erros, visto que dependem apenas da detecção do instante de chegada das primeiras ondas em cada um dos terminais monitorados. Porém, como ponto negativo, estes métodos dependem da sincronização dos dados dos terminais avaliados e tipicamente requerem o conhecimento dos parâmetros da LT.

Devido ao estabelecimento dos métodos de localização baseado nas ondas viajantes ainda na década de 1990, vários autores começaram a elaborar algoritmos, a fim de tentar minimizar as fontes de erros. Em LEE & MOUSA *et al.* (1996) utilizam o método de localização baseado em ondas viajantes de dois terminais adicionando um sistema de sincronização de dados baseado em GPS. Um sistema de 500 kV foi utilizado nos seus estudos e, segundo os autores, o algoritmo apresentou boa precisão de localização de falta na maioria dos casos.

Em 1998, JIAN *et al.* (1998) propõem um novo equacionamento para o método de dois terminais, onde utilizaram a Transformada Wavelet Contínua a uma taxa de amostragem dos dois terminais da linha de 1 MHz. Já nesse método, a precisão das estimativas do ponto de falta calculadas por meio da teoria das ondas viajantes demonstrou ser vantajosa.

Em 2007, Gilany *et al.* (2007), apresentaram um método de localização baseado em ondas viajantes de dois terminais com a utilização de OV refletidas para a eliminação da velocidade de propagação, mostrando por resultados que o algoritmo independe do tipo de falta, resistência de falta, ângulo de incidência da falta e configurações do sistema. Porém, neste método, a sincronização de dados ainda era necessária. No ano seguinte, em 2008, FENG *et al.* (2008), propuseram um método baseado em ondas viajantes de três terminais o qual eliminaria a velocidade de propagação da onda do equacionamento, assim, eliminaria a dependência dos parâmetros da linha, porém necessitaria de informações do comprimento da linha assim como sincronização de dados de não apenas dois, mas de três terminais.

Com o avançar da tecnologia e interesse de implementação dos métodos baseados em ondas viajantes, aplicações do método de dois terminais em tempo real também foram analisadas como descrito por COSTA & SOUZA (2011), onde apresentou o método baseado na Transformada Wavelet Redundante. No referido trabalho, os coeficientes wavelet foram computados usando ambas Transformada Wavelet Discreta (TWD) e Transformada Wavelet Discreta Redundante (TWDR), demonstrando que o segundo método resulta em uma detecção de faltas mais rápida e mais precisa.

Durante o ano de 2012, Liu *et al.* (2012) propuseram um novo método de localização de faltas baseado em ondas viajantes fundamentado na diferença de tempo de propagação entre os modos aéreo e terra adquiridos por vários pontos de medição ao longo da linha de transmissão, eliminando a necessidade de detectar ondas viajantes refletidas, contudo, requiere-se informações dos parâmetros da linha para estimar as velocidades tanto do modo aéreo quanto do modo terra.

Lopes *et al.* (2013) apresentaram em 2013 um novo método de detecção de falta baseado em ondas viajantes onde utilizou da transformada de Park para tal feito, onde resultou em uma técnica de detecção transitória que é auto adaptável às características do sistema monitorado e simples de ser implementada.

Em 2015, Lopes *et al.* (2015) propuseram um inovador método de dois terminais o qual

depende apenas da diferença do tempo de propagação da primeira onda incidente e de sua sucessiva reflexão em ambos terminais de medição, eliminando a dependência de sincronização de dados para método de dois terminais, tal como o uso de GPS, mas os conhecimentos dos parâmetros da linha ainda são requeridos.

Método de localização de um terminal baseado em ondas viajantes que não requer o conhecimento dos parâmetros da linha e de sincronização de dados foi apresentado por Schweitzer *et al.* (2016), mas apesar dessas vantagens, ele utiliza da diferença de tempo da propagação da primeira onda viajante incidente, da segunda e terceira sucessivas reflexões, o que torna a detecção dessas ondas refletidas muito difícil, uma vez que estas reflexões podem estar atenuadas o suficiente para não existirem, o que torna a implementação e viabilização desse método muito difícil.

Também no ano de 2016, Lopes (2016) apresentou outro método de dois terminais baseado em ondas viajantes, porém, não é necessária a sincronização de dados assim como os parâmetros da linha para obtenção de velocidades de propagação das ondas viajantes. Neste método, sinais adquiridos são desacoplados em modos aéreos e terra e a onda viajante de cada modo é detectada nos terminais da linha, sendo então um método mais vantajoso comparado com os métodos de dois terminais. Porém, o algoritmo está limitado a faltas com conexão para o terra.

Por fim, no ano de 2018, Lopes *et al.* (2018), apresentaram mais um método de dois terminais baseado em ondas viajantes, o qual não necessita de parâmetros da linha de transmissão e nem sincronização de dados. Contudo, o método depende da diferença do tempo de propagação de ondas viajantes refletidas do ponto de falta nos dois terminais, o que pode ser uma tarefa difícil de realizar a depender da metodologia empregada..

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, apresenta-se uma caracterização da transmissão de energia por meio de linhas de transmissão, assim como seus tipos de faltas. Em resumo, são mostrados os principais aspectos de uma linha, o comportamento desse sistema diante de casos de falta e, por fim, uma breve abordagem sobre possíveis aplicações voltadas para a localização de faltas baseado em ondas viajantes dessas linhas.

3.1 FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

A definição de curtos-circuitos, popularmente conhecidos como faltas, é usada para caracterizar uma interrupção das condições normais de operação da linha de transmissão. Isso ocorre quando há um contato entre dois condutores sob potenciais diferentes, podendo este ser direto ou indireto através de um arco voltaico (ALMEIDA; DAMASCENO, 1995). Em meio a várias possibilidades de distúrbios que podem ocorrer em um sistema elétrico, as faltas são um dos tipos mais preocupantes, visto que alteram de maneira significativa as grandezas elétricas do sistema monitorado, ocasionando desligamentos não-programados dos sistemas (SAHA *et al.*, 2010).

Os tipos de curtos-circuitos em sistema de transmissão, podem ser classificados dependendo do número de fases envolvidas na falta (GLOVER *et al.*, 2011):

- Curto-circuito monofásico, ou curto para a terra (fase-terra, FT);
- Curto-circuito bifásico, sem contato de terra (fase-fase, FF);
- Curto-circuito bifásico, com contato de terra (fase-fase-terra, FFT);
- Curto-circuito trifásico, ou simétrico (fase-fase-fase, FFF).

Devido à ocorrência de faltas, há mudanças no comportamento das grandezas elétricas do sistema durante e após os curtos-circuitos, que geram transitórios nos sinais de tensão e corrente

(SAHA *et al.*, 2010).

Sendo assim, analisando os transitórios provenientes da falta e do processo de seu isolamento, é possível estimar o local de ocorrência desta. Do mesmo modo, analisando as variações de tensões e correntes no período da falta, podem ser extraídas informações sobre o local de incidência, o tipo e a resistência de falta. (SAHA *et al.*, 2010).

Deste modo, compreende-se que o estudo e análise dessas variações de sinais, é a base dos métodos de localização de faltas, os quais são classificados em diferentes grupos de acordo com o modo de operação.

3.2 TEORIA DA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS POR ONDAS VIAJANTES

Visto que as faltas no sistema elétrico de potência podem causar interrupção do fornecimento de energia gerando custos adicionais à operadora, o desenvolvimento de técnicas de localização de faltas com o objetivo de aumentar a confiabilidade e agilidade na localização de faltas em linhas de transmissão tem crescido bastante. Como consequência disso, entende-se que a compreensão da teoria de localização de faltas e de ondas viajantes é de suma importância. Nesse contexto, fundamentos básicos são descritos a seguir.

3.2.1 Teoria Sobre Ondas Viajantes

A ocorrência de qualquer distúrbio em uma linha de transmissão de energia elétrica, provocados por diferentes fenômenos eletromagnéticos como, por exemplo, descargas atmosféricas, faz com que ocorram mudanças bruscas nas condições dos circuitos elétricos que compõem o sistema de transmissão, o que dá origem à indução de ondas viajantes.

Quando uma falta ocorre ao longo de uma linha de transmissão, transitórios de tensão e corrente vão se propagar em direção aos terminais da linha a uma velocidade próxima à velocidade da luz (300000 km/s), os quais são referenciados como ondas viajantes (BEWLEY, 1931). Esses transitórios vão continuar a refletir para frente e para trás, resultando nas chamadas ondas progressivas e regressivas, entre o ponto de falta e os dois terminais da linha, até que seja atingida a estabilidade dos sinais pós-falta acompanhada da completa atenuação dos

transitórios de alta frequências (SAHA *et al.*, 2010).

Para um melhor entendimento, o também conhecido como diagrama de lattice (BEWLEY, 1931), é apresentado na Figura 3.1. O diagrama apresenta as reflexões das ondas progressivas e regressivas referentes a uma falta ocorrida no ponto F de uma LT de comprimento l , localizada a uma distância d da Barra 1.

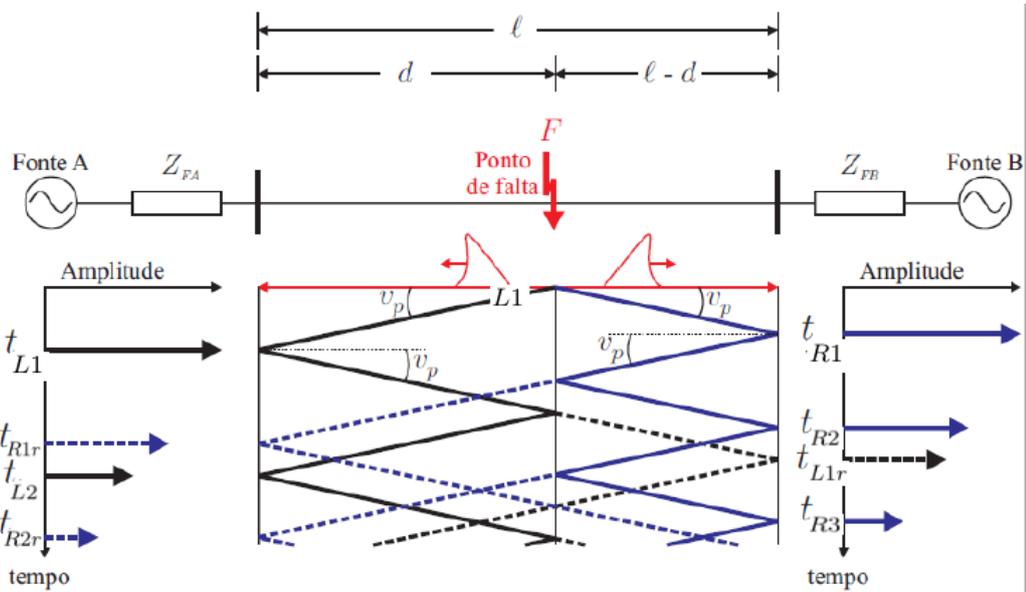


Figura 3.1. Digrama de reflexões de uma falta no ponto F de uma LT de comprimento l (LOPES, 2014).

Na figura, também são ilustrados os tempos de chegada das ondas incidentes (t_{L1} e t_{R1}), refletidas (t_{L2}, t_{R2} e t_{R3}) e refratadas no ponto de falta (t_{R1r}, t_{R2r} e t_{L1r}) às barras 1 e 2.

A seguir é mostrado o circuito equivalente incremental de uma linha de transmissão com dois condutores. O circuito inclui a resistência R , indutância L , condutância G e a capacitância C da linha por unidade do comprimento total da linha.

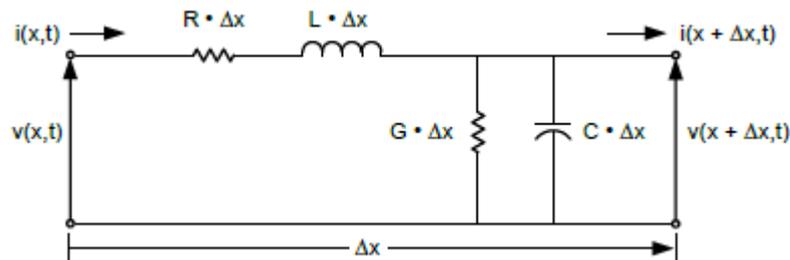


Figura 3.2. Circuito equivalente de um segmento de uma linha de transmissão com dois condutores. (SCHWEITZER III; MARX., 2014).

Utilizam-se as leis de Kirchhoff tanto de tensão (3.1), quanto de corrente (3.2), desconsiderando as perdas, para relacionar as tensões e correntes nas localizações x e $x + \Delta x$:

$$v(x, t) = R \cdot \Delta x \cdot i(x, t) + L \cdot \Delta x \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} + v(x + \Delta x, t), \quad (3.1)$$

$$i(x, t) = G \cdot \Delta x \cdot v(x + \Delta x, t) + C \cdot \Delta x \frac{\partial v(x + \Delta x, t)}{\partial t} + i(x + \Delta x, t). \quad (3.2)$$

As representações dos sinais de tensão e corrente como função da onda x e do tempo t em um trecho de linha infinitesimal com comprimento Δx , no domínio do tempo, à medida que Δx se aproxima de zero, obedecem às seguintes equações diferenciais parciais:

$$\frac{\partial v(x, t)}{\partial x} = -L \frac{\partial i(x, t)}{\partial t}, \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial i(x, t)}{\partial x} = -C \frac{\partial v(x, t)}{\partial t}. \quad (3.4)$$

O sinal negativo indica que as amplitudes diminuem à medida que x aumenta. O objetivo é obter duas equações separadas que envolvem apenas o sinal de corrente e apenas o sinal de tensão. Sendo assim, podemos obter os sinais separados derivando (3.3) e (3.4) em relação a x para obter (3.5) e (3.6).

$$\frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial t^2}, \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial^2 i(x, t)}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 i(x, t)}{\partial t^2}. \quad (3.6)$$

As soluções gerais para essas equações diferenciais parciais de segunda ordem, no domínio do tempo, incluindo ondas progressivas e regressivas são dadas por:

$$v(x, t) = F(x - u \cdot t) + f(x + u \cdot t) \quad (3.7)$$

$$i(x, t) = \frac{1}{Z_s} [F(x - u \cdot t) - f(x + u \cdot t)], \quad (3.8)$$

onde $|F(x - u \cdot t)|$ representa ondas incidentes progressivas, e $|f(x + u \cdot t)|$, as regressivas.

Quando olhamos a tensão e a corrente de um determinado ponto na LT, podemos calcular a relação entre elas para ondas incidentes e refletidas, respectivamente. Essas equações dependem dos parâmetros da linha e definem a impedância característica da linha e a velocidade de propagação da onda, como mostrado em (3.9) e (3.10) respectivamente.

$$Z_s = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (3.9)$$

$$u = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3.10)$$

Onde (3.10) é aproximadamente igual à velocidade da luz, como dito anteriormente.

As medições de ondas viajantes são uma superposição das ondas incidentes e refletidas, como explicado acima. É possível fazer a separação destas em função da tensão e da corrente do terminal medido em v e i . As equações (3.11) e (3.12) representam v e i em termos de suas correspondentes ondas incidentes e refletidas.

$$v = v_I + v_R \quad (3.11)$$

$$i = i_I + i_R \quad (3.12)$$

Assim, em (3.13) é expressado i em termos de v_I e v_R , e em (3.14) solucionamos (3.13) para v_R

$$i = \frac{v_I}{Z_s} - \frac{v_R}{Z_s} \quad (3.13)$$

$$v_R = v_I - iZ_s \quad (3.14)$$

Substituímos v_R da equação (3.14) na equação (3.11) e resolvemos para v_I , obtendo então (3.15), a qual expressa a tensão da onda incidente no terminal da linha como função da tensão e corrente medidas no terminal.

$$v_I = \frac{v + iZ_s}{2} \quad (3.15)$$

De modo similar, obtemos a equação (3.16), que expressa a tensão da onda refletida no terminal da linha como função da tensão e corrente.

$$v_R = \frac{v - iZ_s}{2}. \quad (3.16)$$

O mesmo equacionamento se aplica para separação dos sinais de corrente (SCHWEITZER III; MARX., 2014).

3.2.2 Classificação dos Métodos Baseados na Teoria de Ondas Viajantes

Nos anos de 1950, localizadores de faltas em linhas de transmissão aéreas foram classificadas em quatro tipos, tipos: A, B, C, e D de acordo com seus respectivos modos de operação, cada tipo sendo associado a uma implementação ou metodologia particular (Stringfield et al,1950), e depois foi feita uma classificação por GALE *et al.* (1993) em 1993.

Como diferença básica, os localizadores de faltas do tipo A e D não incluíam geradores de pulso e os do tipo B e C necessitavam de um gerador de pulsos para localização das faltas, sendo assim:

- Localizador de falta tipo A: estima o instante de tempo de viagem dos transitórios gerados pela falta entre o ponto de falta e um terminal local;
- Localizador de falta tipo B: utilizam dados provenientes de ambos os terminais da linha de transmissão. Há três variações deste tipo de localizador e todos detectam a chegada do transitório em seus terminais. Quando a onda viajante atinge o terminal mais próximo, um contador eletrônico é ativado, e só é parado por um sinal enviado do terminal remoto quando a onda viajante o atingir;

Tipo B1: utiliza pulso de rádio enviado por um canal de micro-ondas para envio de um sinal de sincronização para os detectores.

Tipo B2: para transmissão do sinal de sincronização para os detectores utiliza o sistema de transmissão *carrier* da linha.

Tipo B3: utiliza um pulso de corrente contínua sobre a linha para envio do sinal de sincronização.

- Localizador de falta tipo C: Opera com dados de apenas um terminal, estimando o tempo de viagem até o ponto de falta através de um pulso aplicado na linha utilizando um radar;
- Localizador de falta tipo D: Esse método opera com sincronização de dados, utilizando dados de ambos os terminais e estima o tempo de chegada da primeira onda viajante incidente;

As impedâncias efetivas no terminal da linha são assumidas como inferiores à impedância de falta, de modo que produzam reflexões significativas que, em seguida, retornam ao longo da linha defeituosa até o ponto de falha. Se o arco de falha ainda existe, e também apresenta uma resistência efetiva menor do que a impedância de surto da linha, as ondas que chegam à falha serão quase totalmente refletidas de volta para os terminais da linha. Assim, se os transientes que aparecem em cada extremidade da linha são capturados, eles podem ser analisados para determinar a posição de falha (SAHA *et al.*, 2010).

Adotando localizadores de falta do Tipo-D, em que a diferença nos tempos de primeira chegada das duas ondas geradas por falha em ambos os terminais de linha é determinada, evitamos problemas associados ao comportamento do arco de falha. Além disso, as reflexões de outras discontinuidades entre os dois terminais de linha, tais como ramos, cargas em tap, seções de cabos e até mesmo subestações intermediárias, tornam-se irrelevantes (SAHA *et al.*, 2010).

O tipo D exige um método preciso de sincronização do tempo e um meio fácil de levar as medidas dos dois terminais para um ponto comum para que a posição da falta possa ser determinada. Usando pequenas antenas não direcionais, o GPS agora fornece sincronização de tempo com precisão da ordem de $1 \mu s$ em toda a superfície da Terra, 24 h por dia, o que equivale a uma precisão de localização da falta de $\pm 152,4 m$, independentemente do comprimento da linha. Calcular um resultado de Tipo-D requer comunicação com as unidades de aquisição de dados em duas ou mais subestações, e a não obrigatoriedade de se fazer por meio *on-line* permite o uso de qualquer canal de comunicação.(SAHA *et al.*, 2010).

Um novo tipo método é descrito por Saha *et al.* (2010). O tipo E é um modo de extremidade única que usa os transientes criados quando uma linha é reenergizada após o fechamento de

um disjuntor. O método é equivalente ao método atual de impulso de localização de falha amplamente utilizado em cabos subterrâneos. O tipo E pode ser usado para localizar faltas permanentes, incluindo condutores de circuito aberto, onde pouca ou nenhuma corrente de falha está fluindo e, adicionalmente, pode ser usada para medir o comprimento elétrico de linhas em funcionamento.

3.2.3 Análise Modal

Na análise de linhas de transmissão e estudos de transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência, a linha pode ser representada no domínio das fases ou no domínio modal. Componentes simétricas são o tipo de transformação mais comum usada na análise de sistemas de potência, em particular na análise de faltas (GLOVER *et al.*, 2011).

A transformação modal decompõe os sinais no domínio do tempo em componentes desacoplados, permitindo que o sistema de transmissão trifásico seja tratado como um sistema com três circuitos monofásicos independentes desacoplados. Os valores de fase são transformados em três modos desacoplados: um modo terra (modo 0) e dois modos aéreos (modo *alfa* e modo *beta*). O modo zero apresenta impedância característica e velocidade de propagação distinta em relação aos modos aéreos, visto que, uma vez que a impedância característica deste modo é maior do que no modo aéreo, a velocidade de propagação da onda nesse modo é menor do que no modo aéreo (LIU *et al.*, 2012).

No domínio modal, uma linha trifásica pode ser separada em seus 3 modos de propagação e cada um destes modos tem comportamento de uma única linha monofásica. Sendo assim, no domínio modal, uma linha trifásica pode ser representada por três linhas monofásicas, sendo que cada uma destas linhas é independente das demais.

3.2.3.1 Transformada de Clarke

Transformada de Clarke (CLARKE, 1950), também chamada de transformada alfa-beta, é definida pela matriz de transformação (3.17) abaixo:

$$T = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{bmatrix}. \quad (3.17)$$

Os sinais de tensão e corrente trifásicos provenientes dos terminais da linha de transmissão são transformados em seus componentes modais através do uso da matriz de transformação de Clarke T .

$$\begin{bmatrix} \widehat{V}_0 \\ \widehat{V}_\alpha \\ \widehat{V}_\beta \end{bmatrix} = T \cdot \begin{bmatrix} \widehat{V}_a \\ \widehat{V}_b \\ \widehat{V}_c \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

$$\begin{bmatrix} \widehat{V}_0 \\ \widehat{V}_\alpha \\ \widehat{V}_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{3} & -\frac{\sqrt{3}}{3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \widehat{V}_a \\ \widehat{V}_b \\ \widehat{V}_c \end{bmatrix}. \quad (3.19)$$

Nas equações acima, temos que:

- \widehat{V}_0 : Tensão modal de modo terra da linha;
- \widehat{V}_α : Tensão modal de modo α da linha;
- \widehat{V}_β : Tensão modal de modo β da linha;
- \widehat{V}_a : Tensão elétrica da fase A da linha;
- \widehat{V}_b : Tensão elétrica da fase B da linha;
- \widehat{V}_c : Tensão elétrica da fase C da linha;

As equações para a transformada de Clarke são obtidas a partir das componentes simétricas. Desenvolvendo as equações a partir do teorema fundamental de componentes simétricas mostrado na equação (3.19) (GLOVER *et al.*, 2011).

$$\begin{bmatrix} \widehat{V}_a \\ \widehat{V}_b \\ \widehat{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \widehat{V}_0 \\ \widehat{V}_1 \\ \widehat{V}_2 \end{bmatrix}. \quad (3.20)$$

Desenvolvendo a equação (3.20), obtem-se as seguintes equações:

$$\widehat{V}_a = \widehat{V}_0 + \widehat{V}_1 + \widehat{V}_2, \quad (3.21)$$

$$\widehat{V}_b = \widehat{V}_0 + \alpha^2 \widehat{V}_1 + \alpha \widehat{V}_2, \quad (3.22)$$

$$\widehat{V}_c = \widehat{V}_0 + \alpha \widehat{V}_1 + \alpha^2 \widehat{V}_2, \quad (3.23)$$

onde:

- \widehat{V}_0 : Tensão de sequência zero;
- \widehat{V}_1 : Tensão de sequência positiva;
- \widehat{V}_2 : Tensão de sequência negativa;
- α : $1 \angle 120^\circ$.

Substituindo-se os valores de α^2 e α na forma binomial e fatorando a parte real e imaginária das equações (3.21),(3.22) e (3.23), obtem-se a equação matricial mostrada na equação 3.24.

$$\begin{bmatrix} \widehat{V}_a \\ \widehat{V}_b \\ \widehat{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_0 \\ \widehat{V}_1 + \widehat{V}_2 \\ (\widehat{V}_1 - \widehat{V}_2) j \end{bmatrix}, \quad (3.24)$$

manipulando (3.24), temos:

$$\widehat{V}_1 + \widehat{V}_2 = \widehat{V}_\alpha \quad (3.25)$$

$$(\widehat{V}_1 - \widehat{V}_2) j = \widehat{V}_\beta, \quad (3.26)$$

resultando:

$$\begin{bmatrix} \widehat{V}_a \\ \widehat{V}_b \\ \widehat{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \widehat{V}_0 \\ \widehat{V}_\alpha \\ \widehat{V}_\beta \end{bmatrix}, \quad (3.27)$$

$$T_C = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}. \quad (3.28)$$

As sequências V_0 , V_α e V_β representam as componentes de *Clarke*. Para demonstrar sua unicidade é suficiente verificar que a matriz de transformação T_C é não singular, ou seja, a matriz tem determinante diferente de zero que vale $3\frac{\sqrt{3}}{2}$. Logo a matriz T_C admite inversa:

$$T_C^{-1} = T = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{bmatrix}. \quad (3.29)$$

Esta transformação também é aplicada para o sinal de correntes, onde temos:

$$\begin{bmatrix} \widehat{I}_0 \\ \widehat{I}_\alpha \\ \widehat{I}_\beta \end{bmatrix} = T \cdot \begin{bmatrix} \widehat{I}_a \\ \widehat{I}_b \\ \widehat{I}_c \end{bmatrix}. \quad (3.30)$$

$$\begin{bmatrix} \widehat{I}_0 \\ \widehat{I}_\alpha \\ \widehat{I}_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \widehat{I}_a \\ \widehat{I}_b \\ \widehat{I}_c \end{bmatrix}. \quad (3.31)$$

Nas equações (3.30) e (3.31), temos que:

- \widehat{I}_0 : Corrente modal de modo terra da linha;
- \widehat{I}_α : Corrente modal de modo α da linha;
- \widehat{I}_β : Corrente modal de modo β da linha;
- \widehat{I}_a : Corrente elétrica da fase A da linha;
- \widehat{I}_b : Corrente elétrica da fase B da linha;
- \widehat{I}_c : Corrente elétrica da fase C da linha;

Velocidade de propagação do modo terra (u_0) e do modo α , ou do modo aéreo (u_1) são dadas respectivamente por:

$$u_0 = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}}, \quad (3.32)$$

$$u_1 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}. \quad (3.33)$$

Nas equações (3.32) e (3.33), temos que:

- L_0 : Indutância de sequência zero da linha de transmissão por unidade de comprimento;
- C_0 : Capacitância de sequência zero da linha de transmissão por unidade de comprimento;
- L_1 : Indutância de sequência positiva da linha de transmissão por unidade de comprimento;
- C_1 : Capacitância de sequência positiva da linha de transmissão por unidade de comprimento;

Os três modos são referidos como 0, α e β . Se as correntes iguais fluem para baixo nos condutores A, B e C e retornem à terra, então apenas o modo 0, mostrado na linha superior de matriz, está excitado. Se toda a corrente flui para a Fase A e metade retorna em B e C, então

apenas o modo α está excitado, mostrado na linha intermediária da matriz. Se toda a corrente flui B e retorna em C, somente o modo β está excitado.

Os componentes Clarke calculados com referência à Fase A funcionam bem para falhas AG e BC, mas não funcionarão otimamente para outros tipos de faltas (SCHWEITZER III; MARX., 2014) (SCHWEITZER, 2014).

Para cobrir todos os tipos de faltas, podemos usar três conjuntos de componentes Clarke com referência à Fase A, Fase B e Fase C da seguinte maneira:

$$\begin{bmatrix} \widehat{I}_\alpha^A \\ \widehat{I}_\beta^A \\ \widehat{I}_0^A \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \widehat{I}_a \\ \widehat{I}_b \\ \widehat{I}_c \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

$$\begin{bmatrix} \widehat{I}_\alpha^B \\ \widehat{I}_\beta^B \\ \widehat{I}_0^B \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} -1 & 2 & -1 \\ -\sqrt{3} & 0 & -\sqrt{3} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \widehat{I}_a \\ \widehat{I}_b \\ \widehat{I}_c \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

$$\begin{bmatrix} \widehat{I}_\alpha^C \\ \widehat{I}_\beta^C \\ \widehat{I}_0^C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} -1 & -1 & 2 \\ -\sqrt{3} & -\sqrt{3} & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \widehat{I}_a \\ \widehat{I}_b \\ \widehat{I}_c \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

Devido à necessidade de utilizar os três conjuntos de componentes, a transformada de *Clarke* não é a mais ideal para análise de sinais no domínio de frequência, onde a análise por componentes simétricas é preferível. Já a utilização de componentes simétricas para análise das ondas viajantes não é a mais adequada, indicando-se a utilização da transformada de Clarke, apesar da necessidade de três conjuntos de cálculos. Os componentes α são ideais para análise de ondas viajantes provindas de faltas linha-terra, já os componentes β para a análise de faltas linha-linha.

As impedâncias características, atenuação e dispersão são, em geral, diferentes para os modos aéreos e terra. Nesse contexto, a velocidade de propagação, a dispersão e a atenuação são critérios fundamentais para entender e escolher adequadamente as soluções existentes baseadas em ondas viajantes. (CLARKE, 1996)

3.2.4 Detecção de Ondas Viajantes

Como apresentado anteriormente, faltas na LT geram transitórios de tensões e correntes de banda larga que cobrem toda faixa de frequência. Esses diferentes componentes de frequência percorrem a linha até encontrar alguma descontinuidade, como o ponto de falta ou barramentos. Nesse ponto, tanto reflexão das ondas quanto refração ocorrem, e no domínio do tempo, esses sinais podem alcançar inúmeras descontinuidades e são refletidos de volta para o ponto de falta.

Sabendo disso, os métodos baseados na teoria de ondas viajantes utilizam da detecção de tais transitórios para a implementação dos algoritmos. Dentre as técnicas existentes, as mais usuais são as baseadas no filtro *Differentiator Smoother* (filtro DS), Transformada de Park, e na Transformada Discreta Wavelet e filtros digitais Butterworth. Neste trabalho, são avaliados os filtros DS e os filtros digitais passa-altas butterworth quando aplicados em diferentes técnicas de localização de faltas.

3.2.4.1 Processamento e Aquisição dos Sinais

A aquisição dos sinais de um relé real com proteção e localização de faltas baseada em ondas viajantes é representada pelo diagrama simplificado da Figura 3.3.

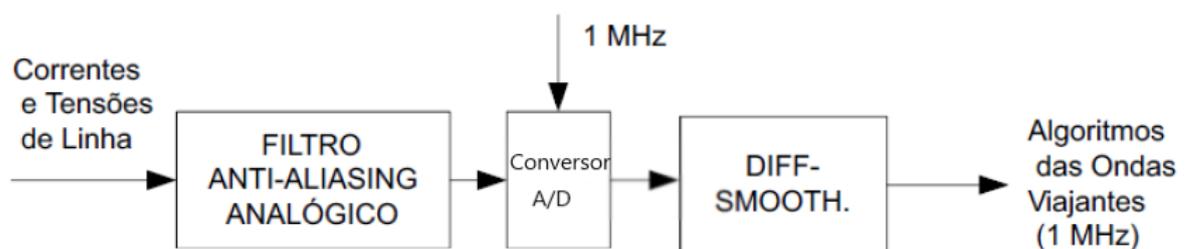


Figura 3.3. Diagrama simplificado de aquisição de dados para os algoritmos de proteção baseados em ondas viajantes (SCHWEITZER *et al.*, 2015).

Todas as aplicações baseadas na teoria das ondas viajantes requerem o uso de altas taxas de amostragem para fins de representar corretamente as altas frequências dos sinais monitorados (ANDERSON, 1999). Sendo assim, a amostragem das correntes e tensões da linha é efetuada a uma taxa de 1 MHz, que é uma taxa apropriada para a localização de falta e proteção baseadas em ondas viajantes. As amostras são alinhadas com uma entrada de tempo absoluto do relé para uso na análise do defeito e localização da falta. Aplica-se um filtro analógico passa-baixa

para evitar o efeito de *aliasing* do sinal e é utilizado o filtro DS para extrair as ondas viajantes das correntes. Além desses, é utilizado também um conversor analógico-digital (*ADC*) que gera uma representação digital a partir dos sinais de corrente analisados (SCHWEITZER *et al.*, 2015).

Na Figura 3.4a. está representada a janela de dados de tamanho T_{DS} do filtro DS e na Figura 3.4b. está ilustrada sua operação no que se refere à resposta a um degrau (forma de onda típica decorrente da incidência de ondas viajantes nos terminais monitorados).

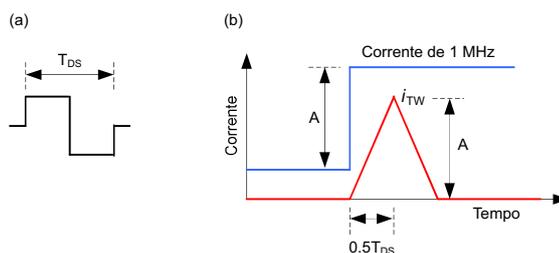


Figura 3.4. Filtro Differentiator-Smoother: (a) Janela de dados; (b) Resposta a um degrau. (SCHWEITZER *et al.*, 2015).

A corrente é quase constante quando considerada ao longo de um período de algumas dezenas de microssegundos. O filtro DS responde a uma mudança na forma de degrau ideal com uma saída em forma de triângulo, enquanto que para uma transição de rampa entre dois níveis a resposta é uma saída em forma de parábola (SCHWEITZER *et al.*, 2014). Referencia-se o tempo associado ao pico da saída como o tempo de chegada da onda viajante, incluindo um atraso constante na detecção do pico de metade do comprimento da janela do diferenciador. O ganho do filtro *differentiator-smoother* é selecionado de forma que o valor de pico na saída corresponda à magnitude da mudança de degrau na entrada. Dessa forma, os sinais de onda filtrados retêm informações sobre a magnitude e polaridade das ondas viajantes (SCHWEITZER *et al.*, 2015). Na Figura 3.5, apresenta-se um exemplo de aplicação do filtro *differentiator-smoother* a um sinal de corrente com transitórios de falta.

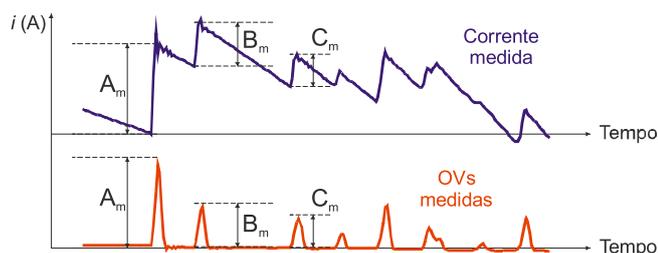


Figura 3.5. Extração das ondas viajantes por meio do filtro *differentiator-smoother*. (LOPES *et al.*, 2016).

3.2.4.2 Detecção de Ondas Viajantes Refletidas

Partindo do pressuposto que todas as LTs são finitas, faz-se necessário levar em consideração as reflexões das ondas viajantes nas descontinuidades existentes ao longo da linha, assim como as ondas transmitidas por refração. Entretanto, há uma dificuldade para detecção de tais sinais refletidos, visto que as ondas viajantes são passíveis de sofrerem atenuações e distorções, causadas por perda de energia devido à impedância da linha, à dispersão dos isoladores, às perdas dielétricas e ao efeito corona (SCHWEITZER III; MARX., 2014).

A Figura 4.6 mostra a atenuação de um sinal de corrente de uma onda viajante. Pode-se observar que o instante de detecção da onda refletida pode ser confundido com diversos outros picos (segundas reflexões ou ondas refratadas), devido à atenuação do sinal ao longo do tempo, sendo este o maior motivo para a dificuldade e complexidade em detectar o instante correto de tal reflexão.

A respeito das dificuldades na detecção de frentes de ondas refletidas do ponto de falta, dois cenários merecem uma atenção especial. O primeiro consiste no fato de que ondas viajantes refletidas do ponto de falta precisam ser diferenciadas daquelas refletidas do terminal remoto. Isso ocorre porque, dependendo da distância de falta, as ondas viajantes refletidas do terminal remoto passam através do ponto de falta em direção ao terminal que está sendo monitorado e pode chegar antes da frente de onda refletida do ponto de falta, como mostrado na figura abaixo (LOPES *et al.*, 2017), caso isso aconteça, os métodos de localização de faltas que requerem detecção de ondas viajantes refletidas do ponto de falta podem falhar (SAHA *et al.*, 2010).

O segundo cenário adverso, ocorre devido a linhas adjacentes ou paralelas conectadas com o terminal monitorado, onde em ambas topologias o problema está em separar as ondas viajantes refletidas do ponto de falta e as refletidas de outras linhas conectadas ao terminal monitorado.(SCHWEITZER *et al.*, 2016).

Com base nos problemas apresentados em detectar ondas viajantes refletidas de um ponto, e com o intuito de ter detecções mais confiáveis dessas ondas, utiliza-se pré estimativa de falta, onde com algoritmo de localização de faltas baseado em componentes fundamentais de Takagi, cria-se uma janela de busca com um intervalo de tempo onde a possível onda refletida do ponto de falta pode estar.

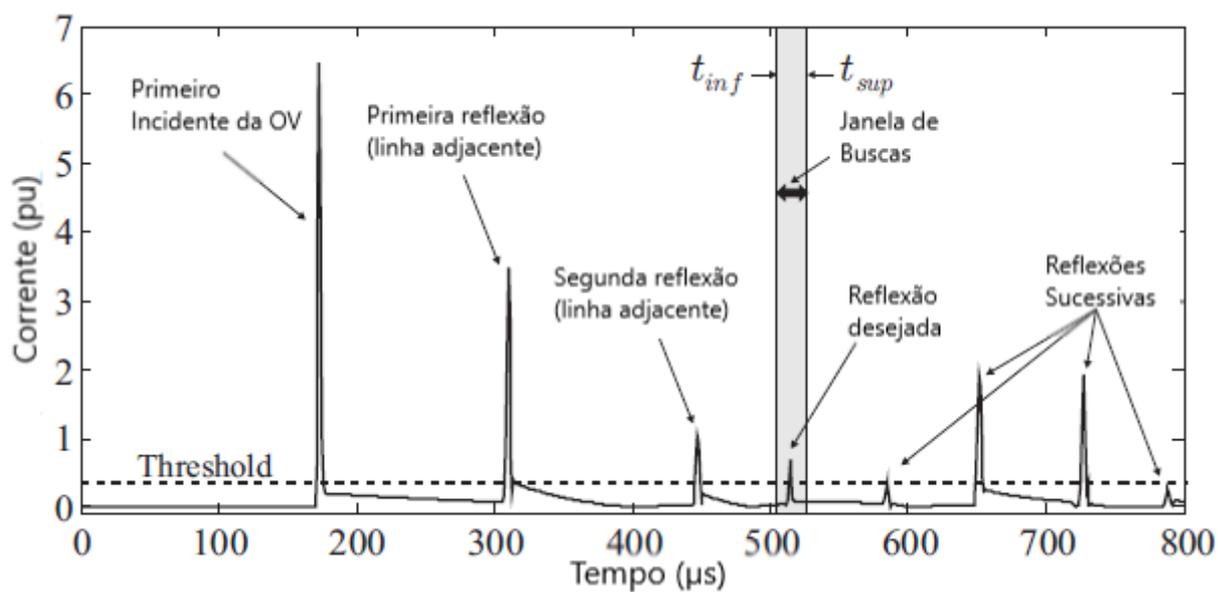


Figura 3.6. Janela de busca de ondas viajantes refletidas do ponto de falta. (LOPES *et al.*, 2017).

Com tal método, a detecção de ondas viajantes refletidas é mais confiável e segura, diminuindo o risco de erros na localização de faltas por algoritmos que utilizam de tal dado. Ainda assim, há a possibilidade de erros, o que torna os métodos que utilizam ondas refletidas menos utilizados.

3.2.5 Fontes de Erros

A precisão dos métodos de localização de faltas é baseada na porcentagem de erro da localização proposta por tal método, sendo assim, para melhorar a estimativa de localização de falta, é de suma importância eliminar ou reduzir possíveis erros para o considerado método. A precisão do método pode ser afetada por diversos fatores (SAHA *et al.*, 2010).

- Posição da falta;
- Tipo da falta;
- Resistência de falta presente em um arco;
- Níveis de fluxo de potência de pré-falta e sua direção;
- Potência das fontes equivalentes atrás dos terminais da linha;
- Desequilíbrio da linha devido à falta de transposição;
- Imprecisão no fornecimento de dados de impedância para a linha aérea (ou subterrânea);

- Imprecisão no fornecimento de dados de impedância para a vizinhança das despesas gerais consideradas linha (ou cabo subterrâneo), como, por exemplo, o possível desajuste com respeito às impedâncias de origem (se estiverem envolvidas na localização de falhas avaliada algoritmo) é considerado;
- Compensação série e dispositivos de derivação na linha, como por exemplo instalações dos bancos de capacitores compensadores de série equipados com varistores de óxidos metálicos;
- Ângulo de incidência da falta;
- Identificação de falta, em termos de exatidão e precisão da detecção do tempo de incidência da falta, detecção de esclarecimento de faltas, classificação de tipo de falta;
- Erros transitórios e constantes de transformadores de tensão e corrente, incluindo a possibilidade de saturação do *TC*;

A definição de erro é expressa pela porcentagem de erro na estimativa da localização da falta baseada no comprimento total da linha: (erro) = (leitura do instrumento - distância exata da falta) dividida por (comprimento total da linha) (SAHA *et al.*, 2010).

Essa definição pode ser expressa pela seguinte fórmula:

$$erro = \frac{d - d_{exato}}{l} \cdot 100(\%) \quad (3.37)$$

onde, d , d_{exato} são a estimativa e a distância exata da falta respectivamente, expressadas normalmente em *km* ou até mesmo em unidades relativas *p.u.*, l é o comprimento total da linha em análise (também expressa em *km* ou em *p.u.*).

Ao realizar a avaliação estatística da precisão de um particular método de localização de falta, diferentes medidas para o erro de localização de falta são determinadas. Por exemplo, os valores máximos, médios e de desvio padrão são determinados para fins de avaliação. É característico que o valor absoluto seja habitualmente utilizado para análise, a partir da fórmula de definição (3.37) e, assim, obtemos:

$$erro = \frac{|d - d_{exato}|}{l} \cdot 100(\%) \quad (3.38)$$

DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS ANALISADOS

Neste capítulo, apresentam-se seis métodos de localização de faltas baseados na teoria de ondas viajantes, apresentando suas principais características assim como seus equacionamentos. O objetivo é analisar vantagens e desvantagens de cada um.

4.1 MÉTODO I: MÉTODO DE DOIS TERMINAIS CLÁSSICO (GALE *et al.*, 1993)

Nas primeiras implementações utilizando o método de localização de faltas de dois terminais, o tempo de chegada em uma extremidade da linha foi transmitido para a outra extremidade através de um canal de comunicação de largura de banda grande, tendo como sua banda base microondas, e o atraso dessa comunicação foi contabilizado na medição de diferença de tempo, ou seja, a comunicação por microondas foi utilizada para enviar um pulso do terminal remoto para sinalizar a hora de chegada da onda viajante, como mostrado na Figura 4.1

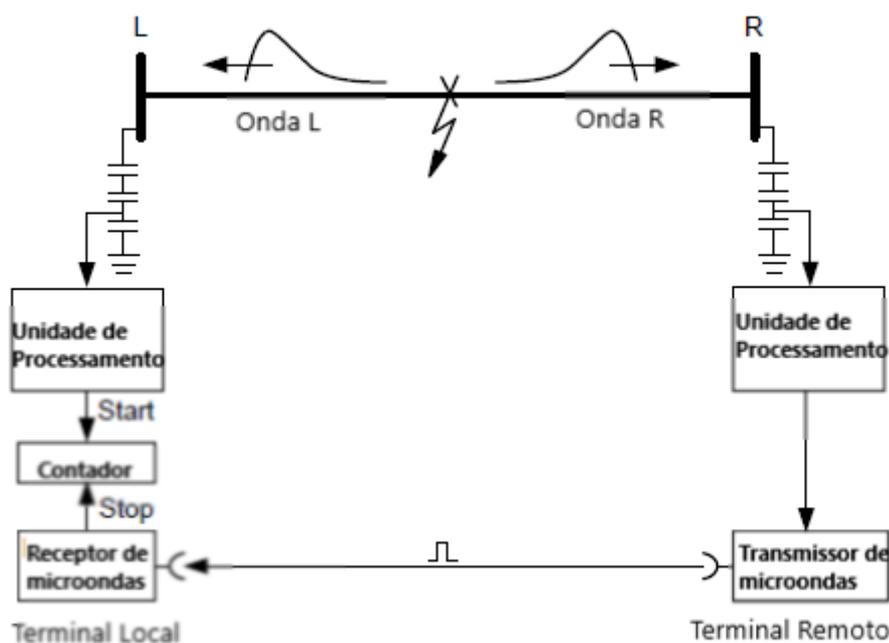


Figura 4.1. Operação de localização de falha de OV's com base no tempo de chegada transmitido via canal de microondas. (MARIHART; HAAGENSON, 1972)

As ondas viajantes atingem o terminal *master* e uma contagem eletrônica é iniciada. O terminal remoto envia um pulso de parada para o terminal *master* via canal de microondas quando as Ondas Viajantes atingem o terminal remoto. O localizador de faltas por ondas viajantes determina o tempo do contador, compensa o atraso das comunicações e converte esse tempo na distância da falta, d , do terminal *master* da seguinte maneira:

$$d = \frac{1}{2} [l - (t_{Timer} - t_{Channel}) \cdot v], \quad (4.1)$$

onde: l é o comprimento da linha; t_{Timer} é o tempo transcorrido; $t_{Channel}$ é o atraso do canal de comunicação (sendo maior do que o tempo de propagação da linha); v é a velocidade de propagação da onda viajante.

Em Schweitzer III & Marx. (2014) localizadores de faltas por ondas viajantes mais modernos são apresentados, os quais utilizam um tempo de referência comum para os dispositivos que capturam as ondas viajantes nos terminais. Esse tipo de localizador de falta mostrado na figura abaixo é conhecido como *Tipo D*.

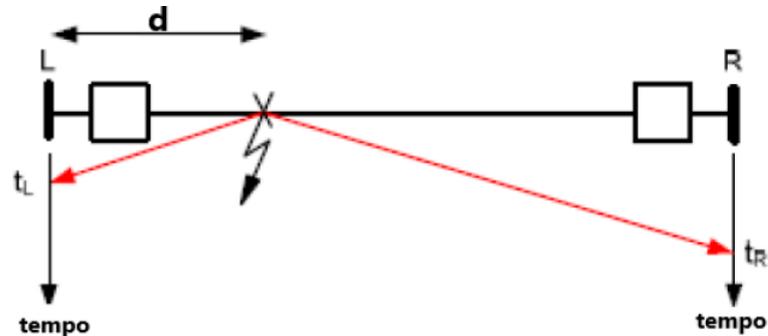


Figura 4.2. Operação de localização de faltas com base no tempo de chegada transmitido via canal de microondas. (SCHWEITZER III; MARX., 2014)

Nos métodos de localização de faltas por ondas viajantes classificados como *Tipo D*, os tempos de chegada da onda necessários são medidos com uma referência de tempo comum e então, são subtraídos para calcular a localização da falta da seguinte forma:

$$d = \frac{1}{2} [l - (t_L - t_R) \cdot v], \quad (4.2)$$

onde: l é o comprimento da linha; t_L é o tempo de chegada das ondas viajantes ao terminal L; t_R é o tempo de chegada das ondas viajantes ao terminal R; v é a velocidade de propagação da onda viajante.

O presente método aproveita as tecnologias econômicas e amplamente disponíveis de comunicações digitais e sincronização de tempo baseada em satélite. Mais recentemente, os dispositivos de comunicação digital projetados para infra-estrutura crítica fornecem tempo absoluto em uma rede de área ampla, independente dos sistemas de posicionamento global (GPS)(ZIMMERMAN; COSTELLO., 2006). As comunicações terrestres têm a vantagem sobre o GPS de serem menos suscetíveis a interferências ou falsificações.

A tecnologia de localização de faltas do *tipo D* pode ser ilustrada adicionalmente usando o diagrama de rede de Bewley, como mostrado na Figura 4.3, que mostra uma linha que liga dois terminais, local e remoto, com redes por trás de cada um. Uma falta na distância d de l lança ondas viajantes para o terminal remoto e terminal local. Se a falta estiver no meio da linha, então a onda viajante atinge ambos os terminais no mesmo tempo absoluto, de modo que o tempo relativo de chegada é zero. É demonstrado na Figura 4.3 com $d < l - d$, então a onda viajante atinge o local antes do remoto. A onda viajante incidente no terminal local é dividida em três partes: algumas refletem de volta para o ponto de falta, algumas são transmitidas através do terminal local e algumas são absorvidas. De maneira análoga acontece com o terminal remoto, com um tempo de chegada maior, neste caso.

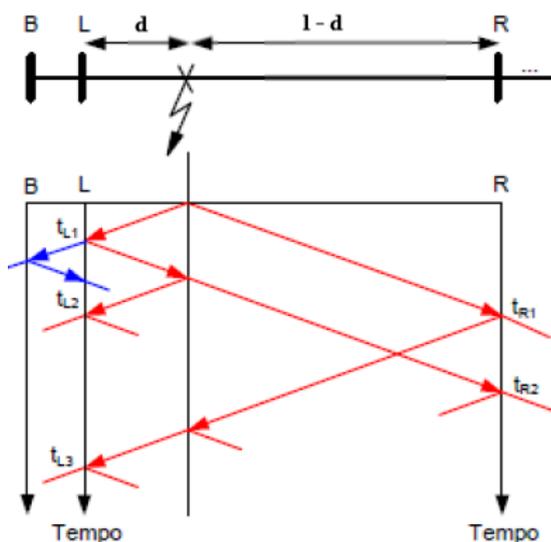


Figura 4.3. Operação de localização de falha de OV's com base no tempo de chegada transmitido via canal de microondas.(SCHWEITZER III; MARX., 2014)

O primeiro dado lido no terminal local sobre a falha incidente na linha é o tempo de chegada da onda viajante vindo do ponto de falta no tempo t_{L1} . Do mesmo modo, a primeiro dado recebido pelo terminal remoto é o tempo de chegada da onda viajante vindo do ponto de falta

que incide o terminal no tempo t_{R1} . Métodos que se baseiam em dois terminais não necessitam de análise sobre as ondas viajantes refletidas, o que é um ponto positivo, visto que a detecção dessas é de grande dificuldade (SAHA *et al.*, 2010).

4.2 MÉTODO II: MÉTODO DE DOIS TERMINAIS COM TERRA LOPES (LOPES, 2016)

Apresenta-se em Lopes (2016) um método de dois terminais com a utilização apenas do modo terra e aéreo de sinais de correntes, para localização de faltas baseado na análise de ondas viajantes, visto que transformadores de corrente (TC) têm uma boa resposta em frequência (SAHA *et al.*, 2010). No artigo, os valores dos modos terra e aéreo são calculados com base na transformada de Karrenbauer.

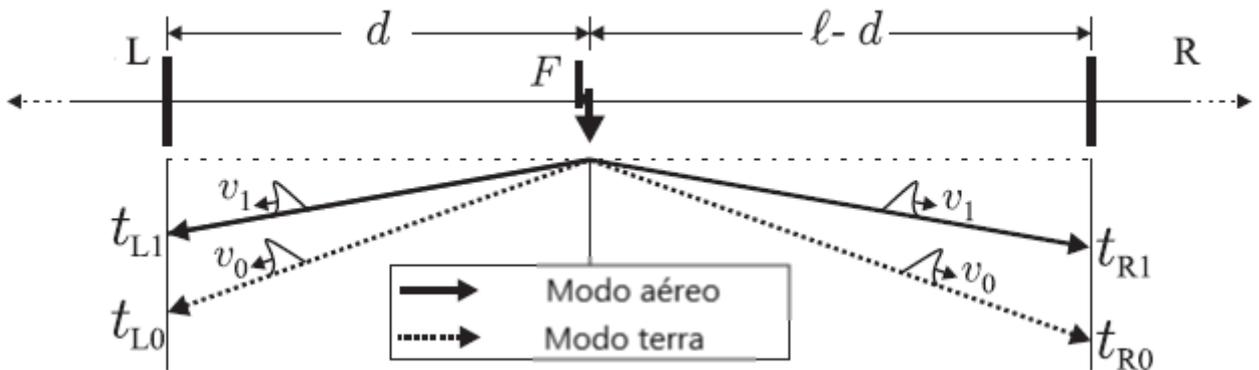


Figura 4.4. Diagrama de espaço de tempo para uma linha monitorada em dois terminais. (LOPES, 2016)

A Figura 4.4 representa um diagrama tempo-espaço em uma linha de dois terminais, em que t_{L0} , t_{L1} , t_{R0} e t_{R1} são os tempos de chegada do modo terra e aéreo das ondas viajantes incidentes nos terminais L e R ; v_0 e v_1 são as velocidades de propagação das ondas viajantes do modo terra e aéreo respectivamente; d é a distância da falta e l o comprimento total da linha analisada.

Como mostrado em Liu *et al.* (2012), as velocidades de propagação das ondas viajantes do modo terra e do modo aéreo são diferentes, sendo $v_1 > v_0$, ou seja, há uma diferença de tempo entre a chegada das ondas viajantes de modo terra e de modo aéreo nos terminais da linha. Sendo assim, assumindo que v_0 e v_1 são constante no decorrer da linha, d e $l-d$ são estimados para faltas com terra por:

$$d = \frac{(t_{L0} - t_{L1}) \cdot v_0 v_1}{v_1 - v_0}, \quad (4.3)$$

$$l - d = \frac{(t_{R0} - t_{R1}) \cdot v_0 v_1}{v_1 - v_0}. \quad (4.4)$$

Adicionando (4.3) e (4.4), obtem-se o comprimento da linha ℓ :

$$d + (l - d) = l = \frac{[(t_{L0} - t_{L1}) + (t_{R0} - t_{R1})] \cdot v_0 v_1}{v_1 - v_0}. \quad (4.5)$$

Portanto:

$$d_{p.u.} = \frac{d}{l} = \frac{(t_{L0} - t_{L1})}{(t_{L0} - t_{L1}) + (t_{R0} - t_{R1})}, \quad (4.6)$$

$$d = d_{p.u.} \cdot l. \quad (4.7)$$

Da mesma forma, para outros métodos baseados em ondas viajantes relatados anteriormente, a localização de faltas são desafiadoras para a proposta, devido à necessidade de taxas de amostragem muito altas para detectar com precisão as primeiras ondas viajantes terrestres e aéreas incidentes nas extremidades da linha (SAHA *et al.*, 2010). Porém, como (4.6) não requer informação da velocidade de propagação e analisa os tempos de chegada nas extremidades da linha separadamente, o algoritmo proposto tem a vantagem de ser independente da sincronização de dados e dos parâmetros da linha, portanto, é completamente livre de configurações da linha de transmissão.

4.3 MÉTODO III: MÉTODO DE DOIS TERMINAIS LOPES (LOPES *et al.*, 2017)

Propõe-se em Lopes *et al.* (2017) um novo método de localização de faltas baseado em ondas viajantes para LTs monitoradas em dois terminais. Este método depende apenas da diferença do tempo entre a primeira onda viajante incidente e sua sucessiva reflexão ao atingir o ponto de falta, nos dois terminais monitorados. Portanto, o presente método não depende de sincronização de dados e nem mesmo dos parâmetros da LT, os quais são fontes de erros que

usualmente afetam a precisão da localização de faltas em algoritmos de localização baseados em ondas viajantes.

O diagrama de espaço-tempo apresentado na Figura 4.5 mostra a distancia d do local de falta medido a partir do terminal local L ; a primeira onda viajante incidente no terminal local e no terminal remoto nos instantes t_L e t_R , respectivamente. Também, pela imagem abaixo temos as ondas viajantes refletidas do ponto de falta lidas pelos terminais local e remoto, com tempo de chegada t_{Lr} e t_{Ll} , respectivamente. Da mesma maneira, têm-se as ondas viajantes refratadas dos terminais adjacentes, L_{adj} e R_{adj} , com seus respectivos tempos de chegada nos terminais L e R , t_L^{adj} e t_R^{adj} .

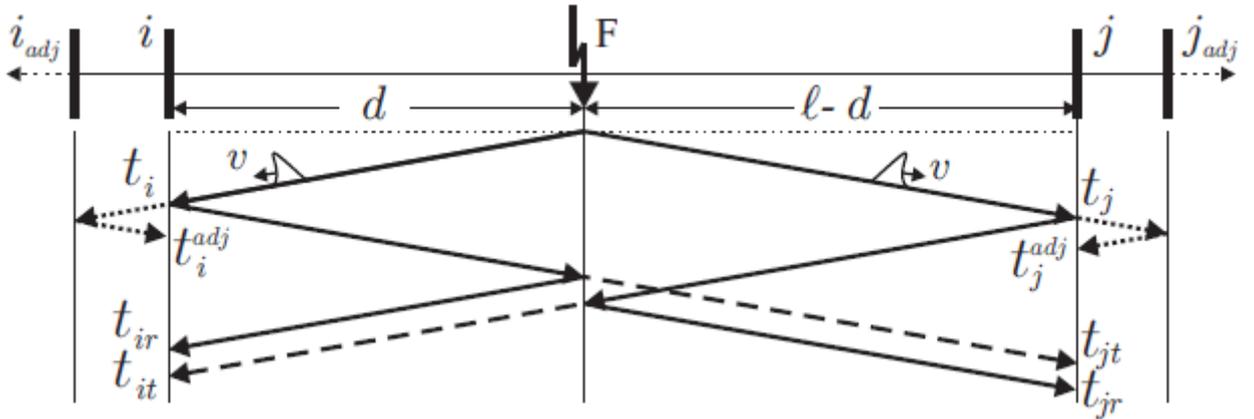


Figura 4.5. Diagrama de espaço de tempo mostrando ondas viajantes incidente, refletidas e refratadas, assim como seus tempos de chegada nos terminais monitorados (LOPES *et al.*, 2017).

Assumindo o terminal local como referência, pode-se observar que os transientes refletidos da linha adjacente podem chegar ao terminal monitorado antes da frente de onda refletida do ponto de falta, ou seja, o tempo de chegada t_{Lr} pode ser confundido com t_L^{adj} ou até mesmo confundido com a frente de onda refratada do terminal remoto, t_{Ll} , o que pode levar a erros no processo de localização de falta. Desse modo, os métodos de localização de dois terminais clássico, e de um terminal clássico não são eficazes.

Para evitar tais erros a fim de otimizar a localização de falta nessas condições, o presente método, que tem sua formulação derivada do método de um terminal clássico, foi proposto.

Assumindo a detecção dos incidentes das ondas refletidas precisa em ambos terminais monitorados, temos as seguintes equações:

$$d = \frac{(t_{L1r} - t_{L1}) \cdot v_1}{2}, \quad (4.8)$$

$$l - d = \frac{(t_{R1r} - t_{R1}) \cdot v_1}{2}. \quad (4.9)$$

Adicionando (4.8) e (4.9), obtem-se o comprimento da linha l :

$$d + (l - d) = l = \frac{[(t_{L1r} - t_{L1}) + (t_{R1r} - t_{R1})] \cdot v_1}{2}. \quad (4.10)$$

Portanto:

$$d_{p.u.} = \frac{d}{l} = \frac{(t_{L1r} - t_{L1})}{(t_{L1r} - t_{L1}) + (t_{R1r} - t_{R1})}, \quad (4.11)$$

$$d = d_{p.u.} \cdot l. \quad (4.12)$$

Analisando (4.11), podemos verificar as seguintes vantagens no uso de tal método:

- Independência dos parâmetros da linha, uma vez que a velocidade v de propagação do transiente não é utilizado;
- Sincronização de dados entre os terminais monitorados não é necessário, visto que os períodos de tempos $t_{L1r} - t_{L1}$ e $t_{R1r} - t_{R1}$ são calculados em cada terminal separado;
- Tal formulação pode ser usada apenas o modo aéreo, assim pode ser usada para todos tipos de faltas;
- A unidade distância da falta em $p.u.$, não é afetada pelas imprecisões do comprimento da linha; (LOPES *et al.*, 2017)

Sendo assim, o maior desafio da formulação é de fato a detecção das primeiras ondas incidentes e das primeiras reflexões no ponto de falta, que chegam aos terminais local e remoto nos tempos de chegada de t_{Lr} e t_{Rr} respectivamente.

4.4 MÉTODO IV:MÉTODO DE DOIS TERMINAIS GILANY (GILANY *et al.*, 2007)

Este método também é baseado em medições sincronizadas de dois terminais e, visando superar limitações já citadas, Gilany *et al.* (2007) propuseram um algoritmo que não depende dos parâmetros da LT, por não ser necessário o uso da velocidade de propagação das ondas

viajantes. Porém, tal algoritmo faz necessária a detecção de ondas viajantes refletidas no ponto de falta e, em alguns casos, de ondas refratadas no ponto de falta, o que torna tal método susceptível a erros, devido à dificuldade da detecção.

Para determinar a localização do ponto de falta, o tempo de chegada entre o primeiro e o segundo pico deve ser identificado. O primeiro, corresponde ao pico incidente, enquanto o segundo pico corresponde à reflexão devido ao terminal remoto ou ao ponto de falta.

O algoritmo é capaz de estimar localização do ponto de falta em ambos os lados da linha de transmissão, porém utilizando dois equacionamentos, assumindo o tamanho da linha como $l = X + Y$, temos para a primeira metade onde $X < L/2$:

$$td_1 = 2 \cdot t_{L1} = 2(X/v) \quad (4.13)$$

$$td_2 = t_{L2} - t_{L1} = (Y/v) - (X/v) \quad (4.14)$$

obtemos então:

$$X = l \cdot \frac{1/2}{1 + (td_2)/(td_1)} \text{ km} \quad (4.15)$$

onde

td_1 : tempo do transitório do primeiro e segundo pico do lado do terminal local;

td_2 : tempo do transitório entre o primeiro incidente da onda viajante em ambos os lados da linha;

v : velocidade de propagação da OV;

l : comprimento total da linha em quilometro;

Caso a falta ocorra na segunda metade da LT, temos o seguinte equacionamento:

$$td_1 = 2 \cdot t_{R1} = 2(Y/v) \quad (4.16)$$

$$td_2 = t_{R2} - t_{R1} = (X/v) - (Y/v) \quad (4.17)$$

obtemos então

$$X = l \cdot \frac{1/2}{1 - (td_2)/(td_1)} km \quad (4.18)$$

4.5 MÉTODO V: MÉTODO DE UM TERMINAL CLÁSSICO

O método de um terminal clássico tem sido reportado em várias referências, a exemplo de Schweitzer III & Marx. (2014). Nesse método, usam-se informações das ondas viajantes de apenas um terminal, eliminando a necessidade de sincronização dos dados.

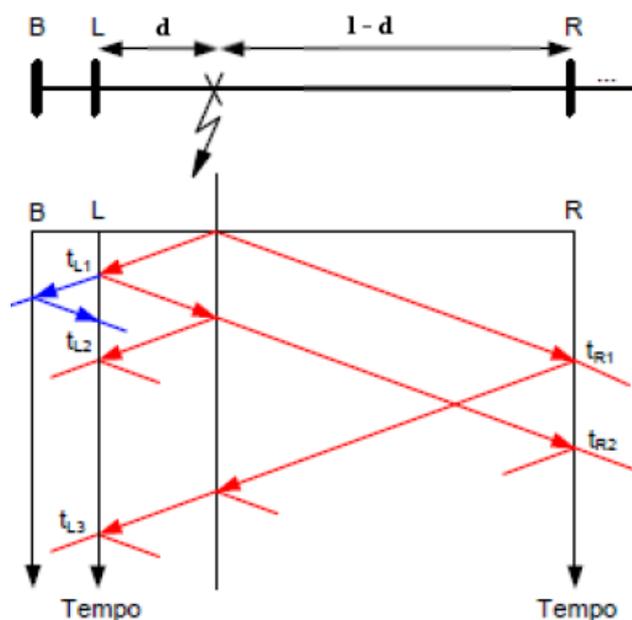


Figura 4.6. Diagrama de espaço de tempo mostrando ondas viajantes incidente, refletidas, assim como seus tempos de chegada em apenas um dos terminais monitorados (SCHWEITZER III; MARX., 2014).

Pode-se ver na Figura 4.6 que as ondas viajantes do ponto de falta chegando no terminal L são ambas transmitidas e refletidas. Para a estimação do local de falta, o método de um terminal utiliza a diferença de tempo entre as ondas incidentes e sua reflexão sucessiva do ponto de falta, como mostrado na equação abaixo:

$$d = \frac{(t_{L2} - t_{L1}) \cdot v}{2}. \quad (4.19)$$

Tal equacionamento, nos permite localizar faltas utilizando apenas informações de um terminal monitorado, desde que não se confundam as ondas refletidas na falta com ondas transmitidas

de outros terminais.

4.6 MÉTODO VI: MÉTODO DE UM TERMINAL COM TERRA (LIU *et al.*, 2012)

Como mostrado na Figura 4.7, uma falta com terra ocorre no ponto F, as ondas viajantes do modo aéreo e do modo terra geradas a partir de tal curto circuito percorrem a linha em direção ao ponto de medição, com velocidades v_1 e v_0 respectivamente, onde $v_1 > v_0$.

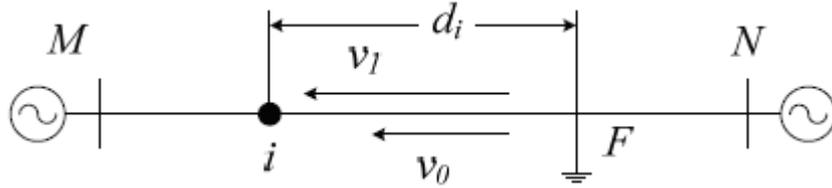


Figura 4.7. Diagrama de espaço de tempo mostrando ondas viajantes faltas com terra que desencadeiam velocidades diferentes para o modo aéreo e modo terra, v_0 e v_1 . (LIU *et al.*, 2012)

Sabendo que as velocidades de propagação das ondas são diferentes para o modo aéreo e para o modo terra, tem-se que:

$$\frac{1}{v_0} = \frac{t_{L0} - t_0}{d}, \quad (4.20)$$

$$\frac{1}{v_1} = \frac{t_{L1} - t_0}{d}. \quad (4.21)$$

Isolando t_0 nas equações (4.20) e (4.21), respectivamente, obtemos as seguintes equações:

$$\frac{1}{v_0} = t_{L0} - t_0 \Rightarrow t_0 = t_{L0} - \frac{d}{v_0}, \quad (4.22)$$

$$\frac{1}{v_1} = t_{L1} - t_0 \Rightarrow t_0 = t_{L1} - \frac{d}{v_1}. \quad (4.23)$$

Igualando (4.22) e (4.23):

$$t_{L0} - \frac{d}{v_0} = t_{L1} - \frac{d}{v_1}, \quad (4.24)$$

$$\frac{d}{v_0} - \frac{d}{v_1} = t_{L0} - t_{L1} \Rightarrow d \left(\frac{1}{v_0} - \frac{1}{v_1} \right) = t_{L0} - t_{L1}, \quad (4.25)$$

$$d \left(\frac{v_1 - v_0}{v_0 v_1} \right) = t_{L0} - t_{L1}. \quad (4.26)$$

Por fim, isolamos d para obtenção da fórmula do algoritmo, tem-se:

$$d = \frac{(t_{L0} - t_{L1}) v_0 v_1}{v_1 - v_0}. \quad (4.27)$$

De acordo com (4.27), conseguimos identificar a dependência dos parâmetros da linha para estimar a distância d da falta, o que não é desejado, visto que tais parâmetros podem sofrer alterações com mudanças nas condições operacionais da LT, alterando bastante as velocidades de propagação e assim comprometendo a estimativa da localização da falta.

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DO DESEMPENHO DOS MÉTODOS IMPLEMENTADOS

Realiza-se neste capítulo uma análise do desempenho de métodos de localização de faltas baseados na teoria de ondas viajantes descritos no capítulo anterior, os quais consistem nos tipos mais populares entre os utilizados e estudados atualmente. Tais métodos foram avaliados por meio de simulações digitais de faltas no ATP, utilizando a linguagem MODELS para simular registradores oscilográficos. Os métodos foram implementados em uma plataforma computacional matemática, no qual foram feitas avaliações de cada técnica. O objetivo é comprovar as vantagens da utilização do filtro DS sobre o filtro digital passa-altas de Butterworth, e da influência da interpolação de dados em cada método durante o procedimento de detecção de picos nos sinais filtrados.

5.1 SISTEMA ANALISADO

Para a análise foram realizados testes em um sistema que segue o modelo da Figura 5.1, cujos parâmetros foram tomados de um sistema elétrico real brasileiro. O sistema trata de uma linha de transmissão de 500 kV/60 Hz com 200 km de comprimento e duas linhas adjacentes de 100 km. As redes elétricas adjacentes à linha analisada foram representadas por meio de suas respectivas tensões e impedâncias de Thévenin e foram configuradas de forma a simular valores de *Source Impedance Ratio* (SIR) de 0,1. A Tabela 5.1 contém as especificações dessa linha.

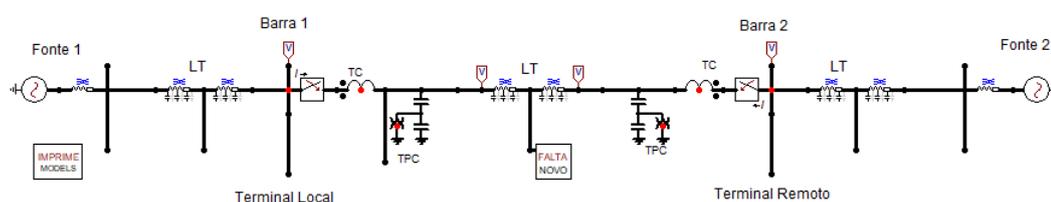


Figura 5.1. Modelo do sistema analisado.

É possível notar também que há elementos que modelam os transformadores de corrente (TCs) utilizados no sistema, cuja relação de transformação, nesse caso, é de 2000 – 5A. Em conjunto com os TPCs, dispositivos estes que fornecem medições de corrente e tensão secundários, respectivamente, que serão utilizados para implementação dos métodos. Usando então um bloco de falta, o qual é composto por resistores e chaves controladas no tempo, tornou-se possível avaliar diferentes tipos de falta, com diferentes ângulos de incidência e resistência de falta.

Tabela 5.1. Dados da linha de transmissão de 500 kV modelada no ATP.

Tensão nominal: 500 kV					
Comprimento da LT: 200 km					
Frequência nominal: 60 Hz					
Impedâncias e Admitâncias					
Sequência Zero			Sequência Positiva		
$R_0(\Omega/km)$	$X_0(\Omega/km)$	$B_0(\mu S/km)$	$R_1(\Omega/km)$	$X_1(\Omega/km)$	$B_1(\mu S/km)$
0,4177	1,5238	2,8648	0,0346	0,3005	5,5106

5.2 CASOS AVALIDOS

No intuito de expor a precisão dos métodos avaliados, foram propostos alguns cenários de falta para a linha de transmissão. Quanto às faltas, que foram simuladas via ATP, foram consideradas apenas faltas AT internas, variando-se a distância de falta d em relação à barra L , o ângulo de incidência Θ . Vale ressaltar que o ângulo de incidência tem como referência a tensão da fase A do terminal local. Além dessas variáveis, foram consideradas diferentes frequências de amostragem fs . Os casos avaliados estão descritos na Tabela 5.2

Tabela 5.2. Casos de falta analisados

Casos de falta			
Caso	d	fs	Θ
Método 1	0,1, 0,15, 0,2, 0,7, 0,9 p.u.	200 kHz	90°, 30°, 60°, 180°
Método 2	0,1, 0,15, 0,2, 0,9 p.u.	200 kHz	90°, 30°, 60°, 180°
Método 3	0,1, 0,15, 0,2 p.u.	200 kHz	90°
Método 4	0,1, 0,15, 0,2 p.u.	200 kHz	90°, 30°, 60°, 180°
Método 5	0,1, 0,15, 0,5 p.u.	200 kHz	90°
Método 6	0,1, 0,15, 0,2, 0,7, 0,9 p.u.	200 kHz	90°, 30°, 60°, 180°

O tempo de simulação considerado foi de 0,8 segundos, com o objetivo de obter no mínimo 3 ciclos do sinal medido para uma melhor aproximação da localização prévia da falta, feita a partir do método por fasores de Takagi, para assim então detectar ondas viajantes refletidas, utilizadas em alguns dos métodos avaliados. Para cada método avaliado, foram considerados apenas os sinais de corrente que por sua vez foram filtrados por dois diferentes filtros e interpolados por parábola, a fim de de comparar o desempenho de cada método quando expostos a tais técnicas. Após cada simulação foi calculado o percentual de erro das localizações estimadas em cada método, utilizando a fórmula:

$$erro = \frac{|d - d_{exato}|}{l} \cdot 100(\%) \quad (5.1)$$

5.3 ANÁLISE DO DESEMPENHO DO FILTRO *DIFFERENTIATOR-SMOOTH*

Como os métodos baseados na teoria de ondas viajantes necessitam da coleta dos tempos de chegada do transitório nos terminais local e remoto, é necessário detectar em qual tempo acontece os primeiros transitórios da falta percebidos pelos terminais local e remoto, assim como os tempos de chegada das ondas viajantes refletidas. Essas detecções influenciam de forma direta o desempenho das técnicas de localização de faltas baseadas em ondas viajantes.

Com a utilização do filtro *Differentiator-Smoother* tais detecções do instante inicial dos transitórios se tornam mais fáceis, pois o filtro em questão responde a uma mudança na forma de degrau ideal com uma saída em forma de triângulo, onde o pico do triângulo é referenciado ao tempo da chegada da onda viajante, como explicado no Capítulo 3. A vantagem pode ser vista tanto no modo aéreo, quanto no modo terra.

Para todos os algoritmos, a detecção dos tempos de chegada foi obtida tanto pelo filtro DS quanto pelo filtro digital passa-altas de Butterworth, como pode-se observar nas Figuras 5.2 e 5.3.

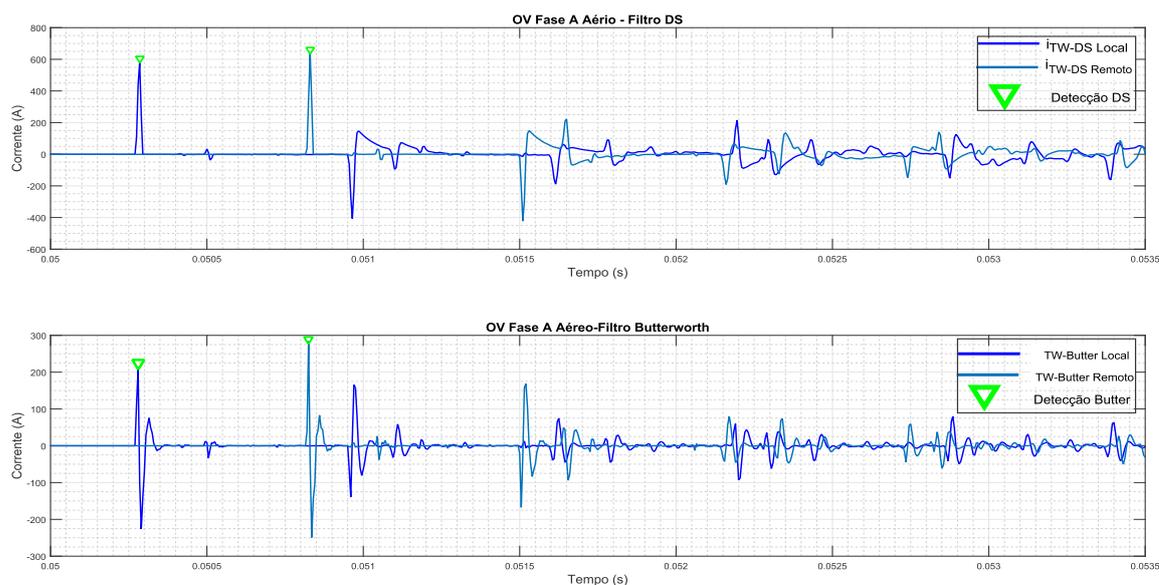


Figura 5.2. Comparação entre os filtros DS e de Butterworth para extração e detecção das Ondas Viajantes do Modo Aéreo.

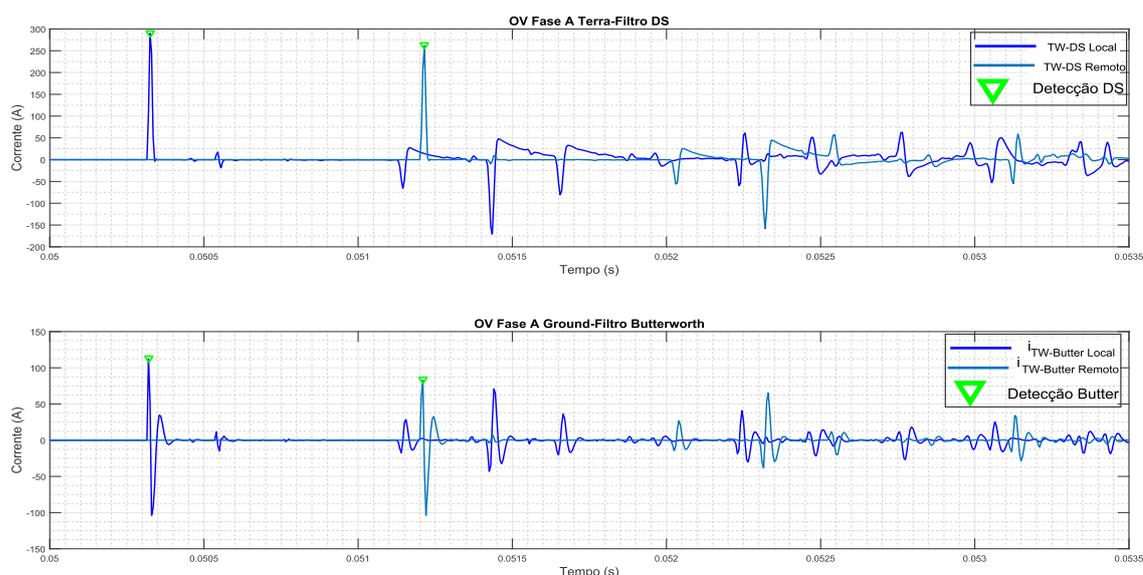


Figura 5.3. Comparação entre os filtros DS e de Butterworth para extração e detecção das Ondas Viajantes do Modo Terra.

Como observado nas Figuras 5.2 e 5.3, a detecção da primeira onda incidente se torna mais fácil ao utilizar o filtro DS. De fato, o formato triangular das saídas facilita a identificação do pico, ao contrário das saídas do filtro Butterworth digital, as quais, embora permitam a identificação dos instantes iniciais dos transitórios, apresentam um formato mais oscilatório em torno dos instantes de incidência.

Pelo mesmo motivo citado, a detecção dos instantes de tempo das ondas viajantes refletidas se tornam mais simples com a utilização do filtro DS, como pode-se observar na Figura (5.4) a seguir, onde as linhas contínuas em preto ilustram o campo de busca criado por meio da

pré-localização estimada por meio do método de Takagi. E tais detecções foram feitas a partir da janela de buscas, em que o algoritmo detecta o primeiro pico como sendo uma onda refletida.

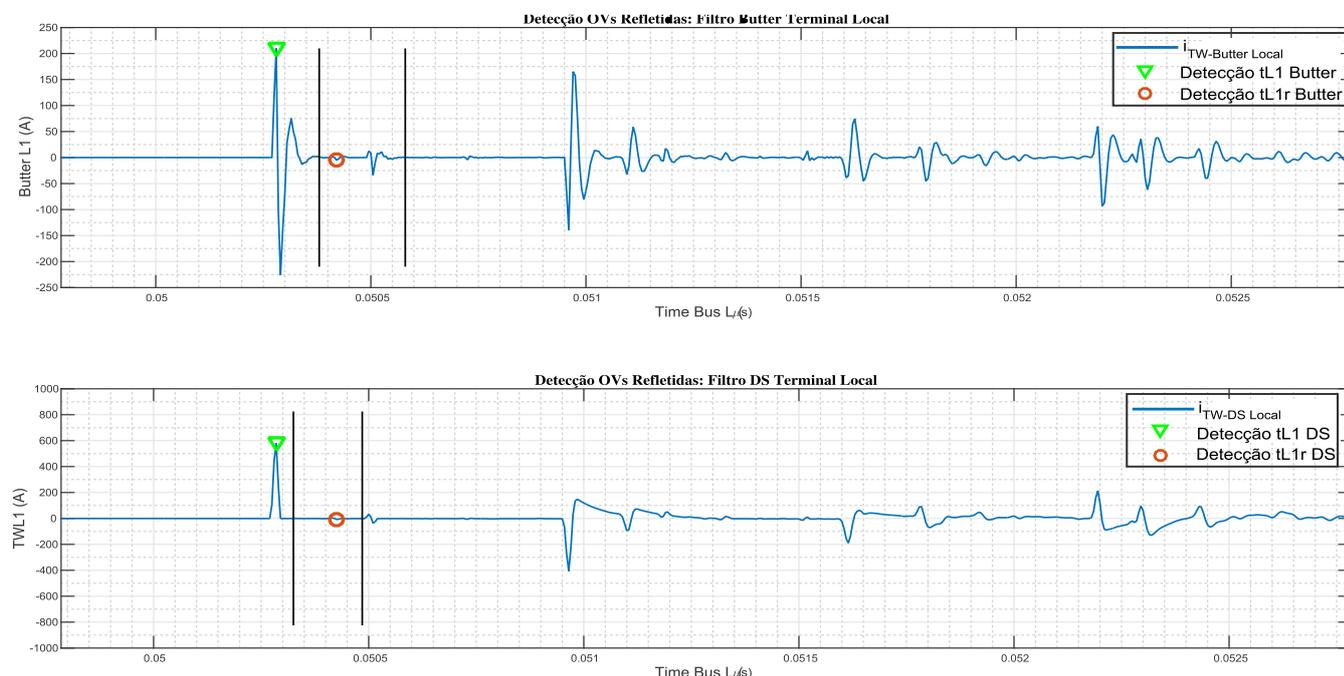


Figura 5.4. Comparação entre os filtros DS e de Butterworth para extração e detecção das Ondas Viajantes Refletidas no Terminal Local.

Percebe-se da Figura (5.4) que o sinal extraído pelo filtro *Differentiator-Smoother* é mais limpo, e visto que as ondas refletidas são muito atenuadas, é mais fácil de se confundir com ondas adjacentes ou outras reflexões não desejadas ao utilizar o filtro Butterworth. Tais atenuações podem ser tão severas que fica inviável a utilização de métodos que dependem do instante de tempo das ondas viajantes refletidas. Diante do exposto, é apresentado a seguir os resultados da localização de falta por cada um dos métodos avaliados com frequência de amostragem de 200 kHz.

Tabela 5.3. Análise comparativa com filtros DS e de Butterworth

Método I: Dois terminais Clássico						
Fase	Θ	$d_{real}(km)$	$d_{butter}(km)$	$erro_{butter}(\%)$	$d_{DS}(km)$	$erro_{DS}(\%)$
A	30°	20	20,17	0,085	20,17	0,085
A	60°	30	28,22	0,890	30,42	0,210
A	30°	80	80,23	0,115	80,23	0,115
A	60°	140	140,28	0,140	140,28	0,140
A	90°	180	179,83	0,085	179,83	0,085

Tabela 5.4. Análise comparativa com filtros DS e de Butterworth

Método II: Dois terminais com terra Lopes						
Fase	Θ	$d_{real}(km)$	$d_{butter}(km)$	$erro_{butter}(\%)$	$d_{DS}(km)$	$erro_{DS}(\%)$
A	30°	20	18,82	0,590	18,82	0,590
A	60°	30	30,95	0,475	28,24	0,880
A	60°	80	82,76	1,38	80,552	0,690
A	60°	140	138,82	0,59	138,82	0,690
A	90°	180	181,18	0,590	181,18	0,590

Tabela 5.5. Análise comparativa com filtros DS e de Butterworth

Método III: Dois terminais Lopes						
Fase	Θ	$d_{real}(km)$	$d_{butter}(km)$	$erro_{butter}(\%)$	$d_{DS}(km)$	$erro_{DS}(\%)$
A	90°	20	20,36	0,18	20,05	0,025
A	90°	30	27,72	1,14	30,55	0,275
A	90°	40	37,52	1,24	38,75	0,625

Tabela 5.6. Análise comparativa com filtros DS e de Butterworth

Método IV: Dois terminais Gilany						
Fase	Θ	$d_{real}(km)$	$d_{butter}(km)$	$erro_{butter}(\%)$	$d_{DS}(km)$	$erro_{DS}(\%)$
A	90°	20	20,36	0,18	20,05	0,025
A	90°	30	28,72	0,64	30,66	0,33
A	90°	40	37,52	1,24	40,58	0,29

Tabela 5.7. Análise comparativa com filtros DS e de Butterworth

Método V: Um terminal clássico						
Fase	Θ	$d_{real}(km)$	$d_{butter}(km)$	$erro_{butter}(\%)$	$d_{DS}(km)$	$erro_{DS}(\%)$
A	90°	20	20,51	0,255	20,51	0,255
A	90°	30	29,3	0,35	30,76	0,380
A	90°	40	39,55	0,225	40,58	0,29

Tabela 5.8. Análise comparativa com filtros DS e de Butterworth

Método VI: Um terminal com terra LIU						
Fase	Θ	$d_{real}(km)$	$d_{butter}(km)$	$erro_{butter}(\%)$	$d_{DS}(km)$	$erro_{DS}(\%)$
A	30°	20	18,79	0,605	18,79	0,605
A	60°	30	30,53	0,265	28,19	0,905
A	60°	140	138,58	0,710	138,58	0,710
A	90°	180	180,86	0,430	180,86	0,430

Considerando as imprecisões dadas pela detecção utilizando o filtro Butterworth, conforme o esperado, a maioria dos métodos de localização de falta obtiveram uma melhora na localização ao utilizar o filtro DS, este que apresentou erros muito baixos de localização. Considerando agora a influência de imprecisões na localização das ondas viajantes refletidas, pode-se observar uma melhora muito significativa nos métodos III, IV e V, ao utilizarem o filtro DS, métodos esses que dependem do primeiro instante das ondas viajantes refletidas vistas pelo terminal local. Porém, vale ressaltar que em alguns casos para diferentes ângulos de incidência da onda a atenuação foi grande o bastante para não apresentar resultados satisfatórios de localização, mesmo com a utilização do filtro DS e uma janela de busca maior na pré localização da falta.

Tal análise confirma a grande influência que o filtro DS apresenta na detecção de ondas viajantes muito atenuadas, o que faz dos métodos de localização de falta que não dependem das ondas refletidas mais confiáveis, diminuindo as fontes de erro.

5.4 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA INTERPOLAÇÃO POR PARÁBOLA

Nessa etapa, a interpolação por parábola é usada como método de cálculo do tempo de chegada. O algoritmo faz o uso de 100 amostras para interpolação e seleciona algumas antes do pico e algumas amostras depois do pico. Em seguida, utiliza-se um processo de interpolação para ajustar uma parábola aos pontos selecionados, incluindo a amostra máxima, a qual é usada para calcular o tempo de chegada usando a parábola de melhor ajuste. Avalia-se aqui a influência da interpolação por parábola sobre o desempenho dos métodos implementados. Foram considerados os parâmetros apresentados anteriormente nas Tabelas 5.1, 5.2 para a obtenção dos resultados das localizações de cada método com os seus respectivos dados interpolados, tal interpolação foi feita tanto para o filtro DS quanto para o filtro digital passa-altas Butterworth.

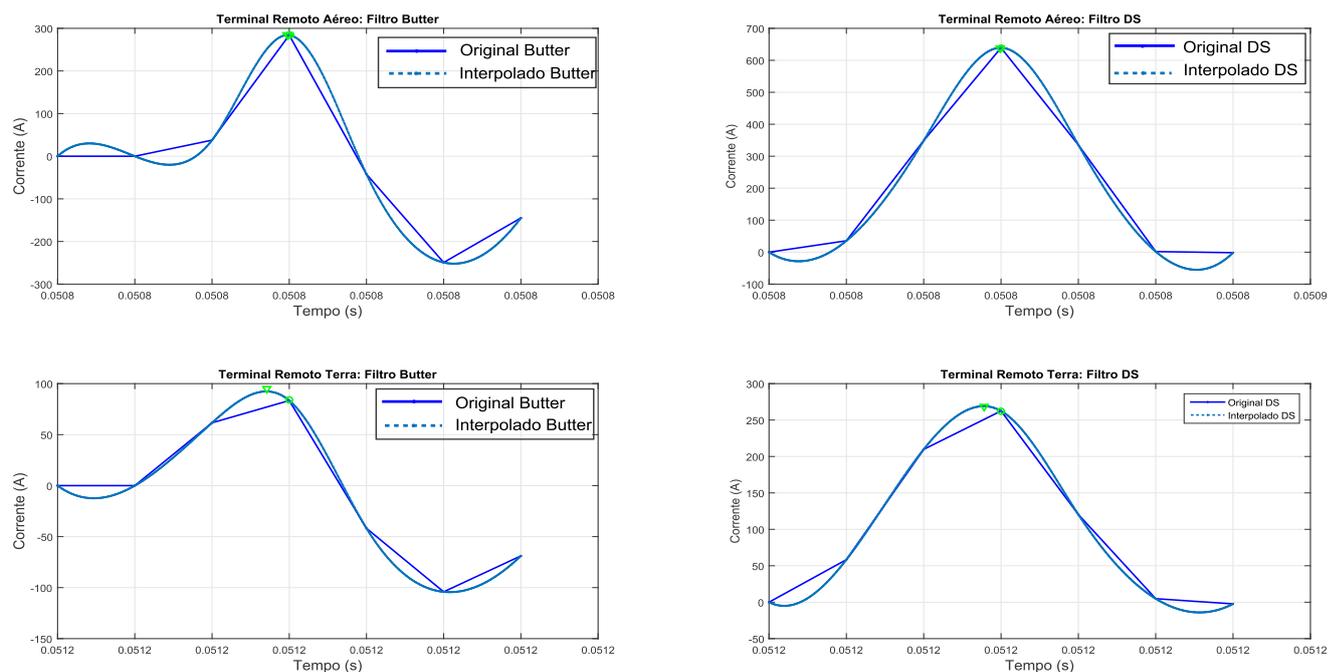


Figura 5.5. Comparação entre os filtros DS e de Butterworth para extração e detecção das Ondas Viajantes por Interpolação por Parábola nos Modos Aéreo e Terra.

A Figura 5.5 expõe a facilidade de utilizar a interpolação por parábola no sinal extraído pelo filtro DS que supera a maioria dos efeitos de distorção do sinal e fornece excelente interpolação entre amostras (SCHWEITZER III; MARX., 2014).

A seguir são apresentadas tabelas comparativas com o percentual de erro dos resultados com interpolação e sem interpolação para ambos os filtros.

5.4.1 Influência da Interpolação por Parábola no filtro de Butterworth

Os resultados dessa seção são referentes à interpolação considerando os sinais de corrente extraídos pelo o filtro passa-altas Butterworth.

Tabela 5.9. Análise comparativa dos sinais interpolados: Butterworth e Butterworth Interpolado

Método I: Dois terminais Clássico						
Fase	Θ	$d_{real}(km)$	$d_{butter}(km)$	$erro_{butter}(\%)$	$d_{butter-interp}(km)$	$erro_{butter-interp}(\%)$
A	30°	20	20,17	0,085	20,04	0,020
A	60°	30	28,22	0,890	31,76	0,880
A	30°	80	80,23	0,115	80,04	0,020
A	60°	140	140,28	0,140	140,05	0,025
A	90°	180	179,83	0,085	179,96	0,020

Tabela 5.10. Análise comparativa dos sinais interpolados: Butter e Butter Interpolado

Método II: Dois terminais com terra Lopes						
Fase	Θ	$d_{real}(km)$	$d_{butter}(km)$	$erro_{butter}(\%)$	$d_{butter-interp}(km)$	$erro_{butter-interp}(\%)$
A	30°	20	18,82	0,590	19,55	0,220
A	60°	30	30,95	0,475	29,37	0,31
A	60°	80	82,76	1,380	78,11	0,945
A	60°	140	138,82	0,590	136,08	1,960
A	90°	180	181,18	0,590	180,45	0,225

Tabela 5.11. Análise comparativa dos sinais interpolados: Butter e Butter Interpolado

Método III: Dois terminais Lopes						
Fase	Θ	$d_{real}(km)$	$d_{butter}(km)$	$erro_{butter}(\%)$	$d_{butter-interp}(km)$	$erro_{butter-interp}(\%)$
A	90°	20	20,36	0,18	20,05	0,04
A	90°	30	27,72	1,14	29,86	0,6
A	90°	40	37,52	1,24	38,83	0,585

Tabela 5.12. Análise comparativa dos sinais interpolados: Butter e Butter Interpolado

Método IV: Dois terminais Gilany						
Fase	Θ	$d_{real}(km)$	$d_{butter}(km)$	$erro_{butter}(\%)$	$d_{butter-interp}(km)$	$erro_{butter-interp}(\%)$
A	90°	20	20,36	0,18	20,05	0,69
A	90°	30	28,72	0,64	29,86	0,33
A	90°	40	37,52	1,24	39,31	0,345

Tabela 5.13. Análise comparativa dos sinais interpolados: Butter e Butter Interpolado

Método V: Um terminal clássico						
Fase	Θ	$d_{real}(km)$	$d_{butter}(km)$	$erro_{butter}(\%)$	$d_{butter-interp}(km)$	$erro_{butter-interp}(\%)$
A	90°	20	20,51	0,255	20,07	0,35
A	90°	30	29,3	0,35	30,14	0,07
A	90°	40	39,55	0,225	40,95	0,345

Tabela 5.14. Análise comparativa dos sinais interpolados: Butter e Butter Interpolado

Método VI: Um terminal com terra LIU						
Fase	Θ	$d_{real}(km)$	$d_{butter}(km)$	$erro_{butter}(\%)$	$d_{butter-interp}(km)$	$erro_{butter-interp}(\%)$
A	30°	20	18,79	0,605	19,73	0,135
A	60°	30	30,53	0,265	30,33	0,165
A	60°	140	138,58	0,710	139,85	0,075
A	90°	180	180,86	0,430	180,72	0,360

5.4.2 Influência da Interpolação por Parábola no Filtro DS

Os resultados dessa seção são referentes à interpolação considerando os sinais de corrente extraídos pelo o filtro DS.

Tabela 5.15. Análise comparativa dos sinais interpolados: DS e DS Interpolado

Método I: Dois terminais Clássico						
Fase	Θ	$d_{real}(km)$	$d_{DS}(km)$	$erro_{DS}(\%)$	$d_{DS-interp}(km)$	$erro_{DS-interp}(\%)$
A	30°	20	20,17	0,085	20,02	0,010
A	60°	30	30,42	0,210	30,04	0,020
A	30°	80	80,23	0,115	80,03	0,015
A	60°	140	140,28	0,140	140,03	0,015
A	90°	180	179,83	0,085	179,98	0,010

Tabela 5.16. Análise comparativa dos sinais interpolados: DS e DS Interpolado

Método II: Dois terminais com terra Lopes						
Fase	Θ	$d_{real}(km)$	$d_{DS}(km)$	$erro_{DS}(\%)$	$d_{DS-interp}(km)$	$erro_{DS-interp}(\%)$
A	30°	20	18,82	0,590	19,93	0,035
A	60°	30	28,24	0,880	30,06	0,030
A	60°	40	41,38	0,690	40,25	0,145
A	90°	180	181,18	0,590	180,07	0,035

Tabela 5.17. Análise comparativa dos sinais interpolados: DS e DS Interpolado

Método III: Dois terminais Lopes						
Fase	Θ	$d_{real}(km)$	$d_{DS}(km)$	$erro_{DS}(\%)$	$d_{butter-DS}(km)$	$erro_{DS-interp}(\%)$
A	90°	20	19,05	0,475	19,37	0,315
A	90°	30	30,55	0,275	30,69	0,345
A	90°	40	38,75	0,625	39,04	0,480

Tabela 5.18. Análise comparativa dos sinais interpolados: DS e DS Interpolado

Método IV: Dois terminais Gilany						
Fase	Θ	$d_{real}(km)$	$d_{DS}(km)$	$erro_{DS}(\%)$	$d_{butter-DS}(km)$	$erro_{DS-interp}(\%)$
A	90°	20	20,44	0,22	19,37	0,315
A	90°	30	30,66	0,33	30,69	0,07
A	90°	40	40,58	0,29	39,04	0,29

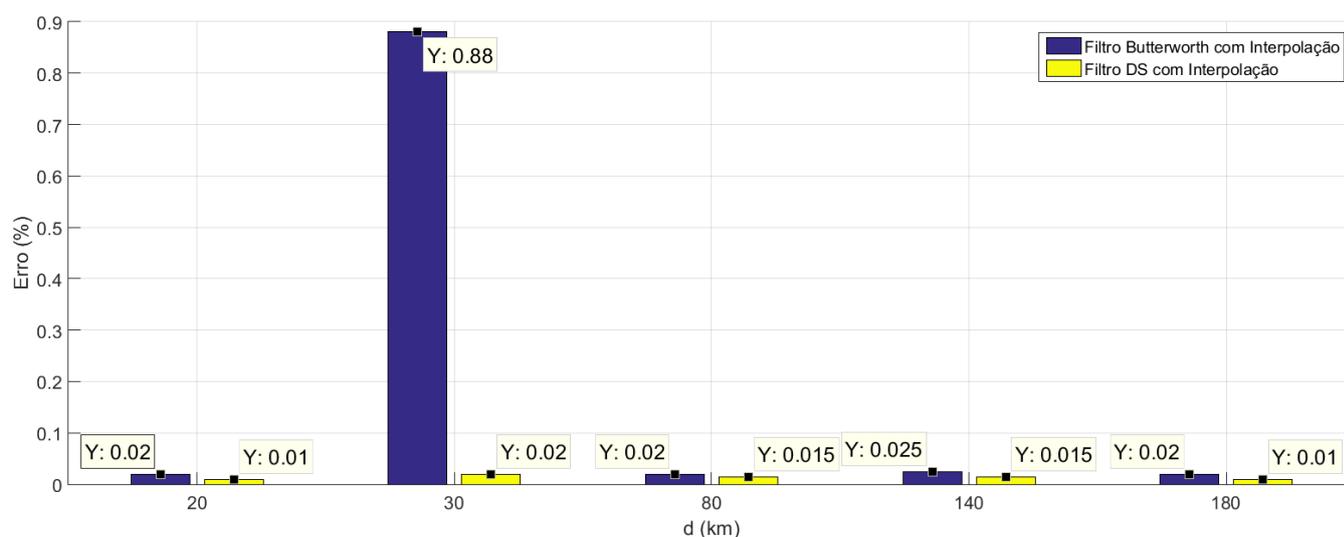
Tabela 5.19. Análise comparativa dos sinais interpolados: DS e DS Interpolado

Método V: Um terminal clássico						
Fase	Θ	$d_{real}(km)$	$d_{DS}(km)$	$erro_{DS}(\%)$	$d_{DS-interp}(km)$	$erro_{DS-interp}(\%)$
A	90°	20	20,51	0,255	20,90	0,045
A	90°	30	30,76	0,380	29,95	0,025
A	90°	40	41,01	0,505	40,85	0,345

Tabela 5.20. Análise comparativa dos sinais interpolados: DS e DS Interpolado

Método VI: Um terminal com terra LIU						
Fase	Θ	$d_{real}(km)$	$d_{DS}(km)$	$erro_{DS}(\%)$	$d_{DS-interp}(km)$	$erro_{DS}(\%)$
A	30°	20	18,79	0,605	19,96	0,020
A	60°	30	28,19	0,905	30,16	0,080
A	60°	140	138,58	0,710	140,04	0,020
A	90°	180	180,86	0,430	180,34	0,170

As Figuras a seguir mostram a percentagem de erro com a utilização dos sinais interpolados em cada um dos métodos avaliados, onde é possível verificar a vantagem do uso do filtro DS:

**Figura 5.6.** Análise comparativa dos sinais interpolados: DS Interpolado e Butter Interpolado. Método I: Dois terminais Clássico.

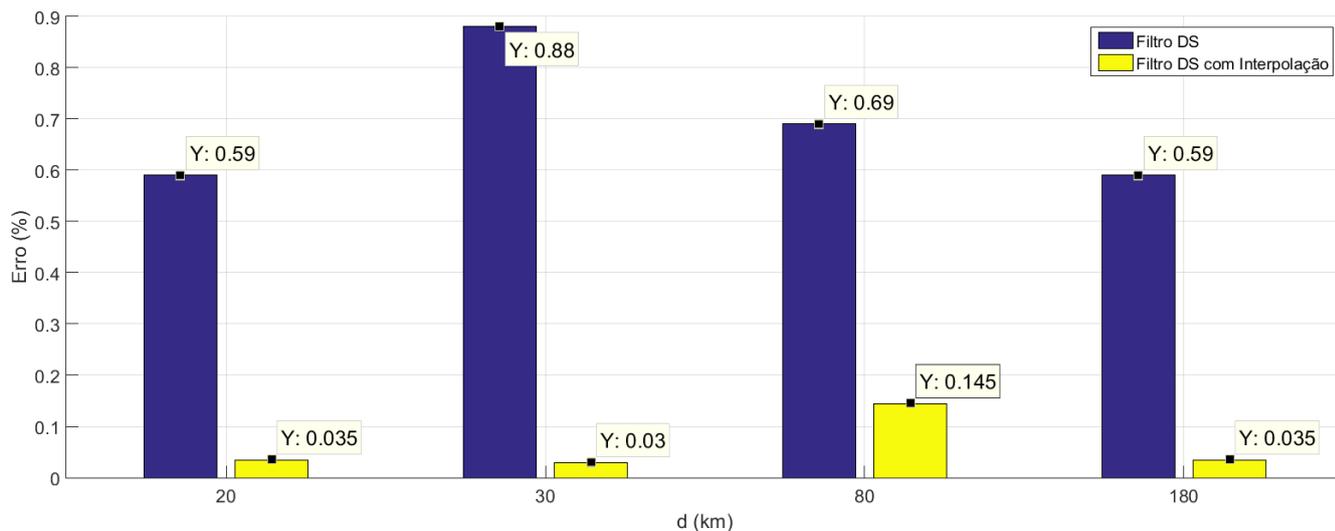


Figura 5.7. Análise comparativa dos sinais interpolados:DS Interpolado e Butter Interpolado.Método II: Dois terminais com terra Lopes.

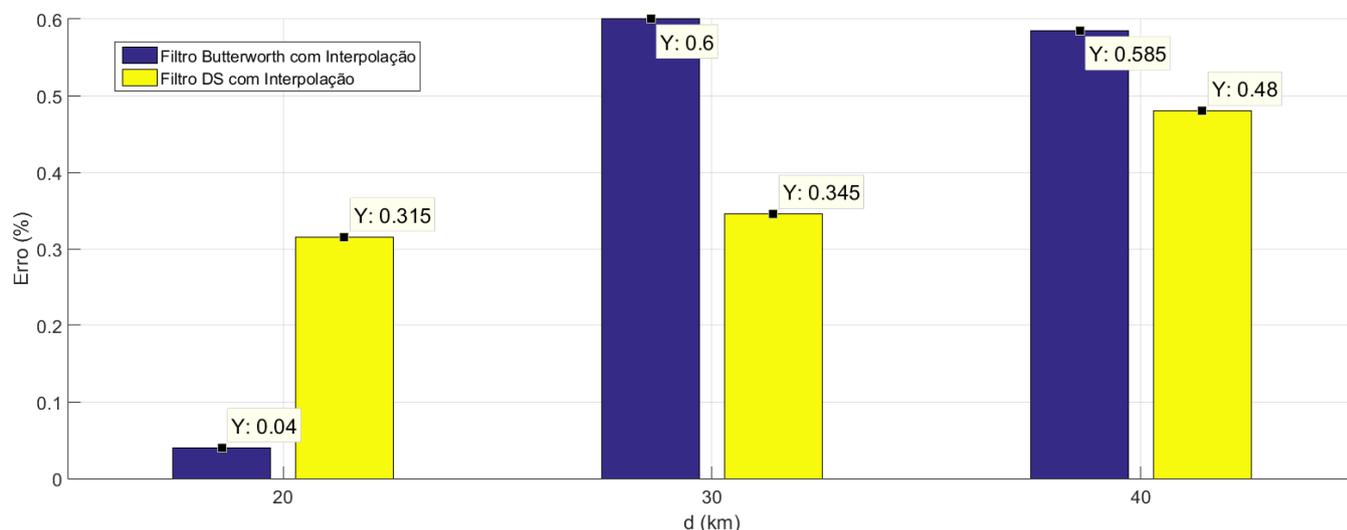


Figura 5.8. Análise comparativa dos sinais interpolados:DS Interpolado e Butter Interpolado.Método III: Dois terminais Lopes.

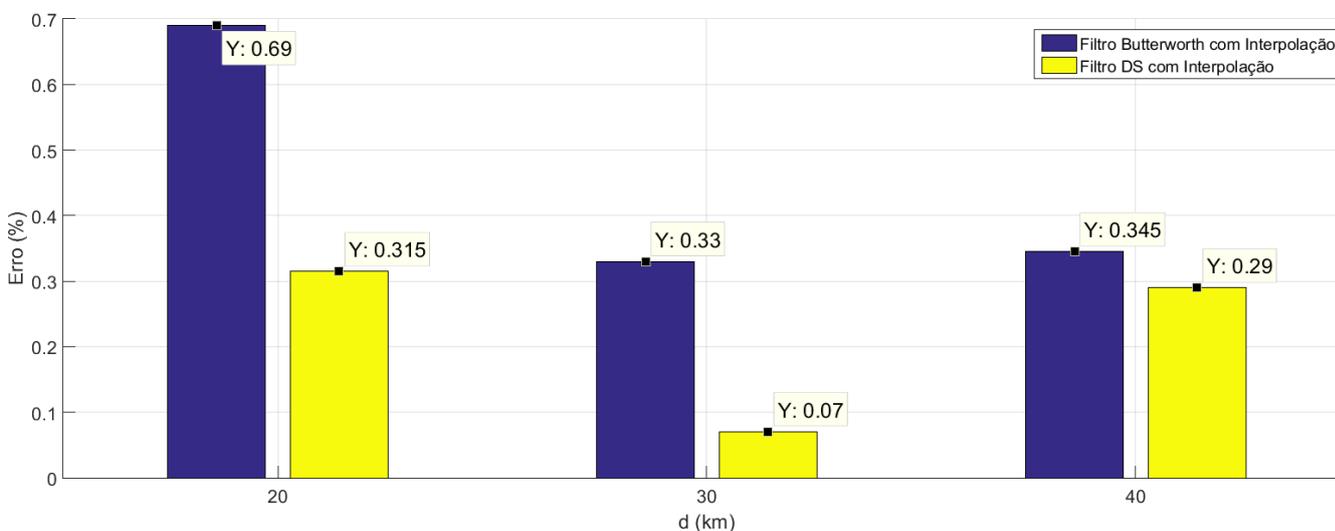


Figura 5.9. Análise comparativa dos sinais interpolados:DS Interpolado e Butter Interpolado.Método IV: Dois terminais Gilany.

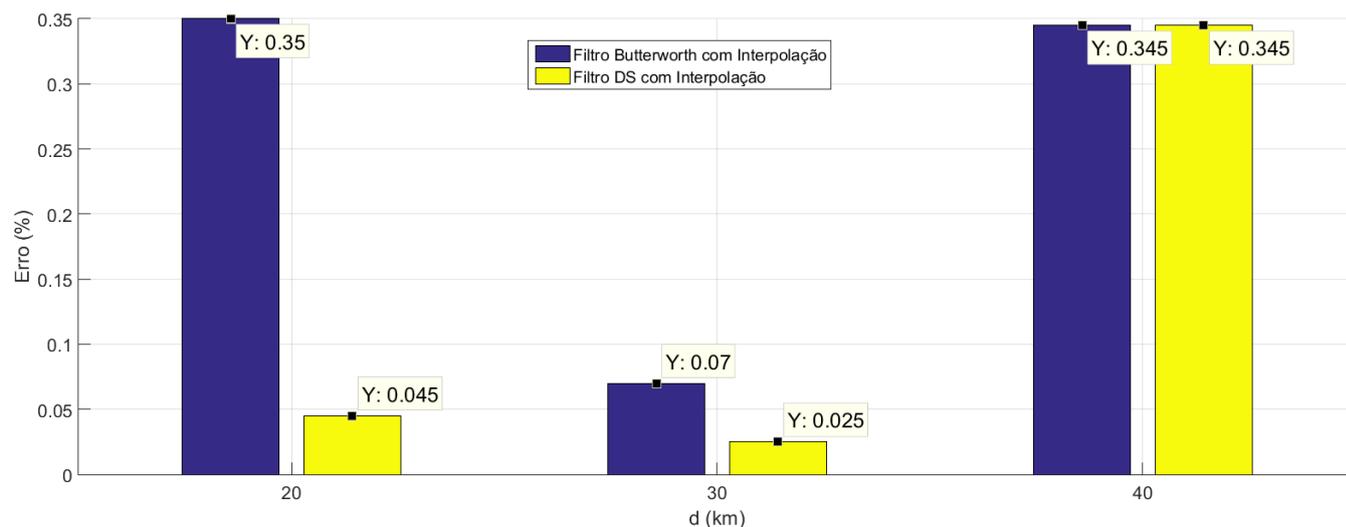


Figura 5.10. Análise comparativa dos sinais interpolados:DS Interpolado e Butter Interpolado.Método V: Um terminal clássico.

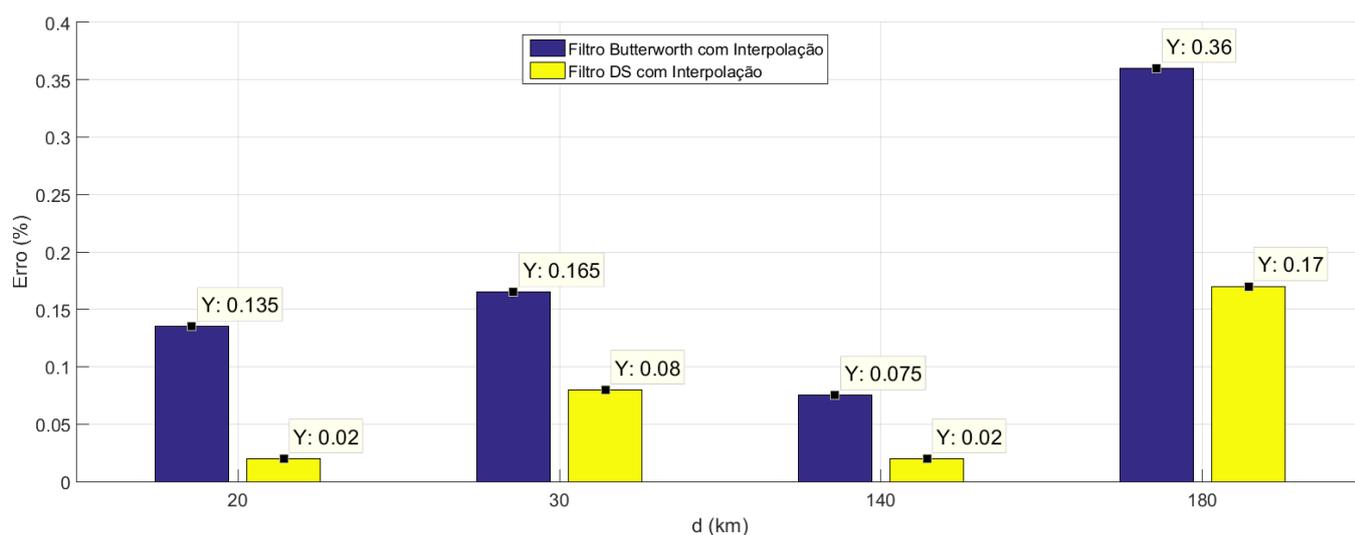


Figura 5.11. Análise comparativa dos sinais interpolados:DS Interpolado e Butter Interpolado.Método VI: Um terminal com terra LIU

Na Figura 5.12 são apresentados os erros percentuais obtidos para faltas AT na linha modelada, com resistências de falta igual a 1Ω , e diferentes ângulos de incidência. Para todos os casos avaliados, uma menor taxa de amostragem os efeitos da interpolação por parábola foram mais evidentes, motivo este de ter sido simulados apenas casos com frequência de amostragem de 200 kHz. Além disso, para melhor análise, é considerado no gráfico resultados com e sem interpolação por parábola. Para os métodos III e IV foram considerados apenas os resultados que apresentaram maior relevância, sendo então desconsiderados aqueles que não obtiveram muitas diferenças na utilização do filtro DS e do filtro passa-altas Butterworth.

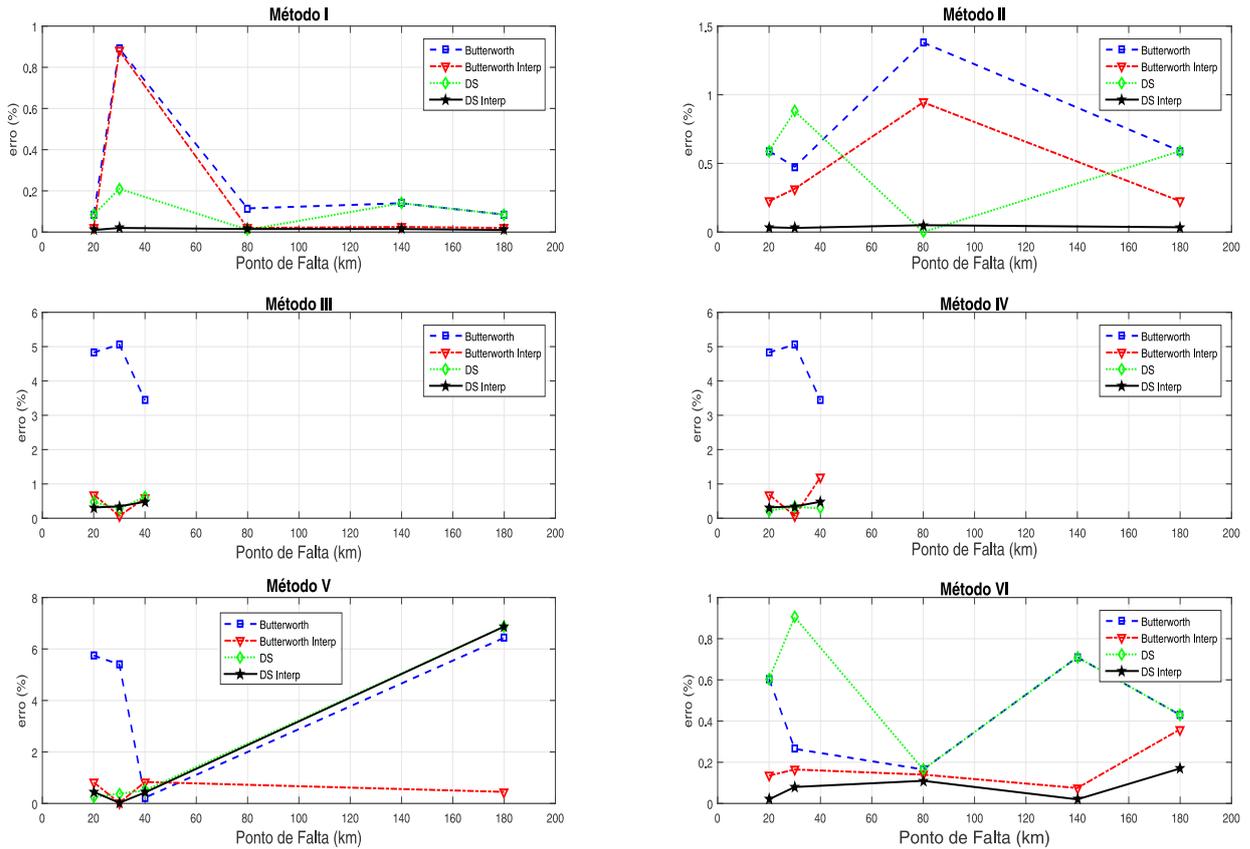


Figura 5.12. Análise da Influência do Filtro DS e da Interpolação por Parábola.

Por meio dos gráficos da Figura 5.12 e das tabelas apresentadas anteriormente, é possível inferir a vantagem de se utilizar o filtro DS sobre o Butterworth e a vantagem de se utilizar a interpolação por parábola.

O filtro Butterworth se mostrou ser melhor do que o DS em alguns casos muito específicos, como no método II e IV para as distâncias de falta de 30 e 40 km, com ângulos de incidência de 60° e 30° respectivamente, pois ambos os métodos utilizam o instante de tempo de detecção no modo terra, t_{L0} , na formulação da localização de falta. Os outros métodos não apresentaram tal resultado, visto que não utilizam desses dados em seus equacionamentos. Por outro lado, tais erro de localização nesses métodos foram melhor compensados pela interpolação por parábola, isso ocorreu não só com o filtro DS, apresentando um erro maior, mas para todos os outros casos sem interpolação, ou seja, quão maior foi a porcentagem de erro, mais efetiva foi a interpolação por parábola.

Analisando a influência do filtro DS na localização de faltas, fica claro pela imagem acima que os resultados obtidos através da interpolação por parábola com a utilização de tal filtro na

extração de sinais apresentaram, conforme o esperado, erros de localização menores em todos os métodos simulados, com exceção do método V, que por requerer a detecção de ondas refletidas muito atenuadas em alguns casos, comprometeu a interpolação por parábola desses sinais, não apresentando melhoras na detecção do instante de tempo, o que comprometeu a localização da falta.

Por fim, dos resultados obtidos, percebeu-se que todas as técnicas avaliadas não se mostraram influenciadas com a variação da resistência de falta R_f , e foram pouco influenciadas pelo ângulo de incidência Θ devido ao limiar utilizado, uma vez que apenas os métodos II e IV apresentaram variações no desempenho, devido a atenuação das ondas refletidas. O método I, de dois terminais clássico, não apresentou melhoras muito significativas com a interpolação por parábola, visto que a detecção utilizando tanto o filtro DS quanto o filtro Butterworth foi muito efetiva, mas ainda assim tal método é dependente dos parâmetros da linha, assim como o método VI e V, o primeiro que por sua vez depende não só da velocidade de propagação do modo aéreo mas também do terra, limitando a localização de falta para faltas com terra, e o segundo que além de depender dos parâmetros da linha ainda depende da detecção de frentes de ondas refletidas, o que é uma desvantagem em relação a outros métodos de localização de faltas. Apesar dos métodos III, IV e V dependerem da detecção de tais frente de ondas refletidas, apresentaram erros grandes apenas quando se utilizou o sinal filtrado pelo filtro Butterworth sem interpolação, com exceção do método V que apresentou erros altos também para o filtro DS e interpolado DS na localização do ponto de falta em 180 km devido a dificuldade da detecção e interpolação de ondas refletidas muito atenuadas, resultados estes já esperados de acordo com a literatura.

CONCLUSÃO E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho, avaliou-se o desempenho de diferentes métodos de localização de falta baseados na teoria de ondas viajantes. Tendo em vista a importância da detecção e localização de faltas na linha de transmissão, os métodos de localização baseados em ondas viajantes vêm se mostrando como uma alternativa interessante em termos técnicos e econômicos. A avaliação e comparação entre métodos de localização é ainda um tópico que se mostra carente em seu estado da arte. Visto a importância e eficiência comprovada na literatura dos métodos baseados em ondas viajantes, este trabalho mostrou a comparação e avaliação entre tais métodos de localização, mostrando a influência do filtro DS e da interpolação por parábola, a qual foi benéfica para aprimorar as estimativas na localização da falta em uma linha de transmissão de 500 kV.

No Capítulo 2 foi realizado um levantamento acerca do estado da arte da visão geral da localização de falta e da localização de faltas pelos métodos baseados em ondas viajantes. Mostrou-se que o estudo e busca de novos métodos de localização de faltas por ondas viajantes é tendência mundial, visto que é comprovado a superioridade da precisão da localização sobre outros métodos.

Em seguida, no Capítulo 3, foram apresentados os principais fundamentos da teoria da localização de faltas por métodos de localização baseados em ondas viajantes. Foi apresentado os principais tipos de faltas em linhas de transmissão e como são geradas ondas viajantes a partir de tais interrupções. Mostrou-se também como são classificados os métodos de localização, onde os localizadores classificados como tipo D são os mais comuns, pois não dependem da detecção de ondas viajantes refletidas, porém dependem da boa sincronização de dados para comunicação entre os terminais monitorados. Além disso, mostrou-se todo equacionamento e a importância da análise modal para implementação dos algoritmos, bem como a detecção de

transientes incidentes e refletidos, mostrando os principais problemas encontrados na detecção e sua influência na confiabilidade do algoritmo. Por fim, mostrou-se as principais fontes de erros, as quais definem a precisão dos métodos avaliados.

No Capítulo 4, descreveu-se os métodos analisados, apresentando as vantagens e desvantagens de cada um, assim como seus equacionamentos e as dificuldades apresentadas em implementar cada um dos algoritmos.

Por fim, no Capítulo 5, uma análise comparativa entre métodos de localização de faltas baseados na teoria de ondas viajantes é apresentada. A linguagem MODELS do ATP foi utilizada para simular registros oscilográficos em uma linha de transmissão de 500 kV, modelado a partir de parâmetros reais de uma LT, variou-se o ângulo de incidência da falta no terminal monitorado, a distância do ponto de falta e a frequência de amostragem, que por sua vez influenciaram na precisão de alguns métodos de localização implementados. Através dessa análise, confirmaram-se as vantagens da utilização do filtro DS na extração das ondas viajantes, o que facilita a detecção do transiente no momento da incidência e o uso da interpolação por parábola, otimizando a localização do ponto de falta.

Dos resultados obtidos, verificou-se também a influência da interpolação por parábola em cada um dos métodos avaliados, a qual para todos os casos se mostrou ser mais efetiva para uma frequência de amostragem menor. Para os métodos que utilizam-se de ondas refletidas, devido à atenuação sofrida por estas de acordo com o ângulo de incidência, percebe-se que a melhora decorrente da interpolação por parábola não se mostra evidente. Por fim, todos os métodos se mostraram viáveis e proporcionais ao tamanho da linha, confirmando uma das principais vantagens dos métodos baseados em ondas viajantes sobre os métodos convencionais.

No geral, os métodos avaliados mostraram-se bastante eficazes na estimativa da localização da falta, confirmando então a vantagem da utilização da teoria de ondas viajantes. Assim, como continuação dos estudos realizados neste trabalho, são sugeridas as seguintes propostas de trabalhos futuros:

- Avaliação comparativa de outros métodos de localização baseados na teoria de ondas viajantes;
- Avaliação da influência da interpolação por parábola utilizando diferentes técnicas de detecção;

- Estudo comparativo considerando diferentes métodos de filtragem do sinal.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, J. E.; GROSS., G. J. A method for locating faults on overhead transmission lines by means of high frequency. In: EDISON ELECTRIC INSTITUTE BULLETIN. [S.l.], 1935. v. 3. Nenhuma citação no texto.
- ALMEIDA, W. G.; DAMASCENO, W. F. Circuitos polifasicos. In: FINATEC. [S.l.], 1995. Citado na página 10.
- ANDERSON, P. Power system protection. In: IEEE PRESS SERIES ON POWER ENGINEERING, WILEY INTERSCIENCE,. Piscataway, NJ - USA, 1999. Citado na página 22.
- BEWLEY, L. V. Traveling waves on transmission systems. transactions of the american institute of electrical engineers. In: . [S.l.: s.n.], 1931. Citado 3 vezes nas páginas 7, 11, and 12.
- BRAHMA, S. M.; GIRGIS, A. A. Fault location on a transmission line using synchronized voltage measurements. In: IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY. [S.l.], 2004. v. 19. Citado na página 6.
- CLARKE, E. *Circuit Analysis of AC Power Systems*. Schenectady, NY: General Electric, 1950. Citado na página 17.
- COSTA, F. B.; SOUZA, B. A. Fault-induced transient analysis for real-time fault detection and location in transmission lines. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEMS TRANSIENTS. Delft, Netherlands, 2011. Citado na página 8.
- DOMMEL, H. W.; MICHELS, J. High-speed relaying using traveling wave transient analysis. In: IEEE PES WINTER MEETING. New York, NY, 1978. Nenhuma citação no texto.
- DUPUIS, H. P.; JACOBS., W. E. Fault location and relay performance analysis by automatic oscillographs. In: TRANSACTIONS OF THE AMERICAN INSTITUTE OF ELECTRICAL ENGINEERS. [S.l.], 1946. v. 65. Nenhuma citação no texto.
- ERIKSSON, L.; SAHA, M. M.; ROCKEFELLER., G. D. An accurate fault locator with compensation for apparent reactance in the fault resistance resulting from remote-end infeed. In: IEEE TRANS. POWER APP. SYST. [S.l.], 1985. v. 3. Citado na página 6.
- FENG, Z.; JUN, L.; LI, Z.; ZHIHAO, Y. A new fault location method avoiding wave speed and based on traveling waves for ehv transmission line. In: THIRD INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRIC UTILITY DEREGULATION AND RESTRUCTURING AND POWER TECHNOLOGIES (DRPT 2008). [S.l.], 2008. Citado na página 8.
- GALE, P.; CROSSLEY, P.; BINGYIN, X.; YAOZHONG, G.; CORY, B.; BARKER, J. Fault location based on travelling waves. In: FIFTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON DEVELOPMENTS IN POWER SYSTEM PROTECTION. [S.l.], 1993. Citado 6 vezes nas páginas ii, 7, 15, 27, 28, and 29.

- GILANY, M.; IBRAHIM, D. K.; ELDIN., E. S. T. Traveling-wave-based fault-location scheme for multiend-aged underground cable system. In: IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY. [S.l.], 2007. Citado 4 vezes nas páginas ii, 8, 33, and 34.
- GLOVER, J. D.; SARMA, M. S.; OVERBYE, T. J. *Power System Analysis and Design*. 5. ed. [S.l.]: CENGAGE Learning, 2011. Citado 3 vezes nas páginas 10, 17, and 18.
- GOPALAKRISHNAN, A.; KEZUNOVIC, M.; MCKENNA, S. M.; HAMAI, D. M. Fault location using the distributed parameter transmission line model. In: IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY. [S.l.], 2000. v. 15. Citado na página 6.
- H, L.; M., M. A. Gps travelling wave fault locator systems: Investigation into the anomalous measurements related to lightning strikes. In: IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY. [S.l.], 1996. Nenhuma citação no texto.
- HEDMAN, D. E. Propagation on overhead transmission lines i: Theory of modal analysis. In: IEEE TRANSACTIONS ON POWER APPARATUS AND SYSTEMS. [S.l.], 1965. v. 84. Nenhuma citação no texto.
- HOLBECK., J. I. A simple method for locating ground faults. In: ELECTRICAL ENGINEERING. [S.l.], 1999. v. 63. Nenhuma citação no texto.
- JIAN, Q.; XIANGXUN, C.; JIANCHAO, Z. Travelling wave fault location of transmission line using wavelet transform. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEM TECHNOLOGY, 1998 (POWERCON'98). [S.l.], 1998. v. 1. Citado na página 8.
- KINDERMANN, G. *Proteção de Sistemas Elétricos de Potência*. 2. ed. Santa Catarina: Edição do Autor, 2005. v. 1. Citado na página 1.
- LIU, Y.; SHENG, G.; HE, Z.; JIANG., X. A traveling wave fault location method for earth faults based on mode propagation time delays of multi-measuring points. In: PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY. [S.l.], 2012. Citado 7 vezes nas páginas ii, iv, 8, 17, 30, 36, and 37.
- LOPES, F.; SILVA, K.; COSTA, F. B.; DANTAS, K. Accurate two-terminal transmission line fault location using traveling waves. In: IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY. [S.l.], 2017. Citado 7 vezes nas páginas ii, iii, 24, 25, 31, 32, and 33.
- LOPES, F. V. *Localização de Falhas em Tempo Real Baseada na Teoria de Ondas Viajantes Usando Dados N/ ao Sincronizados de Dois Terminais*. 191 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, Brasil, mai. 2014. Citado 2 vezes nas páginas iii and 12.
- LOPES, F. V. Settings-free traveling-wave-based earth fault location using unsynchronized two-terminal data. In: IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY. [S.l.], 2016. v. 31. Citado 4 vezes nas páginas ii, iii, 9, and 30.
- LOPES, F. V.; FERNANDES, D.; NEVES, W. A traveling-wave detection method based on park's transformation for fault locators. In: IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY. [S.l.], 2016. v. 28. Nenhuma citação no texto.
- LOPES, F. V.; SILVA, K. M.; COSTA, F. B.; NEVES, W. L. A.; FERNANDES, D. Real-time traveling-wave-based fault location using two-terminal unsynchronized data. In: IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY. [S.l.], 2015. v. 3. Citado na página 8.

- LOPES, F. V.; SILVA, K. M.; JR., E. J. S. L.; OLIVEIRA, A. E. Análise de sensibilidade paramétrica da proteção diferencial de linhas baseada em ondas viajantes. In: XIII SEMINÁRIO TÉCNICO DE PROTEÇÃO E CONTROLE. [S.l.], 2016. Citado 2 vezes nas páginas iii and 23.
- M, M. P. J. V. A digital signal processing technique utilising vlf radio spectra for the detection of power system arcing faults. In: 13TH POWER SYSTEMS COMPUTATIONS CONFERENCE. [S.l.], 1999. Nenhuma citação no texto.
- MAMEDE, F. e. D. R. M. João. *Proteção de Sitemas Elétricos de Potência*. [S.l.]: LTC, 2011. Citado na página 1.
- MARIHART, D. J.; HAAGENSON, N. W. Automatic fault locator for bonneville power administration. In: IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY SUMMER MEETING. San Francisco, CA, 1972. Citado 2 vezes nas páginas iii and 27.
- NOVOSEL D. HART, Y. H. D.; MYLLYMAKI., J. System for locating faults and estimating fault resistance in distribution networks with tapped loads. In: . [S.l.: s.n.], 1998. Citado na página 6.
- RORDEN., H. L. *Visual Flashover Indicator*. [S.l.], 1957. Nenhuma citação no texto.
- SACHDEV, M.; AGARWAL., R. A technique for estimating transmission line fault locations from digital impedance relay measurements. In: IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY. [S.l.], 1988. v. 3. Citado na página 6.
- SAHA, M. M.; IZYKOWSKI, J.; E.ROSOLOWSKI. *Fault Location on Power Networks*. London, U.K.: Springer, 2010. Citado 13 vezes nas páginas 2, 4, 5, 6, 10, 11, 12, 16, 24, 25, 26, 30, and 31.
- SANT, M.; PAITHANKAR., Y. Online digital fault locator for overhead transmission line. In: . [S.l.: s.n.], 1979. Nenhuma citação no texto.
- SCHWEITZER, E. O.; GUZMÁN, A.; MYNAM, M. V.; SKENDZIC, V.; KASZTENNY, B.; GALLACHER, C.; MARX, S. Accurate single-end fault location and line-length estimation using traveling waves. In: 13TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON DEVELOPMENTS IN POWER SYSTEM PROTECTION. [S.l.], 2016. Citado 2 vezes nas páginas 9 and 24.
- SCHWEITZER, I. E. O. A review of impedance-based fault locating experience. In: 15TH ANNUAL WESTERN PROTECTIVE RELAY CONFERENCE. [S.l.], 1988. Citado 2 vezes nas páginas 4 and 6.
- SCHWEITZER, I. E. O.; KASZTENNY, B.; GUZMA, A.; SKENDZIC, V.; MYNAM, M. V. Speed of line protection - can we break free of phasor limitations? In: 41nd ANNUAL WESTERN PROTECTIVE RELAY CONFERENCE. Washington, USA, 2014. Citado na página 23.
- SCHWEITZER, I. E. O.; KASZTENNY, B.; MYNAM, M. V. Performance of time-domain line protection elements on real-world faults. In: 42nd ANNUAL WESTERN PROTECTIVE RELAY CONFERENCE. Washington, USA, 2015. Citado 3 vezes nas páginas iii, 22, and 23.

SCHWEITZER III, A. G. M. V. M. V. S. B. K. E. O.; MARX., S. Locating faults by the traveling waves they launch. In: TEXAS AM CONF. FOR PROTECTIVE RELAY ENGINEERS. [S.l.], 2014. Citado 12 vezes nas páginas iii, iv, 5, 7, 12, 15, 21, 24, 28, 29, 35, and 45.

STEVENS, R. F.; STRINGFIELD., T. W. A transmission line fault locator using fault-generated surges. In: TRANSACTIONS OF THE AMERICAN INSTITUTE OF ELECTRICAL ENGINEERS. [S.l.], 1948. Citado 2 vezes nas páginas 4 and 7.

TAKAGI, T.; YAMAKOSHI, Y.; YAMAURA, M.; KONDOW, R.; MATSUSHIMA., T. Development of a new type fault locator using the one-terminal voltage and current data. In: POWER APPARATUS AND SYSTEMS. [S.l.], 1982. Citado na página 6.

T.W. MARIHAT D.J., S. R. S. Fault location methods for overhead lines. In: TRANSACTIONS OF THE AMERICAN INSTITUTE OF ELECTRICAL ENGINEERS. [S.l.], 1957. Citado na página 7.

WANG, B.; DONG, X.; BO, Z.; KLIMEK, A. Impedance phase faults location algorithm for drv transmission lines. In: TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXPOSITION. [S.l.], 2008. Citado na página 6.

ZIMMERMAN, K.; COSTELLO., D. Impedance-based fault location experience. In: RURAL ELECTRIC POWER CONFERENCE. [S.l.], 2006. Citado 2 vezes nas páginas 5 and 29.