

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**Localização de Falhas em Linhas de Transmissão por Ondas
Viajantes utilizando o Filtro de Savitzky-Golay**

Mateus Cândido de Castro Santos

**Itajubá, MG
2019**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Mateus Cândido de Castro Santos

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

**Área de Concentração: Proteção, Qualidade e Condi-
cionamento da Energia**

Orientador: Prof. Dr. Paulo Márcio da Silveira
Coorientador: Prof. Dr. Marcel Fernando da Costa Parentoni

Itajubá, MG
2019

Dedico este trabalho aos meus pais, Moisés e Adriana, e, à minha irmã Cynthia, com amor e admiração por sempre acreditarem em mim e nunca medirem esforços para me ajudar.

Agradecimentos

Agradeço à Deus, minha fortaleza e inspiração, que me dá forças e ilumina meus caminhos.

A minha família, em especial meus pais, Moisés e Adriana, e minha irmã Cynthia, por serem exemplos e me ajudarem nos momentos mais difíceis desta trajetória. Agradeço também à minha namorada e toda sua família pelo carinho e incentivo ao longo deste trabalho.

Ao professor Paulo Márcio da Silveira pelo trabalho de orientação, apoio e ensinamentos proporcionados. Ao professor Marcel Fernando da Costa Parentoni pela atenção e disponibilidade com que sempre fui recebido.

A todos os colegas e professores do Centro de Estudos em Qualidade da Energia e Proteção Elétrica (QMAP) da Universidade Federal de Itajubá, pelo companheirismo e pelas contribuições no desenvolvimento deste trabalho.

A Universidade Federal de Itajubá, a FAPEMIG e a CAPES, pelo apoio estrutural e financeiro.

Resumo

Este trabalho propõe o uso do filtro de Savitzky-Golay (SG) para localização de faltas em linhas de transmissão utilizando o conceito de ondas viajantes e apresenta resultados da comparação de seu desempenho contra a transformada wavelet para sinais ruidosos.

A característica dos filtros SG em lidar com sinais ruidosos mostrou, nos casos analisados, melhorar a robustez do processo de localização enquanto que um baixo esforço computacional é requerido.

Para isso, simulações computacionais foram realizadas no software MATLAB/Simulink levando em consideração dois modelos de linhas. O primeiro representa um sistema radial, enquanto que o segundo descreve um sistema interligado. Levou-se em conta, também, diversas condições de faltas. Além disso, dois métodos para a localização de faltas foram utilizados. O primeiro que utiliza dados de apenas um terminal e o segundo de dois terminais sincronizados.

Os erros em relação aos filtros são obtidos e comparados. As conclusões são apresentadas com base na exatidão dos resultados e sugestões são feitas para a melhoria dos algoritmos desenvolvidos.

Palavras-chaves: Localização de faltas, transitórios, processamento de sinais, filtro de Savitzky-Golay.

Abstract

This work proposes the use of the Savitzky-Golay (SG) filter to locate faults in transmission lines using the concept of traveling waves and presents results of the comparison of its performance against the wavelet transform for noisy signals.

The characteristic of SG filters in dealing with noisy signals has shown, in the cases analyzed, to improve the robustness of the localization process while a low computational effort is required.

For this, computational simulations were performed in MATLAB/Simulink software taking into account two models of lines. The first represents a radial system, while the second describes an interconnected system. Several fault conditions were also taken into account. In addition, two methods for locating faults were used. The first that uses data from only one terminal and the second from two terminals.

The errors regarding the filters are obtained and compared. The conclusions are presented based on the accuracy of the results and suggestions are made for the improvement of the algorithms developed.

Key-words: Fault location, transient, signal processing, Savitzky-Golay filter.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Classificação dos métodos de localização de faltas em LT's.	23
Figura 2 – Aproximação LS por interpolação polinomial utilizando SG	31
Figura 3 – (a) Transitórios na onda de tensão; (b) Obtenção das ondas viajantes através de <i>sg1</i> ; (c) Intensificação dos picos através de <i>sg1sq</i>	34
Figura 4 – Grade tempo-escala-frequência	37
Figura 5 – Decomposição de sinais utilizando AMR	39
Figura 6 – a) Ruído normalizado para media 0 e desvio padrao 1 e b) Histograma do ruído normalizado	40
Figura 7 – Onda senoidal a) sem a presença de ruído; b) com a presença de ruído.	41
Figura 8 – Diagrama de Lattice para faltas sem envolver o terra.	44
Figura 9 – Diagrama de Lattice para faltas aterradas na primeira metade da LT.	45
Figura 10 – Diagrama de Lattice para faltas aterradas na segunda metade da LT.	46
Figura 11 – Diagrama de Lattice para localização de faltas utilizando dois terminais sincronizados.	47
Figura 12 – Linha I. (a) Representação Geral, (b) Diagrama de blocos no Matlab/Simulink.	50
Figura 13 – Linha II. (a) Representação Geral, (b) Diagrama de blocos no Matlab/Simulink.	51
Figura 14 – Transformada modal em um sinal trifásico de tensão; a) Para uma falta aterrada b) Para uma falta isolada.	54
Figura 15 – Extração dos picos em um sinal com SNR de 30 dB; a) Utilizando o Filtro SG; b) Utilizando a TW.	55
Figura 16 – Detecção dos picos através do filtro SG. a) Modo Aéreo b) Modo Terra	57
Figura 17 – Detecção dos picos através do filtro TW. a) Modo Aéreo b) Modo Terra	57
Figura 18 – Saídas do filtro SG no modo aéreo para; a) o terminal A; b) o terminal B.	59
Figura 19 – Fluxograma do algoritmo de localização de faltas.	61
Figura 20 – Avaliação da performance entre os filtros para o cenário 1. (a) Linha I Método 1; (b) Linha I Método 2; (c) Linha II Método 1;(d) Linha II Método 2.	65
Figura 21 – Avaliação da performance entre os filtros para o cenário 2. (a) Linha I Método 1; (b) Linha I Método 2; (c) Linha II Método 1;(d) Linha II Método 2.	66
Figura 22 – Avaliação da performance entre os filtros para o cenário 3. (a) Linha I Método 1; (b) Linha I Método 2; (c) Linha II Método 1;(d) Linha II Método 2.	68

Figura 23 – Avaliação da performance entre os filtros para o cenário 4. (a) Linha I Método 1; (b) Linha I Método 2; (c) Linha II Método 1;(d) Linha II Método 2.	69
Figura 24 – Avaliação da performance entre os filtros para o cenário 5. (a) Linha I Método 1; (b) Linha I Método 2; (c) Linha II Método 1;(d) Linha II Método 2.	71
Figura 25 – Avaliação da performance entre os filtros para o cenário 6. (a) Linha I Método 1; (b) Linha I Método 2; (c) Linha II Método 1;(d) Linha II Método 2.	72
Figura 26 – Avaliação geral da performance entre os filtros. (a) Linha I Método 1; (b) Linha I Método 2; (c) Linha II Método 1;(d) Linha II Método 2. . .	74

Lista de tabelas

Tabela 1 – Quantidades de faltas localizadas para o cenário 1	64
Tabela 2 – Quantidades de faltas localizadas para o cenário 2	66
Tabela 3 – Quantidades de faltas localizadas para o cenário 3	67
Tabela 4 – Quantidades de faltas localizadas para o cenário 4	69
Tabela 5 – Quantidades de faltas localizadas para o cenário 5	70
Tabela 6 – Quantidades de faltas localizadas para o cenário 6	72
Tabela 7 – Quantidades de faltas localizadas no geral	73

Lista de abreviaturas e siglas

A/D	Analógico-Digital
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	Análise de Componentes Independentes
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
UNIFEI	Universidade Federal de Itajubá
AMR	Análise Multi-Resolução
ATP	Alternative Transient Program
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
COMTRADE	Common Format for Transient Data Exchange
CRLB	Cramer-Rao Lower Bound
CWT	Continuous Wavelet Transform
DSP	Digital Signal Processing
DFT	Discrete Fourier Transform
DWT	Discrete Wavelet transform
EMTP	Eletromagnetic Transient Program
EMTDC	Electromagnetic Transients including DC
FIR	Finite Impulse Response
FDRM	Fault Distance Ratio Matrix
FIMD	Fast Intrinsic Mode Decomposition
GPS	Global Positioning System
IA	Inteligência Artificial
IEC	International Electrotechnical Commission

IED	Intelligent Electronic Device
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IIR	Infinite Impulse Response
LS	Least Squares
LT	Linha de Transmissão
MVU	Minimum Variance Unbiased
PMU	Phasor Measurement Unit
PSD	Processadores de Sinais Digitais
PSCAD	Power Systems Computer Aided Design
RMS	Root Mean Square (Valor Eficaz)
RNA	Rede Neural Artificial
RTDS	Real Time Digital Simulator
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SG	Savitzky-Golay
SNR	Signal to Noise Ratio
TC	Transformador de Corrente
TEO	Teager Energy Operator
TP	Transformador de Potencial
TW	Transformada Wavelet
TWD	Transformada Wavelet para Sinais Discretos
TWC	Transformada Wavelet para Sinais Contínuos
WT	Wavelet Transform
WGN	White Gaussian Noise

Lista de símbolos

A	Ampere
a_i	Ângulo de incidência de falta.
C_m	Capacitância de sequência por unidade de comprimento da LT.
c_i	Coefficientes do polinômio de um filtro LS
$dj(k)$	Coefficientes wavelet de detalhamento
$cj(k)$	Coefficientes wavelet de aproximação
dB	Decibel
σ	Desvio Padrão
x	Distância de falta
e	Erro de localização da Falta
ε	Soma dos quadrados das diferenças
m	Grau do polinômio
f_a	Fator de Ajuste
f_d	Fator de Decaimento
$sg1$	Filtro diferenciador de primeira ordem
$sg1sq$	Filtro resultante de $sg1$ elevado ao quadrado
$h(n)$	Filtro Passa-Alta relacionado à uma dada Wavelet Mãe
$g(n)$	Filtro Passa-Baixa associado à Função Escalamento
f_z	Frequência de Amostragem
Φ	Função escalamento
ψ	Função Wavelet
Z_{cc}	Impedância de curto-circuito do Sistema Equivalente
X	Indutância por fase das fontes

L_m	Indutância de sequência por unidade de comprimento da LT.
n	Índice das amostras
Δt_i	Intervalo de tempo entre as duas primeiras subsequentes ondas do modo aéreo
Δt_e	Intervalo de tempo entre o primeiro pico do modo terra e o primeiro do modo aéreo
$limiar1_m^{sgsq}$	Limiar para capturar o primeiro pico do modo aéreo (m=1) ou terra (m=0) para o filtro SG
$limiar1_m^{TW}$	Limiar para capturar o primeiro pico do modo aéreo (m=1) ou terra (m=0) para o filtro TW
$limiar2_1^{sgsq}$	Limiar para capturar o segundo pico do modo aéreo para o filtro SG.
$limiar2_1^{TW}$	Limiar para capturar o segundo pico do modo aéreo para o filtro TW.
Linha I	Linha de Transmissão em um Sistema Radial
Linha II	Linha de Transmissão em um Sistema Interligado
A^+	Matriz pseudo inversa
\mathbf{T}	Matriz de transformação modal.
μ	Micro
N	Número Total de Amostras
M	Número de amostras para o cálculo do Limiar
a	Parâmetros de escalamento da Transformada Wavelet Contínua
b	Parâmetro de translação da Transformada Wavelet Contínua
T	Período
$p.u.$	Por unidade
$f(x)$	Polinômio de um filtro LS
P	Potência Ativa
Sec	Potência de Curto-Circuito
Q	Potência Reativa

km	Quilômetros
R	Resistência por fase das fontes
R_f	Resistência de Falta
s	Segundos
$f(n)$	Série temporal
$f(t)$	Sinal contínuo qualquer
v_s	Sinal de tensão discretizado
t	Tempo
τ	Tempo total de propagação da onda por toda LT
t_{11}	Tempo de propagação da primeira frente de onda originada no ponto de falta até o terminal A, utilizado no Método 1.
t_{12}	Tempo de propagação da segunda frente de onda que chega ao terminal, considerando-se o tempo de retorno da primeira onda até o ponto de falta e desse ponto novamente ao terminal A, utilizado no Método 1.
t'_{12}	Tempo de propagação da segunda frente de onda que chega ao terminal A considerando a refração no ponto de falta vinda do terminal B, utilizado no Método 1.
t_{A1}	Tempo que a primeira frente de onda do modo aéreo chega no terminal A, utilizado no Método 2.
t_{B1}	Tempo que a primeira frente de onda do modo aéreo chega no terminal B, utilizado no Método 2
$db4$	Tipo de wavelet mãe Daubechies número 4
v_m	Velocidade de propagação da onda viajante.
y	Vetor de dados medidos;
v_f	Vetor contendo as tensões ou as correntes no domínio de fase
v_{mod}	Vetor contendo as tensões ou as correntes no domínio modal
V	Volt
$\psi_{ab}(t)$	Wavelets filhas
$\psi(t)$	Wavelet mãe

Sumário

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Prefácio	17
1.2	Objetivo	19
1.3	Justificativa	20
1.4	Organização do trabalho	20
2	ESTADO DA ARTE - TÉCNICAS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO	22
2.1	Considerações Iniciais	22
2.2	Métodos de Localização de Faltas em LT's utilizando Ondas Viajantes	22
2.3	Considerações Finais	26
3	FILTRO DE SAVITZKY-GOLAY E OUTRAS TÉCNICAS	27
3.1	Considerações Iniciais	27
3.2	Filtro de Savitzky-Golay	27
3.3	Transformada Modal	34
3.4	Transformada Wavelet	35
3.5	Ruído Branco	39
3.6	Considerações Finais	41
4	APLICAÇÃO DA TEORIA DAS ONDAS VIAJANTES NA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS	43
4.1	Considerações Iniciais	43
4.2	Velocidade de Propagação	43
4.3	Método 1 - Utilizando dados de apenas um terminal	44
4.3.1	Faltas Isoladas	44
4.3.2	Faltas Aterradas	45
4.3.2.1	Faltas Aterradas na Primeira Metade da LT	45
4.3.2.2	Faltas Aterradas na Segunda Metade da LT	46
4.4	Método 2 - Utilizando Dados de Dois Terminais Sincronizados	47
4.5	Considerações Finais	47
5	METODOLOGIA PROPOSTA	49
5.1	Considerações Iniciais	49
5.2	Linhas de Transmissão Simuladas	49
5.2.1	Primeiro Modelo (Linha I)	50

5.2.2	Segundo Modelo (Linha II)	51
5.3	Aplicação da Transformada Modal, Wavelet e do Filtro SG	53
5.4	Limiares	55
5.5	Localização de Falhas pelo Método 1	58
5.6	Localização de Falhas pelo Método 2	59
5.7	Funcionamento do Algoritmo de Localização	59
5.8	Considerações Finais	61
6	RESULTADOS	63
6.1	Considerações Iniciais	63
6.2	Cenário 1 ($R_f = 100 \Omega$ e $a_i = 0^\circ$)	64
6.3	Cenário 2 ($R_f = 70 \Omega$ e $a_i = 60^\circ$)	65
6.4	Cenário 3 ($R_f = 50 \Omega$ e $a_i = 45^\circ$)	67
6.5	Cenário 4 ($R_f = 10 \Omega$ e $a_i = 30^\circ$)	68
6.6	Cenário 5 ($R_f = 0 \Omega$ e $a_i = 0^\circ$)	70
6.7	Cenário 6 ($R_f = 0 \Omega$ e $a_i = 90^\circ$)	71
6.8	Resultado Geral	73
6.9	Considerações Finais	74
7	CONCLUSÕES	76
7.1	Conclusões e Contribuições	76
7.2	Sugestões para Trabalhos Futuros	77
	REFERÊNCIAS	79

1 Introdução

1.1 Prefácio

A energia elétrica é um dos recursos fundamentais para promover a satisfação e o bem-estar da sociedade, assim como para o desenvolvimento econômico de um país. Portanto, os Sistemas Elétricos de Potência (SEP) devem garantir um alto grau de confiabilidade na continuidade do fornecimento da energia elétrica. Porém, interrupções no fornecimento de energia podem ser provocadas pela ocorrência de diferentes tipos de distúrbios.

Mesmo os sistemas mais bem planejados estão sujeitos a eventos imprevisíveis que os colocam além dos limites delineados. Quando ocorre um grande distúrbio no circuito de energia, ações de proteção e controle devem ser estabelecidas para evitar a degradação do sistema e para restaurá-lo para um estado normal dentro de um tempo mínimo. Mas, na maioria dos casos, as interrupções do serviço podem, eventualmente, levar à perda de grandes blocos de cargas.

Esses eventos podem ocorrer em diversos componentes de um SEP, dentre os quais destaca-se a linha de transmissão (LT) como o elemento mais susceptível, por considerar suas dimensões físicas, complexidade funcional e o ambiente em que se encontram, apresentando assim, maior dificuldade para manutenção e monitoramento.

A maioria das linhas, inevitavelmente, atravessam terrenos de acesso complicado e, às vezes, com condições climáticas difíceis, o que torna a verificação física do posicionamento do defeito muito demorada. No entanto, pesquisas sobre as técnicas de localização de faltas em linhas de transmissão mostram que métodos precisos e rápidos são de grande importância para a engenharia, pois podem acelerar a restauração, reduzir o tempo de interrupção e melhorar a confiabilidade do sistema, além de diminuir os prejuízos financeiros causados pela falta de energia elétrica.

No geral, os métodos para localização de faltas em linhas de transmissão têm sido classificados em duas categorias básicas: (i) métodos baseados em componentes fundamentais e (ii) métodos baseados nos transitórios de alta frequência gerados pela falta. Esses últimos costumam enquadrar dentro do conceito das assim chamadas ondas viajantes ou trafegantes, objeto de estudo deste trabalho.

Os métodos baseados em componentes de frequência fundamental, são em sua maioria, baseados na determinação da impedância aparente da linha de transmissão vista do local de medida durante a falta. Essa impedância é obtida em função dos parâmetros da LT e dos fasores de frequência fundamental das tensões e correntes que se desenvolvem

em um dos terminais da linha. As estimativas para essas localizações de faltas estão sujeitas a erros devido ao efeito combinado da corrente de carga e da resistência de falta (R_f), tipo de falta, ângulo de incidência da falta, infeed remoto, impedâncias mútuas de sequência zero e outros efeitos. Melhorias em tais medições têm sido alcançadas com dispositivos instalados em ambos os terminais de uma linha de transmissão, com medições sincronizadas via sistema de posicionamento global (GPS) (1).

Os métodos que utilizam as componentes de alta frequência dos sinais transitórios gerados por uma falta, nas quais estão fundamentadas a teoria das ondas viajantes, são algoritmos baseados na determinação do tempo de viagem da onda de tensão ou corrente do ponto de falta ao terminal de monitoramento e na velocidade de propagação da onda viajante na linha, função dos parâmetros da mesma.

A principal limitação encontrada na implementação dos algoritmos que consideram o emprego da teoria de ondas viajantes decorre da necessidade da utilização de elevadas taxas de frequência de amostragem. Todavia, o progresso atual da tecnologia dos conversores A/D de alta velocidade e dos processadores de sinais digitais (PSD) de alto desempenho, como também dos transdutores óticos de corrente e tensão, têm tornado possível a aquisição de dados em elevadas taxas de amostragem. Aliás, técnicas como processamento paralelo tendem a viabilizar altas velocidades de execução de tais tarefas.

Além disso, os algoritmos presentes nos localizadores de falta devem ser capazes de identificar esses transitórios com alta precisão. Caso essas componentes de alta frequência não sejam bem capturadas, em tempo e amplitudes, as informações geram falsas características levando a tomadas de decisões erradas. Uma informação errônea dos instantes dos picos dos transitórios poderá introduzir grandes erros na localização de uma falta, dificultando enormemente o trabalho da equipe de manutenção em caso de faltas permanentes.

Em (2), foram desenvolvidos algoritmos de localização de faltas em linhas de transmissão baseados em ondas viajantes, sendo estas capturadas e analisadas com o auxílio da Transformada Wavelet (TW), obtendo-se, já naquela época, resultados muito promissores para uso em futuros dispositivos. Porém, um dos grandes problemas enfrentados (3) e que se deseja resolver é, em certos casos, a quantidade de ruído não-correlacionado existentes nos sinais capturados. O localizador funcionava bem com SNR (Signal Noise Ratio) acima de 50 dB, em ângulo de incidência da falta próximo de zero. Porém, para esta mesma condição e SNR de menor valor, o método apresentava dificuldades, pois os transitórios da falta se confundiam com os níveis elevados de ruído.

A mitigação da influência do ruído tem sido timidamente abordada em alguns estudos acerca do tema em questão, encontrando-se ainda espaço para aperfeiçoamentos e desenvolvimentos de novas técnicas. Neste cenário, a busca por métodos cada vez mais eficientes que sejam mais robustos diante de ruídos, que não demande muito esforço

computacional e que também possam melhorar a confiabilidade dos relés de proteção, localizadores de falta ou outros dispositivos eletrônicos inteligentes (IEDs), é um desafio estimulante.

Mais recentemente, um novo estudo utilizando o filtro de Savitzky-Golay (SG) mostrou-se robusto em relação aos ruídos e acompanhado de esforço computacional reduzido na detecção da saturação em transformadores de corrente (4).

As aplicações das técnicas de suavização e diferenciação do filtro SG encontram-se centradas nas áreas de processamento de imagens, biomedicina e química e pouco ainda foi produzido nas áreas de qualidade de energia, proteção e instrumentação relacionadas a sistemas elétricos de potência (5).

Portanto, diante das limitações apresentadas pelos métodos atuais conhecidos, o presente trabalho apresenta uma nova proposta utilizando o filtro de Savitzky-Golay para minimizar as dificuldades citadas, ou seja, mesmo na presença de ruídos na captura dos sinais de tensão e/ou corrente, com baixo SNR, a taxa de acerto no posicionamento de uma falta consiga ter maior confiabilidade e menor erro.

Por fim, de modo a validar a nova proposta, a aplicação do filtro SG para extrair os transitórios de alta frequência dos sinais faltosos foi comparada com os resultados obtidos pela aplicação da Transformada Wavelet, na presença de ruídos não correlacionados (WGN).

1.2 Objetivo

Esta dissertação foi desenvolvida a partir das sugestões contidas na tese de doutorado de Silveira, 2001 (3) e na tese de doutorado de Schettino, 2015 (6). Dentre tais sugestões, uma delas diz respeito às limitações dos métodos de localização de faltas na presença de ruídos na rede que dificultam o processamento de sinais e conseqüentemente a operação dos relés e localizadores.

Assim sendo, este trabalho tem por objetivo geral desenvolver, testar e avaliar um método para localização de faltas utilizando o filtro de Savitzky-Golay que seja robusto na presença de ruído, que exija um esforço computacional aceitável e descrever os resultados da comparação de desempenho contra o método utilizando a Transformada Wavelet, diante de algumas condições de falta em linhas de transmissão. Essas condições se referem às variações nos tipos de faltas, distância da falta, resistência de falta, ângulo de incidência de falta e nível do ruído.

Os algoritmos são implementados no MATLAB/Simulink em dois modelos de LT's. O primeiro representa um sistema radial enquanto que o segundo descreve um sistema interligado.

Além disso, dois métodos para a localização de faltas foram utilizados. O primeiro que utiliza dados de apenas um terminal e o segundo de dois terminais sincronizados.

Sendo assim, outros objetivos específicos deste trabalho foram:

- Comparar a performance do método que utiliza um terminal de medição contra o método que utiliza dois terminais de medição sincronizados;
- Avaliar em que condições de falta o algoritmo funciona melhor;
- Desenvolver um limiar de detecção dos picos que seja adaptativo com a variação do nível do ruído;
- Escolher os parâmetros do filtro SG e da transformada wavelet com o intuito de se obter a melhor localização das faltas.

1.3 Justificativa

Os ruídos nos sinais de tensão e corrente apresentam característica similar ao longo de todo sistema elétrico de potência, seja na geração, transmissão e distribuição. Eles podem confundir a medição e gerar características indesejáveis para a tomada de decisão e informação coletada pelos dispositivos de proteção e supervisão. Assim, por exemplo, a detecção errônea do instante em que uma falta inicia, poderá introduzir grandes erros na localização da mesma, dificultando enormemente o trabalho da equipe de manutenção em caso de faltas permanentes. Neste cenário a busca por métodos cada vez mais eficientes que sejam mais robustos diante de ruído, que não demande muito esforço computacional e que também sejam passíveis de implantação em relés de proteção ou outros dispositivos eletrônicos inteligentes (IEDs), é um desafio estimulador.

1.4 Organização do trabalho

Esta dissertação de mestrado está dividida em sete capítulos, a saber:

1. Introdução;
2. Estado da Arte – Técnicas de Localização de Faltas em Linhas de Transmissão;
3. Filtro de Savitzky-Golay e Outras Ferramentas;
4. Aplicação da Teoria das Ondas Viajantes na Localização de Faltas;
5. Método Proposto para Localização de Faltas;
6. Apresentação dos Resultados
7. Conclusão e Considerações Finais

No Capítulo 1, são apresentados comentários sobre a relevância do tema e os objetivos do trabalho. Também é descrita a estrutura da dissertação de mestrado.

A revisão bibliográfica é alvo do Capítulo 2, no qual se apresenta o estado-da-arte da localização de faltas em linhas de transmissão. São descritos alguns métodos utilizando o conceito de ondas viajantes considerando os resultados obtidos nos últimos anos, publicados em congressos, periódicos nacionais e internacionais.

Um estudo sobre o filtro de Savitzky-Golay é descrito no Capítulo 3 que apresenta conclusões sobre o seu funcionamento e aplicações, além de uma breve descrição sobre a Transformada Modal, a Transformada Wavelet e o ruído branco. Essas ferramentas juntamente com técnicas de processamento de sinais digitais constituem a principal ferramenta no desenvolvimento dos algoritmos para este trabalho.

O Capítulo 4 trata da aplicação da teoria das ondas viajantes na localização de faltas em LTs. O principal objetivo desse capítulo é apresentar argumentações sobre como a localização de falta é obtida.

O método proposto é apresentado no Capítulo 5 com detalhamento do raciocínio utilizado no desenvolvimento do algoritmo para localização de faltas em LTs. Na sequência, são discutidos os modelos de linhas de transmissão selecionados em conjunto com a descrição dos seus componentes.

O Capítulo 6 apresenta resultados de análise das simulações computacionais das diversas situações de falta utilizando o novo método. São avaliados os impactos causados pela variação de alguns parâmetros, tais como ruído, distância de falta, resistência de falta, ângulo de incidência de falta, dentre outros. Paralelamente, os resultados são comparados com o método de localização utilizando transformada Wavelet, proposta por Silveira (2001) (3) e Parentoni (2006) (7).

Por fim, o Capítulo 7 traz as conclusões do trabalho de dissertação, apresenta comentários sobre as contribuições alcançadas e indica sugestões de melhorias para trabalhos futuros.

2 Estado da Arte - Técnicas de Localização de Faltas em Linhas de Transmissão

2.1 Considerações Iniciais

No geral, os métodos de localização de faltas em linhas de transmissão são classificados em duas categorias: os baseados em ondas viajantes e os que utilizam as componentes de frequência fundamental.

Sendo assim, neste capítulo é apresentado o resultado de uma pesquisa, que objetivou delimitar o estado da arte em relação aos métodos de localização baseados nos transitórios de alta frequência ou ondas viajantes, que é alvo neste trabalho.

Portanto, para cobrir o assunto de que trata a presente dissertação, foi efetuado um levantamento de artigos científicos patentários e não patentários dos métodos existentes, bem como o apontamento de suas limitações.

2.2 Métodos de Localização de Faltas em LT's utilizando Ondas Viajantes

Com o objetivo de melhorar a proteção dos materiais e equipamentos, bem como manter a estabilidade do sistema de potência, passou-se a pesquisar sobre os relés de proteção de alta velocidade que pudessem reduzir o tempo de falta a um ciclo (8). Para isso, era necessário o encurtamento das janelas de dados, tornando-se necessário imaginar o sinal da rede não mais como uma única frequência, mas em termos de um espectro de frequências mais amplo. Essas razões motivaram investigações sobre as propriedades das ondas viajantes presentes nos sinais de tensão e corrente de uma linha, logo após a ocorrência de uma falta.

Em 1968, os autores em (9) haviam tentado, sem muito sucesso, a utilização de ondas viajantes com o objetivo de proteção. Porém, foram nos anos de 1977 e 1978 que o conceito de Relés Ultra-Rápidos ganhou força (10), (11), (12) e (13). Com o avanço da tecnologia microprocessada nos anos 80, diferentes algoritmos foram apresentados na literatura especializada.

Em 1985, em (14), os autores utilizaram a correlação cruzada entre uma seção do sinal da primeira onda viajante direta, detectada e armazenada, e o sinal da segunda onda viajante reversa que reflete no ponto da falta e retorna ao ponto do relé. Através disso, consegue-se estimar o intervalo de viagem dos transitórios, determinado assim a distância

da falta. Essa abordagem será mais eficaz quanto mais adequada for a largura da janela de dados para armazenar o formato da primeira onda viajante. Porém, o tamanho da janela permanece uma questão não resolvida para a implementação prática do método.

Em (15), os métodos de localização de faltas em linhas de transmissão foram classificados de acordo com a Figura 1.

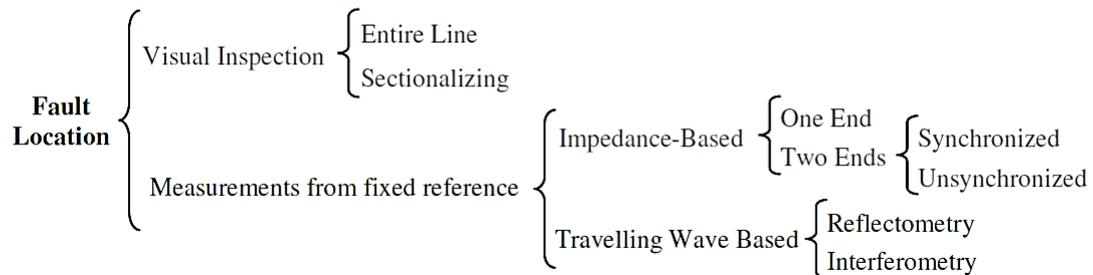


Figura 1 – Classificação dos métodos de localização de faltas em LT's.

Fonte: (15).

Neste trabalho, revisou o estado da técnica para métodos de localização de faltas em linhas de transmissão baseadas em ondas viajantes. Além disso, mostrou as vantagens e desvantagens de cada um deles e suas aplicações mais comuns. Os métodos de localização de falta de ondas viajantes que utilizam uma única extremidade têm as vantagens de evitar as complexidades e os custos da sincronização de extremidade remota. O mais importante é conhecer os diferentes métodos de localização de faltas para selecionar aquele que melhor se adapte aos recursos disponíveis.

Em (3) mostrou-se que as ondas viajantes geradas por uma falta aparecem como distúrbios impulsivos superpostos aos sinais de frequência fundamental, onde a utilização da Transformada Wavelet (TW) tornou-se adequada para a obtenção da localização da falta. Porém, para sinais de tensão recebidos sobre a interferência de ruídos abaixo de 40 dB e ângulo de incidência próximo de zero, o método apresentou dificuldade, pois a perturbação gerada pela falta estará no mesmo patamar do nível do ruído.

Neste trabalho (7), propõe-se um método para localização de faltas em linhas de transmissão (LTs) de três terminais que utiliza dados de apenas dois terminais, e não dos três como era convencionalmente feito. O fato de se utilizar dois representa uma grande economia de equipamentos de monitoração e comunicação de dados entre os terminais. Neste modelo, foram abordadas as mais diversas condições variando os parâmetros das linhas de transmissão do “circuito T”, com o intuito de simular as piores situações para a execução do método proposto.

Através de simulações computacionais foi verificado que o método proposto obteve um bom desempenho e que para efetuar a localização de faltas em circuitos T, a utilização dos dados dos três terminais é desnecessária, visto haver redundância entre eles. O método

proposto possui vantagens e desvantagens. A desvantagem diz respeito as faltas próximas ao ponto de conexão entre os três trechos, em até 2 km o algoritmo poderá identificar erroneamente o ramo sob falta. No entanto, cabe enfatizar que tal limitação pode ser contornada com taxas de amostragem mais elevadas. Sendo assim, é necessário avaliar sua adequação para cada tipo de aplicação, ou seja, a opção de se utilizar o método proposto, ao invés do convencional, deve ser feita com base nas necessidades e disponibilidades econômicas e técnicas.

Já em (16), é apresentado um método de detecção de faltas através do cálculo da energia dos coeficientes wavelet das tensões e correntes de fase. O método é capaz de detectar faltas evolutivas e de múltiplos distúrbios transitórios, a exemplo de uma falta seguida por um religamento automático, capturados no mesmo registro oscilográfico. O método também consegue distinguir faltas de algumas ocorrências relacionadas à qualidade da energia elétrica, tais como afundamento de tensão e transitórios de chaveamento. O método é eficaz na identificação dos instantes iniciais e finais da falta, além de conseguir analisar sinais referentes a linhas de transmissão de diferentes classes de tensão e que tenham sido registrados com frequências de amostragem diversas. Em avaliação de desempenho com registros oscilográficos simulados e reais, o método apresentou bons resultados.

Os autores em (17) desenvolveram um método de localização de faltas para linhas de transmissão multi-terminais no qual combina as vantagens do método baseado em impedância e ondas viajantes. Primeiramente, o método proposto determina se a falta está aterrada ou não através da comparação das magnitudes dos coeficientes wavelet no modo terra na extremidade do terminal de medição. Em seguida, o método baseado em impedância é usado para identificar a metade da linha com a falta, no caso da linha com dois terminais, ou a seção com falta, bem como a metade dessa seção com falta no caso de linhas com múltiplos terminais. Finalmente, a localização da falta é determinada tomando a diferença entre os instantes dos dois primeiros modos aéreos consecutivos da onda viajante observada em uma extremidade da linha multi-terminal. O método proposto foi testado em linhas de transmissão de quatro e cinco terminais com diferentes tipos de faltas, resistências de faltas e ângulos de incidência através de simulações no software ATP. Os resultados mostraram que o algoritmo proposto funciona de forma satisfatória para todos os tipos de faltas. Verificou-se que, uma vez que a seção e a metade da seção da linha com falta são identificadas corretamente, independentemente do tipo de falta, a localização é calculada com alta precisão.

Em (18) propõe-se um método de localização de faltas em LT's utilizando um único terminal que sobreponha as dificuldades de se determinar o tempo de chegada das ondas e suas velocidades de propagações. As características tempo-frequência do sinal das ondas viajantes são descritas pelo expoente Lipschitz. Este expoente do segundo sinal

transitório da onda de chegada é estimado usando a transformada wavelet e o método do mínimo quadrado. Posteriormente, determina-se a frequência da onda viajante e seu tempo correspondente de chegada e a velocidade de propagação. Assim, o método calcula a distância de falta com precisão com base no tempo e velocidade da onda. Foram realizadas simulações no PSCAD / EMTDC, e os resultados demonstram que a precisão do método de localização de falta proposto é significativamente melhorada comparando com a do método tradicional de ondas viajantes. O método é insensível a diferentes condições de falta, além de se adaptar tanto para linhas transpostas como não transpostas.

Em (19) associou-se o método baseado na impedância com as técnicas de ondas viajantes. A Decomposição Rápida do Modo Intrínseco (FIMD) e *Teager Energy Operator* (TEO) são combinadas (FIMD e TEO) para detectar o tempo de chegada da onda viajante em cada terminal. Uma matriz de proporção de distância de falta (FDRM) e regras para identificar as partes com faltas de uma linha de transmissão multi-terminal são propostas. Após os pares de terminais relacionados com a seção defeituosa serem identificados, a posição da falta é calculada por meio de um método de onda viajante de duas extremidades e, em seguida, o ponto de falta pode ser localizado pela média das distâncias de falta. Diversas simulações em várias condições de falta foram realizadas, e os resultados mostraram que o esquema proposto pode localizar faltas com mais precisão do que os métodos existentes baseados somente em impedância.

Vários métodos de localização de faltas usando técnicas de inteligência computacional têm sido usados para estimar a localização de faltas em linhas de transmissão. Em (20), é apresentado um novo método baseado na utilização da técnica de processamento de sinais e Análise de Componentes Independentes (ACI) para estimar a localização de faltas monofásicas em um sistema de transmissão de 500 kV, a partir de dados reais de oscilografia submetidos a diferentes sinais de perturbação. Os resultados obtidos com dados reais de oscilografia e simulação da linha de transmissão mostram que a metodologia implementada no MATLAB é uma ferramenta bastante eficiente e precisa na localização de faltas em sistemas de transmissão.

Utilizou-se em (21), um método para determinar a localização de uma falta em LT's que se baseia na separação de ondas viajantes e no uso de métodos de análise estatística para a determinação da frente de onda. A eficiência do método proposto foi verificada usando um modelo matemático de uma linha de transmissão. O modelo foi implementado em um dispositivo para registrar os processos, medindo as características da qualidade de energia e a localização da falta, obtendo resultados satisfatórios.

Em (22) propõe-se uma solução para localizar faltas em sequências, visto que até o presente momento, ainda não tinha uma solução satisfatória. Duas faltas em sequenciais resulta na mudança de fase da falta. A característica do modo aéreo da onda viajante atual capturada apenas reflete a característica da segunda ocorrência de falta e é usado

para analisar a segunda falta. As faltas em sequencias podem ser determinadas de acordo com a consistência dos resultados de seleção de fase em duas etapas. Posteriormente, as posições das duas faltas sucessivas podem ser adquiridas com precisão implementando individualmente a localização de falta da onda viajando de duas extremidades na fase de falta inicial, bem como as correntes do modo de aéreo, respectivamente. Estudos de simulação digital baseados no PSCAD/EMTDC demonstram que o método proposto é viável e eficaz.

Por fim, é apresentado em (23) uma formulação de localização de faltas baseada em ondas de viajantes de dois terminais. Ela depende da diferença temporal entre a primeira onda incidente em ambas as extremidades da linha e as suas respectivas reflexões do ponto de falta até essas extremidades. Assim, a formulação proposta não requer sincronização de dados nem parâmetros de linha, que são fontes de erro que geralmente afetam os esquemas de localização de faltas baseados em ondas viajantes. Neste trabalho, um filtro básico diferenciador e suavizador foi escolhido para extrair os instantes de chegada das frentes de ondas medidas em dois terminais. Várias faltas em uma linha típica de 500 kV foram simuladas para comparar o desempenho da formulação proposta com o de uma abordagem clássica. Os resultados obtidos atestam que o método proposto é capaz de localizar com precisão faltas em linhas de transmissão, mesmo quando existem erros de sincronismo de dados e incertezas nos parâmetros de linha monitorados.

2.3 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentadas algumas técnicas para a obtenção do local de falta em LT's baseadas no conceito das ondas viajantes, no qual é objeto de estudo desta dissertação.

Diante desta pesquisa, foi verificado pouca preocupação em relação a investigação da interferência de ruídos nos métodos de localização de faltas. Quando não são considerados nos modelos, os ruídos podem causar erros significativos que interferem na precisão da localização das faltas.

3 Filtro de Savitzky-Golay e outras Técnicas

3.1 Considerações Iniciais

O novo método de localização de faltas é baseado no conceito de filtros derivativos, particularmente, o filtro derivativo de primeira ordem de Savitzky-Golay. Sendo assim, neste capítulo, são apresentadas as técnicas de suavização e diferenciação de dados propostas por Savitzky-Golay (24) e suas aplicações.

Em seguida, é mostrado o conceito da Transformada Modal a qual permite desacoplar os sinais de tensão trifásicos, essencial para a correta aplicação das técnicas de localização de faltas baseadas em ondas viajantes.

Logo depois, uma revisão é feita sobre a Transformada Wavelet. Esta, por sua vez, foi utilizada para fins de comparação com o novo método, tendo em vista sua grande utilização em propostas de localização de faltas por ondas viajantes.

Por fim, um breve resumo sobre os ruídos brancos não-correlacionados é apresentado. Entender a forma de construção desse ruído é importante para modelar corretamente os sinais de tensão e aplicá-los nos algoritmos para testar a performance dos filtros.

3.2 Filtro de Savitzky-Golay

O filtro de Savitzky-Golay é um filtro digital apresentado por Abraham Savitzky e Marcel JE Golay (24) e que pode ser aplicado a um conjunto de dados digitais com o intuito de suavizar os dados aumentando a relação sinal-ruído sem distorcer muito o sinal. Além de minimizar os efeitos causados por ruídos não correlacionados, o filtro permite calcular da primeira à quinta derivada do sinal de entrada.

O intuito inicial dos autores foi apresentar uma ferramenta de análise de dados na área da química analítica destinada à implementação nos, na época emergentes, computadores digitais. Embora o trabalho de Savitzky e Golay tenha sido considerado um “divisor de águas” na área de química analítica computacional, tendo sido eleito, pelos editores da revista *Analytical Chemistry*, o quinto artigo mais importante já publicado na revista (25), a sua aplicação em outras áreas de processamento digital de sinais ainda é escasso (5). Praticamente, quase nada ainda foi produzido nas áreas de qualidade da energia, proteção e instrumentação relacionadas à Sistemas Elétricos de Potência (4).

Savitzky e Golay sistematizaram o uso do conceito de mínimos quadrados (least

squares - LS) e da interpolação polinomial na análise de dados experimentais. Seja

$$y = [y_{-N} \ y_{-(N-1)} \ \dots \ y_0 \ \dots \ y_{N-1} \ y_N]^T \quad (3.1)$$

um vetor representativo de um conjunto de $2N + 1$ valores consecutivos afetados por ruído, oriundos da observação de um experimento e seja

$$f(x) = c_0 + c_1x + c_2x^2 + \dots + c_mx^m \quad (3.2)$$

um polinômio de um filtro LS de grau m , sendo ($m < 2N + 1$), com $m + 1$ coeficientes c_i ($i = 0, \dots, m$).

O objetivo inicial é escolher os coeficientes de forma a minimizar a soma dos quadrados das diferenças (ε) entre os valores do polinômio e os valores observados ao longo de todos os $2N + 1$ pontos do intervalo a ser considerado, conforme equação abaixo:

$$\varepsilon(c_0, c_1, \dots, c_m) = \sum_{j=-N}^N (f(j) - y_j)^2 \quad (3.3)$$

Desta forma, deseja-se escolher os valores de c_i ($i = 0, \dots, m$) de forma a minimizar ε . A condição de mínimos quadrados requer então que as derivadas parciais de ε em relação a cada um dos coeficientes do polinômio se anule, ou seja:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial c_i} = \frac{\partial}{\partial c_i} \left[\sum_{j=-N}^N (f(j) - y_j)^2 \right] = 0 \quad i = 0, 1, \dots, m. \quad (3.4)$$

O conjunto de $m + 1$ de equações representado em 3.4 pode ser manipulado algebricamente de forma a encontrar os $m + 1$ coeficientes c_i que satisfazem o critério LS, da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon}{\partial c_i} &= \frac{\partial}{\partial c_i} \left[\sum_{j=-N}^N (f(j) - y_j)^2 \right] \\ &= \frac{\partial}{\partial c_i} \left[\sum_{j=-N}^N \left(\sum_{k=0}^m c_k j^k - y_j \right)^2 \right] \\ &= \sum_{j=-N}^N \left[\frac{\partial}{\partial c_i} \left(\sum_{k=0}^m c_k j^k - y_j \right)^2 \right] \\ &= 2 \sum_{j=-N}^N \left[\left(\sum_{k=0}^m c_k j^k - y_j \right) j^i \right] = 0 \quad i = 0, 1, \dots, m. \end{aligned} \quad (3.5)$$

Por fim, intercambiando a ordem dos somatórios, obtém-se:

$$= \sum_{k=0}^m \left[\left(\sum_{j=-N}^N j^{i+k} \right) c_k \right] = \sum_{j=-N}^N (j^i y_j) \quad i = 0, 1, \dots, m. \quad (3.6)$$

As equações do tipo 3.6 são denominadas “equações normais” para o problema de aproximação por LS, (5) e (26), e o uso da notação matricial pode facilitar a visualização da solução.

Seja a matriz A , com $(2N + 1) \times (m + 1)$ elementos, definida de tal forma que:

$$A = \begin{bmatrix} (-N)^0 & \dots & (-1)^0 & 1 & 1^0 & \dots & N^0 \\ (-N)^1 & \dots & (-1)^1 & 0 & 1^1 & \dots & N^1 \\ (-N)^2 & \dots & (-1)^2 & 0 & 1^2 & \dots & N^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ (-N)^m & \dots & (-1)^m & 0 & 1^m & \dots & N^m \end{bmatrix}^T \quad (3.7)$$

A comparação entre o lado direito de 3.6 e 3.7 possibilita mostrar que

$$\sum_{j=-N}^N (j^i y_j) = \{A^T\}_{\text{Linha } i+1} \cdot y \quad i = 0, 1, \dots, m. \quad (3.8)$$

De outra forma, tem-se que

$$A^T \cdot A = \begin{bmatrix} \sum_{j=-N}^N j^{0+0} & \sum_{j=-N}^N j^{0+0} & \dots & \sum_{j=-N}^N j^{0+0} \\ \sum_{j=-N}^N j^{1+0} & \sum_{j=-N}^N j^{0+0} & \dots & \sum_{j=-N}^N j^{0+0} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{j=-N}^N j^{+0} & \sum_{j=-N}^N j^{0+0} & \dots & \sum_{j=-N}^N j^{0+0} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

o que permite reescrever o lado esquerdo de 3.6 da forma

$$\sum_{k=0}^m \left(\sum_{j=-N}^N j^{i+k} c_k \right) = \{A^T \cdot A\}_{\text{Linha } i+1} \cdot c \quad i = 0, 1, \dots, m. \quad (3.10)$$

Finalmente, baseado em 3.8 e 3.10 as equações normais 3.6 tomam a seguinte forma matricial:

$$(A^T \cdot A) \cdot c = A^T \cdot y \quad (3.11)$$

Assim sendo, supondo a inversibilidade da matriz $A^T \cdot A$, os coeficientes do polinômio podem ser encontrados pela equação

$$c = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot y = A^+ \cdot y \quad (3.12)$$

A Matriz A^+ é denominada pseudo-inversa da matriz A . Verifica-se, pela Eq. 3.12, que cada coeficiente do polinômio corresponde a uma combinação linear dos elementos de y , na qual os pesos correspondem à cada uma das linhas da matriz A^+ . Tal matriz, por sua vez, só depende da quantidade de elementos de y ($2N + 1$) da ordem do polinômio escolhido (m). Por fim, uma vez conhecidos os coeficientes do polinômio de interpolação LS, pode-se estimar o valor observado em qualquer ponto do intervalo amostrado.

Portanto, o valor observado quanto o valor da sua derivada, de qualquer ordem menor ou igual ao grau do polinômio, no centro da janela, pode ser estimado pela passagem dos pontos da janela amostrada por uma família de filtros FIR cujas respostas ao impulso correspondem às linhas da matriz A^+ . Assim sendo, a primeira linha da matriz A^+ define um filtro FIR cuja saída corresponde à estimação LS do valor observado no centro da janela, e sua aplicação em uma janela deslizante ao longo dos dados observados promove um efeito de suavização (smoothing).

Já a segunda linha da matriz A^+ define um filtro FIR cuja saída corresponde a uma estimação LS da derivada primeira do valor observado no centro da janela, sendo que a sua aplicação em uma janela deslizante ao longo dos dados observados produzirá o efeito de um filtro diferenciador de primeira ordem. A terceira linha de A^+ corresponde a um filtro diferenciador de segunda ordem e assim sucessivamente. É importante destacar que, uma vez definidos o grau do polinômio e o tamanho da janela, os coeficientes dos filtros FIR permanecem constantes na medida em que a janela de amostragem se desloca no tempo, simplificando consideravelmente o uso de tais filtros para aplicações em tempo real.

Por fim, algumas questões importantes devem ser abordadas a respeito dos filtros de Savitzky-Golay. Primeiramente, em relação à causalidade, verifica-se que os filtros de Savitzky-Golay são, a princípio, não causais, pois estimam valores contidos no centro da janela de amostragem, baseados nos valores das amostras dos pontos contidos na própria janela. Entretanto, quando o atraso não for um fator limitador, a causalidade pode ser reestabelecida pelo simples deslocamento temporal. Nota-se que o atraso se torna mais relevante quanto maior o tamanho da janela escolhida. Mais especificamente, o atraso corresponde a N amostras, que equivale ao número de amostras situadas à direita da amostra central.

Em segundo lugar, cada família de filtros de Savitzky-Golay, correspondente às linhas da matriz A^+ , depende exclusivamente do tamanho da janela de observação ($2N + 1$)

e do grau do polinômio (m) a ser utilizado na aproximação LS. A cada valor de m e N escolhidos obtém-se uma família composta por $m + 1$ filtros FIR, cada um deles contendo $2N + 1$ coeficientes. Os $m + 1$ filtros correspondem a um filtro suavizador e m filtros diferenciadores, de ordem 1 até m .

Por fim, é importante notar que, para assegurar a inversibilidade da matriz A^T . A e, conseqüentemente, a existência da matriz A^+ , o grau do polinômio a ser escolhido deve ser estritamente menor que o número de pontos total da janela observada, ou seja, $m < 2N + 1$. Neste sentido, cabe aqui uma análise qualitativa do comportamento dos filtros em relação a este compromisso entre m e N .

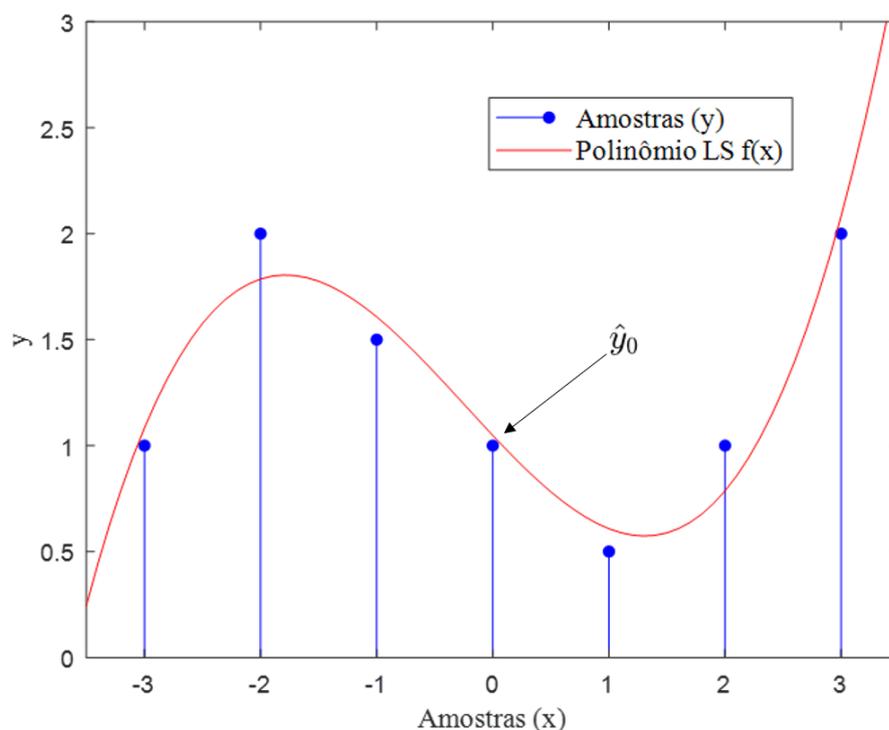


Figura 2 – Aproximação LS por interpolação polinomial utilizando SG

Por outro lado, em uma situação inversa, na medida em que o tamanho da janela de observação passa a ser consideravelmente maior que o grau do polinômio utilizado, o efeito da suavização se potencializa. Além disso, em relação aos filtros diferenciadores obtidos, a atenuação das altas frequências passa a ser também maior.

A característica de atenuar as componentes de alta frequência presente nos filtros diferenciadores de Savitzky-Golay sugere que estes possuam um bom comportamento em relação a sinais ruidosos. Entretanto, dependendo da aplicação, a forte atenuação pode também atenuar ou até mesmo eliminar componentes importantes do sinal. Por outro lado, o aumento do tamanho da janela está diretamente ligado a dois parâmetros de projeto que podem ser limitadores, em determinadas aplicações: o atraso do filtro e o esforço computacional. Em relação ao atraso, pode-se facilmente verificar que este corresponde

a N amostras, correspondentes ao número de amostras na vizinhança à direita do ponto central. O esforço computacional também é proporcional ao tamanho da janela, uma vez que ele está diretamente relacionado ao número de coeficientes do filtro. Portanto, é importante escolher o tamanho da janela e o grau do polinômio de forma a produzir o filtro que apresente o melhor resultado para a aplicação desejada.

Testes foram feitos para encontrar a melhor relação entre o grau do polinômio e o tamanho da janela que resulte em um filtro diferenciador capaz de detectar com precisão as ondas viajantes na LT e que apresente alta imunidade em relação ao ruído, além de requerer um esforço computacional e atrasos aceitáveis. Tais testes indicaram um filtro diferenciador de primeira ordem obtida pela aproximação LS de um polinômio de terceiro grau ($m=3$) em uma janela de 7 pontos ($2N + 1 = 7$).

Essa família de filtros pode ser obtida encontrando A e A^+ através das equações 3.7 e 3.12, resultando em

$$A = \begin{bmatrix} 1 & -3 & 9 & -27 \\ 1 & -2 & 4 & -8 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 4 & 8 \\ 1 & 3 & 9 & 27 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

$$A^+ = \frac{1}{252} \cdot \begin{bmatrix} -24 & 36 & 72 & 84 & 72 & 36 & -24 \\ 22 & -67 & -58 & 0 & 58 & 67 & -22 \\ 15 & 0 & -9 & -12 & -9 & 0 & 15 \\ -7 & 7 & 7 & 0 & -7 & -7 & 7 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Por meio disso, são obtidos os seguintes filtros conforme cada linha da matriz A^+ :

Filtro suavizador (primeira linha):

$$f(0) = c_0 = \frac{1}{21} \cdot [-2 \ 3 \ 6 \ 7 \ 6 \ 3 \ -2] \cdot y \quad (3.15)$$

Filtro diferenciador de 1ª ordem (segunda linha):

$$f'(0) = c_1 = \frac{1}{252} \cdot [22 \ -67 \ -58 \ 0 \ 58 \ 67 \ -22] \cdot y \quad (3.16)$$

Filtro diferenciador de 2ª ordem (terceira linha):

$$f''(0) = 2 \cdot c_2 = \frac{1}{42} \cdot [5 \ 0 \ -3 \ -4 \ -3 \ 0 \ 5] \cdot y \quad (3.17)$$

Filtro diferenciador de 3ª ordem (quarta linha):

$$f'''(0) = 3! \cdot c_3 = \frac{1}{6} \cdot [-1 \ 1 \ 1 \ 0 \ -1 \ -1 \ 1] \cdot y \quad (3.18)$$

Conforme mencionado acima, a melhor opção encontrada para alcançar o objetivo deste trabalho foi o filtro diferenciador de primeira ordem desta família. Os coeficientes deste filtro foram aplicados ao sinal de tensão discretizado v_s , sendo n o índice das amostras, segundo a Eq. 3.19 .

$$sg1[n] = \frac{1}{252} \left\{ \begin{array}{l} 22v_s[n] - 67v_s[n-1] - 58v_s[n-2] + 58v_s[n-4] \\ +67v_s[n-5] - 22v_s[n-6] \end{array} \right\} \quad (3.19)$$

Por meio de $sg1$ é possível encontrar as variações abruptas no sinal de tensão, ou seja, os momentos em que as ondas viajantes chegam ao terminal de medição e refletem. Além disso, visando intensificar essas variações e facilitar o processo de detecção desses picos, o sinal $sg1$ é elevado ao quadrado, originando $sg1sq$, de acordo com a Eq. 3.20.

$$sg1sq[n] = (sg1[n])^2 \quad (3.20)$$

A Figura 3 ilustra o processo de identificação das ondas viajantes através do filtro SG. A Figura 3a mostra os transitórios presentes em um sinal de tensão contaminada por WGN durante a ocorrência de uma falta na LT. Por meio da Figura 3b percebe-se os pequenos picos obtidos através de $sg1$ que representam as ondas viajantes e a Figura 3c representa a intensificação desses picos por meio de $sg1sq$.

O bom comportamento dos filtros de Savitzky-Golay em relação ao ruído é esperado, uma vez que o uso da interpolação polinomial considera as informações contidas nas amostras vizinhas em torno do ponto de interesse. Essa característica permite atenuar o ruído inerente às medições.

Além do mais, a aproximação LS em sistemas bem representados por modelos lineares contaminados por ruído gaussiano leva à estimadores eficientes. Mesmo em modelos não lineares, porém bem-comportados, contaminados por ruído não gaussiano, os estimadores LS tendem a obter desempenho satisfatório (26).

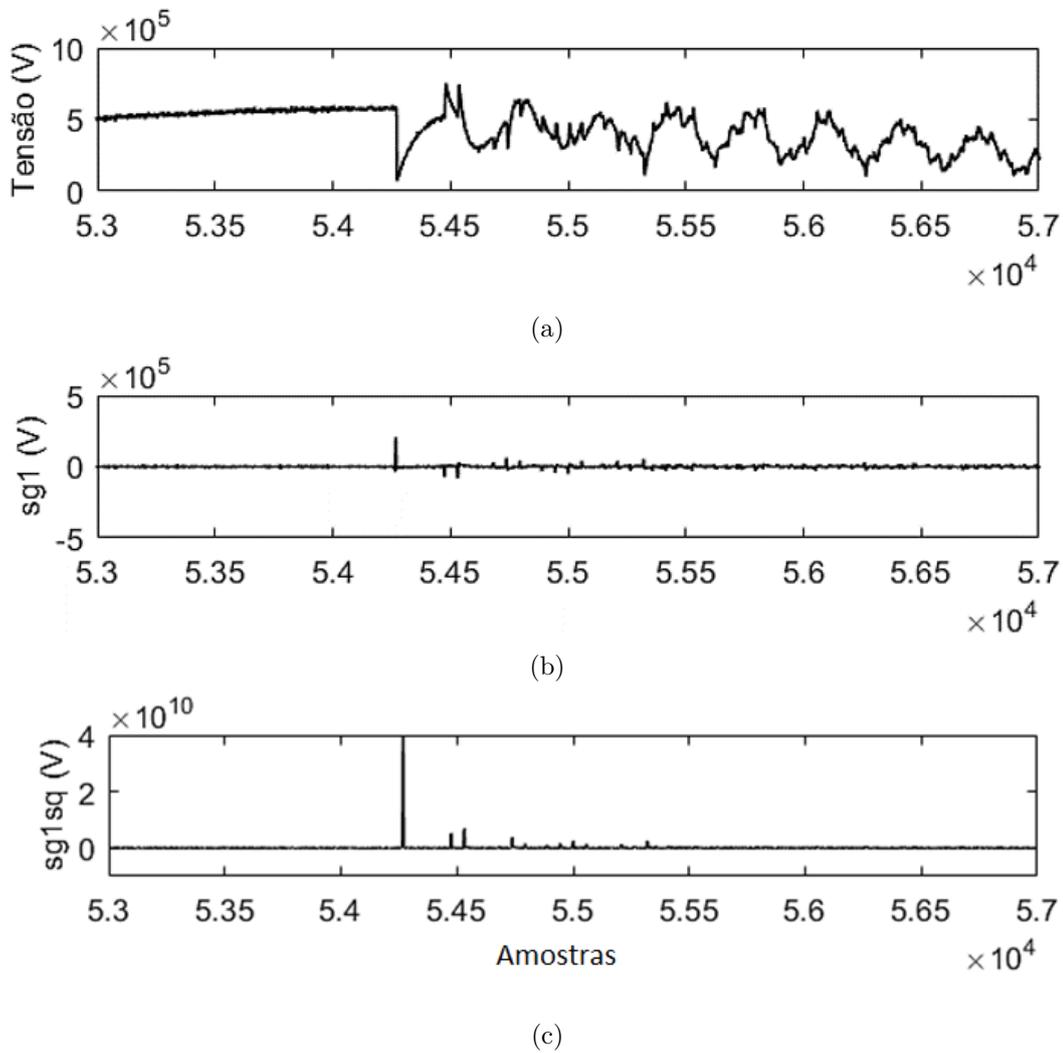


Figura 3 – (a) Transitórios na onda de tensão; (b) Obtenção das ondas viajantes através de $sg1$; (c) Intensificação dos picos através de $sg1sq$.

3.3 Transformada Modal

Em uma linha de transmissão polifásica os sinais são mutuamente acoplados e, portanto, a propagação de ondas em uma fase depende, e ao mesmo tempo influencia, as ondas que estão se propagando nas demais fases. Como consequência, os transitórios gerados durante uma falta podem aparecer nas fases sadias, o que torna a solução em termos de tensões e correntes de fase, bastante complexa.

Por outro lado, com a utilização de uma apropriada transformação matemática, 'n' fases acopladas podem ser desacopladas, obtendo-se 'n' modos independentes. Esta abordagem é conhecida como análise modal (27). Nessa análise, os sinais de fase são transformados em seus componentes modais. Assim,

$$v_{mod} = \mathbf{T} v_f \quad (3.21)$$

onde, v_f é o vetor (ou matriz) contendo as tensões ou as correntes no domínio de fase ($f = A, B$ ou C); v_{mod} é o vetor (ou matriz) contendo as tensões ou as correntes no domínio modal (modo = 0, 1 ou 2); e \mathbf{T} é a matriz de transformação modal. Os modos 1 e 2 são comumente denominadas de modos aéreos e o modo 0 denominado de modo terra.

Existem diferentes soluções para \mathbf{T} . As mais usuais são as transformadas de Clarke, Wedepohl e Karrenbauer (28), (29), (30), além das matrizes de análise e síntese de componentes simétricas que envolvem operações com números complexos. As transformações de Clarke (também conhecida como transformação $\alpha\beta 0$) e de Wedepohl não requerem uma linha de transmissão completamente transposta. Desde que exista um plano de simetria dos condutores em tal linha, os erros resultantes da transformação podem ser desprezados (31). Sendo assim, a matriz de transformação de Clarke, conforme a expressão 3.21, tem sido adotada neste trabalho uma vez que os requisitos de sua aplicação são normalmente encontrados no mundo real.

$$\mathbf{T} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

É importante mencionar que para faltas com conexão com terra existem tanto os modos aéreos como o modo terra, ao contrário dos outros tipos de faltas sem a presença do terra, nos quais somente existirão os modos aéreos. Essas ondas viajam com diferentes velocidades de propagação. Nos modos aéreos elas se propagam com velocidade próxima à da luz. Já para o modo terra a velocidade é aproximadamente 70% da velocidade da luz. Esses valores são dependentes dos parâmetros da linha de transmissão.

3.4 Transformada Wavelet

Uma das propostas deste trabalho foi comparar a eficiência entre os localizadores de faltas utilizando o filtro de Savitzky-Golay e a ferramenta Wavelet, diante de sinais com altos níveis de ruído. Sendo assim, nesta seção é feita uma breve explicação teórica da TW, ferramenta essa que desempenha a mesma função que o filtro SG no algoritmo de localização, ou seja, de extrair as informações contidas nos transitórios de alta frequência.

A Transformada Wavelet é uma operação linear que decompõe um sinal em diferentes escalas com diferentes níveis de resolução. Diferente da análise de Fourier, que fornece uma representação global de um sinal, a TW fornece uma representação local, ou seja, no tempo e na frequência de um determinado sinal. Assim, esta ferramenta é capaz de detectar os instantes em que as ondas viajantes chegam aos terminais de interesse do localizador de faltas. Diante desta habilidade, muitos localizadores que utilizam

a ferramenta wavelet são encontrados na literatura (32), (33), (34), (35), (36), (37), (38) e (39).

A transformada Wavelet de um sinal contínuo (Continuous Wavelet Transform - CWT) $f(t)$, definida em um espaço vetorial de funções quadráticas integráveis $L^2(\mathbf{R})$, é dada por:

$$CWT_f^\psi(a, b) = \langle f(t), \psi_{ab}(t) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_{ab}^*(t) dt \quad (3.23)$$

onde $*$ denota o conjugado complexo e as funções $\psi_{ab}(t)$, conhecidas como wavelets filhas, são versões escaladas e transladas de uma dada função $\psi(t)$, denominada wavelet mãe, e dada por:

$$\psi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (3.24)$$

com $a \in \mathbf{R}^+$ e $b \in \mathbf{R}$, são chamados de parâmetros de escalamento (expansão ou contração) e de translação, respectivamente.

No entanto, sendo a CWT uma transformação contínua, ao analisar uma série temporal $f(n)$, é necessário utilizar a Transformada Wavelet Discreta (Discrete Wavelet Transform - DWT). Nesta análise, torna-se necessário a discretização em passos pequenos dos parâmetros de escalonamento a e translação b . Uma forma comum de discretizar esses parâmetros é fazer $a = a_0^i$; $b = j a_0^i b_0$ com j e $i \in \mathbf{Z}$, $a_0 > 1$ e $b_0 \neq 0$, conforme Eq. 3.25.

$$DWT_f^\psi(i, j) = \frac{1}{\sqrt{a_0^i}} \sum_{k=-\infty}^{\infty} f(k) \psi\left(\frac{k - a_0^i j b_0}{a_0^i}\right) \quad (3.25)$$

O escalamento geométrico de $\psi(k)$, isto é $1, \frac{1}{a_0}, \frac{1}{a_0^2}, \dots$, e a translação por $j b_0$ fazem com que a saída da DWT possa também ser representada numa grade bidimensional, mas com diferentes divisões no tempo e na frequência conforme mostrado na Figura 4. Os pontos mostrados na grade são os coeficientes da DWT.

Nota-se que DWT oferece uma melhor resolução no tempo e pior na frequência para escalas mais baixas, e o inverso para as escalas mais altas. Se observarmos um sinal através de uma janela de tempo larga (grande escala), notaríamos características grosseiras, comportamento regido pelas baixas frequências. De forma análoga, se observamos um sinal através de uma pequena janela (pequena escala), notaríamos características mais sutis, comportamento regido pelas altas frequências.

Além disso, ao fazer $a_0 = 2$ $b_0 = 1$, as famílias de wavelets expandidas podem constituir bases ortonormais em um espaço $L^2(\mathbf{R})$ (40). Neste caso, a transformada Wavelet

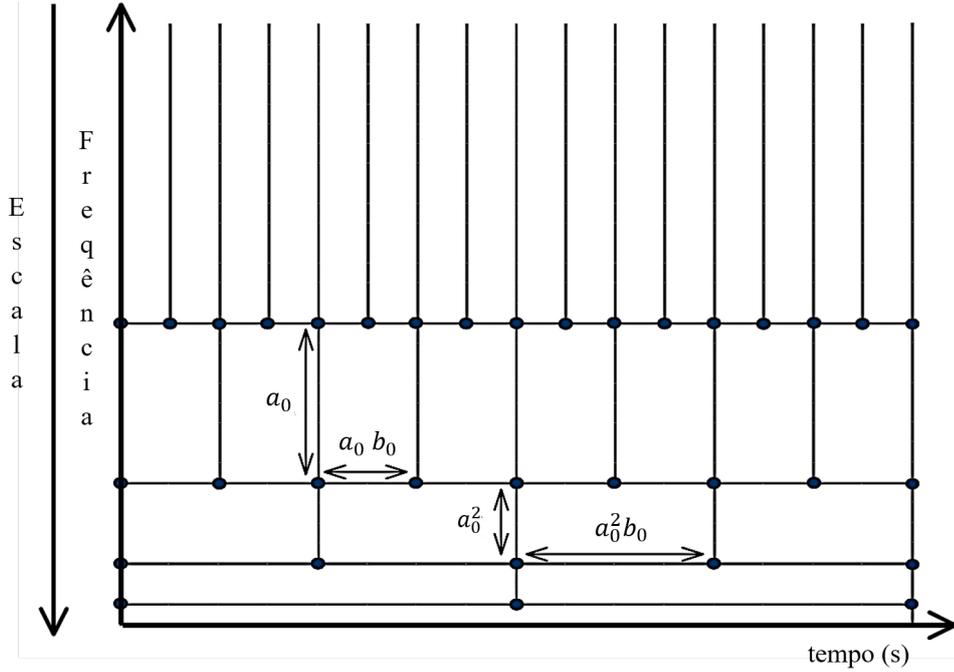


Figura 4 – Grade tempo-escala-frequência

é conhecida como diática-ortonormal. Uma das razões para tal procedimento é a obtenção de um elegante algoritmo, conhecido como análise multi-resolução (AMR) (41).

A ideia básica da AMR é dividir o espectro de um sinal em sub-bandas e então tratar individualmente cada uma das sub-bandas, de acordo com o objetivo almejado. Esse procedimento estabelece um adequado compromisso entre as resoluções no tempo e na frequência, permitindo assim uma eficiente extração de detalhes contidos nos sinais.

A AMR inicia-se com a escolha conveniente de uma função $\phi(x)$ chamada função escalamento, cujas características que a descrevem são: energia finita, oscilatória, média zero e um rápido decaimento em ambos os lados. Essa função pode ser obtida de forma recursiva, a partir da própria função escalada e translada no tempo, tal que:

$$\phi(x) = \sum_n g(n) \sqrt{2} \phi(2x - n), \quad n \in \mathbf{Z} \quad (3.26)$$

onde as amostras $g(n)$ são definidas como o produto interno de $\phi(x)$ e $\sqrt{2} \phi(2x - k)$ representando os coeficientes do filtro de escalamento. Da mesma forma, a função wavelet mãe $\psi(x)$, pode ser obtida:

$$\psi(x) = \sum_n (-1)^n g(-n + 1) \sqrt{2} \phi(2x - n), \quad n \in \mathbf{Z} \quad (3.27)$$

Com um conjunto de $\phi_k(x)$ e $\psi_{j,k}(x)$ gerando todo espaço $L^2(\mathbf{R})$, qualquer função $f(x) \in L^2(\mathbf{R})$ pode ser escrita como uma expansão em série de n termos das funções

wavelets e escalamento. Assim,

$$f(x) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c(k)\phi_k(x) + \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{j=0}^{-\infty} d_j(k)\psi_{j,k}(x), \quad (3.28)$$

sendo os parâmetros $d_j(k)$, os coeficientes wavelet e a sequência $c_j(k)$, representando o sinal no nível de mais baixa resolução.

Sendo o sistema wavelet um sistema ortogonal, os coeficientes $c_j(x)$ e $d_j(k)$ podem ser calculados pelos produtos internos (41), da seguinte forma:

$$c_j(k) = \langle f(x), \phi_{j,k}(t) \rangle = \sum_m g(m - 2k)c_{j-1}(m) \quad (3.29)$$

$$d_j(k) = \langle f(x), \psi_{j,k}(t) \rangle = \sum_m (-1)^{m-2k} g(-m + 2k + 1)d_{j-1}(m) \quad (3.30)$$

Em termos de processamento de sinais, as estruturas de 3.26 e 3.27 sugerem que a análise Wavelet não necessita tratar diretamente com as funções $\phi(x)$ e $\psi(x)$, mas somente com os coeficientes $g(n)$ e $h(n) = (-1)^n g(-n + 1)$, bem como os coeficientes de expansão $d_j(k)$ e $c_j(k)$, presentes na Eq. 3.28. Os dois primeiros coeficientes podem ser vistos como resposta ao impulso de filtros digitais e os dois últimos como sinais digitais propriamente ditos.

Assim, a TW, quando usada para analisar um sinal discreto, pode ser implementada usando-se dois filtros digitais: um passa-altas, $h(n)$, relacionado a uma dada wavelet mãe $\psi(x)$, e sua versão espelhada passa-baixas, $g(n)$, associada à função escalamento $\phi(x)$.

De posse destes filtros, uma estrutura de filtragem para decompor um sinal em diferentes níveis de resolução pode ser construída, tal como a que é mostrada na Figura 5. Nessa estrutura, $c_0(n)$ representa as amostras de $f(x)$, $c_j(n)$ é a versão alisada (passa-baixas) e $d_j(n)$ é a versão detalhada (passa-altas) de $c_j(n)$. O número de níveis de decomposição depende da aplicação desejada.

Assim, a TW, quando usada para analisar um sinal discreto, pode ser implementada usando-se dois filtros digitais: um passa-altas, $h(n)$, relacionado a uma dada wavelet mãe $\psi(x)$, e sua versão espelhada passa-baixas, $g(n)$, associada à função escalamento $\phi(x)$.

Dentre os filtros mais utilizados na AMR estão os filtros de Haar e os filtros de Daubechies (42).

A operação de dizimação por um fator de dois, representada por $\downarrow 2$ nas saídas dos filtros, realiza um escalamento no sinal para o processamento do estágio subsequente. Desse modo, o sinal decomposto tem a metade das amostras do sinal anterior (metade

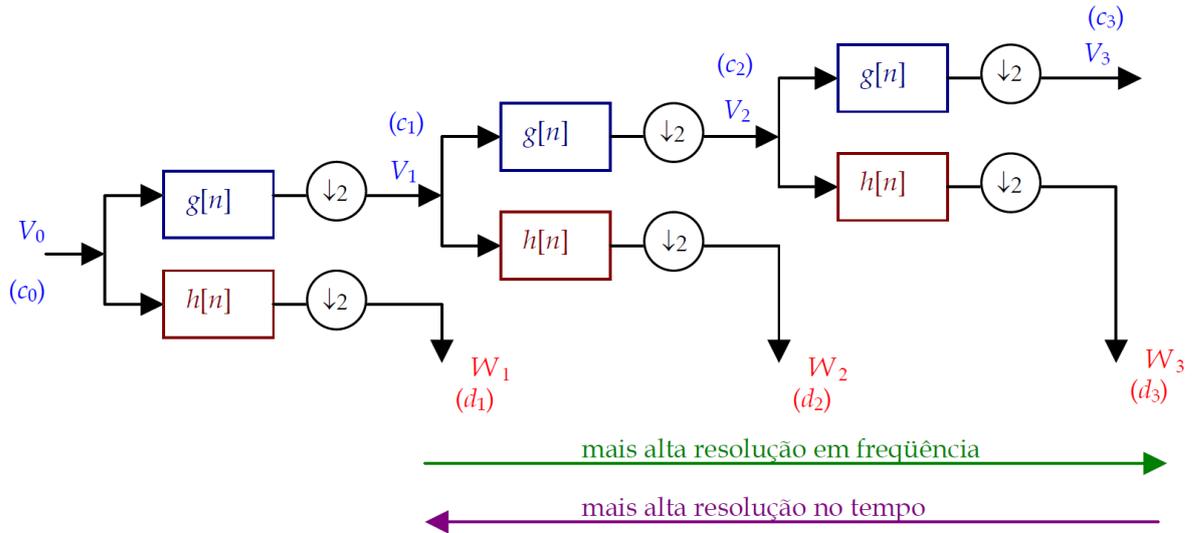


Figura 5 – Decomposição de sinais utilizando AMR
(3)

da largura de banda). Contudo, em muitas aplicações, a operação de dizimação pode ser omitida.

Para este trabalho, foi usado o filtro wavelet do tipo Daubechies (42) com quatro coeficientes *db4*, com decomposição apenas no primeiro nível. Essas características foram baseadas na tese de Silveira (3) e na dissertação de Parentoni (7), nas quais mostraram-se suficientes para capturar eficazmente as informações relevantes à localização das faltas em linhas de transmissão.

3.5 Ruído Branco

O ruído branco é um sinal aleatório que tem a sua potência distribuída uniformemente no espectro de frequência. O nome ruído branco vêm da analogia com o espectro eletromagnético na faixa de luz, pois a luz branca contém todas as frequências do espectro visível.

A quantidade de ruído branco presente nos sinais elétricos, de tensão ou corrente, é um fator que pode influenciar o resultado da localização de faltas quando se trabalha com ondas viajantes. Isto porque quando o nível de ruído não correlacionado é elevado, o mesmo pode se confundir com os transitórios da falta. Portanto, torna-se necessário testar o desempenho dos algoritmos, técnicas e implementações práticas diante dessas interferências.

Os ruídos brancos presentes nos sistemas elétricos têm a propriedade de terem a distribuição normal (também chamada de Gaussiana) com valor médio nulo. Sendo assim, para representá-los fez-se uso das proposições subseqüentes.

Seja um ruído r representado por um vetor de valores aleatórios de uma distribuição uniforme no intervalo de $[0,1]$. Temos que, de acordo com o Teorema do Limite Central, a soma dos números aleatórios torna-se uma distribuição normal quanto mais números são somados. Sendo assim, o ruído com distribuição normal r_g pode ser obtido da seguinte forma:

$$r_g = \sum_{i=1}^j r_i + r \quad (3.31)$$

onde j é o número de vezes em que a soma é realizada.

O ruído normalizado r_n é obtido através da equação:

$$r_n = r_g - \sigma(r_g) \quad (3.32)$$

onde σ é o desvio padrão.

A Figura 6 ilustra um ruído de 10000 amostras de amplitude entre 0 e 1 normalizado e seu histograma, que representa o número de vezes que um determinado valor apareceu.

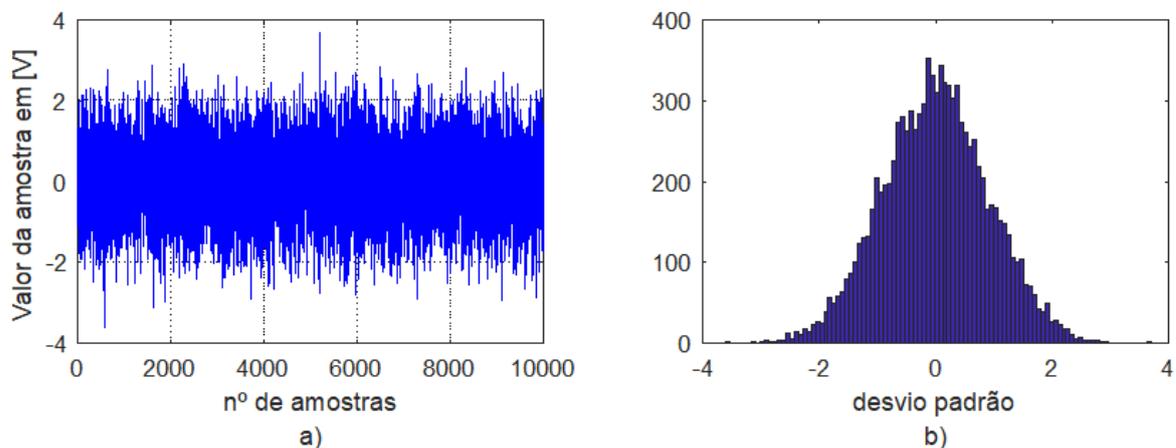


Figura 6 – a) Ruído normalizado para media 0 e desvio padrao 1 e b) Histograma do ruído normalizado

Agora, seja y um sinal senoidal qualquer o qual deseja-se adicionar um ruído branco não-correlacionado com uma determinada Relação Sinal Ruído (SNR).

$$y = A \cdot \text{sen}(2\pi f) \quad (3.33)$$

onde A é amplitude e f é a frequência do sinal senoidal.

O valor que deve ser multiplicado ao ruído normalizado para que ele tenha o SNR desejado é dado por amp_r , expresso pela equação:

$$amp_r = A \cdot \left(10^{\left(\frac{-SNR}{20} \right)} \right) \quad (3.34)$$

Finalmente, o sinal y_r contaminado pelo ruído pode ser obtido através de:

$$y_r = y + amp_r \cdot r_n \quad (3.35)$$

Na Figura 7 é mostrado uma onda senoidal qualquer com a adição dos ruído branco não-correlacionado com SNR de 40 dB através do processo descrito anteriormente.

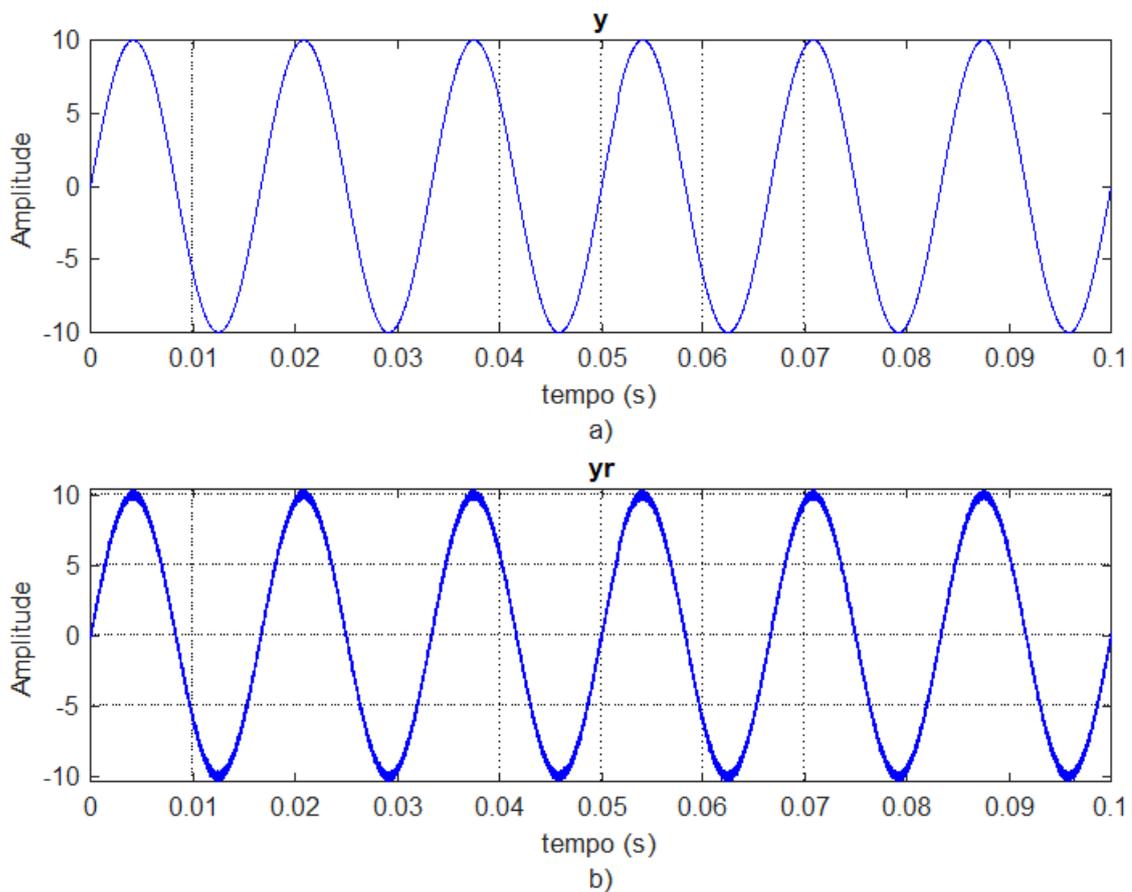


Figura 7 – Onda senoidal a) sem a presença de ruído; b) com a presença de ruído.

3.6 Considerações Finais

Este capítulo teve por objetivo apresentar uma breve base teórica sobre as principais ferramentas matemáticas que foram utilizadas para o desenvolvimento deste trabalho.

O filtro de Savitzky-Golay, amplamente utilizado na área de química analítica, apenas recentemente foi proposto como ferramenta para os engenheiros de potência através

de uma publicação (6), no qual foi possível ter uma visão compreensiva sobre o uso do Filtro SG aplicado aos problemas de transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência.

A eficácia da transformada wavelet para análise de fenômenos transitórios está bastante relacionada com a escolha do tipo de wavelet a ser utilizada. As características sugeridas neste trabalho apresentam, conforme publicações anteriores (3) e (7), bons resultados na localização de faltas em LTs.

O filtro SG e a transformada wavelet serão utilizadas para enfatizar os instantes em que as ondas viajantes refletem nos terminais da LT. Tais ferramentas, com o auxílio da transformada modal, serão aplicadas para localização de faltas para sinais contaminados por ruídos brancos conforme apresentado nos capítulos subsequentes.

4 Aplicação da Teoria das Ondas Viajantes na Localização de Falhas

4.1 Considerações Iniciais

As ondas viajantes representam nada mais do que a propagação de energia elétrica em uma LT (43). Quando ocorre um curto-circuito (falha), as conseqüentes mudanças na energia armazenada produzem ondas viajantes. Essas ondas viajam do ponto de falha, em ambos sentidos, até os terminais da LT. Quando a onda encontra uma descontinuidade de impedância (fontes, transformadores, etc.) ela é refletida e retorna ao ponto de defeito, onde ocorre uma nova reflexão e assim sucessivamente até desaparecerem devido à atenuação (44). Essa dinâmica, configura-se, como sendo transitórios de alta frequência.

Sendo assim, para localizar a distância da falha utilizando os conceitos das ondas viajantes, é necessário determinar a velocidade de propagação das mesmas e o tempo que elas levam para atingir as extremidades da linha. O cálculo da velocidade de propagação é mostrado na seção a seguir.

4.2 Velocidade de Propagação

As ondas viajantes se propagam no sistema elétrico com uma velocidade definida pelos parâmetros da LT. Essa velocidade de propagação pode ser aproximada, para linhas transpostas, de acordo com (43), pela equação 4.1.

$$v_m = \sqrt{\frac{1}{L_m C_m}} \quad (4.1)$$

onde m indica o modo de propagação (terra ou aéreo), L_m e C_m são, respectivamente, os valores de indutância e capacitância de sequência por unidade de comprimento da LT.

Cabe enfatizar que quando a falha envolve o terra é necessário ter cautela na determinação da velocidade v_0 , visto que os parâmetros L_0 e C_0 são, na prática, de difícil determinação.

Além disso, sabe-se que a velocidade de propagação no modo terra é cerca de 70 a 75% da velocidade do modo aéreo. Isso se dá pelos caminhos de retorno (solo, cabos, para-raios, etc.) que o modo terra atravessa.

Assim, com a obtenção da velocidade de propagação da onda, resta encontrar os instantes de tempo em que essas ondas viajantes chegam ao terminal de medição. Com

o auxílio do diagrama de Lattice, dois métodos são apresentados a seguir. O primeiro, denominado de Método 1, utiliza dados de apenas um terminal. Já o segundo, Método 2, necessita de dados de dois terminais sincronizados via GPS.

4.3 Método 1 - Utilizando dados de apenas um terminal

Esta técnica permite calcular a distância da falta com apenas os dados de um terminal. Para entender este procedimento, duas situações devem ser analisadas de forma distintas. A primeira, são as faltas não envolvendo o terra ou faltas isoladas, a outra são as faltas aterradas. Essas configurações, de acordo com o diagrama de Lattice, são apresentados a seguir.

4.3.1 Faltas Isoladas

Seja inicialmente uma falta sem envolver o terra a uma distância x do terminal A. O diagrama de Lattice representa as reflexões e os instantes que as ondas viajantes, provenientes da falta, chegam ao terminal A, como mostra a Figura 8.

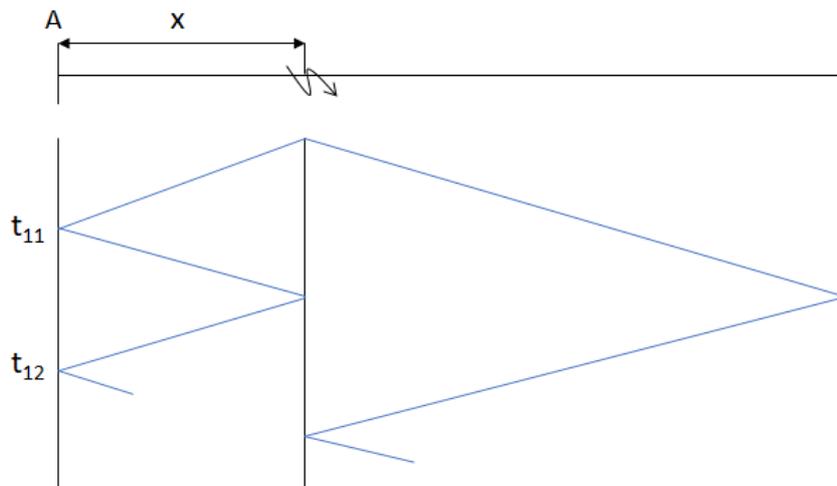


Figura 8 – Diagrama de Lattice para faltas sem envolver o terra.

De acordo com o diagrama de Lattice da figura acima, é mostrado que para faltas não aterradas as ondas refratadas no ponto de defeito, provenientes do terminal remoto, podem ser desprezadas. Sendo assim, a distância x , nesses casos, pode ser calculada, a partir do terminal A, pela seguinte equação:

$$x = \frac{v_1(t_{12} - t_{11})}{2} \quad (4.2)$$

Sendo v_1 a velocidade de propagação das ondas no modo aéreo ($v_1 = 1/\sqrt{L_1 C_1}$); onde L_1 e C_1 são, respectivamente, os valores de indutância e capacitância de sequência

positiva por unidade de comprimento da LT); t_{11} o tempo de propagação da primeira frente de onda originada no ponto de falta até o terminal A; t_{12} é o tempo de propagação da segunda frente de onda que chega ao terminal, considerando-se o tempo de retorno da primeira onda até o ponto de falta e desse ponto novamente ao terminal A.

4.3.2 Falhas Aterradas

Sabe-se que aproximadamente 70% das falhas que ocorrem em sistemas elétricos são do tipo fase-terra. Esse fato remete a uma consideração especial para este tipo de falta, pois, sendo a que mais ocorre, é de grande interesse localizá-las com exatidão.

Por outro lado, as falhas fase-terra são as mais complexas para o processo de localização, pois, neste caso, além de existirem diferentes modos de propagação (aéreo e terra), as refrações, no ponto de falta, não devem mais ser desprezadas.

Essas ondas refratadas que chegam ao terminal A podem atrapalhar no cálculo da distância da falta. Para evitar este problema é necessário saber se a falta ocorreu na primeira ou na segunda metade da linha. Nas próximas sessões é explicado o procedimento efetuado em cada caso para calcular a distância adequadamente.

4.3.2.1 Falhas Aterradas na Primeira Metade da LT

No diagrama de Lattice da Figura 9, o modo aéreo e o modo terra, são representados pelos traços azul e verde, respectivamente, e as refrações, representadas pelos traços em vermelho.

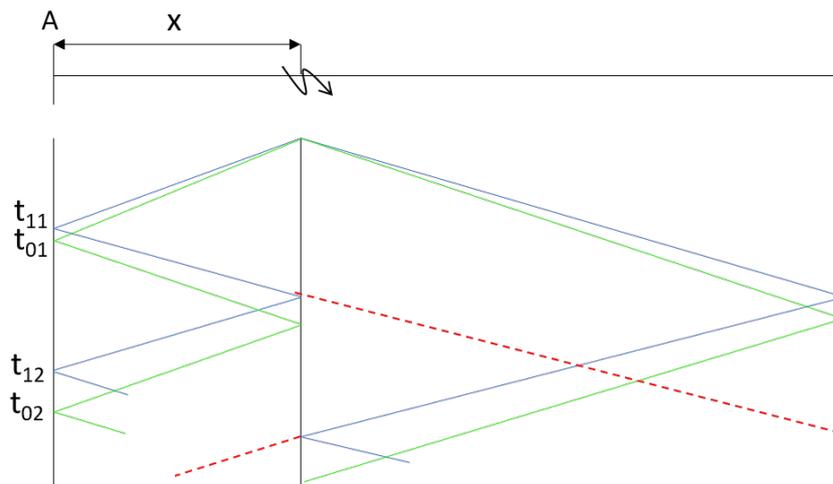


Figura 9 – Diagrama de Lattice para falhas aterradas na primeira metade da LT.

Observa-se, nesta situação, que a partir do ponto de falta, ondas de tensão se propagam em ambos os sentidos; a onda representada pelo traço em azul chega ao terminal A no tempo igual a t_{11} e é refletida novamente para o ponto de falta. Ao chegar no ponto

de falta, parte da energia da onda é refletida e parte é refratada. A parte refletida chega novamente ao terminal A no tempo igual a t_{12} . De posse do intervalo de tempo entre duas reflexões de interesse (t_{11} e t_{12}), a distância x da falta pode ser encontrada mesma forma que para as faltas não aterradas, conforme a Equação 4.2.

A situação na qual uma falta ocorre na primeira metade da LT é a configuração mais simples para a determinação de sua distância, pois as duas primeiras reflexões de modo aéreo medidas no terminal A (t_{11} e t_{12}) já indicam imediatamente os instantes corretos para o cálculo da localização de falta.

4.3.2.2 Faltas Aterradas na Segunda Metade da LT

Quando uma falta aterrada ocorre na segunda metade da LT, é necessária atenção na determinação dos instantes de reflexão, pois a primeira onda refletida no terminal remoto e refratada no ponto de falta chegará antes da segunda onda direta refletida no ponto de falta, como é mostrado no diagrama de Lattice da Figura 10.

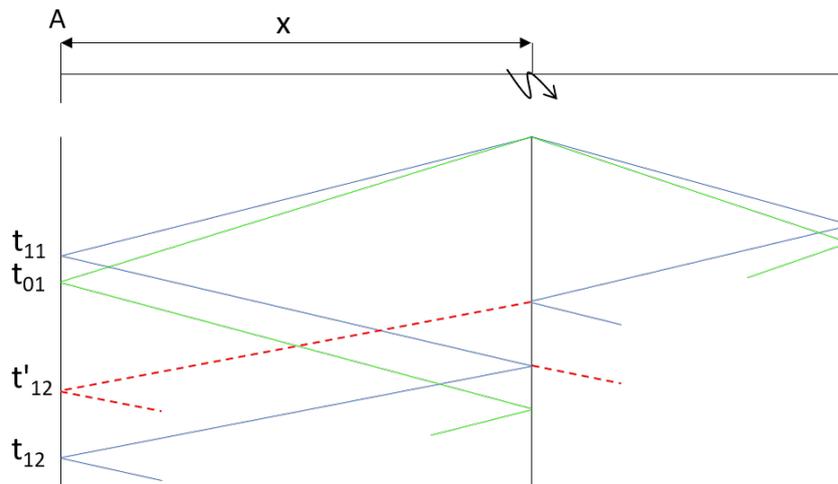


Figura 10 – Diagrama de Lattice para faltas aterradas na segunda metade da LT.

Como base neste resultado, identifica-se uma relação para o tempo t_{11} e outra para o tempo t_{12} , como indicado pelas expressões 4.3 e 4.5.

$$x = v_1 \cdot t_{11} \tag{4.3}$$

$$l + (l - x) = v_1 \cdot t'_{12} \tag{4.4}$$

onde o l é o comprimento total da linha e t'_{12} o tempo de propagação da segunda frente de onda que chega ao terminal A considerando a refração no ponto de falta.

Conseqüentemente, para se determinar o local de falta deve-se agora substituir 4.5 em 4.3 para obter a expressão 4.5.

$$x = l - \frac{v_1(t'_{12} - t_{11})}{2} \quad (4.5)$$

4.4 Método 2 - Utilizando Dados de Dois Terminais Sincronizados

Neste método os registros das ondas viajantes são obtidos em dois terminais (A e B) de modo sincronizado via *Global Positioning System* - GPS. Portanto, é necessário apenas o registro da primeira frente de onda do modo aéreo que chega no terminal A (t_{A1}) e terminal B (t_{B1}), de acordo com o diagrama de Lattice da Figura 11.

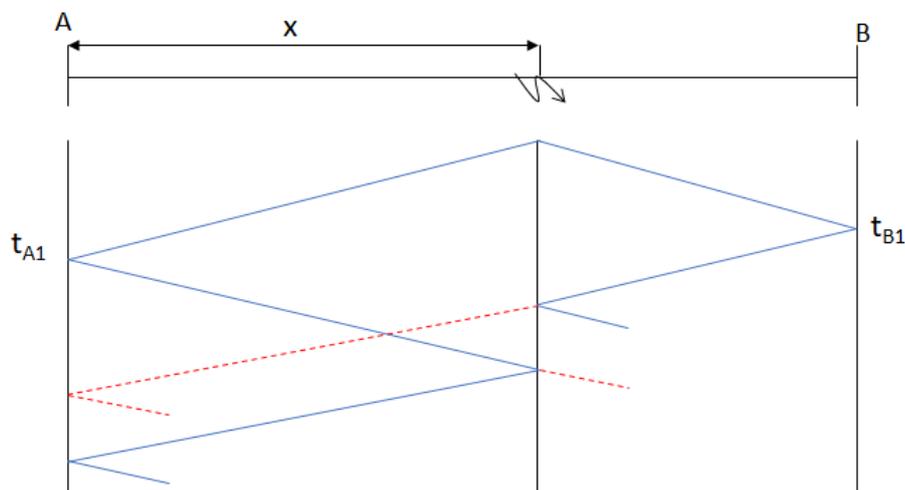


Figura 11 – Diagrama de Lattice para localização de falhas utilizando dois terminais sincronizados.

Assim, a distância x da falta em relação ao terminal A poderá ser facilmente obtida pela seguinte equação:

$$x = l - \frac{v_1(t_{B1} - t_{A1})}{2} \quad (4.6)$$

Cabe ressaltar que neste método não há necessidade de distinguir se a falta é aterrada ou não e se ocorreu na primeira metade da linha ou na segunda. Além disso, não é necessário obter a segunda frente de onda para o mesmo terminal.

4.5 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentadas as principais ideias do desenvolvimento dos métodos de localização de falhas em linhas de transmissão, utilizando o conceito de ondas

viajantes.

Detalhes do algoritmo proposto para localização de faltas utilizando o Método 1 e o Método 2 serão apresentados nos capítulos subsequentes. Esses métodos foram avaliados mediante um conjunto de simulações e seus resultados são apresentados e discutidos no Capítulo 6.

5 Metodologia Proposta

5.1 Considerações Iniciais

Conforme já mencionado nos capítulos anteriores, o foco deste trabalho é simular um módulo de proteção para estimar a localização das faltas através das informações contidas nos transitórios dos sinais elétricos. Porém, é necessário enfatizar que os transitórios que chegam no relé digital podem ser causados não necessariamente por uma falta, mas por outros eventos, tais como energização do sistema, corte de cargas indutivas, energização de transformadores, oscilações de potência, chaveamento de banco de capacitores, harmônicos e etc.

Portanto, para a implementação prática e em tempo real, os sinais elétricos digitais devem passar, previamente, por um módulo classificador de eventos que indicará se houve uma falta na LT ou qualquer outro evento. Se houve uma falta, o módulo de identificação e localização de faltas deverá ser acionado, caso contrário, qualquer outro distúrbio de natureza diferente deverá ser identificado e diagnosticado por outros módulos específicos.

Cabe mencionar que a amplitude dos transitórios é maior nos sinais de tensão do que nos de corrente. Em contrapartida, os transformadores de potencial (TPs) filtram mais transitórios do que os transformadores de corrente (TCs) e, por esse motivo, muitos algoritmos usam sinais de corrente na análise (45), (46) e (47). Neste trabalho, optou-se por utilizar os sinais de tensão por não levar em conta os efeitos da filtragem dos TPs e TCs.

Sendo assim, partiu-se do princípio que todos os transitórios gerados nas simulações foram oriundos de faltas em diversos pontos da LT e em diferentes condições. Os sinais elétricos digitais são analisados por um algoritmo que após diversas operações conseguem estimar a localização das faltas.

Para analisar o desempenho do método de localização de faltas proposto neste trabalho lança-se mão de simulações computacionais. Para tanto, é necessário considerar uma modelagem dos sistemas elétricos a serem simulados.

5.2 Linhas de Transmissão Simuladas

Neste trabalho, foram considerados dois modelos de linhas de transmissão, idealmente transpostas, e modeladas por parâmetros distribuídos com dependência da frequência. Esses modelos foram simulados no software Matlab/Simulink e as suas características são apresentadas a seguir.

5.2.1 Primeiro Modelo (Linha I)

Trata-se de uma linha radial de 138 kV baseada em (7), com 120 km de comprimento, frequência de 60 Hz e ligada a uma carga de 100 MW com fator de potência unitário, conforme a Figura 12 abaixo:

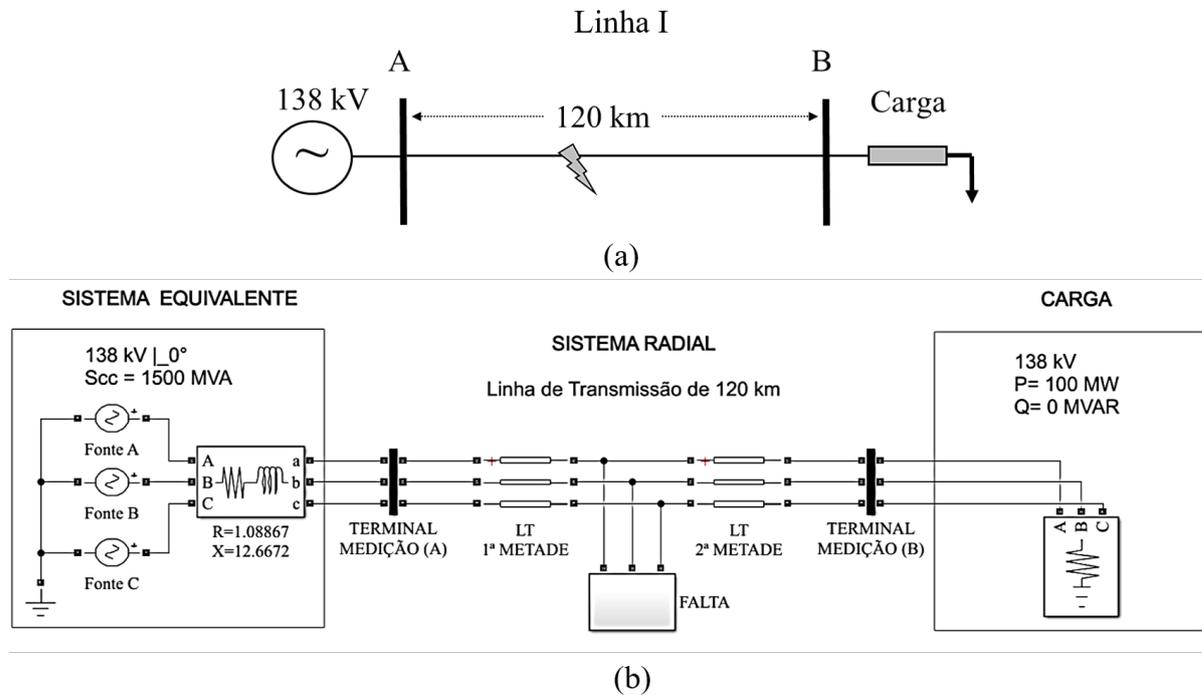


Figura 12 – Linha I. (a) Representação Geral, (b) Diagrama de blocos no Matlab/Simulink.

O Sistema Equivalente é constituído por uma fonte de tensão trifásica de 138 kV (valor eficaz entre fases) em série com uma impedância trifásica, de acordo com o equivalente de Thévenin. O valor da impedância é calculado a partir da potência de curto-circuito (S_{cc}), adotada como sendo de 1500 MVA, baseado em valores de um sistema elétrico real. Assim temos:

$$Z_{cc} = \frac{V_N^2}{S_{cc}} = \frac{138^2}{1500} = 12,696 \Omega$$

Utilizou-se também, com base em valores reais, a relação $X/R = 11,635$, resultando nos seguintes valores para resistência e reatância, por fase, das fontes:

$$R = 1,08867 \Omega$$

$$X = 12,6672 \Omega$$

Com base no modelo de parâmetros distribuídos, pode-se obter os elementos de sequência positiva, negativa e zero da LT, conforme abaixo:

$$R_0 = 0,58449 \Omega/\text{km}$$

$$R_1 = R_2 = 0,256184 \Omega/\text{km}$$

$$L_0 = 3,71 \text{ mH}/\text{km}$$

$$L_1 = L_2 = 1,30 \text{ mH}/\text{km}$$

$$C_0 = 5,18 \text{ nF}/\text{km}$$

$$C_1 = C_2 = 9,09 \text{ nF}/\text{km}$$

Conforme visto na Seção 4.2, as velocidades das ondas viajantes nos modos aéreos (v_1) e terra (v_0), podem ser calculadas de acordo com equação 4.1. Sendo assim, baseados nos parâmetros da Linha I, v_1 e v_2 , são, respectivamente:

$$v_1 = \sqrt{\frac{1}{L_1 C_1}} = \sqrt{\frac{1}{1,30 \cdot 10^{-3} \cdot 9,09 \cdot 10^{-9}}} = 2,90 \cdot 10^5 \text{ km/s}$$

e

$$v_0 = \sqrt{\frac{1}{L_0 C_0}} = \sqrt{\frac{1}{3,71 \cdot 10^{-3} \cdot 5,18 \cdot 10^{-9}}} = 2,28 \cdot 10^5 \text{ km/s}$$

5.2.2 Segundo Modelo (Linha II)

Esta linha corresponde a dois sistemas interligados de 735 kV por uma linha de 500 km de comprimento e frequência de 60 Hz, baseada em (35), conforme Figura 13.

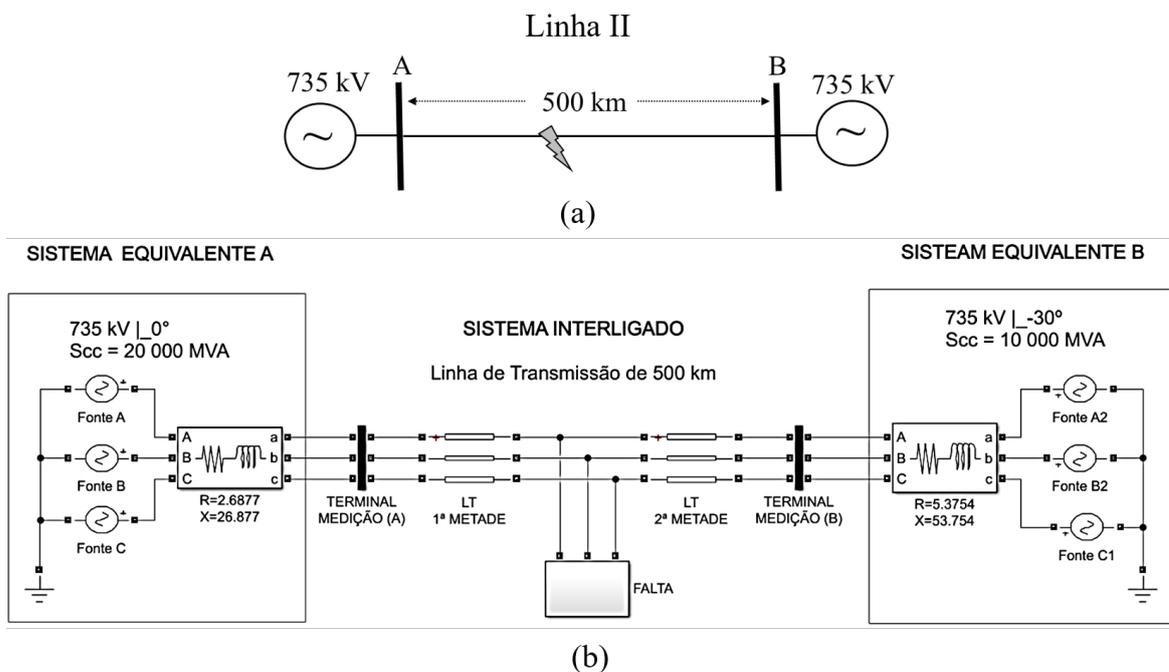


Figura 13 – Linha II. (a) Representação Geral, (b) Diagrama de blocos no Matlab/Simulink.

Pelo mesmo princípio de modelagem da Linha I, o sistema interligado é representado através do equivalente de Thévenin, ou seja, uma fonte de tensão trifásico em série com uma impedância trifásica. As potências de curto-circuito adotadas para o Sistema Equivalente A e B, são, respectivamente:

$$S_{cc_A} = 20000 \text{ MVA}$$

$$S_{cc_B} = 10000 \text{ MVA}$$

Logo, as Impedância de curto-circuito do Sistema Equivalente A e B, são, respectivamente:

$$Z_{cc_A} = \frac{V_N^2}{S_{cc_A}} = \frac{735^2}{20000} = 27,01125 \Omega$$

$$Z_{cc_B} = \frac{V_N^2}{S_{cc_B}} = \frac{735^2}{10000} = 54,0225 \Omega$$

Assumiu-se, uma relação $X/R = 10$ para a impedância da fonte em ambos os sistemas equivalentes, resultando nos seguintes valores para resistência e reatância, por fase:

$$R_A = 2,6877 \Omega \quad R_B = 5,3754 \Omega$$

$$X_A = 26,877 \Omega \quad X_B = 53,754 \Omega$$

O ângulo da tensão em uma das barras é variado de tal modo a simular o fluxo de corrente na linha. Além disso, com base no modelo de parâmetros distribuídos, pode-se obter os elementos de sequência positiva, negativa e zero da LT, apresentados a seguir:

$$R_0 = 0,2676 \Omega/\text{km}$$

$$R_1 = R_2 = 0,01165 \Omega/\text{km}$$

$$L_0 = 3,01 \text{ mH}/\text{km}$$

$$L_1 = L_2 = 0,868 \text{ mH}/\text{km}$$

$$C_0 = 8,57 \text{ nF}/\text{km}$$

$$C_1 = C_2 = 13,41 \text{ nF}/\text{km}$$

Da mesma forma que na Linha I, utilizando a Eq. 4.1, a velocidade de propagação da onda no modo aéreo (v_1) e terra (v_0), são, respectivamente:

$$v_1 = \sqrt{\frac{1}{L_1 C_1}} = \sqrt{\frac{1}{0,868 \cdot 10^{-3} \cdot 13,41 \cdot 10^{-9}}} = 2,931 \cdot 10^5 \text{ km/s}$$

e

$$v_0 = \sqrt{\frac{1}{L_0 C_0}} = \sqrt{\frac{1}{3,01 \cdot 10^{-3} \cdot 8,57 \cdot 10^{-9}}} = 1,969 \cdot 10^5 \text{ km/s}$$

Com a modelagem dos sistemas de transmissão é possível simular várias condições de faltas e gerar os sinais elétricos de corrente e tensão que, por meio de algumas ferramentas matemática, obter-se-ão informações importantes para a localização de faltas. A seção 5.3 seguinte mostra essas ferramentas utilizadas para capturar tais informações.

5.3 Aplicação da Transformada Modal, Wavelet e do Filtro SG

Nesta seção será mostrado como é feito a detecção dos instantes de tempo dos picos das ondas viajantes através da aplicação das ferramentas matemáticas vistas no Capítulo 3.

Inicialmente, é feito o desacoplamento dos sinais trifásicos através da Transformada Modal. Esse procedimento permite eliminar o efeito dos transitórios nas fases sadias através do desacoplamento, conforme visto na seção 3.3.

Além disso permite verificar o tipo de falta ocorrida, aterrada ou isolada. Ou seja, se houve excitação no modo 0 (terra) significa que a falta é aterrada (AT, BT, CT, ABT, BCT, CAT e ABCT). Caso contrário, revela que a falta é isolada (AB, BC, CA e ABC).

Pela Figura 14, pode-se visualizar estes conceitos. Na Figura 14a é mostrado um sinal trifásico sob uma falta fase-terra. Após o desacoplamento pela Transformada Modal, observa-se que o modo terra tem grande intensidade e deve ser levado em consideração. Já na Figura 14b, os sinais desacoplados são provenientes de um sinal trifásico sob uma falta bifásica. Neste caso, percebe-se que o modo terra é praticamente nulo e pode ser desprezado. Assim, através desta análise (Transformação Modal), é constatado se a falta é aterrada ou não.

Posteriormente, aplica-se o filtro diferenciador de Savitzky-Golay de 1ª ordem (*sgsq*) para capturar os transitórios de alta frequência, ou seja, as mudanças abruptas de tensão que representam o instante de chegada da onda viajante no terminal de medição. Para fins de comparação, a Transformada Wavelet (TW) foi também aplicada nesta etapa, de modo a mostrar a eficiência de ambas as técnicas na presença de elevado nível de ruído.

A Figura 15 apresenta essa diferença na robustez de cada ferramenta na detecção dos picos diante de um sinal de tensão com SNR de 30 dB. Como pode ser visto pela Figura 15b, ao utilizar a TW, somente o primeiro pico pode ser identificado, os demais picos subsequentes estão no mesmo nível do ruído. Já utilizando o filtro SG no mesmo sinal, conforme Figura 15a, os picos podem ser identificados facilmente com o mesmo SNR, mostrando sua robustez perante sinais ruidosos.

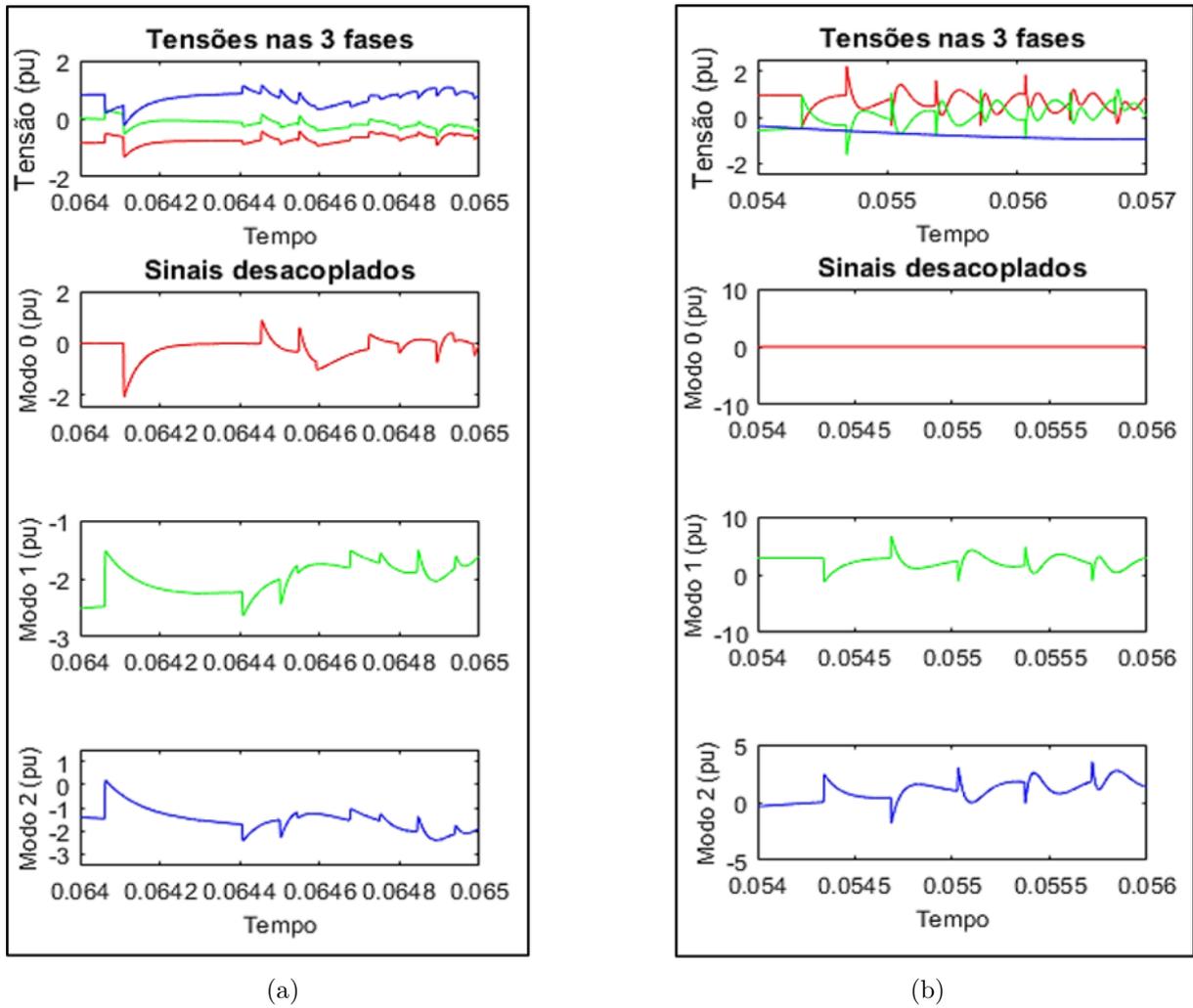


Figura 14 – Transformada modal em um sinal trifásico de tensão; a) Para uma falta aterrada b) Para uma falta isolada.

Para localizar os instantes de tempo em que os picos das ondas viajantes chegam ao terminal de medição é necessário adotar uma adequada política de limiares. Isso é feito através da detecção dos picos que ultrapassem esses limiares, como será explicado a seguir.

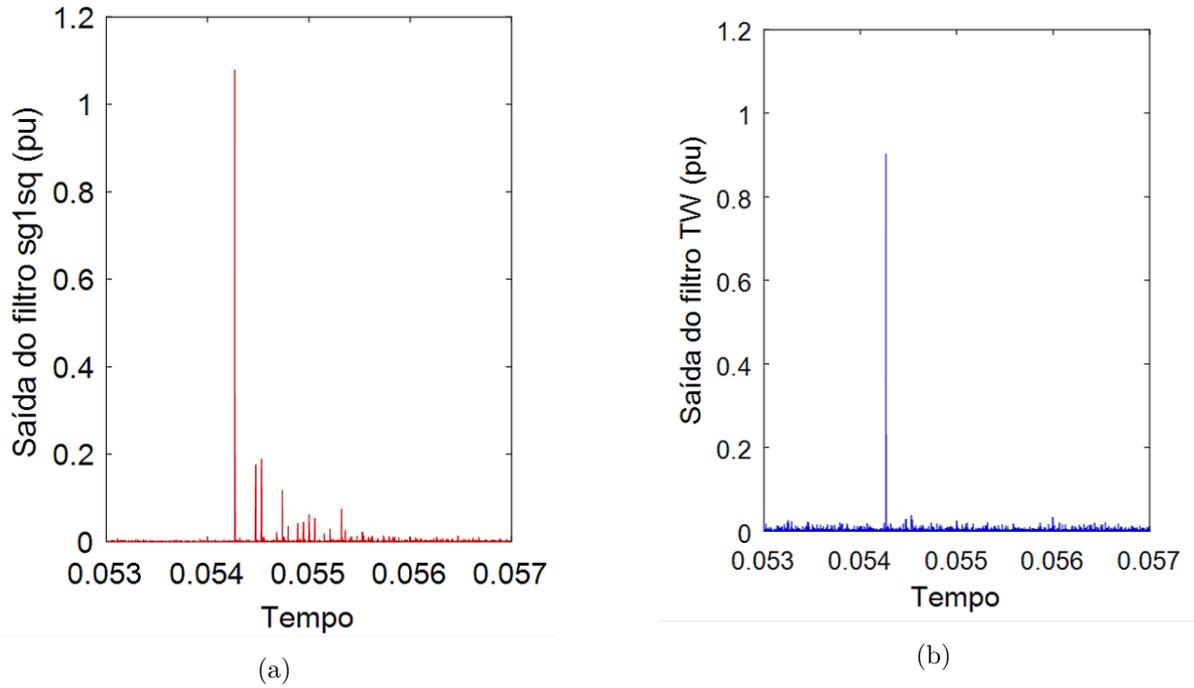


Figura 15 – Extração dos picos em um sinal com SNR de 30 dB; a) Utilizando o Filtro SG; b) Utilizando a TW.

5.4 Limiares

A detecção do primeiro pico é baseada em um limiar previamente definido, o qual é ajustado em função do histórico do nível de ruído em regime permanente presente no sinal, chamado de limiar adaptativo.

A ideia é calcular um valor de limiar que fique um pouco acima do máximo valor do sinal (*sgsq* ou *TW*) em regime permanente, de modo que qualquer variação possa ser detectada mesmo que mude o nível do ruído. Isso é feito por meio do cálculo do desvio padrão σ de (*sgsq* ou *TW*) através de uma janela compreendendo M amostras, ou seja, a cada M amostras o valor do limiar é ajustado. O valor de M deve ser adequado para o propósito de uma supervisão precisa. Sendo assim, as Eq. 5.1 e Eq. 5.2, referentes aos sinais *sgsq* e *TW*, respectivamente, mostraram ser eficazes para criar tais limiares:

$$\text{limiar}_m^{\text{sgsq}} = \sigma \left(\sum_{k=1}^M \text{sgsq}_m(k) \right) \cdot fa \quad (5.1)$$

$$\text{limiar}_m^{\text{TW}} = \sigma \left(\sum_{k=1}^M \text{TW}_m(k) \right) \cdot fa \quad (5.2)$$

nos quais m indica o modo (aéreo=1 ou terra=0) e fa um fator de ajuste. Neste trabalho adotou-se $fa = 20$ e $M = 1000$ para uma frequência de amostragem $f_z = 1$ MHz para ambos os filtros. Tais características mostraram ser eficazes para o objetivo proposto.

Portanto, ao ocorrer uma variação no sinal proveniente de um distúrbio, o limiar detectará com precisão o instante do primeiro pico através da seguinte comparação:

$$sgsq_m(k) \geq \text{limiar}1_m^{sgsq} \quad (5.3)$$

e

$$TW_m(k) \geq \text{limiar}1_m^{TW} \quad (5.4)$$

Para detectar o segundo pico subsequente, apenas no modo aéreo, é necessário utilizar o $\text{limiar}2_1$ que considera os amortecimentos das ondas viajantes. Esta relação pode ser expressa da seguinte forma:

$$\text{limiar}2_1^{sgsq} = \frac{\text{limiar}1_1^{sgsq}}{f_d} \quad (5.5)$$

$$\text{limiar}2_1^{TW} = \frac{\text{limiar}1_1^{TW}}{f_d} \quad (5.6)$$

onde f_d significa um fator de decaimento. Da mesma forma que em 5.3 e 5.4, será registrado o instante do segundo pico no momento em que o sinal ultrapassar o valor do $\text{limiar}2_1$.

Por meio de vários testes, adotou-se, neste trabalho, um $f_d = 3$ para $sgsq$ e $f_d = 8$ para TW , afim de se obterem os melhores resultados. As Figuras 16 e 17, mostram a obtenção desses picos através do filtro SG e do filtro TW, respectivamente.

Por fim, para determinar a distância de uma falta são apresentados dois caminhos semelhantes: o Método 1 e o Método 2. O primeiro utiliza os dados de apenas um terminal enquanto o outro necessita de dados sincronizados de dois terminais.

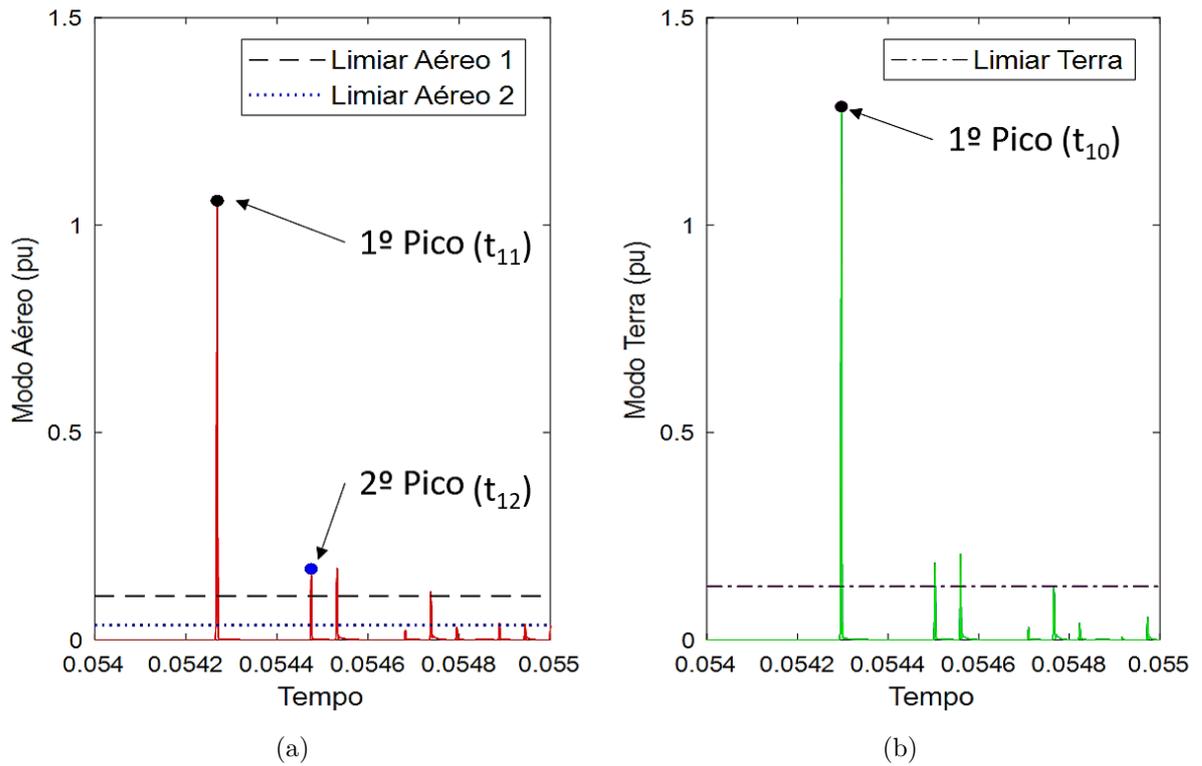


Figura 16 – Detecção dos picos através do filtro SG. a) Modo Aéreo b) Modo Terra

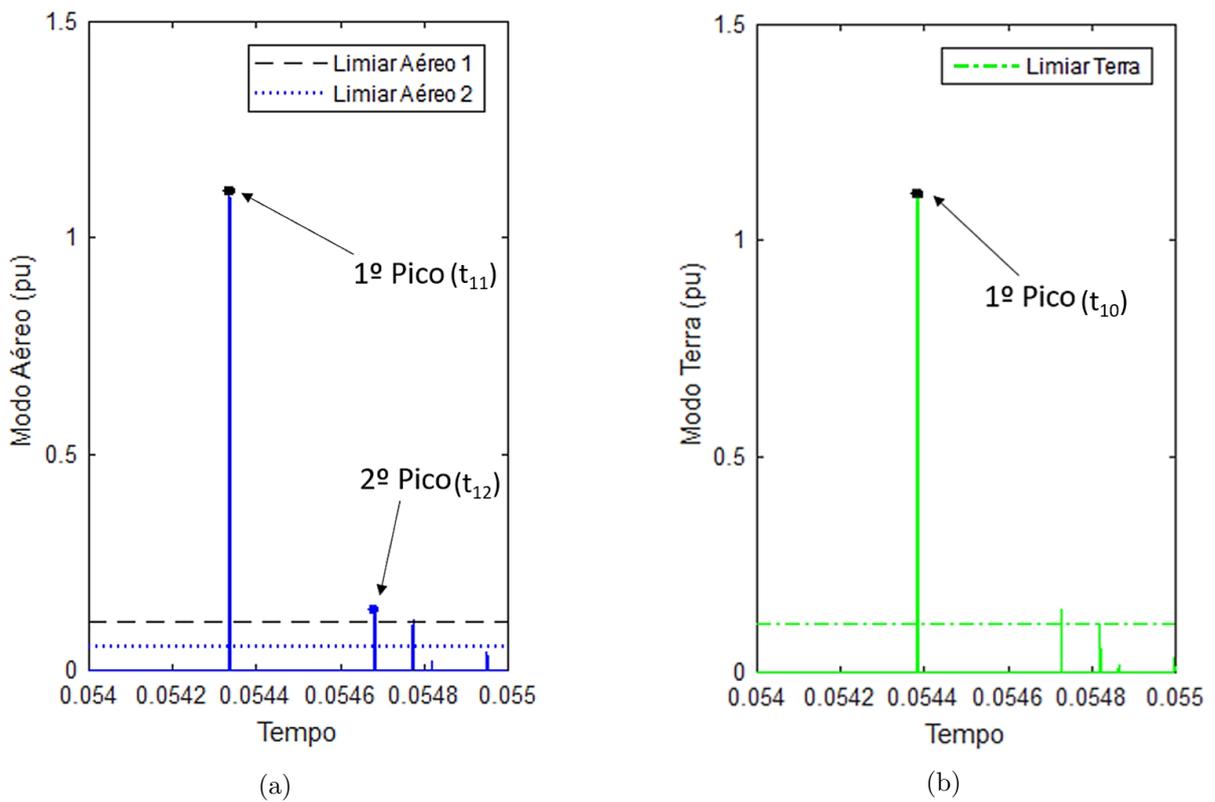


Figura 17 – Detecção dos picos através do filtro TW. a) Modo Aéreo b) Modo Terra

5.5 Localização de Faltas pelo Método 1

Conforme visto o Capítulo 4, se as faltas são do tipo não-aterradas, as ondas refratadas no ponto de defeito, provenientes do terminal remoto, podem ser desprezadas e portanto, a distância x da falta é calculada, a partir do terminal A, de acordo com Eq. 4.2, conforme visto na Seção 4.2.

Já no caso das faltas aterradas, as ondas refletidas no terminal remoto e refratadas no ponto de falta não podem mais ser desprezadas e duas diferentes condições devem ser consideradas:

- i. Faltas na primeira metade da linha.

A distância pode ser calculada pela Eq. 4.2 após a obtenção do intervalo de tempo entre as duas primeiras ondas que chegam ao terminal de medição, de acordo o diagrama de Lattice na Figura 9, conforme na subseção 4.3.2.1.

- ii. Faltas na segunda metade da linha.

Nestes casos, a primeira onda refletida no terminal remoto e refratada no ponto de falta chegará antes da segunda onda direta refletida no ponto de falta, como mostrado no diagrama de Lattice da Figura 10. Sendo assim, a distância da falta pode ser calculada pela equação 4.5, conforme visto na subseção 4.3.2.2.

Para saber se a falta ocorreu na primeira ou na segunda metade da linha é necessário realizar uma análise envolvendo o modo terra e o modo aéreo. Sabe-se que a velocidade do modo terra é menor do que a do modo aéreo. Logo, o primeiro pico do modo terra (t_{10}) estará atrasado com relação ao primeiro pico do modo aéreo (t_{11}), conforme pode ser observado nas Figuras 16a e 17a. Portanto, através do intervalo de tempo entre as duas primeiras subseqüentes ondas do modo aéreo ($\Delta t_i = t_{12} - t_{11}$), pode-se calcular uma distância x_1 usando a Eq. 4.2 e outra distância x_2 pela Eq. 4.5 (complemento de x_1). Ainda, com o intervalo de tempo entre o primeiro pico do modo terra e o primeiro do modo aéreo ($\Delta t_e = t_{10} - t_{11}$), de acordo com as Figuras 16 e 17, e sabendo-se o tempo total de propagação da onda (τ) por toda a LT, dois valores de v_0 podem ser calculados:

$$v_{01} = \frac{2x_1}{2\Delta t_e + \Delta t_i} \quad (5.7)$$

$$v_{02} = \frac{2x_2}{2\Delta t_e + 2\tau - \Delta t_i} \quad (5.8)$$

Um dos dois valores obtidos estará fora de uma provável faixa de variação da velocidade de propagação do modo terra (por exemplo $v_0 = 0,7 \cdot v_1 \pm 10\%$). Se isso acontecer com 5.8, a falta ocorreu na primeira metade da linha, conseqüentemente a

distância x_1 estará correta. Caso contrário, a falta ocorreu na segunda metade da LT e, portanto, a distância x_2 será verdadeira.

5.6 Localização de Faltas pelo Método 2

Conforme visto na Seção 4.4, neste método não há necessidade de distinguir se a falta é aterrada ou não e se ocorreu na primeira metade da linha ou na segunda. Além disso, não é necessário obter a segunda frente de onda para o mesmo terminal. É necessário, somente, o registro da primeira frente de onda do modo aéreo para cada terminal (t_{A1} e t_{B1}), conforme Figura 18. Assim, a distância da falta poderá ser obtida através da seguinte expressão:

$$x = l - \frac{v(t_{B1} - t_{A1})}{2} \quad (5.9)$$

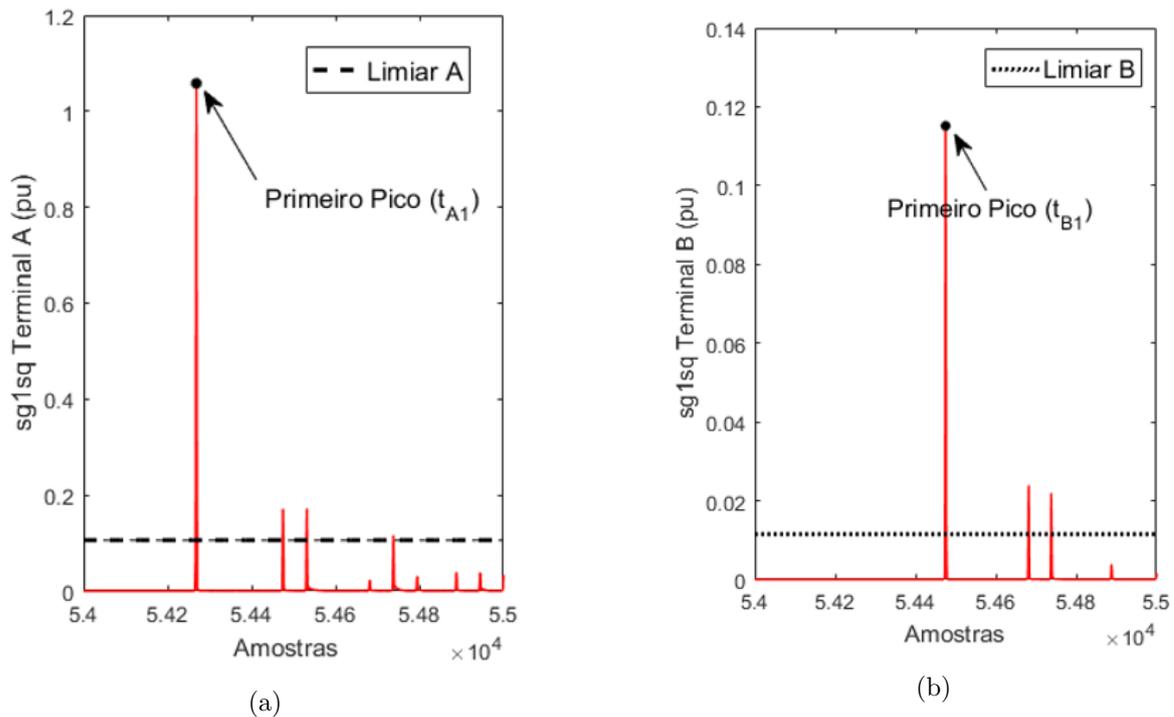


Figura 18 – Saídas do filtro SG no modo aéreo para; a) o terminal A; b) o terminal B.

Na próxima seção é apresentado um resumo relatando todo o processo que o algoritmo realiza para estimar a localização de faltas em linhas de transmissão.

5.7 Funcionamento do Algoritmo de Localização

Com o objetivo de automatizar o procedimento de localização de faltas, foi desenvolvido um algoritmo computacional através do software Matlab. Esse algoritmo tem

como dados de entrada os sinais de tensão, provenientes de simulações feitas pelo próprio Matlab, através do módulo Simulink, no qual é possível selecionar dois tipos de linhas de transmissão: Linha em um sistema radial (Linha I) e linha em um sistema interligado (Linha II).

Assim, de posse dos sinais de tensão provenientes da simulação, o algoritmo realiza as operações da transformação modal, para desacoplar os sinais em modos aéreos e terra. A seguir é aplicado o filtro SG e a transformada Wavelet no sinal desacoplado, para extrair apenas as variações abruptas (alta frequência) do sinal.

Em seguida, o algoritmo estima a localização da falta através de duas técnicas diferentes, o Método 1 e o Método 2. No Método 2, que faz uso de dados de dois terminais sincronizados, detecta-se o primeiro pico no modo aéreo em cada terminal por meio do limiar adaptativo *limiar1*. Assim, com os instantes de tempo de chegada desses picos nos terminais, é utilizado a Eq. 4.6 para o cálculo da distância.

Já no método 1, que utiliza dados de apenas um terminal, são detectados dois picos subsequentes, através do *limiar1* e do *limiar2*, no modo aéreo para o mesmo terminal.

Após isso, é verificado se a falta é aterrada ou não, através da análise modal do modo 0 (terra). Caso a falta não seja aterrada, o algoritmo utiliza Eq. 4.2 para o cálculo da distância. Caso contrário, isto é, a falta seja aterrada, o algoritmo realiza alguns cálculos para verificar se a falta ocorreu na primeira ou na segunda metade da LT. Assim se a falta aconteceu na primeira metade da linha, o algoritmo utiliza Eq. 4.2, caso contrário, se a falta ocorreu na segunda metade da linha, o algoritmo utiliza Eq. 4.5 para o cálculo da distância.

Para um melhor entendimento, a Figura 19 ilustra o fluxograma do algoritmo de localização de faltas desenvolvido

Além disso, o algoritmo permite simular a influência da variação de diversos fatores na precisão da localização de faltas, tais como resistência, ângulo de incidência, distância de falta, razão sinal ruído da tensão de entrada, taxa de amostragem, dentre outros.

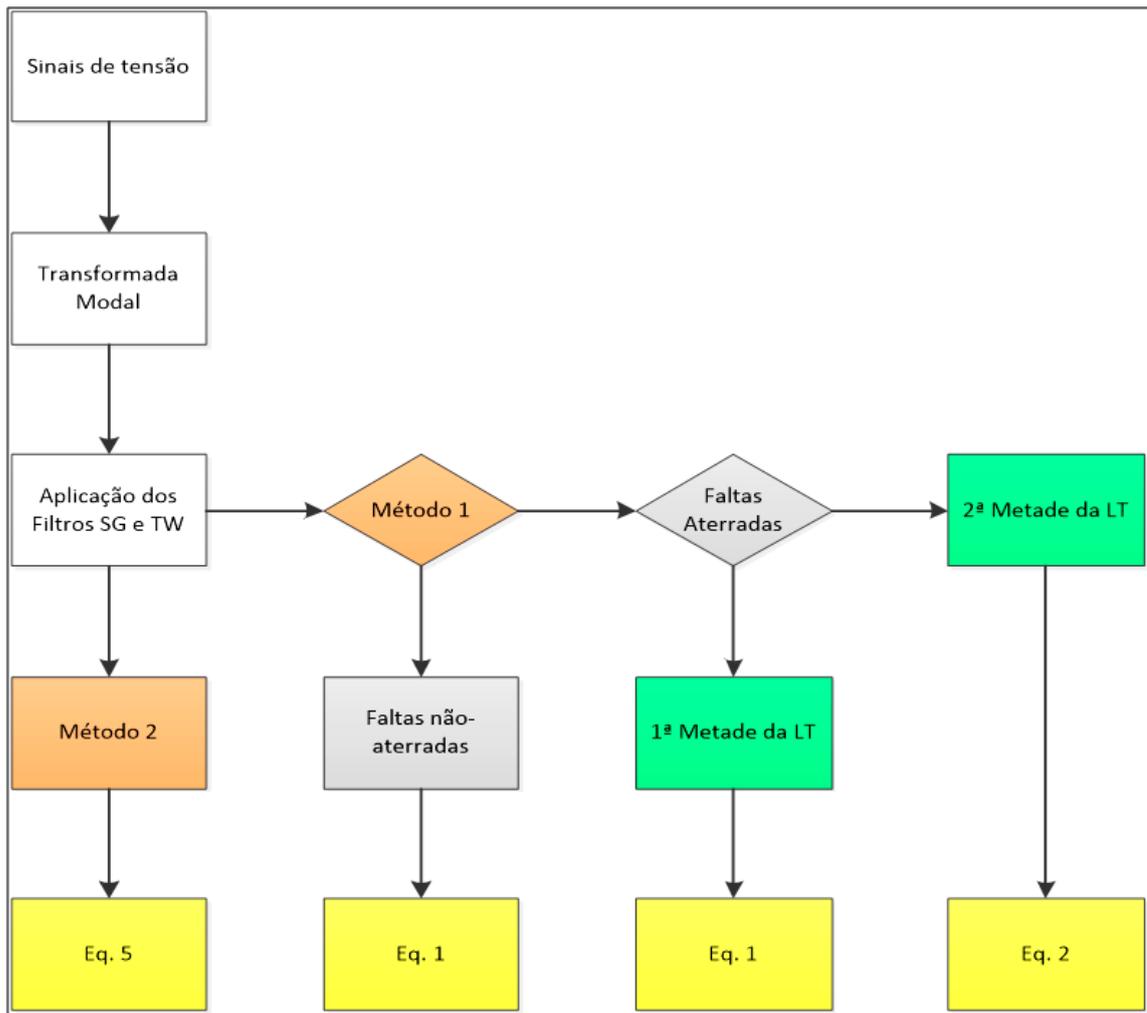


Figura 19 – Fluxograma do algoritmo de localização de faltas.

5.8 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentadas as principais ideias do desenvolvimento do localizador de faltas para uso em relés de proteção de linhas de transmissão. O uso do Filtro SG como ferramenta para extrair características em sinais ruidosos pode ser mais eficiente em relação a Transformada Wavelet.

Além disso, foram apresentados dois métodos alternativos para a localização de faltas em Linhas de transmissão. O Método 1, que utiliza dados de apenas um terminal, é menos oneroso. Porém, o procedimento para a identificação do ramo sob falta é mais complexo e menos confiável pois é necessário a detecção de uma segunda reflexão da onda para o mesmo terminal. Em caso de atenuações muito elevadas esta reflexão pode não ser capturada, comprometendo a localização da falta. Ao contrário do Método 2, que por utilizar dados de dois terminais sincronizados, precisa capturar somente a primeira frente de onda para cada terminal, tornando-o assim mais robusto. Vale lembrar que a solução utilizando o Método 2 no modelo simulado não acarreta em nenhum problema, pois os limites técnicos de comunicação e sincronismo são inerentes. Os resultados apresentados

no Capítulo 6 comprovam tais comentários.

6 Resultados

6.1 Considerações Iniciais

Este capítulo tem por objetivo mostrar e analisar os principais resultados obtidos pelas simulações computacionais realizadas ao longo do desenvolvimento desta dissertação. Esses resultados mostram a performance do filtro SG e da transformada Wavelet no tocante a localização de faltas em LTs na presença de ruídos.

Os dados de sinais faltosos foram obtidos através de simulações nos programas MATLAB/Simulink. Tendo em vista a atual tecnologia de amostragem e processamento de sinais que apresenta alto poder de captura e velocidade, o intervalo de amostragem adotado foi de 1 μ s. Duas linhas de diferentes características, foram modeladas por parâmetros distribuídos com dependência da frequência.

Além disso, foram representados vários cenários de interesse, ou seja, foram simuladas faltas na LT com diferentes ângulos de incidência (a_i) e resistências de falta (R_f). Em cada cenário foi aplicado todos os tipos de faltas (AT, BT, CT, AB, BC, CA, ABT, BCT, CAT e ABC) e em diferentes pontos da linha (variando de 10 a 90% da LT, em passos de 10%), além de aplicar diferentes níveis de ruído não-correlacionado (SNR de 30, 40, 50, 60 e 80).

Os testes foram feitos tanto para a Linha I como para Linha II, totalizando 12960 situações simuladas. As sessões a seguir mostram os resultados da eficiência dos filtros para tais cenários, onde cada cenário apresenta 2160 simulações.

Por fim, vale ressaltar que os erros de localização (e) são normalmente encontrados na literatura (20), (33), (48), (49) e (36), utilizando o comprimento da linha no denominador, conforme Eq. 6.1.

$$e\% = \left| \frac{x_{real} - x_{encontrado}}{x_{linha}} \right| \cdot 100\% \quad (6.1)$$

No entanto, como o comprimento da linha é maior que a distância da falta, o erro calculado se torna menor do que deveria, mascarando-o. No presente trabalho, teve-se o cuidado de adotar a expressão que leva em consideração o valor real da posição da falta no denominador, representando com mais fidelidade o valor do erro, conforme Eq. 6.2.

$$e\% = \left| \frac{x_{real} - x_{encontrado}}{x_{real}} \right| \cdot 100\% \quad (6.2)$$

6.2 Cenário 1 ($R_f = 100 \Omega$ e $a_i = 0^\circ$)

Como mencionado anteriormente, em cada cenário foi aplicado todos os tipos de faltas (AT, BT, CT, AB, BC, CA, ABT, BCT, CAT e ABC) e em diferentes pontos da linha (variando de 10 a 90% da LT, em passos de 10%). No entanto, nessa situação, as faltas foram simuladas com um ângulo de incidência $a_i = 0^\circ$ e resistência de falta $R_f = 100 \Omega$.

A Tabela 1 mostra a quantidade de faltas localizadas em relação ao nível de ruído presente no sinal através do filtro SG e Wavelet para os Métodos 1 e 2 e, também, para as Linhas I e II.

Tabela 1 – Quantidades de faltas localizadas para o cenário 1

Faltas localizadas em (%)	Método com 1 Terminal		Método com 2 Terminais	
LINHA I	SG	TW	SG	TW
SNR 80	100,0	100,0	100,0	100,0
SNR 70	100,0	98,9	100,0	100,0
SNR 60	100,0	78,9	100,0	100,0
SNR 50	90,0	43,3	100,0	94,4
SNR 40	68,9	1,1	87,8	67,8
SNR 30	28,9	1,1	67,8	35,6
LINHA II	SG	TW	SG	TW
SNR 80	100,0	100,0	100,0	100,0
SNR 70	100,0	97,8	100,0	100,0
SNR 60	100,0	80,0	100,0	100,0
SNR 50	90,0	44,4	100,0	100,0
SNR 40	57,8	0,0	98,9	90,0
SNR 30	14,4	0,0	87,8	62,2

Na Figura 20 é mostrado o mesmo resultado da tabela acima, porém em forma de gráfico para melhor visualização. É interessante observar que mesmo a falta ocorrendo com um ângulo de incidência próximo de zero é possível ter uma boa eficiência até SNR = 50. A partir disso, o algoritmo começa a apresentar erros. Todavia, em todos os casos é notável o ganho de eficiência utilizando o filtro SG em relação à Wavelet.

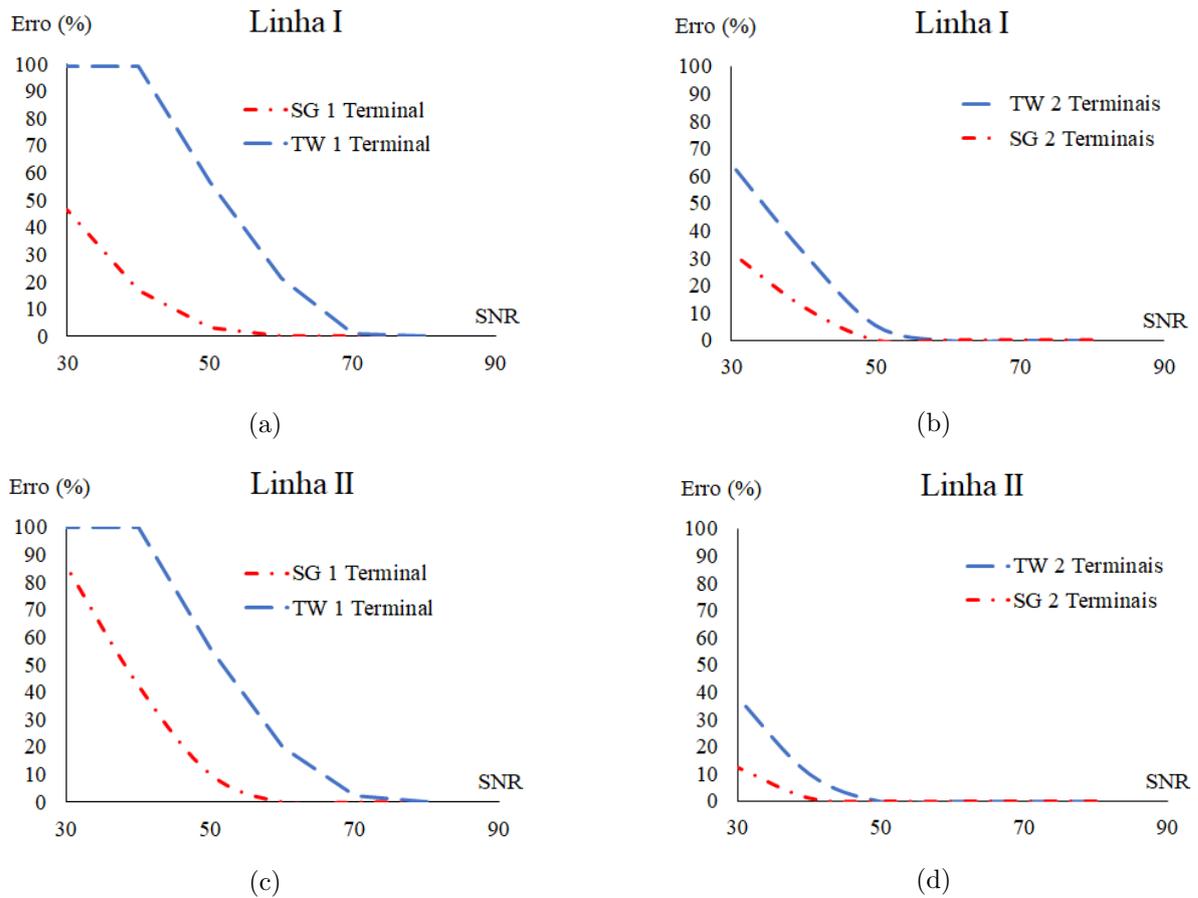


Figura 20 – Avaliação da performance entre os filtros para o cenário 1. (a) Linha I Método 1; (b) Linha I Método 2; (c) Linha II Método 1; (d) Linha II Método 2.

6.3 Cenário 2 ($R_f = 70 \Omega$ e $a_i = 60^\circ$)

Neste caso, as faltas foram simuladas com um ângulo de incidência $a_i = 60^\circ$ e resistência de falta $R_f = 70 \Omega$. A Tabela 2 bem como a Figura 21 mostram a quantidade de faltas localizadas em relação ao nível de ruído através do filtro SG e Wavelet para os Métodos 1, 2 para as Linhas I e II.

Diante desses dados, pode ser visto o ganho de eficiência utilizando o filtro SG. Note, pelas Figuras 21c e 21d, que a eficiência do algoritmo utilizando o filtro SG juntamente com Método 2 é de aproximadamente 100% para toda faixa de SNR.

Tabela 2 – Quantidades de faltas localizadas para o cenário 2

Faltas localizadas em (%)	Método com 1 Terminal		Método com 2 Terminais		
	LINHA I	SG	TW	SG	TW
SNR 80		100,0	100,0	100,0	100,0
SNR 70		100,0	100,0	100,0	100,0
SNR 60		100,0	100,0	100,0	100,0
SNR 50		100,0	90,0	100,0	100,0
SNR 40		92,2	40,0	100,0	98,9
SNR 30		68,9	1,1	100,0	71,1
LINHA II		SG	TW	SG	TW
SNR 80		100,0	100,0	100,0	100,0
SNR 70		100,0	100,0	100,0	100,0
SNR 60		100,0	100,0	100,0	100,0
SNR 50		100,0	80,0	100,0	100,0
SNR 40		95,6	47,8	100,0	98,9
SNR 30		68,9	0,0	98,9	98,9

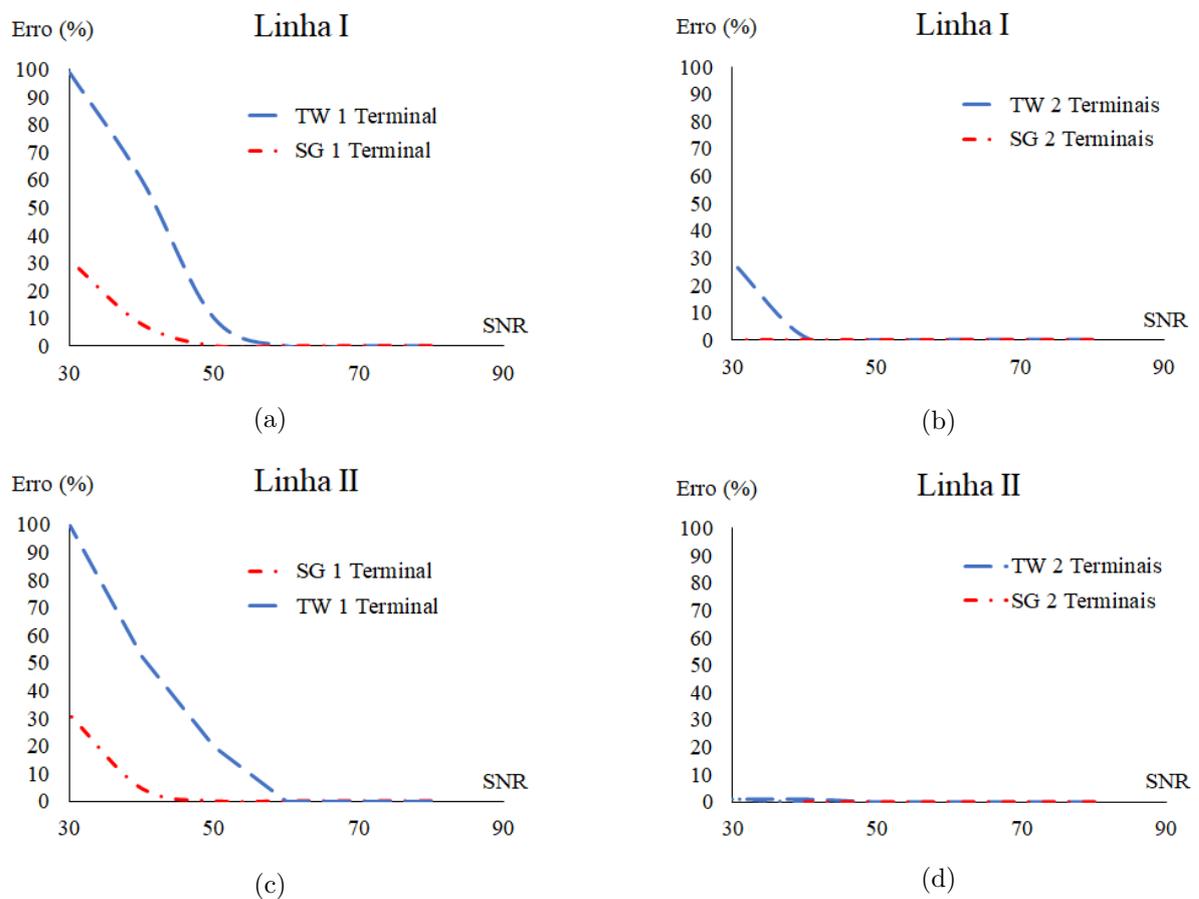


Figura 21 – Avaliação da performance entre os filtros para o cenário 2. (a) Linha I Método 1; (b) Linha I Método 2; (c) Linha II Método 1;(d) Linha II Método 2.

6.4 Cenário 3 ($R_f = 50 \Omega$ e $a_i = 45^\circ$)

Neste cenário, as faltas foram simuladas com um ângulo de incidência $a_i = 45^\circ$ e resistência de falta $R_f = 50 \Omega$. Do mesmo modo que as sessões anteriores, a Tabela 3 bem como a Figura 22 mostram a quantidade de faltas localizadas em relação ao nível de ruído presente no sinal.

Tabela 3 – Quantidades de faltas localizadas para o cenário 3

Faltas localizadas em (%)	Método com 1 Terminal		Método com 2 Terminais	
	SG	TW	SG	TW
LINHA I				
SNR 80	100,0	100,0	100,0	100,0
SNR 70	100,0	100,0	100,0	100,0
SNR 60	100,0	100,0	100,0	100,0
SNR 50	100,0	82,2	100,0	100,0
SNR 40	90,0	41,1	100,0	97,8
SNR 30	70,0	0,0	98,9	71,1
LINHA II				
SNR 80	100,0	100,0	100,0	100,0
SNR 70	100,0	100,0	100,0	100,0
SNR 60	100,0	100,0	100,0	100,0
SNR 50	100,0	74,4	100,0	100,0
SNR 40	81,1	41,1	98,9	98,9
SNR 30	71,1	0,0	98,9	88,9

Novamente, nota-se pelas Figuras 22c e 22d, que a eficiência do algoritmo utilizando o filtro SG juntamente com Método 2 é de aproximadamente 100% para toda faixa de SNR.

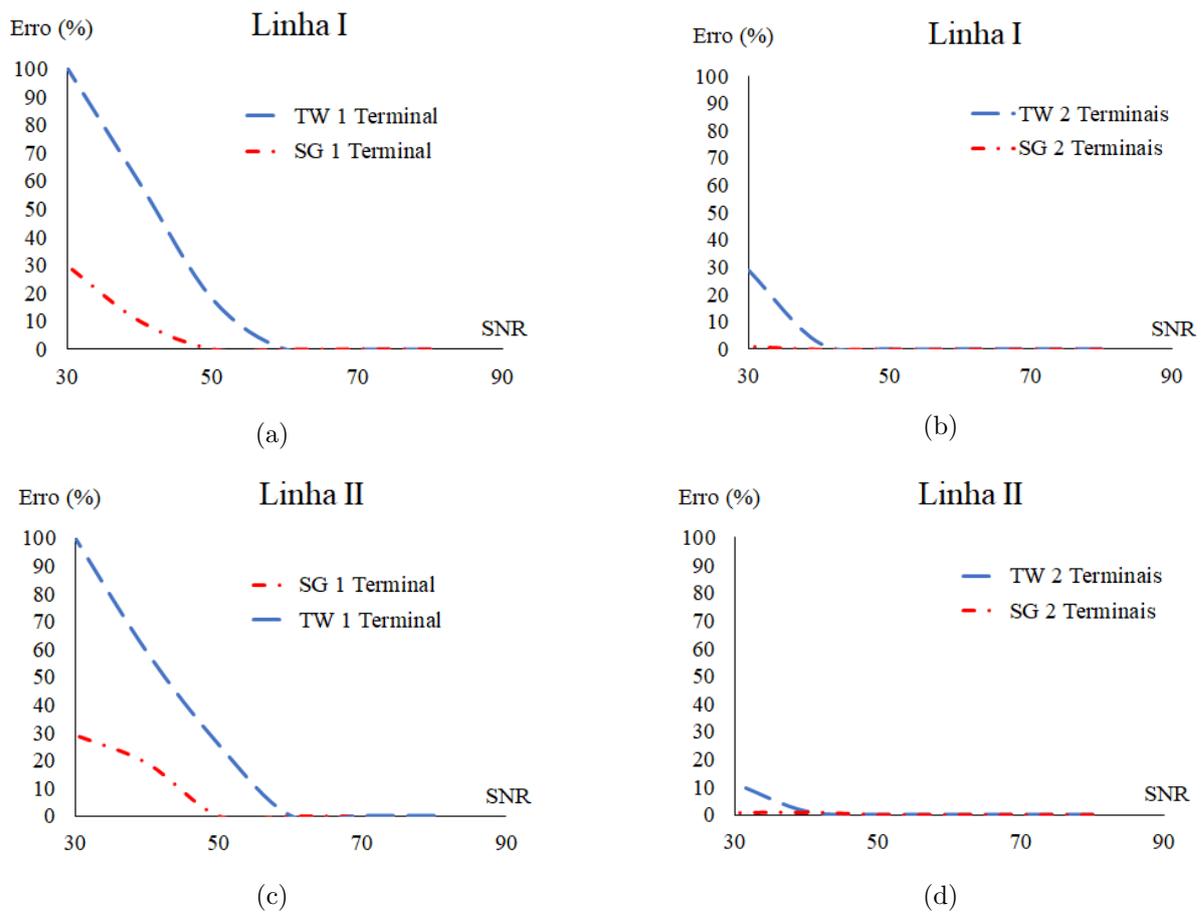


Figura 22 – Avaliação da performance entre os filtros para o cenário 3. (a) Linha I Método 1; (b) Linha I Método 2; (c) Linha II Método 1; (d) Linha II Método 2.

6.5 Cenário 4 ($R_f = 10 \Omega$ e $a_i = 30^\circ$)

No cenário 4, as faltas foram simuladas com um ângulo de incidência $a_i = 30^\circ$ e resistência de falta $R_f = 10 \Omega$. A Tabela 4 bem como a Figura 23 mostram a quantidade de faltas localizadas em relação ao nível de ruído presente no sinal.

Mais uma vez o filtro SG proporciona um ganho de eficiências em relação à Wavelet.

Tabela 4 – Quantidades de faltas localizadas para o cenário 4

Faltas localizadas em (%)	Método com 1 Terminal		Método com 2 Terminais	
LINHA I	SG	TW	SG	TW
SNR 80	100,0	100,0	100,0	100,0
SNR 70	100,0	100,0	100,0	100,0
SNR 60	100,0	100,0	100,0	100,0
SNR 50	98,9	73,3	100,0	100,0
SNR 40	77,8	32,2	100,0	92,2
SNR 30	50,0	0,0	90,0	64,4
LINHA II	SG	TW	SG	TW
SNR 80	100,0	100,0	100,0	100,0
SNR 70	100,0	100,0	100,0	100,0
SNR 60	100,0	95,6	100,0	100,0
SNR 50	97,8	66,7	100,0	100,0
SNR 40	72,2	24,4	98,9	100,0
SNR 30	51,1	0,0	98,9	73,3

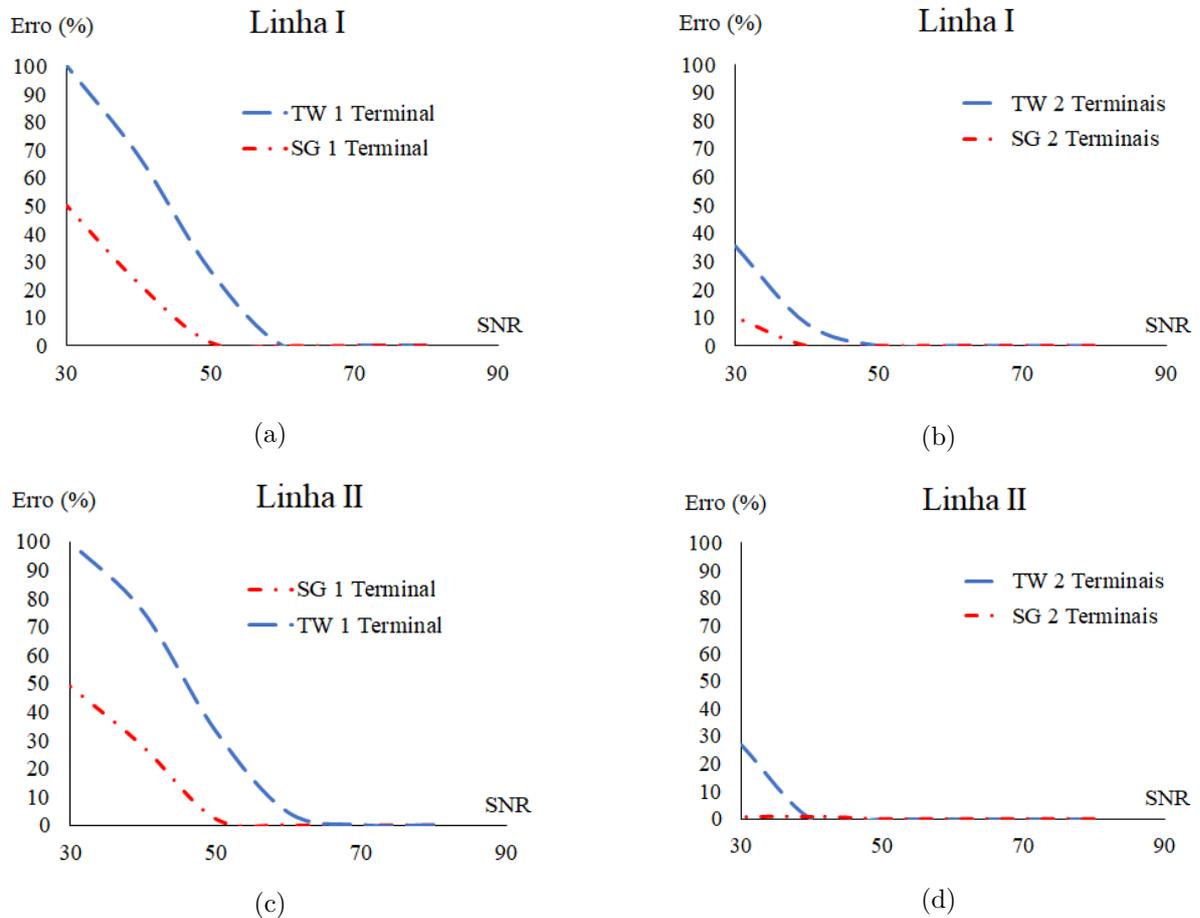


Figura 23 – Avaliação da performance entre os filtros para o cenário 4. (a) Linha I Método 1; (b) Linha I Método 2; (c) Linha II Método 1;(d) Linha II Método 2.

6.6 Cenário 5 ($R_f = 0 \Omega$ e $a_i = 0^\circ$)

No cenário 5, as faltas foram simuladas com um ângulo de incidência $a_i = 0^\circ$ e resistência de falta $R_f = 0 \Omega$. A Tabela 5 bem como a Figura 24 mostram a quantidade de faltas localizadas em relação ao nível de ruído presente no sinal.

Tabela 5 – Quantidades de faltas localizadas para o cenário 5

Faltas localizadas em (%)	Método com 1 Terminal		Método com 2 Terminais	
LINHA I	SG	TW	SG	TW
SNR 80	100,0	100,0	100,0	100,0
SNR 70	100,0	100,0	100,0	100,0
SNR 60	100,0	86,7	100,0	100,0
SNR 50	93,3	43,3	100,0	97,8
SNR 40	71,1	1,1	96,7	74,4
SNR 30	32,2	1,1	67,8	36,7
LINHA II	SG	TW	SG	TW
SNR 80	100,0	100,0	100,0	100,0
SNR 70	100,0	100,0	100,0	100,0
SNR 60	100,0	90,0	100,0	100,0
SNR 50	100,0	44,4	100,0	100,0
SNR 40	58,9	0,0	98,9	95,6
SNR 30	14,4	0,0	93,3	67,8

Novamente, o Filtro SG apresenta mais robustez diante da diminuição do SNR, ou seja, com o aumento do ruído.

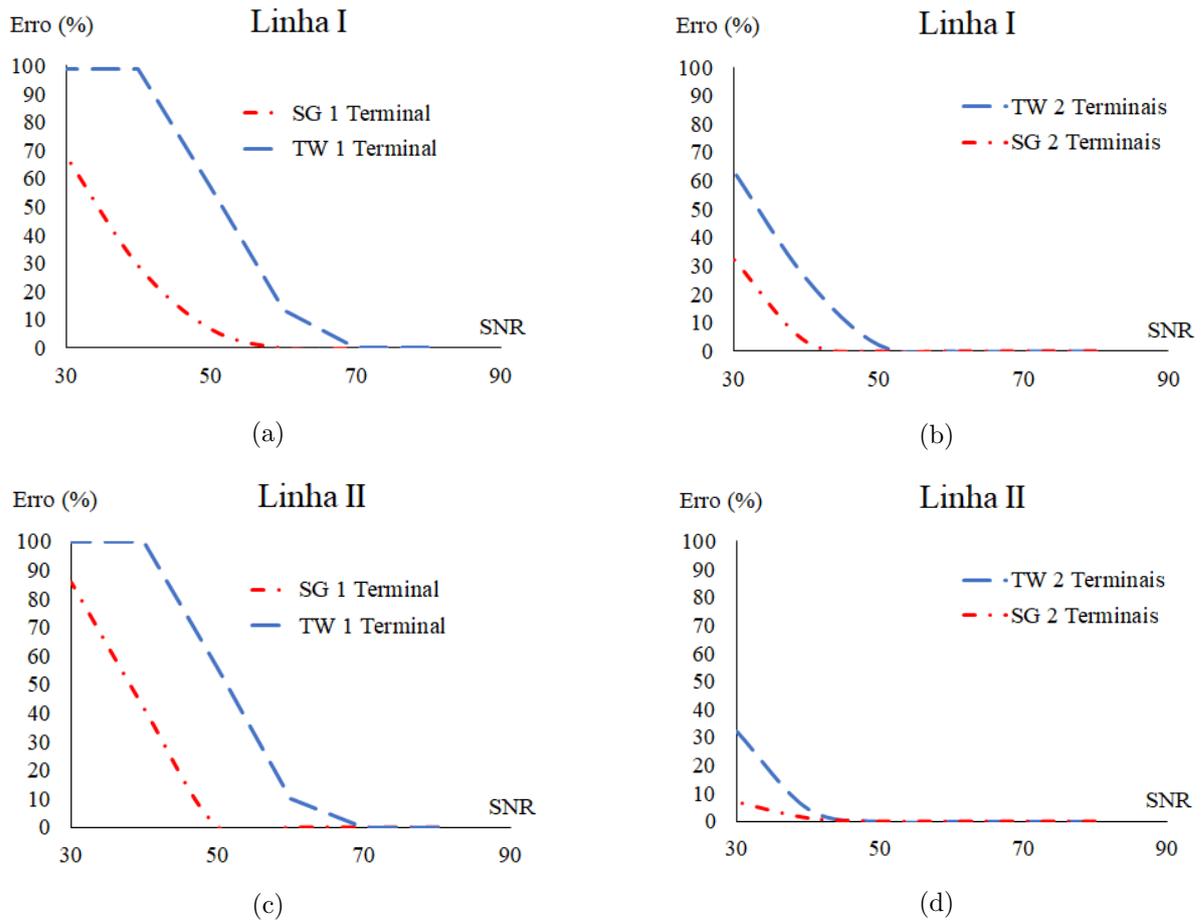


Figura 24 – Avaliação da performance entre os filtros para o cenário 5. (a) Linha I Método 1; (b) Linha I Método 2; (c) Linha II Método 1;(d) Linha II Método 2.

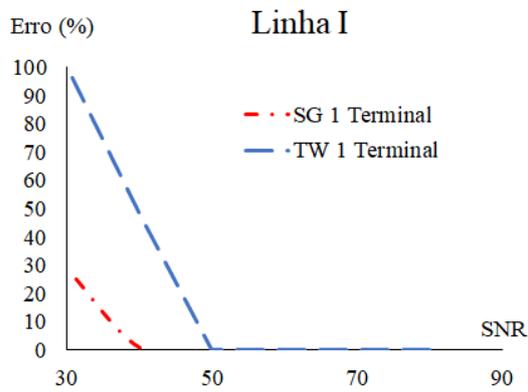
6.7 Cenário 6 ($R_f = 0 \Omega$ e $a_i = 90^\circ$)

Por último, o cenário 6, as faltas foram simuladas com um ângulo de incidência $a_i = 90^\circ$ e resistência de falta $R_f = 0 \Omega$. Como o angulo de incidência é o maior possível e a resistência de falta é a menor possível, os transitórios gerados por este tipo de falta são os mais intensos, tornando assim este cenário o melhor para se localizar uma falta. A Tabela 6 bem como a Figura 25 apresentam tais resultados.

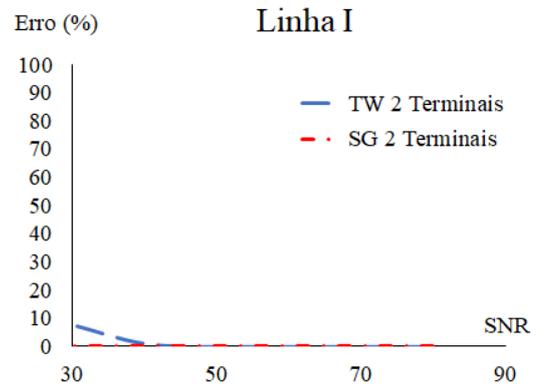
Nota-se que o filtro SG apresenta aproximadamente 100% de aproveitamento utilizando o Método 2 e, utilizando o Método 1, o algoritmo começa a apresentar erro a partir de $\text{SNR} = 40$, mostrando um erro de 30% com $\text{SNR} = 30$.

Tabela 6 – Quantidades de faltas localizadas para o cenário 6

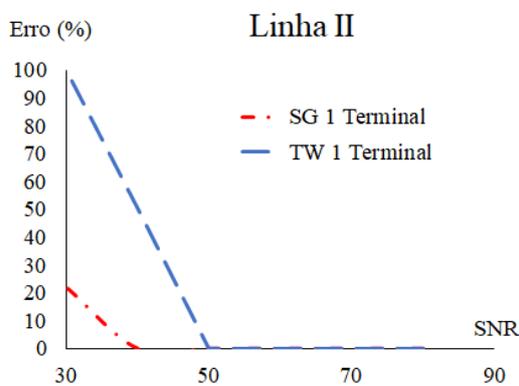
Faltas localizadas em (%)	Método com 1 Terminal		Método com 2 Terminais	
LINHA I	SG	TW	SG	TW
SNR 80	100,0	100,0	100,0	100,0
SNR 70	100,0	100,0	100,0	100,0
SNR 60	100,0	100,0	100,0	100,0
SNR 50	100,0	100,0	100,0	100,0
SNR 40	98,9	52,2	100,0	98,9
SNR 30	71,1	0,0	100,0	92,2
LINHA II	SG	TW	SG	TW
SNR 80	100,0	100,0	100,0	100,0
SNR 70	100,0	100,0	100,0	100,0
SNR 60	100,0	100,0	100,0	100,0
SNR 50	100,0	100,0	100,0	100,0
SNR 40	100,0	50,0	100,0	100,0
SNR 30	77,8	0,0	98,9	98,9



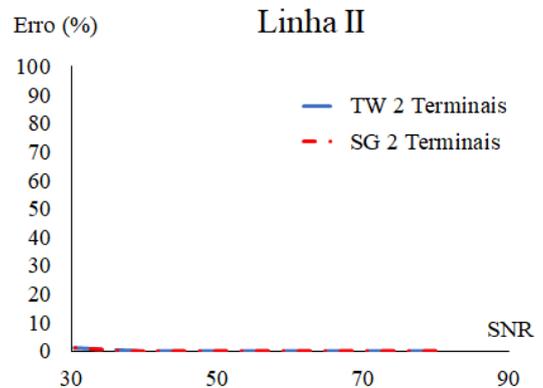
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 25 – Avaliação da performance entre os filtros para o cenário 6. (a) Linha I Método 1; (b) Linha I Método 2; (c) Linha II Método 1; (d) Linha II Método 2.

6.8 Resultado Geral

Nesta seção é mostrado o resultado dos seis cenários juntos, totalizando 12960 simulações. Desta forma, pode-se ter uma ideia geral sobre a eficiência dos métodos. A Tabela 7, bem como a Figura 26 apresentam tais resultados.

Tabela 7 – Quantidades de faltas localizadas no geral

Faltas localizadas em (%)	Método com 1 Terminal		Método com 2 Terminais	
	SG	TW	SG	TW
LINHA I				
SNR 80	100,0	100,0	100,0	100,0
SNR 70	100,0	99,8	100,0	100,0
SNR 60	100,0	94,3	100,0	100,0
SNR 50	97,0	72,0	100,0	98,7
SNR 40	83,1	28,0	97,4	88,3
SNR 30	53,5	0,6	87,4	61,9
LINHA II				
SNR 80	100,0	100,0	100,0	100,0
SNR 70	100,0	99,6	100,0	100,0
SNR 60	100,0	94,3	100,0	100,0
SNR 50	98,0	68,3	100,0	100,0
SNR 40	77,6	27,2	99,3	97,2
SNR 30	49,6	0,0	96,1	81,7

De acordo com os dados apresentados verifica-se que os resultados do algoritmo de localização de faltas provenientes da utilização do filtro SG foram mais eficientes do que os resultados fornecidos através da transformada Wavelet tanto para as simulações feitas na Linha I quanto na Linha II, além de considerar os diversos pontos de faltas e os diferentes tipos de faltas.

Além disso, o Método 2 mostrou ser mais robusto do que o Método 1. Por fazer uso de dois terminais sincronizados, o Método 2 exige a captura de apenas uma frente de onda para realizar o cálculo da distância. Diferentemente do Método 1, que exige a captura de duas frentes de ondas. O problema é que a segunda frente de onda sofre atenuações e pode perder mais facilmente as informações desejadas para realizar o cálculo da distância.

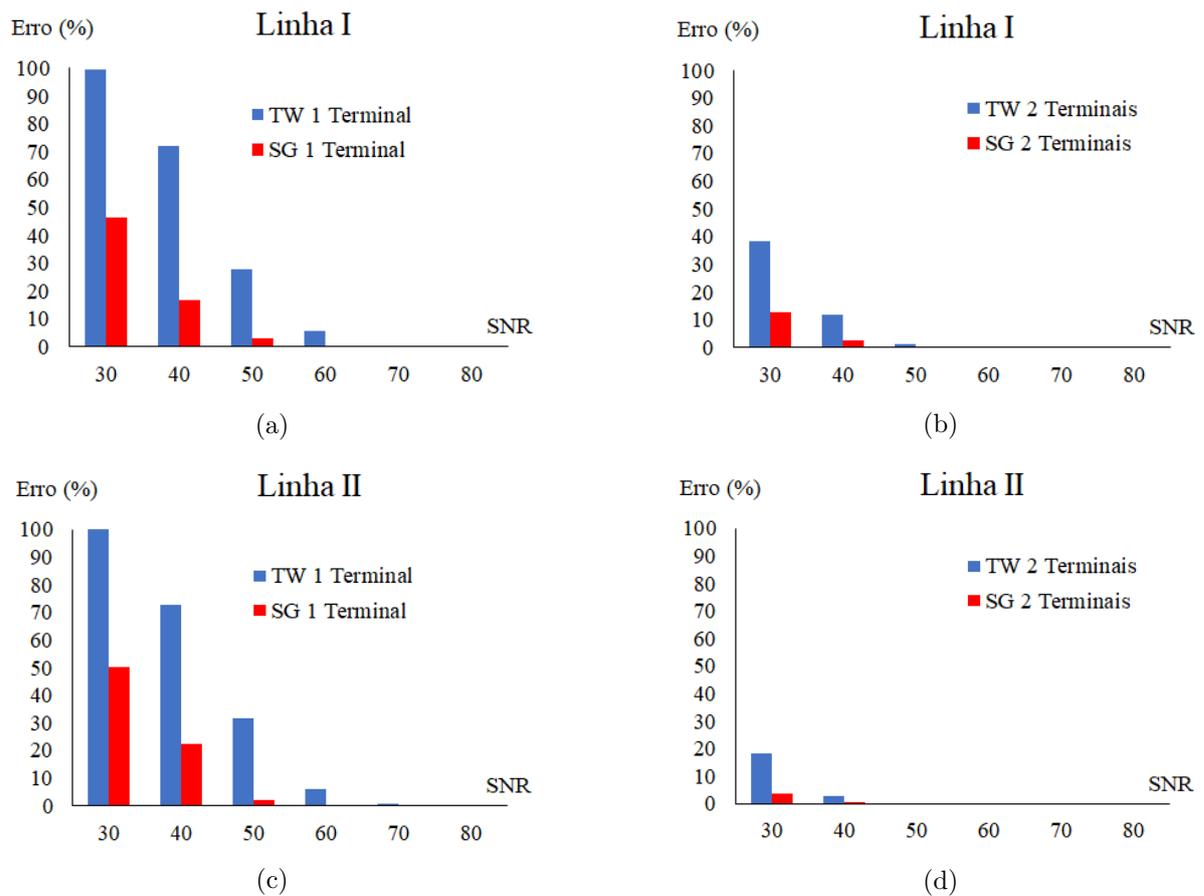


Figura 26 – Avaliação geral da performance entre os filtros. (a) Linha I Método 1; (b) Linha I Método 2; (c) Linha II Método 1; (d) Linha II Método 2.

6.9 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentados diversos resultados obtidos por um algoritmo de localização de faltas baseados em ondas viajantes. Foi avaliado a robustez do localizador utilizando o filtro SG e a transformada Wavelet, considerando a aplicação da abordagem para:

- O modelo de linha radial (Linha I) e sistema interligado (Linha II)
- O método que utiliza dados de um terminal de medição (Método 1);
- O método que utiliza dados de dois terminais de medição sincronizados via GPS (Método 2);
- Diferentes condições de faltas.

O algoritmo que faz uso do filtro SG apresentou um ganho significativo na performance de localização de faltas diante de sinais ruidosos em relação à Wavelet. Além disso, percebe-se que o Método 2 é mais robusto do que o Método 1, como já era de se esperar.

A capacidade de trabalhar com sinais ruidosos pelos filtros SG, permite extrair

informações importantes mesmo em sinais com baixo SNR. Diferentemente da TW, o filtro SG, através da interpolação polinomial e aproximação LS, considera os valores das amostras vizinhas ao ponto de interesse. É por esse motivo que reagem melhor e permitem atenuar os ruídos inerentes às medições.

7 Conclusões

7.1 Conclusões e Contribuições

Neste trabalho de dissertação de mestrado foi comparado a robustez entre o filtro de Savitzky-Golay e a Transformada Wavelet em relação a localização de faltas em Linhas de transmissão utilizando o conceito de ondas viajantes na presença de ruídos. Os filtros atuam no momento da obtenção das informações contidas nos transitórios de alta frequência gerados no momento da falta. Essas informações referem-se aos instantes de tempo que as ondas viajantes chegam ao terminal de medição. Porém, um dos problemas que ocorre é quando o nível de ruído no sinal (gerado por interferências irradiadas e conduzidas, processo de quantização, etc.) está no mesmo patamar da perturbação gerada pela falta, gerando erros na obtenção desses instantes de tempo.

O filtro SG mostrou ser uma ferramenta simples, porém poderosa para manusear sinais ruidosos. Assim, pode-se concluir que o objetivo principal do presente trabalho foi alcançado, ao apresentar um método de localização de faltas em linhas de transmissão utilizando o Filtro de Savitzky-Golay passível de implementação em IEDs e capaz de extrair características em sinais ruidosos mais eficiente em relação a um método utilizando a transformada Wavelet, na qual é muitas vezes apresentada na literatura, (32), (33), (34), (35), (36), (37), (38) e (39). Os resultados apresentados mostraram um ganho de performance na localização de faltas ao utilizar o filtro SG diante de vários cenários.

Tanto o filtro SG quanto a TW foram aplicados em dois métodos de localização: O Método 1, que utiliza dados de apenas um terminal e o Método 2, que utiliza dados de dois terminais sincronizados via GPS.

Ambos os métodos foram avaliados através de simulações computacionais em ambiente Matlab/Simulink. Para isso, dois modelos de linhas de transmissão foram simulados. A primeira, denominada de Linha I, representa um sistema radial de 120 km em 138 kV, enquanto que a segunda, Linha II, representa um sistema radial de 500 km em 735 kV. Além disso, foram considerados diversos cenários de falta levando em conta a variação da distância da falta, da resistência e do ângulo de incidência de falta, com o intuito de se obter conclusões sobre a aplicabilidade e eficácia dos filtros.

Vale mencionar que o procedimento para localização de faltas se torna mais confiável utilizando o Método 2 ao invés do Método 1. Isso se dá, pois, no caso do Método 2, é necessário capturar somente a primeira frente de onda para cada terminal. No entanto, por se tratar da obtenção de dados sincronizados de dois terminais, o método torna-se mais oneroso, muito embora o custo de sistemas de sincronização via GPS vem melho-

rando cada vez mais e sua tecnologia passa a ser comum nos dias atuais. Já no Método 1, é necessário capturar uma segunda frente de onda para um mesmo terminal. Esta segunda onda sofre um amortecimento em sua intensidade o que pode deixá-la no mesmo nível do ruído mais facilmente. Por outro lado, esta técnica apresenta uma grande economia de equipamentos de monitoração, uma vez que necessita de dados de apenas um terminal de medição.

Seria interessante ter tanto o Método 2 quanto o Método 1 implementados no IED. Pois, supondo o caso da perda de comunicação e sincronismo entre os terminais, o Método 2 perderia sua funcionalidade. Porém, neste cenário, o Método 1, mesmo sendo menos preciso que o Método 2, assumiria a função de localização de falta.

Por fim, acredita-se que os algoritmos baseados nos filtros SG têm enorme potencial para fazer parte em uma nova geração de relés de proteção e localizadores de falta em LT, além de abrir caminho para a utilização destes em outras aplicações na engenharia de sistemas elétricos de potência. Além disso, este trabalho trouxe contribuições científicas que certamente podem ser adicionadas àquelas já apresentadas na literatura especializada. Estas razões se refletem na aceitação do trabalho técnico apresentado no XXII CBA (Décimo Segundo Congresso Brasileiro de Automática) respectivamente intitulado como: “Localização de Falhas em Linhas de Transmissão Utilizando o Filtro de Savitzky-Golay”.

7.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Para a continuação dos estudos da avaliação de parâmetros de influência no cálculo da distância de falta, sugerem-se as seguintes situações:

- Substituição da transformada Wavelet por outros filtros digitais com diferentes níveis de razão sinal ruído;
- Avaliar a resposta dos métodos diante das mais diversas configurações do filtro SG.
- Aplicação dos métodos propostos em outros tipos de linhas de transmissão de maior complexidade operativa, como são os casos de linhas paralelas e linhas com compensação série.
- Aprimoramento do algoritmo de localização de faltas baseado na teoria das ondas viajantes para faltas muito próximas às extremidades da LT;
- Variação da frequência de amostragem. Otimizar o valor da taxa de amostragem necessária para o bom funcionamento do método;
- Promover a associação do método de detecção proposto a outros esquemas de proteção, avaliando o desempenho do conjunto;

- Implementar o método proposto em Hardware, validando o sistema através de um esquema de testes Hardware-in-the-loop no RTDS;
- Validar o funcionamento dos algoritmos propostos com oscilografias coletadas em campo;
- Estudar a viabilidade de utilização dos filtros de Savitzky-Golay na detecção de outros distúrbios nos SEPs e eventos relacionados à qualidade de energia.

A realização das sugestões de melhorias citadas acima, certamente representará novas contribuições científicas para um assunto que ainda necessita de soluções e aprimoramento em diversos aspectos.

Referências

- 1 KEZUNOVIC, M.; PERUNICIC, B. Synchronized sampling improves fault location. *IEEE Computer Applications in Power*, IEEE, v. 8, n. 2, p. 30–33, 1995. [18](#)
- 2 SILVEIRA, P.; SEARA, R.; ZÜRN, H. H. Localização de faltas por ondas viajantes—uma nova abordagem baseada em decomposição wavelet. *Proceedings of the Anais do XVI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica—SNPTEE*, 2001. [18](#)
- 3 SILVEIRA, P. M. d. et al. Identificação e localização de faltas utilizando análise por decomposição wavelet para relés de linhas de transmissão. Florianópolis, SC, 2001. [18](#), [19](#), [21](#), [23](#), [39](#), [42](#)
- 4 SCHETTINO, B. M.; DUQUE, C. A.; SILVEIRA, P. M. Current-transformer saturation detection using savitzky-golay filter. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 31, n. 3, p. 1400–1401, 2016. [19](#), [27](#)
- 5 SCHAFER, R. W. What is a savitzky-golay filter? *IEEE Signal processing magazine*, IEEE, v. 28, n. 4, p. 111–117, 2011. [19](#), [27](#), [29](#)
- 6 SCHETTINO, B. M. et al. Método para detecção e compensação dos efeitos causados pela saturação dos tcs de proteção com meios adaptativos para mitigação da influência do ruído e dos desvios de frequência. Universidade Federal de Juiz de Fora, 2015. [19](#), [42](#)
- 7 PARENTONI, M. F. D. C. Localização de faltas por ondas viajantes em linhas de transmissão de três terminais—abordagem baseada em decomposição wavelet. *Universidade Federal de Itajubá*, 2006. [21](#), [23](#), [39](#), [42](#), [50](#)
- 8 CHRISTOPOULOS, C.; THOMAS, D.; WRIGHT, A. Scheme, based on travelling-waves, for the protection of major transmission lines. In: IET. *IEE Proceedings C-Generation, Transmission and Distribution*. [S.l.], 1988. v. 135, n. 1, p. 63–73. [22](#)
- 9 WALKER, L. et al. Implementation of high frequency transient fault detector. In: *IEEE Winter Power Meeting*. [S.l.: s.n.], 1970. [22](#)
- 10 TAKAGI, T. et al. Fault protection based on travelling wave theory-part 1: Theory. In: MEXICO CITY. *IEEE PES Summer Meeting*. [S.l.], 1977. v. 77, p. 750–753. [22](#)
- 11 TAKAGI, T. et al. Fault protection based on traveling wave theory. part 2: Sensitivity analysis and laboratory test. In: *IEEE PES Winter Meeting, New York City*. [S.l.: s.n.], 1978. p. 220–226. [22](#)
- 12 DOMMEL, H. High speed replying using traveling wave transient analysis. *IEEE Publications*, IEEE PES Winter Power Meeting, p. 1–7, 1978. [22](#)
- 13 CHAMIA, M.; LIBERMAN, S. Ultra high speed relay for ehv/uhv transmission lines—development, design and application. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, IEEE, n. 6, p. 2104–2116, 1978. [22](#)

- 14 MCLAREN, P.; RAJENDRA, S. Travelling-wave techniques applied to the protection of teed circuits:-principle of travelling-wave techniques. *IEEE transactions on power apparatus and systems*, IEEE, n. 12, p. 3544–3550, 1985. [22](#)
- 15 ANDRADE, L. D.; LEÃO, T. P. de. Impedance-based fault location analysis for transmission lines. In: IEEE. *Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), 2012 IEEE PES*. [S.l.], 2012. p. 1–6. [23](#)
- 16 COSTA, F. B.; SOUZA, B. d.; BRITO, N. S. D. Detecção de faltas evolutivas e múltiplos distúrbios em registros oscilográficos baseada na transformada wavelet discreta. *Revista Controle e Automação*, SciELO Brasil, v. 21, p. 173–184, 2010. [24](#)
- 17 NGU, E.; RAMAR, K. A combined impedance and traveling wave based fault location method for multi-terminal transmission lines. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Elsevier, v. 33, n. 10, p. 1767–1775, 2011. [24](#)
- 18 LIN, S. et al. Travelling wave time–frequency characteristic-based fault location method for transmission lines. *IET generation, transmission & distribution*, IET, v. 6, n. 8, p. 764–772, 2012. [24](#)
- 19 ZHU, Y.; FAN, X. Fault location scheme for a multi-terminal transmission line based on current traveling waves. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Elsevier, v. 53, p. 367–374, 2013. [25](#)
- 20 ALMEIDA, A. et al. Localização de faltas em sistemas de transmissão de alta tensão a partir de registros oscilográficos usando análise de componentes independentes. *Proceedings of the Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos—SBSE, Foz do Iguaçu, Brasil*, p. 22–25, 2014. [25](#), [63](#)
- 21 LACHUGIN, V.; PANFILOV, D.; SMIRNOV, A. Travelling wave fault location in power transmission lines using statistic data analysis methods. *Thermal Engineering*, Springer, v. 61, n. 13, p. 985–991, 2014. [25](#)
- 22 ZHANG, G.; SHU, H.; LIAO, Y. An approach for detecting and locating evolving faults on transmission lines based on transient traveling waves. *Electric Power Components and Systems*, Taylor & Francis, v. 45, n. 2, p. 121–130, 2017. [25](#)
- 23 LOPES, F. V. et al. Accurate two-terminal transmission line fault location using traveling waves. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 33, n. 2, p. 873–880, 2018. [26](#)
- 24 SAVITZKY, A.; GOLAY, M. J. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Analytical chemistry*, ACS Publications, v. 36, n. 8, p. 1627–1639, 1964. [27](#)
- 25 RIORDON, J.; ZUBRITSKY, E.; NEWMAN, A. *Top 10 Articles*. [S.l.]: ACS Publications, 2000. [27](#)
- 26 KAY, S. M. Fundamentals of statistical signal processing: estimation theory. Prentice-Hall PTR, 2010. [29](#), [33](#)
- 27 HEDMAN, D. Propagation on overhead transmission lines i-theory of modal analysis. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, IEEE, v. 84, n. 3, p. 200–205, 1965. [34](#)

- 28 WEDEPOHL, L. Application of matrix methods to the solution of travelling-wave phenomena in polyphase systems. In: IET. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*. [S.l.], 1963. v. 110, n. 12, p. 2200–2212. [35](#)
- 29 WEDEPOHL, L.; NGUYEN, H.; IRWIN, G. Frequency-dependent transformation matrices for untransposed transmission lines using newton-raphson method. *IEEE Transactions on Power Systems*, IEEE, v. 11, n. 3, p. 1538–1546, 1996. [35](#)
- 30 KUROKAWA, S. et al. Decomposição modal de linhas de transmissão a partir do uso de duas matrizes de transformação. *Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica*, SciELO Brasil, v. 18, n. 3, p. 372–380, 2007. [35](#)
- 31 MAGNUSSON, P. C. Traveling waves on multi-conductor open-wire lines—a numerical survey of the effects of frequency dependence of modal composition. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, IEEE, n. 3, p. 999–1008, 1973. [35](#)
- 32 MAGNAGO, F. H.; ABUR, A. Fault location using wavelets. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 13, n. 4, p. 1475–1480, 1998. [36](#), [76](#)
- 33 LIVANI, H.; EVRENOSOGLU, C. Y. A machine learning and wavelet-based fault location method for hybrid transmission lines. *IEEE Transactions on Smart Grid*, IEEE, v. 5, n. 1, p. 51–59, 2014. [36](#), [63](#), [76](#)
- 34 YUSUFF, A.; JIMOH, A.; MUNDA, J. Fault location in transmission lines based on stationary wavelet transform, determinant function feature and support vector regression. *Electric Power Systems Research*, Elsevier, v. 110, p. 73–83, 2014. [36](#), [76](#)
- 35 ANDRADE, L. de; LEAO, M. T. P. de. Fault location for transmission lines using wavelet. *IEEE Latin America Transactions*, IEEE, v. 12, n. 6, p. 1043–1048, 2014. [36](#), [51](#), [76](#)
- 36 SOUZA, D. Pinto Moreira de; CHRISTO, E. da S.; ALMEIDA, A. R. Location of faults in power transmission lines using the arima method. *Energies*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 10, n. 10, p. 1596, 2017. [36](#), [63](#), [76](#)
- 37 SILVA, M. d.; OLESKOVICZ, M.; COURRY, D. V. Uma nova ferramenta baseada na transformada wavelet para localização digital de faltas. *Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica*, SciELO Brasil, v. 16, n. 3, p. 345–358, 2005. [36](#), [76](#)
- 38 VALINS, T. F. *Relé digital de distância baseado na teoria de ondas viajantes e transformada Wavelet*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2005. [36](#), [76](#)
- 39 SOUZA, T. *Análise de Ondas Viajantes em Linhas de Transmissão para Localização de Faltas: Abordagem via Transformada Wavelet*. Tese (Doutorado) — Master’s Thesis, Federal University of Pará (UFPA): Belém, Brazil, 2007.(In . . . , 2007. [36](#), [76](#)
- 40 VETTERLI, M.; HERLEY, C. Wavelets and filter banks: Theory and design. *IEEE transactions on signal processing*, v. 40, n. ARTICLE, 1992. [36](#)
- 41 MALLAT, S. G. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, Ieee, v. 11, n. 7, p. 674–693, 1989. [37](#), [38](#)
- 42 DAUBECHIES, I. *Ten lectures on wavelets*. [S.l.]: Siam, 1992. v. 61. [38](#), [39](#)

- 43 FUCHS, R.; ENERGIA, L. A. d. T. de. Elétrica. *Escola Federal de Engenharia de Itajubá (EFEI), Itajubá*, 1973. 43
- 44 BHUNIA, S.; ROY, K.; SEGURA, J. A novel wavelet transform based transient current analysis for fault detection and localization. In: ACM. *Proceedings of the 39th annual Design Automation Conference*. [S.l.], 2002. p. 361–366. 43
- 45 AURANGZEB, M.; CROSSLEY, P.; GALE, P. Fault location using the high frequency travelling waves measured at a single location on a transmission line. IET, 2001. 49
- 46 ELHAFFAR, A. M. et al. Power transmission line fault location based on current traveling waves. Helsinki university of technology, 2008. 49
- 47 THOMAS, D. W.; CARVALHO, R. J.; PEREIRA, E. T. Fault location in distribution systems based on traveling waves. In: IEEE. *Power Tech Conference Proceedings, 2003 IEEE Bologna*. [S.l.], 2003. v. 2, p. 5–pp. 49
- 48 PARENTONI, M. F. D. C. Localização de faltas em sistemas de três terminiais, através da teoria de ondas viajantes, utilizando dados de dois terminiais. *SNPTEE Seminario Nacional de Produção e Transmissão de Energia Eletrica*. 63
- 49 LOPES, F. V.; KUSEL, B. F.; SILVA, K. M. Traveling wave-based fault location on half-wavelength transmission lines. *IEEE Latin America Transactions*, IEEE, v. 14, n. 1, p. 248–253, 2016. 63