



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO

Victor Pellanda Dardengo

Localização de faltas em linhas HVDC com estimação
da velocidade de propagação das frentes de onda

Campinas
2018

Victor Pellanda Dardengo

Localização de faltas em linhas HVDC com estimação da velocidade de propagação das frentes de onda

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica, na Área de Energia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Madson Cortes de Almeida

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA TESE DEFENDIDA PELO ALUNO VICTOR PELLANDA DARDENGO, E ORIENTADA PELO PROF. DR. MADSON CORTES DE ALMEIDA.

Campinas
2018

Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s): CNPq, 164732/2013-6

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

D246l Dardengo, Victor Pellanda, 1988-
Localização de faltas em linhas HVDC com estimação da velocidade de propagação das frentes de onda / Victor Pellanda Dardengo. – Campinas, SP : [s.n.], 2018.

Orientador: Madson Cortes de Almeida.
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Morfologia matemática. 2. Energia elétrica - Transmissão. 3. Ondas viajantes. I. Almeida, Madson Cortes de, 1973-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Fault location in HVDC lines with traveling wave speed estimation

Palavras-chave em inglês:

Mathemhatical morphology

Eletric power - Transmission

Traveling waves

Área de concentração: Energia Elétrica

Titulação: Doutor em Engenharia Elétrica

Banca examinadora:

Madson Cortes de Almeida [Orientador]

Daniel Dotta

Heverton Augusto Pereira

Silvio Giuseppe Di Santo

Karen Caino de Oliveira Salim

Data de defesa: 28-05-2018

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Elétrica

COMISSÃO JULGADORA - TESE DE DOUTORADO

Candidato: Victor Pellanda Dardengo RA: 123247

Data da Defesa: 28 de maio de 2018

Título da Tese: “Localização de faltas em linhas HVDC com estimação da velocidade de propagação das frentes de onda”

Prof. Dr. Madson Cortes de Almeida (Presidente, FEEC/UNICAMP)

Prof. Dr. Daniel Dotta (FEEC/UNICAMP)

Prof. Dr. Heverton Augusto Pereira (UFV)

Prof. Dr. Silvio Giuseppe Di Santo (USP)

Profa. Dra. Karen Caino de Oliveira Salim (UFRJ)

A ata de defesa, com as respectivas assinaturas dos membros da Comissão Julgadora, encontra-se no processo de vida acadêmica do aluno.

Dedico este trabalho à minha família.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Celso e Arlinda e minha irmã Raquel, pela confiança e suporte dado durante todo este trabalho.

Ao meu orientador, professor Madson Cortes de Almeida, pela oportunidade, confiança, incentivo, ensinamentos transmitidos, dedicada orientação e amizade.

Aos meus amigos, pelas conversas, conselhos e inesquecíveis momentos de diversão.

Aos professores e funcionários do DSE que colaboraram de alguma forma para a realização desse trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq, pelo apoio financeiro.

À UNICAMP pela oportunidade de estudar em uma instituição de excelência.
Obrigado!

“A resposta certa não importa nada: o essencial é que
as perguntas estejam certas”

Mario Quintana

RESUMO

Atualmente, com o desenvolvimento da eletrônica de potência, as linhas HVDC têm se tornado uma alternativa as linhas HVAC na transmissão de grandes blocos de energia a longas distâncias, sendo economicamente mais viáveis e com baixas perdas. O correto funcionamento das linhas HVDC são essenciais na manutenção da estabilidade do sistema. Operando sob diversas condições climáticas e de relevo, além de geralmente apresentarem dimensões continentais, essas linhas são susceptíveis a faltas. Portanto, metodologias eficientes de localização de faltas são cada vez mais importantes, a fim de minimizar seus tempos inoperantes e, consequentemente, reduzir os prejuízos de concessionárias e consumidores. Na atualidade, os principais métodos de localização de faltas são baseados em ondas viajantes, onde a posição da falta é estimada através dos tempos de chegada das frentes de onda nos terminais monitorados e da velocidade de propagação das ondas. Entre os métodos para evidenciamento das frentes de onda, destaca-se o uso da morfologia matemática, a qual apresenta fácil implementação e reduzido custo computacional. Na literatura, geralmente os processos morfológicos não são apresentados de forma otimizada e portanto, nesta tese as operações básicas, além dos gradientes utilizados para evidenciamento das frentes de onda, são apresentados de maneira mais eficientes. Além disto, um novo elemento estruturante é proposto, o qual permite uma nova abordagem para o evidenciamento das frentes de onda baseado nas translações do sinal. A velocidade de propagação das ondas é outro fator primordial para a estimação do local de falta de forma precisa, entretanto, devido sua variação de acordo com a posição da falta, condições climáticas e parâmetros da linha, sua definição é ainda uma tarefa árdua. Neste sentido, esta tese realiza um estudo comparando a influência da velocidade nos métodos convencionais de localização de faltas com metodologias não influenciadas pela velocidade. Neste contexto, esta tese propõe uma nova metodologia de localização de faltas para linhas HVDC com estimação da velocidade de propagação das frentes de onda. O novo método proposto define a velocidade das frentes de onda levando em consideração os parâmetros da linha e também a posição da falta. Testes realizados demonstraram a precisão e robustez da metodologia proposta. Como os métodos de ondas viajantes requerem elevadas taxas de amostragem e são fortemente influenciados por ruídos, diferentes filtros morfológicos foram avaliados no processo de filtragem de ruídos destinados a localização de faltas. Testes demonstraram que a combinação do correto filtro de redução de ruídos com a metodologia proposta de localização de faltas apresenta bons resultados, tornando a metodologia desenvolvida promissora.

Palavras-chave: Localização de Faltas, Morfologia Matemática, Ondas Viajantes, HVDC.

ABSTRACT

Currently, with the development of power electronics, HVDC lines have become an alternative to HVAC lines in the transmission of large blocks of energy over long distances, being economically more viable and with low losses. Proper operation of HVDC lines is essential to maintain system stability. Operating under various climatic conditions, relief variation besides these lines, generally, present continental size, they are susceptible to faults. Therefore, efficient fault localization methodologies are important in order to minimize their inoperative times and consequently reduce the losses of concessionaires and consumers. In this context, this thesis proposes a new fault localization methodology for HVDC lines. At present, the main fault location methods are based on traveling waves, where the fault position is estimated by the arrival times of the wavefronts at the monitored terminals and the traveling wave speed. Among the methods for evidence of wavefronts, highlight the use of mathematical morphology, which presents easy implementation and low computational cost. In the literature, generally the morphological processes are not presented optimally, and therefore, in this thesis the basic operations besides the gradients used for evidence of wavefronts are presented in a more efficient way. In addition, a new structuring element is proposed, which allows a new approach to highlight the wavefronts, based on the signal translations. The traveling wave speed is another primordial factor for the estimation of the accurate fault position, however, due to its variation according to the fault position, climate and line parameters, its definition is still an arduous task. Therefore, this thesis performs a study comparing the influence of wave speed in conventional fault location methods comparing its results with methodologies not influenced by speed. A new fault location method based on one terminal, where the traveling wave speed is estimated, is also presented. The new proposed method defines the wave speed taking into account the line parameters and also the fault position. Tests were performed to demonstrate the accuracy and robustness of the proposed methodology. Since traveling wave methods require high sampling rates and are heavily influenced by noise, different noise reduction morphological filters were evaluated in the fault location process. Tests have shown that the combination between the correct noise reduction filter with the proposed fault location method presents good results, making the proposed methodology promising.

Keywords: Fault location, Mathematical Morphology, Traveling waves, HVDC.

Lista de Figuras

2.1	Dilatação do sinal hipotético f pelo EE = $\{0\ 0\ 0\}$	26
2.2	Dilatação do sinal hipotético f pelo EE = $\{0\ 0\ 0\ 0\ 0\}$	26
2.3	Erosão do sinal hipotético f pelo EE = $\{0\ 0\ 0\}$	27
2.4	Erosão do sinal hipotético f pelo EE = $\{0\ 0\ 0\ 0\ 0\}$	27
2.5	Gradiente Morfológico com os EE's g^c , g^+ e g^-	30
2.6	Comparação entre o GMM e o GMR.	42
2.7	Comparação entre o GMM e o GMR na presença de ruído.	42
2.8	Esforço computacional.	43
3.1	Diagrama de Lattice para uma linha HVDC.	46
3.2	Janela de dados contendo diversas frentes de onda.	48
3.3	Zoom's aplicados as frentes de onda.	49
3.4	Zoom 1 - Polaridade da primeira frente de onda.	49
3.5	Zoom 2 - Polaridade das frentes de onda referentes aos Picos 2 e 3.	50
3.6	Configuração da linha HVCD bipolar (representação conforme PSCAD).	51
3.7	Erros percentuais das posições de faltas estimadas via (3.1).	52
3.8	Erros percentuais das posições de faltas estimadas via (3.2).	52
3.9	Erros percentuais das posições de faltas estimadas via (3.1) com $v = 0,97 \times v_{luz}$	53
3.10	Método convencional de localização de faltas de um terminal baseado em (3.1).	56
3.11	Método convencional de localização de faltas de um terminal baseado em (3.2).	56
3.12	Método convencional de localização de faltas de dois terminais baseado em (3.3).	57
3.13	Comparação entre o método de um terminal não influenciado pela velocidade e o método convencional de um terminal baseado em (3.1) com $v = v_3$	59
3.14	Comparação entre os método de dois terminais não influenciado pela velocidade e o método convencional de dois terminais com $v = v_3$	59
4.1	Variação da velocidade de propagação das frentes de onda de acordo com a posição e resistência de falta para uma linha HVDC com resistividade do solo igual a 100 Ω .m e 1.000 Ω .m.	63
4.2	Variação da velocidade de propagação das frentes de onda vista de cada terminal.	63
4.3	Variação da velocidade v_k e v_m para mesmas distâncias entre a falta e o respectivo terminal monitorado.	64
4.4	Ajuste de (4.8) aos pares (v_n, f_n) calculados.	67
4.5	Valores obtidos para α considerando diferentes casos de falta.	69

4.6	Valores de α_m calculados de acordo com o número de casos de faltas disponíveis.	70
4.7	Erro percentual da localização de faltas usando o método proposto com α_m^{max} , α_m^{min} e α_m^{med} obtidos de $\alpha_{set} = 5$	71
4.8	Valores de α_m calculados para a linha com resistividade do solo igual a 100 $\Omega.m$ e 1.000 $\Omega.m$ ($\alpha_{set} = 30$).	78
5.1	Processo de filtragem de redução de ruídos.	84
5.2	Cálculo do $FAF_{max}FA_{min}$. Adaptada de [46]	87
5.3	Processo de localização de faltas com filtro de redução de ruídos.	87

Lista de Tabelas

2.1	Comparação entre os tempos de processamento para o cálculo da dilatação via (2.1) e (2.13)	34
2.2	Tempo e processamento para o cálculo da dilatação para diferentes número de amostras	35
4.1	Valor máximo, mínimo e médio de α_m de acordo com α_{set} especificado.	69
4.2	Erros da localização de falta para a metodologia com estimação da velocidade de propagação da onda.	72
4.3	Distribuição dos 5.000 valores de α_m .	73
4.4	Distribuição dos erros de localização de faltas para a metodologia proposta.	74
4.5	Erros referente as metodologias convencionais adotando-se diferentes v .	75
4.6	Distribuição dos erros de localização de faltas para a metodologia convencional com valores de velocidade propostos na literatura.	76
4.7	Erros referente a metodologia de localização de faltas com estimação da velocidade baseada na velocidade média.	77
4.8	Distribuição dos erros de localização de faltas para a metodologia baseada na velocidade média.	77
4.9	Erros da metodologia proposta com especificação incorreta da resistividade do solo.	78
4.10	Distribuição dos erros de localização da metologia proposta com especificação incorreta da resistividade do solo.	79
4.11	Percentual de casos obtidos dentro de uma nova faixa de erros para a metodologia proposta aplicadas a faltas com resistividade do solo igual a 100 $\Omega.m$.	80
4.12	Valores máximos, mínimos e médio de α_m calculados usando os parâmetros c_1 , c_2 e c_3 da curva de velocidade dado por (4.8), para uma linha modelada com resistividade do solo igual a 1.000 $\Omega.m$ e faltas ocorridas em uma linha com resistividade do solo igual a 100 $\Omega.m$.	80
4.13	Erros de localização de faltas para α_m para faltas aplicadas a uma linha com resistividade de 100 $\Omega.m$ com α_m ajustado através da curva de velocidade obtida para a linha com resistividade igual a 1.000 $\Omega.m$ e faltas aplicadas a uma linha com resistividade de 100 $\Omega.m$.	81
5.1	Porcentagem de casos com erro de localização de falta superior 2% para diferentes FRR com evidenciamento das frentes de onda baseado no GMM.	89
5.2	Porcentagem de casos com erro de localização de falta superior a 2% para diferentes FRR com evidenciamento das frentes de onda baseado no GMR.	90
5.3	Desempenho do método de localização de faltas com estimação da velocidade para na presença de ruídos nos sinais monitorados.	91

A.1	Erros percentuais da estimação das posições de falta para resistência de falta igual a 0Ω	106
A.2	Erros percentuais da estimação das posições de falta para resistência de falta igual a 20Ω	107
A.3	Erros percentuais da estimação das posições de falta para resistência de falta igual a 50Ω	108
A.4	Erros percentuais da estimação das posições de falta para resistência de falta igual a 100Ω	109
B.1	Erros percentuais da estimação das posições de falta para o método convencional de um terminal baseado em (3.1)	111
B.2	Erros percentuais da estimação das posições de falta para o método convencional de um terminal baseado em (3.1)	112
B.3	Erros percentuais da estimação das posições de falta para o método convencional de um terminal baseado em (3.1)	113
B.4	Erros percentuais da estimação das posições de falta para o método convencional de um terminal baseado em (3.1)	114
B.5	Erros percentuais da estimação das posições de falta para o método convencional de um terminal baseado em (3.2)	115
B.6	Erros percentuais da estimação das posições de falta para o método convencional de um terminal baseado em (3.2)	116
B.7	Erros percentuais da estimação das posições de falta para o método convencional de um terminal baseado em (3.2)	117
B.8	Erros percentuais da estimação das posições de falta para o método convencional de um terminal baseado em (3.2)	118
B.9	Erros percentuais da estimação das posições de falta para o método convencional de dois terminais baseado em (3.3)	119
B.10	Erros percentuais da estimação das posições de falta para o método convencional de dois terminais baseado em (3.3)	120
B.11	Erros percentuais da estimação das posições de falta para o método convencional de dois terminais baseado em (3.3)	121
B.12	Erros percentuais da estimação das posições de falta para o método convencional de dois terminais baseado em (3.3)	122
C.1	Erros percentuais da estimação das posições de falta para o método de um terminal não influenciado pela velocidade baseado em (3.6).	124
C.2	Erros percentuais da estimação das posições de falta para o método de dois terminais não influenciado pela velocidade baseado em (3.7).	125
C.3	Erros percentuais da estimação das posições de falta para o método de dois terminais não influenciado pela velocidade baseado em (3.8).	126

Lista de Símbolos

AC	<i>Alternating Current</i>
CA	Corrente Alternada
DC	<i>Direct Current</i>
EE	Elemento Estruturante
FastICA	<i>Fast Independent Component Analysis</i>
$\text{FAF}_{\max}\text{FA}_{\min}$	Filtro Abertura-Fechamento Máximo/ Fechamento-Abertura Mínimo
FAFFA	Filtro Abertura-Fechamento/Fechamento-Abertura
FMM	Filtro Morfológico Média
FMMAF	Filtro Morfológico Multi-resolução Abertura/Fechamento
FRR	Filtro de Redução de Ruídos
GM	Gradiente Morfológico
GMM	Gradiente Morfológico Multi-resolução
GMMR	Gradiente Morfológico Multi-resolução Rápido
GMR	Gradiente Morfológico Rápido
GPS	<i>Global Position System</i>
HVAC	<i>High Voltage Alternating Current</i>
HVDC	<i>High Voltage Direct Current</i>
MM	Morfologia Matemática
MUSIC	<i>Multiple Signal Classification</i>
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i>
SVM	<i>Support Vector Machine</i>
TW	Transformada Wavelet
TWD	Transformada Wavelet Discreta

Sumário

1	Introdução	17
2	Morfologia Matemática	24
2.1	Introdução	24
2.2	Filtros Morfológicos	24
2.2.1	Dilatação	25
2.2.2	Erosão	25
2.3	Gradiente Morfológico (GM)	28
2.4	Gradiente Morfológico Multi-resolução (GMM)	28
2.5	A influência da origem do EE	29
2.6	Análise computacional	30
2.6.1	Exemplo: Cálculo da dilatação e erosão baseado em (2.13) e (2.14)	32
2.6.2	Desempenho computacional	33
2.7	Gradiente Morfológico Multi-resolução Rápido (GMMR)	35
2.8	O Gradiente Morfológico Rápido (GMR)	37
2.9	Conclusão	43
3	Métodos de Localização de Faltas Baseados em Ondas Viajantes	45
3.1	Introdução	45
3.2	Princípios da localização de faltas usando ondas viajantes	46
3.3	Evidenciamento e identificação das frentes de onda	47
3.4	Identificação das frentes de onda usando GMM e GMR e a influência da velocidade	50
3.5	Métodos de localização de faltas baseados em ondas viajantes não influenciados pela velocidade de propagação	54
3.6	A influência da velocidade nos métodos convencionais de localização de faltas	55
3.6.1	Métodos convencionais de um terminal	56
3.6.2	Método Convencional de dois terminais	57
3.7	Comparação entre os métodos convencionais de localização de faltas e os métodos não influenciados pela velocidade	58
3.7.1	Método de um terminal não influenciado pela velocidade da onda	58
3.7.2	Métodos de dois terminais não influenciado pela velocidade da onda	58
3.8	Conclusão	60
4	Localização de faltas em linhas HVDC com estimação da velocidade de propagação da onda	61
4.1	Análise da velocidade de propagação das ondas viajantes	62
4.2	Método de localização de faltas com estimação da velocidade	64
4.2.1	O processo de estimação da velocidade	65

4.2.2	A curva de velocidade da onda	66
4.2.3	Obtendo α	67
4.3	Impacto da seleção de α_m	68
4.4	Avaliação da Metodologia de Localização de Faltas	70
4.4.1	Comparação entre a metodologia de localização de faltas proposta e metodologias da literatura	73
4.4.2	Influência da resistividade na metodologia proposta	77
4.5	Conclusão	81
5	Uso de Filtros Morfológicos na Filtragem de Ruídos	83
5.1	Introdução	83
5.2	Filtros de Redução de Ruídos	84
5.2.1	Filtro Morfológico Média	85
5.2.2	Filtro Morfológico Multi-resolução Abertura/Fechamento	85
5.2.3	Filtro Abertura-Fechamento/Fechamento-Abertura	85
5.2.4	Abertura-Fechamento Máximo/Fechamento-Abertura Mínimo	86
5.3	Análise de desempenho dos FRR na filtragem de ruídos	86
5.4	Metodologia de localização de faltas com estimação da velocidade de pro- pagação da onda aplicada a sinais contendo ruídos	89
5.5	Conclusão	91
6	Conclusões e Trabalhos Futuros	92
6.1	Conclusões Gerais	92
6.1.1	Trabalhos Futuros	94
	Referências Bibliográficas	95
	Apêndice A Resultados obtidos entre o GMM e GMR	105
	Apêndice B Erros de localização de falta para os métodos convencionais de localização de faltas	110
B.1	Métodos convencionais	110
B.1.1	Metodologias de um terminal	110
B.1.2	Metodologia de dois terminais	110
	Apêndice C Erros de localização de falta para os métodos de localização de falta não influenciados pela velocidade	123
C.1	Metodologias não influenciadas pela velocidade da onda	123
C.1.1	Metodologia de um terminal	123
C.1.2	Metodologia de dois terminais	123

Capítulo 1

Introdução

Nas últimas décadas, o crescimento industrial e populacional têm resultado no aumento na demanda energética gerando uma expansão do setor elétrico e de sua complexidade [1]. No Brasil, onde o sistema de geração é predominantemente hídrico, com suas principais usinas distantes dos grandes centros consumidores, o setor de transmissão apresenta papel fundamental no fornecimento e estabilidade do sistema, e por isso, é regido por parâmetros rígidos de controle de qualidade e avaliação de desempenho. Entre os principais aspectos observados desses índices de avaliação de qualidade, destacam-se a frequência e o tempo de indisponibilidade do fornecimento de energia, os quais podem levar a incidência de multas e cobranças as empresas do setor de transmissão, trazendo prejuízos a clientes e concessionárias [2]-[7].

Na atualidade, a transmissão em Corrente Alternada (CA), ou AC do inglês *Alternating Current*, é a mais difundida, entretanto com a necessidade de transmissão de grandes blocos de energia a longas distâncias, aliada ao desenvolvimento da eletrônica de potência e a redução dos custos de implantação das estações retificadores e inversoras, as linhas HVDC (*High Voltage Direct Current*) têm se tornado uma alternativa aos sistemas de transmissão HVAC (*High Voltage Alternating Current*) [8]. Além disso, com a maior preocupação ambiental e a subsequente introdução de legislações internacionais para minimizar a emissão de poluentes, as fontes renováveis de energia têm sofrido um aumento significativo na última década, sendo que a interligação entre as grandes centrais elétricas de energias renováveis, as quais são geralmente localizadas *offshore*, e as redes *onshore*, são tipicamente realizadas através de linhas HVDC [9]-[11]. Entre as principais vantagens da transmissão em corrente contínua, destaca-se [12]-[17]:

- controle rápido e flexível;
- permitem a conexão de sistemas AC com diferentes frequências;
- alta capacidade de transmissão a longas distâncias com baixas perdas e mais economicamente que os sistemas HVAC e;

- maior limite técnico que as linhas AC para transmissões via cabos submarinos.

Entretanto, devido as dimensões físicas das linhas HVDC, usualmente muito longas e inevitavelmente operando sob diferentes tipos de terrenos e condições climáticas, essas linhas tornam-se susceptíveis a faltas, sendo as principais causas de desligamento, as descargas atmosféricas, as queimadas, as falhas em equipamentos e as falhas humanas [2], [4], [18]. Entre os componentes presentes em um sistema elétrico de potência, a linha de transmissão é o elemento mais susceptível a faltas, dessa forma, é extremamente importante que as concessionárias de energia elétrica possuam metodologias eficientes de detecção e localização de faltas, as quais permitam que o sistema elétrico seja restaurado de maneira mais eficiente, evitando desperdício de mão de obra e recursos materiais, além de sérios problemas sociais e econômicos [14], [17], [19]. Essas metodologias devem ainda permitir a localização de faltas temporárias, indicando pontos do sistema que devam passar por manutenção ou reforço, evitando assim, o surgimento de problemas de maior impacto no futuro. Nesse contexto, este trabalho tem como principal objetivo a proposta de um novo método de localização de faltas para linhas HVDC.

Atualmente, a maioria dos métodos de localização de faltas para linhas HVDC são baseados em ondas viajantes, entretanto, apesar de menos recorrente, outros métodos de localização de faltas para essas linhas podem ser encontrados [14], [15].

Em [14], a posição da falta é calculada através do modelo de parâmetros distribuídos da linha e dos dados de tensão e corrente medidos nos dois terminais da linha, onde o local de falta é identificado a partir do perfil da distribuição de tensão calculada.

Em [20], o método proposto utiliza um modelo matemático da linha de transmissão, o qual é obtido a partir das equações diferenciais no domínio do tempo, para calcular a impedância da linha. Através dos dados de tensão e corrente obtidos de cada terminal monitorado, um perfil de tensão é calculado, visto do seu respectivo terminal. Quando estas tensões se igualam, o local de falta é então obtido. Ressalta-se que os métodos baseado em impedância, os quais são largamente usados para as linhas AC, apesar de poderem ser adaptados para as linhas HVDC, a dificuldade de implementação dos modelos da linha DC (*Direct Current*) e os resultados menos precisos que os métodos baseado em ondas viajantes, torna os métodos baseados em impedância para as linhas HVDC pouco atrativos [20], [21].

Em [22], através dos transientes de tensão e corrente e da transformada de Fourier, a impedância da linha, incluindo a resistência de falta, é obtida, denominada impedância medida. Através dessa impedância, uma posição da falta é estimada, a qual é usada para estimar uma impedância calculada através do modelo equivalente da linha. Por um processo iterativo, onde a posição da falta e resistência de falta são continuamente atualizados, a posição da falta é determinada quando a impedância medida e impedância calculada se igualam.

Em [23], a posição da falta é estimada através do perfil de tensão da linha HVDC utilizando-se dados de um terminal, onde o cálculo da falta é realizado baseado nas derivadas da tensão ao longo da linha para o modelo de parâmetros distribuídos.

Em [24], o processo de localização de faltas é aplicado para linhas HVDC de circuitos duplos. Novamente a posição da falta é calculada através do cálculo de tensão ao longo da linha. Entretanto, o perfil de tensão é calculado referente a cada terminal, a diferença entre essas tensões tende a ser mínima no ponto de falta.

Em [17], o método de localização de faltas de um terminal proposto baseia-se no cálculo da similaridade entre o sinal de tensão medido e um banco de dados contendo padrões existentes. Esta similaridade é calculada através do coeficiente de correlação Pearson, enquanto os padrões existentes são formados através de diversas simulações realizadas para vários tipos de falta sob diferentes condições de posição de falta, resistência de falta e valores pré-falta de corrente.

Em [25], o processo de localização de faltas é realizado através da combinação entre redes neurais artificiais e Transformada Wavelet (TW). Os dados de corrente de falta são processados com a TW e através dos coeficientes de detalhe obtidos, uma rede neural artificial é desenvolvida. Os testes foram realizados para uma linha HVDC de 200 km, onde faltas fase-fase foram analisadas.

Em [26], um método de detecção, classificação e localização de faltas baseado na máquina de vetores de suporte (SVM, do inglês *Support Vector Machine*) é apresentado. O método requer apenas dados de tensão e corrente medidos em uma curta janela de dados com medições pré e pós falta. Testes foram realizados com uma frequência de amostragem de 1 e 4 kHz apresentando resultados satisfatórios, o que representa a utilização de frequências de amostragem bem menores que várias metodologias de localização de faltas para linhas DC, principalmente as baseadas em ondas viajantes.

Em [27], faltas fase-terra são examinadas e a posição da falta é calcula através do uso do aprendizado de máquinas. A partir de simulações, dados de tensão e corrente são amostrados e através da Transformada Wavelet Discreta (TWD) informações sobre a falta são obtidas. Neste estágio, características sobre energia do sinal e entropia de Shannon também são caracterizados. Todos estes dados são então usados no treinamento e testados em uma rede HVDC de 500 kV de 300 km de comprimento.

Em [28], um método híbrido de localização de faltas para linhas HVDC multi-terminais é proposto, onde através de ondas viajantes e lógica Fuzzy a posição da falta é calculada. A lógica Fuzzy é aplicada de forma a analisar as ondas de corrente gerada pela falta e identificar a linha em falta e o tipo de falta. Em seguida, através da transformada Wavelet discreta, a posição da falta é identificada.

Outras metodologias, como em [15], [29]-[31] utilizam a relação entre as frequências naturais das ondas viajantes e posição da falta. Nestes métodos, não é necessário a identificação dos tempos de chegada das frentes de onda nos terminais monitorados, além disso,

dados de apenas um terminal são necessários. Entretanto, apesar dos bons resultados obtidos, o uso de metodologias de extração de frequências como Fourier e MUSIC (do inglês *Multiple Signal Classification*), são complexos e exigem um custo computacional elevado quando comparados ao métodos de ondas viajantes.

Neste cenário, os métodos de localização de faltas para linhas HVDC baseado em ondas viajantes se destacam por apresentarem alta precisão, confiabilidade e respostas rápidas. Além disso, seus resultados são pouco influenciados pelas configurações das linhas, tipos de falta e resistências de falta. Entretanto, esses métodos são influenciados pelos níveis de ruído, necessitam de uma alta taxa de amostragem, uma janela de análise de dados apropriada, determinação da velocidade de propagação das ondas viajantes, métodos eficientes de detecção das chegadas das frentes de onda nos terminais monitorados, além de distinção entre as ondas viajantes refletidas no ponto de falta ou no terminal oposto da linha [14], [15], [17], [30], [32]-[36].

Nos métodos baseados em ondas viajantes, a posição da falta é estimada através dos instantes de incidência das frentes de ondas nos terminais monitorados e de sua velocidade de propagação. Para o evidenciamento das frentes de onda e consequentemente a determinação dos seus instantes de chegada nos terminais monitorados, diferentes técnicas são encontradas na literatura, as quais podem ser aplicadas tanto as linhas AC quanto para as linhas DC. Em [37], as frentes de onda são identificadas via FastICA (do inglês *Fast Independent Component Analysis*). Em [38], a transformada-S é utilizada, a qual combina vantagens da TW e transformada de Fourier. Já em [8], a identificação dos tempos de chegada são calculados a partir da correlação cruzada. Entretanto, a TW é a ferramenta mais utilizada para o processo de identificação dos tempos de chegada das frentes de onda nos terminais monitorados [32], [39]-[45].

Apesar da transformada Wavelet apresentar bons resultados no processo de identificação das frentes de onda, sua demanda computacional aliada à sua complexidade de implementação, torna este tipo de metodologia menos atraente para implantação em *real-time* ou ambientes onde o nível de processamento é limitado [46]. Aliado a esta condição, atualmente tem crescido o uso da Morfologia Matemática (MM) no processo de evidenciamento das frentes de onda. Além de apresentarem resultados extremamente satisfatórios, a MM baseia suas operações através de uma função geralmente conhecida, denominada Elemento Estruturante (EE), e cálculos simples, como adição, subtração, máximo e mínimo, tornando-a uma ferramenta com um custo computacional reduzido e fácil implementação [35], [47], [48].

Na morfologia, a definição do chamado Elemento Estruturante é de fundamental importância no processo de filtragem, já que de acordo com tamanho e tipo de EE usado, características específicas do sinal podem ser atenuadas ou evidenciadas [49]. Na literatura, para evidenciamento das frentes de onda, o Gradiente Morfológico Multi-resolução (GMM) é o mais usado. Neste contexto, como contribuições desta tese, pode-se

destacar:

- Implementação do GMM de forma otimizada: As operações básicas da morfologia, denominadas erosão e dilatação, as quais são a base para o cálculo do GMM. Atualmente, a maioria dos trabalhos apresentam o processo de dilatação e erosão baseados em laços condicionais do tipo *for*, o que compromete o desempenho computacional. Como contribuição deste trabalho, o processo de dilatação e erosão é apresentado de forma otimizada, além disso, o próprio cálculo do GMM também é otimizado quando EE planares são utilizados.
- Desenvolvimento de um novo EE: Um novo tipo de elemento estruturante é proposto a fim de evidenciar as frentes de ondas. Com este novo EE, simplificações significativas são realizadas no GMM, tornando seu cálculo extremamente simples e rápido, ao mesmo tempo em que mantém suas capacidades de evidenciar as frentes de onda.

Além do processo de identificação dos instantes de chegada das frentes ondas, a definição da velocidade de propagação da onda desempenha papel fundamental para a precisão da estimação do local da falta. Enquanto diversas ferramentas podem ser utilizadas para a identificação dos instantes de chegada das frentes de onda, a determinação de sua velocidade é ainda uma tarefa complexa, já que a velocidade é influenciada por diversos fatores como, parâmetros da linha, temperatura, resistividade do solo e posição da falta. Em geral, os métodos de localização de faltas adotam a velocidade de propagação das frentes de onda constante, com valores próximos à velocidade da luz, negligenciando sua variação de acordo com o local de falta e parâmetros da linha e, conseqüentemente, aumentando os erros de estimação da posição da falta [50], [51].

Devido a dificuldade de definir a velocidade de propagação da onda de forma precisa, algumas metodologias visam minimizar os erros da definição da velocidade no processo de localização de faltas.

Em [51] e [52], a posição da falta é estimada através do cruzamento entre duas curvas, as quais relacionam os tempos de chegada das frentes de onda e a posição da falta, onde os parâmetros dessas curvas são obtidos através de simulações. Em [53], três pontos de medição são utilizados, um localizado em cada extremidade da linha e outro em seu ponto médio. De acordo com os tempos de chegada das frentes de onda obtidas de cada medidor, a velocidade da onda é calculada e a posição da falta estimada. No entanto, de acordo com os autores, o método proposto não é recomendado para aplicações em linhas longas, além disso o uso de três medidores aumenta os custos envolvidos da localização. Em [38] e [54] a eliminação da velocidade é também realizada através da identificação de três frentes de onda. Entretanto, em [54], as medições são realizadas através de dois terminais, enquanto em [38], medidas de apenas um terminal são utilizadas. Quanto

maior a quantidade de frentes de onda a serem identificadas e quanto menor a quantidade de medidores, mais complexos se tornam os algoritmos necessários para a identificação das frentes de onda reduzindo também sua confiabilidade. Assim, uma outra contribuição deste trabalho pode ser destacada:

- Análise da influência da velocidade nos métodos convencionais de localização de faltas: Um estudo comparativo entre os métodos convencionais de localização de faltas, isto é, aqueles que adotam velocidade constante independente do ponto de falta e os métodos de localização de faltas não influenciados pela velocidade é realizado, ressaltando seus desempenhos, dificuldades de implementação, além da influência da velocidade na precisão da estimação dos locais de falta. Testes são realizados com diversas velocidades de propagação das ondas. Além disso, são discutidos os efeitos das ondas serem refletidas no local da falta ou no terminal oposto ao monitorado.

Neste contexto, este trabalho propõe uma nova metodologia de localização de faltas para linhas HVDC com estimação da velocidade de propagação das frentes de onda através de medições obtidas de um terminal. Todo o processo de estimação da velocidade e cálculo da posição da falta é baseado na teoria de ondas viajantes. Nesta proposta podem ser destacadas as seguintes contribuições:

- Nova metodologia de localização de faltas para linhas HVDC com estimação da velocidade de propagação da onda: Na metodologia de localização de faltas para linhas HVDC a velocidade de propagação das ondas viajantes é uma função do local da falta. Assim, apesar da maioria dos trabalhos encontrados na literatura tratarem a velocidade de propagação das ondas como constante, a velocidade de propagação das frentes de onda não é constante. A metodologia proposta é baseada em dados medidos em apenas um terminal, o que reduz os custos e facilita a sua implantação. Os parâmetros da função que representa a velocidade são ajustados *offline* considerando a topologia e os parâmetros da linha, e um conjunto reduzido de casos de falta, que podem ser simulados ou reais. Devido à simplicidade dos filtros morfológicos necessários, bem como da função que representa a velocidade, a metodologia proposta pode ser implementada diretamente nos dispositivos de proteção, evitando assim, a necessidade de transmissão dos sinais de tensão e correntes que devem ser obtidos em elevadas taxas de amostragem.

Como as metodologias baseadas nos conceitos de ondas viajantes exigem uma alta taxa de amostragem para que se obtenha uma precisão aceitável, a influência de ruídos nos sinais medidos não podem ser negligenciadas. Filtros morfológicos são então usados como redutores de ruídos. Neste contexto, esta tese também traz a seguinte contribuição:

- Avaliação de diversos filtros morfológicos para a redução de ruídos nos processos de localização de faltas em linhas HVDC: Diversos tipos de filtros podem ser aplicados

para a redução de ruídos, entretanto de acordo com tipo de filtro e tamanho do EE, diferentes desempenhos são obtidos. Esta tese, traz uma avaliação do processo de filtragem levando em consideração esses dois fatores. Testes são realizados visando a definição dos melhores filtros morfológicos para a redução de ruídos.

Além deste capítulo introdutório, esta tese está organizada da seguinte maneira:

No capítulo 2, os conceitos básicos da teoria de Morfologia Matemática são apresentados juntamente com os gradientes morfológicos, que serão a base para o processo de identificação das frentes de onda.

No capítulo 3, apresenta-se os algoritmos de localização de faltas baseados em um e dois terminais convencionais e são discutidas as metodologias não influenciadas pela velocidade de propagação das ondas viajantes. Testes são realizados a fim de mostrar o desempenho de cada metodologia.

No capítulo 4, a nova metodologia de localização de faltas com estimação da velocidade de propagação das ondas viajantes é apresentada. Uma análise do comportamento da velocidade das ondas de acordo com parâmetros como posição da falta, resistência de falta e resistividade da linha é realizada.

No capítulo 5, o desempenho de diversos filtros morfológicos são avaliados para o processo de redução de ruídos, voltado para a localização de faltas.

No capítulo 6, as conclusões gerais desta tese e perspectiva de trabalhos futuros são apresentados.

Capítulo 2

Morfologia Matemática

2.1 Introdução

A Morfologia Matemática (MM) é uma ferramenta não-linear de processamento e análise de imagens baseada na teoria de conjuntos. Ela foi inicialmente desenvolvida por Georges Matheron [55] e Jean Serra [56], a fim de explorar as formas das imagens extraindo características de interesse [49]. Atualmente, entre as diversas aplicações da morfologia, pode-se destacar a segmentação, restauração, detecção de bordas, análise de textura, análise de formas, entre outras. A morfologia matemática é muito utilizada no processamento de imagens médicas [57]-[59], processamento de vídeos [60]-[62], bem como em sistemas de energia elétrica [46], [48], [63]-[67]. Em geral, as operações de filtragem morfológica são bastante rápidas e simples, o que torna a MM uma ferramenta atraente inclusive para aplicações em tempo real [4], [68].

Neste capítulo as operações básicas da morfologia são apresentadas juntamente com os gradientes morfológicos, que serão usados na identificação das frentes de onda requeridas pela metodologia de localização de faltas. Como uma das contribuições deste trabalho, o processo otimizado de implementação da erosão, dilatação e gradiente morfológico também são apresentados. Além disso, é proposto um novo Elemento Estruturante (EE) para uso com o Gradiente Morfológico Multi-resolução (GMM) que permite o evidenciamento das frentes de onda de maneira mais eficiente.

2.2 Filtros Morfológicos

Os filtros morfológicos são ferramentas matemáticas baseadas na teoria de conjuntos, que através de transformações não lineares entre um sinal e um conjunto denominado Elemento Estruturante (EE), modificam localmente as características geométricas do sinal, a partir de operações matemáticas simples [33]. Ao contrário de outras transformadas que são realizadas no domínio da frequência, como Fourier e transformada Wavelet,

os filtros morfológicos interagem com o sinal através do EE por meio de operações algébrica aplicadas no domínio do tempo [69].

O processo de filtragem morfológica pode evidenciar ou atenuar as características de um determinado sinal de acordo com o tipo de filtro, tamanho e tipo de elemento estruturante [49]. Em geral, os filtros morfológicos são formados como a combinação das duas operações elementares da MM, a dilatação e a erosão.

2.2.1 Dilatação

A dilatação é a transformação morfológica caracterizada pela soma de uma porção do sinal analisado com o EE, seguida da extração de seu máximo. A aplicação deste operador aumenta os objetos da imagem, preenche pequenos lacunas e conecta objetos próximos [70]. Para uma análise unidimensional, a dilatação contorna o sinal por sua borda superior.

Em sistemas elétricos de potência, geralmente a dilatação é definida por (2.1), onde $f(n)$ é a função discretizada contendo n amostras, D_f é o domínio da função f , $g(m)$ é o elemento estruturante contendo m amostras, D_g é o domínio do EE, onde $n > m$. A dilatação do sinal $f(n)$ pelo EE $g(m)$, é simbolizado pelo operador $f \oplus g$.

$$(f \oplus g)(n) = \max \left\{ f(n - m) + g(m) \mid (n - m) \in D_f; m \in D_g \right\} \quad (2.1)$$

As Figuras 2.1 e 2.2 mostram os efeitos da dilatação aplicado a um sinal hipotético f , utilizando respectivamente $g(m) = \{0 \ 0 \ 0\}$ com $D_g = \{-1 \ 0 \ 1\}$ e $g(m) = \{0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0\}$ com $D_g = \{-2 \ -1 \ 0 \ 1 \ 2\}$. Note que a dilatação contorna a borda superior do sinal. Para um EE menor, este contorno é realizado mais próximo da borda superior do sinal, como pode ser visto na Figura 2.1, e para um EE de tamanho maior, este contorno é um pouco mais distante da borda do sinal, como pode ser visto na Figura 2.2. Devido a esta característica de contornar a borda superior do sinal, dependendo do tipo e tamanho do EE utilizado, a dilatação pode suavizar picos negativos ou até mesmo eliminá-los, como demonstra a Figura 2.2.

2.2.2 Erosão

A erosão é a transformação morfológica realizada no sinal que consiste em subtrações de uma região do sinal analisado pelo EE, seguida das extrações de seus mínimos. A aplicação deste operador diminui o nível de partículas, elimina os grãos de tamanho inferior ao tamanho do EE, aumenta as lacunas e separações de grãos próximos [70]. Para um sinal unidimensional, a erosão contorna a borda inferior do sinal.

Geralmente a erosão é definida por (2.2), onde $f(n)$ é a função discretizada

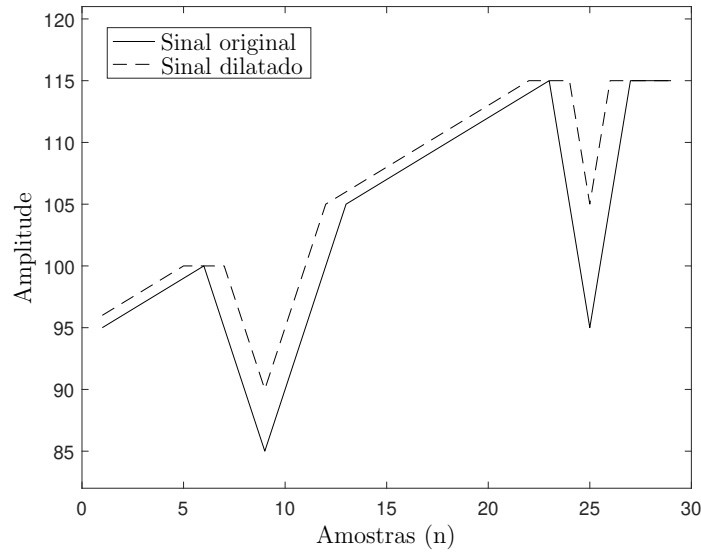


Figura 2.1: Dilatação do sinal hipotético f pelo $EE = \{0 \ 0 \ 0\}$.

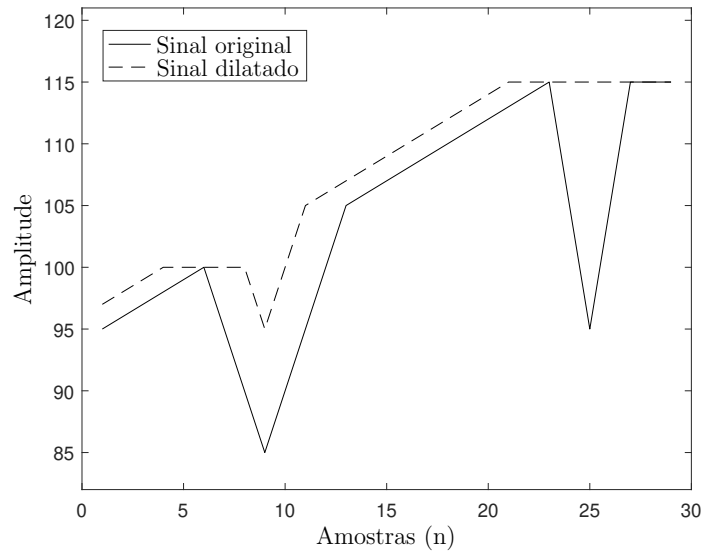


Figura 2.2: Dilatação do sinal hipotético f pelo $EE = \{0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0\}$.

contendo n amostras, $g(m)$ é o elemento estruturante contendo m amostras, D_f e D_g , respectivamente, o domínio da função f e do EE $g(m)$, onde $n > m$. A erosão do sinal $f(n)$ pelo EE $g(m)$ é simbolizado pelo operador $f \ominus g$.

$$(f \ominus g)(n) = \min \left\{ f(n+m) - g(m) \mid (n+m) \in D_f; m \in D_g \right\} \quad (2.2)$$

Um novo sinal hipotético f foi formulado, o qual apresenta picos positivos, e erosões foram realizadas neste sinal através dos EE's $g(m) = \{0 \ 0 \ 0\}$ com $D_g = \{-1 \ 0 \ 1\}$ e $g(m) = \{0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0\}$ com $D_g = \{-2 \ -1 \ 0 \ 1 \ 2\}$. Os resultados são demonstrados nas Figuras

2.3 e 2.4, respectivamente.

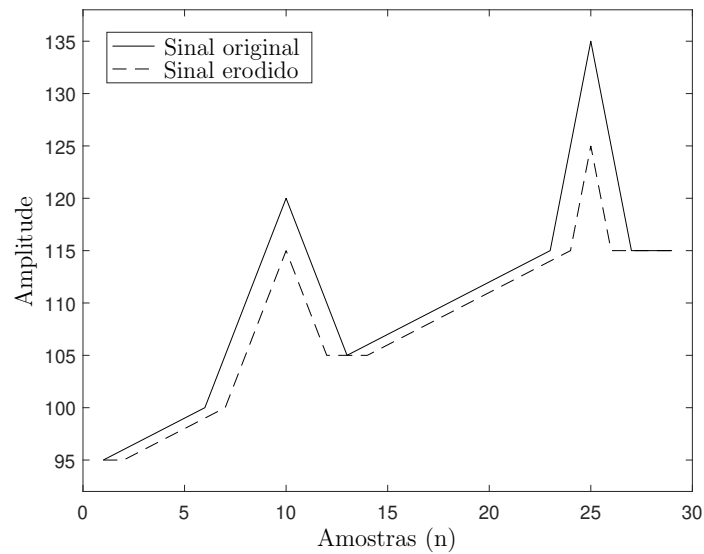


Figura 2.3: Erosão do sinal hipotético f pelo $EE = \{0\ 0\ 0\}$.

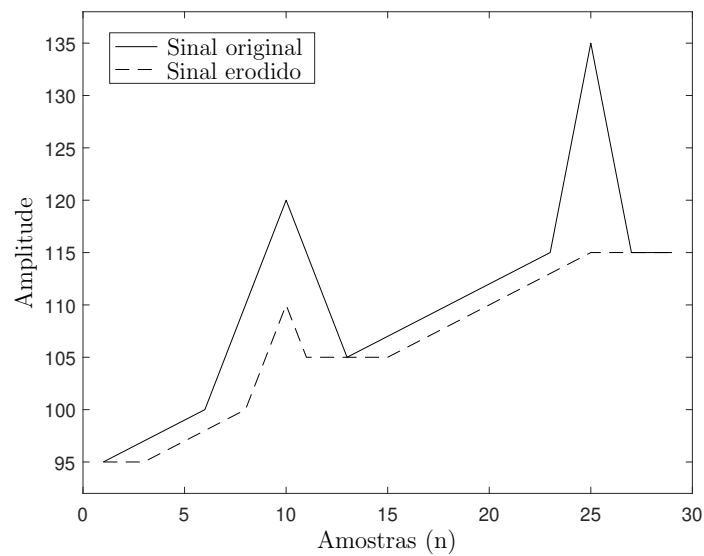


Figura 2.4: Erosão do sinal hipotético f pelo $EE = \{0\ 0\ 0\ 0\ 0\}$.

Novamente, EE's menores realizaram um contorno mais próximo da função original. Ao contrário da dilatação, a erosão tende a contornar a borda inferior do sinal, podendo suavizar ou eliminar os picos positivos dependendo do tipo e tamanho do EE usado. Note o exemplo mostrado na Figura 2.4 em que, através da erosão, um dos picos foi bastante suavizado enquanto o outro foi totalmente eliminado.

2.3 Gradiente Morfológico (GM)

O Gradiente Morfológico é um filtro morfológico definido como a diferença entre a dilatação e erosão de um sinal $f(n)$ por um mesmo EE $g(n)$, como demonstrado em (2.3).

$$G_{grad} = (f \oplus g)(n) - (f \ominus g)(n) \quad (2.3)$$

O GM é uma ferramenta frequentemente usada para detecção de bordas e mudanças súbitas do sinal, principalmente quando um EE planar ($g(n)=0$) é usado [71].

2.4 Gradiente Morfológico Multi-resolução (GMM)

O Gradiente Morfológico Multi-resolução (GMM) é um melhoramento ao GM e visa extrair os transitórios dos sinais analisados, ignorando sua parcela de regime permanente. Devido a esta característica, o GMM tem grande aplicabilidade nos métodos de localização de falta, evidenciando as frentes de onda que atingem os terminais monitorados.

O GMM, denominado por ρ_g^s , é definido por (2.4), para cada nível de decomposição s , onde ρ_{g+}^s representa a extração das bordas de subida e ρ_{g-}^s a extração das bordas de descida, dados respectivamente por (2.5) e (2.6).

$$\rho_g^s(n) = \rho_{g+}^s(n) + \rho_{g-}^s(n) \quad (2.4)$$

$$\rho_{g+}^s = (\rho^{s-1} \oplus g^+)(n) - (\rho^{s-1} \ominus g^+)(n) \quad (2.5)$$

$$\rho_{g-}^s = (\rho^{s-1} \ominus g^-)(n) - (\rho^{s-1} \oplus g^-)(n) \quad (2.6)$$

Os EE's g^+ e g^- , são definidos respectivamente por (2.7) e (2.8), e se caracterizam por terem origens invertidas, onde $\underline{g}_l$ indica a origem do elemento estruturante com tamanho $l = 2^{1-s} \times l_g$, sendo s , o nível de decomposição do GMM executado, e l_g , o tamanho do elemento estruturante do primeiro nível, ou seja, para $s = 1$, $\rho^0 = f$, onde f representa o sinal original.

$$g^+ = [g_1, g_2, \dots, g_{l-1}, \underline{g}_l] \quad (2.7)$$

$$g^- = [\underline{g}_l, g_{l-1}, \dots, g_2, g_1] \quad (2.8)$$

Note que as origens dos EE's g^+ e g^- desempenham um papel fundamental na

obtenção das frentes de onda a partir do GMM.

2.5 A influência da origem do EE

De acordo com o tipo, tamanho e origem do EE, os filtros morfológicos podem evidenciar ou suavizar características diferentes do sinal. Em [72], foi realizado um estudo relatando a influência do tamanho e tipo de EE usado no processo de evidenciamento das frentes de onda, entretanto, a influência da origem não foi levado em consideração. A origem do EE desempenha um papel fundamental no processo de filtragem. Mudando-se apenas a origem do EE é possível extrair características diferentes do sinal.

Aplicando-se, por exemplo, o GM ao sinal f usando o mesmo tipo e tamanho de EE com diferentes origens (g^c , g^+ e g^-), características distintas do sinal podem ser evidenciadas. O sinal f e os EE g^c , g^+ e g^- são representados respectivamente pelas Equações (2.9), (2.10), (2.11) e (2.12), onde o elemento sublinhado representa a origem do EE.

$$f = [1, 1, 1, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 1, 1, 1, 1] \quad (2.9)$$

$$g^c = [0, \underline{0}, 0]; \quad (2.10)$$

$$g^+ = [0, 0, \underline{0}]; \quad (2.11)$$

$$g^- = [\underline{0}, 0, 0]; \quad (2.12)$$

A Figura 2.5 mostra os resultados obtidos, onde G_{grad}^c , G_{grad}^+ e G_{grad}^- representam, respectivamente, o GM do sinal f para os EE's g^c , g^+ e g^- .

Note que, usando o GM com EE g^+ , apenas a borda de subida foi evidenciada, enquanto que, usando o EE g^- , apenas a borda de descida é evidenciada. Porém, quando a origem do EE é centralizada, g^c , as bordas de descida e subida foram evidenciadas. Entretanto, tanto a borda positiva quanto a borda negativa são evidenciadas com mesma polaridade, não sendo possível distinguir o tipo de borda evidenciada.

Dessa forma, a combinação entre tipo de filtro, tamanho do EE e origem do EE, permite evidenciar não apenas as frentes de onda, mas também identificar suas polaridades. As polaridades das frentes de onda servem para indicar se as frentes de onda foram refletidas no local da falta ou no terminal oposto da linha sob falta.

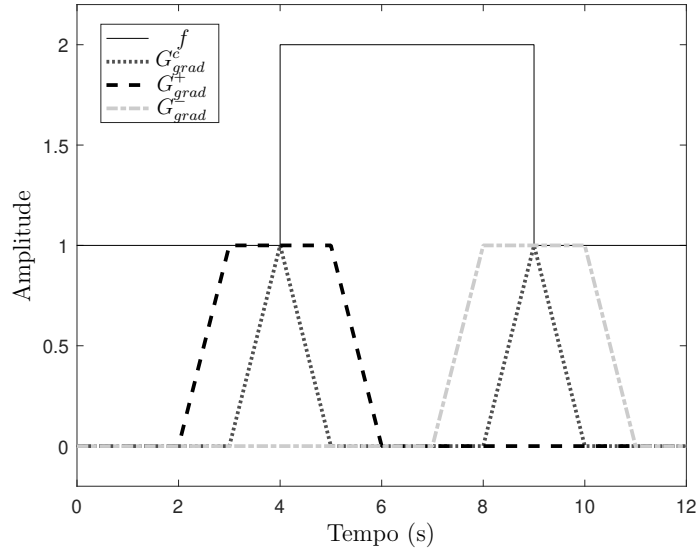


Figura 2.5: Gradiente Morfológico com os EE's g^c , g^+ e g^- .

2.6 Análise computacional

A maioria dos filtros morfológicos são baseados nas combinações da dilatação e erosão. Na literatura, apesar da maioria dos trabalhos definirem a dilatação e a erosão como mostrados em (2.1) e (2.2) [35], [48], [63], computacionalmente há maneiras mais eficientes de implementar estas operações de acordo com as especificidades da aplicação. Os Algoritmos 1 e 2 mostram, respectivamente, a implementação computacional clássica da dilatação e erosão. Neste tipo de implementação são usados dois laços, um para percorrer o sinal f e outro para o EE , como proposto em [71].

Uma maneira mais eficiente de calcular a dilatação e erosão é baseado na translação do sinal f , conforme sugere as Equações (2.13) e (2.14) [49]. Este tipo de abordagem, além de computacionalmente mais eficiente é também mais simples de ser implementada.

$$f \oplus g = \bigvee_{n \in D[g]} f_n + g(n) \quad (2.13)$$

$$f \ominus g = \bigwedge_{n \in D[g]} f_{-n} - g(n) \quad (2.14)$$

Na dilatação, para cada ponto n no domínio do elemento estruturante g , o sinal f é transladado de n posições e somado a $g(n)$, a cada valor do sinal transladado. Os valores fora do domínio de f são definidos como *NaN* (*Not a Number*). Assim, os sinais transladados na dilatação apresentarão domínio maior que o domínio de f . Tomando-se o máximo entre os elementos dos sinais $f_n + g(n)$ referente a cada ponto do seu domínio,

Algoritmo 1: DILATAÇÃO

Entrada: f, g, D_g
Saída: Sinal dilatado

```

1 início
2    $w = \text{tamanho de } f;$ 
3    $m = \text{tamanho de } g;$ 
4    $dlin = 0;$ 
5    $t = 1;$ 
6   para cada  $i = 1 : w$  faça
7      $dlin = [];$ 
8     para cada  $j = 1 : m$  faça
9       se  $(t - D_g(j)) > 0$  e  $(t - D_g(j)) \leq w$  então
10         $dlin(j) = f(t - D_g(j)) + g(j);$ 
11      senão
12         $dlin(j) = NaN;$ 
13      fim
14    fim
15     $dil(t) = \max(dlin);$ 
16     $t = t + 1;$ 
17  fim
18 fim
19 retorna  $dil$ 

```

Algoritmo 2: EROSAO

Entrada: f, g, D_g
Saída: Sinal erodido

```

1 início
2    $w = \text{tamanho de } f;$ 
3    $m = \text{tamanho de } g;$ 
4    $elin = 0;$ 
5    $t = 1;$ 
6   para cada  $i = 1 : w$  faça
7      $elin = [];$ 
8     para cada  $j = 1 : m$  faça
9       se  $(t + D_g(j)) > 0$  e  $(t + D_g(j)) \leq w$  então
10         $elin(j) = f(t + D_g(j)) - g(j);$ 
11      senão
12         $elin(j) = NaN;$ 
13      fim
14    fim
15     $ero(t) = \min(elin);$ 
16     $t = t + 1;$ 
17  fim
18 fim
19 retorna  $ero$ 

```

tem-se a dilatação [49]. De forma similar é realizado a erosão, onde para cada ponto n no domínio do elemento estruturante g , o sinal f é transladado de $-n$ posições e cada valor do sinal transladado é subtraído de $g(n)$. Os valores fora do domínio de f são novamente definidos como NaN . Os sinais transladados terão domínio maior que o domínio de n . Tomando-se o mínimo entre os elementos dos sinais $f_n - g(n)$ referente a cada ponto do seu domínio, tem-se a erosão [49].

A seguir um exemplo de dilatação e erosão baseada em (2.13) e (2.14) será apresentado para uma maior facilidade de entendimento.

2.6.1 Exemplo: Cálculo da dilatação e erosão baseado em (2.13) e (2.14)

Considere o sinal f e o EE, g , definidos abaixo, onde o elemento sublinhado refere-se à origem do EE. Como a origem foi definida como o elemento central de g , tem-se que o domínio de g é dado por $D_g = \{-1, 0, 1\}$.

$$f = [2, 4, 1, 6] \quad (2.15)$$

$$g = [1, \underline{0}, -2] \quad (2.16)$$

Calculando inicialmente a dilatação, a função f deve ser transladada de acordo com D_g , como mostrado em (2.17). A região destacada marca as posições referentes aos elementos do sinal original f . Como a dilatação aumenta o domínio do sinal, esta região é importante para que um janelamento possa ser feito ao final, de modo que o sinal dilatado tenha o mesmo tamanho que o sinal original f . Em (2.17), f_{-n} indica o sinal f deslocado de n posições para a esquerda, f_n indica o sinal f deslocado de n posições para a direita, $g(-1)$ indica o elemento uma posição à esquerda da origem de g (a origem de g é indicada por um sublinhado) e $g(1)$ indica o elemento uma posição à direita da origem de g . Assim, as operações se resumem ao deslocamento de f seguido da soma com um elemento de g .

$$\begin{aligned} f_{-1} + g(-1) &= [\quad 3 \quad \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline & 5 & 2 & 7 & NaN \\ \hline \end{array} \quad NaN] \\ f_0 + g(0) &= [\quad NaN \quad \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline & 2 & 4 & 1 & 6 \\ \hline \end{array} \quad NaN] \\ f_1 + g(1) &= [\quad NaN \quad \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline NaN & 0 & 2 & -1 & \\ \hline \end{array} \quad 4] \end{aligned} \quad (2.17)$$

Tomando-se o máximo referente a cada coluna, tem-se o sinal dilatado abaixo:

$$f \oplus g = [3 \quad \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline 5 & 4 & 7 & 6 & \\ \hline \end{array} \quad 4] \quad (2.18)$$

Note que, (2.17) apresenta domínio maior que o da função f . Realizando o janelamento de acordo com as posições referentes ao sinal original f , tem-se que:

$$f \oplus g = [5 \quad 4 \quad 7 \quad 6] \quad (2.19)$$

O cálculo da erosão é feito de maneira análoga. Transladando-se os elementos de f de $-n$ posições e subtraindo de cada valor $g(n)$, tem-se (2.20).

$$\begin{aligned} f_1 - g(-1) &= [\quad NaN \quad \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline NaN & 1 & 3 & 0 \\ \hline \end{array} \quad 5] \\ f_0 - g(0) &= [\quad NaN \quad \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline & 2 & 4 & 1 \\ \hline \end{array} \quad 6 \quad NaN] \\ f_{-1} - g(1) &= [\quad 4 \quad \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline & 6 & 3 & 8 \\ \hline \end{array} \quad NaN \quad NaN] \end{aligned} \quad (2.20)$$

Tomando-se o mínimo de cada coluna e realizando o janelamento, como no exemplo da dilatação, o sinal erodido é obtido conforme (2.21).

$$f \ominus g = [2 \quad 1 \quad 1 \quad 0] \quad (2.21)$$

2.6.2 Desempenho computacional

Para avaliar a diferença dos procedimentos de dilatação e erosão dados pelas Equações (2.1) e (2.13), e pelas Equações (2.2) e (2.14), estes procedimentos foram aplicados ao sinal f e os tempos de processamento foram monitorados. Note que o desempenho computacional da dilatação e erosão, dados por (2.1) e (2.2), são semelhantes, assim como, os processos de dilatação e erosão, dados por (2.13) e (2.14). Dessa forma, apenas os procedimentos de dilatação dados por (2.1) e (2.13) serão comparados.

Um sinal f com 10.000 amostras é então dilatado, de acordo com cada equacionamento, para diferentes tamanhos de EE's (5, 10, 15, 20 e 25), com origem definida de acordo com a Equação (2.8). Observe que a origem do EE não interfere na carga computacional. O processo de dilatação foi realizado 2.000 vezes para cada EE, e a média dos tempos de processamento foi calculada e mostrada na Tabela 2.1. De acordo com as configurações do computador, linguagem computacional usada para a implementação entre outros fatores, os tempos de processamento sofrerão alterações, portanto os dados da Tabela 2.1 têm como objetivo principal a comparação entre a diferença de desempenho entre as duas abordagens utilizadas para o cálculo da dilatação, e consequentemente da erosão, e não os valores absolutos de processamento em si.

Os resultados da tabela indicam vantagens significativas do uso do mecanismo proposto em (2.13), especialmente para EE menores, como tipicamente ocorre em aplicações da área de sistema de energia. Por exemplo, para o EE de tamanho 25, o tempo de processamento do método baseado em (2.1) foi cerca de 0,0760 s, já o tempo de processamento do método baseado em (2.13) foi de 0,0023 s, aproximadamente. Além disso, para ambas abordagens, o aumento do tamanho do EE resultou no aumento do custo computacional.

O Algoritmo 3 mostra a implementação em Matlab para a dilatação baseada na Equação (2.13) com EE de origem definida como em (2.8). Note que, enquanto o Algoritmo 1 requer dois laços, no Algoritmo 3, apenas um laço é utilizado.

Tabela 2.1: Comparação entre os tempos de processamento para o cálculo da dilatação via (2.1) e (2.13)

Tamanho do EE	Tempo de processamento (s)	
	baseado em (2.1)	baseado em (2.13)
5	0,0372	0,0003
10	0,0456	0,0007
15	0,0550	0,0013
20	0,0650	0,0018
25	0,0760	0,0023

Algoritmo 3: DILATAÇÃO BASEADA EM (2.13) COM EE COM ORIGEM DEFINIDA COMO EM (2.8)

Entrada: f, g

Saída: Sinal dilatado

```

1 início
2    $w = \text{tamanho de } f;$ 
3    $m = \text{tamanho de } g;$ 
4    $\text{matriz}_{\text{mor}f} = \text{ones}(m, w + m - 1) * \text{NaN};$ 
5   para  $k = 1 : m$  faça
6      $\text{matriz}_{\text{mor}f}(k, k : w + k - 1) = f + g(k)$ 
7   fim
8    $y = \max(\text{matriz}_{\text{mor}f})$ 
9   Processo de Janelamento:
10   $dil = y(1 : w)$ 
11 fim
12 retorna  $dil$ 

```

Uma outra análise foi também realizada em que se manteve o tamanho do EE fixo, enquanto o número de amostras do sinal f foi variado (5.000, 10.000, 15.000, 20.000 e 25.000 amostras). Um EE de tamanho 10 foi utilizado, sendo sua origem definida como na Equação (2.8). Para cada sinal, o tempo de processamento da dilatação foi calculado através da média realizada para 2.000 repetições. A Tabela 2.2 mostra os resultados obtidos.

Note que o aumento do número de amostras de f gerou um aumento da carga computacional para as metodologias de cálculo da dilatação. Entretanto, mesmo para o

Tabela 2.2: Tempo e processamento para o cálculo da dilatação para diferentes número de amostras

Número de amostras	Tempo de processamento (s)	
	baseado em (2.1)	baseado em (2.13)
5.000	0,0223	0,0003
10.000	0,0462	0,0007
15.000	0,0669	0,0012
20.000	0,0923	0,0017
25.000	0,1119	0,0021

sinal com 25.000 amostras, o tempo de processamento da dilatação baseada em (2.13) foi significativamente inferior.

Com base nos métodos eficientes propostos nesta seção para implementação da dilatação e da erosão, é possível modificar o GMM dando origem ao Gradiente Morfológico Multi-resolução Rápido que será utilizado na concepção da metodologia de localização de faltas. A seguir o GMMR é proposto.

2.7 Gradiente Morfológico Multi-resolução Rápido (GMMR)

Nas metodologias de localização de faltas, para evidenciamento da chegada das frentes de onda nos terminais monitorados, o GMM pode ser utilizado junto com um EE planar ($g(n)=0$). A utilização do EE planar permite a simplificação de algumas operações no cálculo do GMM. Portanto, como uma das contribuições deste trabalho, uma abordagem eficiente do cálculo do GMM com EE planar é apresentado, onde através de uma matriz denominada matriz morfológica, todas as operações de (2.5) e (2.6) podem ser calculadas através de janelamentos realizados nessa matriz. As Equações (2.5) e (2.6) são reapresentadas abaixo.

$$\rho_{g^+}^s = (\rho^{s-1} \oplus g^+)(n) - (\rho^{s-1} \ominus g^+)(n) \quad (2.22)$$

$$\rho_{g^-}^s = (\rho^{s-1} \ominus g^-)(n) - (\rho^{s-1} \oplus g^-)(n) \quad (2.23)$$

Considere $f = [a, b, c, d]$ e os EE planares $g^+ = [0, 0, \underline{0}]$ e $g^- = [\underline{0}, 0, 0]$, portanto os respectivos domínios de g^+ e g^- são dados por $D_{g^+} = \{-2, -1, 0\}$ e $D_{g^-} = \{0, 1, 2\}$. Analisando as operações de dilatação e erosão com os EE g^+ e g^- , para cada operação a função f é deslocada conforme a seguir:

$$f \oplus g^+ = \max \begin{cases} f_{-2} = [a & b & \boxed{c & d} &] \\ f_{-1} = [& a & b & c & d &] \\ f_0 = [& & \boxed{a & b & c & d} &] \end{cases} \quad (2.24)$$

$$f \ominus g^+ = \min \begin{cases} f_0 = [& \boxed{a & b & c & d} &] \\ f_1 = [& & a & b & c & d &] \\ f_2 = [& & & a & b & c & d &] \end{cases} \quad (2.25)$$

$$f \oplus g^- = \max \begin{cases} f_0 = [& \boxed{a & b & c & d} &] \\ f_1 = [& & a & b & c & d &] \\ f_2 = [& & & a & b & c & d &] \end{cases} \quad (2.26)$$

$$f \ominus g^- = \min \begin{cases} f_{-2} = [a & b & \boxed{c & d} &] \\ f_{-1} = [& a & b & c & d &] \\ f_0 = [& & \boxed{a & b & c & d} &] \end{cases} \quad (2.27)$$

Note que (2.24), (2.25), (2.26) e (2.27) representam uma mesma matriz. Esta matriz é denominada Matriz Morfológica (M_m) e é representada de acordo com a Equação (2.28).

$$M_m = \begin{bmatrix} a & b & c & d \\ & a & b & c & d \\ & & a & b & c & d \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

O Gradiente Morfológico Multi-resolução Rápido (GMMR) proposto é calculado tendo como base a matriz morfológica. Dessa forma, as operações da função f são realizadas apenas uma vez, enquanto o processo de dilatação e erosão para os respectivos EE g^+ e g^- são calculados através de janelamentos e operações de máximo e mínimo.

Definindo a matriz morfológica (M_m), o cálculo do GMMR pode ser obtido de acordo com Algoritmo 4.

Note que o GMMR resulta em uma melhora de desempenho computacional, dado que, cada operação de $f \oplus g^+$, $f \ominus g^-$, $f \ominus g^+$ e $f \oplus g^-$ apenas a matriz M_m é construída. Apesar do GMMR ser aplicado apenas a EE planares, este tipo de EE é um dos mais adequados em sistema de energia [66], [73].

Outros tipos de EE também poderiam ser usados em conjunto com o GMM de forma a evidenciar as frentes de onda. Neste contexto, como uma das contribuições deste trabalho, um novo EE é proposto, o qual apresenta resultados similares ao GMM com EE planar. Este novo EE permite uma implementação mais fácil e computacionalmente mais eficiente que o GMMR. A combinação entre GMM com o novo EE é denominado Gradiente Morfológico Rápido e será apresentado a seguir.

Algoritmo 4: Gradiente Multi-resolução Rápido para EE planares

Entrada: f, g^+
Saída: GMMR

- 1 **início**
- 2 $w = \text{tamanho de } f$;
- 3 $m = \text{tamanho de } g^+$;
- 4 $\eta_{mm} = \text{número de colunas de } M_m$
- 5 Calcule M_m ;
- 6 Calcule M_1 :

$$i = \eta_{mm} - w + 1;$$

$$j = \eta_{mm};$$

$$M_1 = M_m(:, i : j)$$
- 7 Calcule M_2 :

$$i = 1;$$

$$j = w;$$

$$M_2 = M_m(:, i : j)$$
- 8 Calcule $f \oplus g^+, f \ominus g^-, f \ominus g^+$ e $f \oplus g^-$::

$$f \oplus g^+ = \max\{M_1\};$$

$$f \ominus g^- = \min\{M_1\};$$

$$f \ominus g^+ = \min\{M_2\};$$

$$f \oplus g^- = \max\{M_2\};$$
- 9 Usando (2.4), calcule o GMM (ρ_g).
- 10 **fim**
- 11 **retorna** ρ_g

2.8 O Gradiente Morfológico Rápido (GMR)

O Gradiente Morfológico Rápido (GMR) é uma simplificação do GMM para o EE proposto g_n , o qual tem seu primeiro elemento igual a zero e os demais iguais a $-\infty$, como demonstrado na Equação (2.29). As características de g_n permitem que o evidenciamento das frentes de onda seja realizado de forma rápida e simples, já que com o novo EE proposto, a dilatação e erosão podem ser calculadas apenas como um deslocamento temporal da função f .

$$g_n = [0, -\infty, -\infty, -\infty, \dots] \quad (2.29)$$

Considere o sinal f e g_n definidos respectivamente por (2.30) e (2.31).

$$f = [a, b, c, d, e, f, g] \quad (2.30)$$

$$g_n = [0, -\infty, -\infty] \quad (2.31)$$

As operações $f \oplus g_n^+$, $f \ominus g_n^-$, $f \ominus g_n^+$ e $f \oplus g_n^-$ serão realizadas a fim de obter o GMM com nível 1, onde g_n^+ e g_n^- apresentam origens opostas conforme mostram as Equações (2.32) e (2.33). Essas operações são realizadas de acordo com as Equações (2.34), (2.35), (2.36) e (2.37). A região destacada representa o janelamento de forma que a dilatação e erosão tenham o mesmo tamanho do sinal f . Novamente, f_{-n} indica o sinal f deslocado de n posições a esquerda, enquanto que f_n indica o sinal f deslocado de n posições a direita. Note que a última linha de cada operação representa o máximo ou mínimo valor de cada coluna, de acordo com a operação morfológica a ser calculada.

$$g_n^+ = [0, -\infty, \underline{-\infty}] \quad (2.32)$$

$$g_n^- = [\underline{0}, -\infty, -\infty] \quad (2.33)$$

$$\begin{aligned}
 f \oplus g_n^+ = \max \left\{ \begin{array}{l} f_{-2} + g_n^+(-2) = \\ f_{-1} + g_n^+(-1) = \\ f_0 + g_n^+(0) = \end{array} \right. & \begin{bmatrix} a & b & \boxed{\begin{matrix} c & d & e & f & g \\ -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty \\ -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty \\ c & d & e & f & g & -\infty & -\infty \end{matrix}} & \end{bmatrix} \\
 f \oplus g_n^+ = & \begin{bmatrix} & & & & & & & \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{2.34}$$

$$\begin{aligned}
 f \ominus g_n^+ = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{+2} - g_n^+(-2) = \\ f_{+1} - g_n^+(-1) = \\ f_0 - g_n^+(0) = \end{array} \right. & \begin{bmatrix} & & & a & b & c & d & e & f & g \\ & & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \\ \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & & \\ \infty & \infty & a & b & c & d & e & & & \end{bmatrix} \\
 f \ominus g_n^+ = & \begin{bmatrix} & & & & & & & & & \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{2.35}$$

$$\begin{aligned}
 f \oplus g_n^- = \max \left\{ \begin{array}{l} f_0 + g_n^-(0) = \\ f_1 + g_n^-(1) = \\ f_2 + g_n^-(2) = \end{array} \right. & \begin{bmatrix} a & b & c & d & e & f & g \\ & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty \\ & & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty & -\infty \\ a & b & c & d & e & f & g & & & \end{bmatrix} \\
 f \oplus g_n^- = & \begin{bmatrix} & & & & & & & & & \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{2.36}$$

$$\begin{aligned} f \ominus g_n^- = & \min \left\{ \begin{array}{l} f_0 - g_n^-(0) = \\ f_{-1} - g_n^-(1) = \\ f_{-2} - g_n^-(2) = \end{array} \right. \left[\begin{array}{ccccccccc} & & & & & & & & \\ & & & & & & & & \\ & & & & & & & & \\ & & & & & & & & \\ & & & & & & & & \\ & & & & & & & & \\ & & & & & & & & \\ & & & & & & & & \\ & & & & & & & & \\ & & & & & & & & \end{array} \right] \\ f \ominus g_n^- = & \left[\begin{array}{ccccccccc} & & & & & & & & \\ & & & & & & & & \\ & & & & & & & & \\ & & & & & & & & \\ & & & & & & & & \\ & & & & & & & & \\ & & & & & & & & \\ & & & & & & & & \\ & & & & & & & & \\ & & & & & & & & \end{array} \right] \end{aligned} \tag{2.37}$$

Como $f \oplus g_n^-$ e $f \ominus g_n^-$ apresentam o mesmo resultado, portanto se anulam. Dessa forma, o GMM com EE g_n (ρ_{g_n}) é equivalente ao GM com EE g_n^+ , como pode ser observados nas Equações (2.38) e (2.39).

$$\rho_{g_n} = [(f \oplus g_n^+ - f \ominus g_n^+)] + \underbrace{[(f \ominus g_n^- - f \oplus g_n^-)]}_0 \quad (2.38)$$

$$\rho_{g_n} = (f \oplus g_n^+ - f \ominus g_n^+) = G_{grad}^{g_n^+} \quad (2.39)$$

Note que $(f \oplus g_n^+ - f \ominus g_n^+)$ é a própria definição de GM conforme mostra a Equação (2.3), para um EE g_n^+ . Note ainda que, devido as características do EE g_n , os cálculos de $f \oplus g_n^+$ e $f \ominus g_n^+$ podem ser obtidos apenas pela translação do sinal f , como poder ser visto em (2.34) e (2.35). Assim, definindo o domínio de $D_{g_n^+}$ como em (2.40), o processo de dilatação e erosão são calculados por (2.41) e (2.42), onde d_l é um número negativo.

$$D_{g_n^+} = \{d_l, d_{l-1}, d_{l-2}, \dots, -2, -1, 0\} \quad (2.40)$$

$$f \oplus g_n^+ = f_{dl} \quad (2.41)$$

$$f \ominus g_n^+ = f_{-dl} \quad (2.42)$$

De (2.41) e (2.42), o GMR, denominado GM_{rap} , é calculado conforme (2.43), onde s é o nível de decomposição do GM que está sendo executado. O tamanho de g_n^+ para cada nível é dado por $l = 2^{1-s} \times l_g$, onde l_g é o tamanho do EE para o primeiro nível. Para $s = 1$, $GM_{dl}^0 = f$.

$$GM_{rap}^s = GM_{dl}^{s-1} - GM_{-dl}^{s-1} \quad (2.43)$$

Apesar das operações de dilatação e erosão de (2.41) e (2.42) apresentarem valores com $-\infty$ e ∞ em suas extremidades, e, conseqüentemente, modificar o cálculo do GM, na prática essas posições serão descartadas sem interferir no processo de identificação das frentes de onda.

A Figura 2.6 mostra os resultados obtidos para a identificação de uma frente de onda aplicando o GMM de nível 2 com EE planar de tamanho 8 e o GMR com EE de tamanho 8.

Note que o GMM e o GMR apresentam resultados semelhantes. Portanto, devido ao menor custo computacional, o GMR torna-se uma alternativa promissora para a identificação das frentes de onda.

O GMM e GMR com as mesmas configurações descritas anteriormente foram

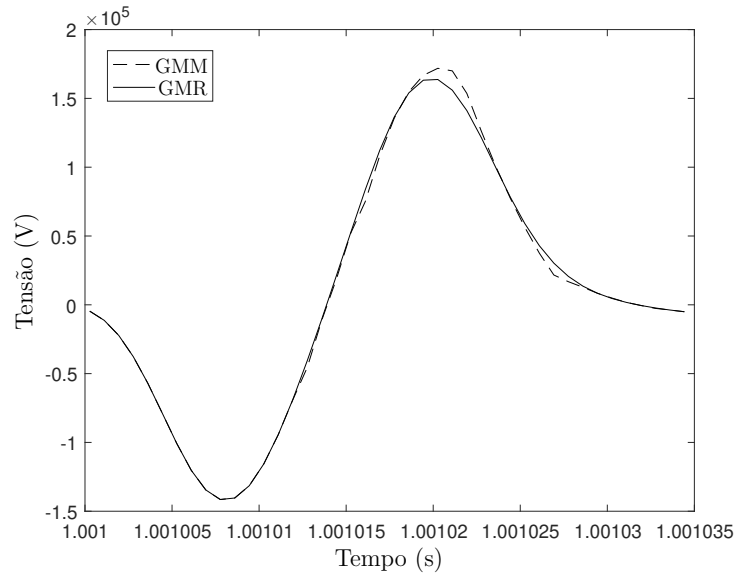


Figura 2.6: Comparação entre o GMM e o GMR.

aplicadas a um sinal na presença de ruído de 30dB. A Figura 2.7 mostra os resultados encontrados. Percebe-se que mesmo na presença de ruído, o GMM e GMR apresentaram resultados semelhantes para o evidenciamento das frentes de onda.

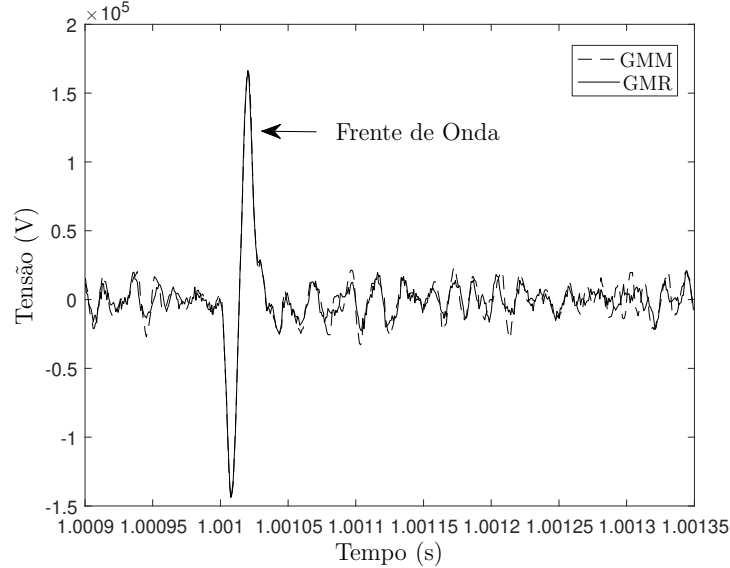


Figura 2.7: Comparação entre o GMM e o GMR na presença de ruído.

Além de apresentar resultados similares ao GMM, o GMR tem baixo custo computacional, dado que seu cálculo é baseado em duas translações do sinal. A Figura 2.8 compara o tempo computacional gasto para calcular o GMM com EE planar, o GMMR e o GMR, todos com nível 1, para diferentes tamanhos de EE. O sinal processado contém 50.000 amostras e o tempo de processamento foi calculado através da média de 2.000 simulações. O GMM com EE planar foi calculado de acordo com a formulação de dilatação

e erosão dada por (2.13) e (2.14), respectivamente.

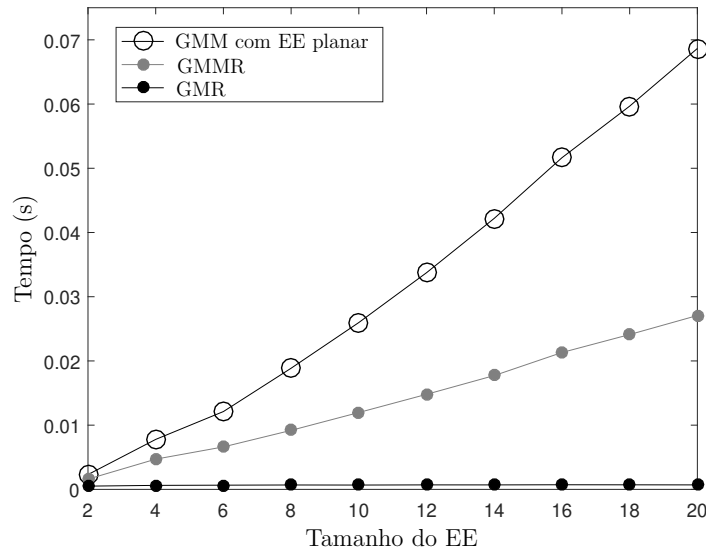


Figura 2.8: Esforço computacional.

Independente do tamanho do EE, o GMR apresentou o menor tempo de processamento. Além disso, enquanto o tempo de processamento do GMM com EE planar e GMMR aumentaram à medida que o tamanho do EE aumentou, o tempo de processamento do GMR se mantém praticamente constante, permitindo a utilização de EE maiores sem comprometer o desempenho computacional.

No Capítulo 3, o processo de identificação das frentes de onda será apresentado e uma comparação entre os resultados obtidos na estimação do ponto de falta entre o GMM com EE planar e o GMR será realizada.

Apesar do foco deste trabalho ser voltado a localização de faltas em linhas HVDC, espera-se que o GMR proposto também possa ser aplicado a problemas como a desagregação de cargas [74], qualidade de energia [48], etc.

2.9 Conclusão

No processo de localização de faltas baseado em ondas viajantes, para a identificação das frentes de ondas são usados métodos baseados na Transformada Wavelet ou Morfologia Matemática. Neste trabalho, a morfologia matemática será usada devido a sua facilidade de implementação e baixo custo computacional. Assim, neste capítulo foram apresentados os conceitos básicos de MM. A formulação de dilatação e erosão, geralmente presentes nos trabalhos de sistemas de energia foi discutida, entretanto uma metodologia mais eficiente de cálculo foi apresentada, demonstrando através de testes sua superioridade computacional. O GM e o GMM, os quais são geralmente utilizados para o evidenciamento das frentes de onda nos terminais monitorados foram apresentados e também suas

versões otimizadas. Um novo EE também foi proposto, permitindo o desenvolvimento de uma formulação para a identificação das frentes de onda baseada no deslocamento da função original, o GMR, o qual demonstrou ser de simples implementação e eficiente. Por fim, o desempenho computacional entre GMM com EE planar, GMMR e GMR foram analisados, onde foi possível comprovar a eficiência computacional do GMR.

Capítulo 3

Métodos de Localização de Faltas Baseados em Ondas Viajantes

3.1 Introdução

Atualmente, os principais métodos de localização de falta em linhas HVDC são baseados em ondas viajantes. Estes métodos apresentam alta confiabilidade e precisão, respostas rápidas e seus resultados são apenas ligeiramente influenciados pela tipo de falta, resistência de falta e parâmetros da linha [14], [17], [30], [34], [35]. Nesses métodos, a posição da falta é calculada através do tempo de viagem das frentes de onda até os terminais monitorados. Sua precisão está diretamente relacionada com a correta identificação dos tempos de chegada dessas frentes de ondas nos terminais e da especificação da velocidade de propagação da onda [15], [17], [31], [50], [51], [69].

Neste capítulo, os conceitos de identificação de faltas baseado em ondas viajantes serão apresentados, assim como o processo de identificação das frentes de onda através de filtros morfológicos. Os filtros morfológicos apresentam bom desempenho no evidenciamento das frentes de onda, além de serem facilmente implementados e com baixo custo computacional. Entretanto, mesmo com as frentes de onda identificadas corretamente, a precisão da estimação do local da falta ainda depende da velocidade de propagação das ondas. A maioria das metodologias baseadas em ondas viajantes adotam a velocidade de propagação constante, próxima a velocidade da luz, negligenciando sua variação de acordo com o ponto de ocorrência da falta. Algumas metodologias, visando a minimização dos erros associados à especificação da velocidade de propagação das frentes de onda, estimam a posição de falta através da identificação de três frentes de onda, evitando a necessidade de especificar a velocidade. Portanto, como umas das contribuições deste capítulo, os métodos convencionais de localização de faltas baseados em ondas viajantes são comparados aos métodos não influenciados pela velocidade da onda. Esta comparação é realizada levando em consideração a quantidade de terminais monitorados e também a origem da

frente de onda, seja ela refletida do local da falta ou no terminal oposto.

3.2 Princípios da localização de falhas usando ondas viajantes

Quando uma falta ocorre em uma linha de transmissão, transitórios de alta frequência são produzidos e, como resultado, ondas de tensão e correntes são geradas no ponto de falta e se propagam ao longo da linha sofrendo reflexões, refrações e atenuações [42], [50], [53], [72], [75]-[77].

Esses processos podem ser observados no diagrama de Lattice da Figura 3.1, onde a linha contínua representa as reflexões e a linha tracejada as refrações. O processo de atenuação não foi representado.

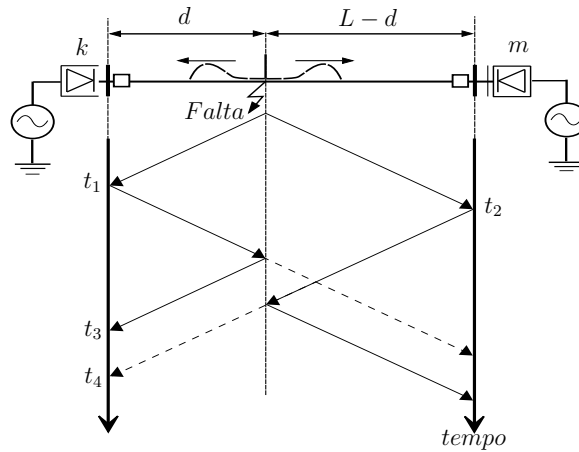


Figura 3.1: Diagrama de Lattice para uma linha HVDC.

Nos métodos convencionais de localização de falhas baseados em ondas viajantes, a posição da falta (d) é calculada através dos tempos de chegada das frentes de onda aos terminais monitorados e da velocidade de propagação das frentes de onda (v), a qual é adotada constante para toda a linha e para todas as frentes de onda [78].

De acordo com a quantidade de terminais monitorados, a posição da falta pode ser estimada usando as Equações (3.1) e (3.2), para os métodos de um terminal, ou (3.3) para os métodos de dois terminais, onde t_1 e t_2 representam, respectivamente, o instante de chegada da primeira frente de onda aos terminais monitorados k e m , t_3 representa o instante de chegada da frente de onda refletida no ponto de falta, enquanto t_4 representa o instante de chegada da onda refletida no terminal oposto ao terminal monitorado. O tamanho da linha é definido como L e o terminal k foi adotado como o terminal monitorado para o método de um terminal.

$$d = \frac{v \times (t_3 - t_1)}{2} \quad (3.1)$$

$$d = L - \frac{v \times (t_4 - t_1)}{2} \quad (3.2)$$

$$d = \frac{L - v \times (t_2 - t_1)}{2} \quad (3.3)$$

A velocidade da onda pode ser calculada conforme a Equação (3.4), onde v é a velocidade de propagação da onda para a frequência natural f_n , $Z(j\omega_n)$ e $Y(j\omega_n)$ são, respectivamente, a impedância série e a admitância *shunt* da linha, *imag* é o operador que retorna a parte imaginária de um número complexo e $\omega_n = 2\pi f_n$. Entretanto, determinar a velocidade das ondas viajantes através de (3.4) é uma tarefa complexa, já que os sinais transientes causados pela falta possuem uma ampla faixa de frequências naturais [79].

$$v = \frac{\omega_n}{\text{imag} \left(\sqrt{Z(j\omega_n)Y(j\omega_n)} \right)} \quad (3.4)$$

Os métodos de dois terminais, em geral, são mais confiáveis e precisos que os métodos de um terminal, uma vez que para o cálculo da posição da falta apenas a primeira frente de onda de cada terminal monitorado é necessária. Como essas frentes de onda apresentam alta energia, são usualmente mais fáceis de serem identificadas. A limitação desses métodos são os custos envolvidos, já que equipamentos de medição devem ser instalados nos dois terminais da linha com algum sistema de sincronização, como por exemplo, GPS (*Global Position System*), aumentando os custos do sistema de monitoramento [19], [80]. Os métodos de um terminal apresentam um custo de implantação inferior, já que o monitoramento dos dados é realizado em apenas um terminal, sem a necessidade de sistemas de sincronização. Além disso, os métodos de um terminal podem ser usados em testes de linhas em aberto. Entretanto, duas frentes de ondas devem ser identificadas, demandando algoritmos mais complexos de identificação das frentes de ondas [16], [43].

Neste trabalho, para a identificação das frentes de ondas, filtros morfológicos serão usados. A facilidade de implementação aliada a um custo de processamento reduzido, torna a morfologia matemática uma opção atraente, inclusive com possibilidade de aplicações em processamento em tempo real. O processo de evidenciamento e identificação das frentes de onda será mostrado a seguir.

3.3 Evidenciamento e identificação das frentes de onda

Como o Gradiente Morfológico Multi-resolução e o Gradiente Morfológico Rápido apresentam resultados semelhantes, ambas metodologias podem ser aplicadas para o evidenciamento das frentes de onda. Neste trabalho, o sinal de tensão será usado para detecção das frentes de onda, além disso, os gradientes serão usados com nível 2.

A Figura 3.2 mostra as frentes de onda, obtidas com o GMR e EE de tamanho 8, para o sinal de tensão de uma falta fase-terra localizada a 100 km do terminal de medição k , com resistência de falta igual a 0Ω . A primeira frente de onda corresponde ao pico de maior amplitude. Como o terminal de medição é o terminal k , a primeira frente de onda corresponde ao instante t_1 , conforme ilustrado na Figura 3.1. Note que como a primeira frente de onda apresenta amplitude bem superior as demais frentes de onda, seu processo de identificação é simples, e consequentemente, os métodos de dois terminais apresentam algoritmos de identificação das frentes de onda mais simples e são considerados mais confiáveis, desde que os sinais lidos nos dois terminais estejam devidamente sincronizados.

Identificada a primeira frente de onda, uma janela de dados (W) correspondente a duas vezes o tempo gasto para uma onda percorrer toda a linha é selecionada. Este é o tempo máximo necessário para uma onda sair de um terminal, ser refletida no ponto de falta e voltar ao mesmo terminal. A janela W inicia-se no instante t_1^k e termina no instante $t_1^k + 2L/v$, como mostrado na Figura 3.2, onde L é o comprimento total da linha e v uma velocidade pré-estabelecida.

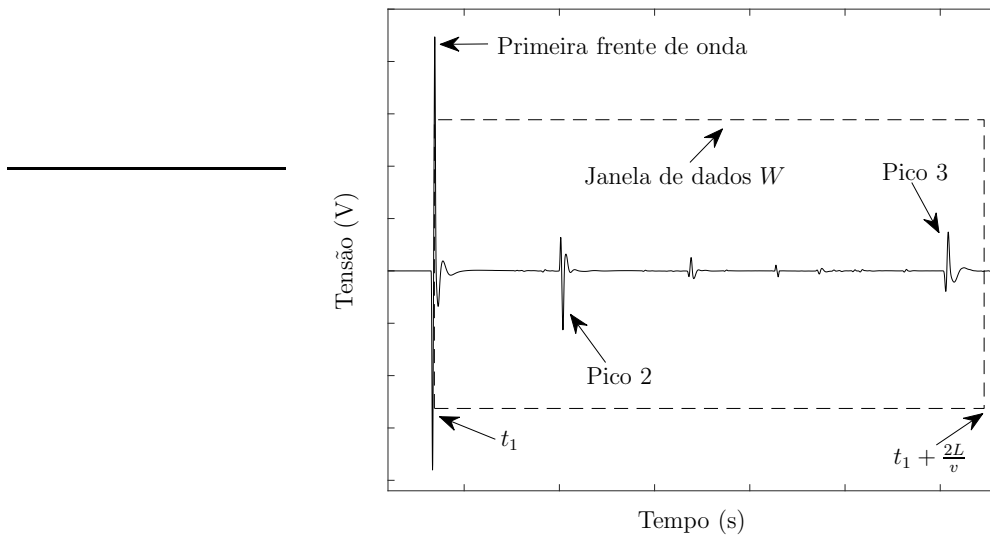


Figura 3.2: Janela de dados contendo diversas frentes de onda.

Os instantes de tempo t_3 e t_4 , dentro da janela de dados W , correspondem às duas frentes de onda com maiores pico (em módulo). Para determinar a origem (terminal oposto ou local da falta) das duas frentes de onda, as suas polaridades devem ser comparadas com a polaridade da primeira frente de onda. Para facilitar a visualização das polaridades, as janelas destacadas na Figura 3.3 são ampliados nas Figuras 3.4 e 3.5.

O Zoom 1, mostrado na Figura 3.4, se refere à primeira frente de onda, a qual é caracterizada por um pico negativo seguido de um pico positivo. A frente de onda refletida no ponto de falta apresentará polaridade oposta à primeira frente de onda e a

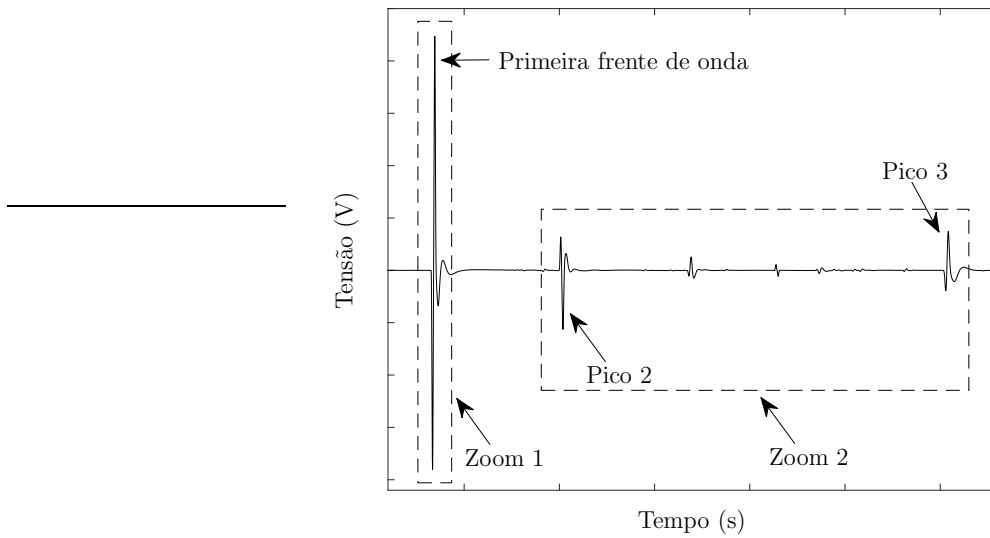


Figura 3.3: Zoom's aplicados as frentes de onda.

frente de onda refletida no terminal oposto apresentará a mesma polaridade da primeira frente de onda.

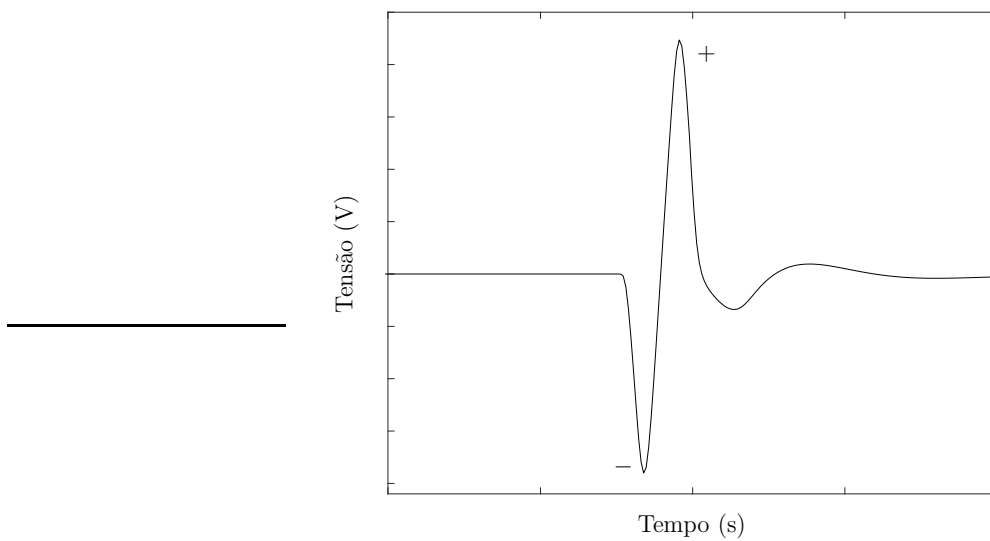


Figura 3.4: Zoom 1 - Polaridade da primeira frente de onda.

De acordo com a Figura 3.5, como o Pico 2 é o pico de maior amplitude dentro da janela de dados W e sua polaridade é dada por um pico positivo seguido de um pico negativo, esta frente de onda tem origem no ponto de falta, e seu instante de chegada no terminal monitorado é o instante t_3 . Se o maior pico dentro da janela de dados fosse o Pico 3, como sua polaridade é dada por um pico negativo seguido de um pico positivo, sua origem seria o terminal oposto e, portanto, o seu instante de chegada no terminal monitorado representaria t_4 .

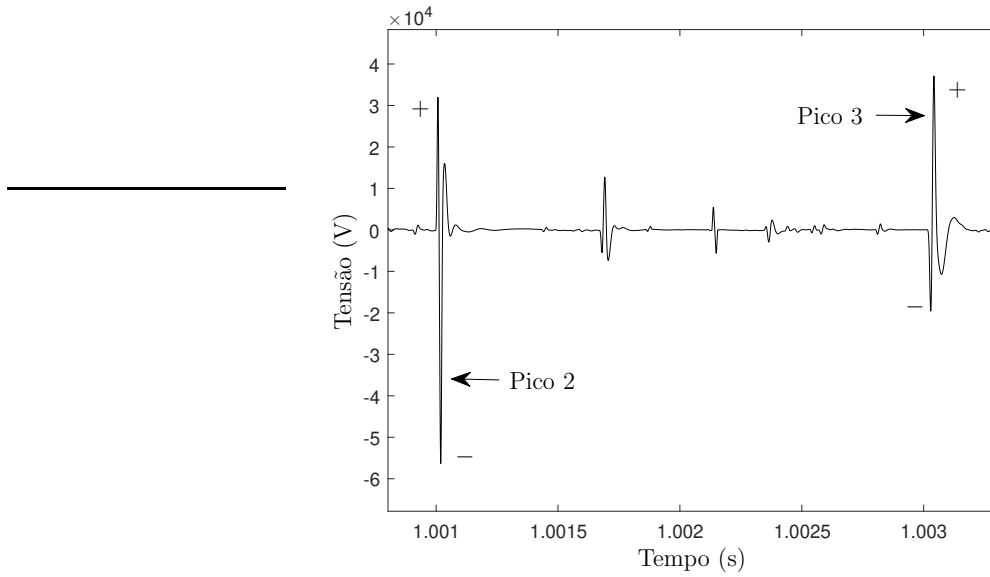


Figura 3.5: Zoom 2 - Polaridade das frentes de onda referentes aos Picos 2 e 3.

Tomando como referência o instante t_3 , através de (3.1) a posição da falta poderia ser estimada. Eventualmente, outros instantes de tempo podem ser identificados mais facilmente se uma nova janela de busca for aberta nas proximidades do instante de interesse. Neste exemplo, o centro da nova janela de busca pode ser definido a partir da estimativa para a posição da falta obtida com base nos instantes t_1 e t_3 já identificados. A terceira frente de onda pode ser usada nos métodos de localização de faltas que não requerem a definição de uma velocidade de propagação.

De forma geral, o uso das polaridades para a determinação da origem das frentes de onda permite que a estimativa da posição da falta seja obtida usando t_1 mais t_3 ou t_4 . Esta flexibilidade torna a metodologia de localização de faltas mais robusta, já que os picos de maior amplitude sejam sempre os usados na estimativa do local da falta.

3.4 Identificação das frentes de onda usando GMM e GMR e a influência da velocidade

O processo de identificação das frentes de ondas será avaliado a partir do cálculo de faltas aplicadas ao longo da linha com diferentes resistências de falta (0 Ω , 20 Ω , 50 Ω , 100 Ω). Para evidenciar as frentes de onda tanto o GMM quanto o GMR serão usados e seus desempenhos comparados.

As simulações de falta foram realizadas no PSCAD para um sistema HVDC bipolar de 500 kV com 500 km de extensão. A linha foi modelada através do modelo dependente da frequência com seus parâmetros representados conforme a Figura 3.6 com resistividade do solo igual a 1.000 $\Omega.m$. A Figura 3.6 é representada exatamente conforme

apresentada no PSCAD. Os conversores e inversores foram modelados de acordo com sistema CIGRE-HVDC [81]. Os dados de tensão foram amostrados no terminal k com uma taxa de 1,2 MHz. Faltas fase-terra foram simuladas, já que estas representam uma das principais faltas ocorridas em um sistema de transmissão [11], [18]. Toda a parte de processamento de sinal foi realizada em Matlab.

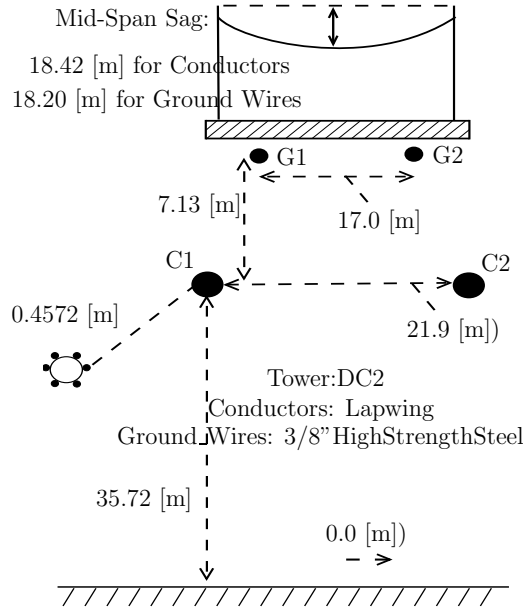


Figura 3.6: Configuração da linha HVDC bipolar (representação conforme PSCAD).

Inicialmente, o sinal de tensão é aplicado a um filtro de média móvel com uma janela de dados de 8 amostras. Este procedimento ajuda na redução de ruídos tornando a identificação das frentes de onda mais robusta. Tanto o GMM quanto o GMR de nível dois foram usados, respectivamente, com os elementos estruturantes planar e g_n , ambos de tamanho 8. No EE planar todos seus elementos são compostos por zeros, enquanto o g_n o primeiro elemento é nulo enquanto os demais são definidos como $-\infty$, conforme mostra a Equação (2.29).

Para avaliar o processo de identificação, tanto do instante t_3 , como de t_4 , a posição da falta foi calculada através das Equações (3.1) e (3.2). Em ambos os casos, a velocidade de propagação das frentes de onda adotada foi de $0,985 \times v_{luz}$, onde $v_{luz} = 299.792,458$ km/s representa a velocidade da luz. O erro percentual de estimação da posição de falta ($\epsilon\%$) foi calculado de acordo com (3.5), em que d_{real} é o ponto de falta real, d_{est} é a posição da falta estimada e L é o tamanho total da linha.

$$\epsilon\% = \frac{\|d_{real} - d_{est}\|}{L} \cdot 100 \quad (3.5)$$

As Figuras 3.7 e 3.8 mostram, respectivamente, os erros percentuais obtidos para o GMM e o GMR para faltas localizadas ao longo da linha, com resistência de falta igual a 0Ω através das abordagens indicadas por (3.1) e (3.2).

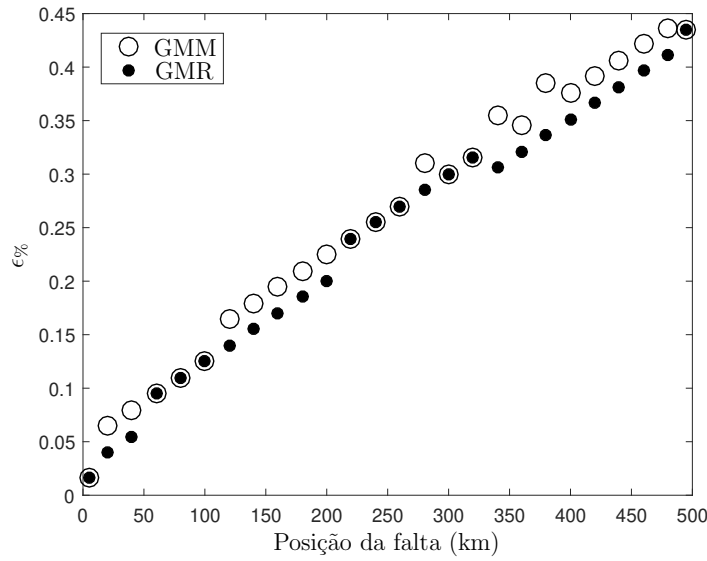


Figura 3.7: Erros percentuais das posições de faltas estimadas via (3.1).

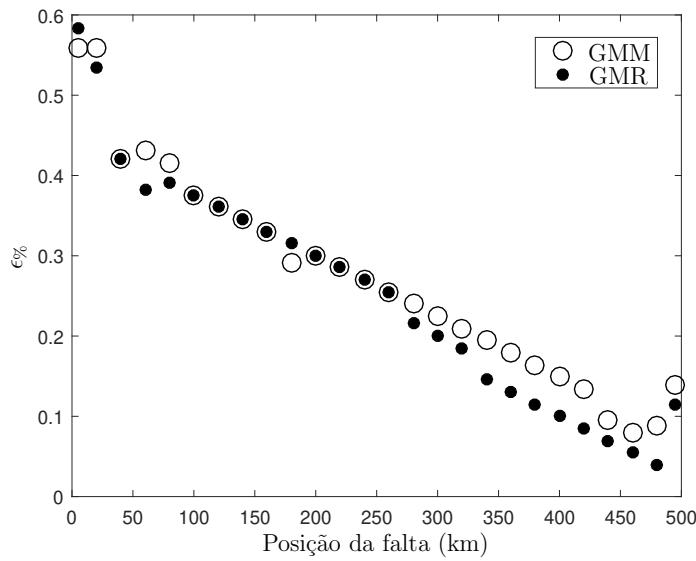


Figura 3.8: Erros percentuais das posições de faltas estimadas via (3.2).

Os resultados indicam que o GMM e o GMR apresentaram resultados semelhantes na identificação de chegada das frentes de onda associadas a t_3 e t_4 . Além disso, para a velocidade de propagação da onda especificada, a metodologia baseada em (3.1) apresentou resultados mais precisos para faltas no início da linha, enquanto que a metodologia baseada em (3.2) apresentou resultados mais precisos para faltas no fim da linha.

Baseado na identificação de t_1 , t_3 e no cálculo da posição da falta, Equação (3.1), o erro máximo obtido para o GMM e GMR foram respectivamente de 0,4363% e 0,4353%. Além disso, os erros médios das faltas simuladas para GMM e GMR foram de 0,2579% e 0,2408%, respectivamente. Já o processo de localização baseado em t_1 , t_4 , e na

Equação (3.2), os erros máximos obtidos foram de 0,5593% e 0,5829%, respectivamente, para o GMM e GMR, enquanto seus erros médios foram de 0,2730% e 0,2541%.

Percebe-se que, de maneira geral tanto o GMM quanto o GMR permitem um evidenciamento das frentes de onda que proporciona identificar adequadamente os instantes que as frentes de onda chegam nos terminais monitorados, dado que os resultados obtidos na estimação da posição da falta, tanto utilizando a Equação (3.1) quanto (3.2), foram satisfatórios. Uma gama maior de testes foi realizada para outras condições de falta, e os mesmos comportamentos gerais foram observados. O Apêndice A apresenta os resultados desses testes.

Note que para todos os testes, a velocidade de propagação da onda adotada foi igual a $0,985 \times v_{luz}$, entretanto, a definição de outro valor de velocidade irá influenciar diretamente na precisão das metodologias. Por exemplo, a Figura 3.9, mostra os resultados obtidos através de (3.1) utilizando-se os mesmos instantes de tempo (t_1 e t_3) usados nos resultados mostrados na Figura 3.7, porém adotando-se $v = 0,97 \times v_{luz}$.

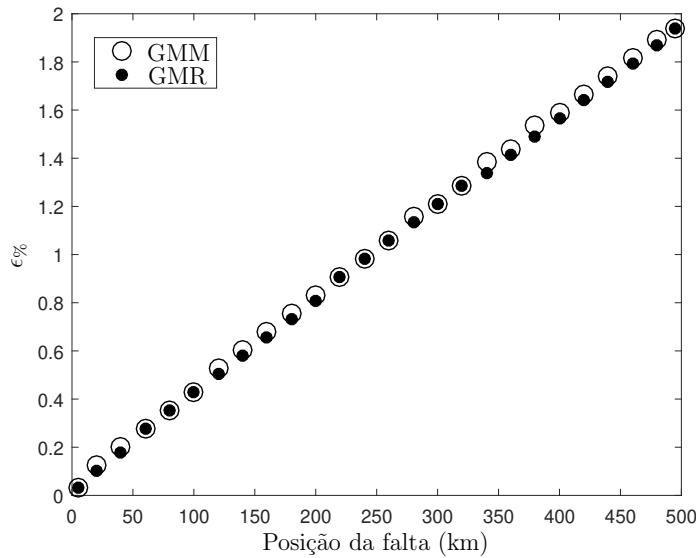


Figura 3.9: Erros percentuais das posições de falhas estimadas via (3.1) com $v = 0,97 \times v_{luz}$.

Note que a troca da velocidade ocasionou um aumento do erros de localização de falta, tanto para GMM quanto para GMR, alcançando em ambos os casos um erro máximo de aproximadamente 2%. Portanto, a determinação da velocidade da onda é um aspecto fundamental para que as metodologias de localização de falhas possam obter resultados mais precisos. Entretanto, a correta definição da velocidade de propagação da frente de onda é uma tarefa complexa, já que a velocidade da onda é influenciada por diversos fatores, como parâmetros da linha, condições climáticas e posição da falhas [15], [51], [53]. Uma forma de minimizar os erros associados à inadequada especificação da velocidade é usar o instante de tempo associado a uma terceira onda. Com isso, admitindo que todas as frentes de onda se deslocam com mesma velocidade é possível

eliminar a variável velocidade do processo de localização de falta. Note que ainda há uma aproximação relacionada à consideração da velocidade constante. A seguir, tais métodos serão avaliados.

3.5 Métodos de localização de faltas baseados em ondas viajantes não influenciados pela velocidade de propagação

Nos métodos convencionais de localização de faltas, tanto de um como de dois terminais, a velocidade de propagação da onda é um importante parâmetro a ser definido, influenciando diretamente no desempenho das metodologias. A fim de evitar a necessidade de se definir uma velocidade de propagação da onda, algumas metodologias adotam a identificação de três frentes de onda, consequentemente, eliminando a influência da velocidade. De acordo com a quantidade de terminais monitorados, a identificação da terceira frente de onda requer algoritmos com diferentes graus de complexidade.

No método de um terminal não influenciado pela velocidade da onda, os instantes t_1 , t_3 e t_4 devem ser identificados, sendo a posição da falta estimada de acordo com (3.6).

$$d = \frac{L \times (t_3 - t_1)}{t_3 + t_4 - 2t_1} \quad (3.6)$$

O principal problema desta metodologia é a necessidade de identificar tanto o instante t_3 quanto o instante t_4 . Por exemplo, para uma falta localizada próximo ao final da linha, enquanto a frente de onda referente a t_4 percorrerá uma distância próxima ao tamanho da linha, a frente de onda referente a t_3 terá percorrido uma distância aproximada de 3 vezes o tamanho da linha. Portanto, devido aos processos de refração, reflexão e atenuação, a amplitude da terceira frente de onda é significativamente menor que a amplitude das duas primeiras frentes de onda, o que torna a sua identificação muito mais complexa. Dependendo dos parâmetros da falta, a amplitude de uma ou mais frentes pode ser similar à amplitude de ruídos, inviabilizando sua identificação.

Nos métodos de dois terminais não influenciados pela velocidade da onda, a posição da falta é calculada através da primeira frente de onda que atinge cada terminal monitorado, instante t_1 e t_2 , e da frente de onda refletida do ponto de falta ou do terminal oposto, associados aos instantes t_3 ou t_4 , como indica as Equações (3.7) e (3.8). Note que ao contrário da Equação (3.6), onde é necessário a identificação tanto do instante t_3 quanto do instante t_4 , nos métodos de dois terminais não influenciados pela velocidade da onda, a posição da falta é calculada usando o instante t_3 ou o instante t_4 , tornando o processo de identificação das frentes de onda mais simples, uma vez que apenas a onda

de maior amplitude referente a t_3 ou t_4 precisa ser identificada. Vale lembrar, entretanto, que os sinais monitorados nos dois terminais devem ser perfeitamente sincronizados, o que dificulta o uso desta abordagem.

$$d = \frac{L \times (t_3 - t_1)}{2(t_2 + t_3 - 2t_1)} \quad (3.7)$$

$$d = \frac{L \times (t_1 + t_4 - 2t_2)}{2(t_4 - t_2)} \quad (3.8)$$

3.6 A influência da velocidade nos métodos convencionais de localização de faltas

A fim de avaliar a influência da velocidade da onda nos métodos convencionais de localização de faltas, através dos instantes de chegadas obtidos para uma determinada falta, a posição da falta foi estimada para diferentes velocidades de propagação. Como a velocidade da onda varia de acordo com diversos parâmetros, uma gama de valores são adotados na literatura. Por exemplo, em [37], $v = 2,96 \times 10^5$ km/s foi adotada. Em [82], $v = 2,97 \times 10^5$ km/s, enquanto em [39], $v = 3,00 \times 10^5$ km/s. Neste trabalho, os testes serão realizados para quatro diferentes valores de v (v_1, v_2, v_3, v_{luz}), onde v_1, v_2 e v_3 correspondente respectivamente a 0,97, 0,98 e 0,99 da velocidade da luz (v_{luz}), onde $v_{luz} = 2,99792458 \times 10^5$ km/s.

Novamente, os testes foram realizados para a linha bipolar HVDC de 500 kV mostrada na Figura 3.6. As faltas foram aplicadas ao longo da linha com resistência de falta de 0 Ω , 20 Ω , 50 Ω e 100 Ω . Como os métodos de ondas viajantes são pouco influenciados pela resistência de falta, nesta seção os testes serão apresentados apenas para resistência de falta igual a 0 Ω [14]. No Apêndice B, são apresentados os resultados para todas as resistências.

O sinal de tensão foi amostrado com uma taxa igual a 1,2 MHz em conjunto com um filtro de média móvel com janela de dados de 8 amostras. Para evidenciar as frentes de onda, o filtro GMR foi utilizado com EE de tamanho 8 e nível 2. Esta combinação foi selecionada por apresentar desempenho similar ao obtido com o GMM, porém com um menor custo computacional. Em todos os casos, os instantes t_1, t_2, t_3 e t_4 foram corretamente identificados. Para o método de um terminal, o terminal k foi novamente adotado como o terminal monitorado. Por fim, o erro percentual de localização de falta foi calculado de acordo com a Equação (3.5).

3.6.1 Métodos convencionais de um terminal

Os métodos convencionais de um terminal foram avaliados para as diferentes velocidades da onda adotadas. As Figuras 3.10 e 3.11 apresentam os erros percentuais obtidos para as metodologias baseadas em (3.1) e (3.2), respectivamente.

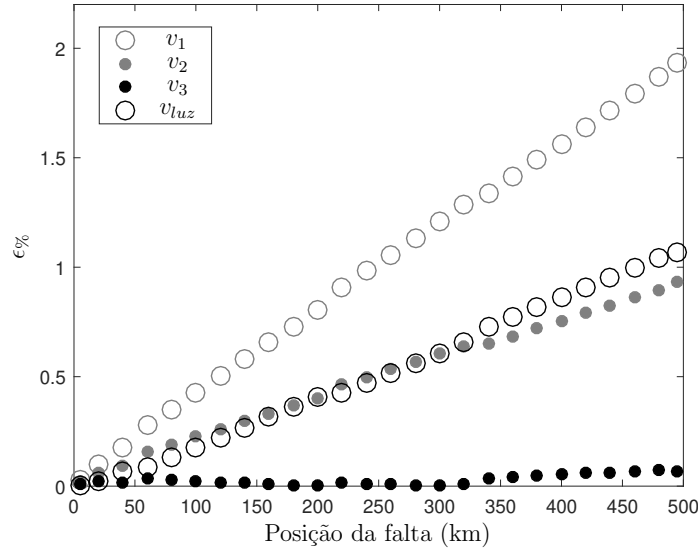


Figura 3.10: Método convencional de localização de falhas de um terminal baseado em (3.1).

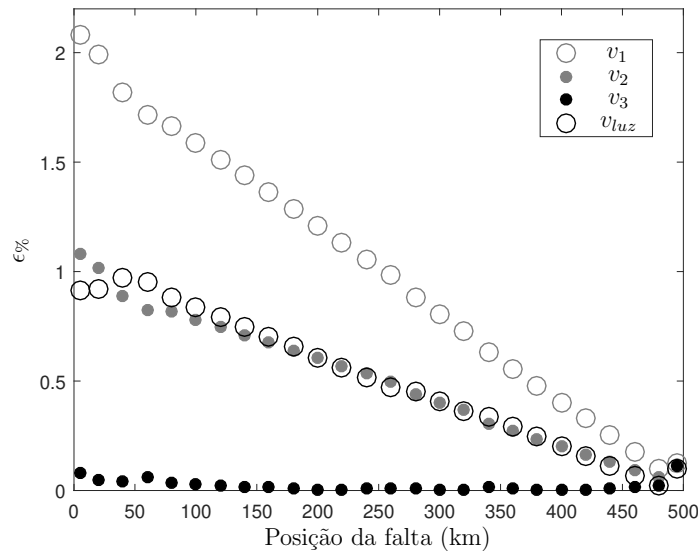


Figura 3.11: Método convencional de localização de falhas de um terminal baseado em (3.2).

De forma geral, as metodologias baseadas em (3.1) e (3.2) apresentam desempenhos semelhantes, porém, enquanto em (3.1) os resultados mais precisos são obtidos para falhas localizadas próximas ao início da linha, em (3.2) os melhores resultados foram encontrados para falhas mais próximas ao final da linha. Além disso, para ambas as metodologias a velocidade v_3 proporcionou os menores erros de estimação da posição da

falta. Nos resultados da Figura 3.10, o erro máximo obtido com v_3 foi de 0,0735% e nos resultados para a Figura 3.11, o erro máximo foi de 0,1100%. É importante destacar que a velocidade v_3 obteve os melhores resultados para esta configuração de linha HVDC, porém ela não necessariamente será a melhor para linhas com configurações diferentes.

3.6.2 Método Convencional de dois terminais

A Figura 3.12 mostra os erros percentuais obtidos para o método convencional de localização de falta de dois terminais, da Equação (3.3). Observe que em métodos de dois terminais, as melhores estimativas são realizadas para faltas próximas ao meio da linha. Novamente, o melhor desempenho foi obtido adotando-se $v = v_3$, onde o erro máximo observado foi de 0,0265%. O método de dois terminais apresentou uma melhor precisão que os métodos baseado em um terminal. Além disso, por ser necessário identificar somente a primeira frente de onda que atinge cada terminal monitorado, o método de dois terminais é mais robusto, sendo menos susceptível a interferências de ruído. Em contrapartida, é necessário relembrar que os sinais monitorados nos dois terminais devem ser sincronizados, o que requer a adoção de recursos tecnológicos adicionais.

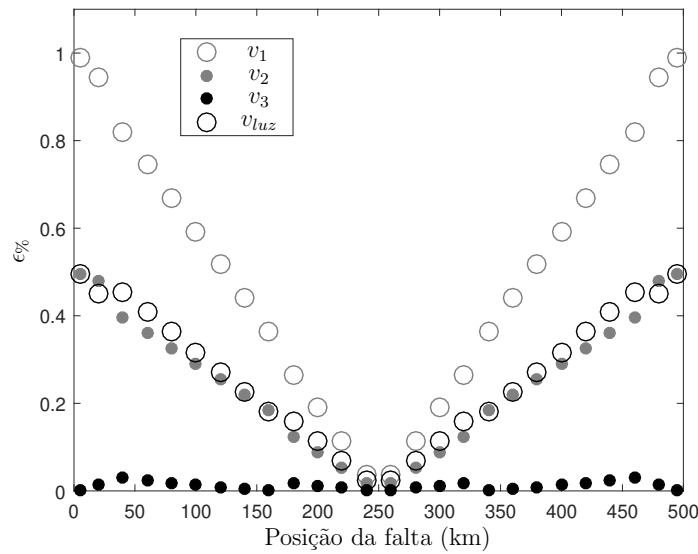


Figura 3.12: Método convencional de localização de faltas de dois terminais baseado em (3.3).

3.7 Comparação entre os métodos convencionais de localização de faltas e os métodos não influenciados pela velocidade

Para os testes apresentados nesta seção, foram adotados os mesmos filtros morfológicos na identificação das frentes de onda, assim, foi possível garantir que os instantes de tempo utilizados são os mesmos encontrados nos testes da seção anterior. Portanto, a diferença de desempenho entre os métodos convencionais e os métodos não influenciados pela velocidade é proveniente exclusivamente da definição da velocidade de propagação da onda. Como nos testes realizados para os métodos convencionais os resultados obtidos para $v = v_3$ obtiveram os melhores resultados, esses valores serão definidos como base para a comparação com os resultados obtidos pelos métodos não influenciados pela velocidade. Todas as faltas são aplicadas com resistência de falta iguais a 0Ω , 20Ω , 50Ω e 100Ω . Neste capítulo apenas os resultado referentes a 0Ω são apresentados. Todos os demais casos simulados são mostrados no Apêndice C desta tese.

3.7.1 Método de um terminal não influenciado pela velocidade da onda

A Figura 3.13 mostra os erros de localização de falta para o método de um terminal não influenciado pela velocidade da onda e para o método convencional de um terminal baseado em (3.1). Para faltas localizadas na primeira metade da linha, as duas metodologias apresentaram resultados bem semelhantes, entretanto para a segunda metade da linha, o método não influenciado pela velocidade apresentou resultados mais precisos, excetuando-se na posição de falta igual a 495 km, onde foi obtido seu maior erro, 0,1096%.

Comparando os resultados obtidos para o método não influenciado pela velocidade com o método de um terminal convencional para as velocidades v_1 , v_2 e v_{luz} , o método não influenciado pela velocidade é, de modo geral, sempre mais preciso.

3.7.2 Métodos de dois terminais não influenciado pela velocidade da onda

Os erros de localização obtidos para os métodos de dois terminais não influenciados pela velocidade baseados em (3.7) e (3.8) foram calculados e comparados com os erros obtidos a partir do método de dois terminais convencional com $v = v_3$. Os resultados da comparação são apresentados na 3.14.

As metodologias de dois terminais não influenciadas pela velocidade apresentam resultados bem similares. Essas metodologias, entretanto, apresentaram resultados

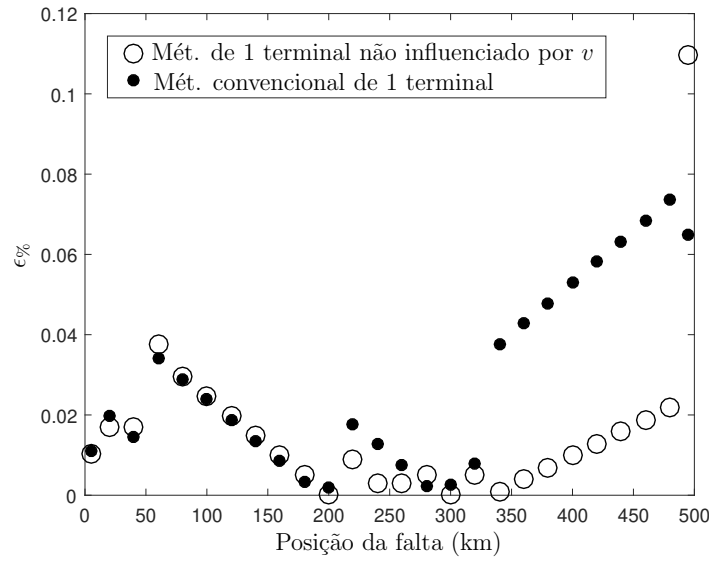


Figura 3.13: Comparação entre o método de um terminal não influenciado pela velocidade e o método convencional de um terminal baseado em (3.1) com $v = v_3$.

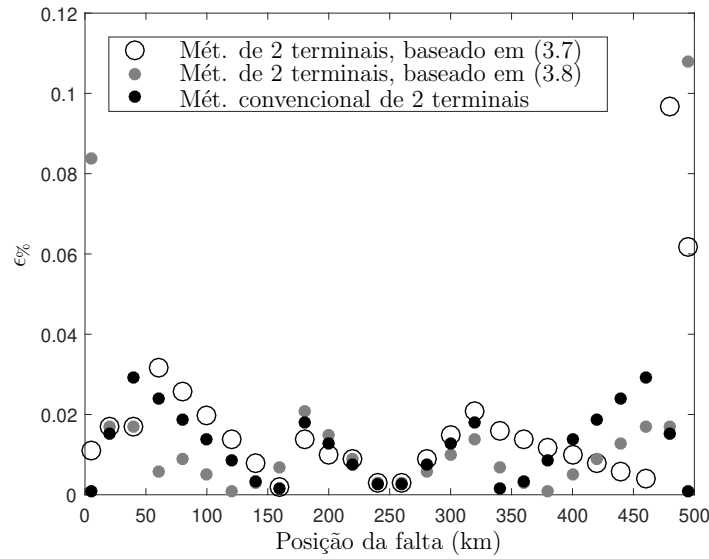


Figura 3.14: Comparação entre os métodos de dois terminais não influenciados pela velocidade e o método convencional de dois terminais com $v = v_3$.

menos precisos para faltas localizadas nas extremidades da linha, quando comparada com a metodologia convencional de 2 terminais, com $v = v_3$. O erro máximo para as metodologias baseadas em (3.7) e (3.8) foram, respectivamente, iguais a 0,0967% e 0,1080%, enquanto o erro máximo para a metodologia de dois terminais convencional com $v = v_3$ foi de 0,0291%. Se os métodos baseados em (3.7) e (3.8) forem comparados com o método de dois terminais convencional com velocidades das ondas iguais a v_1 , v_2 e v_{uz} , as metodologias não influenciadas pela velocidade novamente apresentam resultados melhores.

Note que tanto para o método de um ou dois terminais convencionais, uma boa

especificação da velocidade de propagação das ondas pode levar a resultados tão precisos quanto os métodos não influenciados pela velocidade. Entretanto, na literatura não há métodos para a especificação dessa velocidade de maneira simples e eficiente. Além disso, os métodos não influenciados pela velocidade, apesar de apresentarem resultados precisos e evitarem a necessidade de especificar a velocidade de propagação das frentes de onda, requerem a identificação de 3 frentes de onda, o que implica no aumento da complexidade dos algoritmos. Além disso, a robustez dos algoritmos diminui com a necessidade de identificação de mais frentes de onda.

3.8 Conclusão

Os métodos mais promissores para localização de faltas em linhas HVDC são baseados em ondas viajantes. Estes métodos são rápidos e precisos, porém, são dependentes da correta identificação dos instantes de chegada das frentes de onda nos terminais monitorados e também da especificação da velocidade de propagação das frentes de ondas. Nesta tese são propostos filtros morfológicos, como o GMM e o GMR, para a identificação das frentes de onda.

Os estudos realizados indicam que tanto o GMM quanto o GMR apresentam resultados bastantes satisfatórios para o evidenciamento das frentes de onda. Entretanto, de modo geral, o GMR apresenta um custo computacional inferior. Além da identificação correta das frentes de onda, a especificação da velocidade de propagação das frentes de onda é determinante para a precisão dos métodos convencionais de um ou dois terminais. Neste capítulo, foram apresentados resultados de testes que confirmam a forte relação da precisão dos métodos de localização de falta com a velocidade de propagação das frentes de onda.

A fim de evitar a necessidade de definição da velocidade da onda, algumas metodologias utilizam os tempos de chegada de três frentes de onda. As metodologias não influenciadas pela velocidade e as metodologias convencionais (que fazem uso da velocidade) foram comparadas de acordo com a quantidade de terminais monitorados. Se a velocidade de propagação for especificada de forma adequada, tanto as metodologias convencionais quanto as metodologias não influenciadas pela velocidade da onda podem apresentar resultados, em geral, igualmente precisos. O grande limitador dos métodos não influenciados pela velocidade é o aumento da complexidade dos algoritmos devido a necessidade de identificação de 3 frentes de onda, tornando a metodologia menos robusta, principalmente na presença de ruídos. Além disso, tem-se o aumento do custo do sistema de monitoramento nos casos em que vários terminais são monitorados.

Capítulo 4

Localização de faltas em linhas HVDC com estimação da velocidade de propagação da onda

Nas metodologias de localização de faltas baseadas em ondas viajantes, a velocidade de propagação das frentes de onda é um parâmetro que precisa ser especificado. Na literatura, poucos estudos são dedicados à determinação desta velocidade. Em geral, nos métodos de localização de faltas convencionais, assume-se para a velocidade de propagação das frentes de onda valores próximos a velocidade da luz. Entretanto, a velocidade varia de acordo com diversos parâmetros como condições climáticas, topologia da linha, tipos de cabos, tipo de solo e posição da falta.

Neste capítulo, como contribuição deste trabalho, é proposta uma metodologia de estimação da velocidade de propagação das frentes de onda usando dados medidos em um terminal da linha. Esta metodologia funde conceitos das abordagens baseadas em ondas viajantes e frequência natural. Na metodologia de estimação da velocidade proposta, a velocidade da onda é calculada levando em consideração os parâmetros da linha e a posição da falta. Assim, através de cálculos realizados *offline* e a partir de dados reais e/ou simulados de faltas, é obtida uma função que descreve o comportamento da velocidade de propagação das frentes de onda em função do local da falta. Na medida em que dados reais de faltas vão sendo incorporados a metodologia, substituindo os dados simulados, a função que descreve o comportamento da velocidade passa a incorporar fatores que não podem ser previstos nas simulações, como a deterioração natural dos componentes da linha e a variação da resistividade do solo, o que torna a função da velocidade mais precisa e realista.

4.1 Análise da velocidade de propagação das ondas viajantes

Embora as metodologias tradicionais de localização de faltas para linhas HVDC adotem a velocidade de propagação das ondas constante, com valores próximos a velocidade da luz, a velocidade varia de acordo com alguns parâmetros, tais como, parâmetros da linha, temperatura e posição da falta [15], [53]. A fim de avaliar a influência de alguns desses parâmetros no comportamento da velocidade da onda, faltas fase-terra foram aplicadas ao longo da linha HVDC bipolar de 500 kV e 500 km de extensão, com resistência de falta iguais a 0 Ω , 20 Ω , 50 Ω e 100 Ω e resistividade do solo igual a 100 Ω .m e 1.000 Ω .m, em seguida, para cada condição de falta simulada a velocidade de propagação da frente de onda foi calculada. A Figura 3.6, mostra os resultados obtidos para faltas com resistências iguais a 0 e 100 Ω .

A velocidade de propagação da frente de onda foi calculada através da Equação (4.1), onde o terminal k foi definido como o terminal monitorado. Note que são usados apenas dados monitorados em um terminal da linha. A posição da falta é conhecida *a priori* e os instantes de chegada t_1 e t_3 foram identificados através do sinal de tensão amostrado a 1,2 MHz. Os ruídos do sinal de tensão foram eliminados com um filtro de média móvel e para evidenciar as frentes de onda, o GMR com EE de tamanho 8 foi utilizado.

A Figura 4.1 mostra a variação da velocidade de propagação das frentes de onda de acordo com a posição e resistência de falta para a linha HVDC com resistividade do solo igual a 100 Ω .m, pontos em cinza, e 1.000 Ω .m, pontos em preto. As linhas continuas em preto e cinza representam as curvas de tendência das velocidades para cada resistividade.

$$v = \frac{2d}{t_3 - t_1} \quad (4.1)$$

Note que a resistência de falta apresentou pouca influência na velocidade de propagação das ondas, e por isso, para fins de cálculo da velocidade, pode ser desprezada. Em contrapartida, a velocidade de propagação foi fortemente influenciada pela posição da falta e pela resistividade do solo. De forma geral, para faltas próximas ao terminal monitorado, a velocidade das ondas apresentam valores mais elevados e à medida que a falta se distancia do terminal monitorado, os valores de velocidade vão decaindo. Além disso, para uma mesma posição de falta, a velocidade de propagação da onda é maior para menores resistividades do solo. Embora os testes tenham sido realizados para uma linha bipolar, a velocidade da onda apresenta comportamento similar para linhas monopolares.

Novamente, através da Equação (4.1), a velocidade de propagação das ondas viajantes foi calculada usando dados medidos no terminal k , v_k , e dados medidos no

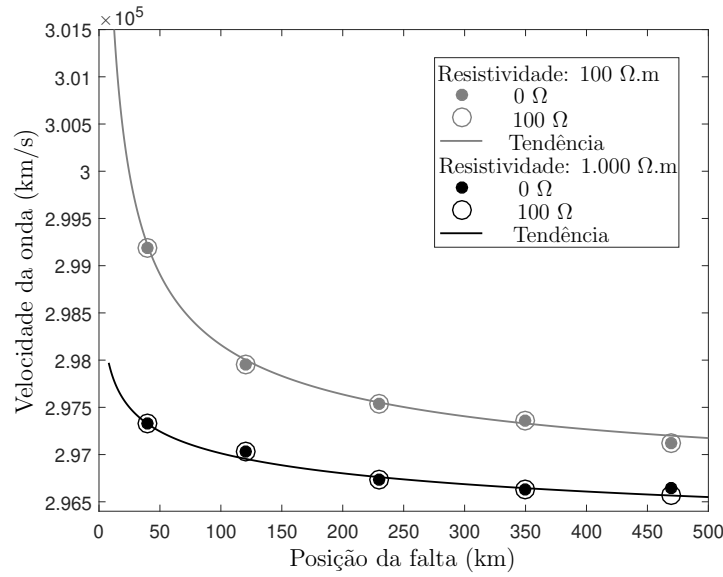


Figura 4.1: Variação da velocidade de propagação das frentes de onda de acordo com a posição e resistência de falta para uma linha HVDC com resistividade do solo igual a 100 $\Omega.m$ e 1.000 $\Omega.m$.

terminal m , v_m . A Figura 4.2 mostra os resultados obtidos, onde a posição da falta foi referenciada ao terminal k . As curvas em preto e cinza, representam as tendências das curvas de velocidade v_k e v_m . Em uma curva ideal de v_k e v_m , essas velocidades deveriam se cruzar na metade da linha.

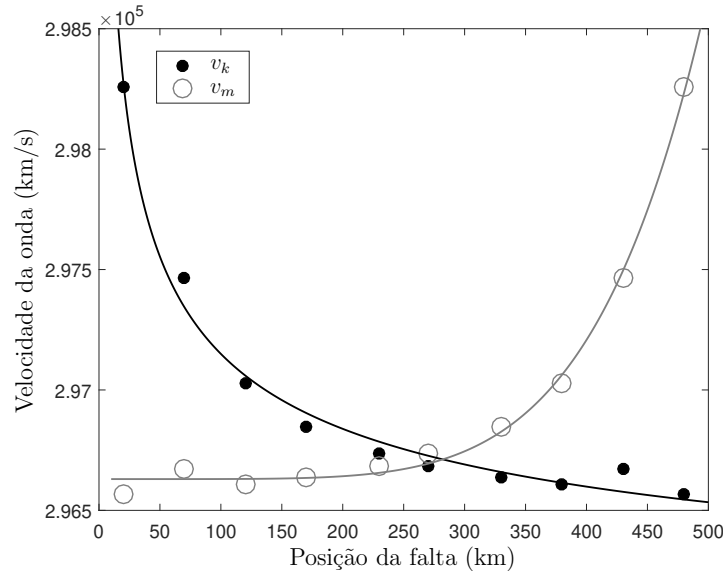


Figura 4.2: Variação da velocidade de propagação das frentes de onda vista de cada terminal.

Note que para uma dada posição de falta, as ondas que se propagam em direções opostas possuem velocidades distintas de propagação. Além disso, as velocidades v_k e v_m para faltas a uma mesma distância dos respectivos terminais monitorados apresentarão valores semelhantes. A Figura 4.3 mostra este resultado, onde para maior

facilidade de visualização, os pontos da Figura 4.2 foram plotados de forma que o eixo “Posição da falta (km)” refere-se à distância entre a falta e o terminal k , para v_k , e entre a falta e o terminal m , para v_m .

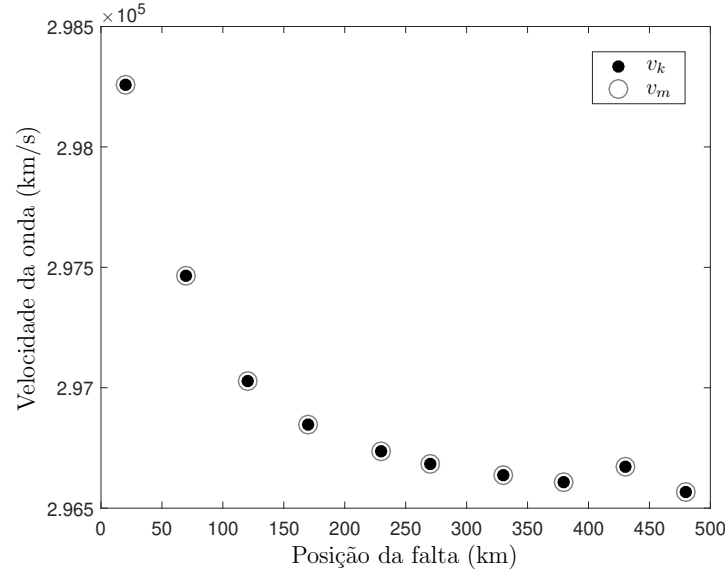


Figura 4.3: Variação da velocidade v_k e v_m para mesmas distâncias entre a falta e o respectivo terminal monitorado.

Com base nas curvas de velocidade de propagação das frentes de onda apresentadas nesta seção, fica claro que ao invés de adotar uma velocidade de propagação constante, como tipicamente é feito na literatura, a velocidade de propagação das frentes de onda adotada nas metodologias de um terminal deveria ser específica para cada linha e dependente da posição da falta. Na próxima seção é proposta uma metodologia que permite estimar uma curva de velocidade similar àquelas mostradas nesta seção que seja adequada aos métodos de localização de falta que requerem dados monitorados em apenas um terminal da linha.

4.2 Método de localização de faltas com estimação da velocidade

A metodologia proposta para localização de faltas difere das metodologias tradicionais por adotar velocidades de propagação das frentes de onda que variam de acordo com o local da falta. Para tal, é proposta uma função que relaciona a velocidade de propagação das frentes de onda aos instantes de incidência das frentes de onda no terminal monitorado. Os parâmetros da função de velocidade são ajustados a partir de dados característicos de faltas reais e/ou simuladas. O ajuste a partir de dados obtidos de faltas reais permite considerar aspectos que tipicamente não podem ser incluídos nas

simulações, o que torna a metodologia proposta para localização de faltas mais precisa e robusta.

4.2.1 O processo de estimação da velocidade

De acordo com a literatura, a velocidade de propagação das ondas podem ser obtidas para uma determinada frequência natural a partir da Equação (4.2), onde v_n é a velocidade de propagação da onda, f_n é a frequência natural, $Z(j\omega_n)$ e $Y(j\omega_n)$ são, respectivamente, a impedância série e admitância *shunt* da linha, *imag* é o operados que retorna a parte imaginária de um número complexo e $\omega_n = 2\pi f_n$ [83].

$$v_n = \frac{\omega_n}{\text{imag} \left(\sqrt{Z(j\omega_n)Y(j\omega_n)} \right)} \quad (4.2)$$

Obtida a velocidade da onda v_n , a distância entre a posição da falta e o terminal monitorado k pode ser calculada a partir da Equação (4.3), onde θ_1 e θ_2 dependem da configuração da linha, assim como das condições da falta. Um melhor detalhamento de (4.3) pode ser encontrado em [15], [83], [84].

$$d = \frac{(\theta_1 + \theta_2)v_n}{4\pi f_n} \quad (4.3)$$

Apesar das relações matemáticas simples, estimar a posição da falta através da Equação (4.3) é uma tarefa árdua, uma vez que os algoritmos disponíveis para obter a frequência natural requerida, em geral a frequência dominante, dos sinais de falta, como por exemplo Fourier e MUSIC, são complexos e podem apresentar baixa eficiência computacional e precisão [53].

Idealmente, a posição da falta calculada por qualquer abordagem deve fornecer os mesmos resultados. Portanto, as distâncias d fornecidas por (3.1) e (4.3) devem ser as mesmas, como mostrado abaixo, onde $\Delta t = t_3 - t_1$.

$$d = \frac{v\Delta t}{2} = \frac{(\theta_1 + \theta_2)v_n}{4\pi f_n} \quad (4.4)$$

A propagação da velocidade da onda v_n pode ser obtida para qualquer frequência natural. Vamos supor uma frequência natural tal que $v = v_n$. Como resultado, a seguinte frequência natural é definida:

$$f_n = \frac{(\theta_1 + \theta_2)}{2\pi} \cdot \frac{1}{\Delta t} \quad (4.5)$$

Por uma questão de simplicidade, definindo α como em (4.6), a frequência natural f_α pode ser obtida de (4.7). Como dito anteriormente, α depende dos parâmetros da linha, bem como das condições de falta. Para evitar cálculos trabalhosos, propõe-se estimar α a partir de casos de faltas reais e/ou simulados. De fato, a média de α será

obtida e usada para propor uma curva de velocidade da onda apropriada, tornando a localização de falta muito mais simples e precisa.

$$\alpha = \frac{(\theta_1 + \theta_2)}{2\pi} \quad (4.6)$$

$$f_\alpha = \frac{\alpha}{\Delta t} \quad (4.7)$$

Dado um valor médio para α , f_α pode ser calculado a partir de (4.7) e uma estimativa para v_α pode ser obtida de (4.2). Note que v_α depende de Δt e, portanto, da posição da falta. Entretanto, do ponto de vista prático, ainda é uma tarefa árdua obter a impedância em série (Z) e a admitância *shunt* da linha, uma vez que um conhecimento detalhado do modelo da linha e dos cabos são necessários. Apesar dos recursos computacionais envolvidos não serem proibitivos, pode tornar inviável a aplicação desta abordagem em dispositivos de proteção *online*. Para superar tal problema, na próxima seção é proposto uma simples relação matemática associando a velocidade de propagação da onda v_α , a constante α e Δt . A equação proposta permite que a tarefa árdua seja realizada *offline*. Como consequência, a abordagem de localização de faltas resultante pode ser incorporada em dispositivos de proteção *online*.

4.2.2 A curva de velocidade da onda

De (4.2) a (4.7) é possível relacionar v_α , a posição da falta d , o parâmetro α e Δt . Entretanto, mesmo se v_α , d e Δt são conhecidos, ou seja, mesmo que a falta seja completamente caracterizada, α não pode ser obtido diretamente de (4.2). O objetivo desta seção é propor uma simples relação de velocidade da onda que permita obter α para uma determinada posição de falta, bem como estimar v_α de Δt uma vez que α é conhecido.

Dado o modelo detalhado da linha HVDC, programas de transitórios eletromagnéticos, como PSCAD/EMTDC, podem fornecer os valores de $Z(j\omega_n)$ e $Y(j\omega_n)$ para uma frequência especificada e, portanto, a velocidade de propagação da onda correspondente pode ser calculada a partir de (4.2). Com isso, uma curva que relaciona v_n e f_n pode ser obtida de uma determinada linha HVDC. Observe que esses cálculos são executados *offline* e não envolvem simulações de faltas, mas apenas o cálculo dos parâmetros do modelo da linha. Dessa forma, uma curva referente a v_n e f_n foi construída para a linha de teste HVDC bipolar de 500 km. Esta curva é mostrada na Figura (4.4). As frequências mais altas são típicas de faltas ocorridas próximo ao terminal monitorado, enquanto frequências mais baixas são dominantes pra faltas localizadas próximas ao terminal oposto. A frequência mais alta foi limitada pelo PSCAD. Como pode ser observado, a curva $v_n \times f_n$ é muito bem comportada e, portanto, poucos pares calculados (v_n , f_n)

são necessários para caracterizá-la

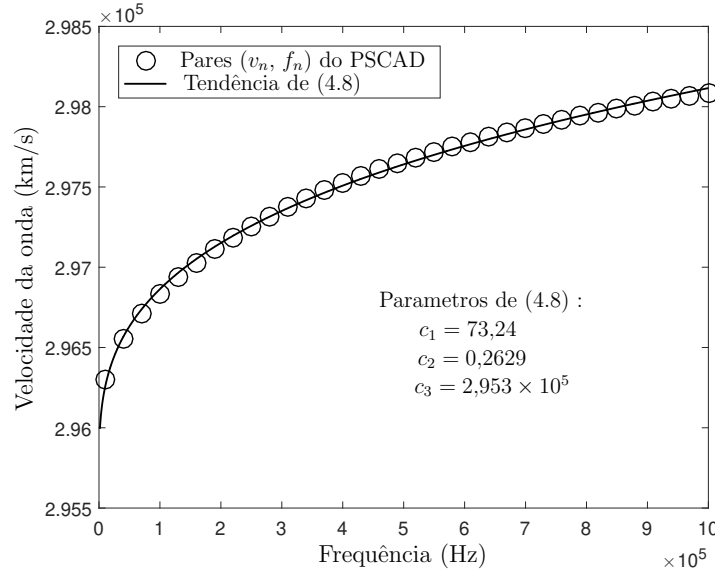


Figura 4.4: Ajuste de (4.8) aos pares (v_n, f_n) calculados.

A linha contínua mostrada na Figura 4.4 foi ajustada aos pares calculados (v_n, f_n) pelo Matlab através da ferramenta *Curve Fitting Tool*. Para atingir os objetivos desta seção, o modelo matemático *Power2*, descrito por (4.8), foi selecionado. Os parâmetros c_1 , c_2 e c_3 são fornecidos pela *Curve Fitting Tool* ajustando de forma otimizada os pares simulados ao modelo matemático proposto.

$$v_\alpha = c_1 f_\alpha^{c_2} + c_3 \quad (4.8)$$

Finalmente de (4.7) e (4.8), assumindo que o parâmetro α é conhecido, (4.9) pode ser obtido, permitindo estimar a velocidade de propagação da onda, v_α , para uma determinada posição de falta a partir de seu Δt correspondente. Note que, se v_α e Δt são conhecidos, o local da falta pode ser calculado a partir da Equação (3.1).

$$v_\alpha = c_1 \left(\frac{\alpha}{\Delta t} \right)^{c_2} + c_3 \quad (4.9)$$

Na próxima seção, propõe-se uma abordagem para estimar o parâmetro α a partir de casos reais e/ou simulados de faltas. De fato, uma média de α será obtida e usada para definir uma curva de velocidade de onda adequada, em vez de uma propagação de velocidade de onda constante, tornando a localização da falta muito mais robusta e precisa.

4.2.3 Obtendo α

Considerando a metodologia de um terminal, dada uma falta real e/ou simulada, esta é completamente caracterizada se o local de falta d e $\Delta t = t_3 - t_1$ são conhecidos.

E a velocidade de propagação da onda v_α pode ser obtida por (4.10), como segue.

$$v_\alpha = \frac{2d}{t_3 - t_1} \quad (4.10)$$

Substituindo (4.8) em (4.10), a correspondente frequência f_α é calculada de acordo com (4.11).

$$f_\alpha = \left(\frac{v_\alpha - c_3}{c_1} \right)^{\frac{1}{c_2}} = \left[\left(\frac{2d}{t_3 - t_1} - c_3 \right) \frac{1}{c_1} \right]^{\frac{1}{c_2}} \quad (4.11)$$

Finalmente, de (4.11) e (4.7), o valor do parâmetro α associado para uma dada falta é obtido de (4.12).

$$\alpha = (t_3 - t_1) \left[\left(\frac{2d}{t_3 - t_1} - c_3 \right) \frac{1}{c_1} \right]^{\frac{1}{c_2}} \quad (4.12)$$

O parâmetro α contém informação sobre a topologia e configuração da linha, através dos coeficientes c_1 , c_2 e c_3 , assim como da posição da falta através dos instantes de tempo t_1 e t_3 .

Portanto, para a definição de α e consequente definição da curva de propagação das ondas, apenas uma posição de falta é necessária. Entretanto, a fim de melhorar a robustez e precisão da metodologia proposta, recomenda-se a adoção de um valor médio α_m , obtido para um conjunto de casos de localização de faltas bem caracterizados.

A Figura 4.5 mostra um conjunto de valores obtidos para α para diferentes locais de falta. A linha contínua representa o valor de α_m . Neste exemplo, os valores para α variaram de 122 a 215. Na prática, faltas próximas ao terminal monitorado resultam em valores maiores de α , portanto, para evitar a polarização de α_m , é recomendável selecionar um conjunto de casos de faltas distribuídos ao longo da linha. No entanto, como será mostrado, mesmo adotando-se os valores extremos de α , a abordagem de localização de faltas de um terminal proposta, apresentará melhores resultados usando a curva de velocidade, (4.8), que velocidade da onda constante.

4.3 Impacto da seleção de α_m

De acordo com o conjunto de dados (número de faltas, posição e resistência da falta) disponíveis para o cálculo de α_m , valores diferentes de α_m são obtidos. A fim de avaliar os efeitos do valor de α_m na precisão da localização de faltas, vários conjuntos de dados (chamados α_{set}) foram formados de acordo com o número de faltas disponíveis para o cálculo de α_m . Assim, por exemplo, para um valor de $\alpha_{set} = 5$, significa que um conjunto de dados obtidos de 5 casos de falta foi usado para calcular α_m .

Definindo o tamanho do conjunto α_{set} , onde os casos de falta que comporão o

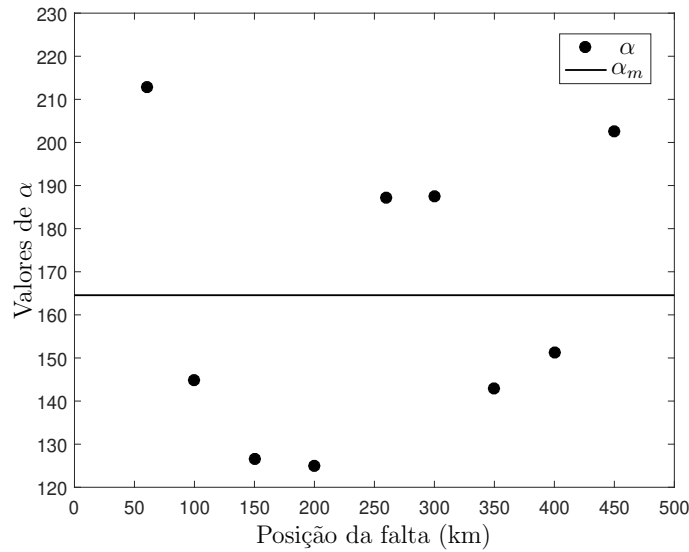


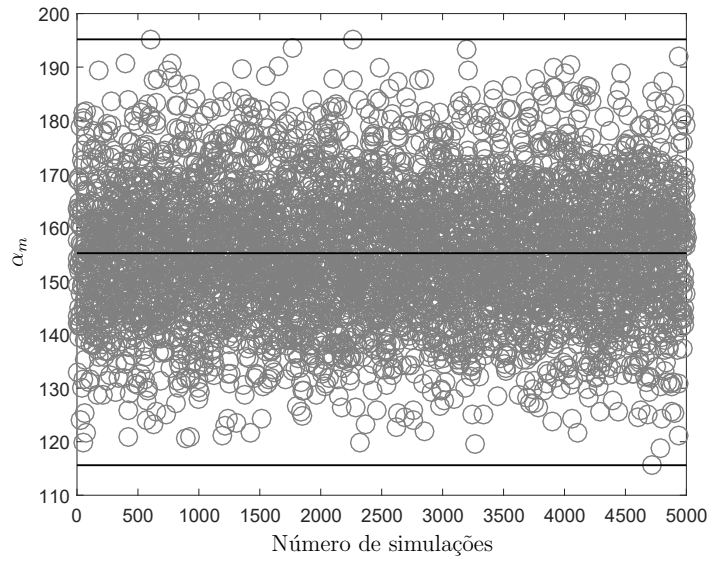
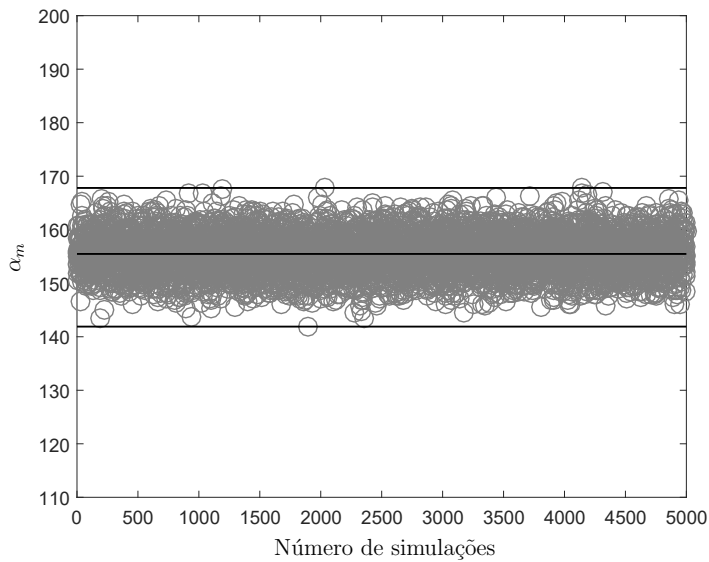
Figura 4.5: Valores obtidos para α considerando diferentes casos de falta.

conjunto são escolhidos aleatoriamente e o valor de α_m é calculado. Este procedimento foi realizado 2.000 vezes para α_{set} com 5, 10, 15 e 30 casos de falta. A Tabela 4.1 mostra os valores máximo, mínimo e médio de α_m calculado de acordo com o α_{set} especificado, denominado, respectivamente, α_m^{max} , α_m^{min} e α_m^{med} . A Figura 4.6 mostra todos os valores de α_m calculados para $\alpha_{set} = 5$ e $\alpha_{set} = 30$, onde as linhas contínuas representam o valor máximo, mínimo e médio dos α_m calculados.

Tabela 4.1: Valor máximo, mínimo e médio de α_m de acordo com α_{set} especificado.

α_{set}	α_m^{max}	α_m^{min}	α_m^{med}
5	196,7368	116,3887	155,3848
10	183,1047	127,8446	155,4284
15	174,8228	134,0921	155,3577
30	167,1167	143,6400	155,3641

Note que se o número de casos de falta usados para obter os valores de α_m aumenta, a faixa de valores de α_m torna-se mais estreita. Por exemplo, enquanto para $\alpha_{set} = 5$ os valores de α_m variaram entre 116,3887 e 196,7368, para $\alpha_{set} = 30$ esses valores variaram de 143,6400 a 167,1167. Embora a média de α_m não seja garantidamente a melhor escolha para α_m , testes comprovam que a adoção de valores de α_m mais próximos da média de α_m , tendem a melhor precisão da localização de faltas. Portanto, usando uma quantidade maior de casos de falta no cálculo de α_m , tende a melhorar as estimativas das velocidades e, portanto, melhorar a precisão da localização de faltas.

(a) Valores de α_m calculados com 5 casos de faltas disponíveis.(b) Valores de α_m calculados com 30 casos de faltas disponíveis.Figura 4.6: Valores de α_m calculados de acordo com o número de casos de faltas disponíveis.

4.4 Avaliação da Metodologia de Localização de Faltas

Neste trabalho, um sistema HVDC bipolar de 500 kV foi utilizado para simulação em PSCAD de acordo com os parâmetros mostrados na Figura 3.6. A linha tem 500 km e o modelo dependente da frequência foi usado para modelar os parâmetros da linha de transmissão. Para avaliar o método proposto, faltas fase-terra foram aplicadas ao longo da linha com diferentes resistências de faltas. O sinal de tensão do terminal k foi amostrado com uma taxa de 1,2 MHz. Para cada simulação, o erro de localização da falta

foi obtido de acordo com (4.13), onde $\epsilon\%$ é o erro relativo percentual, d_{real} é a posição de falta real, d_{est} a posição de falta estimada e L o tamanho total da linha.

$$\epsilon\% = \frac{\|d_{real} - d_{est}\|}{L} \cdot 100 \quad (4.13)$$

A metodologia proposta foi inicialmente avaliada de acordo com os valores de α_m^{max} , α_m^{min} e α_m^{med} mostrados na Tabela 4.1 para $\alpha_{set} = 5$. Estes valores foram escolhidos, pois representam a maior variação dos valores de α_m . Faltas foram aplicadas ao longo da linha com resistência de falta igual a 0Ω . Os resultados são mostrados na Figura 4.7.

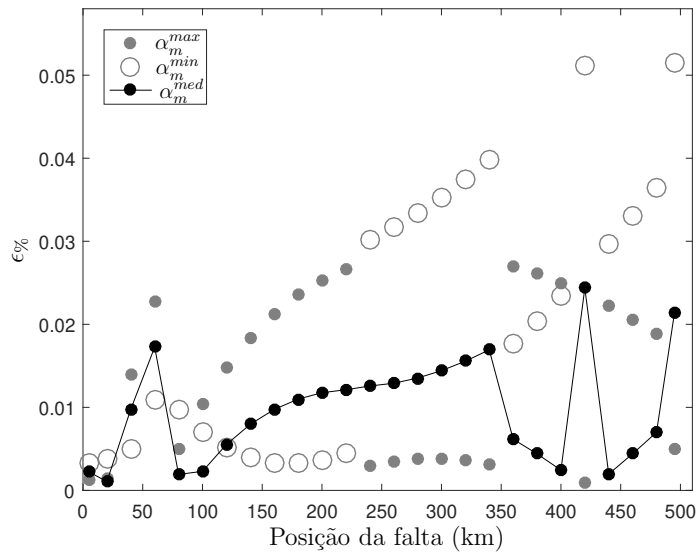


Figura 4.7: Erro percentual da localização de faltas usando o método proposto com α_m^{max} , α_m^{min} e α_m^{med} obtidos de $\alpha_{set} = 5$.

A metodologia proposta apresentou resultados altamente precisos, o erro máximo obtido foi igual a 0,0515% quando α_m^{min} foi usado para ajustar a curva da velocidade de propagação das frentes de onda. Em geral, usando α_m^{med} , a metodologia apresentou o melhor desempenho, encontrando um erro máximo de 0,0244% (122 m), além de um erro médio de localização de 0,0096% (48,2 m). Note entretanto, que mesmo usando valores de α_m^{max} e α_m^{min} , apesar da redução na precisão, o desempenho da metodologia não é comprometida, apresentando, respectivamente, um erro médio de 0,0135% (67,5 m) e 0,0206% (103,0 m), mostrando assim a robustez da metodologia.

Como o valor de α_m varia de acordo com o conjunto de faltas selecionadas para formar os conjuntos α_{set} , testes foram realizados para 5.000 diferentes valores de α_m . Novamente, cada valor de α_m foi obtido escolhendo aleatoriamente as faltas que compõem α_{set} . Para evitar o enviesamento de α_m , apenas faltas com distância acima de 50 km foram consideradas. Faltas fase-terra foram simuladas para 50 diferentes posições de falta com resistências iguais a 0Ω , 20Ω , 50Ω e 100Ω , totalizando 200 diferentes condições de falta, que foram usadas para avaliar o desempenho da metodologia de localização de

faltas proposta. Para cada α_m obtido, o erro percentual médio dos 200 casos de falta foi calculado, e denominado ϵ_m .

A Tabela 4.2 mostra os resultados obtidos para a média dos erros médios (ϵ_m^{med}), o qual representa a média dos 5.000 valores de ϵ_m calculados, seu desvio padrão (σ), além do erro médio mínimo (ϵ_m^{min}) e erro médio máximo (ϵ_m^{max}), os quais representam, respectivamente, o mínimo e máximo valor entre os 5.000 valores de ϵ_m . O erro máximo entre todas as condições de faltas avaliadas, denominado ϵ_{max} , também é obtido e mostrado na Tabela 4.2. Note que, ϵ_{max} representa a posição de falta com maior erro de localização.

Tabela 4.2: Erros da localização de falta para a metodologia com estimação da velocidade de propagação da onda.

α_{set}	$\epsilon_m^{med}(\%)$	$\sigma \times 10^{-4}(\%)$	$\epsilon_m^{min}(\%)$	$\epsilon_m^{max}(\%)$	$\epsilon_{max}(\%)$
5	0,0111	9,2894	0,0105	0,0195	0,0630
10	0,0108	4,3349	0,0105	0,0146	0,0535
15	0,0106	2,4964	0,0105	0,0129	0,0486
30	0,0105	0,7405	0,0105	0,0112	0,0414

Analisando a Tabela 4.2, a metodologia proposta mostra-se precisa e robusta. O pior erro médio obtido foi igual a 0,0195% (97,5 m) para um α_m estimado através de $\alpha_{set} = 5$. Para $\alpha_{set} = 5$, também foi obtido a pior estimativa de localização da falta, com erro de 0,0630% (315,0 m). A medida que α_{set} aumenta, isto é, uma maior quantidade de posições de faltas são usadas para calcular α_m , a metodologia se torna mais precisa, reduzindo o valores de ϵ_m^{med} , ϵ_m^{max} e ϵ_{max} . Note, por exemplo, para $\alpha_{set} = 30$, o máximo erro encontrado foi de 0,0414% (207,0 m), enquanto para $\alpha_{set} = 5$, esse valor foi de 0,0630% (315,0 m).

Para todos os α_{set} 's testados, o mínimo erro médio foi de aproximadamente 0,0105% (52,5 m). Para isto, os valores de α_m iguais a 154,8698, 154,8715 154,8727 e 154.8699, respectivamente, para α_{set} iguais a 5, 10, 15 e 30 foram usados. Estes valores de α_m são denominados α_m^{otm} . Note, através da Tabela 4.1, que os valores de α_m^{otm} são próximos aos valores de α_m^{med} .

A Tabela 4.3 mostra a distribuição dos 5.000 valores de α_m . Em negrito está destacado o intervalo onde os valores de α_m^{otm} se encontram.

Note que a medida que α_{set} aumenta, maior a porcentagem de valores de α_m calculados próximos ao valor de α_m^{otm} e, portanto, maior a probabilidade de se encontrar um α_m que otimizará a estimação da velocidade. Por exemplo, para $\alpha_{set} = 30$, aproximadamente 81,14% dos valores de α_m estão próximos de α_m^{otm} .

Por fim, para os 5.000 valores de α_m calculados, os quais foram avaliados para os 200 diferentes casos de falta, totalizando um montante de 1.000.000 simulações, a Tabela 4.4, mostra a distribuição dos erros de localização de faltas.

Tabela 4.3: Distribuição dos 5.000 valores de α_m .

α_{set}	Faixas	Distribuição de casos (%)
$\alpha_{set} = 5$	$\alpha_m \leq 140$	10,4600
	$140 < \alpha_m \leq 150$	23,7800
	$150 < \alpha_m \leq 160$	31,3400
	$160 < \alpha_m \leq 170$	23,0000
	$\alpha_m > 170$	11,4200
$\alpha_{set} = 10$	$\alpha_m \leq 140$	3,3200
	$140 < \alpha_m \leq 150$	22,8400
	$150 < \alpha_m \leq 160$	45,6800
	$160 < \alpha_m \leq 170$	24,3800
	$\alpha_m > 170$	3,7800
$\alpha_{set} = 15$	$\alpha_m \leq 140$	0,6400
	$140 < \alpha_m \leq 150$	19,7800
	$150 < \alpha_m \leq 160$	55,7800
	$160 < \alpha_m \leq 170$	22,6600
	$\alpha_m > 170$	1,1400
$\alpha_{set} = 30$	$\alpha_m \leq 140$	0,0000
	$140 < \alpha_m \leq 150$	7,6800
	$150 < \alpha_m \leq 160$	81,1400
	$160 < \alpha_m \leq 170$	11,1800
	$\alpha_m > 170$	0,0000

Note que independente do α_{set} adotado, para a maioria dos casos de falta simulados o erro de estimação da posição da falta é inferior a 0,01%. Note ainda que o aumento de α_{set} tende a tornar a metodologia mais precisa. Por exemplo, para $\alpha_{set} = 30$, 96,3924% dos casos avaliados apresentaram erros inferiores a 0.03%, isso corresponde a um erro inferior a 150 m.

4.4.1 Comparação entre a metodologia de localização de faltas proposta e metodologias da literatura

Nesta seção, o método proposto de localização de faltas com estimação da velocidade será comparado com metodologias similares disponíveis na literatura. Tipicamente essas metodologias utilizam velocidade constante independente do local de falta. Na primeira seção, a comparação será feita com metodologias que usam dados de um terminal e adotam as velocidade de propagação da onda constantes propostas na literatura. Na segunda análise, será adotada uma velocidade média constante obtida via simulação de alguns locais de falta.

Tabela 4.4: Distribuição dos erros de localização de faltas para a metodologia proposta.

α_{set}	Faixa de erro (%)	Distribuição dos casos (%)
$\alpha_{set} = 5$	$\epsilon \leq 0,01$	53,9239
	$0,01 < \epsilon \leq 0,02$	32,9397
	$0,02 < \epsilon \leq 0,03$	7,8549
	$0,03 < \epsilon \leq 0,04$	3,0020
	$0,04 < \epsilon \leq 0,05$	2,2440
	$\epsilon > 0,05$	0,0355
$\alpha_{set} = 10$	$\epsilon \leq 0,01$	54,7557
	$0,01 < \epsilon \leq 0,02$	33,4461
	$0,02 < \epsilon \leq 0,03$	7,3072
	$0,03 < \epsilon \leq 0,04$	2,4391
	$0,04 < \epsilon \leq 0,05$	2,0510
	$\epsilon > 0,05$	0,0009
$\alpha_{set} = 15$	$\epsilon \leq 0,01$	54,7871
	$0,01 < \epsilon \leq 0,02$	33,5915
	$0,02 < \epsilon \leq 0,03$	7,5031
	$0,03 < \epsilon \leq 0,04$	2,1040
	$0,04 < \epsilon \leq 0,05$	2,0143
	$\epsilon > 0,05$	0,0000
$\alpha_{set} = 30$	$\epsilon \leq 0,01$	54,2571
	$0,01 < \epsilon \leq 0,02$	33,8786
	$0,02 < \epsilon \leq 0,03$	8,2567
	$0,03 < \epsilon \leq 0,04$	1,6064
	$0,04 < \epsilon \leq 0,05$	2,0012
	$\epsilon > 0,05$	0,0000

Comparação com as diferentes velocidades propostas na literatura

Na literatura, diferentes valores de velocidade de propagação das frente de onda são propostas, como por exemplo $v = 2,9550 \times 10^5 \text{ km/s}$ em [85], $v = 2,9600 \times 10^5 \text{ km/s}$ em [37], $v = 2,9700 \times 10^5 \text{ km/s}$ em [82], $v = 2,9968 \times 10^5 \text{ km/s}$ em [86] e $v = 3,0000 \times 10^5 \text{ km/s}$ é adotado em [39]. Utilizando-se os mesmos 200 casos de falta descritos na seção anterior, o desempenho da metodologia convencional para o método de 1 terminal foi avaliado levando em consideração as diferentes velocidades propostas na literatura. A Tabela 4.5, mostra os erros médios (ϵ_m) obtidos para cada velocidade proposta e os erros máximos (ϵ_{max}).

Entre todas as velocidade avaliadas, para a linha simulada nesta tese, $v = 2,970 \times 10^5 \text{ km/s}$ foi a que apresentou melhor desempenho, apresentando não somente o menor erro médio, 0,0543% (271,5 m), mas também o menor erro máximo, 0,1440% (720 m). Apesar de obter um desempenho aceitável, note que, para a metodologia de estimação da velocidade proposta, em seu pior desempenho, o erro médio máximo e o

Tabela 4.5: Erros referente as metodologias convencionais adotando-se diferentes v .

Referência	v ($\times 10^5$ km/s)	$\epsilon_m(\%)$	$\epsilon_{max}(\%)$
[85]	2,955	0,2058	0,3763
[37]	2,960	0,1216	0,2111
[82]	2,970	0,0543	0,1440
[86]	2,997	0,5479	1,1248
[39]	3,000	0,5533	1,1353

erro máximo foram, respectivamente, iguais a 0,0195% (97,5 m) e 0,0630% (315,0 m), como mostrado na Tabela 4.2. Assim, os piores erros médio e máximo encontrados pela metodologia proposta, ainda são menores que os obtidos com uma boa escolha da velocidade constante. Note que esta velocidade levou a bons resultados médios para a linha HVDC estudada, porém a troca de parâmetros da linha pode tornar esta velocidade fixa totalmente inadequada.

A Tabela 4.6 apresenta a distribuição de erros de localização obtidos com a adoção da velocidade constante.

Note que a adoção de qualquer uma das velocidades constantes recomendadas pela literatura resultaram em pelo menos 44% dos casos de faltas avaliados com erros de estimação superiores a 0,05% (250 m), enquanto que na metodologia proposta, no pior cenário apenas 0,0355% dos casos apresentaram erros de estimação superiores a 0,05% (250 m).

Comparação com o uso da velocidade média

A velocidade de propagação das ondas pode também ser especificada simulando alguns locais de falta ao longo da linha e calculando a média entre as velocidades obtidas, como proposto em [86]. Este tipo de estimação da velocidade, também foi realizado, levando em consideração 5, 10, 15 e 30 casos de falta para o cálculo da velocidade média, por facilidade de notação, também denominado α_{set} . Novamente, de acordo com a quantidade de casos que comporão o conjunto α_{set} , 5.000 simulações foram realizadas, e os valores de ϵ_m^{med} , ϵ_m^{min} e ϵ_m^{max} , foram calculados para as velocidades médias. Os resultados são mostrados na Tabela 4.7.

O método de estimação de velocidade baseado nas velocidades médias apresentou resultados bastante satisfatórios, entretanto seu desempenho ainda é inferior ao da metodologia proposta. Note, por exemplo, que para as simulações realizadas, o pior desempenho obtido para a metodologia proposta obteve um erro médio de 0,0195% (97,5 m), e este erro é inferior ao melhor desempenho médio obtido com a velocidade média, que foi de 0,0201% (100,5 m). Apesar de apresentar um erro médio aceitável, o uso da velocidade média constante, assim como o uso de qualquer velocidade constante, tende

Tabela 4.6: Distribuição dos erros de localização de faltas para a metodologia convencional com valores de velocidade propostos na literatura.

Referência	$v(\times 10^5 \text{km/s})$	Faixa de erro (%)	Distribuição dos casos (%)
[85]	2,955	$\epsilon \leq 0,01$	0,0000
		$0,01 < \epsilon \leq 0,02$	4,0000
		$0,02 < \epsilon \leq 0,03$	0,0000
		$0,03 < \epsilon \leq 0,04$	2,0000
		$0,04 < \epsilon \leq 0,05$	4,0000
		$\epsilon > 0,05$	90,0000
[37]	2,960	$\epsilon \leq 0,01$	0,0000
		$0,01 < \epsilon \leq 0,02$	2,0000
		$0,02 < \epsilon \leq 0,03$	2,0000
		$0,03 < \epsilon \leq 0,04$	6,0000
		$0,04 < \epsilon \leq 0,05$	1,0000
		$\epsilon > 0,05$	89,0000
[82]	2,970	$\epsilon \leq 0,01$	15,0000
		$0,01 < \epsilon \leq 0,02$	15,0000
		$0,02 < \epsilon \leq 0,03$	17,0000
		$0,03 < \epsilon \leq 0,04$	5,0000
		$0,04 < \epsilon \leq 0,05$	4,0000
		$\epsilon > 0,05$	44,0000
[86]	2,997	$\epsilon \leq 0,01$	2,0000
		$0,01 < \epsilon \leq 0,02$	0,0000
		$0,02 < \epsilon \leq 0,03$	2,0000
		$0,03 < \epsilon \leq 0,04$	0,0000
		$0,04 < \epsilon \leq 0,05$	4,0000
		$\epsilon > 0,05$	92,0000
[39]	3,000	$\epsilon \leq 0,01$	2,0000
		$0,01 < \epsilon \leq 0,02$	0,0000
		$0,02 < \epsilon \leq 0,03$	2,0000
		$0,03 < \epsilon \leq 0,04$	0,0000
		$0,04 < \epsilon \leq 0,05$	4,0000
		$\epsilon > 0,05$	92,0000

a apresentar erros maiores para faltas mais próximas do terminal monitorado, o que não ocorre com a metodologia proposta.

A Tabela 4.8 mostra a distribuição dos erros de todos os casos simulados para a adoção das velocidades médias. Note que a porcentagem de casos com erros superior a 0,05% (250 m) variou entre 16,9974% a 17,4142%. Analisando a metodologia proposta, para essa faixa de erros a maior porcentagem de casos obtidos foi de 0,0355%, como mostrado na Tabela 4.4, quando adotado $\alpha_{set} = 5$. Se levarmos em consideração $\alpha_{set} = 15$ e $\alpha_{set} = 30$, nenhum erro acima de 0,05% (250 m) foi obtido.

Tabela 4.7: Erros referente a metodologia de localização de faltas com estimação da velocidade baseada na velocidade média.

α_{set}	$\epsilon_m^{med}(\%)$	$\sigma(\%)$	$\epsilon_m^{min}(\%)$	$\epsilon_m^{max}(\%)$	$\epsilon_{max}(\%)$
5	0,0301	0,0101	0,0201	0,0859	0,2187
10	0,0291	0,0064	0,0201	0,0596	0,1627
15	0,0285	0,0048	0,0201	0,0489	0,1381
30	0,0281	0,0024	0,0217	0,0363	0,1042

Tabela 4.8: Distribuição dos erros de localização de faltas para a metodologia baseada na velocidade média.

α_{set}	Faixa de erro (%)	Distribuição casos (%)
$\alpha_{set} = 5$	$\epsilon \leq 0,01$	18,5741
	$0,01 < \epsilon \leq 0,02$	25,5505
	$0,02 < \epsilon \leq 0,03$	19,7740
	$0,03 < \epsilon \leq 0,04$	12,8681
	$0,04 < \epsilon \leq 0,05$	5,9294
	$\epsilon > 0,05$	17,3039
$\alpha_{set} = 10$	$\epsilon \leq 0,01$	19,5146
	$0,01 < \epsilon \leq 0,02$	25,1905
	$0,02 < \epsilon \leq 0,03$	18,4488
	$0,03 < \epsilon \leq 0,04$	12,6657
	$0,04 < \epsilon \leq 0,05$	6,7912
	$\epsilon > 0,05$	17,3892
$\alpha_{set} = 15$	$\epsilon \leq 0,01$	20,3741
	$0,01 < \epsilon \leq 0,02$	24,5475
	$0,02 < \epsilon \leq 0,03$	17,5443
	$0,03 < \epsilon \leq 0,04$	12,7141
	$0,04 < \epsilon \leq 0,05$	7,4058
	$\epsilon > 0,05$	17,4142
$\alpha_{set} = 30$	$\epsilon \leq 0,01$	22,0449
	$0,01 < \epsilon \leq 0,02$	23,0661
	$0,02 < \epsilon \leq 0,03$	15,9469
	$0,03 < \epsilon \leq 0,04$	13,3372
	$0,04 < \epsilon \leq 0,05$	8,6075
	$\epsilon > 0,05$	16,9974

4.4.2 Influência da resistividade na metodologia proposta

Para todos os testes apresentados até aqui, todas as faltas foram simuladas com resistividade do solo igual 1.000 $\Omega.m$. Nas simulações, geralmente a linha é modelada assumindo um único valor de resistividade, entretanto, na prática, por percorrem grandes

distâncias, essas linhas operam sob diferentes valores de resistividade do solo.

A Figura 4.8 mostra o cálculo de 1.000 valores de α_m , para linhas com resistividade 100 $\Omega.m$ e 1.000 $\Omega.m$. Todos os demais parâmetros da linha são iguais, diferenciando-se somente o valor da resistividade.

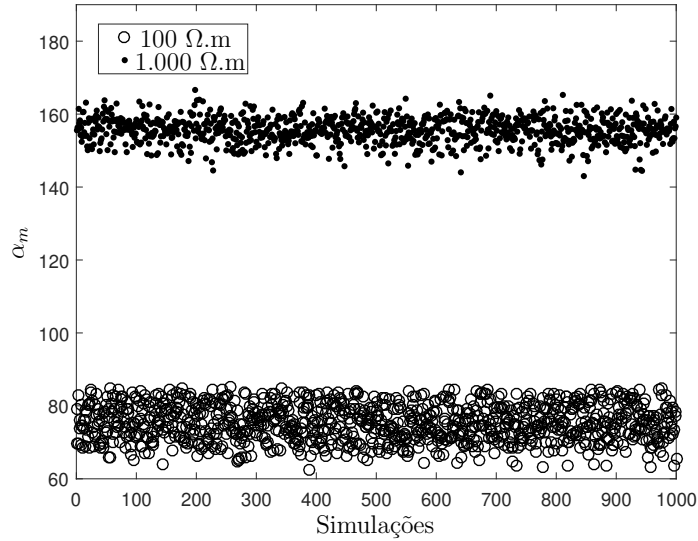


Figura 4.8: Valores de α_m calculados para a linha com resistividade do solo igual a 100 $\Omega.m$ e 1.000 $\Omega.m$ ($\alpha_{set} = 30$).

Note que, enquanto os valores de α_m calculados para a resistividade do solo igual a 1.000 $\Omega.m$ ficaram em torno de 155, para a linha com resistividade igual a 100 $\Omega.m$, esse valor variou em torno de 75. Para avaliar os efeitos da resistividade do solo na localização de faltas, 5.000 valores de α_m foram avaliados de acordo com cada α_{set} especificado. A curva de velocidade, Equação (4.8), foi obtida a partir de faltas simuladas com resistividade do solo igual a 1.000 $\Omega.m$. Entretanto, as faltas usadas para avaliar a precisão da metodologia, foram simuladas para uma linha com resistividade igual 100 $\Omega.m$. A Tabela 4.9 mostra os resultados obtidos.

Tabela 4.9: Erros da metodologia proposta com especificação incorreta da resistividade do solo.

α_{set}	$\epsilon_m^{med}(\%)$	$\sigma(\%)$	$\epsilon_m^{min}(\%)$	$\epsilon_m^{max}(\%)$	$\epsilon_{max}(\%)$
5	0,1180	0,0049	0,1025	0,1357	0,2494
10	0,1179	0,0033	0,1054	0,1294	0,2397
15	0,1179	0,0026	0,1076	0,1269	0,2358
30	0,1179	0,0015	0,1131	0,1228	0,2294

Note que, para faltas onde a resistividade da linha foi de 100 $\Omega.m$, a metodologia proposta apresentou uma queda de desempenho. Entretanto, a precisão da

metodologia é ainda aceitável, já que a média dos erros variou em torno de 0,1179% (589,5 m) e o erro máximo obtido foi de 0,2494%, o qual representa um erro de 1,24 km.

A Tabela 4.10 mostra a distribuição dos erros nas faixas pré-estabelecidas.

Tabela 4.10: Distribuição dos erros de localização da metodologia proposta com especificação incorreta da resistividade do solo.

α_{set}	Faixa de erro (%)	Percentual de casos (%)
$\alpha_{set} = 5$	$\epsilon \leq 0,01$	7,4372
	$0,01 < \epsilon \leq 0,02$	0,0628
	$0,02 < \epsilon \leq 0,03$	0,5000
	$0,03 < \epsilon \leq 0,04$	3,1508
	$0,04 < \epsilon \leq 0,05$	0,8586
	$\epsilon > 0,05$	87,9906
$\alpha_{set} = 10$	$\epsilon \leq 0,01$	7,4956
	$0,01 < \epsilon \leq 0,02$	0,0044
	$0,02 < \epsilon \leq 0,03$	0,5000
	$0,03 < \epsilon \leq 0,04$	3,2384
	$0,04 < \epsilon \leq 0,05$	0,7623
	$\epsilon > 0,05$	87,9993
$\alpha_{set} = 15$	$\epsilon \leq 0,01$	7,5000
	$0,01 < \epsilon \leq 0,02$	0,0000
	$0,02 < \epsilon \leq 0,03$	0,5000
	$0,03 < \epsilon \leq 0,04$	3,3056
	$0,04 < \epsilon \leq 0,05$	0,6945
	$\epsilon > 0,05$	87,9999
$\alpha_{set} = 30$	$\epsilon \leq 0,01$	7,5000
	$0,01 < \epsilon \leq 0,02$	0,0000
	$0,02 < \epsilon \leq 0,03$	0,5000
	$0,03 < \epsilon \leq 0,04$	3,4924
	$0,04 < \epsilon \leq 0,05$	0,5076
	$\epsilon > 0,05$	88,0000

Ao contrário da Tabela 4.4, onde a maior parte dos erros foram inferiores a 0,01% (50 m), com a mudança da resistividade a grande maioria dos erros foram superiores a 0,05% (250 m). Para uma melhor compreensão dos erros, os dados da Tabela 4.4 foram reajustados a uma nova faixa de erros, como mostra a Tabela 4.11.

Note que para a maioria das faltas simuladas, os erros obtidos se encontram entre 0,1% (500 m) a 0,2% (1 km). Além disso, independente do α_{set} adotado, nenhum erro foi superior a 0,3% (1,5 km).

Na prática, para obter o valor de α_m , valores reais de faltas podem ser utilizados. Assim, usando os parâmetros c_1 , c_2 e c_3 obtidos da curva representa por (4.8) para a linha com resistividade do solo igual a 1.000 $\Omega.m$, conforme mostrado na Figura 4.4, entretanto, usando para o cálculo de α_m , faltas aplicadas a uma linha com resistividade

Tabela 4.11: Percentual de casos obtidos dentro de uma nova faixa de erros para a metodologia proposta aplicadas a faltas com resistividade do solo igual a 100 Ω .m.

α_{set}	Faixa de erro (%)	Percentual de casos (%)
$\alpha_{set} = 5$	$\epsilon \leq 0,1$	36,8754
	$0,1 < \epsilon \leq 0,2$	59,2191
	$0,2 < \epsilon \leq 0,3$	3,9055
	$\epsilon > 0,3$	0,0000
$\alpha_{set} = 10$	$\epsilon \leq 0,1$	36,8927
	$0,1 < \epsilon \leq 0,2$	59,3252
	$0,2 < \epsilon \leq 0,3$	3,7821
	$\epsilon > 0,3$	0,0000
$\alpha_{set} = 15$	$\epsilon \leq 0,1$	36,9202
	$0,1 < \epsilon \leq 0,2$	59,2940
	$0,2 < \epsilon \leq 0,3$	3,7858
	$\epsilon > 0,3$	0,0000
$\alpha_{set} =$	$\epsilon \leq 0,1$	36,9806
	$0,1 < \epsilon \leq 0,2$	59,2861
	$0,2 < \epsilon \leq 0,3$	3,7333
	$\epsilon > 0,3$	0,0000

do solo igual a 100 Ω .m, novamente 5.000 valores de α_m foram calculados. Os valores de α_m^{max} , α_m^{min} e α_m^{med} são mostrados na Tabela 4.12 de acordo com cada α_{set} especificado.

Tabela 4.12: Valores máximos, mínimos e médio de α_m calculados usando os parâmetros c_1 , c_2 e c_3 da curva de velocidade dado por (4.8), para uma linha modelada com resistividade do solo igual a 1.000 Ω .m e faltas ocorridas em uma linha com resistividade do solo igual a 100 Ω .m.

α_{set}	α_m^{max}	α_m^{min}	α_m^{med}
5	1033,62	585,42	762,19
10	928,76	637,96	761,75
15	884,07	671,37	761,68
30	815,47	701,65	762,14

Note que os valores de α_m calculados são bem distintos dos valores mostrados na Tabela 4.1, já que agora as faltas utilizadas para calcular α_m foram obtidas de uma linha com resistividade igual a 100 Ω .m. Novamente, para cada valor de α_m , 200 condições de falta foram testadas, no entanto, para faltas aplicadas a uma linha com resistividade do solo igual a 100 Ω .m. Os resultados são mostrados na Tabela 4.13.

Note que os resultados obtidos foram bem próximos dos resultados encontrados na Tabela 4.2. Portanto, para a metodologia proposta, mesmo se os parâmetros da curva (4.8) não forem ajustados corretamente para os parâmetros reais da linha, desde que as faltas usadas para calcular α_m sejam casos reais de falta e, portanto, representem a

Tabela 4.13: Erros de localização de faltas para α_m para faltas aplicadas a uma linha com resistividade de 100 $\Omega.m$ com α_m ajustado através da curva de velocidade obtida para a linha com resistividade igual a 1.000 $\Omega.m$ e faltas aplicadas a uma linha com resistividade de 100 $\Omega.m$.

α_{set}	$\epsilon_m^{med}(\%)$	σ	$\epsilon_m^{min}(\%)$	$\epsilon_m^{max}(\%)$	$\epsilon_{max}(\%)$
5	0.0140	0.0043	0.0109	0.0369	0.1708
10	0.0131	0.0026	0.0109	0.0269	0.1520
15	0.0128	0.0019	0.0109	0.0225	0.1435
30	0.0125	0.0010	0.0109	0.0161	0.1298

resistividade da linha corretamente, a metodologia proposta apresentará alta precisão na localização de faltas. Portanto, na prática, se dados reais forem usados para calcular α_m , a metodologia de localização de faltas apresentará bom desempenho mesmo nos casos onde os parâmetros c_1 , c_2 e c_3 da função de velocidade sejam obtidos para uma resistividade do solo especificada incorretamente. Isso ocorre pois as curvas de velocidade obtida para diferentes resistividade do solo são aproximadamente paralelas e o ajuste correto de α_m aproxima essas curvas de velocidade.

4.5 Conclusão

A velocidade de propagação das frentes de onda, varia sob diversos fatores, entre eles podemos destacar a resistividade do solo e a posição de falta. Na literatura, essas variações são geralmente negligenciadas, adotando-se velocidades de propagação constantes para todas as frentes de onda. Neste trabalho, como uma de suas contribuições, um processo de estimação da velocidade de propagação das frentes de onda é proposto. Testes mostram a robustez e precisão da metodologia proposta, a qual foi comparada com metodologias tradicionais de localização de falta adotando-se velocidades de propagação das frentes de onda encontradas em diversos trabalhos e também a metodologia de estimação da velocidade baseada na velocidade média v_m . De modo geral, a metodologia proposta apresenta menores erros de localização de faltas e ainda apresenta erros mais uniformes para faltas em todos os locais da linha.

Apesar da resistividade influenciar nos parâmetros da curva de velocidade e também na definição de α_m , mesmo para faltas localizadas em regiões onde a resistividade é significativamente diferente da resistividade usada para a definição de α_m e dos parâmetros da curva de velocidade, a metodologia ainda assim apresenta resultados aceitáveis. Testes ainda mostraram que para situações onde os parâmetros da curva de velocidade são ajustados para resistividades do solo erradas, se as faltas utilizadas para calcular α_m representarem corretamente o comportamento da linha, resultados altamente precisos serão encontrados.

Como todo o processo de definição da curva de velocidade e do parâmetros α_m são realizados *offline* e as frente de onda foram identificadas com o uso da morfologia matemática, o custo da metodologia proposta é extremamente módico, o que permite a sua implementação mesmo em dispositivos de proteção.

Capítulo 5

Uso de Filtros Morfológicos na Filtragem de Ruídos

5.1 Introdução

Os métodos para localização de faltas baseados em ondas viajantes requerem elevadas taxas de amostragem dos sinais. Nesses métodos é necessário identificar uma, duas ou três frentes de onda, dependendo da abordagem adotada. Como as frentes de onda podem percorrer grandes distâncias, a atenuação das amplitudes dos sinais pode causar confusão entre as frentes de onda e os ruídos inerentes à operação da linha e dos sistemas de monitoramento. Os métodos de evidenciamento das frentes de onda nos terminais monitorados baseado em morfologia matemática apresentam bom desempenho frente às diversas condições de falta, entretanto, a precisão e robustez desses métodos decaem a medida que os níveis de ruído aumentam. Assim, a fim de melhorar a precisão e robustez dos métodos de localização de faltas baseado em ondas viajantes, os Filtros de Redução de Ruídos (FRR's) devem ser integrados ao sistema de localização de faltas [87].

Apesar das recentes aplicações da morfologia matemática em sistemas de energia, atualmente poucos estudos ainda são direcionados a redução de ruídos usando filtros morfológicos [68]. In [48], conceitos básicos de MM são apresentados e filtros morfológicos são avaliados para o processo de filtragem através de exemplos simples. Em [46] e [47] os filtros morfológicos são aplicados para a redução do nível de ruído em distúrbios relacionados a qualidade de energia. Já em [88], a MM é utilizada na redução de ruídos para o monitoramento de variação de tensão. Em [89], a MM é aplicada na redução de ruídos na proteção de linhas AC. Em [35] e [66], os FRR's são aplicados ao problema de localização de faltas em linhas HVCA. Note que, estes trabalhos não tratam da localização de faltas em linhas HVDC. Neste contexto, como uma das contribuições deste trabalho, este capítulo avalia o desempenho de diferentes filtros morfológicos no processo de redução de ruídos para localização de faltas em linhas HVDC. A combinação entre

o tipo de filtro e tamanho do EE utilizado para a redução de ruído em conjunto com o método de evidenciamento das frentes de onda, são determinantes para a precisão dos métodos de localização de faltas. O processo de redução de ruído será avaliado através de faltas aplicadas em diferentes posições e diferentes valores de resistências, com o sinal monitorado contaminado por diferentes níveis de ruído.

5.2 Filtros de Redução de Ruídos

A fim de reduzir os níveis de ruído de um sinal, os FRR's tendem a contornar a borda superior e inferior do sinal e calcular a média entre os contornos. Para manter as características originais do sinal, EE's planares são geralmente usados. De acordo com o processo de filtragem, os filtros podem ter diferentes níveis, em cada nível o tamanho do EE é calculado de acordo com (5.1), onde λ é o fator de dilatação, b é o nível do filtro a ser calculado, l o tamanho do EE para o nível b e l_1 o tamanho do EE para o nível 1.

$$l = \lambda^{1-b} l_1 \quad (5.1)$$

A Figura 5.1 representa o processo de filtragem de redução de ruído, onde g representa o EE e f o sinal a ser filtrado. Para $b = 1$, g^0 representa o EE inicial de tamanho l_1 e f_0 é o sinal a ser filtrado. No nível 1, o sinal inicial é então filtrado pelo FRR com o EE de tamanho igual a l_1 . Para o próximo nível de filtragem, b é atualizado e o tamanho do novo EE é calculado. O sinal resultante da filtragem do nível 1, torna-se então a entrada do filtro nível 2. Este processo é repetido de acordo com o nível de filtragem desejado.

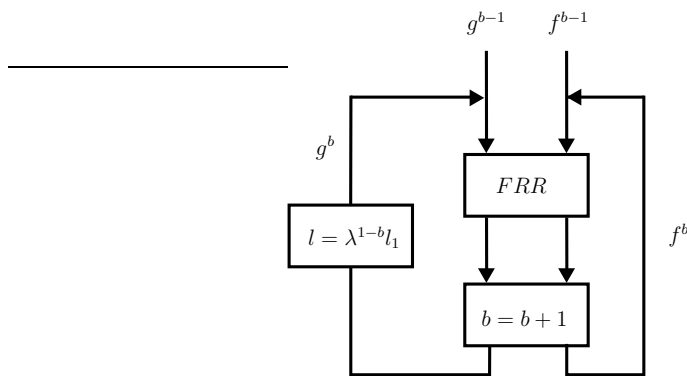


Figura 5.1: Processo de filtragem de redução de ruídos.

Os principais filtros morfológicos utilizados no processo de redução de ruídos são o Filtro Morfológico Média [35], [47], [48], Filtro Morfológico Multi-resolução Abertura/Fechamento [48], [90], Filtro Abertura-Fechamento/Fechamento-Abertura [46] e Abertura-Fechamento Máximo/Fechamento-Abertura Mínimo [46]. Estes filtros serão definidos a seguir.

5.2.1 Filtro Morfológico Média

O Filtro Morfológico Média (FMM), denominado μ , é a média entre o sinal dilatado e o sinal erodido, como descrito na Equação (5.2). Quando $b = 1$, $\mu^0 = f$.

$$\mu^b = \frac{(\mu^{b-1} \oplus g^b)(n) + (\mu^{b-1} \ominus g^b)(n)}{2} \quad (5.2)$$

5.2.2 Filtro Morfológico Multi-resolução Abertura/Fechamento

O Filtro Morfológico Multi-resolução Abertura/Fechamento (FMMAF), denominado ϕ , é a média entre os filtros abertura e fechamento, como demonstrado em (5.3), onde $\phi \circ g$ e $\phi \bullet g$ representam respectivamente as operações de abertura e fechamento entre o sinal ϕ e o elemento estruturante g . Novamente, quando $b = 1$, $\theta^0 = f$.

$$\phi^b = \frac{(\phi^{b-1} \circ g^b)(x) + (\phi^{b-1} \bullet g^b)(x)}{2} \quad (5.3)$$

A abertura e fechamento são filtros derivados da combinação entre as operações de dilatação e erosão. A abertura, definida pela Equação (5.4), é usada para suavizar bordas ou cantos. Já o fechamento, definida conforme a Equação (5.5), tende a preencher canais estreitos e pequenos buracos [46], [90].

$$(f \circ g)(n) = ((f \ominus g) \oplus g)(n) \quad (5.4)$$

$$(f \bullet g)(n) = ((f \oplus g) \ominus g)(n) \quad (5.5)$$

5.2.3 Filtro Abertura-Fechamento/Fechamento-Abertura

O Filtro Abertura-Fechamento/Fechamento-Abertura (FAFFA), denotado por χ , busca filtrar ruídos com impulsos negativos e positivos simultaneamente. O FAFFA é resultado da combinação entre as operações Abertura/Fechamento (AF) e Fechamento/Abertura (FA), representados respectivamente por ζ e ν . No filtro AF, como o próprio nome já sugere, inicialmente realiza-se sobre o sinal o processo de abertura e este resultado é então utilizado em seguida para o processo de fechamento, conforme representado na Equação (5.6). Para o filtro FA, inicialmente o processo de fechamento é realizado e em seguida o processo de abertura, conforme demonstra a Equação (5.7).

$$\zeta^b = ((\zeta^{b-1} \circ g^b) \bullet g^b)(n) \quad (5.6)$$

$$\nu^b = ((\nu^{b-1} \bullet g^b) \circ g^b)(x) \quad (5.7)$$

O FAFFA é, portanto, a média entre os resultados obtidos entre os filtros AF e FA, como mostrado em (5.8). Para $b = 1$, $\zeta^0 = f$ e $\nu^0 = f$.

$$\chi^b = \frac{\zeta^{b-1} + \nu^{b-1}}{2} \quad (5.8)$$

5.2.4 Abertura-Fechamento Máximo/Fechamento-Abertura Mínimo

O Filtro Abertura-Fechamento Máximo/Fechamento-Abertura Mínimo ($\text{FAF}_{\max}\text{FA}_{\min}$), denotado por Λ , é formado pelos filtros AF e FA operando em paralelo [46].

Dados diferentes EE's, $\{g_1, g_2, \dots, g_b\}$, para calcular a Abertura-Fechamento Máximo ($\zeta_{\max}$), o filtro Abertura-Fechamento é calculado para cada EE e o máximo valor para cada posição de f é obtido como mostra a Equação (5.9).

$$\zeta_{\max} = \max(\zeta_{g_1}, \zeta_{g_2}, \dots, \zeta_{g_b}) \quad (5.9)$$

De forma similar o valor o Fechamento-Abertura mínimo ($\nu_{\min}$) é calculado, entretanto o filtro Fechamento-Abertura é calculado para cada EE e o mínimo valor para da posição de f é obtido, conforme a Equação (5.10).

$$\nu_{\min} = \min(\nu_{g_1}, \nu_{g_2}, \dots, \nu_{g_b}) \quad (5.10)$$

O $\text{FAF}_{\max}\text{FA}_{\min}$ é então calculado como a média entre os $\zeta_{\max}$ e $\nu_{\min}$, como descrito em (5.11). A Figura 5.2, ilustra todo o processo para o cálculo do $\text{FAF}_{\max}\text{FA}_{\min}$. Para cada nível b definido, neste trabalho o tamanho do EE é calculado de acordo com a Equação 5.1, para $\lambda = 2$.

$$\Lambda = \frac{\zeta_{\max} + \nu_{\min}}{2} \quad (5.11)$$

5.3 Análise de desempenho dos FRR na filtragem de ruídos

Para a avaliar o desempenho dos FRR, faltas fase-terra foram aplicadas ao longo da linha bipolar de 500 km da Figura 3.6 entre as posições 10 e 490 km do terminal k , com resistências de falta iguais a 0 Ω , 20 Ω , 50 Ω e 100 Ω com diferentes níveis de ruído, totalizando um montante de 192 condições de falta. Estas 192 condições de falta foram simulados 50 vezes, onde em cada simulação, um ruído branco aleatório foi adicionado ao sinal de tensão. O desempenho dos filtros foram avaliados calculando o percentual

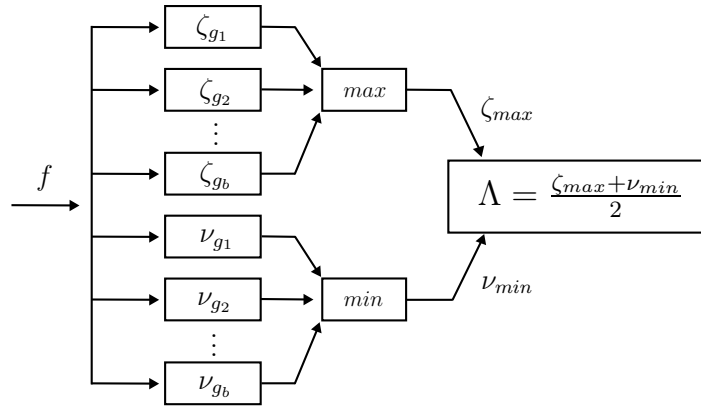


Figura 5.2: Cálculo do $FAF_{max}FA_{min}$.
Adaptada de [46]

de casos no qual o erro de localização de faltas foi superior a 2%. O limite igual a 2% é adotado, uma vez que faltas estimadas com um erro menor que 2% tendem a ter suas frentes de onda corretamente identificadas. No entanto, essas frentes de onda podem ainda conter ruídos que prejudiquem a identificação correta do real pico referente a frente de onda, prejudicando assim o desempenho da estimativa da falta. Embora esses ruídos diminuam a precisão da metodologia de localização de falta, seus erros não são maiores que 2%. O processo de localização de faltas adotado é descrito na Figura 5.3. Em todos os casos, os FRR com nível 2 foram utilizados e as posições de falta foram obtidas através do método convencional de um terminal, com $v = 0,99 \times v_{luz}$.

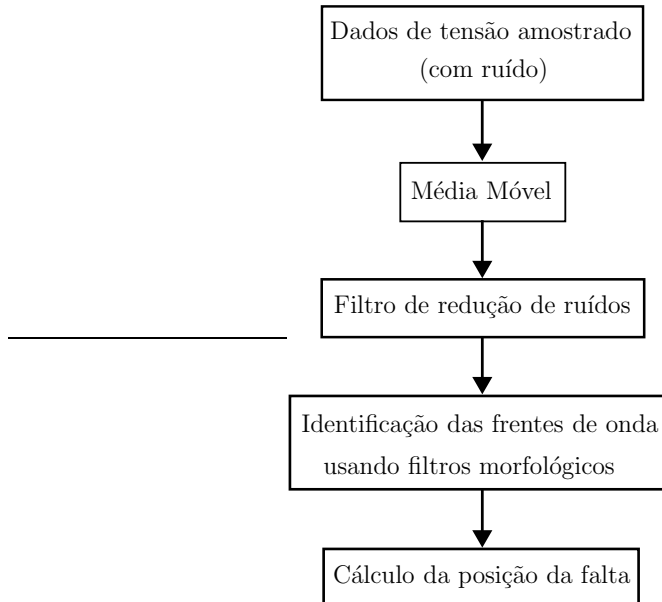


Figura 5.3: Processo de localização de faltas com filtro de redução de ruídos.

Os dados de tensão são amostrados no terminal k a uma taxa de 1,2 MHz. Antes do processo de filtragem, o sinal de tensão passa por um filtro de média móvel de 8 amostras. O objetivo é suavizar o sinal e eliminar variações bruscas entre amostras

consecutivas. Para a identificação das frentes de onda, o GMM ou GMR são usados. De posse dos tempos de chegada das frentes de onda no terminal monitorado k , a posição da falta é estimada pelo método de 1 terminal baseado em (3.1) através da metodologia tradicional com a velocidade de propagação da onda igual a $v = 0,99 \times v_{luz}$. De (3.5) o erro percentual é calculado. O processo de filtragem é então analisado através da porcentagem de casos que obtiveram erros de estimação da falta superior a 2%.

O desempenho de cada filtro foi avaliado para diferentes tamanhos de EE aplicados a sinais com relação sinal-ruído (ou do inglês SNR, *signal to noise ratio*) iguais a 40 dB, 35dB e 30 dB. As Tabelas 5.1 e 5.2 mostram a porcentagem de casos onde os erros de localização de faltas foram superiores a 2%, respectivamente para o evidenciamento das frentes de onda através do GMM e GMR, ambos com nível 2 e tamanho de EE igual a 8. Em negrito destaca-se os melhores resultados (menores erros) referentes a cada nível de ruído para os diferentes FRR's.

Note que o uso de EE de tamanhos elevados para o processo de filtragem dos ruídos resultou em um aumento nos erros de estimação da posição da falta. Isso ocorre, pois, EE de tamanho elevado podem mascarar as frentes de onda, filtrando juntamente com o ruído a frente de onda, levando à identificação equivocada dos instantes de chegada das frentes de onda de interesse. Ao contrário, se os EE são muito pequenos os ruídos não são devidamente filtrados e, portanto, eles podem ser confundidos com as frentes de onda, levando à identificação equivocada dos instantes de chegada de interesse. Assim, o tamanho dos EE deve ser definido com base no FRR adotado e na taxa de amostragem dos sinais. Obviamente, se a relação sinal ruído é muito baixa, as taxas de erro naturalmente aumentam.

Para o processo de localização de faltas apresentado neste trabalho, o FMM com tamanho do EE igual a 12 e 14, apresentaram os melhores resultados. Por exemplo, para um nível de ruído igual a 30 dB, usando-se o GMM e EE de tamanho 12 e 14, respectivamente apenas 0,85% e 0,71% dos casos testados levaram a erros de estimação da posição da falta superior a 2%. Note ainda, que para níveis de ruídos mais baixos, como 40 dB, mesmo na ausência dos FRR's, o processo de localização de faltas obteve um bom desempenho, entretanto, para o nível de ruído igual a 30 dB, aproximadamente 19,23% e 9,44% dos casos testados obtiveram erros de localização de faltas superiores a 2%, respectivamente para o GMM e GMR.

Note ainda que para os casos onde nenhum FRR foi utilizado, a metodologia de localização de faltas baseada no GMR apresentou resultados mais precisos que a metodologia baseada no GMM.

Tabela 5.1: Porcentagem de casos com erro de localização de falta superior 2% para diferentes FRR com evidenciamento das frentes de onda baseado no GMM.

SNR (dB)	Tamanho do FRR	Tipo de FRR				
		FMM	FMMAF	FAFFA	*	sem FRR
40	6	0,00	0,01	0,00	0,01	0,03
	8	0,00	0,01	0,01	0,01	
	10	0,00	0,01	0,00	0,01	
	12	0,00	0,00	0,00	0,00	
	14	0,13	0,00	0,09	0,01	
	16	0,54	0,01	0,95	0,00	
	18	1,11	0,03	1,37	0,10	
	20	2,41	0,15	2,02	0,29	
35	6	0,07	0,14	0,09	0,11	0,61
	8	0,06	0,11	0,10	0,08	
	10	0,00	0,04	0,07	0,04	
	12	0,00	0,10	0,25	0,14	
	14	0,16	0,12	0,92	0,23	
	16	0,54	0,30	3,96	0,67	
	18	1,04	0,73	5,28	1,30	
	20	2,56	1,50	7,02	3,15	
30	6	7,78	7,09	4,65	6,41	19,23
	8	4,47	5,40	3,72	4,95	
	10	1,95	4,28	3,01	4,78	
	12	0,85	3,06	4,11	4,89	
	14	0,71	3,33	7,70	7,04	
	16	0,93	3,75	14,96	9,26	
	18	1,57	6,86	18,76	13,41	
	20	3,08	10,39	22,80	17,59	

* $FAF_{max}FA_{min}$

5.4 Metodologia de localização de faltas com estimação da velocidade de propagação da onda aplicada a sinais contendo ruídos

No Capítulo 4, o processo de localização de faltas com estimação de velocidade da propagação da onda foi avaliado frente a diversas condições de falta. Nesta seção, testes serão realizados levando em consideração a presença de ruídos nos sinais monitorados. Por apresentar melhor robustez e precisão nos testes mostrados na seção anterior, o FMM com EE de tamanho 12 será usado para reduzir a influência do ruído no processo de identificação das frentes de onda. O sinal de tensão foi amostrado a uma taxa de 1,2 MHz, faltas fase-terra foram aplicadas ao longo da linha com resistências de falta iguais a 0 Ω , 20 Ω , 50 Ω e 100 Ω com diferentes níveis de ruído, para a linha bipolar de 500 km

Tabela 5.2: Porcentagem de casos com erro de localização de falta superior a 2% para diferentes FRR com evidenciamento das frentes de onda baseado no GMR.

SNR (dB)	Tamanho do FRR	Tipo de FRR				
		FMM	FMMAF	FAFFA	*	sem FRR
40	6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	8	0,00	0,00	0,00	0,00	
	10	0,00	0,00	0,00	0,00	
	12	0,00	0,00	0,00	0,00	
	14	0,03	0,00	0,07	0,00	
	16	0,23	0,01	0,92	0,01	
	18	0,57	0,03	1,46	0,03	
	20	1,69	0,17	1,89	0,22	
35	6	0,02	0,19	0,14	0,19	0,18
	8	0,01	0,06	0,07	0,09	
	10	0,00	0,10	0,06	0,11	
	12	0,01	0,12	0,26	0,13	
	14	0,09	0,18	1,12	0,27	
	16	0,21	0,36	3,77	0,38	
	18	0,63	1,02	5,14	1,33	
	20	1,82	2,15	6,88	2,79	
30	6	4,37	5,77	4,95	5,93	9,44
	8	2,51	4,62	3,75	4,87	
	10	1,23	3,44	2,97	4,33	
	12	0,85	3,40	4,31	5,02	
	14	0,34	3,77	8,35	6,80	
	16	0,76	4,75	14,91	9,56	
	18	1,13	8,83	19,05	14,05	
	20	2,91	12,86	21,51	18,07	

* $FAF_{max}FA_{min}$

da Figura 3.6, totalizando um montante de 192 condições de falta. Para cada nível de ruído, as 192 condição de falta foram simuladas 50 vezes com a adição de ruídos aleatórios, totalizando 9.600 testes. Para cada um destes testes, foi calculado o erro da estimação da posição da falta. A Tabela 5.3 mostra a porcentagem de casos que tiveram erros dentro das faixas especificadas.

Para o processo de estimação da velocidade $\alpha_m = 155,3848$ foi usado, o qual corresponde o valor de α_m^{med} calculado para $\alpha_{set} = 5$, conforme mostrado na Tabela 4.1 e o evidenciamento das frentes de onda foi realizado utilizando-se o GMM. Resultados similares foram obtidos utilizando o GMR.

Note que para um nível de ruído igual a 40 dB, 99,95% dos 9.600 casos simulados resultaram em erros de estimação da posição da falta inferiores a 0,5%, além disso, nenhum caso obteve um erro superior a 2%. Mesmo para os casos onde o nível

Tabela 5.3: Desempenho do método de localização de faltas com estimação da velocidade para na presença de ruídos nos sinais monitorados.

SNR (dB)	Faixa de erro			
	$\epsilon < 0,5\%$	$0,5\% \leq \epsilon < 1\%$	$1\% \leq \epsilon < 2\%$	$\epsilon \geq 2\%$
40	99,95	0,01	0,04	0,00
35	99,10	0,34	0,53	0,02
30	93,24	2,55	3,30	0,91

de ruído foi de 30 dB, menos de 1% das estimativas da posições de falta resultaram em erros superiores a 2%, demonstrando que o ajuste correto de tamanho de EE e filtro e tipo de FRR, em conjunto com a metodologia de localização de faltas com estimação de velocidade apresenta alta robustez e precisão mesmo operando na presença de ruídos.

5.5 Conclusão

Neste capítulo diferentes filtros morfológicos utilizados para a redução de ruídos foram avaliados como parte do processo de localização de faltas em linhas HVDC. De acordo com o tipo de FRR e tamanho de EE, os filtros podem apresentar resultados significativamente diferentes. Assim, um estudo deve ser realizado para que a melhor configuração entre tipo de FRR e tamanho de EE seja adotada de acordo com a taxa de amostragem disponível. EE de tamanhos elevados tendem a filtrar grande parte do ruído, entretanto as frentes de onda podem também ser mascaradas comprometendo sua identificação. Por outro lado, EE de tamanhos pequenos, apesar de geralmente não mascarar as frentes de onda, podem não filtrar adequadamente os ruídos, permitindo a identificação correta das frentes de onda de interesse.

Testes demonstraram que o FMM com EE de tamanho 12, apresenta um bom desempenho no processo de filtragem, mesmo para sistemas com níveis de ruído iguais a 30 dB. Este filtro, foi utilizado em conjunto com o método de localização de faltas com estimação da velocidade, onde foi possível comprovar a robustez e precisão do conjunto redução de ruídos e localização da falta com estimação da velocidade para o sistema de teste adotado.

Capítulo 6

Conclusões e Trabalhos Futuros

6.1 Conclusões Gerais

A maturação das tecnologias dos dispositivos HVDC tem implicado no aumento da adoção dessa tecnologia. O uso de linhas HVDC é economicamente mais vantajoso para a transmissão de grades montantes de energia elétrica a grandes distâncias. O comprimento de linhas HVDC tipicamente varia de algumas centenas de quilômetros a milhares de quilômetros. Nesse cenário, o desenvolvimento de metodologias precisas e robustas para a localização de faltas em linhas HVDC é um tema de grande interesse para o setor elétrico. Neste contexto, este trabalho apresentou um estudo sobre metodologias de localização de faltas baseada em ondas viajantes utilizando a Morfologia Matemática para o evidenciamento das frentes de onda, além de um novo método de localização de faltas, onde a velocidade de propagação das frentes de onda é função do local da falta.

Na Morfologia Matemática, a maioria dos trabalhos voltados a sistemas de potência definem suas operações básicas, dilatação e erosão, através de uma formulação não otimizada para implementação. Nesta tese foram investigados e identificados Elementos Estruturantes que permitem a implementação muito mais eficiente dos filtros morfológicos usados tanto na filtragem de ruídos inerentes aos sinais de tensão e corrente medidos, bem como na identificação das frentes de onda.

Para evidenciamento das frentes de onda, o GMM com EE planar foi inicialmente utilizado, entretanto devido as características do EE usado, simplificações foram realizadas de forma que o GMM pôde ser calculado através de máximos e mínimos obtidos da matriz morfológica, dando origem ao GMMR, o qual é significativamente mais eficiente computacionalmente que o GMM com EE planar.

Um novo EE também foi proposto e usado em conjunto com o GMM a fim de evidenciar as frentes de onda. Novamente devido as características do novo EE, simplificações importantes foram realizadas no cálculo do GMM, dando origem ao GMR. De modo geral, o GMR apresenta resultados similares ao GMM com EE planar, porém, com

um custo computacional significativamente inferior.

Além da correta identificação das frentes de onda, a correta determinação das velocidades de propagação das ondas é um fator primordial para a precisão da estimação do local da falta. Testes foram realizados mostrando o desempenho das metodologias convencionais diante de várias velocidades de onda distintas propostas na literatura. Os resultados mostram que a correta definição da velocidade pode resultar em erros de localização bastante aceitáveis. Entretanto, definir esta velocidade é uma tarefa complexa já que ela depende de diversos fatores como temperatura, posição da falta e parâmetros da linha.

Neste contexto, este trabalho apresentou como principal contribuição original uma metodologia de localização de faltas para linhas HVDC onde a velocidade de propagação das ondas viajantes é uma função do local da falta. Assim, ao contrário da literatura, a velocidade de propagação das frentes de onda não é constante. De forma geral, os resultados indicam que a metodologia proposta resulta em erros menores que os apresentados por todas as metodologias disponíveis na literatura. A metodologia proposta é baseada em dados medidos em apenas um terminal, o que reduz os custos e facilita a sua implantação. Os parâmetros da função que representa a velocidade são ajustados *offline* considerando a topologia e os parâmetros da linha, e um conjunto reduzido de casos de falta que podem ser simulados ou reais. Devido à simplicidade dos filtros morfológicos necessários, bem como da função que representa a velocidade, a metodologia proposta pode ser implementada diretamente nos dispositivos de proteção, evitando assim, a necessidade de transmissão dos sinais de tensão e corrente que devem ser obtidos em elevadas taxas de amostragem.

Como os métodos de ondas viajantes requerem elevadas taxas de amostragem e são fortemente influenciados por ruídos, diferentes filtros morfológicos foram avaliados no processo de filtragem de ruídos destinados a localização de faltas. O FMM apresentou melhor desempenho entre os filtros testados. Além disso foi possível perceber que EE de tamanhos elevados, apesar de filtrarem os ruídos, acabam por filtrar também algumas frentes de onda. Ao contrário, EE pequenos, apesar de não filtrarem as frentes de onda, nem sempre são capazes de filtrar os níveis de ruído de uma maneira satisfatória. A definição do tamanho do EE a ser usado nos FRR, irá depender do tipo de filtro utilizado e também da taxa de amostragem.

A metodologia de localização de faltas com estimação da velocidade foi avaliada na presença de ruídos apresentando bons resultados. Portanto, como conclusão geral, tem-se que o bom desempenho dos filtros morfológicos apresentados nesta tese em conjunto com a satisfatória precisão da metodologia de localização de faltas proposta, indica que a abordagem proposta é bastante promissora.

6.1.1 Trabalhos Futuros

Alguns aspectos das metodologias e ferramentas investigadas podem ainda ser explorados a fim de tornar as propostas originais desta tese adequadas para concepção de um produto final. Assim, como continuação deste trabalho recomenda-se:

- Analisar o comportamento da função de velocidade para linhas HVDC extremamente longas;
- Avaliar o processo de estimação da velocidade para outros tipos de faltas e configurações de linhas;
- Ampliar a metodologia de estimação da velocidade utilizando dados de dois terminais;
- Desenvolver filtros de redução de ruídos com EE's dinâmicos, onde a forma e tamanho do EE se adaptam aos sinais analisados.
- Investigar funções de velocidade que sejam mais lineares e, portanto, mais fáceis de serem parametrizadas.

Referências Bibliográficas

- [1] F. Vigolvino Lopes, B. Fernandes Kusel, and K. Melo Silva. Traveling wave-based fault location on half-wavelength transmission lines. *IEEE Latin America Transactions*, 14(1):248–253, Jan 2016. ISSN 1548-0992. doi: 10.1109/TLA.2016.7430086.
- [2] Marlim Pereira Menezes. Classificação e localização de faltas em linhas de transmissão usando diferentes arquiteturas de redes neurais artificiais. Dissertação de mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2008.
- [3] Eduardo Yada Matias. Avaliação do desempenho dinâmico e imunidade a falhas de comutação para faltas remotas em sistemas HVDC híbridos, retificador LCC e inversor CCC, em linhas de transmissão longas. Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Outubro 2015.
- [4] Paulo A. H. Cavalcante. Localização de faltas em linhas de transmissão usando morfologia matemática. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Abril 2011.
- [5] Fábio Oliveira Morais Arruda. Localização de faltas em sistemas de transmissão em corrente contínua (HVDC) utilizando transformada wavelet. Dissertação de mestrado, CEFET-MG/ Universidade Federal de São João Del-Rei, 2012.
- [6] Leandro Veloso Cunha. Desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas: Influência do efeito corona na ruptura a meio de vão. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Julho 2010.
- [7] Thiago Brito P. De Souza. Análise de ondas viajantes em linhas de transmissão para localização de faltas: Abordagem via transformada wavelet. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Pará, Fevereiro 2007.
- [8] Y. j. Kwon, S. h. Kang, D. g. Lee, and H. k. Kim. Fault location algorithm based on cross correlation method for HVDC cable lines. In *2008 IET 9th International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2008)*, pages 360–364, March 2008. doi: 10.1049/cp:20080064.

- [9] J. Rafferty, L. Xu, and D. J. Morrow. DC fault analysis of VSC based multi-terminal HVDC systems. In *10th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2012)*, pages 1–6, Dec 2012. doi: 10.1049/cp.2012.1961.
- [10] S. Ademi, D. Tzelepis, A. Dysko, S. Subramanian, and H. Ha. Fault current characterisation in VSC-based HVDC systems. In *13th International Conference on Development in Power System Protection 2016 (DPSP)*, pages 1–7, March 2016. doi: 10.1049/cp.2016.0043.
- [11] L. Lin, Z. He, J. Hu, Z. He, and K. Xu. Pole-to-ground fault ride through strategy for half-/full-bridge hybrid MMC-based radial multi-terminal HVDC systems with low-impedance grounded. *IET Generation, Transmission Distribution*, 12(4):1038–1044, 2018. ISSN 1751-8687. doi: 10.1049/iet-gtd.2017.0580.
- [12] Chan-Ki Kim, Vijay K. Sood, Gil-Soo Jang, Seong-Joo Lim, and Seo-Jin Lee. *HVDC Transmission - Power Conversion Applications in Power Systems*. IEEE PRESS, 2009. ISBN 978-0-470-82295-1.
- [13] Jos Arrillaga. *High Voltage Direct Current Transmission*. The Institution of Electrical Engineers, 2 edition, 1998. ISBN 0 85296 941 4.
- [14] Jiale Suonan, Shuping Gao, Guobing Song, Zaibin Jiao, and Xiaoning Kang. A novel fault-location method for HVDC transmission lines. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 25(2):1203–1209, April 2010. ISSN 0885-8977. doi: 10.1109/TPWRD.2009.2033078.
- [15] Zheng-You He, Kai Liao, Xiao peng Li, Sheng Lin, Jian wei Yang, and Rui kun Mai. Natural frequency-based line fault location in HVDC lines. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 29(2):851–859, April 2014. ISSN 0885-8977. doi: 10.1109/TPWRD.2013.2269769.
- [16] Ping Chen, Bingyin Xu, and Jing Li. A traveling wave based fault locating system for HVDC transmission lines. In *Power System Technology, 2006. PowerCon 2006. International Conference on*, pages 1–4, Oct 2006. doi: 10.1109/ICPST.2006.321669.
- [17] M. Farshad and J. Sadeh. A novel fault-location method for HVDC transmission lines based on similarity measure of voltage signals. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 28(4):2483–2490, Oct 2013. ISSN 0885-8977. doi: 10.1109/TPWRD.2013.2272436.
- [18] Y. Wang, Ziguang Zhang, Y. Fu, Yang Hei, and Xiangyu Zhang. Pole-to-ground fault analysis in transmission line of DC grids based on VSC. In *2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia)*, pages 2028–2032, May 2016. doi: 10.1109/IPEMC.2016.7512607.

- [19] N. E. Eng and K. Ramar. Single-ended traveling wave based fault location on two terminal transmission lines. In *TENCON 2009 - 2009 IEEE Region 10 Conference*, pages 1–4, Jan 2009. doi: 10.1109/TENCON.2009.5396141.
- [20] Luis de Andrade de Freitas. Time-domain impedance-based fault location for HVDC transmission lines. Doctoral thesis, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, October 2013.
- [21] T. C. Peng, D. Tzelepis, A. Dysko, and I. Glesk. Assessment of fault location techniques in voltage source converter based HVDC systems. In *2017 IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC)*, pages 1–6, Feb 2017. doi: 10.1109/TPEC.2017.7868270.
- [22] M. Shukr, D. W. P. Thomas, and P. Zanchetta. VSC-HVDC transmission line faults location using active line impedance estimation. In *2012 IEEE International Energy Conference and Exhibition (ENERGYCON)*, pages 244–248, Sept 2012. doi: 10.1109/EnergyCon.2012.6347760.
- [23] Li Bao-de and Tan Jian-cheng. Transient fault location for HVDC transmission lines based on voltage distribution and one-terminal information. In *2014 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*, pages 508–510, Sept 2014. doi: 10.1109/CICED.2014.6991760.
- [24] Yingdan Qiu, Haifeng Li, Lvxing Guo, Jiyang Wu, and Yuansheng Liang. A fault location method for double-circuit HVDC transmission lines on the same tower based on mixed modulus. In *2015 IEEE Eindhoven PowerTech*, pages 1–5, June 2015. doi: 10.1109/PTC.2015.7232352.
- [25] S. Vasanth, Y. M. Yeap, and A. Ukil. Fault location estimation for VSC-HVDC system using artificial neural network. In *2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON)*, pages 501–504, Nov 2016. doi: 10.1109/TENCON.2016.7848050.
- [26] J. M. Johnson and A. Yadav. Complete protection scheme for fault detection, classification and location estimation in HVDC transmission lines using support vector machines. *IET Science, Measurement Technology*, 11(3):279–287, 2017. ISSN 1751-8822. doi: 10.1049/iet-smt.2016.0244.
- [27] F. Ünal and S. Ekici. A fault location technique for HVDC transmission lines using extreme learning machines. In *2017 5th International Istanbul Smart Grid and Cities Congress and Fair (ICSG)*, pages 125–129, April 2017. doi: 10.1109/SGCF.2017.7947616.

- [28] A. Hossam-Eldin, A. Lotfy, M. Elgamal, and M. Ebeed. Combined traveling wave and fuzzy logic based fault location in multi-terminal HVDC systems. In *2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, pages 1–6, June 2016. doi: 10.1109/EEEIC.2016.7555591.
- [29] K. Liao, Z. He, and X. Li. A fault location method based on traveling wave natural frequency used on ± 800 kV UHVDC transmission lines. In *Electrical and Control Engineering (ICECE), 2011 International Conference on*, pages 5652–5655, Sept 2011. doi: 10.1109/ICECENG.2011.6057218.
- [30] Song Guobing, Cai XinLei, Gao ShuPing, Suonan Jiale, and Li Guang. Natural frequency based protection and fault location for VSC-HVDC transmission lines. In *Advanced Power System Automation and Protection (APAP), 2011 International Conference on*, volume 1, pages 177–182, Oct 2011. doi: 10.1109/APAP.2011.6180405.
- [31] Guobing Song, Xu Chu, Xinlei Cai, Shuping Gao, and Mengbing Ran. A fault-location method for VSC-HVDC transmission lines based on natural frequency of current. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 63(24):347 – 352, 2014. ISSN 0142-0615. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.05.069>.
- [32] F.H. Magnago and A. Abur. Fault location using wavelets. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 13(4):1475–1480, Oct 1998. ISSN 0885-8977. doi: 10.1109/61.714808.
- [33] X. Yuqin, W. Zengping, B. Jia, and Zhanghai. A transmission line unit protection technique based combination modulus by using mathematical morphology. In *2006 International Conference on Power System Technology*, pages 1–6, Oct 2006. doi: 10.1109/ICPST.2006.321568.
- [34] Zhang Feng, Liang Jun, Zhang Li, and Yun Zhihao. A new fault location method avoiding wave speed and based on traveling waves for EHV transmission line. In *2008 Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*, pages 1753–1757, April 2008. doi: 10.1109/DRPT.2008.4523690.
- [35] Ma Jing, Wang Zengping, Xu Yan, and Ma Lei. Single-ended transient positional protection of transmission lines using mathematical morphology. In *Power Engineering Conference, 2005. IPEC 2005. The 7th International*, pages 1–603, Nov 2005. doi: 10.1109/IPEC.2005.206978.
- [36] M.M Sasha, J. Izykowski, and E. Rosolowski. *Fault Location on Power Networks*. Springer London Dordrecht Heidelberg New York, 2010. ISBN 978-1-84882-885-8. doi: 0.1007/978-1-84882-886-5.

- [37] L. Yue. Research on HVDC single-ended fault traveling wave location method based on fastica. In *2016 International Conference on Audio, Language and Image Processing (ICALIP)*, pages 509–514, July 2016. doi: 10.1109/ICALIP.2016.7846524.
- [38] Chuanxin Xi, Qing Chen, and Lei Wang. A single-terminal traveling wave fault location method for VSC-HVDC transmission lines based on s-transform. In *2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, pages 1008–1012, Oct 2016. doi: 10.1109/APPEEC.2016.7779647.
- [39] S. Mangalge and S. Jawale. Location of fault in long HVDC transmission line using continuous wavelet transform. In *2016 International Conference on Signal Processing, Communication, Power and Embedded System (SCOPEs)*, pages 930–935, Oct 2016. doi: 10.1109/SCOPEs.2016.7955579.
- [40] M. Bazargan and K. Maleka. Fault location algorithm for identifying a faulted section in a meshed multi-terminal HVDC grid. In *13th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2017)*, pages 1–6, Feb 2017. doi: 10.1049/cp.2017.0043.
- [41] L. Shang, G. Herold, J. Jaeger, R. Krebs, and A. Kumar. High-speed fault identification and protection for HVDC line using wavelet technique. In *Power Tech Proceedings, 2001 IEEE Porto*, volume 3, pages 5 pp. vol.3–, 2001. doi: 10.1109/PTC.2001.964958.
- [42] P.K. Murthy, J. Amarnath, S. Kamakshiah, and B.P. Singh. Wavelet transform approach for detection and location of faults in HVDC system. In *Industrial and Information Systems, 2008. ICIIS 2008. IEEE Region 10 and the Third international Conference on*, pages 1–6, Dec 2008. doi: 10.1109/ICIINFS.2008.4798483.
- [43] O.M.K.K. Nanayakkara, A.D. Rajapakse, and R. Wachal. Location of DC line faults in conventional HVDC systems with segments of cables and overhead lines using terminal measurements. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 27(1):279–288, Jan 2012. ISSN 0885-8977. doi: 10.1109/TPWRD.2011.2174067.
- [44] O. M. K. K. Nanayakkara, A. D. Rajapakse, and R. Wachal. Traveling-wave-based line fault location in star-connected multiterminal HVDC systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 27(4):2286–2294, Oct 2012. ISSN 0885-8977. doi: 10.1109/TPWRD.2012.2202405.
- [45] E. Styvaktakis, M. H. J. Bollen, and I. Y. H. Gu. A fault location technique using high frequency fault clearing transients. *IEEE Power Engineering Review*, 19(5): 58–60, May 1999. ISSN 0272-1724. doi: 10.1109/39.761821.

- [46] Gengyin Li, Ming Zhou, Yan Luo, and Yixin Ni. Power quality disturbance detection based on mathematical morphology and fractal technique. In *2005 IEEE/PES Transmission Distribution Conference Exposition: Asia and Pacific*, pages 1–6, 2005. doi: 10.1109/TDC.2005.1547030.
- [47] Z. Lu, D. R. Turner, Q. H. Wu, J. Fitch, and S. Mann. Morphological transform for detection of power quality disturbances. In *2004 International Conference on Power System Technology, 2004. PowerCon 2004.*, volume 2, pages 1644–1649 Vol.2, Nov 2004. doi: 10.1109/ICPST.2004.1460267.
- [48] S. Gautam and S. M. Brahma. Overview of mathematical morphology in power systems - a tutorial approach. In *2009 IEEE Power Energy Society General Meeting*, pages 1–7, July 2009. doi: 10.1109/PES.2009.5275190.
- [49] Edward R. Dougherty and Roberto A. Lotufo. *Hands-on morphological image processing*. SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2003.
- [50] S. Lin, Z. Y. He, X. P. Li, and Q. Q. Qian. Travelling wave time-frequency characteristic-based fault location method for transmission lines. *IET Generation, Transmission Distribution*, 6(8):764–772, August 2012. ISSN 1751-8687. doi: 10.1049/iet-gtd.2011.0703.
- [51] Zhang Yi-ning, Liu Yong-hao, Xu Min, and Cai Ze-xiang. A novel algorithm for HVDC line fault location based on variant travelling wave speed. In *Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), 2011 4th International Conference on*, pages 1459–1463, July 2011. doi: 10.1109/DRPT.2011.5994126.
- [52] Xu Min, Cai Zexiang, Liu Yonghao, and Ku Xiaofei. A novel coordination scheme of wavefront and wave speed for HVDC travelling wave fault location. In *Advanced Power System Automation and Protection (APAP), 2011 International Conference on*, volume 1, pages 102–107, Oct 2011. doi: 10.1109/APAP.2011.6180393.
- [53] J. Ding, L. Li, Y. Zheng, C. Zhao, H. Chen, and X. Wang. Distributed travelling-wave-based fault location without time synchronisation and wave velocity error. *IET Generation, Transmission Distribution*, 11(8):2085–2093, 2017. ISSN 1751-8687. doi: 10.1049/iet-gtd.2016.1778.
- [54] W. Zhihua, L. Zewen, Q. Xiao'an, H. Xiang, and Z. Xiangjun. A novel double terminal traveling wave fault location method not influenced by wave speed. In *2009 Transmission Distribution Conference Exposition: Asia and Pacific*, pages 1–4, Oct 2009. doi: 10.1109/TD-ASIA.2009.5356916.
- [55] G. Matheron. *Randon Sets and Integral Geometry*. New York, NY, USA:Wiley, 1975.

- [56] J. Serra. *Image Analysis and Mathematical Morphology*. Inc. Academic Press, Orlando, FL, USA, 1982.
- [57] K. L. Nisha, Sreelekha G., S. P. Savithri, P. Mohanachandran, and A. Vinekar. Fusion of structure adaptive filtering and mathematical morphology for vessel segmentation in fundus images of infants with retinopathy of prematurity. In *2017 IEEE 30th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, pages 1–6, April 2017. doi: 10.1109/CCECE.2017.7946704.
- [58] J. Rodrigues and N. Bezerra. Retinal vessel segmentation using parallel grayscale skeletonization algorithm and mathematical morphology. In *2016 29th SIBGRAPI Conference on Graphics, Patterns and Images (SIBGRAPI)*, pages 17–24, Oct 2016. doi: 10.1109/SIBGRAPI.2016.012.
- [59] M. Braiki, A. Benzinou, K. Nasreddine, S. Labidi, and N. Hymery. Segmentation of dendritic cells from microscopic images using mathematical morphology. In *2016 2nd International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP)*, pages 282–287, March 2016. doi: 10.1109/ATSIP.2016.7523116.
- [60] L. Li, J. Li, Y. Song, and L. Wang. A multiple frame integration and mathematical morphology based technique for video text extraction. In *2010 International Conference on Computer and Information Application*, pages 434–437, Dec 2010. doi: 10.1109/ICCIA.2010.6141629.
- [61] Shao Bin, Jiang Yunliang, and Yang Zhen. The research on video supervision technology based on mathematical morphology. In *2009 International Conference on Industrial Mechatronics and Automation*, pages 57–60, May 2009. doi: 10.1109/ICIMA.2009.5156559.
- [62] S. J. F. Guimaraes, A. de, M. Couprie, and N. J. Leite. An approach to detect video transitions based on mathematical morphology. In *Proceedings 2003 International Conference on Image Processing (Cat. No.03CH37429)*, volume 2, pages II–1021–4 vol.3, 2003. doi: 10.1109/ICIP.2003.1246858.
- [63] M. A. Barik, A. Gargoom, M. A. Mahmud, M. E. Haque, A. M. T. Oo, and H. Al-Khalidi. Mathematical morphology-based fault detection technique for power distribution systems subjected to resonant grounding. In *2017 IEEE Power Energy Society General Meeting*, pages 1–5, July 2017. doi: 10.1109/PESGM.2017.8274459.
- [64] S. Gautam and S. M. Brahma. Guidelines for selection of an optimal structuring element for mathematical morphology based tools to detect power system disturbances. In *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pages 1–6, July 2012. doi: 10.1109/PESGM.2012.6345105.

- [65] S. Gautam and S. M. Brahma. Detection of high impedance fault in power distribution systems using mathematical morphology. *IEEE Transactions on Power Systems*, 28(2):1226–1234, May 2013. ISSN 0885-8950. doi: 10.1109/TPWRS.2012.2215630.
- [66] Z. Ji, Q. Zeng, J. Liao, and Q. H. Wu. A novel mathematical morphology filter for the accurate fault location in power transmission lines. In *TENCON 2009 - 2009 IEEE Region 10 Conference*, pages 1–6, Jan 2009. doi: 10.1109/TENCON.2009.5396127.
- [67] John Pável T. Ramos. Localização de faltas em linhas HVDC usando ondas viajantes e morfologia matemática. Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Julho 2015.
- [68] S. Gautam and S. Brahma. Properties of mathematical morphology based filter for online filtering of power system signals. In *41st North American Power Symposium*, pages 1–5, Oct 2009. doi: 10.1109/NAPS.2009.5484011.
- [69] D.J. Zhang, Q.H. Wu, J.F. Zhang, and K.I. Nuttall. Accurate fault location based on transients extraction using mathematical morphology. *Electronics Letters*, 38(24): 1583–1585, Nov 2002. ISSN 0013-5194. doi: 10.1049/el:20020989.
- [70] Aline Sayuri Ishikawa. Detecção de rodovias em imagens digitais de alta resolução com o uso da teoria de morfologia matemática. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual Paulista - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Fevereiro 2008.
- [71] Z. Lu Q. H. Wu and T. Y. Ji. *Protective Relaying of Power Systems Using Mathematical Morphology*. Springer-Verlag London Limited, 2009. ISBN 978-1-84882-498-0.
- [72] J.P. Triveno, V.P. Dardengo, and M.C. de Almeida. An approach to fault location in HVDC lines using mathematical morphology. In *Power Energy Society General Meeting, 2015 IEEE*, pages 1–5, July 2015. doi: 10.1109/PESGM.2015.7286301.
- [73] M. Salehi and F. Namdari. Fault location on branched networks using mathematical morphology. *IET Generation, Transmission Distribution*, 12(1):207–216, 2018. ISSN 1751-8687. doi: 10.1049/iet-gtd.2017.0598.
- [74] Hader Aguiar Dias Azzini. Sistema de monitoramento de cargas residenciais usando informações on-off e modelos de consumo. Tese de doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Dezembro 2017.
- [75] M. Ando, E. O. Schweitzer, and R. A. Baker. Development and field-data evaluation of single-end fault locator for two-terminal HVDC transmission lines part 2: Algorithm and evaluation. *IEEE Power Engineering Review*, PER-5(12):48–48, Dec 1985. ISSN 0272-1724. doi: 10.1109/MPER.1985.5528632.

- [76] P.A.H. Cavalcante, B.D.S. Jose, F.C.L. Trindade, and M.C. de Almeida. A transmission line two-end fault location approach based on mathematical morphology. In *Power and Energy Society General Meeting (PES), 2013 IEEE*, pages 1–5, July 2013. doi: 10.1109/PESMG.2013.6672836.
- [77] Chen Shi long, Shu Hong Chun, Wang Yong zhi, and Zeng Fang. Distance protection scheme with travelling wave for UHVDC transmission line based on wavelet transform. In *2008 Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*, pages 2162–2165, April 2008. doi: 10.1109/DRPT.2008.4523768.
- [78] T. Takagi, Y. Yamakoshi, J. Baba, K. Uemura, and T. Sakaguchi. A new algorithm of an accurate fault location for EHV/UHV transmission lines: Part i - Fourier transformation method. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-100(3):1316–1323, March 1981. ISSN 0018-9510. doi: 10.1109/TPAS.1981.316604.
- [79] C. Li and P. He. Fault-location method for HVDC transmission lines based on phase frequency characteristics. *IET Generation, Transmission Distribution*, 12(4): 912–916, 2018. ISSN 1751-8687. doi: 10.1049/iet-gtd.2017.0967.
- [80] M. B. Dewe, S. Sankar, and J. Arrillaga. The application of satellite time references to HVDC fault location. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 8(3):1295–1302, July 1993. ISSN 0885-8977. doi: 10.1109/61.252655.
- [81] M.O. Faruque, Yuyan Zhang, and V. Dinavahi. Detailed modeling of CIGRE HVDC benchmark system using PSCAD/EMTDC and PSB/SIMULINK. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 21(1):378–387, Jan 2006. ISSN 0885-8977. doi: 10.1109/TPWRD.2005.852376.
- [82] Yuntao Zou, Xiuli Wang, Haitao Zhang, Chunyang Liu, Qian Zhou, and Weiping Zhu. Traveling-wave based fault location with high grounding resistance for HVDC transmission lines. In *2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, pages 1651–1655, Oct 2016. doi: 10.1109/APPEEC.2016.7779773.
- [83] X. Li, Z. He, and L. Xia. A novel fault location method using traveling wave natural frequencies for transmission grid. In *Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), 2011 4th International Conference on*, pages 209–212, July 2011. doi: 10.1109/DRPT.2011.5993890.
- [84] D. Jiandong, Z. Zhao, and L. Jing. Combined fault location algorithm for HVDC transmission lines based on natural frequency. In *2015 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT)*, pages 1720–1725, Nov 2015. doi: 10.1109/DRPT.2015.7432511.

- [85] L. Yuansheng, W. Gang, and L. Haifeng. Time-domain fault-location method on HVDC transmission lines under unsynchronized two-end measurement and uncertain line parameters. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 30(3):1031–1038, June 2015. ISSN 0885-8977. doi: 10.1109/TPWRD.2014.2335748.
- [86] T. Bi, S. Wang, and K. Jia. Single pole-to-ground fault location method for MMC-HVDC system using active pulse. *IET Generation, Transmission Distribution*, 12(2):272–278, 2018. ISSN 1751-8687. doi: 10.1049/iet-gtd.2017.0116.
- [87] V. P. Dardengo, P. A. H. Cavalcante, and M. C. de Almeida. Noise reduction for faults in HVDC lines using mathematical morphology. In *2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America (ISGT Latin America)*, pages 1–6, Sept 2017. doi: 10.1109/ISGT-LA.2017.8126750.
- [88] M. Valtierra Rodriguez, L. A. Morales Hernandez, J. P. Benitez Rangel, and A. Dominguez Gonzalez. Real-time monitoring of voltage variations using mathematical morphology. *IEEE Latin America Transactions*, 14(5):2138–2145, May 2016. ISSN 1548-0992. doi: 10.1109/TLA.2016.7530406.
- [89] F. Namdari and M. Salehi. High-speed protection scheme based on initial current traveling wave for transmission lines employing mathematical morphology. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 32(1):246–253, Feb 2017. ISSN 0885-8977. doi: 10.1109/TPWRD.2016.2571341.
- [90] L. Zou, P. Liu, and Q. Zhao. Applications of multiresolution morphological analysis in ultra high speed protection of transmission line. *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, 153(5):515–523, September 2006. ISSN 1350-2360. doi: 10.1049/ip-gtd:20050085.

Apêndice A

Resultados obtidos entre o GMM e GMR

Através do processo de identificação das frentes de onda descrito na seção 3.3, o processo de localização de faltas, utilizando para evidenciamento das frentes de onda o GMM e o GMR, ambos com nível dois, foi avaliado para diferentes posições de falta e resistências de falta. EEs de tamanho 8 para os filtros morfológicos e uma média móvel de janela igual a 8 foram utilizados, o sinal de tensão foi amostrado a 1,2 MHz e $v = 0,985 \times v_{luz}$ foi especificado para a velocidade de propagação das frentes de onda. Os resultados obtidos para as faltas com resistências de falta iguais a 0 Ω , 20 Ω , 50 Ω e 100 Ω são mostrados, respectivamente, nas Tabelas A.1, A.2, A.3 e A.4.

Tabela A.1: Erros percentuais da estimação das posições de falta para resistência de falta igual a 0Ω

Res. de Falta (Ω)	Posição da Falta (km)	Erro percentual (%)			
		GMM		GMR	
		baseado em (3.1)	baseado em (3.2)	baseado em (3.1)	baseado em (3.2)
0	5	0,0161	0,5583	0,0161	0,5829
	20	0,0643	0,5593	0,0397	0,5347
	40	0,0794	0,4212	0,0548	0,4212
	60	0,0945	0,4307	0,0945	0,3815
	80	0,1096	0,4156	0,1096	0,3910
	100	0,1247	0,3759	0,1247	0,3759
	120	0,1644	0,3608	0,1398	0,3608
	140	0,1795	0,3457	0,1549	0,3457
	160	0,1946	0,3306	0,1700	0,3306
	180	0,2097	0,2909	0,1851	0,3155
	200	0,2248	0,3004	0,2002	0,3004
	220	0,2399	0,2853	0,2399	0,2853
	240	0,2550	0,2702	0,2550	0,2702
	260	0,2702	0,2550	0,2702	0,2550
	280	0,3099	0,2399	0,2853	0,2153
	300	0,3004	0,2248	0,3004	0,2002
	320	0,3155	0,2097	0,3155	0,1851
	340	0,3552	0,1946	0,3060	0,1454
	360	0,3457	0,1795	0,3211	0,1303
	380	0,3854	0,1644	0,3362	0,1152
	400	0,3759	0,1493	0,3513	0,1001
	420	0,3910	0,1342	0,3664	0,0850
	440	0,4061	0,0945	0,3815	0,0699
	460	0,4212	0,0794	0,3966	0,0548
	480	0,4363	0,0889	0,4117	0,0397
	495	0,4353	0,1391	0,4353	0,1145
Erro médio		0,2579	0,2730	0,2408	0,2541
Erro máximo		0,4363	0,5593	0,4353	0,5829

Tabela A.2: Erros percentuais da estimação das posições de falta para resistência de falta igual a 20Ω

Res. de Falta (Ω)	Posição da Falta (km)	Erro percentual (%)			
		GMM		GMR	
		baseado em (3.1)	baseado em (3.2)	baseado em (3.1)	baseado em (3.2)
20	5	0,0085	0,5337	0,0161	0,5583
	20	0,0643	0,5347	0,0397	0,5347
	40	0,0794	0,4458	0,0548	0,4212
	60	0,0945	0,4307	0,0945	0,4061
	80	0,1096	0,3910	0,1096	0,3910
	100	0,1247	0,3759	0,1247	0,3759
	120	0,1644	0,3608	0,1398	0,3608
	140	0,1795	0,3457	0,1549	0,3457
	160	0,1946	0,3306	0,1700	0,3306
	180	0,2097	0,3155	0,1851	0,3155
	200	0,2248	0,3004	0,2002	0,3004
	220	0,2399	0,2853	0,2399	0,2853
	240	0,2550	0,2702	0,2550	0,2702
	260	0,2702	0,2550	0,2702	0,2550
	280	0,3099	0,2399	0,2853	0,2153
	300	0,3004	0,2248	0,3004	0,2002
	320	0,3401	0,2097	0,3155	0,1851
	340	0,3552	0,1946	0,3060	0,1454
	360	0,3457	0,1795	0,3211	0,1303
	380	0,3608	0,1644	0,3362	0,1152
	400	0,3759	0,1493	0,3513	0,1001
	420	0,3910	0,1342	0,3664	0,0850
	440	0,4061	0,1191	0,3815	0,0699
	460	0,4212	0,0794	0,3966	0,0548
	480	0,4363	0,0889	0,4117	0,0397
	495	0,4353	0,1391	0,4353	0,0899
Erro médio		0,2576	0,2730	0,2408	0,2531
Erro máximo		0,4363	0,5347	0,4353	0,5583

Tabela A.3: Erros percentuais da estimação das posições de falta para resistência de falta igual a 50Ω

Res. de Falta (Ω)	Posição da Falta (km)	Erro percentual (%)			
		GMM		GMR	
		baseado em (3.1)	baseado em (3.2)	baseado em (3.1)	baseado em (3.2)
50	5	0,0085	0,5091	0,0161	0,5337
	20	0,0643	0,5347	0,0397	0,5101
	40	0,0794	0,4458	0,0548	0,4212
	60	0,0945	0,4307	0,0699	0,4061
	80	0,1096	0,3910	0,1096	0,3910
	100	0,1247	0,3759	0,1247	0,3759
	120	0,1398	0,3608	0,1398	0,3608
	140	0,1795	0,3457	0,1549	0,3457
	160	0,1946	0,3306	0,1700	0,3306
	180	0,1851	0,3155	0,1851	0,3155
	200	0,2248	0,3004	0,2002	0,3004
	220	0,2399	0,2853	0,2153	0,2853
	240	0,2550	0,2702	0,2550	0,2702
	260	0,2702	0,2550	0,2702	0,2550
	280	0,3099	0,2399	0,2853	0,2153
	300	0,3004	0,2248	0,3004	0,2002
	320	0,3401	0,2097	0,3155	0,1851
	340	0,3552	0,1946	0,3306	0,1700
	360	0,3457	0,1795	0,3211	0,1303
	380	0,3608	0,1644	0,3362	0,1152
	400	0,3759	0,1493	0,3513	0,1001
	420	0,4156	0,1342	0,3910	0,0850
	440	0,4061	0,1191	0,3815	0,0699
	460	0,4212	0,0794	0,3966	0,0548
	480	0,4363	0,0643	0,4117	0,0397
	495	0,4353	0,1145	0,4353	0,0653
Erro médio		0,2566	0,2702	0,2408	0,2512
Erro máximo		0,4363	0,5347	0,4353	0,5337

Tabela A.4: Erros percentuais da estimação das posições de falta para resistência de falta igual a 100Ω

Res. de Falta (Ω)	Posição da Falta (km)	Erro percentual (%)			
		GMM		GMR	
		baseado em (3.1)	baseado em (3.2)	baseado em (3.1)	baseado em (3.2)
100	5	0,0085	0,4845	0,0161	0,5091
	20	0,0643	0,5101	0,0397	0,5101
	40	0,0794	0,4212	0,0548	0,4212
	60	0,0945	0,4061	0,0699	0,4061
	80	0,1096	0,3910	0,1096	0,3910
	100	0,1247	0,3759	0,1247	0,3759
	120	0,1398	0,3608	0,1398	0,3608
	140	0,1549	0,3457	0,1549	0,3457
	160	0,1700	0,3306	0,1700	0,3306
	180	0,1851	0,3155	0,1851	0,3155
	200	0,2002	0,3004	0,2002	0,3004
	220	0,2153	0,2853	0,2153	0,2853
	240	0,2550	0,2702	0,2550	0,2702
	260	0,2702	0,2550	0,2702	0,2550
	280	0,3099	0,2399	0,2853	0,2153
	300	0,3004	0,2248	0,3004	0,2002
	320	0,3401	0,2097	0,3155	0,1851
	340	0,3552	0,1946	0,3306	0,1700
	360	0,3211	0,1795	0,3211	0,1303
	380	0,3608	0,1644	0,3362	0,1152
	400	0,3759	0,1493	0,3513	0,1001
	420	0,4402	0,1342	0,3910	0,0850
	440	0,4307	0,1191	0,3815	0,0699
	460	0,4458	0,0794	0,3966	0,0548
	480	0,4363	0,0643	0,4117	0,0397
	495	0,4353	0,1145	0,4353	0,0653
Erro médio		0,2547	0,2664	0,2408	0,2503
Erro máximo		0,4458	0,5101	0,4353	0,5101

Apêndice B

Erros de localização de falta para os métodos convencionais de localização de faltas

B.1 Métodos convencionais

Os métodos convencionais de localização de falta foram avaliados através de diferentes posições e resistências de falta, tanto para os métodos baseado em um quanto em dois terminais e seus resultados são mostrados abaixo.

B.1.1 Metodologias de um terminal

As Tabelas B.1, B.2, B.3 e B.4 demonstram, respectivamente, os erros obtidos para a metodologia de um terminal baseada em (3.1) para faltas aplicadas ao longo da linha com resistência de falta iguais a $0\ \Omega$, $20\ \Omega$, $50\ \Omega$ e $100\ \Omega$, enquanto as Tabelas B.5, B.6, B.7 e B.8 demonstram, os erros obtidos para a metodologia de 1 terminal baseada em (3.2) respectivamente para resistências de falta iguais a $0\ \Omega$, $20\ \Omega$, $50\ \Omega$ e $100\ \Omega$.

As abordagens foram avaliadas através de diferentes velocidades de propagação das frentes de onda.

B.1.2 Metodologia de dois terminais

As Tabelas B.9, B.10, B.11 e B.12 demonstram, respectivamente, os erros obtidos para a metodologia de dois terminais baseada em (3.3) para faltas aplicadas ao longo da linha com resistência de falta iguais a $0\ \Omega$, $20\ \Omega$, $50\ \Omega$ e $100\ \Omega$.

As abordagens foram avaliadas através de diferentes velocidades de propagação das frentes de onda.

Tabela B.1: Erros percentuais da estimação das posições de falta para o método convencional de um terminal baseado em (3.1)

Res. de Falta (Ω)	Posição da Falta (km)	Erro percentual (%)			
		Metodologia de um terminal baseada em (3.1)			
		v_1	v_2	v_3	v_{luz}
0	5	0,0311	0,0211	0,0111	0,0011
	20	0,1000	0,0598	0,0196	0,0206
	40	0,1758	0,0951	0,0145	0,0662
	60	0,2758	0,1549	0,0341	0,0868
	80	0,3516	0,1903	0,0290	0,1324
	100	0,4274	0,2256	0,0238	0,1780
	120	0,5032	0,2609	0,0187	0,2235
	140	0,5790	0,2963	0,0136	0,2691
	160	0,6548	0,3316	0,0085	0,3147
	180	0,7305	0,3669	0,0033	0,3603
	200	0,8063	0,4023	0,0018	0,4058
	220	0,9063	0,4621	0,0178	0,4265
	240	0,9821	0,4974	0,0127	0,4720
	260	1,0579	0,5327	0,0076	0,5176
	280	1,1337	0,5681	0,0024	0,5632
	300	1,2095	0,6034	0,0027	0,6088
	320	1,2853	0,6387	0,0078	0,6544
	340	1,3368	0,6496	0,0377	0,7249
	360	1,4126	0,6849	0,0428	0,7705
	380	1,4884	0,7203	0,0479	0,8161
	400	1,5642	0,7556	0,0530	0,8616
	420	1,6400	0,7909	0,0581	0,9072
	440	1,7158	0,8263	0,0633	0,9528
	460	1,7916	0,8616	0,0684	0,9984
	480	1,8674	0,8969	0,0735	1,0440
	495	1,9363	0,9357	0,0650	1,0657

Tabela B.2: Erros percentuais da estimação das posições de falta para o método convencional de um terminal baseado em (3.1)

Res. de Falta (Ω)	Posição da Falta (km)	Erro percentual (%)			
		Metodologia de um terminal baseada em (3.1)			
		v_1	v_2	v_3	v_{luz}
20	5	0,0311	0,0211	0,0111	0,0011
	20	0,1000	0,0598	0,0196	0,0206
	40	0,1758	0,0951	0,0145	0,0662
	60	0,2758	0,1549	0,0341	0,0868
	80	0,3516	0,1903	0,0290	0,1324
	100	0,4274	0,2256	0,0238	0,1780
	120	0,5032	0,2609	0,0187	0,2235
	140	0,5790	0,2963	0,0136	0,2691
	160	0,6548	0,3316	0,0085	0,3147
	180	0,7305	0,3669	0,0033	0,3603
	200	0,8063	0,4023	0,0018	0,4058
	220	0,9063	0,4621	0,0178	0,4265
	240	0,9821	0,4974	0,0127	0,4720
	260	1,0579	0,5327	0,0076	0,5176
	280	1,1337	0,5681	0,0024	0,5632
	300	1,2095	0,6034	0,0027	0,6088
	320	1,2853	0,6387	0,0078	0,6544
	340	1,3368	0,6496	0,0377	0,7249
	360	1,4126	0,6849	0,0428	0,7705
	380	1,4884	0,7203	0,0479	0,8161
	400	1,5642	0,7556	0,0530	0,8616
	420	1,6400	0,7909	0,0581	0,9072
	440	1,7158	0,8263	0,0633	0,9528
	460	1,7916	0,8616	0,0684	0,9984
	480	1,8674	0,8969	0,0735	1,0440
	495	1,9363	0,9357	0,0650	1,0657

Tabela B.3: Erros percentuais da estimação das posições de falta para o método convencional de um terminal baseado em (3.1)

Res. de Falta (Ω)	Posição da Falta (km)	Erro percentual (%)			
		Metodologia de um terminal baseada em (3.1)			
		v_1	v_2	v_3	v_{luz}
50	5	0,0311	0,0211	0,0111	0,0011
	20	0,1000	0,0598	0,0196	0,0206
	40	0,1758	0,0951	0,0145	0,0662
	60	0,2516	0,1305	0,0094	0,1118
	80	0,3516	0,1903	0,0290	0,1324
	100	0,4274	0,2256	0,0238	0,1780
	120	0,5032	0,2609	0,0187	0,2235
	140	0,5790	0,2963	0,0136	0,2691
	160	0,6548	0,3316	0,0085	0,3147
	180	0,7305	0,3669	0,0033	0,3603
	200	0,8063	0,4023	0,0018	0,4058
	220	0,8821	0,4376	0,0069	0,4514
	240	0,9821	0,4974	0,0127	0,4720
	260	1,0579	0,5327	0,0076	0,5176
	280	1,1337	0,5681	0,0024	0,5632
	300	1,2095	0,6034	0,0027	0,6088
	320	1,2853	0,6387	0,0078	0,6544
	340	1,3611	0,6741	0,0129	0,6999
	360	1,4126	0,6849	0,0428	0,7705
	380	1,4884	0,7203	0,0479	0,8161
	400	1,5642	0,7556	0,0530	0,8616
	420	1,6642	0,8154	0,0334	0,8822
	440	1,7158	0,8263	0,0633	0,9528
	460	1,7916	0,8616	0,0684	0,9984
	480	1,8674	0,8969	0,0735	1,0440
	495	1,9363	0,9357	0,0650	1,0657

Tabela B.4: Erros percentuais da estimação das posições de falta para o método convencional de um terminal baseado em (3.1)

Res. de Falta (Ω)	Posição da Falta (km)	Erro percentual (%)			
		Metodologia de um terminal baseada em (3.1)			
		v_1	v_2	v_3	v_{luz}
100	5	0,0311	0,0211	0,0111	0,0011
	20	0,1000	0,0598	0,0196	0,0206
	40	0,1758	0,0951	0,0145	0,0662
	60	0,2516	0,1305	0,0094	0,1118
	80	0,3516	0,1903	0,0290	0,1324
	100	0,4274	0,2256	0,0238	0,1780
	120	0,5032	0,2609	0,0187	0,2235
	140	0,5790	0,2963	0,0136	0,2691
	160	0,6548	0,3316	0,0085	0,3147
	180	0,7305	0,3669	0,0033	0,3603
	200	0,8063	0,4023	0,0018	0,4058
	220	0,8821	0,4376	0,0069	0,4514
	240	0,9821	0,4974	0,0127	0,4720
	260	1,0579	0,5327	0,0076	0,5176
	280	1,1337	0,5681	0,0024	0,5632
	300	1,2095	0,6034	0,0027	0,6088
	320	1,2853	0,6387	0,0078	0,6544
	340	1,3611	0,6741	0,0129	0,6999
	360	1,4126	0,6849	0,0428	0,7705
	380	1,4884	0,7203	0,0479	0,8161
	400	1,5642	0,7556	0,0530	0,8616
	420	1,6642	0,8154	0,0334	0,8822
	440	1,7158	0,8263	0,0633	0,9528
	460	1,7916	0,8616	0,0684	0,9984
	480	1,8674	0,8969	0,0735	1,0440
	495	1,9363	0,9357	0,0650	1,0657

Tabela B.5: Erros percentuais da estimação das posições de falta para o método convencional de um terminal baseado em (3.2)

Res. de Falta (Ω)	Posição da Falta (km)	Erro percentual (%)			
		Metodologia de um terminal baseada em (3.2)			
		v_1	v_2	v_3	v_{luz}
0	5	2,0817	1,0825	0,0833	0,9158
	20	1,9885	1,0193	0,0501	0,9191
	40	1,8158	0,8861	0,0437	0,9734
	60	1,7158	0,8263	0,0633	0,9528
	80	1,6642	0,8154	0,0334	0,8822
	100	1,5884	0,7801	0,0283	0,8367
	120	1,5126	0,7447	0,0232	0,7911
	140	1,4369	0,7094	0,0181	0,7455
	160	1,3611	0,6741	0,0129	0,6999
	180	1,2853	0,6387	0,0078	0,6544
	200	1,2095	0,6034	0,0027	0,6088
	220	1,1337	0,5681	0,0024	0,5632
	240	1,0579	0,5327	0,0076	0,5176
	260	0,9821	0,4974	0,0127	0,4720
	280	0,8821	0,4376	0,0069	0,4514
	300	0,8063	0,4023	0,0018	0,4058
	320	0,7305	0,3669	0,0033	0,3603
	340	0,6305	0,3071	0,0163	0,3397
	360	0,5547	0,2718	0,0111	0,2941
	380	0,4790	0,2365	0,0060	0,2485
	400	0,4032	0,2011	0,0009	0,2029
	420	0,3274	0,1658	0,0042	0,1573
	440	0,2516	0,1305	0,0094	0,1118
	460	0,1758	0,0951	0,0145	0,0662
	480	0,1000	0,0598	0,0196	0,0206
	495	0,1280	0,1190	0,1100	0,1010

Tabela B.6: Erros percentuais da estimação das posições de falta para o método convencional de um terminal baseado em (3.2)

Res. de Falta (Ω)	Posição da Falta (km)	Erro percentual (%)			
		Metodologia de um terminal baseada em (3.2)			
		v_1	v_2	v_3	v_{luz}
20		2,0574	1,0580	0,0586	0,9408
	20	1,9885	1,0193	0,0501	0,9191
	40	1,8158	0,8861	0,0437	0,9734
	60	1,7400	0,8507	0,0385	0,9278
	80	1,6642	0,8154	0,0334	0,8822
	100	1,5884	0,7801	0,0283	0,8367
	120	1,5126	0,7447	0,0232	0,7911
	140	1,4369	0,7094	0,0181	0,7455
	160	1,3611	0,6741	0,0129	0,6999
	180	1,2853	0,6387	0,0078	0,6544
	200	1,2095	0,6034	0,0027	0,6088
	220	1,1337	0,5681	0,0024	0,5632
	240	1,0579	0,5327	0,0076	0,5176
	260	0,9821	0,4974	0,0127	0,4720
	280	0,8821	0,4376	0,0069	0,4514
	300	0,8063	0,4023	0,0018	0,4058
	320	0,7305	0,3669	0,0033	0,3603
	340	0,6305	0,3071	0,0163	0,3397
	360	0,5547	0,2718	0,0111	0,2941
	380	0,4790	0,2365	0,0060	0,2485
	400	0,4032	0,2011	0,0009	0,2029
	420	0,3274	0,1658	0,0042	0,1573
	440	0,2516	0,1305	0,0094	0,1118
	460	0,1758	0,0951	0,0145	0,0662
	480	0,1000	0,0598	0,0196	0,0206
	495	0,1037	0,0945	0,0852	0,0760

Tabela B.7: Erros percentuais da estimação das posições de falta para o método convencional de um terminal baseado em (3.2)

Res. de Falta (Ω)	Posição da Falta (km)	Erro percentual (%)			
		Metodologia de um terminal baseada em (3.2)			
		v_1	v_2	v_3	v_{luz}
50	5	2,0332	1,0336	0,0339	0,9658
	20	1,9643	0,9948	0,0254	0,9441
	40	1,8158	0,8861	0,0437	0,9734
	60	1,7400	0,8507	0,0385	0,9278
	80	1,6642	0,8154	0,0334	0,8822
	100	1,5884	0,7801	0,0283	0,8367
	120	1,5126	0,7447	0,0232	0,7911
	140	1,4369	0,7094	0,0181	0,7455
	160	1,3611	0,6741	0,0129	0,6999
	180	1,2853	0,6387	0,0078	0,6544
	200	1,2095	0,6034	0,0027	0,6088
	220	1,1337	0,5681	0,0024	0,5632
	240	1,0579	0,5327	0,0076	0,5176
	260	0,9821	0,4974	0,0127	0,4720
	280	0,8821	0,4376	0,0069	0,4514
	300	0,8063	0,4023	0,0018	0,4058
	320	0,7305	0,3669	0,0033	0,3603
	340	0,6548	0,3316	0,0085	0,3147
	360	0,5547	0,2718	0,0111	0,2941
	380	0,4790	0,2365	0,0060	0,2485
	400	0,4032	0,2011	0,0009	0,2029
	420	0,3274	0,1658	0,0042	0,1573
	440	0,2516	0,1305	0,0094	0,1118
	460	0,1758	0,0951	0,0145	0,0662
	480	0,1000	0,0598	0,0196	0,0206
	495	0,0795	0,0700	0,0605	0,0510

Tabela B.8: Erros percentuais da estimação das posições de falta para o método convencional de um terminal baseado em (3.2)

Res. de Falta (Ω)	Posição da Falta (km)	Erro percentual (%)			
		Metodologia de um terminal baseada em (3.2)			
		v_1	v_2	v_3	v_{luz}
100	5	2,0090	1,0091	0,0092	0,9907
	20	1,9643	0,9948	0,0254	0,9441
	40	1,8158	0,8861	0,0437	0,9734
	60	1,7400	0,8507	0,0385	0,9278
	80	1,6642	0,8154	0,0334	0,8822
	100	1,5884	0,7801	0,0283	0,8367
	120	1,5126	0,7447	0,0232	0,7911
	140	1,4369	0,7094	0,0181	0,7455
	160	1,3611	0,6741	0,0129	0,6999
	180	1,2853	0,6387	0,0078	0,6544
	200	1,2095	0,6034	0,0027	0,6088
	220	1,1337	0,5681	0,0024	0,5632
	240	1,0579	0,5327	0,0076	0,5176
	260	0,9821	0,4974	0,0127	0,4720
	280	0,8821	0,4376	0,0069	0,4514
	300	0,8063	0,4023	0,0018	0,4058
	320	0,7305	0,3669	0,0033	0,3603
	340	0,6548	0,3316	0,0085	0,3147
	360	0,5547	0,2718	0,0111	0,2941
	380	0,4790	0,2365	0,0060	0,2485
	400	0,4032	0,2011	0,0009	0,2029
	420	0,3274	0,1658	0,0042	0,1573
	440	0,2516	0,1305	0,0094	0,1118
	460	0,1758	0,0951	0,0145	0,0662
	480	0,1000	0,0598	0,0196	0,0206
	495	0,0795	0,0700	0,0605	0,0510

Tabela B.9: Erros percentuais da estimação das posições de falta para o método convencional de dois terminais baseado em (3.3)

Res. de Falta (Ω)	Posição da Falta (km)	Erro percentual (%)			
		Metodologia de dois terminais baseada em (3.3)			
		v_1	v_2	v_3	v_{luz}
0	5	0,9890	0,4940	0,0010	0,4959
	20	0,9442	0,4797	0,0152	0,4492
	40	0,8200	0,3955	0,0291	0,4536
	60	0,7442	0,3601	0,0240	0,4080
	80	0,6684	0,3248	0,0188	0,3625
	100	0,5926	0,2895	0,0137	0,3169
	120	0,5168	0,2541	0,0086	0,2713
	140	0,4411	0,2188	0,0035	0,2257
	160	0,3653	0,1835	0,0017	0,1801
	180	0,2653	0,1237	0,0179	0,1595
	200	0,1895	0,0883	0,0128	0,1139
	220	0,1137	0,0530	0,0077	0,0684
	240	0,0379	0,0177	0,0026	0,0228
	260	0,0379	0,0177	0,0026	0,0228
	280	0,1137	0,0530	0,0077	0,0684
	300	0,1895	0,0883	0,0128	0,1139
	320	0,2653	0,1237	0,0179	0,1595
	340	0,3653	0,1835	0,0017	0,1801
	360	0,4411	0,2188	0,0035	0,2257
	380	0,5168	0,2541	0,0086	0,2713
	400	0,5926	0,2895	0,0137	0,3169
	420	0,6684	0,3248	0,0188	0,3625
	440	0,7442	0,3601	0,0240	0,4080
	460	0,8200	0,3955	0,0291	0,4536
	480	0,9442	0,4797	0,0152	0,4492
	495	0,9890	0,4940	0,0010	0,4959

Tabela B.10: Erros percentuais da estimação das posições de falta para o método convencional de dois terminais baseado em (3.3)

Res. de Falta (Ω)	Posição da Falta (km)	Erro percentual (%)			
		Metodologia de dois terminais baseada em (3.3)			
		v_1	v_2	v_3	v_{luz}
20	5	0,9890	0,4940	0,0010	0,4959
	20	0,9442	0,4797	0,0152	0,4492
	40	0,8200	0,3955	0,0291	0,4536
	60	0,7442	0,3601	0,0240	0,4080
	80	0,6684	0,3248	0,0188	0,3625
	100	0,5926	0,2895	0,0137	0,3169
	120	0,5168	0,2541	0,0086	0,2713
	140	0,4411	0,2188	0,0035	0,2257
	160	0,3653	0,1835	0,0017	0,1801
	180	0,2653	0,1237	0,0179	0,1595
	200	0,1895	0,0883	0,0128	0,1139
	220	0,1137	0,0530	0,0077	0,0684
	240	0,0379	0,0177	0,0026	0,0228
	260	0,0379	0,0177	0,0026	0,0228
	280	0,1137	0,0530	0,0077	0,0684
	300	0,1895	0,0883	0,0128	0,1139
	320	0,2653	0,1237	0,0179	0,1595
	340	0,3653	0,1835	0,0017	0,1801
	360	0,4411	0,2188	0,0035	0,2257
	380	0,5168	0,2541	0,0086	0,2713
	400	0,5926	0,2895	0,0137	0,3169
	420	0,6684	0,3248	0,0188	0,3625
	440	0,7442	0,3601	0,0240	0,4080
	460	0,8200	0,3955	0,0291	0,4536
	480	0,9442	0,4797	0,0152	0,4492
	495	0,9890	0,4940	0,0010	0,4959

Tabela B.11: Erros percentuais da estimação das posições de falta para o método convencional de dois terminais baseado em (3.3)

Res. de Falta (Ω)	Posição da Falta (km)	Erro percentual (%)			
		Metodologia de dois terminais baseada em (3.3)			
		v_1	v_2	v_3	v_{luz}
50	5	0,9890	0,4940	0,0010	0,4959
	20	0,9442	0,4797	0,0152	0,4492
	40	0,8200	0,3955	0,0291	0,4536
	60	0,7442	0,3601	0,0240	0,4080
	80	0,6684	0,3248	0,0188	0,3625
	100	0,5926	0,2895	0,0137	0,3169
	120	0,5168	0,2541	0,0086	0,2713
	140	0,4411	0,2188	0,0035	0,2257
	160	0,3653	0,1835	0,0017	0,1801
	180	0,2653	0,1237	0,0179	0,1595
	200	0,1895	0,0883	0,0128	0,1139
	220	0,1137	0,0530	0,0077	0,0684
	240	0,0379	0,0177	0,0026	0,0228
	260	0,0379	0,0177	0,0026	0,0228
	280	0,1137	0,0530	0,0077	0,0684
	300	0,1895	0,0883	0,0128	0,1139
	320	0,2653	0,1237	0,0179	0,1595
	340	0,3410	0,1590	0,0231	0,2051
	360	0,4411	0,2188	0,0035	0,2257
	380	0,5168	0,2541	0,0086	0,2713
	400	0,5926	0,2895	0,0137	0,3169
	420	0,6684	0,3248	0,0188	0,3625
	440	0,7442	0,3601	0,0240	0,4080
	460	0,8200	0,3955	0,0291	0,4536
	480	0,9442	0,4797	0,0152	0,4492
	495	0,9890	0,4940	0,0010	0,4959

Tabela B.12: Erros percentuais da estimação das posições de falta para o método convencional de dois terminais baseado em (3.3)

Res. de Falta (Ω)	Posição da Falta (km)	Erro percentual (%)			
		Metodologia de dois terminais baseada em (3.3)			
		v_1	v_2	v_3	v_{luz}
100	5	0,9890	0,4940	0,0010	0,4959
	20	0,9442	0,4797	0,0152	0,4492
	40	0,8200	0,3955	0,0291	0,4536
	60	0,7442	0,3601	0,0240	0,4080
	80	0,6684	0,3248	0,0188	0,3625
	100	0,5926	0,2895	0,0137	0,3169
	120	0,5168	0,2541	0,0086	0,2713
	140	0,4411	0,2188	0,0035	0,2257
	160	0,3410	0,1590	0,0231	0,2051
	180	0,2653	0,1237	0,0179	0,1595
	200	0,1895	0,0883	0,0128	0,1139
	220	0,1137	0,0530	0,0077	0,0684
	240	0,0379	0,0177	0,0026	0,0228
	260	0,0379	0,0177	0,0026	0,0228
	280	0,1137	0,0530	0,0077	0,0684
	300	0,1895	0,0883	0,0128	0,1139
	320	0,2653	0,1237	0,0179	0,1595
	340	0,3410	0,1590	0,0231	0,2051
	360	0,4411	0,2188	0,0035	0,2257
	380	0,5168	0,2541	0,0086	0,2713
	400	0,5926	0,2895	0,0137	0,3169
	420	0,6684	0,3248	0,0188	0,3625
	440	0,7442	0,3601	0,0240	0,4080
	460	0,8200	0,3955	0,0291	0,4536
	480	0,9442	0,4797	0,0152	0,4492
	495	0,9890	0,4940	0,0010	0,4959

Apêndice C

Erros de localização de falta para os métodos de localização de falta não influenciados pela velocidade

C.1 Metodologias não influenciadas pela velocidade da onda

Através dos mesmo instantes de chegada das frentes de onda nos terminais monitorados obtidos para o cálculo dos métodos convencionais, os métodos não influenciados pela velocidade da onda foram calculados. Os resultados são mostrados a seguir.

C.1.1 Metodologia de um terminal

A Tabela C.1 demonstra os erros obtidos para a metodologia de um terminal não influenciada pela velocidade, Equação (3.6), para faltas aplicadas ao longo da linha com resistência de falta iguais a $0\ \Omega$, $20\ \Omega$, $50\ \Omega$ e $100\ \Omega$.

C.1.2 Metodologia de dois terminais

As Tabelas C.2 e C.3 demonstram os erros obtidos para a metodologia de 2 terminais não influenciada pela velocidade baseada respectivamente nas Equações (3.7) e (3.8), para faltas aplicadas ao longo da linha com resistência de falta iguais a $0\ \Omega$, $20\ \Omega$, $50\ \Omega$ e $100\ \Omega$.

Tabela C.1: Erros percentuais da estimação das posições de falta para o método de um terminal não influenciado pela velocidade baseado em (3.6).

Posição da Falta (km)	Erro percentual (%)			
	Resistências de falta			
	0 Ω	20 Ω	50 Ω	100 Ω
5	0,0101	0,0104	0,0106	0,0109
20	0,0168	0,0168	0,0178	0,0178
40	0,0168	0,0168	0,0168	0,0168
60	0,0376	0,0346	0,0129	0,0129
80	0,0297	0,0297	0,0297	0,0297
100	0,0247	0,0247	0,0247	0,0247
120	0,0198	0,0198	0,0198	0,0198
140	0,0148	0,0148	0,0148	0,0148
160	0,0099	0,0099	0,0099	0,0099
180	0,0049	0,0049	0,0049	0,0049
200	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
220	0,0089	0,0089	0,0049	0,0049
240	0,0030	0,0030	0,0030	0,0030
260	0,0030	0,0030	0,0030	0,0030
280	0,0049	0,0049	0,0049	0,0049
300	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
320	0,0049	0,0049	0,0049	0,0049
340	0,0010	0,0010	0,0099	0,0099
360	0,0040	0,0040	0,0040	0,0040
380	0,0069	0,0069	0,0069	0,0069
400	0,0099	0,0099	0,0099	0,0099
420	0,0128	0,0128	0,0089	0,0089
440	0,0158	0,0158	0,0158	0,0158
460	0,0188	0,0188	0,0188	0,0188
480	0,0217	0,0217	0,0217	0,0217
495	0,1096	0,0851	0,0606	0,0606

Tabela C.2: Erros percentuais da estimação das posições de falta para o método de dois terminais não influenciado pela velocidade baseado em (3.7).

Posição da Falta (km)	Erro percentual (%)			
	Resistências de falta			
	0 Ω	20 Ω	50 Ω	100 Ω
5	0,0109	0,0109	0,0109	0,0109
20	0,0168	0,0168	0,0168	0,0168
40	0,0168	0,0168	0,0168	0,0168
60	0,0317	0,0317	0,0129	0,0129
80	0,0257	0,0257	0,0257	0,0257
100	0,0198	0,0198	0,0198	0,0198
120	0,0138	0,0138	0,0138	0,0138
140	0,0079	0,0079	0,0079	0,0079
160	0,0020	0,0020	0,0020	0,0178
180	0,0138	0,0138	0,0138	0,0138
200	0,0099	0,0099	0,0099	0,0099
220	0,0089	0,0089	0,0059	0,0059
240	0,0030	0,0030	0,0030	0,0030
260	0,0030	0,0030	0,0030	0,0030
280	0,0089	0,0089	0,0089	0,0089
300	0,0148	0,0148	0,0148	0,0148
320	0,0208	0,0208	0,0208	0,0208
340	0,0158	0,0158	0,0267	0,0267
360	0,0138	0,0138	0,0138	0,0138
380	0,0119	0,0119	0,0119	0,0119
400	0,0099	0,0099	0,0099	0,0099
420	0,0079	0,0079	0,0089	0,0089
440	0,0059	0,0059	0,0059	0,0059
460	0,0040	0,0040	0,0040	0,0040
480	0,0967	0,0967	0,0967	0,0967
495	0,0617	0,0617	0,0617	0,0617

Tabela C.3: Erros percentuais da estimação das posições de falta para o método de dois terminais não influenciado pela velocidade baseado em (3.8).

Posição da Falta (km)	Erro percentual (%)			
	Resistências de falta			
	0 Ω	20 Ω	50 Ω	100 Ω
5	0,0837	0,0594	0,0351	0,0109
20	0,0168	0,0168	0,0059	0,0059
40	0,0168	0,0168	0,0168	0,0168
60	0,0059	0,0129	0,0129	0,0129
80	0,0089	0,0089	0,0089	0,0089
100	0,0049	0,0049	0,0049	0,0049
120	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010
140	0,0030	0,0030	0,0030	0,0030
160	0,0069	0,0069	0,0069	0,0267
180	0,0208	0,0208	0,0208	0,0208
200	0,0148	0,0148	0,0148	0,0148
220	0,0089	0,0089	0,0089	0,0089
240	0,0030	0,0030	0,0030	0,0030
260	0,0030	0,0030	0,0030	0,0030
280	0,0059	0,0059	0,0059	0,0059
300	0,0099	0,0099	0,0099	0,0099
320	0,0138	0,0138	0,0138	0,0138
340	0,0069	0,0069	0,0178	0,0178
360	0,0030	0,0030	0,0030	0,0030
380	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010
400	0,0049	0,0049	0,0049	0,0049
420	0,0089	0,0089	0,0089	0,0089
440	0,0129	0,0129	0,0129	0,0129
460	0,0168	0,0168	0,0168	0,0168
480	0,0168	0,0168	0,0168	0,0168
495	0,1080	0,0837	0,0594	0,0594