

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

JÚLIO CÉSAR CÂNDIDO VIEIRA

MÉTODO PARA CLASSIFICAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO HVDC BASEADO NA TEORIA DE ONDAS VIAJANTES E EM DADOS MONITORADOS EM UM TERMINAL

Campina Grande – PB

Julho – 2026

JÚLIO CÉSAR CÂNDIDO VIEIRA

MÉTODO PARA CLASSIFICAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO HVDC BASEADO NA TEORIA DE ONDAS VIAJANTES E EM DADOS MONITORADOS EM UM TERMINAL

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências, no domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento da Energia

Washington Luiz Araujo Neves, Ph.D.
Damásio Fernandes Júnior, D.Sc.

Orientadores

Campina Grande – PB

Julho – 2026

Universidade Federal de Campina Grande - UFCG
Sistema de Bibliotecas - SISTEMOTECA
Catalogação de Publicação na Fonte. UFCG - Biblioteca Central

V658m Vieira, Júlio César Cândido.

Método para classificação e localização de faltas em linhas de transmissão HVDC baseado na teoria de ondas viajantes e em dados monitorados em um terminal / Júlio César Cândido Vieira. – 2026.

130 f. : il. color.

Tese (doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2026.

"Orientação: Prof. Dr. Washington Luiz Araujo Neves, Prof. Dr. Damásio Fernandes Júnior".

Referências.

1. Processamento da Energia. 2. Classificação e Localização de Faltas. 3. Sistemas HVDC. 4. Teoria de Ondas Viajantes. 5. Filtro DS. I. Neves, Washington Luiz Araujo. II. Fernandes Júnior, Damásio. III. Título.

UFCG/BC CDU 621.31(043.3)

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECÁRIA SEVERINA SUELI DA SILVA OLIVEIRA CRB-15/225

Método para Classificação e Localização de Faltas em Linhas de Transmissão HVDC Baseado na Teoria de Ondas Viajantes e em Dados Monitorados em um terminal

JÚLIO CÉSAR CÂNDIDO VIEIRA

TESE APROVADA EM 17/07/2026

WASHINGTON LUIZ ARAÚJO NEVES, Ph.D., UFCG
Orientador(a)

DAMÁSIO FERNANDES JÚNIOR, D.Sc. , UFCG
Orientador(a)

BENEMAR ALENCAR DE SOUZA, D.Sc., UFCG
Examinador(a)

KARCIUS MARCELUS COLAÇO DANTAS, D.Sc., UFCG
Examinador(a)

MÁRIO OLESKOVICZ, Dr., USP
Examinador(a)

RAPHAEL LEITE DE ANDRADE REIS, D.Sc., UFPB
Examinador(a)

CAMPINA GRANDE - PB

Processo: 23096.052095/2026-78 Documento: 6733416

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
POS-GRADUACAO EM ENGENHARIA ELETRICA
Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

1 - ATA DA DEFESA PARA CONCESSÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS, NO DOMÍNIO DA ENGENHARIA ELÉTRICA, REALIZADA EM 17 DE JULHO DE 2026.

(Nº 406)

CANDIDATO(A): JÚLIO CÉSAR CÂNDIDO VIEIRA. COMISSÃO EXAMINADORA: BENEMAR ALENCAR DE SOUZA, D.Sc., UFCG - Presidente da Comissão e Examinador Interno, WASHINGTON LUIZ ARAÚJO NEVES, Ph.D., UFCG - Orientador, DAMÁSIO FERNANDES JÚNIOR, D.Sc. , UFCG - Orientador, KARCIUS MARCELUS COLAÇO DANTAS, D.Sc., UFCG - Examinador Interno, MÁRIO OLESKOVICZ, Dr., USP - Examinador Externo, RAPHAEL LEITE DE ANDRADE REIS, D.Sc., UFPB - Examinador Externo. TÍTULO DA TESE: Método para Classificação e Localização de Faltas em Linhas de Transmissão HVDC Baseado na Teoria de Ondas Viajantes e em Dados Monitorados em um terminal ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Processamento da Energia. HORA DE INÍCIO: 15h - LOCAL: Sala Virtual, conforme Art. 5º da PORTARIA SEI Nº 01/PRPG/UFCG/GPR, DE 09 DE MAIO DE 2022. Em sessão pública, após exposição de cerca de 45 minutos, o(a) candidato(a) foi arguido(a) oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização, no tema de sua tese, obtendo conceito APROVADO. Face à aprovação, declara o presidente da Comissão, achar-se o examinado, legalmente habilitado a receber o Grau de Doutor em Ciências, no domínio da Engenharia Elétrica, cabendo a Universidade Federal de Campina Grande, como de direito, providenciar a expedição do Diploma, a que o(a) mesmo(a) faz jus. Na forma regulamentar, foi lavrada a presente ata, que é assinada por mim, Francimário Filho Araújo de Amorim, e os membros da Comissão Examinadora. Campina Grande, 17 de Julho de 2026.

FRANCIMÁRIO FILHO ARAÚJO DE AMORIM
Secretário

BENEMAR ALENCAR DE SOUZA, D.Sc., UFCG
Presidente da Comissão e Examinador Interno

WASHINGTON LUIZ ARAÚJO NEVES, Ph.D., UFCG
Orientador

DAMÁSIO FERNANDES JÚNIOR, D.Sc. , UFCG
Orientador

KARCIUS MARCELUS COLAÇO DANTAS, D.Sc., UFCG
Examinador Interno

MÁRIO OLESKOVICZ,Dr., USP
Examinador Externo

RAPHAEL LEITE DE ANDRADE REIS, D.Sc., UFPB
Examinador Externo

JÚLIO CÉSAR CÂNDIDO VIEIRA
Candidato

2 - APROVAÇÃO

2.1. Segue a presente Ata de Defesa de Tese de Doutorado do candidato JÚLIO CÉSAR CÂNDIDO VIEIRA, assinada eletronicamente pela Comissão Examinadora acima identificada.

Processo: 23096.052095/2026-78 Documento: 6733416

tomaram conhecimento do teor deste documento.

Documento assinado eletronicamente por **FRANCIMARIO FILHO ARAUJO DE AMORIM**, **ASSISTENTE EM ADMINISTRACAO**, em 04/08/2026, às 15:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018.

Documento assinado eletronicamente por **KARCIUS MARCELUS COLACO DANTAS**, **PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 04/08/2026, às 16:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018.

Documento assinado eletronicamente por **Raphael Leite de Andrade Reis**, **Usuário Externo**, em 04/08/2026, às 16:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018.

Documento assinado eletronicamente por **Júlio César Cândido Vieira**, **Usuário Externo**, em 04/08/2026, às 17:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018.

Documento assinado eletronicamente por **DAMASIO FERNANDES JUNIOR**, **PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 04/08/2026, às 21:50, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018.

Documento assinado eletronicamente por **Mário Oleskovicz**, **Usuário Externo**, em 05/08/2026, às 14:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018.

Documento assinado eletronicamente por **WASHINGTON LUIZ ARAUJO NEVES**, **PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 11/08/2026, às 10:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018.

Documento assinado eletronicamente por **BENEMAR ALENCAR DE SOUZA**, **PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 12/08/2026, às 13:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade, informando o código verificador **6733416** e o código CRC **9FADC285**.

Referência: Processo nº 23096.052095/2026-78 SEI nº 6733416

Dedico este trabalho aos meus pais, Lúcia Vieira e Mário Sérgio, que sempre me apoiaram e me incentivaram a perseguir meus sonhos e a acreditar que eles poderiam se tornar realidade.

AGRADECIMENTOS

A Deus, acima de tudo, pelo dom da vida e por toda a força e discernimento que Ele me concede.

Aos meus pais, Lúcia Vieira e Mário Sérgio, pelo amor incondicional, pelos ensinamentos que moldaram meu caráter e por todos os sacrifícios que fizeram para que eu pudesse alcançar meus sonhos.

A minha esposa, Thayanne Jácome, pelo amor compartilhado e por caminhar ao meu lado em todos os desafios e conquistas da vida.

Aos meus orientadores, Damásio Fernandes e Washington Luiz, pela instrução, amizade, acolhimento e por serem verdadeiros incentivadores do meu trabalho.

RESUMO

Esta tese propõe um método para classificação e localização de faltas em LTs de um sistema HVDC (*High Voltage Direct Current*) bipolar baseado na teoria de Ondas Viajantes (OVs) e em dados de tensão monitorados em apenas um terminal do sistema. A principal contribuição do trabalho consiste na proposição de um fator de ajuste da velocidade de propagação das OVs em função da zona de incidência da falta, visando reduzir os erros de localização observados nos métodos clássicos de um terminal. O sistema HVDC analisado foi modelado no ATP e representa o bipolo do Rio Madeira. As LTs foram modeladas a parâmetros distribuídos dependentes da frequência para representar de forma mais realista os fenômenos de atenuação e dispersão das OVs. O filtro *Differentiator-Smoother* (DS) foi utilizado para detectar os instantes de chegada das ondas viajantes. Adicionalmente, foram propostas regras de classificação de faltas baseadas na análise das variações dos sinais de tensão após a incidência da falta. O desempenho do método foi avaliado por meio da simulação de diferentes cenários de falta, considerando variações do tipo, resistência e distância de falta, bem como diferentes níveis de ruído nos sinais monitorados. Os resultados demonstraram que o método de classificação apresentou eficácia média de 98,6%; 99,6% e 75,0% para faltas polo+:terra, polo-:terra e polo:polo, respectivamente, mantendo robustez mesmo sob condições de elevado ruído. A menor eficiência para faltas polo:polo decorre da redução da corrente de curto-circuito para elevadas resistências de falta, tornando a dinâmica dos sinais de tensão semelhante à verificada em faltas monopolares. Na etapa de localização, verificou-se que a proposta de ajuste da velocidade de propagação das OVs reduziu significativamente os erros obtidos pelo método clássico de um terminal, resultando em um erro absoluto médio equivalente a apenas 0,013% do comprimento total da LT. Adicionalmente, constatou-se que a precisão da localização é influenciada pela resistência da falta, pela distância em relação ao terminal de monitoramento e pelo nível de ruído presente nos sinais analisados. Os resultados obtidos demonstram que o método proposto constitui uma alternativa de simples implementação para classificação e localização de faltas em sistemas HVDC, dispensando a utilização de canais de comunicação sincronizados e contribuindo para aumentar a precisão da localização de faltas por meio do ajuste da velocidade de propagação das ondas viajantes.

Palavras-chave: Classificação e localização de faltas, sistemas HVDC, teoria de ondas viajantes, filtro DS.

ABSTRACT

This thesis proposes a fault classification and location method for bipolar High Voltage Direct Current (HVDC) transmission lines based on Traveling Wave (TW) theory and voltage measurements acquired at only one terminal of the system. The main contribution of this work is the proposal of a TW propagation velocity adjustment strategy according to the fault location zone, aiming to reduce the location errors observed in classical one-terminal TW-based fault location methods. The HVDC system analyzed in this work was modeled in ATP and represents the Rio Madeira HVDC bipole. The transmission lines were modeled using a frequency dependent distributed parameter model to provide a more realistic representation of TWs attenuation and dispersion phenomena. The Differentiator-Smoother (DS) filter was employed to detect the arrival instants of the traveling waves. Subsequently, fault classification rules were formulated based on the analysis of voltage signal variations after fault inception. The performance of the proposed method was evaluated by simulation of different fault scenarios, considering variations in fault type, fault resistance, and fault location, as well as different noise levels in the monitored signals. The results demonstrated that the fault classification method achieved average accuracies of 98.6%, 99.6%, and 75.0% for pole+:ground, pole-:ground, and pole:pole faults, respectively, while maintaining robustness even under high noise conditions. The lower accuracy for pole:pole faults is attributed to the reduction in fault current under high fault resistance conditions, making the voltage signal dynamics similar to those observed in pole:ground faults. In the fault location stage, the proposed traveling wave propagation velocity adjustment strategy significantly reduced the errors obtained by the classical one-terminal method, resulting in an average absolute error corresponding to only 0.013% of the total TL length. Furthermore, it was verified that fault location accuracy is influenced by the fault resistance, the distance from the monitoring terminal, and the level of noise present in the analyzed signals. The results obtained demonstrate that the proposed method constitutes a simple and practical alternative for fault classification and location in HVDC systems, eliminating the need for synchronized communication channels and contributing to improved fault location accuracy through the adjustment of traveling wave propagation velocity.

Keywords: Fault classification and location, HVDC systems, traveling waves theory, DS filter.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Sistemas HVDC no Brasil. 25
Figura 2 – Estatísticas de desligamentos nas linhas de transmissão dos sistemas HVDC do Brasil entre os anos 2020 e 2025. 28
Figura 3 – Estatísticas das causas dos desligamentos das linhas de transmissão dos sistemas HVDC do Brasil. 29
Figura 4 – Modelo da LT a parâmetros distribuídos. 31
Figura 5 – Ondas viajantes progressivas e regressivas. 33
Figura 6 – Análise das polaridades das ondas viajantes no diagrama de Bewley para terminação capacitiva: a) Tensão e b) Corrente. 35
Figura 7 – Análise das polaridades das ondas viajantes no diagrama de Bewley para terminação indutiva: a) Tensão e b) Corrente. 36
Figura 8 – Diagrama de Bewley para uma falta no sistema HVDC. 37
Figura 9 – Circuito puro de uma falta do tipo polo:terra na LT de um sistema HVDC. 39
Figura 10 – Coeficientes do Filtro DS: a) Janela de Coeficientes e b) Resposta para entrada em degrau. 42
Figura 11 – Estágios de análise da filtragem para obtenção do ganho unitário do filtro DS. 43
Figura 12 – Resposta do filtro DS para um sinal de entrada em formato de rampa. 44
Figura 13 – Diagrama de Bewley com a representação dos modos aéreo e terra. . 54
Figura 14 – Sistema bipolar HVDC do Rio Madeira. 62
Figura 15 – Impedância do circuito CA, compensadores reativos e filtros nos terminais do a) Retificador e b) Inversor. 63
Figura 16 – Parâmetros do filtro capacitivo. 64
Figura 17 – Parâmetros da torre da LT. 64
Figura 18 – Locais de medição do sinal de tensão na linha de transmissão. 66
Figura 19 – Sinais monitorados no terminal retificador de a) Tensão e b) Corrente. 67
Figura 20 – Coeficientes do filtro DS aplicado aos sinais de tensão e corrente. . . 68
Figura 21 – Resposta em frequência do filtro DS para diferentes valores de T_{DS}. . 70
Figura 22 – Tensões monitoradas nos polos do terminal retificador. 72
Figura 23 – Aplicação do método de detecção de faltas. 73
Figura 24 – Comparação do limiar autoadaptativo com os valores absolutos dos coeficientes DS. 74
Figura 25 – Tensão no sistema HVDC para os diferentes tipos de falta: a) polo+:terra, b) polo-:terra e c) polo:polo. 75
Figura 26 – Parâmetros para aplicação do método de classificação para faltas do tipo: a) polo+:terra e b) polo:polo. 78

Figura 27 – Diagrama de Bewley do sinal de tensão para uma falta aplicada na a) primeira metade e b) segunda metade da LT. 80
Figura 28 – Coeficientes do filtro DS aplicado ao sinal de tensão para uma falta na a) Primeira metade e b) Segunda metade da LT. 81
Figura 29 – Parábolas no gráfico dos coeficientes do filtro DS no processo de detecção dos instantes t_{R1} e t_{R2}. 82
Figura 30 – Interpolação via *spline* para a detecção do instante $t_{R1-ajuste}$. 83
Figura 31 – Diagrama de Bewley para uma falta próxima do terminal de monitoramento. 85
Figura 32 – Diagrama de Bewley considerando a LT dividida em quatro zonas para aplicação da metodologia de localização. 86
Figura 33 – Ajuste de curva utilizando o método dos mínimos quadrados para aplicação da metodologia de localização. 87
Figura 34 – Diagrama de blocos do método proposto para classificação e localização de faltas. 90
Figura 35 – Percentual de acerto do processo de classificação para cada tipo de falta. 91
Figura 36 – *Boxplot* dos valores do índice de simetria do sinal de tensão (r_V) em função do tipo de falta. 92
Figura 37 – Percentual de acerto de classificação em função do tipo e resistência de falta. 93
Figura 38 – Tensão no sistema HVDC para faltas polo:polo com diferentes resistências: a) 1 Ω, b) 50 Ω, c) 200 Ω e d) 500 Ω. 94
Figura 39 – Eficácia do método no processo de classificação de faltas polo:polo com resistência de falta de 200 e 300 Ω. 95
Figura 40 – Percentual de acerto no processo de classificação de faltas em função do ruído do sinal de tensão. 97
Figura 41 – *Boxplot* dos valores dos índices de simetria do sinal de tensão (r_V) para cada falta em função do ruído do sinal. 98
Figura 42 – *Boxplot* dos erros absolutos de localização para cada tipo de falta. . . 99
Figura 43 – Média dos erros absolutos de localização para cada resistência de falta. 100
Figura 44 – Coeficientes do filtro DS aplicado ao sinal de tensão para faltas com resistência igual a 1 Ω, 30 Ω, 100 Ω, 200 Ω, 300 Ω e 500 Ω. 101
Figura 45 – Média dos erros absolutos de localização para cada local de falta. . . 102
Figura 46 – Fenômenos de sobreposição de ondas: a) interferência construtiva e b) interferência destrutiva. 103
Figura 47 – Coeficientes DS para uma falta localizada a 1175 km, 1225 km (meio da LT) e 1275 km do terminal retificador. 104
Figura 48 – Erros absolutos de localização para faltas incidentes no meio da LT. . 105
Figura 49 – Coeficientes DS para uma falta polo:polo com R_f = a) 10 Ω e b) 500 Ω. 106

Figura 50 – *Boxplot* dos erros absolutos de localização para cada método. 108
Figura 51 – Média dos erros absolutos para cada método em função do local de incidência de falta. 109
Figura 52 – Média dos erros absolutos para cada método em função da resistência de falta. 110
Figura 53 – *Boxplot* dos erros absolutos de localização para cada método em função do tipo de falta. 111
Figura 54 – Média dos erros absolutos para cada método em função do tipo de falta.111
Figura 55 – *Boxplot* dos erros absolutos de localização em função do nível de ruído do sinal. 112
Figura 56 – *Boxplot* dos erros absolutos de localização em função do tipo de falta e do nível de ruído do sinal. 113
Figura 57 – Média dos erros absolutos de localização para cada resistência de falta em função do nível de ruído do sinal. 114

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo da revisão bibliográfica. 57
Tabela 2 – Análise comparativa entre a bibliografia utilizada e o método proposto. 59
Tabela 3 – Parâmetros dos transformadores. 63
Tabela 4 – Características de falta. 66
Tabela 5 – Parâmetros obtidos dos sinais de tensão para aplicação do método de classificação de faltas para os exemplos de falta polo+:terra e polo:polo. 79
Tabela 6 – Exemplo da aplicação da interpolação na saída do filtro DS para uma falta incidente a 1.025 km do terminal de monitoramento. 84
Tabela 7 – Fatores de ajuste da velocidade de propagação das OVs em função da zona de incidência de falta. 88

LISTA DE SÍMBOLOS

C	Capacitância
d	Distância da falta em relação ao terminal de monitoramento
d_{est}	Distância da falta estimada pelo método
F_{CS}	Fator característico do sistema
f_1	Onda progressiva de corrente ou tensão
f_2	Onda regressiva de corrente ou tensão
Hz	Hertz
i	Corrente
L	Indutância
l	Comprimento da linha
n	Número de amostras
R	Resistência
R_f	Resistência de falta
t_{R1}	Instante de chegada da primeira frente de onda no terminal retificador
t_{I1}	Instante de chegada da primeira frente de onda no terminal inversor
t_{R2}	Instante de chegada no terminal retificador da segunda frente de onda refletida no ponto de falta
t_{I2}	Instante de chegada no terminal inversor da segunda frente de onda refletida no ponto de falta
t_{I1r}	Instante de chegada no terminal retificador da frente de onda refletida no terminal inversor e refratada no ponto de falta
t_{R1i}	Instante de chegada no terminal inversor da frente de onda refletida no terminal retificador e refratada no ponto de falta
$t_{R1-ajuste}$	Instante de chegada da primeira frente de onda no terminal retificador com a aplicação da interpolação pelo método dos mínimos quadrados
$t_{R2-ajuste}$	Instante de chegada da segunda frente de onda no terminal retificador com a aplicação da interpolação pelo método dos mínimos quadrados

T_{DS}	Duração da janela do filtro *Differentiator-Smoother*
N_{DS}	Número de coeficientes do filtro *Differentiator-Smoother*
G	Ganho do filtro *Differentiator-Smoother*
v_p	Velocidade de propagação das ondas viajantes
v_{p1}	Velocidade de propagação das ondas viajantes no modo aéreo
v_{p0}	Velocidade de propagação das ondas viajantes no modo terra
V_{PRE}	Tensão pré-falta
X	Reatância série da linha de transmissão
Z_S	Impedância característica da linha de transmissão
Z_T	Impedância no terminal de descontinuidade da linha de transmissão
Δx	Comprimento da seção da linha de transmissão
Δt	Taxa de amostragem
k	Fator de ajuste na velocidade de propagação das ondas viajantes
δ	Ângulo da diferença de fase da tensão nos terminais da linha de transmissão em corrente alternada
$\Gamma_{r(v)}$	Coeficiente de reflexão do sinal de tensão
$\Gamma_{t(v)}$	Coeficiente de refração do sinal de tensão
$\Gamma_{r(i)}$	Coeficiente de reflexão do sinal de corrente
$\Gamma_{t(i)}$	Coeficiente de refração do sinal de corrente
ρ	Limiar de detecção autoadaptativo
σ_V	Desvio padrão do sinal de tensão
μ_V	Média dos valores de tensão
$c(t)$	Coeficiente do filtro DS calculado no instante t
$Vrpos, f$	Tensão no polo positivo no instante da falta
$Vrneg, f$	Tensão no polo negativo no instante da falta
$Vrpos, min$	Valor mínimo do sinal de tensão no polo positivo

$Vrneg, max$	Valor máximo do sinal de tensão no polo negativo
ΔVr_{pos}	Variação máxima de tensão no polo positivo
ΔVr_{neg}	Variação máxima de tensão no polo negativo
E_{pos}	Energia transitória associada ao polo positivo
E_{neg}	Energia transitória associada ao polo negativo
r_V	Índice de simetria em magnitude da variação de tensão

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ATP	*Alternative Transients Program*
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
DS	*Differentiator-Smoother*
EA	Erro Absoluto
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
HVAC	*High Voltage Alternating Current*, Alta Tensão em Corrente Alternada
HVDC	*High Voltage Direct Current*, Alta Tensão em Corrente Contínua
IED	*Intelligent Electronic Device*, Dispositivo Eletrônico Inteligente
IGBT	*Insulated Gate Bipolar Transistor*, Transistor Bipolar de Porta Isolada
LCC	*Line Commutated Converters*, Conversor Comutado por Linha
LT	Linha de Transmissão
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
OVs	Ondas Viajantes
PSCAD	*Power Systems Computer Aided Design*
PWM	*Pulse Width Modulation*, Modulação por Largura de Pulso
SE	Subestação
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SIN	Sistema Interligado Nacional
TOV	Teoria de Ondas Viajantes
TWC	Transformada Wavelet Contínua
TWD	Transformada Wavelet Discreta
TWDR	Transformada Wavelet Discreta Redundante
VSC	*Voltage Source Converter*, Conversor Fonte de Tensão

SUMÁRIO

1 Introdução 16
1.1 Motivação 19
1.2 Objetivos 19
1.3 Contribuições 20
1.4 Produção Intelectual 21
1.5 Organização do Trabalho 21
2 Fundamentação Teórica 23
2.1 Fundamentos do Sistema HVDC 23
2.2 Sistemas HVDC no Brasil 25
2.2.1 Projetos HVDC 25
2.2.2 Estatística de Desligamentos de Linhas de Transmissão 27
2.3 Teoria de Ondas Viajantes 29
2.3.1 Linhas de Transmissão a Parâmetros Distribuídos 30
2.3.2 Coeficientes de Reflexão e Refração de Ondas Viajantes 33
2.3.2.1 Terminação Capacitiva 34
2.3.2.2 Terminação Indutiva 35
2.4 Localização de Faltas em Linhas de Transmissão Utilizando a Teoria de Ondas Viajantes 36
2.5 Filtro *Differentiator-Smoother* 40
2.6 Síntese do Capítulo 44
3 Revisão Bibliográfica 46
3.1 Síntese da Revisão Bibliográfica 57
4 Metodologia 61
4.1 Sistema Bipolar HVDC Modelado 61
4.2 Simulações e Sinais Analisados 65
4.3 Método para Classificação e Localização de Faltas 68
4.3.1 Detecção 69
4.3.2 Classificação 74
4.3.3 Localização 79
4.3.4 Fator de Ajuste da Velocidade de Propagação das Ondas Viajantes 84
4.4 Avaliação do Método 89
4.5 Síntese do Capítulo 89
5 Análise dos Resultados 91
5.1 Classificação 91
5.1.1 Análise do Método Proposto 91
5.1.2 Análise com Ruído 96
5.2 Localização 98

5.2.1 Análise do Método Proposto 98
5.2.2 Comparação com os Métodos Clássicos 107
5.2.3 Análise com Ruído 112
5.3 Síntese do Capítulo 115
6 Conclusões 116

REFERÊNCIAS 121

Capítulo 1

Introdução

O acesso à eletricidade e sua utilização desempenham papel fundamental no desenvolvimento econômico e social da sociedade. Nesse contexto, a melhoria operacional do Sistema Elétrico de Potência (SEP) tem sido amplamente estudada, tanto na academia quanto na indústria do setor elétrico. O SEP pode ser dividido em três setores principais: geração, transmissão e distribuição, os quais desempenham funções essenciais para garantir o fornecimento contínuo de energia elétrica.

O sistema de transmissão deve assegurar o transporte eficiente e confiável da energia dos pontos de geração aos centros de consumo, atendendo a critérios técnicos e econômicos. A escolha entre operar em Corrente Alternada (CA) ou Corrente Contínua (CC) depende de fatores como distância e potência a ser transmitida (VIEIRA, 2021; MEAH; ULA, 2007). Tradicionalmente, a CA é amplamente empregada devido à facilidade de transformação dos níveis de tensão por meio de transformadores (MEAH; ULA, 2007). Contudo, o avanço da eletrônica de potência tornou o processo de conversão entre CA e CC tecnicamente viável e eficiente. Nesse cenário, os sistemas de transmissão HVDC, do inglês *High Voltage Direct Current*, consolidaram-se como uma solução cada vez mais adotada no setor elétrico mundial (SETREUS; BERTLING, 2008; VIEIRA, 2021).

A escolha por sistemas HVDC em detrimento do HVAC, do inglês *High Voltage Alternating Current*, é justificada, principalmente, por fatores como a possibilidade de interconectar redes assíncronas, viabilidade técnica e econômica para transmitir grandes blocos de potência a longas distâncias com menor nível de perdas, tensões operacionais comumente mais elevadas, alta controlabilidade de injeção de potência ativa e reativa, melhores limites de estabilidade e capacidade de estabilização do sistema (FERNANDES et al., 2020; JOVCIC, 2019). Na interconexão de redes assíncronas, os terminais do sistema HVDC podem operar como estágios de conversão de frequência. Já na transmissão a longas distâncias, destaca-se o menor nível de perdas de potência quando comparado ao sistema em corrente alternada. Além do sistema HVDC, as linhas em CA com meio comprimento de onda também são consideradas soluções para transmissão a longas distâncias, pois não requerem a compensação de reativos e subestações intermediárias (LOPES; KÜSEL; SILVA, 2016). Entretanto, tais linhas ainda são vistas como promessas, diferentemente dos sistemas HVDC, que já operam em diversos países.

Uma das principais características dos sistemas de transmissão HVDC é a longa extensão de suas Linhas de Transmissão (LTs). Essa característica, associada às diferentes

condições ambientais e geográficas ao longo do trajeto das LTs, aumenta significativamente a probabilidade de ocorrência de faltas (VIEIRA et al., 2023). De acordo com WU et al. (2016), a maioria das faltas verificadas nos sistemas HVDC incide nas LTs, evidenciando a importância de um método rápido e preciso para classificar e localizar tais defeitos. A eficiência de tal método é essencial para garantir o rápido restabelecimento das condições nominais de operação do sistema de transmissão, minimizando prejuízos financeiros a concessionárias de energia, danos a equipamentos e interrupções no fornecimento de energia elétrica.

Nesse contexto, os métodos de localização de faltas baseados na Teoria de Ondas Viajantes (TOV) têm atraído o interesse das concessionárias de transmissão, principalmente por sua imunidade a fontes de erro que comumente afetam as técnicas tradicionais baseadas na análise de componentes fundamentais (LOPES et al., 2019a). Para sistemas HVDC, os métodos baseados em Ondas Viajantes (OVs) se destacam no processo de detecção e localização de faltas. Na ocorrência de uma falta em uma LT, impulsos eletromagnéticos de alta frequência são gerados nos sinais de tensão e corrente, os quais se propagam em direção aos terminais da LT a uma determinada velocidade. Ressalta-se que, ao incidirem sobre descontinuidades do sistema, como os terminais da linha de transmissão, as ondas viajantes sofrem fenômenos de reflexão e refração. Além disso, sua velocidade de propagação é influenciada pelas características eletromagnéticas da linha, incluindo sua geometria, configuração das torres, sistema de aterramento, resistividade do solo, modo de propagação e conteúdo espectral das componentes transitórias (VIEIRA et al., 2022; FERNANDES et al., 2020). Como consequência, a velocidade efetiva das frentes de onda pode variar ao longo da propagação, influenciando diretamente a precisão dos métodos de localização de faltas baseados na teoria de ondas viajantes.

A depender do número de terminais monitorados, os métodos baseados na TOV podem ser classificados em um ou dois terminais. O método de dois terminais utiliza os dados monitorados em ambos os terminais da linha. Dessa forma, este método necessita de um canal de comunicação sincronizado entre os terminais na aplicação em operação em tempo real, o que pode afetar a confiabilidade ou tornar o método sensível a erros de sincronização. Os métodos de um terminal baseiam-se em dados monitorados em um único terminal do sistema, dispensando o monitoramento de ambos os terminais da LT e eliminando a dependência da sincronização de dados. Todavia, ao contrário das técnicas que utilizam dados de dois terminais, o método de um terminal requer informações tanto da primeira frente de onda que se propaga a partir do ponto de falta quanto das ondas refletidas no ponto de falta que retornam ao terminal de monitoramento.

É relevante pontuar que detectar corretamente o instante de chegada da segunda frente de onda refletida é o principal desafio na aplicação dos métodos de um terminal, pois esse instante pode ser confundido com os instantes de chegada, no terminal de

monitoramento, de outras frentes de ondas resultantes dos múltiplos processos de reflexão e refração nas descontinuidades do sistema. Nesse contexto, diversas técnicas têm sido reportadas na literatura para avaliar o sinal obtido no terminal local, dentre as quais pode-se destacar a aplicação das transformadas wavelet, filtros digitais e o filtro *Differentiator-Smoother* (DS) (SCHWEITZER et al., 2014).

As transformadas wavelet permitem decompor uma série de dados originalmente descrita no domínio do tempo, de forma a tornar possível realizar a análise em diferentes escalas de tempo e frequência (MURTHY et al., 2008). Ademais, os filtros digitais FIR (*Finite Impulse Response*) também são empregados na detecção de OVs, porém não dispõem de uma delimitação clara de regiões de interesse no espectro e seu desempenho depende fortemente da escolha dos coeficientes, assim como ocorre com a seleção da wavelet mãe nas transformadas wavelet (COSTA et al., 2011; ZIMATH; RAMOS, 2010). Nesse cenário, o filtro DS apresenta determinadas vantagens em relação às transformadas wavelet e aos filtros FIR para detecção de ondas viajantes, pois como o filtro DS opera diretamente no domínio do tempo, ele não necessita da etapa de decomposição multirresolução e evita a dependência da escolha da wavelet-mãe. Ademais, diferentemente dos filtros FIR, cujo desempenho depende da definição dos coeficientes, o DS fornece resposta mais estável e seletiva às componentes de alta frequência associadas às ondas viajantes. Por outro lado, o desempenho do filtro DS depende da parametrização correta da sua janela de coeficientes (SCHWEITZER et al., 2014; SCHWEITZER et al., 2016).

Ademais, considerando as diferentes técnicas para detecção das frentes de onda, ressalta-se que há trabalhos na literatura que utilizam a TOV para desenvolver métodos de localização de faltas em sistemas HVDC. Em ANDO, SCHWEITZER e BAKER (1985) é proposto um método de localização de faltas por meio da utilização de dados de corrente monitorados em um terminal e uso do limiar de detecção fixo para detecção das faltas. Em SUONAN et al. (2009) é apresentado um método de localização que utiliza as medições de tensão e corrente pós-falta em ambos os terminais da LT. No trabalho apresentado em HOSSAM-ELDIN et al. (2016) foi utilizada a Transformada Wavelet Discreta (TWD) em conjunto com a lógica *fuzzy* para localizar e classificar faltas em um sistema HVDC multiterminal.

Também se destacam trabalhos que comparam métodos baseados na TOV no processo de localização de faltas em sistemas HVDC. Em FERNANDES et al. (2020) foi realizada uma análise comparativa entre diferentes métodos de localização de faltas baseados em OVs, considerando uma modelagem da LT constante e dependente da frequência. Em VIEIRA et al. (2022) foi apresentada uma avaliação comparativa entre a aplicação dos métodos clássicos de um e dois terminais baseados em OVs no processo de localização de faltas em um sistema HVDC.

1.1 MOTIVAÇÃO

No contexto apresentado, nota-se que a transmissão em corrente contínua representa uma tecnologia fundamental para o desenvolvimento dos sistemas elétricos de potência, permitindo integrar centros remotos de geração de energia elétrica aos principais centros de carga por meio de linhas de transmissão com centenas ou milhares de quilômetros de extensão. Entretanto, a elevada extensão dessas linhas faz com que elas permaneçam continuamente expostas à ocorrência de faltas provocadas por descargas atmosféricas, queimadas, vegetação e outros agentes externos. Tal fato reforça a necessidade da rápida identificação e localização do ponto de falta a fim de reduzir o tempo de indisponibilidade do sistema, minimizar os custos de inspeção e manutenção e aumentar a confiabilidade da transmissão de energia elétrica.

Nesse cenário, os métodos de localização de faltas baseados em ondas viajantes destacam-se por apresentarem elevada rapidez e precisão quando comparados às técnicas convencionais fundamentadas na análise da frequência fundamental. Entretanto, conforme será discutido no Capítulo 3, observa-se que os métodos de um terminal ainda apresentam limitações importantes. Entre elas destacam-se a adoção de uma velocidade de propagação constante ao longo da linha de transmissão, apesar de a propagação das ondas viajantes ser influenciada pelas características eletromagnéticas da linha e pelo conteúdo espectral dos transitórios. Destaca-se também a necessidade de identificar previamente quais polos foram afetados pelo distúrbio antes da aplicação da etapa de localização.

Além dessas limitações metodológicas, ressalta-se que, em linhas de transmissão HVDC extensas, pequenas imprecisões na estimativa da posição da falta podem representar erros na ordem de dezenas de quilômetros, aumentando significativamente o tempo necessário para inspeção em campo e para o restabelecimento da transmissão. Dessa forma, torna-se relevante investigar estratégias capazes de aumentar a precisão dos métodos de localização, preservando simultaneamente as vantagens inerentes às técnicas baseadas em medições realizadas em apenas um terminal, tais como menor complexidade de implementação, menor custo e independência de sistemas de sincronização temporal.

1.2 OBJETIVOS

Considerando a relevância do problema descrito e o crescente interesse do setor elétrico por soluções que auxiliem a identificação de defeitos em linhas de transmissão HVDC, o principal objetivo deste trabalho é propor um método de classificação e localização de faltas em um sistema HVDC bipolar. Tal método é baseado na teoria de ondas viajantes e necessita do monitoramento dos sinais de tensão em apenas um terminal do

sistema. Destaca-se ainda que os sinais de tensão são analisados via aplicação do filtro *differentiator-smoother*.

Para tanto, os objetivos específicos da pesquisa são:

- Elaborar regras para classificar as faltas no sistema HVDC baseadas na análise da variação dos sinais de tensão monitorados em ambos os polos do terminal retificador;
- Propor uma adaptação na aplicação do método clássico de um terminal de localização de faltas baseado em OVs a fim de reduzir o impacto da variação da v_p em função da distância de falta;
- Avaliar as potencialidades e limitações do método e validar a metodologia proposta considerando diferentes características de faltas nas LTs.

1.3 CONTRIBUIÇÕES

Embora seja vasta a literatura sobre a aplicação de ondas viajantes no processo de identificação de faltas incidentes em linhas de transmissão de sistemas HVDC, ainda são verificados desafios no processo de localização e classificação. Dentre tais desafios, destaca-se a necessidade do conhecimento da velocidade de propagação das ondas viajantes para aplicação do método clássico de um terminal. Todavia, tal velocidade pode variar em função das características de falta e dos parâmetros do sistema. Além disso, poucos trabalhos avaliam de forma abrangente a influência das diferentes características de falta (resistência, tipo e distância) e da inserção de ruído aos sinais monitorados na eficácia dos métodos propostos. No que se refere à etapa de classificação, observa-se a necessidade de métodos menos dependentes dos parâmetros específicos do sistema, ampliando sua aplicabilidade em diferentes cenários operativos.

Motivado pelas lacunas identificadas, este trabalho propõe um método para classificação e localização de faltas em linhas de transmissão de sistemas HVDC. O método baseia-se na teoria de ondas viajantes e utiliza o filtro DS para analisar os sinais de tensão monitorados em um único terminal do sistema HVDC. Essa abordagem elimina a necessidade de canais de comunicação sincronizados entre os terminais, reduzindo custos de instalação e manutenção. Na etapa de classificação de faltas, é proposto um índice relativo de comparação para analisar o nível de variação de tensão após a incidência de falta. Já na etapa de localização, propõe-se um fator de ajuste na velocidade de propagação das ondas viajantes na aplicação do método clássico de um terminal a fim de reduzir os impactos da consideração de uma v_p fixa.

1.4 PRODUÇÃO INTELECTUAL

O desenvolvimento desta pesquisa resultou nas seguintes publicações:

- VIEIRA, J. C. C.; FERNANDES JR., D.; NEVES, W. A.; LOPES, F. V. Fault Diagnosis in Bipolar HVDC Systems Based on Traveling Wave Theory by Monitoring Data From One Terminal. Electric Power Systems Research (EPSR), v.2023, p.109594, 2023.
- VIEIRA, J. C. C.; FERNANDES JR., D.; NEVES, W. A.; LOPES, F. V. Challenges in Application of the Traveling Wave-Based Fault Location Methods Applied to HVDC Systems: Evaluation of Classical One- and Two-Terminal Methods. 20th International Conference on Harmonics Quality of Power (ICHQP), 2022.
- VIEIRA, J. C. C.; FERNANDES JR., D.; NEVES, W. A. Um Método para Diagnóstico de Faltas em Sistema HVDC Utilizando Dados de Um Terminal e Transformada Wavelet. XIV Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia Elétrica (CBQEE), 2021.
- VIEIRA, J. C. C.; FERNANDES JR., D.; NEVES, W. A. Diagnóstico Completo de Faltas em Um Sistema HVDC Baseado na Teoria de Ondas Viajantes e em Dados de Monitoramento de Um Terminal. XV Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI), 2021.

Além disso, as pesquisas realizadas resultaram na seguinte submissão:

- VIEIRA, J. C. C.; FERNANDES JR., D.; NEVES, W. A. Improved Traveling-Wave-Based Fault Classification and Location in Bipolar HVDC Transmission Lines Using One-Terminal Voltage Measurements. IEEE Open Access Journal of Power and Energy (OAJPE).

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Além do presente capítulo introdutório, esta tese está organizada de acordo com a seguinte estrutura de capítulos:

- No capítulo 2 são apresentados os conceitos acerca dos sistemas HVDC, da teoria de ondas viajantes, da localização de faltas via ondas viajantes e do filtro *differentiator-smoother*;
- No capítulo 3 é apresentada a revisão bibliográfica dos principais métodos de classificação e localização de faltas em sistemas HVDC encontrados na literatura e analisados nesta pesquisa;

- No capítulo 4 é apresentado o método proposto para a classificação e localização de faltas em um sistema HVDC bipolar;
- No capítulo 5 são apresentados os principais resultados da pesquisa;
- No capítulo 6 são apresentadas as conclusões acerca da pesquisa e propostas para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

De forma majoritária, os sistemas de transmissão operam em corrente alternada, devido principalmente à possibilidade de alterar o nível de tensão via os transformadores de potência. Entretanto, esta forma de transmissão apresenta algumas limitações relacionadas à transmissão de grandes blocos de potência a longas distâncias e à impossibilidade de conectar sistemas assíncronos. Dessa forma, com o avanço tecnológico da eletrônica de potência, a transmissão HVDC vem se destacando na operação de sistemas elétricos atuais.

A fim de avaliar a viabilidade da utilização de sistemas de transmissão em corrente contínua, nesta seção serão apresentados os fundamentos teóricos da operação do sistema de transmissão HVDC, os projetos HVDC do sistema elétrico nacional e uma análise estatística acerca da taxa de perturbações em linhas de transmissão HVDC no Brasil. Destaca-se também o detalhamento acerca da teoria de ondas viajantes e do filtro *differentiator-smoother*, que constituem a base para implementação do método proposto para classificação e localização de faltas no sistema HVDC.

2.1 FUNDAMENTOS DO SISTEMA HVDC

A tecnologia de transmissão em corrente contínua em alta tensão tem se destacado como uma alternativa robusta e eficiente aos sistemas em corrente alternada, especialmente em aplicações que envolvem a transmissão de grandes blocos de potência a longas distâncias ou a necessidade de interligação entre sistemas assíncronos. Embora a corrente alternada tenha se disseminado desde o início do século XX devido à facilidade de transformação de níveis de tensão e ao uso difundido de motores de indução (MEAH; ULA, 2007), ela apresenta limitações relacionadas ao efeito pelicular, às perdas elevadas no caso de transmissão a longas distâncias e à necessidade de fornecer suporte reativo ao longo das LTs (ROBERT, 2000).

A potência transmitida em corrente alternada depende diretamente da reatância série da linha, que aumenta de forma proporcional ao comprimento da LT. Assim, em distâncias elevadas, a capacidade de transmissão é limitada, exigindo a implantação de compensação reativa. Em contraste, os sistemas HVDC não sofrem os mesmos efeitos da reatância e podem transmitir grandes blocos de potência com menores perdas, apresentando-se como solução preferencial em projetos acima de 600 km para linhas

aéreas e acima de 80 km para cabos submarinos (PIERRI et al., 2017; PILLAY; KABEYA; DAVIDSON, 2020). Complementarmente, o HVDC permite a interconexão de redes assíncronas, viabilizando o fluxo de potência entre sistemas que operam com frequências elétricas distintas (PRACA et al., 1996).

O avanço da eletrônica de potência foi fundamental para a consolidação dos sistemas HVDC. Atualmente, há duas tecnologias principais de conversores: Conversor Comutado por Linha (LCC), do inglês *Line Commutated Converter*, e Conversor Fonte de Tensão (VSC), do inglês *Voltage Source Converter*. Os conversores LCC utilizam tiristores, cuja comutação depende da rede CA, atuando como fontes de corrente e exigindo compensação reativa significativa. Embora amplamente empregados em sistemas de grande porte, apresentam limitações relevantes, como incapacidade de operar em redes fracas e alto impacto harmônico (ARRILLAGA; LIU; WATSON, 2007; SHARMA, 2013). Já os conversores VSC utilizam IGBTs, que são autocomutáveis, operam em alta frequência e permitem controle independente de potência ativa e reativa. Dessa forma, tais conversores viabilizam a flexibilidade de fluxo de potência em ambos os sentidos e possibilitam o uso em redes fracas, caracterizadas por um baixo nível de curto-circuito (BARNES et al., 2017; CHUCO; WATANABE, 2010).

Além disso, os sistemas de transmissão em corrente contínua são classificados de acordo com a quantidade de linhas de transmissão e conversores, polaridade das tensões dos conversores e arranjo entre eles (SILVA JR., 2018). A classificação dos esquemas de transmissão HVDC é baseada na divisão em três grupos principais: transmissão ponto a ponto, *back-to-back* e multiterminal.

A configuração ponto a ponto é a mais comum e pode ser implementada nos modos monopolar, bipolar ou homopolar, conforme a polaridade e o número de condutores utilizados (RASHID, 2010). O arranjo *back-to-back*, por sua vez, é aplicado para interligar redes em corrente alternada assíncronas, sendo amplamente utilizado em fronteiras elétricas, como nos sistemas Garabi e Melo, que conectam os sistemas elétricos do Brasil-Argentina e Brasil-Uruguai, respectivamente. Já as ligações multiterminais, embora mais complexas em termos de proteção e controle, têm ganhado destaque com o avanço dos conversores VSC, possibilitando a formação de redes em malha para integração de grandes blocos de geração renovável, a exemplo das iniciativas europeias voltadas ao conceito de *SuperGrid* (SOARES et al., 2020; SONGLI; RENFENG; QIAN, 2015).

Nesse contexto, a comparação entre sistemas HVAC e HVDC demonstra que os sistemas de transmissão em corrente contínua desempenham um papel central na expansão e modernização dos sistemas elétricos de potência atuais. Esses sistemas viabilizam aplicações inviáveis ou menos eficientes em corrente alternada, oferecendo maior robustez operacional, flexibilidade de controle e capacidade de integração de grandes fontes de geração remota — características essenciais no contexto atual de

diversificação da matriz energética e ampliação da geração renovável.

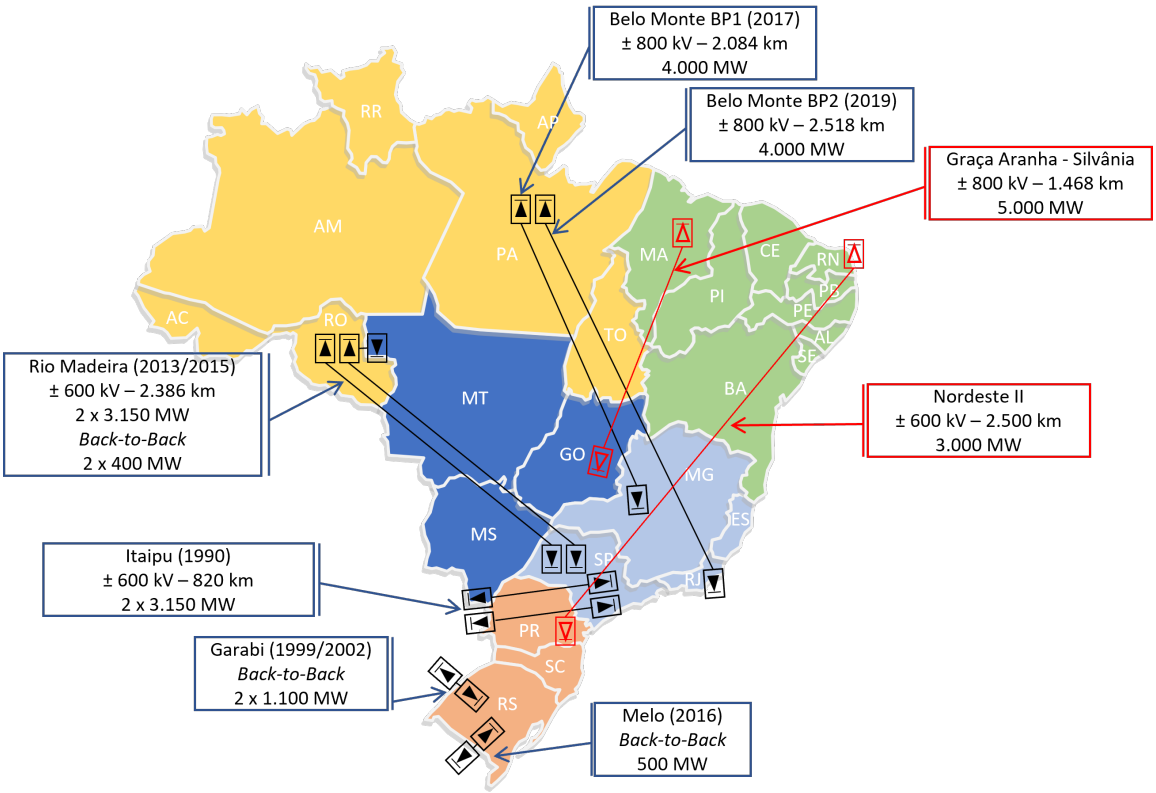
2.2 SISTEMAS HVDC NO BRASIL

2.2.1 Projetos HVDC

O desenvolvimento de sistemas HVDC no Brasil foi realizado com base em estudos de planejamento e de viabilidade técnica e econômica. À época, tais estudos foram motivados pela necessidade de utilização da energia produzida pelas grandes usinas hidrelétricas planejadas entre as décadas de 1970 e 1980, situadas em regiões distantes dos principais centros de consumo do país.

Atualmente, o Brasil conta com seis extensas linhas de transmissão HVDC em operação comercial, somando cerca de 18.750 km de extensão, o que representa aproximadamente 10,6% do total de 176.169 km de linhas de transmissão em operação até 2024. Além dos sistemas HVDC bipolares, no Brasil há três sistemas *back-to-back* em operação. Na Figura 1 está apresentada a evolução da tecnologia HVDC no sistema elétrico brasileiro, destacando as principais características dos projetos, como potência nominal, extensão das linhas de transmissão e ano de entrada em operação comercial.

Figura 1 – Sistemas HVDC no Brasil.



Fonte: Próprio autor.

A tecnologia de transmissão HVDC foi implementada no Brasil pela primeira

vez para integrar a energia gerada pela usina hidrelétrica de Itaipu ao sistema elétrico brasileiro. Este sistema foi projetado para transmitir energia elétrica por cerca de 800 km, conectando a estação retificadora de Foz do Iguaçu à inversora de Ibiúna, possibilitando a interligação entre os sistemas de 50 Hz do Paraguai e 60 Hz do Brasil (PRACA et al., 1996).

Posteriormente, a entrada em operação das conversoras Melo e Garabi permitiu a interligação entre Brasil-Uruguai e Brasil-Argentina, respectivamente. Tais sistemas operam no modo *back-to-back* para conversão de frequência de 50 Hz para 60 Hz e vice-versa. Tais interligações foram concebidas para operarem com fluxo de energia nos dois sentidos: a importação de energia é realizada por meio de ofertas semanais de energia elétrica, na fronteira com o Brasil, ao Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

A tecnologia de transmissão HVDC tornou-se uma alternativa para a conexão de grandes polos de geração de energia aos grandes centros de carga. Assim, para escoar a geração produzida pelas usinas hidrelétricas Santo Antônio e Jirau, no Rio Madeira, foram construídos dois bipolos HVDC, interligando a subestação Coletora Porto Velho, em Rondônia, à SE Araraquara II, em São Paulo. Na SE Coletora Porto Velho, além dos dois bipolos, foi instalada uma estação conversora do tipo *back-to-back*, possibilitando o suprimento elétrico ao sistema Acre-Rondônia com a energia das usinas do Madeira (VIANNA; MONTEIRO; SILVA, 2019).

O último sistema HVDC a entrar em operação comercial no Brasil foi o de Belo Monte, que foi projetado para escoar a geração da UHE Belo Monte para a região Sudeste. A energia é transmitida por duas LTs em corrente contínua de $\pm$800 kV: o Bipolo I interliga a SE Xingu, no Pará, à subestação de Estreito, em Minas Gerais, e o Bipolo II percorre aproximadamente 2.439 km até a SE Terminal Rio, no Rio de Janeiro. Diferentemente de outros elos de corrente contínua do SIN, os bipolos de Xingu estão integrados ao sistema CA existente, oferecendo flexibilidade no controle de fluxo e elevando a complexidade de operação (NEVES et al., 2019).

Adicionalmente, no âmbito do planejamento da expansão do sistema de transmissão, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) identificou a necessidade de expandir a capacidade das interligações entre as regiões Norte/Nordeste e Sudeste/Centro-Oeste, considerando a crescente oferta de geração renovável no Nordeste (EPE, 2021). Nesse contexto, para garantir o escoamento da geração excedente prevista para a região Norte/Nordeste, a EPE recomendou dois novos corredores expressos de transmissão de alta tensão em corrente contínua, interligando essa região ao Sudeste/Centro-Oeste, além de reforços adicionais na malha de transmissão em corrente alternada existente, conforme apresentado nos estudos EPE (2023) e EPE (2025).

A implantação do primeiro corredor em corrente contínua para interligar as regiões Norte/Nordeste e Sudeste foi recomendada pelo estudo realizado em EPE (2023). Este corredor é composto pelo sistema HVDC, em $\pm$ 800 kV e capacidade nominal de 5 GW, denominado "Bipolo Graça Aranha-Silvânia", que interliga a subestação Graça Aranha, no Maranhão, à subestação Silvânia, no Goiás. Esse novo sistema HVDC já foi outorgado via o Leilão de Transmissão ANEEL nº 002/2023 e tem data contratual para entrada em operação comercial em 2030.

Adicionalmente, de modo a atender a necessidade de ampliação da capacidade de exportação de energia da região Nordeste e a de importação da região Sul, a EPE recomendou, via o estudo EPE (2025), a implantação de um novo sistema HVDC bipolar, que será interligado ao SIN via estações conversoras localizadas nos estados do Rio Grande do Norte e Paraná. Destaca-se que esse será o primeiro sistema HVDC a utilizar a tecnologia VSC nos conversores de potência. No contexto brasileiro, a escolha pela tecnologia VSC-HVDC é justificada pela necessidade de integrar grandes blocos de geração renovável em regiões com redes fracas, garantir suporte de tensão e permitir uma operação mais flexível. Diferentemente do LCC, que exige uma rede forte e significativa compensação reativa, o VSC oferece controle independente de potência ativa e reativa, tornando-se mais adequado às condições operativas e aos desafios de expansão do SIN.

Como se sabe, o Brasil é um país com dimensões continentais, com diferentes regimes hidrológicos e diversidade energética entre as sub-regiões eletro-geográficas, o que reitera a necessidade de utilizar recursos de transmissão para otimizar o custo da operação do SIN. Neste cenário, os sistemas HVDC vêm sendo de sobremaneira importantes ao sistema elétrico nacional pois possibilitam o escoamento de grandes blocos de geração até as regiões de maior demanda, além de permitir a interconexão elétrica com países vizinhos da América do Sul, que operam com uma frequência nominal distinta do sistema elétrico brasileiro.

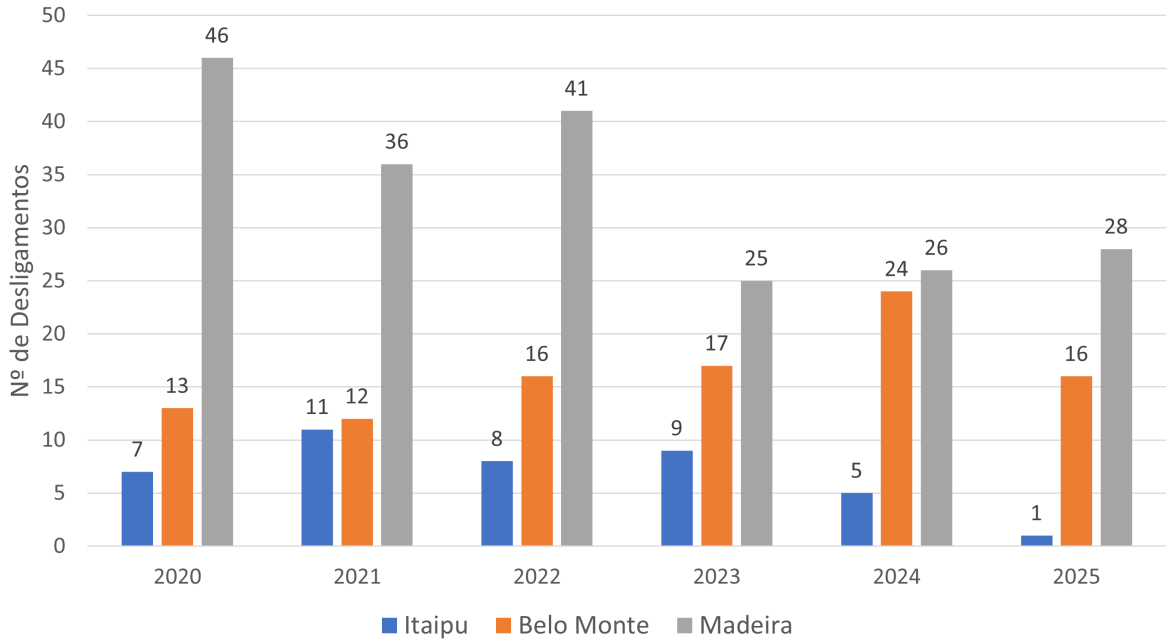
2.2.2 Estatística de Desligamentos de Linhas de Transmissão

Baseado na análise dos sistemas HVDC apresentados na Figura 1, verifica-se que todos os sistemas HVDC bipolares no Brasil apresentam linhas de transmissão de grande extensão, variando entre 800 e 2.500 km. Para efeito de comparação, a linha de transmissão mais longa em CA na Rede Básica do sistema elétrico brasileiro é a LT 500 kV Xingu - Serra Pelada, com 443 km de extensão (ONS, 2026). Consequentemente, as linhas dos sistemas HVDC percorrem diversas regiões, cada uma com condições atmosféricas e geográficas distintas. Esse fato eleva a probabilidade de faltas nas linhas de transmissão, o que pode resultar em desligamentos forçados na sua função de transmissão.

Nesse âmbito, foi realizada uma análise estatística sobre os desligamentos forçados das linhas de transmissão dos sistemas HVDC bipolares em operação no Brasil. De

acordo com ONS (2026), os desligamentos forçados nas linhas de transmissão da Rede Básica são provocados, predominantemente, por causas de origem interna. A origem do desligamento é classificada como interna quando a causa se relaciona com as partes principais do componente em análise, em geral energizadas (ONS, 2026). Nesse contexto, na Figura 2 é apresentado o número de desligamentos das linhas de transmissão, causados por origem interna, dos sistemas HVDC de Itaipu, Belo Monte e Madeira no período de 2020 a 2025.

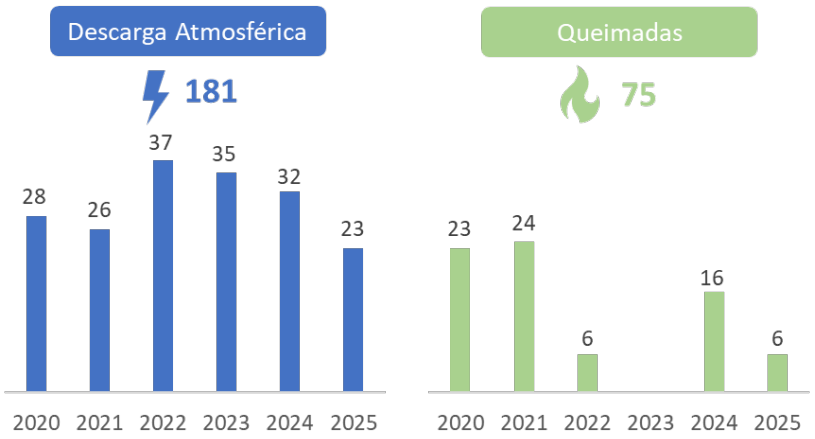
Figura 2 – Estatísticas de desligamentos nas linhas de transmissão dos sistemas HVDC do Brasil entre os anos 2020 e 2025.



Fonte: Adaptado de ONS (2026).

Com base na análise dos dados apresentados na Figura 2, observou-se um total de 341 desligamentos forçados nas LTs dos sistemas HVDC, causados por origem interna, entre os anos de 2020 e 2025.Dentre os 341 casos de desligamentos, um total de 256 foram causados por descargas atmosféricas ou queimadas, conforme consta no levantamento estatístico apresentado na Figura 3.

Figura 3 – Estatísticas das causas dos desligamentos das linhas de transmissão dos sistemas HVDC do Brasil.



Fonte: Adaptado de ONS (2026).

Baseado na análise estatística apresentada, conclui-se que as descargas atmosféricas e as queimadas representam as principais causas de desligamento nas LTs dos sistemas HVDC. Nesse contexto, a elevada incidência de faltas em linhas de transmissão de sistemas HVDC torna essencial a realização de um diagnóstico rápido e preciso dessas ocorrências. Tal diagnóstico é fundamental para reduzir o tempo de indisponibilidade da função de transmissão e aumentar a confiabilidade do suprimento de energia elétrica. Para a localização de faltas em linhas de transmissão, diversas concessionárias utilizam equipamentos baseados na teoria das ondas viajantes. Os fundamentos teóricos dessa técnica são apresentados na seção a seguir.

2.3 TEORIA DE ONDAS VIAJANTES

Todos os sistemas de transmissão de energia elétrica, até mesmo os mais robustos, estão sujeitos a alterações em suas condições nominais de operação, que podem ser causadas, por exemplo, por faltas incidentes nas linhas de transmissão. Dessa forma, desde o início do projeto de uma LT deve-se considerar o estudo acerca do sistema de proteção desta linha com relação às faltas que podem ocorrer no sistema.

No que tange ao processo de recomposição do sistema após a incidência do distúrbio, a detecção e a localização imediata das falhas nas linhas de transmissão podem acelerar a restauração dos valores nominais de operação do sistema e, consequentemente, reduzir o tempo em que a linha fica indisponível para operação e assegurar a confiabilidade do sistema (ANDRADE; LEÃO, 2012).

Os métodos de localização de faltas em LT podem ser classificados de acordo com as técnicas utilizadas no algoritmo de detecção das falhas. Tais técnicas podem

ser baseadas na teoria de ondas viajantes, componentes de frequência fundamental, impedâncias, inteligência artificial e métodos híbridos (MIRZAEI et al., 2009).

Como reportado na literatura, as técnicas que empregam componentes de frequência não podem ser aplicadas na transmissão HVDC, devido à ausência da componente oscilatória fundamental. Além disso, um estudo realizado por KRZYSZTOF, KOWALIK e RASOLOMAMPIONONA (2011) mostrou que a TOV apresentou um desempenho mais eficiente do que os métodos baseados em impedância nas aplicações HVDC.

2.3.1 Linhas de Transmissão a Parâmetros Distribuídos

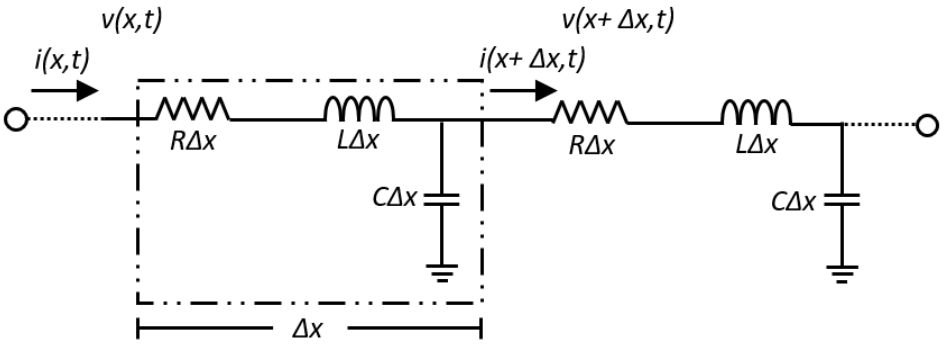
O conjunto de linhas de transmissão representa um dos principais elementos do sistema de transmissão de energia elétrica. As LTs apresentam diferentes características que dependem, dentre outros fatores, do tipo de transmissão (corrente alternada ou contínua), nível de potência do sistema e das condições climáticas e ambientais dos terrenos em que a LT percorre. Em simulações, as LTs comumente podem ser modeladas de duas formas distintas: a parâmetros concentrados ou distribuídos.

O modelo a parâmetros concentrados é uma das formas mais simples de representar a LT. Esta representação assume que os parâmetros da linha são constantes e definidos em uma determinada frequência, comumente a fundamental. Os parâmetros de resistência, indutância e capacitância por unidade de comprimento são considerados constantes em qualquer ponto da linha.

Na ocorrência de uma falta em um determinado ponto da LT, ondas eletromagnéticas de tensão e corrente são produzidas e se propagam para ambos os terminais da linha. Na representação da LT com parâmetros concentrados, tais ondas são instantaneamente identificadas nos dois terminais. Todavia, na operação em tempo real dos sistemas elétricos, isto não ocorre, pois há um intervalo de tempo necessário para uma onda eletromagnética se propagar de um terminal a outro da linha, conhecido como tempo de trânsito. Este intervalo de tempo pode ser considerado desprezível na maioria das aplicações para linhas curtas. Entretanto, à medida que o comprimento da linha aumenta, as variações de tensão e corrente nos terminais da linha deixam de ser instantaneamente identificadas, de modo que um modelo mais preciso das linhas se faz necessário, como o modelo de LT a parâmetros distribuídos (REIS, 2019).

No modelo a parâmetros distribuídos, a resistência, indutância e capacitância da linha são consideradas distribuídas ao longo da sua extensão. Na Figura 4 estão representadas duas seções de uma linha com comprimento Δx, cada. Os parâmetros R, L e C representam a resistência, indutância e capacitância por unidade de comprimento e v e i representam a tensão e corrente, respectivamente.

Figura 4 – Modelo da LT a parâmetros distribuídos.



Fonte: Adaptado de ZANETTA JR. (2003).

Considerando apenas a seção com comprimento Δx em destaque na Figura 4 e aplicando as leis de Kirchhoff no circuito, tem-se que:

$$v(x,t) - v(x+\Delta x,t) = R\Delta x.i(x,t) + L\Delta x.\frac{\partial i(x,t)}{\partial t}, \tag{2.1}$$

$$i(x,t) - i(x+\Delta x,t) = C\Delta x.\frac{\partial v(x+\Delta x,t)}{\partial t}. \tag{2.2}$$

Por meio da aplicação da transformada de Laplace nas Equações (2.1) e (2.2) para condições iniciais nulas, obtém-se:

$$\frac{V(x+\Delta x,s) - V(x,s)}{\Delta x} = -(R+sL).I(x,s), \tag{2.3}$$

$$\frac{I(x+\Delta x,s) - I(x,s)}{\Delta x} = -sC.V(x,s). \tag{2.4}$$

Aplicando o limite nas Equações (2.3) e (2.4) quando o termo Δx tende a zero, tem-se que a derivada da tensão e corrente em relação a x é dada por:

$$\frac{\partial V(x,s)}{\partial x} = -(R+sL).I(x,s), \tag{2.5}$$

$$\frac{I(x,s)}{\partial x} = -sC.V(x,s). \tag{2.6}$$

Derivando a Equação (2.5) em relação a x, tem-se que:

$$\frac{\partial^2 V(x,s)}{\partial x^2} = -(R+sL).\frac{I(x,s)}{\partial x}. \tag{2.7}$$

Substituindo a Equação (2.6) em (2.7), obtém-se:

$$\frac{\partial^2 V(x,s)}{\partial x^2} = (R + sL).sC.V(x,s). \tag{2.8}$$

De forma análoga, a derivada parcial segunda da corrente em relação a x é dada pela Equação (2.9).

$$\frac{\partial^2 I(x,s)}{\partial x^2} = (R + sL).sC.I(x,s). \tag{2.9}$$

Para uma linha de transmissão sem perdas, em que a resistência R é nula, obtêm-se das Equações (2.8) e (2.9):

$$\frac{\partial^2 V(x,s)}{\partial x^2} = s^2.L.C.V(x,s), \tag{2.10}$$

$$\frac{\partial^2 I(x,s)}{\partial x^2} = s^2.L.C.I(x,s). \tag{2.11}$$

De acordo com ZANETTA JR. (2003), as soluções das Equações (2.10) e (2.11) no domínio da frequência são dadas pelas Equações (2.12) e (2.13), respectivamente.

$$V(x,s) = V^+(0,s).e^{-\gamma(s)x} + V^-(0,s).e^{+\gamma(s)x}, \tag{2.12}$$

$$I(x,s) = I^+(0,s).e^{-\gamma(s)x} - I^-(0,s).e^{+\gamma(s)x}, \tag{2.13}$$

em que $\gamma(s) = s/v$ para $v = 1/\sqrt{LC}$. O parâmetro v representa a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas para uma linha de transmissão sem perdas. Os termos $V^+(0,s)$, $V^-(0,s)$, $I^+(0,s)$ e $I^-(0,s)$ são as condições de contorno que representam o sinal de tensão e corrente no ponto de origem do sistema em análise.

Substituindo a solução geral da Equação (2.12) em (2.5) e isolando o termo $\gamma(s)$, obtém-se:

$$I(x,s) = \frac{\gamma(s)}{sL}.(V^+(0,s).e^{-\gamma(s)x} - V^-(0,s).e^{+\gamma(s)x}). \tag{2.14}$$

Realizando a substituição $\gamma(s) = s\sqrt{LC}$ na Equação (2.14), obtém-se:

$$I(x,s) = \frac{1}{Z_s}.(V^+(0,s).e^{-\gamma(s)x} - V^-(0,s).e^{+\gamma(s)x}), \tag{2.15}$$

em que $Z_s = \sqrt{\frac{L}{C}}$ é a impedância de surto da LT.

As soluções no domínio do tempo das Equações (2.12) e (2.15) são obtidas por meio da aplicação da transformada inversa de Laplace. Logo, tem-se que:

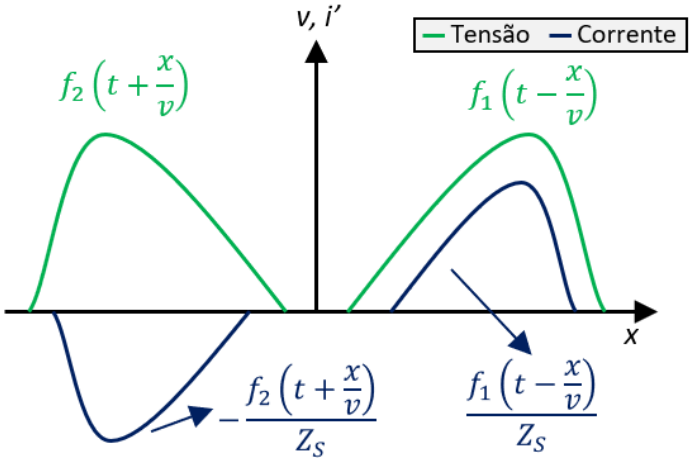
$$v(x,t) = f_1(0, t - \frac{x}{v}) + f_2(0, t + \frac{x}{v}), \tag{2.16}$$

$$i(x,t) = \frac{1}{Z_s}\Big[f_1(0, t - \frac{x}{v}) - f_2(0, t + \frac{x}{v})\Big], \tag{2.17}$$

em que f_1 é a onda que se propaga no sentido positivo de x, sendo denominada de onda progressiva, já f_2 representa a onda que se propaga no sentido negativo de x (onda regressiva).

Na ocorrência de um distúrbio na linha de transmissão, as ondas de tensão e corrente se propagam ao longo da extensão da LT de acordo com as Equações (2.16) e (2.17), respectivamente. Na Figura 5 é apresentada a propagação das ondas progressivas e regressivas de tensão e corrente para uma falta na LT.

Figura 5 – Ondas viajantes progressivas e regressivas.



Fonte: Próprio autor.

De acordo com a Figura 5, as ondas progressivas e regressivas apresentam a mesma polaridade para o sinal de tensão. Para a corrente, tais ondas apresentam polaridades distintas.

2.3.2 Coeficientes de Reflexão e Refração de Ondas Viajantes

As ondas de tensão e corrente apresentadas na Figura 5 se propagam da forma apresentada até atingirem um ponto de descontinuidade na LT. Tais descontinuidades podem existir devido à presença de circuitos com parâmetros concentrados, como resistores, indutores e capacitores, ou mesmo na forma de parâmetros distribuídos, como linhas de transmissão com características diferentes (ZANETTA JR., 2003).

No ponto de descontinuidade, uma parte da onda incidente é refletida e a outra é refratada. Os fenômenos de reflexão e refração das ondas são definidos por meio

de coeficientes que dependem da impedância característica da linha e da impedância no ponto de descontinuidade, que pode apresentar uma terminação resistiva, indutiva, capacitiva, um circuito aberto ou curto-circuito. Em ZANETTA JR. (2003), os coeficientes de reflexão e refração das ondas eletromagnéticas de tensão são definidas por meio das Equações (2.18) e (2.19), respectivamente.

$$\Gamma_{r(v)} = \frac{Z_T - Z_S}{Z_T + Z_S}, \tag{2.18}$$

$$\Gamma_{t(v)} = \frac{2Z_T}{Z_S + Z_T}, \tag{2.19}$$

em que Z_S representa a impedância característica da LT e Z_T é a impedância no terminal de descontinuidade.

Já para as ondas de corrente, os coeficientes de reflexão e refração são definidos em ZANETTA JR. (2003) por meio das Equações (2.20) e (2.21), respectivamente.

$$\Gamma_{r(i)} = \frac{Z_S - Z_T}{Z_S + Z_T}. \tag{2.20}$$

$$\Gamma_{t(i)} = \frac{2Z_S}{Z_S + Z_T}. \tag{2.21}$$

Como foi apresentado, os coeficientes de reflexão e refração das ondas dependem das terminações da LT. Nos sistemas de transmissão HVDC, a impedância das terminações da linha pode ser capacitiva ou indutiva. A natureza de tal impedância depende dos equipamentos instalados nas terminações do sistema, tais como filtros e reatores de amortecimento (ANDO; SCHWEITZER; BAKER, 1985; LIU; OSMAN; MALIK, 2009).

2.3.2.1 Terminação Capacitiva

O capacitor pode ser representado como um curto-circuito nos instantes iniciais de operação. Dessa forma, a impedância da terminação capacitiva da linha pode ser considerada aproximadamente nula, ou seja, $Z_T \approx 0$ nas equações que definem os coeficientes de reflexão e refração.

Com isso, a impedância nas terminações da linha é considerada muito menor do que a impedância característica da LT, ou seja, $Z_T << Z_S$. Logo, as polaridades dos coeficientes de reflexão para as ondas de tensão e corrente são obtidas por meio da substituição dessa consideração nas Equações (2.18) e (2.20), respectivamente.

$$\Gamma_{r(v),cap} = \frac{Z_T - Z_S}{Z_T + Z_S} < 0, \tag{2.22}$$

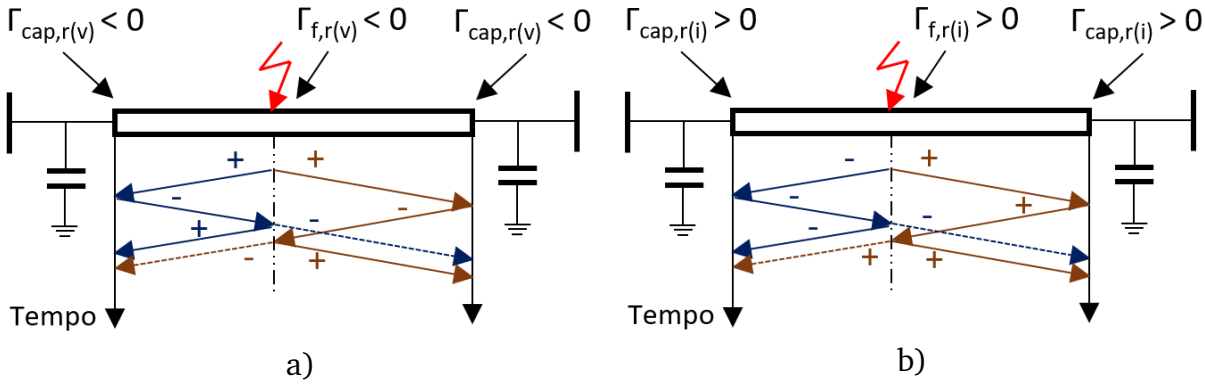
$$\Gamma_{r(i),cap} = \frac{Z_S - Z_T}{Z_S + Z_T} > 0. \tag{2.23}$$

Além das descontinuidades nas terminações da LT, o ponto de falta na LT é considerado uma descontinuidade e também pode ser representado por um curto-circuito (SILVA, 2018). Logo, os coeficientes de reflexão das ondas de tensão e corrente no ponto de falta apresentam a mesma polaridade que os coeficientes nas terminações capacitivas da LT.

No mais, independentemente da impedância terminal na linha, as polaridades dos coeficientes de refração das ondas de tensão e corrente são positivos, assim como demonstrado nas Equações 2.19 e 2.21.

Na Figura 6 é apresentada a análise da alteração de polaridades das ondas de tensão e corrente com base nos seus coeficientes de reflexão e refração para a terminação capacitiva. É importante destacar que o método baseado na teoria de ondas viajantes mensura a sobreposição das ondas detectadas naquele instante de tempo e, portanto, a depender da polaridade das ondas, a amplitude da onda medida pode ser alterada.

Figura 6 – Análise das polaridades das ondas viajantes no diagrama de Bewley para terminação capacitiva: a) Tensão e b) Corrente.



Fonte: Adaptado de SILVA (2018).

2.3.2.2 Terminação Indutiva

O indutor pode ser representado por um circuito aberto nos instantes inicias de operação. Dessa forma, a impedância da terminação indutiva da LT pode ser considerada muito elevada, ou seja, $Z_T \approx \infty$ nas equações que definem os coeficientes de reflexão e refração.

Portanto, a impedância nos terminais da LT é muito maior do que a impedância característica da linha, ou seja, $Z_T >> Z_S$. Logo, de forma análoga ao procedimento que foi realizado na terminação capacitiva, tem-se que as polaridades dos coeficientes de reflexão para as ondas de tensão e corrente são dadas por:

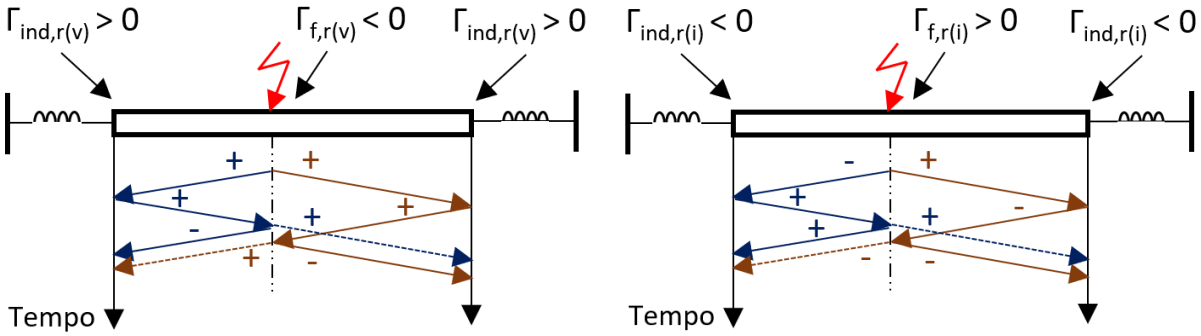
$$\Gamma_{r(v),ind} = \frac{Z_T - Z_S}{Z_T + Z_S} > 0, \tag{2.24}$$

$$\Gamma_{r(i),ind} = \frac{Z_S - Z_T}{Z_S + Z_T} < 0. \tag{2.25}$$

As polaridades dos coeficientes de reflexão nos terminais da linha são as únicas que são alteradas com relação aos coeficientes vistos na terminação capacitiva. Tal evidência é explicada devido ao fato de que o ponto de falta continua sendo visto como um curto-circuito e os coeficientes de refração são sempre positivos, independentemente das características da impedância.

Na Figura 7 é apresentada a análise da mudança de polaridades das ondas de tensão e corrente com base nos seus coeficientes de reflexão e refração para a terminação indutiva.

Figura 7 – Análise das polaridades das ondas viajantes no diagrama de Bewley para terminação indutiva: a) Tensão e b) Corrente.



Fonte: Adaptado de SILVA (2018).

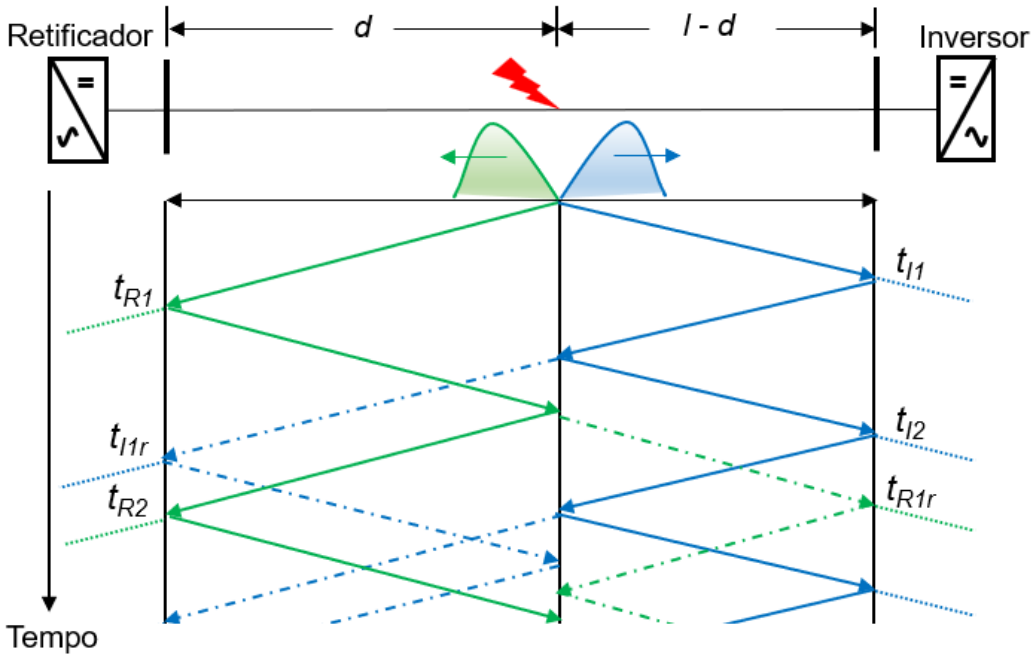
Com base na análise das Figuras 6 e 7, conclui-se que as polaridades das ondas incidentes nos terminais do sistema são distintas para as ondas de tensão e corrente, além de serem impactadas pela impedância das terminações do sistema.

2.4 LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO UTILIZANDO A TEORIA DE ONDAS VIAJANTES

O fenômeno de ondas viajantes em linhas de transmissão constitui um dos efeitos de transitórios eletromagnéticos do sistema elétrico. As ondas eletromagnéticas resultantes de falhas nas linhas de transmissão se propagam em ambas as direções da LT com uma velocidade que depende dos parâmetros da linha e que pode ser considerada muito próxima da luz (SAHA; IZYKOWSKI; ROSOLOWSKI, 2009). Na Figura 8 é apresentado o diagrama de Bewley para um sistema HVDC com uma LT de comprimento l, em que os

fenômenos de reflexão e refração das ondas são representados no domínio do tempo e espaço (DATTA; CHATTERJEE, 2012).

Figura 8 – Diagrama de Bewley para uma falta no sistema HVDC.



Fonte: Próprio autor.

De acordo com a Figura 8, as ondas eletromagnéticas de tensão e corrente produzidas pela incidência da falta na LT são transmitidas em ambas as direções da linha por meio das ondas progressivas e regressivas. Ao atingirem os terminais da LT, uma parte da onda incidente é refletida de volta em direção ao ponto de falta. Neste ponto, uma parte da onda é refletida de volta ao terminal de origem e a outra é refratada em direção ao terminal oposto. Esses processos de reflexão e refração ocorrem sucessivamente até que a energia do sinal seja totalmente dissipada pela resistência da linha.

Além disso, a aplicação da TOV na localização de faltas é baseada na detecção dos instantes de tempo em que a onda de tensão e/ou corrente produzida no ponto de falta é refletida em um ou nos dois terminais da linha. Caso os dados de tensão e/ou corrente sejam obtidos apenas em um terminal, o método é dito de um terminal. Caso os dados estejam disponíveis em ambos os terminais da LT, o método é classificado como dois terminais.

Com base na Figura 8 e considerando o método de dois terminais, tem-se que as relações entre a distância da falta (d) e os primeiros instantes de tempo em que a onda produzida pela falta atinge os terminais do retificador (t_{R1}) e inversor (t_{I1}) são dadas pelas Equações (2.26) e (2.27).

$$t_{R1} = \frac{d}{v_p}, \tag{2.26}$$

$$t_{I1} = \frac{l - d}{v_p}. \tag{2.27}$$

Subtraindo a Equação (2.26) da (2.27) e isolando o termo d, conclui-se que a distância de falta (d) é calculada via a Equação (2.28), conforme apresentado abaixo.

$$d = \frac{l + (t_{R1} - t_{I1}).v_p}{2}, \tag{2.28}$$

em que d é a distância da falta com relação ao terminal retificador, l é o comprimento total da linha e v_p é a velocidade de propagação das ondas.

No método de dois terminais é necessário realizar a detecção do instante de tempo de chegada da primeira frente de onda em ambos os terminais, o que consiste em uma vantagem, pois a detecção da segunda frente de onda refletida pelo ponto de falta é uma tarefa mais complexa (DEWE; SANKAR; ARRILLAGA, 1993). Por outro lado, esta técnica exige a existência de um canal de comunicação sincronizado entre os terminais da linha, o que acarreta no aumento dos custos do projeto e em um atraso de tempo na transmissão de informações. Além disso, caso não exista esse meio de comunicação ou ocorram problemas de funcionamento nos dispositivos de comunicação, tal como o GPS, o desempenho do método é afetado.

O método de um terminal extingue a necessidade de um canal de comunicação entre os terminais da linha, o que representa uma grande vantagem em termos financeiros. Por outro lado, tal método exige a detecção da primeira e segunda frentes de onda refletidas no ponto de falta no terminal de monitoramento. A distinção da chegada da segunda frente de onda refletida no ponto de falta com outras ondas refletidas e refratadas que atingem o terminal de monitoramento é uma tarefa complexa e que vem sendo alvo de diversas pesquisas. Com base na Figura 8, a relação entre o instante t_{R2} e o local de falta (d) é dada pela Equação (2.29):

$$t_{R2} = \frac{3.d}{v_p}, \tag{2.29}$$

Por meio da subtração da Equação (2.29) da (2.26), obtém-se que a distância de falta em relação ao terminal retificador é dada pela Equação (2.30):

$$d = \frac{(t_{R2} - t_{R1}).v_p}{2}. \tag{2.30}$$

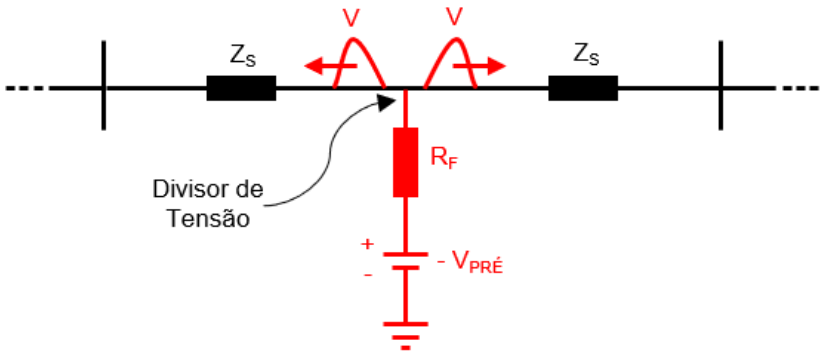
A distinção entre a chegada da segunda frente de onda refletida no ponto de falta com as ondas refletidas e/ou refratadas no outro terminal da linha pode ser realizado por meio da análise das polaridades das ondas de tensão e corrente.

As análises das polaridades dos sinais de tensão e corrente para as terminações capacitiva e indutiva são apresentadas nas Figuras 6 e 7, respectivamente. Com base nessas figuras e considerando o retificador como terminal de monitoramento, conclui-se que, para terminação capacitiva, a primeira e segunda frentes de onda refletidas no ponto de falta apresentam a mesma polaridade, sendo positiva para a tensão e negativa para a corrente. Já para terminação indutiva, a primeira e segunda frentes de onda refletidas no ponto de falta apresentam polaridades distintas.

Complementarmente, destaca-se que há um afundamento significativo da tensão quando a falta incide na LT do sistema HVDC, que é causado pelo transitório eletromagnético de alta frequência. Tal transitório gera o lançamento de OVs em ambas as direções da LT. Para uma falta franca, a tensão no ponto de falta é modificada de um valor elevado para zero quase que instantaneamente, promovendo a indução de ondas que têm amplitude proporcional à variação da tensão. Porém, para os casos de falta com um determinado valor de resistência, o afundamento de tensão será reduzido, resultando no lançamento de ondas viajantes com amplitude atenuadas (LOPES et al., 2019b).

O fenômeno de atenuação da amplitude de OVs em função da resistência de falta pode ser explicado por meio da Figura 9, a qual representa o circuito de uma falta incidente na LT. O curto-circuito é tipicamente modelado por uma resistência de falta em série com uma fonte de tensão que assume o valor de tensão no ponto de falta imediatamente antes do instante de incidência da falta no sistema, porém com a polaridade reversa (GLOVER; SARMA; OVERBYE, 2017).

Figura 9 – Circuito puro de uma falta do tipo polo:terra na LT de um sistema HVDC.



Fonte: Próprio autor.

Da Figura 9, tem-se que Z_S, R_f, $V_{PRÉ}$ e V representam, respectivamente, a impedância de surto da LT, a resistência de falta, a fonte de tensão com o valor de tensão

pré-falta e a amplitude da onda viajante de tensão lançada no ponto de falta. É relevante ressaltar que os sistemas conectados em ambos os terminais da LT não são representados pois eles não influenciam na amplitude das ondas viajantes lançadas a partir do ponto de falta, mas apenas na amplitude das OVs medidas nos terminais da LT (LOPES et al., 2019b). Assim, a amplitude da onda de tensão lançada pode ser calculada por meio do divisor de tensão formado pela resistência de falta e pelo paralelo das impedâncias de surto da LT, assim como está apresentado na Equação (2.31).

$$V = \frac{V_{PRE}.Z_S}{Z_S + 2.R_F}. \tag{2.31}$$

Logo, com base na Equação (2.31), conclui-se que a amplitude da onda viajante de tensão lançada no ponto de falta e que se propaga para ambos os terminais da LT é inversamente proporcional à resistência de falta.

Tanto no método de dois terminais, quanto no de um terminal, a detecção precisa do instante de tempo de chegada das frentes de onda nos terminais de monitoramento é de suma importância para garantir a confiabilidade da aplicação dos métodos. Dentre as principais ferramentas que estão sendo utilizadas para detectar tais instantes de tempo atualmente em dispositivos reais, destaca-se a aplicação do filtro *Differentiator-Smoother* (LOPES et al., 2019a). Os fundamentos teóricos da aplicação desse filtro estão apresentados na próxima seção.

2.5 FILTRO *DIFFERENTIATOR-SMOOTHER*

Tendo em vista que o fenômeno de propagação de ondas viajantes em linhas de transmissão possui natureza transitória, a análise das frentes de onda induzidas por faltas requer a utilização de filtros capazes de eliminar as componentes de baixa frequência. Dessa forma, torna-se possível extrair as informações contidas nas componentes transitórias dos sinais monitorados, as quais estão diretamente relacionadas às distorções provocadas pela incidência das ondas viajantes nos terminais da linha de transmissão (COSTA; SOUZA; BRITO, 2010). Para eliminação das componentes de baixa frequência, aplicações reportadas na literatura utilizam filtros digitais passa-alta ou passa-faixa a fim de identificar as características de amplitude e propagação das ondas viajantes que incidem nos terminais de monitoramento (SAHA; IZYKOWSKI; ROSOLOWSKI, 2009; ZIMATH; RAMOS, 2010).

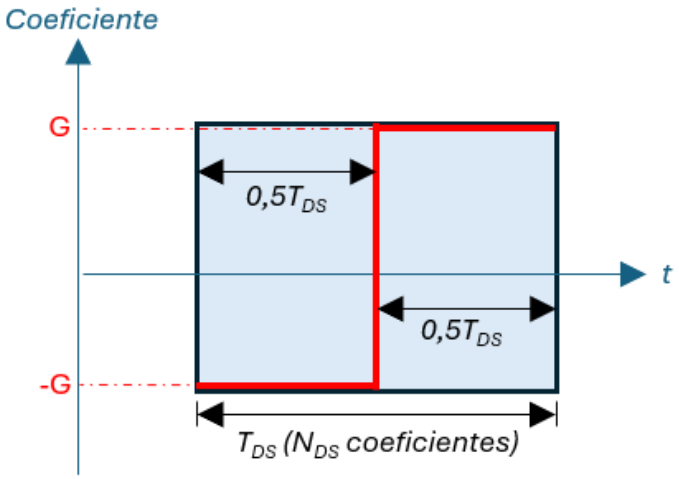
Na literatura, diversas técnicas para detecção e análise de ondas viajantes têm sido reportadas, dentre as quais se destacam: as transformadas wavelet discreta (TWD) e discreta redundante (TWDR) (COSTA, 2014; COSTA; SOUZA; BRITO, 2008), filtros digitais FIR (ZIMATH; RAMOS, 2010) e o filtro *Differentiator-Smoother* (SCHWEITZER et al., 2014; SCHWEITZER et al., 2016), denominado filtro DS.

A TWD e a TWDR são amplamente utilizadas na análise de OVs incidentes e refletidas, pois permitem isolar faixas específicas do espectro por meio de filtros digitais em cascata (PERCIVAL; WALDEN, 2000), cujo desempenho depende da wavelet-mãe adotada (COSTA et al., 2011). Embora semelhantes, a TWD exige subamostragem, ao contrário da TWDR, tornando esta última mais adequada para aplicações baseadas na teoria das OVs (SAHA; IZYKOWSKI; ROSOLOWSKI, 2009). Ademais, os filtros digitais FIR também são empregados na detecção de OVs (ZIMATH; RAMOS, 2010), porém não dispõem de uma delimitação clara de regiões de interesse no espectro, podendo responder a transitórios espúrios. Além disso, seu desempenho depende fortemente da escolha dos coeficientes, assim como ocorre com a seleção da wavelet-mãe na TWD e na TWDR.

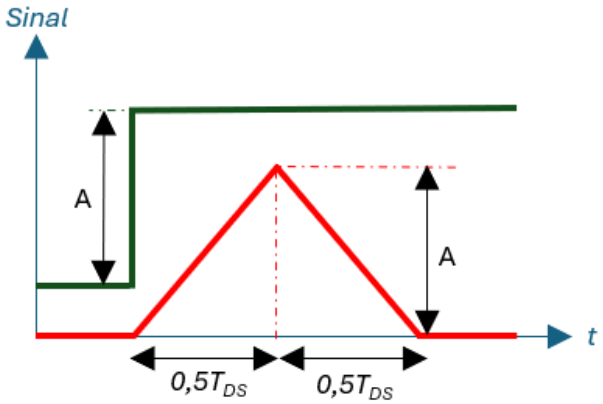
A fim de otimizar o processo de identificação de OVs em LTs, sejam essas frentes de onda incidentes ou refletidas, os estudos apresentados em SCHWEITZER et al. (2014) e SCHWEITZER et al. (2016) propõem a aplicação do filtro DS em esquemas de proteção rápida no domínio do tempo, bem como em algoritmos de localização de faltas baseados na teoria de OVs. O filtro DS apresenta vantagens em relação às transformadas wavelet e aos filtros digitais FIR para detecção de ondas viajantes. Por operar diretamente no domínio do tempo, o DS evita as etapas de decomposição multirresolução e a dependência da escolha da wavelet-mãe — fatores que impactam o desempenho das técnicas baseadas em wavelets. Além disso, diferentemente dos filtros FIR, cujo desempenho depende fortemente da definição dos coeficientes, o DS fornece resposta mais estável e seletiva às componentes de alta frequência associadas às ondas viajantes, atenuando as componentes de baixa frequência provenientes da fundamental e de harmônicos.

O funcionamento do filtro DS baseia-se no fato de que distúrbios em uma linha impõem transitórios em formato de degrau e, com isso, busca gerar uma saída em formato triangular, com ganho unitário, que favoreça a detecção da OV e, consequentemente, o instante de tempo de chegada nos terminais monitorados. Para tanto, o filtro é composto por uma parte suavizante (*smoother*) e uma parte diferencial (*differentiator*) em cascata. A componente suavizante tem como funções não só de reduzir os efeitos das distorções, mas também de realizar o espalhamento da borda de subida do sinal de entrada, viabilizando o uso da interpolação para a determinação dos tempos de incidência das ondas (SCHWEITZER et al., 2014). Na etapa diferencial subsequente, um sinal ideal com formato em degrau é convertido para um formato triangular, mantendo-se a amplitude do sinal de entrada. Na Figura 10, a seguir, está apresentada a janela de coeficientes do filtro DS, denominada T_{DS}, bem como o formato de sua saída quando aplicado um degrau na sua entrada (SCHWEITZER et al., 2014; LOPES et al., 2019a).

Figura 10 – Coeficientes do Filtro DS: a) Janela de Coeficientes e b) Resposta para entrada em degrau.



(a)



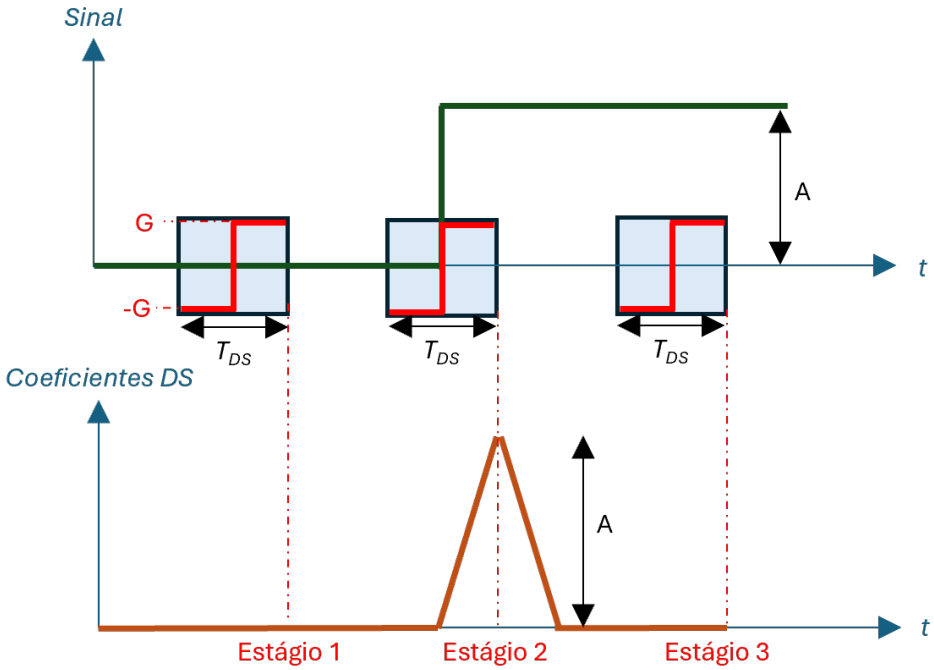
(b)

Fonte: Adaptado de LOPES et al. (2019a).

Da Figura 10.b), verifica-se que a amplitude da saída triangular do filtro DS (A) é igual à amplitude do degrau do sinal. Este ganho unitário só é possível quando considerado o ajuste apropriado do ganho G dos N_{DS} coeficientes do filtro DS. Conforme ilustrado na Figura 10.a), os coeficientes são determinados pelo ganho G (metade dos coeficientes com valor G e a outra metade com valor -G), de modo que se deve obter um valor de G que mantenha o ganho unitário do filtro, independentemente dos N_{DS} coeficientes considerados. Destaca-se que, conforme apresentado em (LOPES et al., 2019a), o valor nulo da amostra central da janela de coeficientes não é considerado. Para que o valor de ganho G seja unitário, o processo de filtragem é separado em três estágios conforme apresentado na Figura 11. Tais estágios podem ser definidos como: 1) Instante em que a janela do filtro encontra-se antes do degrau induzido pelo distúrbio; 2) Instante em que a janela do filtro está centrada na borda de subida do filtro e 3) Instante em que a janela do filtro encontra-se dentro do degrau de amplitude A induzido pelo

distúrbio (LOPES et al., 2019a).

Figura 11 – Estágios de análise da filtragem para obtenção do ganho unitário do filtro DS.



Fonte: Adaptado de LOPES et al. (2019a).

Como a saída do filtro DS é resultado do produto interno entre as amostras do sinal de entrada e os coeficientes do filtro, para cada estágio ilustrado na Figura 11, são obtidos os seguintes valores de saída do filtro DS:

- Estágio 1:

$$x_{DS} = \frac{N_{DS}}{2}.(-G.0) + \frac{N_{DS}}{2}.(G.0) = 0, \tag{2.32}$$

- Estágio 2:

$$x_{DS} = \frac{N_{DS}}{2}.(-G.0) + \frac{N_{DS}}{2}.(G.A) = \frac{N_{DS}}{2}.(G.A), \tag{2.33}$$

- Estágio 3:

$$x_{DS} = \frac{N_{DS}}{2}.(-G.A) + \frac{N_{DS}}{2}.(G.A) = 0. \tag{2.34}$$

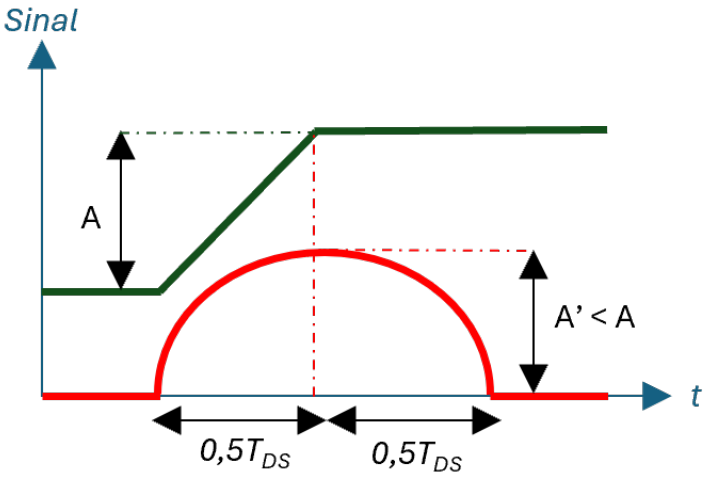
em que x_{DS} representa a saída do filtro DS.

Dessa forma, durante os estágios 1 e 3, o sinal de saída do filtro DS (x_{DS}) é nulo. Já no estágio 2, considerando a amplitude A do sinal de entrada, tem-se que o valor de G deve ser dado conforme a Equação 2.35 para garantir um ganho unitário no filtro.

$$G = \frac{2}{N_{DS}}. \tag{2.35}$$

Até então, considerou-se um distúrbio no formato de um degrau unitário chegando aos terminais monitorados, resultando em uma saída de formato triangular de fácil extração do instante de tempo das ondas viajantes. Todavia, os transitórios eletromagnéticos induzidos por falta atingem o terminal de monitoramento com algum grau de atenuação dado o grau de dispersão enfrentado pela OV, especialmente em sistemas com linhas de transmissão muito extensas, como é o caso de elos HVDC. Assim, as variações decorrentes da incidência de OVs nos terminais de monitoramento não resulta em degraus, mas sim, em rampas, cujas taxas de variação entre os valores inicial e final dependem do nível de atenuação das frentes de onda (LOPES et al., 2019a; FERNANDES et al., 2020), conforme apresentado na Figura 12.

Figura 12 – Resposta do filtro DS para um sinal de entrada em formato de rampa.



Fonte: Adaptado de FERNANDES (2020).

De acordo com a Figura 12, verifica-se que as ondas viajantes chegam ao terminal de monitoramento com um formato de rampa. Dessa forma, após o processo filtragem via o *Differentiator-Smoother*, os coeficientes do filtro assumem formato de parábola. O pico que anteriormente era de fácil detecção dado o formato triangular (para entradas em formato de degrau), passa agora a ser o ponto máximo de uma parábola que pode ser gerada por um processo de interpolação de amostras em torno da OV detectada.

2.6 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi apresentada a fundamentação teórica utilizada para o desenvolvimento desta tese. Inicialmente, foram apresentadas as principais características dos sistemas HVDC. Adicionalmente, foi apresentada uma análise estatística do número

de desligamentos forçados nas LTs dos sistemas HVDC atualmente em operação no Brasil, em que as descargas atmosféricas ganham destaque como a principal fonte de tais desligamentos. Por fim, foram apresentados os fundamentos da teoria de ondas viajantes e do filtro DS para embasar a sua aplicação no processo de localização de faltas em sistemas HVDC.

No próximo capítulo é apresentada a revisão bibliográfica acerca dos principais trabalhos encontrados na literatura que utilizam a teoria de ondas viajantes para realizar a classificação e/ou localização de faltas em linhas de transmissão de sistemas HVDC.

Capítulo 3

Revisão Bibliográfica

A utilização dos transitórios eletromagnéticos de tensão e/ou corrente para a detecção, classificação e localização de faltas consolidou a teoria de ondas viajantes como um tema de grande relevância na área de transitórios eletromagnéticos. Consequentemente, observa-se um crescimento contínuo do número de pesquisas acadêmicas e aplicações industriais voltadas ao diagnóstico de faltas em linhas de transmissão por meio da teoria de ondas viajantes. A revisão bibliográfica realizada neste trabalho destaca os principais estudos que exploram a aplicação das ondas viajantes para a detecção, classificação e/ou localização de faltas em linhas de transmissão, evidenciando avanços, desafios e lacunas ainda existentes na literatura.

ANDO, SCHWEITZER e BAKER (1985) propõem uma técnica de localização de faltas avaliada no sistema HVDC bipolar Pacific Inertie, a qual utiliza os dados de corrente do terminal conversor. O método faz uso das sucessivas reflexões de onda no ponto de falta e no terminal oposto ao de monitoramento. A técnica utiliza o filtro DS e um limiar de detecção igual a 100 A para detectar as faltas na LT. O sinal obtido no filtro DS é utilizado para estimar os instantes de tempo de incidência das três primeiras frentes de onda no terminal de monitoramento. Tal estimação é realizada por meio de uma técnica de interpolação triangular. De acordo com as polaridades dos sinais obtidos no filtro DS, a técnica distingue uma falta aplicada na primeira ou segunda metade da linha. O cálculo da localização é uma função da diferença entre os dois instantes de tempo de chegada das frentes de onda e da velocidade de propagação das ondas viajantes. A técnica foi aplicada em uma base de dados de corrente de falta obtida no sistema Pacific Inertie e apresentou um bom desempenho quando comparada com o método vigente na época que utilizava um contador eletrônico para medir o intervalo de tempo entre as chegadas das frentes de ondas em ambos os terminais. Entretanto, o trabalho não avaliou a eficiência do método para diferentes condições de falta e a técnica requer o conhecimento exato da velocidade de propagação das ondas, o que pode ser uma fonte de erros.

Em SUONAN et al. (2009) é proposto um método para localizar faltas em um sistema HVDC bipolar. O método baseia-se no modelo de linha de transmissão a parâmetros distribuídos, no qual a distribuição de tensão na LT pode ser obtida a partir das medições de tensão e corrente pós-falta em ambos os terminais do sistema. O método é aplicado no domínio do tempo e uma curta janela temporal é necessária para localizar a

falha. As equações telegráficas da LT são desacopladas e os parâmetros do modo aéreo de tensão e corrente são utilizados para formular a equação que caracteriza a curva de distribuição de tensão na linha em função da localização. Uma vez obtida tal equação, o local de falta corresponde ao ponto de mínimo da função. A fim de avaliar o método proposto, foram realizadas simulações do sistema HVDC no PSCAD variando o local, o tipo e resistência de falta e o algoritmo do método foi implementado no Matlab®. A frequência de amostragem utilizada nas simulações foi de 100 kHz e os resultados obtidos demonstraram elevada precisão de localização. Porém, o método necessita de uma sincronização entre os terminais.

Em NANAYAKKARA, RAJAPAKSE e WACHAL (2012a) apresenta-se um método de localização de faltas na LT de um sistema HVDC bipolar composta por linhas aéreas e cabos subterrâneos. O método utiliza os sinais de tensão ou corrente em ambos os terminais do sistema e faz uso da TWC para detectar os instantes de tempo de chegada da onda viajante em cada terminal. O sistema foi modelado e simulado no PSCAD e o algoritmo de localização foi programado no Matlab®. Os sinais de tensão e corrente foram condicionados a uma taxa de amostragem igual a 2 MHz e uma resolução de conversão A/D de 16 bits. No mais, foram considerados distintas localizações e resistência de faltas nas simulações e a influência do ruído nos sinais foi avaliada. Por fim, concluiu-se que o método apresentou resultados satisfatórios nos casos analisados, até mesmo aqueles que consideraram a presença do ruído nos sinais. Além disso, o método pode ser adaptado para ser aplicado em sistemas com uma LT composta por mais de três segmentos híbridos. Entretanto, o método exige um canal de comunicação sincronizado e qualquer alteração em tal sincronização pode ocasionar erros.

Em NANAYAKKARA, RAJAPAKSE e WACHAL (2012b) é proposto um método de localização de faltas para um sistema HVDC com três terminais conectados em um ponto em comum. Tal método utiliza a teoria de onda viajantes e analisa os sinais de corrente medidos em todos os terminais do sistema. Os autores adaptaram a equação de localização de faltas baseada em dois terminais para o sistema multiterminal. A detecção dos instantes de chegada da onda viajante em cada terminal é realizada por meio da aplicação da transformada wavelet contínua ao sinal de corrente. Tais instantes são utilizados para detectar a linha em que ocorreu a falta e calcular a sua localização. Antes de serem enviados para o algoritmo de localização programado no Matlab®, os sinais de corrente foram condicionados a uma conversão analógica digital a fim de considerar os efeitos práticos de medição. Com o intuito de validar o método proposto, o sistema HVDC foi modelado e simulado no PSCAD considerando uma frequência de amostragem igual a 10 MHz. Apesar dos resultados satisfatórios nos casos simulados, o método necessita de esquemas de comunicação entre os terminais do sistema a fim de sincronizar as medições. No mais, é necessário o conhecimento da velocidade de propagação das ondas em cada

segmento de linha, o que pode ocasionar erros de localização.

Em HE et al. (2013) propõe-se um método de localização de faltas em um sistema HVDC bipolar baseado na frequência natural das ondas viajantes. O método utiliza os dados de corrente de apenas um dos terminais do sistema, os quais são submetidos a uma transformação modal utilizando a matriz de Karrenbauer. A frequência natural dos sinais é calculada por meio da aplicação do método paramétrico MUSIC, do inglês *Multiple Signal Classification*. O coeficiente e o ângulo de reflexão das ondas viajantes dependem da impedância característica da LT e da impedância no ponto de descontinuidade avaliado. No mais, a velocidade de propagação das ondas é calculada como uma função da frequência, impedância equivalente da terminação da LT e da resistência de falta. Por fim, a localização da falta é calculada em função da velocidade de propagação e da frequência natural das ondas viajantes, o que elimina a necessidade de obtenção dos instantes de tempo de chegada das frentes de onda, presente na grande maioria das aplicações baseadas na teoria de ondas viajantes. O sistema HVDC bipolar foi modelado no PSCAD e o método foi implementado no Matlab®. A eficiência do método foi avaliada com base em simulações para diferentes locais, resistências e tipos de falta. Tal técnica se mostrou eficaz na grande maioria dos casos analisados e pode ser considerada uma alternativa promissora para contornar os erros causados pela má identificação dos instantes de tempo de chegada das frentes de onda no terminal de monitoramento.

YUANSHENG, GANG e HAIFENG (2015) propõem um algoritmo de localização de faltas no sistema HVDC baseado na combinação de um método de localização no domínio do tempo com o modelo de linha de transmissão de Bergeron. O esquema proposto detecta a chegada da primeira onda viajante em cada terminal da linha. Tal detecção é realizada por meio da aplicação da transformada wavelet aos sinais de tensão. Os instantes de tempo de chegada da primeira frente de onda em cada terminal são definidos como os pontos iniciais de uma nova linha de tempo de referência. Com isso, a diferença de tempo das medições não sincronizadas nos dois terminais corresponde ao intervalo temporal entre as chegadas das frentes de ondas em ambos os terminais. Por fim, os sinais analisados são filtrados por meio de um filtro digital Butterworth e aplicados na equação de localização de faltas no domínio do tempo. A solução ótima de tal equação é calculada por meio do algoritmo de otimização PSO, do inglês *Particle Swarm Optimization*. Para validar o método, dois sistemas HVDC bipolares reais são modelados no PSCAD e simulações considerando diferentes locais de faltas são realizadas. Os resultados das simulações para uma frequência de amostragem de 1 MHz se mostraram satisfatórias. Entretanto, por conta da formulação aplicada no método de dois terminais, a velocidade de propagação das ondas deve ser conhecida.

No trabalho de YUE (2016) propõe-se um método de localização de faltas em um sistema HVDC monopolar utilizando os dados de tensão de apenas um terminal. Tal

método utiliza a técnica FastICA, do inglês *Fast Independent Component Analysis*, para decompor o sinal de tensão medido e isolar a onda viajante proveniente de uma falta no sistema das demais que compõem o sinal. A técnica FastICA é baseada no princípio de maximização não gaussiana, o qual define uma função objetivo para avaliar o grau de independência entre cada componente de um sinal. A partir do sinal obtido pela FastICA, é possível detectar os instantes de tempo de chegada da primeira e segunda frente de onda, além de identificar as polaridades de tais ondas. Com a obtenção dessas informações, é possível aplicar a equação de localização de faltas baseada em um terminal. A fim de validar o método, o sistema HVDC foi modelado e simulado no Matlab® para diferentes locais e resistências de falta. A frequência de amostragem utilizada foi de 20 kHz e os resultados das simulações mostraram-se satisfatórios. Todavia, o método necessita do conhecimento da velocidade de propagação das ondas, o que nem sempre é viável em aplicações práticas.

Em VASANTH, YEAP e UKIL (2016) utiliza-se a TWC em conjunto com redes neurais artificiais (RNA) para localizar faltas em um sistema bipolar VSC-HVDC. A RNA implementada apresenta três camadas, as quais consistem em dois nós de entrada (coeficientes da TWC dos sinais de corrente nos dois terminais), treze nós ocultos e um nó de saída, que corresponde ao local estimado de falta. Cenários distintos de faltas foram simulados no PSCAD considerando variações nas resistências e locais de falta. Dentre todos os cenários gerados, 80% foram utilizados para o treinamento da rede neural por meio da técnica bayesiana, enquanto que 20% dos casos foram utilizados para testar o método. Por fim, a eficiência da técnica foi avaliada com base em alguns parâmetros da rede neural, tal como o coeficiente de correlação que foi igual a 0,99532 e indica um bom ajuste dos dados estimados com os valores reais. Entretanto, tal coeficiente se mostrou inversamente proporcional ao aumento da resistência de falta e chegou a um valor inferior a 0,2 para faltas com uma resistência superior a 70 Ω. A eficiência da rede neural se mostrou bastante restrita aos casos semelhantes àqueles para os quais ela foi treinada, o que representa uma impossibilidade de aplicação de tal técnica em outros sistemas.

Em HOSSAM-ELDIN et al. (2016) utiliza-se a transformada wavelet discreta em conjunto com a lógica fuzzy com o objetivo de localizar uma falta em um sistema VSC-HVDC multiterminal. A lógica fuzzy é utilizada para analisar as ondas viajantes de corrente não estacionárias geradas pela incidência da falta. Antes da etapa de localização da falta utilizando os dados de um terminal por meio da TOV, o método proposto é capaz de classificar a falta por meio da análise dos sinais de corrente nos dois polos de cada terminal do sistema. Os dados dos coeficientes da TWD aplicada aos sinais de corrente são enviados para a lógica fuzzy, onde é definido em qual LT ocorreu a falta. O sistema VSC-HVDC foi modelado no Matlab® e simulações considerando diferentes locais de

falta foram realizadas. No mais, foi utilizado uma frequência de amostragem igual a 50 kHz nas simulações. Os resultados obtidos no trabalho foram satisfatórios, entretanto a eficiência do método não foi avaliada para diferentes resistências e faltas polo:polo.

Em BUREK et al. (2018) propõe-se um método de localização de faltas em um sistema HVDC bipolar baseado na análise das ondas viajantes de corrente medidas em apenas um terminal. A base do método é a comparação dos instantes de tempo calculados da chegada da segunda (t_2) e terceira (t_3) frentes de onda no terminal de monitoramento com os instantes disponíveis em um banco de dados. Tal banco consiste em inúmeros diagramas de Bewley das ondas viajantes de corrente para diferentes locais de falta. Para obter os instantes t_2 e t_3, é aplicada a derivada no sinal de corrente e os extremos locais do sinal obtido são gravados. A escolha adequada dos instantes t_2 e t_3 é realizada por meio da minimização de uma função objetivo que analisa a diferença entre os instantes calculados e aqueles disponíveis no banco de dados. O sistema foi modelado e simulado no PSCAD para uma LT homogênea e híbrida considerando diferentes locais de falta e uma frequência de amostragem igual a 1 MHz. O método se mostrou capaz de localizar as faltas analisadas, entretanto tal metodologia não é prática, pois para gerar o banco de dados dos diagramas de Bewley é necessário conhecer com exatidão todos parâmetros da LT. Além disso, os parâmetros da LT podem variar a depender da frequência e tempo de operação.

Em MELO (2018) propõe-se um algoritmo para detecção de faltas em linhas de transmissão HVDC utilizando dados de tensão e corrente medidos em ambos os terminais do sistema HVDC, o que requer a necessidade de um canal de comunicação sincronizado. O método de detecção de faltas desenvolvido utiliza o cálculo da derivada de sinais, cálculo da energia de coeficientes e um limiar de detecção autoadaptativo. Após a detecção dos instantes de chegada das frentes de onda nos terminas de monitoramento, o trabalho emprega o método clássico de dois terminais baseado na teoria de ondas viajantes para localizar as faltas. A eficiência do método foi avaliada por meio de simulações realizada no Matlab® considerando um sistema HVDC monopolar e outro bipolar. Todavia, a LT foi modelada a parâmetros distribuídos independentes da frequência, o que distancia as simulações da realidade, e foi utilizada uma frequência de amostragem igual a 200 kHz, valor inferior às taxas de resolução de dispositivos atuais.

Uma rede neural artificial foi treinada em SILVA et al. (2019) para correlacionar o sinal de tensão pós falta no terminal retificador de um sistema HVDC monopolar com a localização das faltas. O método é baseado na análise dos sinais de tensão medidos no retificador e a falta no sistema é detectada se, em algum instante, o nível de tensão for inferior a 0,8 pu. Nesse caso, a partir do instante inicial de detecção, é formada uma janela de tempo contendo 200 amostras do sinal a uma frequência de amostragem igual a 20 kHz. A fim de treinar a RNA, 480 casos de falta foram gerados por meio da variação

do local e resistência de falta e do carregamento do sistema HVDC. O treinamento se deu por meio da rede MLP, do inglês *multilayer perceptron*. Já na etapa de validação, 580 novos casos de faltas foram gerados com características diferentes daqueles de treinamento e o algoritmo foi avaliado. O método se mostrou eficiente frente à variação do local e resistência de falta e, por ser um método *offline*, pode ser implementado sem a necessidade de sincronização de dados. Por outro lado, por ser baseado em inteligência artificial, o método depende de uma grande e confiável base de dados e não apresenta uma generalidade para ser aplicado em outras configurações de sistemas HVDC.

Em FERNANDES et al. (2020) é realizada uma avaliação comparativa entre diferentes métodos de localização de faltas baseados na teoria de ondas viajantes aplicados a um sistema HVDC bipolar. A análise comparativa foi realizada entre as seguintes técnicas: método de um e dois terminais, sendo aplicado ou não a transformação modal dos sinais de corrente e tensão em cada um deles. A LT do sistema foi modelada considerando parâmetros constantes e variantes na frequência, por meio do modelo de Bergeron e J.Marti, respectivamente. A fim de realizar a análise comparativa das técnicas apresentadas, o sistema bipolar HVDC do Rio Madeira foi modelado no software ATP/ATPDraw. Vários cenários de faltas foram analisados, considerando a variação da resistência, local e tipo do distúrbio com intuito de avaliar a eficiência da estimação do local de falta. Os resultados obtidos das simulações mostraram que todas as técnicas utilizadas apresentaram eficiência na localização de distúrbios, entretanto notou-se que quando se utiliza o modelo de LT com parâmetros variantes na frequência, a precisão do método é comprometida.

Em FAYAZI et al. (2023) é apresentada uma técnica de localização de faltas baseada no método de um terminal da teoria de ondas viajantes para linhas de transmissão aérea híbridas paralelas HVAC/HVDC, em que as LTs CA e CC estão adjacentes uma à outra e há um acoplamento eletromagnético entre elas. Ressalta-se que nesse trabalho foram avaliadas as faltas incidentes nos sistemas CA e CC. A metodologia utiliza os dados de tensão monitorados em apenas um terminal do sistema considerando uma frequência de amostragem de 100 kHz. Para atenuar o efeito do ruído do sinal, os coeficientes ao quadrado da transformada wavelet são utilizados no método de localização de faltas proposto. Por fim, os diagramas de Bewley são utilizados para verificar o padrão das ondas viajantes e consequente localização de faltas. Como resultados, os autores demonstram que o método proposto apresenta alta precisão e robustez frente a variação do ângulo de incidência das faltas CA e da resistência de falta.

Em LIMA (2024) é proposta uma metodologia para detecção de frentes de ondas geradas em faltas em LTs em corrente contínua utilizando a teoria de ondas viajantes. A metodologia permite a criação de filtros ótimos a partir da união de métodos de otimização e técnicas para detecção de frentes de onda geradas a partir de faltas em LT.

A metodologia desenvolvida é capaz de ser adaptada a qualquer tipo de sistema HVDC ao criar filtros ótimos que minimizam o erro de localização de faltas e nos instantes de detecção. Nas simulações realizadas via MATLAB/Simulink para avaliar o desempenho do método desenvolvido, foram variadas as distâncias, resistências e tipo de falta. Ao comparar o método proposto de detecção com os outros tradicionais da literatura, pode-se verificar que ele foi capaz de detectar corretamente todos os casos de falta analisados com os menores erros médios. Ademais, a metodologia foi avaliada ainda na detecção de outras frentes de onda diferentes da primeira onda, uma vez que elas são fundamentais para aplicação de métodos de localização de falta com um terminal. Foi verificado que a metodologia proposta se mostrou promissor para essa aplicação, uma vez que ele é capaz de detectar corretamente outras frentes de onda geradas na falta. Entretanto, para aplicá-la na localização de faltas com dados de um terminal ainda é necessário o desenvolvimento de uma técnica que seja capaz de diferenciar os instantes de chegada das ondas refletidas dos instantes de chegada das ondas refratadas de forma automática.

Em XIA et al. (2024) é proposto um método para localização de faltas múltiplas utilizando as ondas viajantes de faltas virtuais simuladas. O método é validado por meio da comparação com as frentes de onda obtidas para faltas reais. Os autores analisam as interações e os fenômenos de *aliasing* das ondas viajantes de diferentes faltas nos pontos de medição com base em suas características de propagação. Em seguida, é proposto um método de correspondência entre as sequências de frentes de onda de faltas virtuais simuladas e as de frentes de onda de faltas reais, e uma taxa de correspondência de sequência de frentes de onda é formulada para quantificar a disparidade de localização entre as faltas simuladas e as reais. Nesse contexto, o artigo introduz um mecanismo de localização de múltiplas falhas e alcança a localização precisa de múltiplas falhas usando o método de localização dinâmica de ondas viajantes de falhas virtuais. A eficiência do método é avaliada por meio de simulações no PSCAD, sendo constatado que o método proposto não é afetado por erros na velocidade de propagação das ondas viajantes e elimina a necessidade de equipamentos de medição de ondas viajantes em ambos os terminais.

HONG et al. (2025) propõem um método de localização de faltas baseado na teoria de ondas viajantes para linhas de transmissão de sistemas VSC-HVDC. Os autores relatam que a precisão dos métodos convencionais é influenciada por incertezas na velocidade de propagação das ondas viajantes e por erros de sincronização entre os terminais monitorados. Para contornar essas limitações, foi desenvolvido um algoritmo híbrido que combina características dos métodos clássicos de um e dois terminais, considerando as propriedades dos reatores de alisamento presentes nos terminais do sistema para facilitar a identificação das frentes de onda transitórias. Os resultados obtidos demonstraram precisão para diferentes posições de falta ao longo da linha

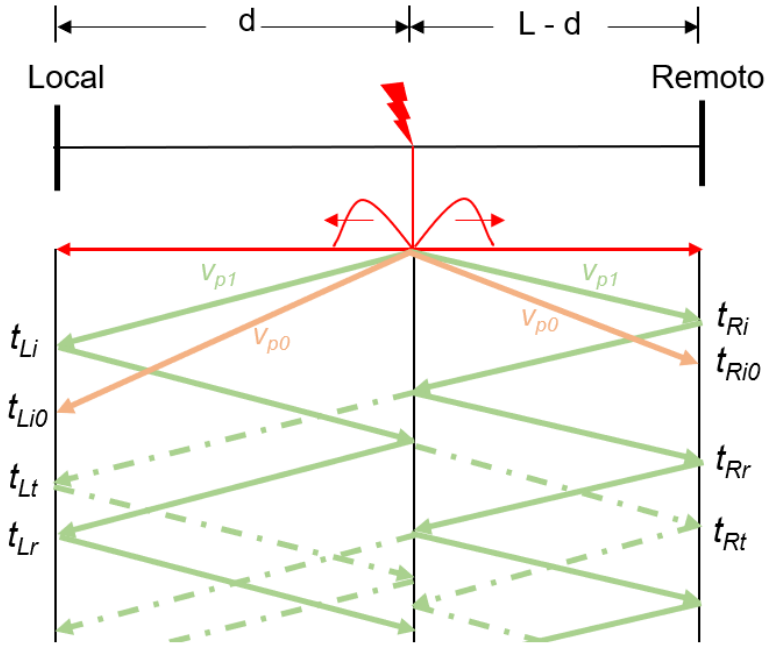
e robustez frente a variações dos parâmetros do sistema. Entretanto, a metodologia requer medições sincronizadas em ambos os terminais da linha e depende da correta identificação de múltiplas frentes de onda refletidas e refratadas, condição que pode ser dificultada, especialmente em cenários com a presença de ruído no sinal monitorado. Adicionalmente, o trabalho concentra-se exclusivamente na etapa de localização de faltas, não contemplando procedimentos para classificação dos defeitos nem uma análise abrangente da influência de diferentes níveis de ruído, resistências de falta ou tipos de curto-circuito sobre o desempenho do método. Os autores consideraram faltas com uma resistência máxima de 20 Ω e a LT do sistema HVDC modelado apresenta uma extensão de apenas 15 km, valor bem inferior à extensão de LTs de sistemas HVDC em operação atualmente.

LIU et al. (2025) apresentaram um método de localização de faltas para sistemas HVDC multiterminais baseado na teoria de ondas viajantes via o ajuste paramétrico dos sinais transitórios. Inicialmente, os autores desenvolveram um modelo analítico da propagação das OVs no domínio modal, obtendo expressões matemáticas para as componentes de corrente associadas às ondas refletidas que retornam aos terminais de monitoramento. Em seguida, foi empregado um procedimento de ajuste paramétrico capaz de estimar simultaneamente a posição da falta e os parâmetros associados à propagação das ondas, reduzindo a dependência da utilização de valores previamente definidos para determinadas características do sistema. Os resultados demonstraram precisão de localização para diferentes posições de falta e configurações da rede multiterminal. Como principal contribuição, o trabalho demonstra que a utilização de modelos analíticos associados a técnicas de ajuste de parâmetros pode reduzir os erros tradicionalmente observados em métodos que dependem diretamente da identificação dos instantes de chegada das ondas viajantes. Entretanto, a metodologia apresenta elevada complexidade matemática e computacional, exigindo a resolução de procedimentos iterativos de ajuste que podem dificultar sua implementação em aplicações em tempo real. Além disso, o estudo concentra-se exclusivamente na etapa de localização de faltas, não contemplando mecanismos para classificação dos defeitos. Também não foi realizada uma avaliação detalhada da influência de diferentes níveis de ruído, resistências de falta ou tipos de curto-circuito sobre o desempenho do método. Dessa forma, permanecem abertas questões relacionadas à robustez da metodologia frente às diversas condições operativas e características de falta encontradas em sistemas HVDC reais.

Diante da importância da TOV para a localização correta de faltas em LTs, muitos trabalhos desenvolveram ajustes na aplicação dos métodos clássicos de localização, resultando em técnicas não convencionais baseadas na TOV, aqui chamados de métodos alternativos. Na maioria dos métodos alternativos são utilizados os modos aéreos e terra das OVs. Dessa forma, a fim de visualizar a propagação das ondas viajantes ao longo da

extensão da LT, na Figura 13 está apresentado o diagrama de Bewley representando os modos aéreo e terra das ondas viajantes.

Figura 13 – Diagrama de Bewley com a representação dos modos aéreo e terra.



Fonte: Próprio autor.

Da Figura 13, tem-se que: v_{p1} representa a velocidade de propagação das ondas viajantes no modo aéreo e v_{p0} representa a velocidade das ondas viajantes no modo terra. Já com relação aos instantes de tempo apresentados na figura, considera-se que: t_{Li} e t_{Ri} são os instantes de chegada das OVs incidentes de modo aéreo; t_{Li0} e t_{Ri0} os instantes de chegada das OVs incidentes de modo terra; t_{Lr} e t_{Rr} os instantes de chegada das OVs refletidas de modo aéreo; e t_{Lt} e t_{Rt} os instantes de chegada das OVs transmitidas de modo aéreo.

Com base nas definições apresentadas na Figura 13, as principais vantagens e desvantagens dos métodos alternativos considerados neste estudo são apresentados a seguir.

Em GILANY e KHALILl (2006) propõe-se um método de localização de faltas que elimina a necessidade do conhecimento preciso da v_p de modo aéreo das OVs, mas necessita dos dados monitorados em ambos os terminais do sistema. Uma vez que a utilização da velocidade de propagação em modo aéreo não é considerada, informações adicionais acerca da falta se tornam necessárias. No método proposto em GILANY e KHALILl (2006), torna-se necessário identificar o instante de chegada da frente de onda refletida no ponto de falta (ou seja, t_{Lr}), resultando na aplicação do método por meio da Equação 3.1. Entretanto, apesar do método eliminar a necessidade do conhecimento da

velocidade de propagação das ondas viajantes, a sincronização do canal de comunicação continua sendo necessária, o que representa uma desvantagem.

$$d = \frac{l}{2}.\frac{t_{Lr} - t_{Li}}{(t_{Lr} - t_{Li}) + (t_{RI} - t_{Li})}. \tag{3.1}$$

Em LIU et al. (2012), os autores propõem um método de localização de faltas com base no método de um terminal que elimina a necessidade de detecção da frente de onda refletida no ponto de falta. O método analisa a velocidade de propagação das ondas viajantes no modo aéreo e terra, assim como está apresentado na Equação 3.2. Apesar de matematicamente atrativa, a necessidade de analisar o modo terra das ondas viajantes pode representar uma desvantagem, pois tal modo sofre maior atenuação e dispersão das altas frequências, degradando a forma das OVs e dificultando a identificação precisa dos instantes usados na localização de faltas. Com isso, a velocidade de propagação das ondas viajantes no modo terra pode apresentar mais incertezas do que no modo aéreo (MAGALHÃES; LOPES, 2021). No mais, o modo terra existe apenas para faltas que envolvem a terra, o que limita a aplicação da Equação 3.2.

$$d = \frac{(t_{Li0} - t_{Li}).v_{p0}.v_{p1}}{(v_{p1} - v_{p0})}. \tag{3.2}$$

Um método alternativo que utiliza dados monitorados apenas em um terminal foi proposto em SCHWEITZER et al. (2016). Tal método elimina a necessidade de uso das velocidades de propagação das ondas viajantes no modo terra e aéreo, necessitando apenas a análise da onda viajante de modo aéreo. Basicamente, a detecção da onda viajante refletida e refratada no instantes t_{Lr} e t_{Lt} é proposta, resultando na Equação 3.3. No entanto, apesar das vantagens matemáticas, a detecção dos instantes t_{Lr} e t_{Lt} é considerada uma tarefa desafiadora, principalmente porque, a depender do tipo e resistência de falta, pode não haver ondas viajantes transmitidas (MAGALHÃES; LOPES, 2021).

$$d = l.\frac{(t_{Lr} - t_{Li})}{(t_{Lr} - t_{Li}) + (t_{Lt} - t_{Li})}. \tag{3.3}$$

Tomando como referência inicial a Equação 3.2, foi proposta uma nova solução em LOPES (2016). Tal solução é baseada no método de dois terminais e independe do conhecimento da velocidade de propagação das ondas viajantes de modo terra e aéreo. Para isso, a Equação 3.2 foi aplicada em ambos os terminais da LT e, assumindo que as ondas viajantes se propagam em ambas as direções da LT com velocidade de propagação de modo terra e aéreo uniforme, os resultados obtidos em ambos os terminais são combinados, resultando na Equação 3.4. Apesar do método analisar os dados nos dois terminais, a sincronização de dados não é necessária. Entretanto, de forma similar ao

método apresentado em LIU et al. (2012), a aplicação dessa solução é restrita para faltas que envolvem o modo terra. No mais, a premissa que as ondas viajantes se propagam de forma uniforme para o modo terra pode ser uma fonte de erros no processo de localização das faltas. As ondas viajantes de modo aéreo se propagam em direção aos extremos da LT de forma uniforme visto que apresentam uma dispersão desprezível. Isto resulta em valores de velocidade de propagação muito semelhantes quando analisados de ambos os terminais da LT. Por outro lado, a dispersão das ondas viajantes de modo terra é mais relevante, resultando em maiores diferenças entre as velocidade aparentes verificadas em cada terminal da LT (RIBEIRO et al., 2020). Com isso, apesar do bom resultado obtido pela solução proposta para aplicação em linhas curtas, quando considerado linhas mais extensas, o desempenho da solução pode ser afetado devido aos processos de atenuação e dispersão das ondas viajantes de modo terra.

$$d = l.\frac{(t_{Li0} - t_{Li})}{(t_{Li0} - t_{Li}) + (t_{Ri0} - t_{Ri})}. \tag{3.4}$$

Motivados pelos desafios e algumas desvantagens apresentadas nos métodos anteriores, em (LOPES et al., 2017) foi proposta uma solução baseada no método de dois terminais que elimina a necessidade de detecção das ondas viajantes de modo terra. Este método combina os resultados obtidos por meio da aplicação do método clássico de um terminal em ambos os terminais da LT, resultando na Equação 3.5. O método exige a detecção da onda viajante de modo aéreo refletida no ponto de falta, o que representa um dos grandes desafios da aplicação dos métodos baseados na teoria de ondas viajantes. Por outro lado, a aplicação da solução proposta independe da sincronização de dados e do conhecimento específico dos parâmetros elétricos do sistema.

$$d = l.\frac{(t_{Lr} - t_{Li})}{(t_{Lr} - t_{Li}) + (t_{Rr} - t_{Ri})}. \tag{3.5}$$

Em REIS et al. (2021) é proposto um método de localização de faltas baseado na teoria de ondas viajantes, o qual utiliza os dados monitorados em apenas um terminal do sistema. O método utiliza a Transformação de Park para calcular os modos aéreos dos sinais de tensão e corrente, e um procedimento de análise de correlação adaptado é proposto para estimar o atraso de tempo entre as ondas incidentes e refletidas induzidas pela falta na linha de transmissão. O algoritmo é acionado quando a perturbação é detectada no terminal monitorado. Diferente das metodologias clássicas relatadas na literatura, a técnica proposta não necessita de um processo prévio de classificação de falhas e não é afetada por componentes de baixa frequência presentes nos sinais elétricos, o que representa aspectos desafiadores das abordagens tradicionais baseadas em correlação.

Os ajustes dos métodos alternativos descritos acima foram capazes de contornar muitos obstáculos da aplicação dos métodos clássicos de localização baseados na TOV e se mostraram bastante eficientes. Contudo, estes métodos foram avaliados considerando apenas sistemas de transmissão em corrente alternada.

3.1 SÍNTESE DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para avaliar as principais características dos trabalhos analisados, na Tabela 1 é apresentado um resumo da revisão bibliográfica, acompanhado de uma comparação com o método proposto nesta tese. O resumo analisa a função e as técnicas empregadas em cada trabalho, além de verificar se o método requer dados monitorados em um ou dois terminais e se utiliza os dados de corrente e/ou tensão. Adicionalmente, analisa se o impacto da variação dos parâmetros de distância (d), resistência (r) e tipo (t) de falta na eficácia do método proposto foi avaliado em cada trabalho.

Tabela 1 – Resumo da revisão bibliográfica.

Referência	**Função**	**Técnica Empregada**	**Terminais**		**Sinal**		**Falta**		
			1	**2**	**I**	**V**	**d**	**r**	**t**
Ando et al. (1985)	LF	OV e DS	✓	-	✓	-	-	-	-
Gilany et al. (2006)	LF	OV e TW	-	✓	-	✓	✓	✓	-
Suonan et al. (2009)	DF e LF	MDT	-	✓	✓	-	✓	✓	✓
Nanayakkara et al. (2012a)	DF e LF	OV e TW	-	✓	✓	✓	✓	✓	-
Nanayakkara et al. (2012b)	DF e LF	OV e TW	-	✓	✓	-	✓	-	-
Liu et al. (2012)	DF e LF	OV e TW	-	✓	✓	-	✓	✓	-
He et al. (2013)	LF	FN	✓	-	✓	-	✓	✓	✓
Yuansheng et al. (2015)	LF	OV, BT e PSO	-	✓	✓	✓	✓	-	-
Yue (2016)	LF	FastICA	✓	-	-	✓	✓	✓	-
Vasanth et al. (2016)	LF	RNA e TW	-	✓	✓	-	✓	✓	-
Hossam-Eldim et al. (2016)	DF, LF e CF	Fuzzy e TW	✓	-	✓	-	✓	-	-
Schweitzer et al. (2016)	LF	OV e DS	✓	-	✓	✓	✓	-	-
Lopes (2016)	LF	OV e TW	-	✓	✓	-	✓	-	-
Lopes et al. (2017)	LF	OV e TW	-	✓	✓	-	✓	✓	✓
Burek et al. (2018)	DF e LF	OV e Der	✓	-	✓	-	✓	-	-
Melo (2018)	DF e LF	OV e Der	-	✓	✓	✓	✓	✓	-
Silva et al. (2019)	DF e LF	RNA	✓	-	-	✓	✓	✓	✓
Fernandes et al. (2020)	DF e LF	OV e DS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Reis et al. (2021)	LF	OV e TP	✓	-	✓	✓	✓	✓	✓
Fayazy et al. (2023)	LF	OV e TW	✓	-	-	✓	✓	✓	✓
Lima (2024)	DF e LF	OV, MO e AG	-	✓	✓	-	-	✓	✓
Xia et al. (2024)	LF	OV e DM	-	✓	✓	✓	✓	-	✓
Hong et al. (2025)	LF	OV e TW	✓	✓	-	✓	✓	-	-
Liu et al. (2025)	LF	OV	-	-	✓	-	✓	-	-
Método Proposto	CF e LF	OV e DS	✓	-	-	✓	✓	✓	✓

DF: Detecção, LF: Localização, CF: Classificação, OV: Ondas Viajantes, DS: Filtro Differentiator Smoother, MDT: Minimização da Função de Distribuição de Tensão, TW: Transformada Wavelet, FN: Frequência Natural, BT: Filtro Butterwoth, PSO: Otimização por Enxame de Partículas, FastICA: Rápida Análise de Componentes Independentes, RNA: Rede Neural Artificial, LFUZ: Lógica Fuzzy, Der: Derivada, TP: Transformada de Park, MO: Métodos de Otimização, AG: Algoritmo Genético DM: Decomposição modal, TWDR: Transformada Wavelet Discreta Redundante

Fonte: Próprio autor.

De acordo com os dados apresentados na Tabela 1, verifica-se que há diferentes técnicas que vêm sendo empregadas a fim de diagnosticar as faltas em sistemas elétricos de potência. Dentre tais técnicas, destaca-se a aplicação do filtro DS e das transformadas wavelet, seja contínua ou discreta, para avaliar os sinais de tensão e/ou corrente do sistema. Além disso, conclui-se que a teoria de ondas viajantes é a principal metodologia de localização de faltas aplicada em sistemas HVDC.

Nesse contexto, para compreender melhor as contribuições desta tese ao estado da arte, na Tabela 2 é apresentada uma análise comparativa das principais vantagens e limitações dos trabalhos encontrados na literatura em relação ao método proposto neste trabalho. Ressalta-se que foram considerados apenas os trabalhos que propuseram métodos baseados na teoria de ondas viajantes no processo de diagnóstico de faltas em sistemas HVDC, em alinhamento com o método proposto nesta tese.

Tabela 2 – Análise comparativa entre a bibliografia utilizada e o método proposto.

Referência	Vantagens	Limitações
Ando et al. (1985)	- Não necessita de um canal de comunicação sincronizado, - Avaliação da eficácia do método com base em registros reais.	- Velocidade de propagação das ondas viajantes considerada fixa, - Não avaliação da influência de diferentes características de falta na eficácia do método, - Avaliação de apenas quatro casos de faltas.
Suonan et al. (2009)	- Modelo de LT a parâmetros distribuídos dependentes da frequência, - Análise da variação da resistência e local de falta na eficácia do método.	- Canal de comunicação sincronizado, - Necessita dos dados de tensão e corrente, - Necessita do cálculo da distribuição de tensão ao longo da LT.
Nanayakkara et al. (2012a)	- Aplicação do método de localização de faltas em uma LT HVDC composta por trechos aéreos e subterrâneos, - Técnica para estimação da velocidade de propagação das ondas viajantes em cada trecho da linha de transmissão.	- Canal de comunicação sincronizado, - Limiar de detecção de faltas considerado fixo, - Considerado apenas dois valores de resistência de falta.
Nanayakkara et al. (2012b)	- Aplicação do método de localização de faltas em um sistema HVDC multiterminal (três terminais), - Aplicável a sistemas HVDC multiterminais com mais de três terminais.	- Canal de comunicação sincronizado, - Dados monitorados em todos os terminais do sistema HVDC, - Limiar de detecção de faltas considerado fixo.
Yuansheng et al. (2015)	- Não necessita de um canal de comunicação sincronizado, - Técnica que utiliza a teoria de ondas viajantes em conjunto com métodos de otimização.	- Modelo de LT a parâmetros distribuídos constantes com a frequência, - Dados monitorados em ambos os terminais da LT, - Velocidade de propagação das ondas viajantes considerada fixa.
Burek et al. (2018)	- Não necessita de um canal de comunicação sincronizado, - Dados monitorados apenas em um terminal do sistema.	- Necessidade do conhecimento preciso das características da linha, - Velocidade de propagação das ondas viajantes considerada fixa, - Não avaliação de diferentes tipos e valores de resistência de falta.
Melo (2018)	- Emprego de um limiar de detecção autoadaptativo.	- Canal de comunicação sincronizado, - Necessidade do monitoramento de dados de tensão e corrente, - Velocidade de propagação das ondas viajantes considerada fixa, - Modelo de LT a parâmetros distribuídos constantes com a frequência.
Fayazy et al. (2023)	- Aplicação do método de localização de faltas em um sistema com LTs HVDC e HVAC adjacentes, - Não necessita de um canal de comunicação sincronizado.	- Baixa frequência de amostragem utilizada nas simulações (100 kHz), - Velocidade de propagação das ondas viajantes considerada fixa, - Não avaliação de diferentes valores de resistência de falta.
Lima (2024)	- Emprego de um limiar de detecção autoadaptativo, - Avaliação do ruído do sinal na eficácia do método.	- Necessidade de um canal de comunicação sincronizado, - Modelo de LT a parâmetros distribuídos constantes com a frequência.
Método Proposto	- Não necessita de um canal de comunicação sincronizado, - Dados monitorados em apenas um terminal, - Emprego de um limiar de detecção autoadaptativo, - Método de classificação baseado apenas em sinais de tensão, - Robustez do processo de classificação frente a ruídos no sinal monitorado, - Redução dos erros no processo de localização em comparação ao método clássico de um terminal via a proposição de um fator de ajuste da velocidade de propagação das OVs.	- Redução da eficiência de classificação para faltas polo:polo com elevada resistência de falta, - Necessidade de simulação de faltas no sistema para determinação do fator de ajuste da velocidade de propagação das OVs.

Fonte: Próprio autor.

Por meio da análise da Tabela 2, conclui-se que muitos trabalhos encontrados na literatura necessitam de um canal de comunicação sincronizado entre os terminais do sistema HVDC, além de considerarem a velocidade de propagação das OVs fixa. Ademais, outras pesquisas consideram o modelo da LT a parâmetros distribuídos constantes com a frequência, o que distancia as simulações da operação real dos sistemas elétricos. É relevante destacar também que alguns métodos empregam um limiar de detecção fixo, o que pode implicar em fontes de erro no processo de localização de faltas.

Diante da revisão bibliográfica apresentada neste capítulo, conclui-se que o desempenho do processo de localização de faltas em muitos trabalhos é afetado, pois a velocidade de propagação das ondas viajantes é considerada fixa. Além disso, constatou-se que determinados trabalhos apresentam limitações na aplicação do processo de localização e classificação de faltas, pois dependem da análise do modo terra, o qual não está presente em faltas polo:polo. Ressalta-se ainda que alguns trabalhos não avaliam a influência de todas as características de falta (resistência, tipo e local) e da adição de ruído ao sinal monitorado na eficácia do método proposto. Essas constatações evidenciam a relevância e a contribuição desta tese.

Motivado pelas lacunas mencionadas acima, propõe-se aqui um método para classificação e localização de faltas incidentes na LT de um sistema HVDC. Tal método é baseado na análise dos sinais de tensão monitorados em apenas um terminal do sistema HVDC, que é realizada por meio da aplicação do filtro DS. A metodologia empregada nas etapas de classificação e localização de faltas é apresentada no próximo capítulo.

Capítulo 4

Metodologia

O método proposto para classificação e localização de faltas em LTs do sistema bipolar HVDC é baseado na análise dos sinais de tensão monitorados no terminal retificador, que é realizada por meio da aplicação do filtro DS. A fim de gerar a base de dados necessária para avaliar o método, o programa ATP (*Alternative Transients Program*) foi utilizado para realizar as simulações de diferentes condições de falta. O *software* Matlab® foi empregado como referência para importação dos dados do ATP e implementação do método proposto.

Neste capítulo são apresentados os dados técnicos do sistema HVDC analisado, a metodologia proposta para classificação e localização de faltas e as métricas empregadas para avaliação do desempenho do método.

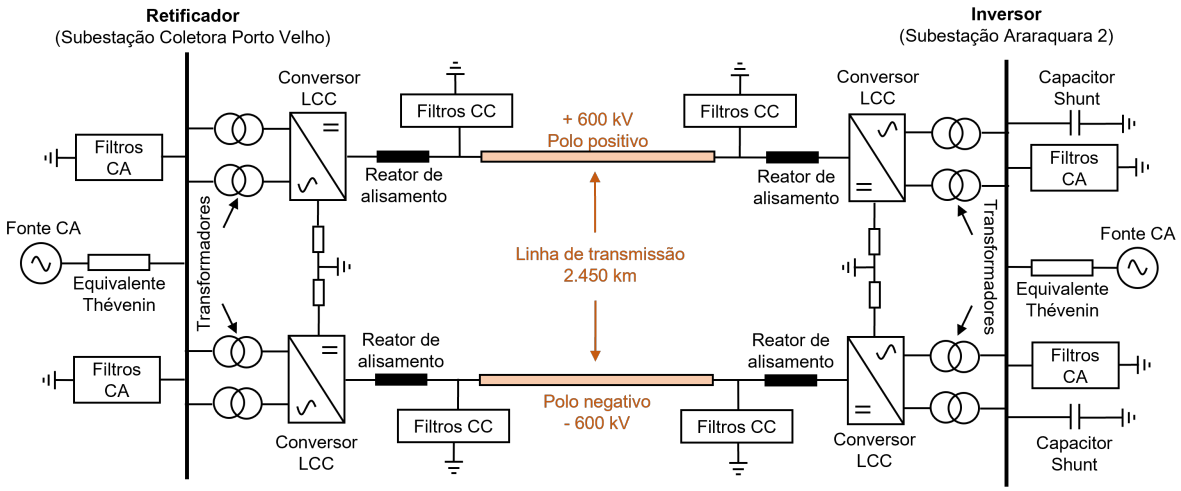
4.1 SISTEMA BIPOLAR HVDC MODELADO

O esquema HVDC utilizado neste estudo para avaliar o desempenho do método proposto é baseado no sistema modelado por LUZ, CARVALHO JR. e GOMES JR. (2014) no *software* ATP/ATPDraw, que representa a topologia adotada, na etapa dos estudos pré-operacionais, para representar o sistema HVDC bipolar brasileiro do Rio Madeira. Tal sistema é constituído por dois bipolos com potência igual a 3.150 MW cada e um nível de tensão de $\pm$600 kV, que interliga a subestação Coletora Porto Velho, localizada em Rondônia, à subestação Araraquara 2, instalada em São Paulo. É importante destacar que o método proposto para classificação e localização de faltas, conforme será apresentado na Seção 4.3, não depende das características específicas do sistema HVDC do Rio Madeira e, portanto, pode ser adaptado para aplicação em outros sistemas HVDC.

A interligação do sistema HVDC do Rio Madeira é realizada por meio de uma LT com comprimento de aproximadamente 2.450 km e corrente nominal de 2.625 A. Tal sistema conta com quatro conversores do tipo LCC de doze pulsos. Adicionalmente, o esquema apresenta compensadores reativos capacitivos e filtros para atenuar as distorções harmônicas produzidas pela conversão de corrente alternada em contínua e vice-versa. Os sistemas em CA conectados em cada estação conversora do sistema HVDC são modelados por meio de uma impedância equivalente Thévenin e de uma fonte de tensão alternada. Na Figura 14 é apresentado o esquema modelado no ATP com a representação de todos os componentes do sistema HVDC bipolar: linhas de transmissão,

filtros de corrente alternada e corrente contínua, reatores de alisamento, capacitores *shunt* e transformadores.

Figura 14 – Sistema bipolar HVDC do Rio Madeira.

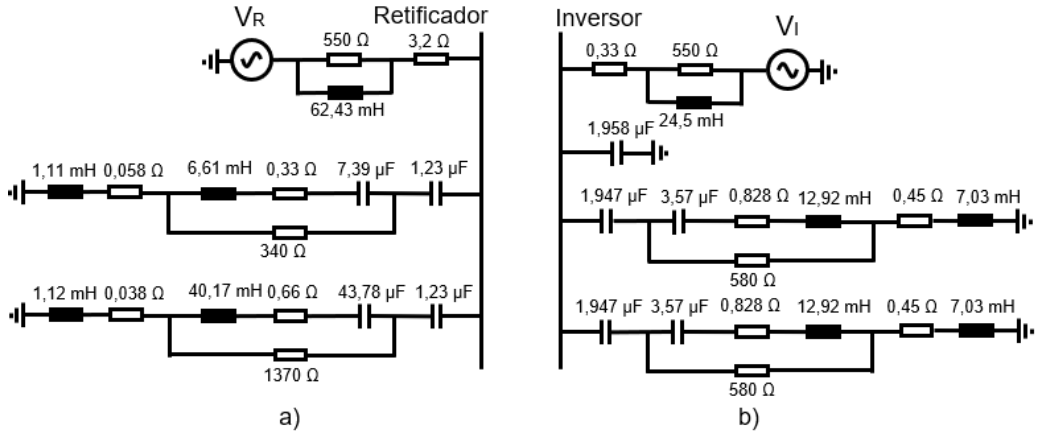


Fonte: Próprio autor.

De acordo com a análise da Figura 14, verifica-se que os sistemas em corrente alternada conectados nos terminais do retificador e inversor são representados pela impedância equivalente Thévenin e por uma fonte de tensão alternada. Os blocos denominados “Filtros CA” e “Filtros CC” representam, respectivamente, os filtros de corrente alternada e contínua do sistema HVDC. Destaca-se que as terminações da LT são caracterizadas pela associação do reator de alisamento e filtros CC, os quais são modelados pela associação de resistores, capacitores e indutores.

Na Figura 15 são apresentados os valores dos parâmetros modelados no ATP dos filtros, da impedância equivalente e dos compensadores reativos em cada terminal do sistema. Note que na Figura 15 estão representados apenas os filtros e compensadores conectados ao polo positivo de cada terminal, pois tais configurações são iguais para o polo negativo.

Figura 15 – Impedância do circuito CA, compensadores reativos e filtros nos terminais do a) Retificador e b) Inversor.



Fonte: Próprio autor.

Os transformadores de cada terminal são modelados por dois transformadores trifásicos de enrolamento duplo. A conexão de cada enrolamento dos transformadores é realizada por meio da ligação Y/Δ e Y/Y. Os parâmetros de tais transformadores são apresentados na Tabela 3.

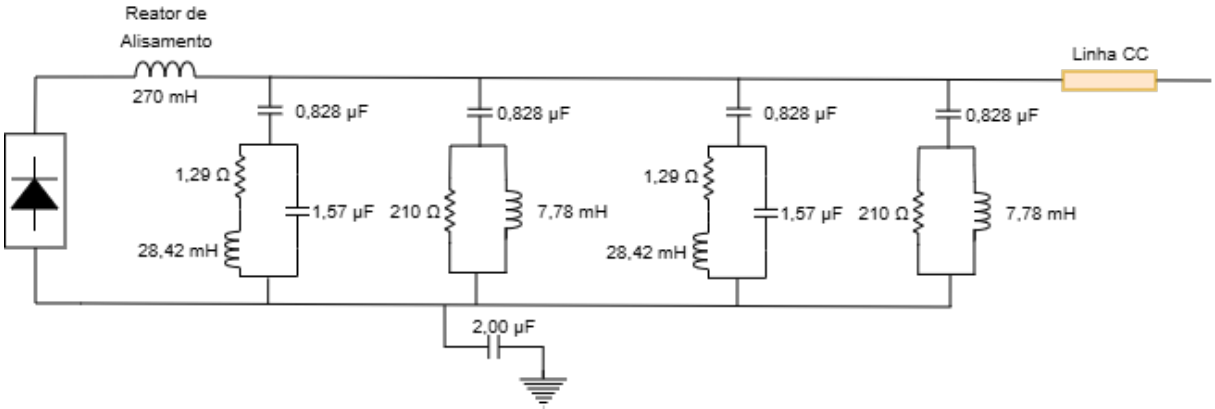
Tabela 3 – Parâmetros dos transformadores.

Parâmetro	**Retificador**		**Inversor**	
Conexão	Y/Δ	Y/Y	Y/Δ	Y/Y
Potência nominal (MVA)	930,36	930,36	860,79	860,79
Tensão do enrolamento (kV)	299,5/250,6	299,5/144,7	295,6/231,9	295,6/133,8

Fonte: Próprio autor.

A ligação entre os conversores e as linhas de transmissão em corrente contínua é realizada por meio do conjunto composto pelo reator de alisamento (L_a) e pelo filtro capacitivo CC, conforme apresentado na Figura 16. É relevante destacar que o filtro é conectado entre a linha de transmissão e o conversor LCC do sistema.

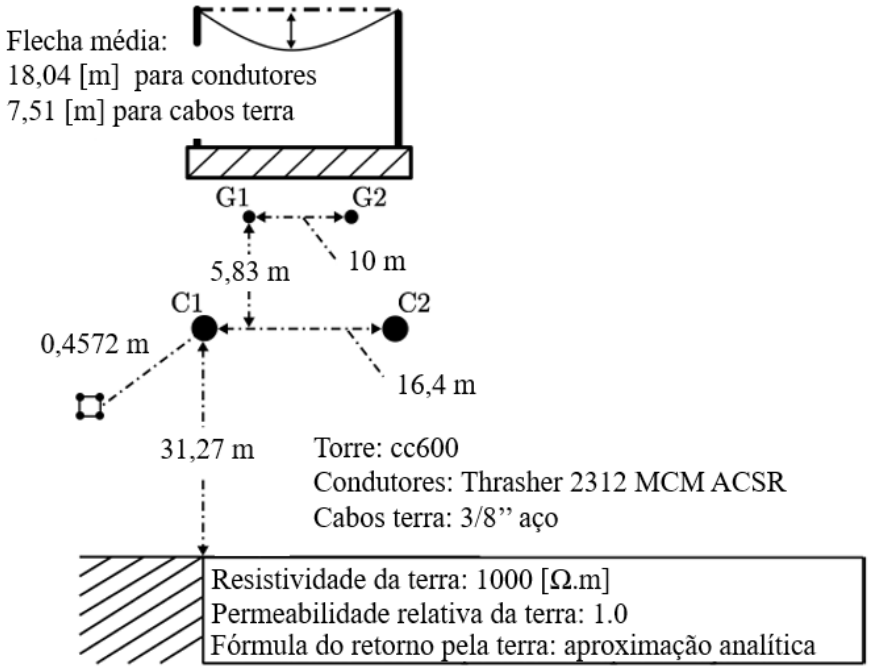
Figura 16 – Parâmetros do filtro capacitivo.



Fonte: Próprio autor.

O modelo de linha de transmissão adotado originalmente em LUZ, CARVALHO JR. e GOMES JR. (2014) considera os parâmetros distribuídos da LT independentes da frequência por meio da adoção do modelo de Bergeron no ATP. Entretanto, o modelo a parâmetros distribuídos dependentes da frequência é mais adequado para estudos de ondas viajantes, pois resulta em atenuações e dispersões mais críticas das OVs (RIBEIRO et al., 2020; RIBERIO et al., 2021). Dessa forma, a fim de tornar a simulação mais próxima da operação real, as linhas de transmissão dos dois polos do sistema são modeladas a parâmetros distribuídos dependentes da frequência. Para tanto, utilizou-se o modelo de JMarti, proposto em MARTI (1982), para realizar a modelagem da LT utilizando os parâmetros da torre apresentados na Figura 17.

Figura 17 – Parâmetros da torre da LT.



Fonte: LUZ, CARVALHO JR. e GOMES JR. (2014).

Destaca-se que o modelo JMarti é mais preciso e confiável para estudos baseados em ondas viajantes, pois resulta em transitórios com formas de onda mais próximas das obtidas em sistemas reais, de forma que tal modelo é indicado sempre que a pesquisa avalia a reflexão e refração das ondas viajantes (RIBEIRO et al., 2020).

4.2 SIMULAÇÕES E SINAIS ANALISADOS

Como a modelagem da linha de transmissão é realizada por meio de parâmetros distribuídos dependentes da frequência, a velocidade de propagação das ondas viajantes varia de acordo com as frequências transitórias dominantes. Tal fato acarreta incertezas na modelagem dos parâmetros da LT para todos os casos simulados no ATP.

Diante desse cenário, a velocidade de propagação das ondas viajantes foi estimada a partir da aplicação de uma falta controlada e da medição do tempo de trânsito da primeira frente de onda. Para essa finalidade, adotou-se uma falta do tipo polo+:terra, aplicada a 1.175 km (48% da extensão da linha) a partir do terminal retificador e com resistência de falta de 10 Ω, assim como está apresentado em FERNANDES et al. (2020). A escolha dessa condição deve-se ao fato de que faltas de baixa resistência produzem transitórios de maior amplitude e frentes de onda mais bem definidas, reduzindo as incertezas associadas à determinação do tempo de propagação. Adicionalmente, a aplicação da falta em uma posição aproximadamente central da linha proporciona um tempo de trânsito suficientemente elevado para a estimativa da velocidade. Ressalta-se que essa etapa tem como único objetivo estimar uma velocidade de propagação de referência para o sistema em estudo. Posteriormente, como será apresentado na Seção 4.3.4, essa velocidade é corrigida por meio do fator de ajuste proposto, permitindo representar de forma mais adequada a propagação efetiva das ondas viajantes ao longo da linha de transmissão.

Com o sistema bipolar HVDC modelado no ATP, simulações com diferentes características de falta foram realizadas adotando-se uma frequência de amostragem igual a 1 MHz. Tal valor foi adotado por representar as elevadas taxas de resolução dos IEDs, do inglês *Intelligent Electronic Devices*, em sistemas elétricos reais. Dentre os principais IEDs que utilizam a teoria de ondas viajantes para localizar faltas em LTs, destaca-se o relé SEL-T400L, que registra eventos com uma taxa de amostragem de 1 MHz para análise de eventos do sistema de potência e das funções de localização de faltas e proteção baseadas nas ondas viajantes (SEL, 2021).

Os diferentes cenários de falta analisados neste trabalho foram gerados a partir da variação da localização, do tipo e da resistência de falta. Em relação à posição da falta, foram simuladas ocorrências ao longo de praticamente toda a extensão da linha de transmissão, variando entre 25 km e 2.425 km em relação ao terminal retificador,

com incrementos de 50 km, correspondentes a aproximadamente 2% do comprimento total da LT. A escolha da posição inicial de 25 km permite que os pontos simulados representem o centro de cada intervalo de discretização de 50 km, proporcionando uma distribuição aproximadamente uniforme dos cenários ao longo da linha.

Os tipos de falta analisados foram: polo+:terra, polo-:terra e polo:polo e a resistência de falta foi variada entre 0,1 e 500 Ω para avaliar a influência da impedância de falta na eficácia do método. Na Tabela 4 são apresentados os cenários de falta avaliados, totalizando 1.764 casos distintos.

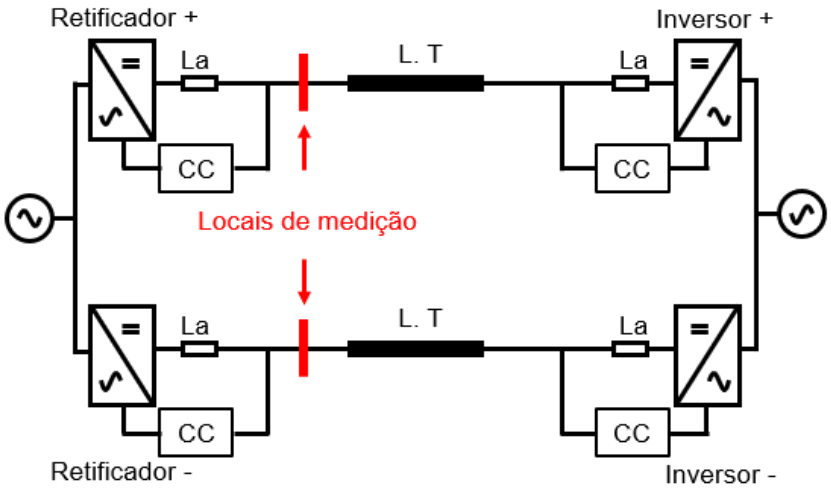
Tabela 4 – Características de falta.

Local (km)	**Tipo**	**Resistência (Ω)**
25, 75, ..., 2.375, 2.425	Polo+:Terra, Polo-:Terra, Polo:Polo	0,1; 1; 5; 10; 30; 50; 100; 150; 200; 300; 400; 500

Fonte: Próprio autor.

Cumpre ressaltar que o método de classificação e localização de faltas proposto é baseado na análise dos sinais de tensão monitorados no terminal retificador. É importante destacar que na aplicação prática de métodos baseados em ondas viajantes, os sinais de tensão em linhas HVDC comumente são obtidos por meio de divisores resistivos e/ou capacitivos de tensão. Neste trabalho, entretanto, o sistema de medição não foi modelado, assumindo-se medições ideais de tensão nos terminais da linha. Os pontos de medição desses sinais no sistema HVDC estão ilustrados na Figura 18.

Figura 18 – Locais de medição do sinal de tensão na linha de transmissão.

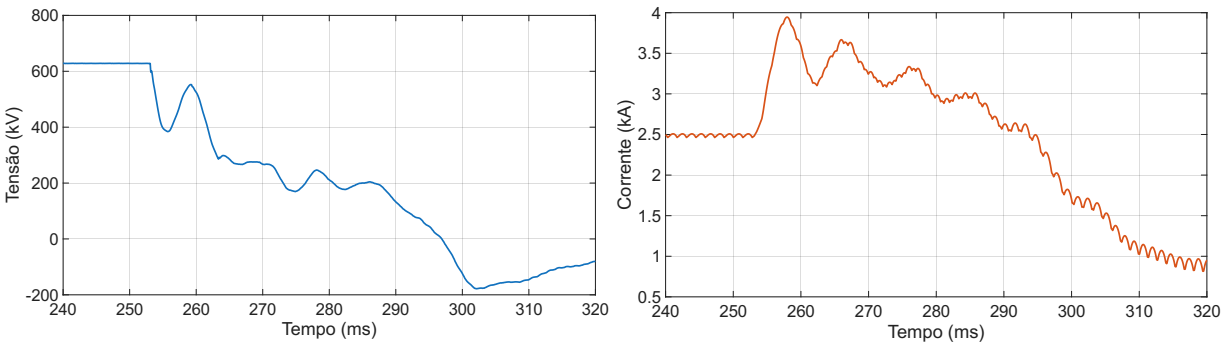


Fonte: Próprio autor.

De acordo com a Figura 18, nota-se que a medição dos sinais é realizada na terminação da LT do retificador, que é composta pelo reator de alisamento (L_a) e pelo

filtro capacitivo (CC), o qual é modelado por uma associação de resistores, capacitores e indutores. Por meio de uma análise do filtro CC, foi verificado que as terminações da LT apresentam uma impedância predominantemente capacitiva, conforme apresentado em FERNANDES (2020). Ressalta-se que os sinais de tensão e/ou corrente monitorados são filtrados pelo filtro CC com o objetivo de atenuar as distorções causadas pelos efeitos harmônicos do processo de conversão CA-CC. A fim de analisar o processo de filtragem dos sinais, na Figura 19 estão apresentados os gráficos dos sinais de tensão e corrente monitorados no polo positivo do retificador. Tais sinais foram obtidos considerando a incidência de uma falta do tipo polo+:terra, com impedância de 100 Ω e localizada a 925 km do retificador.

Figura 19 – Sinais monitorados no terminal retificador de a) Tensão e b) Corrente.

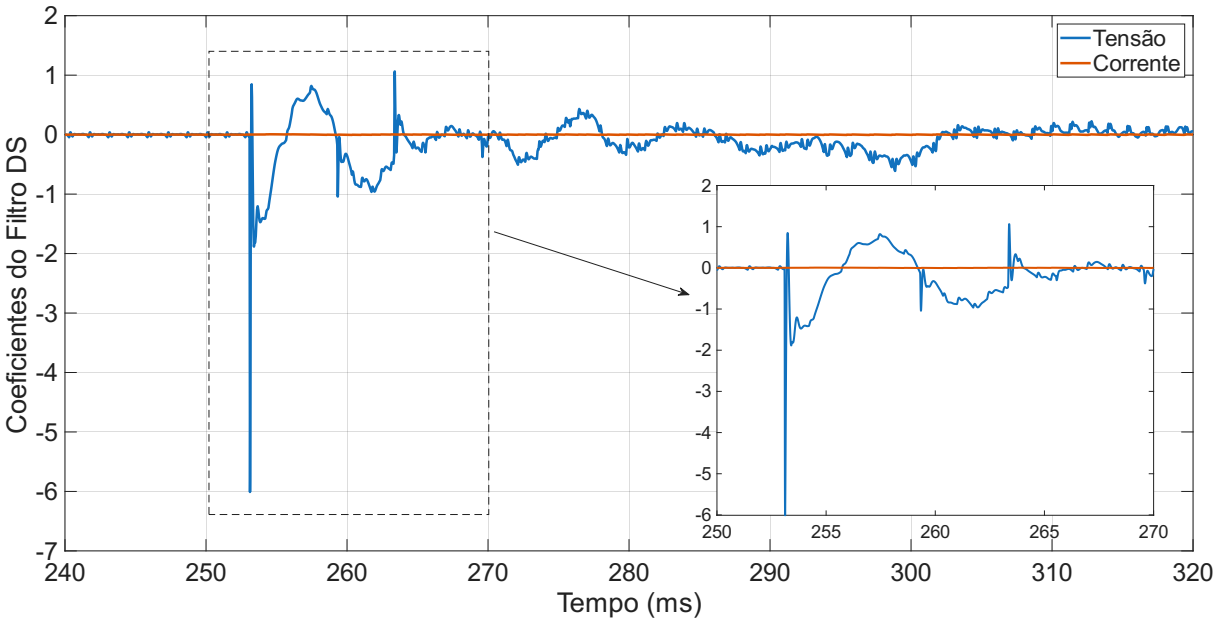


a) b)

Fonte: Próprio autor.

A fim de comparar o desempenho dos sinais de tensão e corrente após a incidência da falta, na Figura 20 estão apresentados os gráficos dos coeficientes do filtro DS aplicado aos sinais de tensão e corrente.

Figura 20 – Coeficientes do filtro DS aplicado aos sinais de tensão e corrente.



Fonte: Próprio autor.

Como verificado nos gráficos apresentados nas Figuras 19 e 20, para o caso analisado, o sinal de tensão apresenta uma variação mais abrupta no instante de incidência da falta, resultando em um pico de elevada amplitude nos coeficientes do filtro DS. Em contrapartida, o sinal de corrente apresenta uma evolução mais gradual, fazendo com que os coeficientes produzidos pelo filtro DS permaneçam com amplitudes reduzidas e sem um pico claramente destacado no instante da incidência da falta. Dessa forma, a identificação do instante correspondente à chegada da primeira frente de onda torna-se mais evidente quando o filtro é aplicado ao sinal de tensão.

Esse desempenho está associado ao princípio de funcionamento do filtro DS, que enfatiza variações rápidas dos sinais. Como a tensão apresentou uma transição mais abrupta no instante da incidência da falta do que a corrente, seus coeficientes exibiram um pico mais pronunciado, favorecendo a detecção da primeira frente de onda. Dessa forma, a fim de facilitar o processo de detecção dos instantes de tempo de chegada das ondas viajantes no terminal de monitoramento via a análise dos coeficientes do filtro DS, o sinal de tensão é utilizado neste estudo.

4.3 MÉTODO PARA CLASSIFICAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE FALTAS

O método proposto para classificação e localização de faltas neste trabalho exige a correta detecção dos instantes de tempo de chegada das frentes de ondas viajantes oriundas do ponto de falta. De posse de tais instantes, torna-se possível aplicar o método, conforme será detalhado nos próximos tópicos.

4.3.1 Detecção

A detecção dos transitórios eletromagnéticos originados pela incidência da falta é realizada por meio da aplicação do filtro DS aos sinais de tensão monitorados em ambos os polos do terminal retificador. A aplicação das faltas apresentadas na Tabela 4 na LT do sistema HVDC é simulada no ATP e os sinais de tensão monitorados nos polos do retificador são importados para o Matlab®. Neste *software* é implementada a metodologia para o cálculo dos valores dos coeficientes do filtro DS dos sinais de tensão analisados.

Conforme discutido na seção 2.5, o parâmetro do tamanho da janela de coeficientes do filtro DS (T_{DS}) influencia diretamente o desempenho do filtro DS, pois determina a largura da resposta produzida pelo filtro quando submetido a um afundamento dos sinais de tensão monitorados. Como demonstrado em LOPES et al. (2019a), janelas maiores de T_{DS} resultam em pulsos mais largos, o que pode comprometer a capacidade do método de detectar as frentes de ondas viajantes.

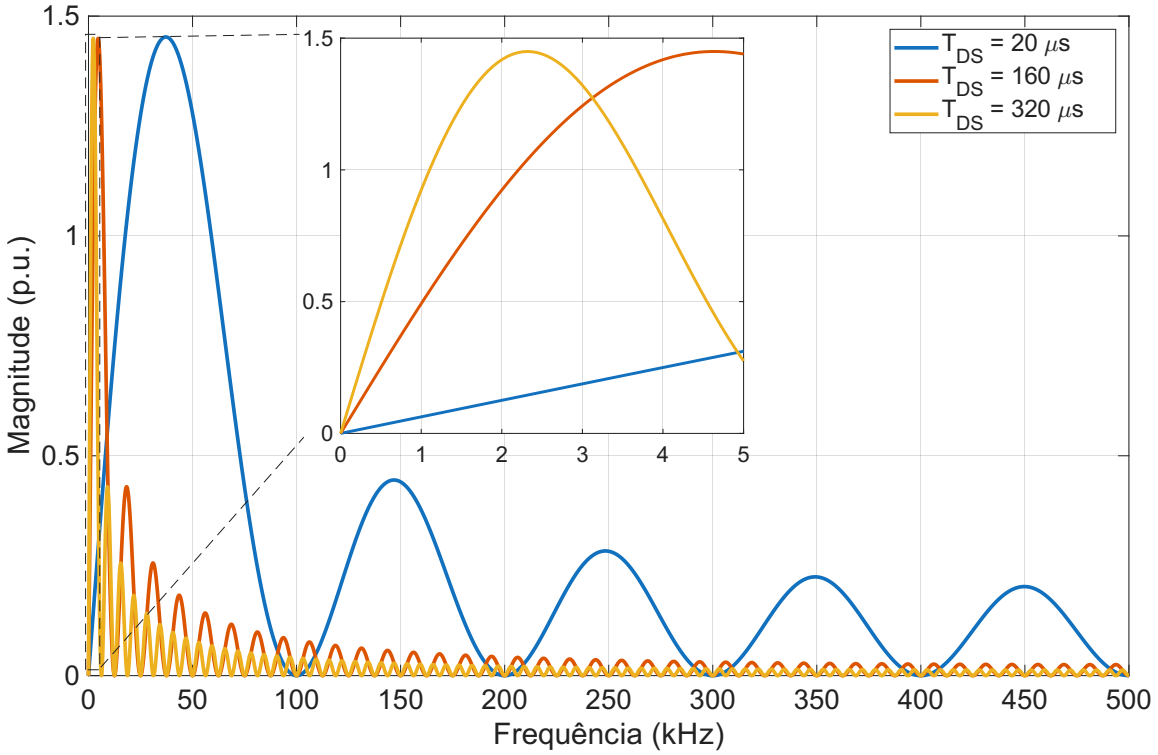
Além da influência no domínio do tempo, a escolha do T_{DS} também impacta significativamente a resposta em frequência do filtro DS. Em sistemas HVDC, os sinais medidos apresentam componentes de baixa frequência associadas aos processos de comutação dos conversores e possíveis oscilações oriundas da rede em corrente alternada conectadas aos terminais do sistema HVDC. Nesse contexto, quando a janela T_{DS} assume valores elevados, parte dessas componentes de baixa frequência pode passar pelo filtro, podendo comprometer a detecção de transitórios atenuados. Por outro lado, janelas menores de T_{DS} proporcionam maior atenuação das componentes de baixa frequência, reduzindo sua influência sobre a saída do filtro (LOPES et al., 2019a).

Em decorrência dessa problemática, evidencia-se a necessidade de remoção da maior parte possível das componentes de baixa frequência, sem comprometer a detecção de ondas viajantes que incidem no ponto de medição em instantes próximos entre si. Nesse cenário, o uso de janelas curtas de coeficientes seria indicado. Porém, a redução de T_{DS} resultaria também em uma maior sensibilidade do filtro DS a transitórios espúrios. Por isso, os desenvolvedores do filtro DS optaram por utilizar em seus dispositivos baseados em ondas viajantes o valor de 20 μs para o parâmetro T_{DS} (SEL, 2021). Dessa forma, neste estudo também é utilizado esse valor para a janela T_{DS} para aplicação do filtro DS. Ressalta-se que os parâmetros utilizados no filtro DS foram definidos com base na parametrização proposta em SCHWEITZER et al. (2014) e, posteriormente, empregada em LOPES et al. (2019a), a qual foi desenvolvida para maximizar a sensibilidade à detecção das componentes de alta frequência associadas às ondas viajantes.

Ressalta-se que, conforme apresentado em LOPES et al. (2019a), a janela do filtro DS é composta por duas metades simétricas de coeficientes, desconsiderando-se

coeficientes centrais nulos. Dessa forma, para $T_{DS} = 20$ μ s e taxa de amostragem de 1 MHz, a janela do filtro foi composta por 20 coeficientes. Na Figura 21 está apresentada a resposta em frequência do filtro DS considerando a frequência de amostragem de 1 MHz, que é a utilizada nas simulações conforme apresentado na seção 4.2. Adicionalmente, apresenta-se a resposta considerando os valores de 20 μs, 160 μs e 320 μs para o parâmetro T_{DS}.

Figura 21 – Resposta em frequência do filtro DS para diferentes valores de T_{DS}.



Fonte: Adaptado de (LOPES et al., 2019a).

Ressalta-se que o ganho unitário mencionado na parametrização do filtro DS apresentado na Seção 2.5 refere-se à sua resposta temporal para sinais em degrau, garantindo que o pico da saída possua a mesma amplitude da variação presente no sinal de entrada. Tal característica não implica que a magnitude da resposta em frequência permaneça unitária para todas as frequências, motivo pelo qual são observados valores superiores a 1 em determinadas faixas do espectro, conforme ilustrado na Figura 21.

Adicionalmente, conforme apresentado na Figura 21, a resposta em frequência do filtro DS para $T_{DS} = 20$ μs evidencia que essa configuração favorece as componentes de alta frequência associadas às ondas viajantes, mantendo ganho significativo na faixa entre dezenas e centenas de kHz. Esse desempenho garante que transitórios eletromagnéticos rápidos sejam preservados e destacados na saída do filtro. Ao mesmo tempo, a aproximação do ganho a zero para valores de baixas frequências promove a rejeição de componentes lentas do sinal, tais como processos de comutação de conversores,

oscilações de controle e variações do regime permanente, evitando que essas parcelas interfiram na identificação das frentes de onda de interesse.

Com os coeficientes do filtro DS calculados, procede-se à comparação dos módulos desses coeficientes com o limiar de detecção autoadaptativo proposto em MELO, NEVES e FERNANDES JR (2018), a fim de identificar o instante de chegada da primeira frente de onda originada no ponto de falta no terminal de monitoramento.

O limiar de detecção autoadaptativo é composto por dois parâmetros. O primeiro parâmetro a ser calculado é o desvio padrão do sinal de tensão (σ_V), que deve ser obtido em um intervalo de amostras no qual o sistema esteja operando em regime permanente. O intervalo proposto em MELO, NEVES e FERNANDES JR (2018) de 100 ms para as amostras em regime permanente foi utilizado no estudo. Tal parâmetro pode ser calculado por meio da Equação 4.1:

$$\sigma_V = \sqrt{\frac{\sum \left[(V(t) - \mu_V)^2\right]}{n}}, \tag{4.1}$$

em que $V(t)$ representa o valor de tensão no instante t, μ_V é a média dos valores de tensão e n é o número de amostras do intervalo considerado.

O segundo parâmetro utilizado no cálculo do limiar autoadaptativo é o fator característico do sistema (F_{CS}), que é calculado pela razão entre o valor máximo e o valor médio dos valores dos coeficientes do filtro DS, em módulo, assim como é apresentado na Equação (4.2). Destaca-se que deve ser considerado o mesmo período de amostras utilizado no cálculo do desvio padrão.

$$F_{CS} = \frac{máximo(|c(t)|)}{média(|c(t)|)}, \tag{4.2}$$

onde $c(t)$ representa o coeficiente do filtro DS calculado no instante t.

Após o cálculo dos parâmetros σ_V e F_{CS}, o valor do limiar autoadaptativo de detecção ($\rho(t)$) deve ser obtido por meio da Equação (4.3), assim como está descrito em MELO, NEVES e FERNANDES JR (2018).

$$\rho(t) = (|c(t - \Delta t)| + \sigma_V).F_{CS}, \tag{4.3}$$

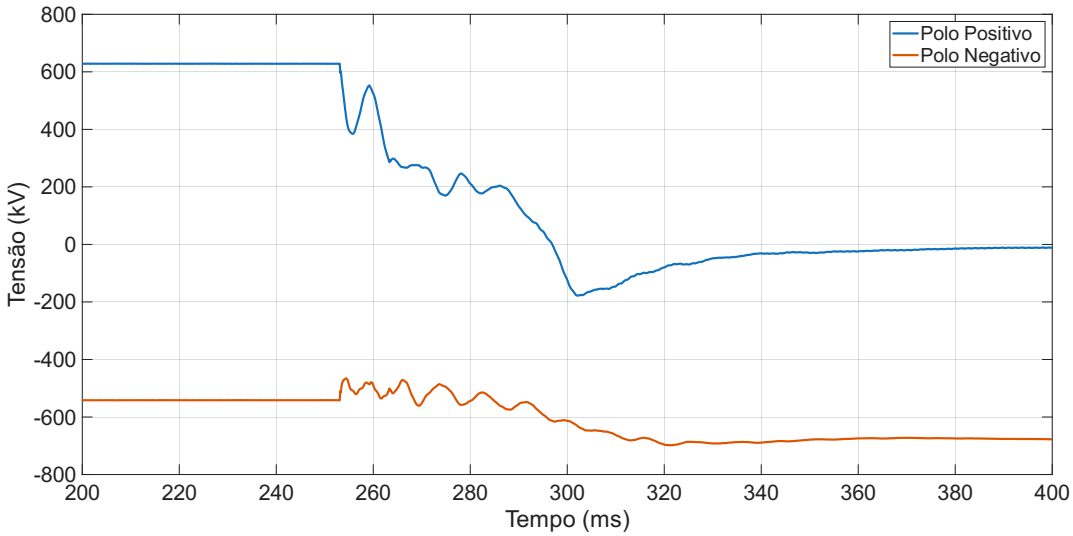
em que $c(t - \Delta t)$ é o coeficiente do filtro DS calculado no instante $t - \Delta t$, onde Δt representa o período de amostragem utilizado nas simulações. Como a frequência de amostragem utilizada nas simulações foi de 1 MHz, o período de amostragem é igual a 1 μs.

Nota-se que o limiar proposto é autoadaptativo e tem o seu valor modificado a cada iteração. Com isso, o limiar calculado na Equação (4.3) deve ser comparado com o

valor absoluto do coeficiente do filtro DS no instante t. Caso o valor de $|c(t)|$ seja superior ao limiar, o transitório eletromagnético é detectado e o instante de detecção é gravado para ser utilizado na etapa de localização da falta. Caso contrário, conclui-se que não foi verificado nenhum transitório eletromagnético no sistema naquele instante e o processo iterativo continua.

A fim de exemplificar a aplicação do limiar de detecção autoadaptativo, os gráficos dos sinais de tensão monitorados em ambos os polos do retificador estão apresentados na Figura 22. Tais gráficos foram obtidos considerando uma falta do tipo polo+:terra, com impedância igual a 100 Ω e localizada a 925 km do retificador.

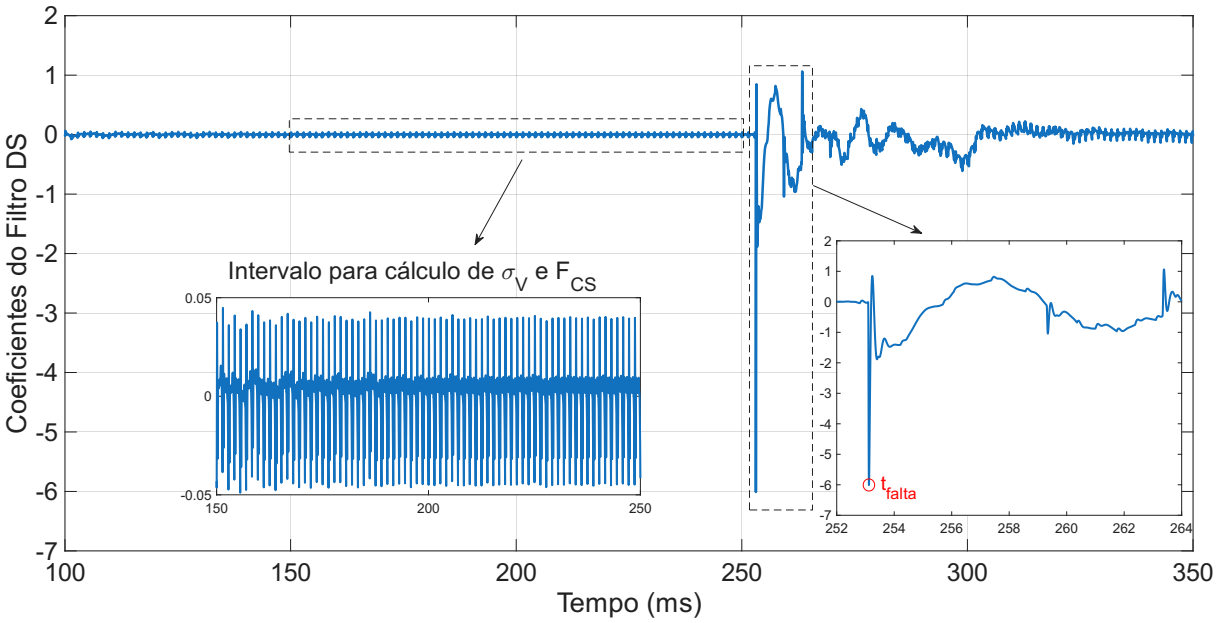
Figura 22 – Tensões monitoradas nos polos do terminal retificador.



Fonte: Próprio autor.

Os coeficientes do filtro DS aplicado aos sinais de tensão apresentados na Figura 22 são calculados. Na Figura 23 é apresentado o gráfico desses coeficientes para o sinal de tensão monitorado no polo positivo do retificador, no qual a falta foi incidida.

Figura 23 – Aplicação do método de detecção de faltas.



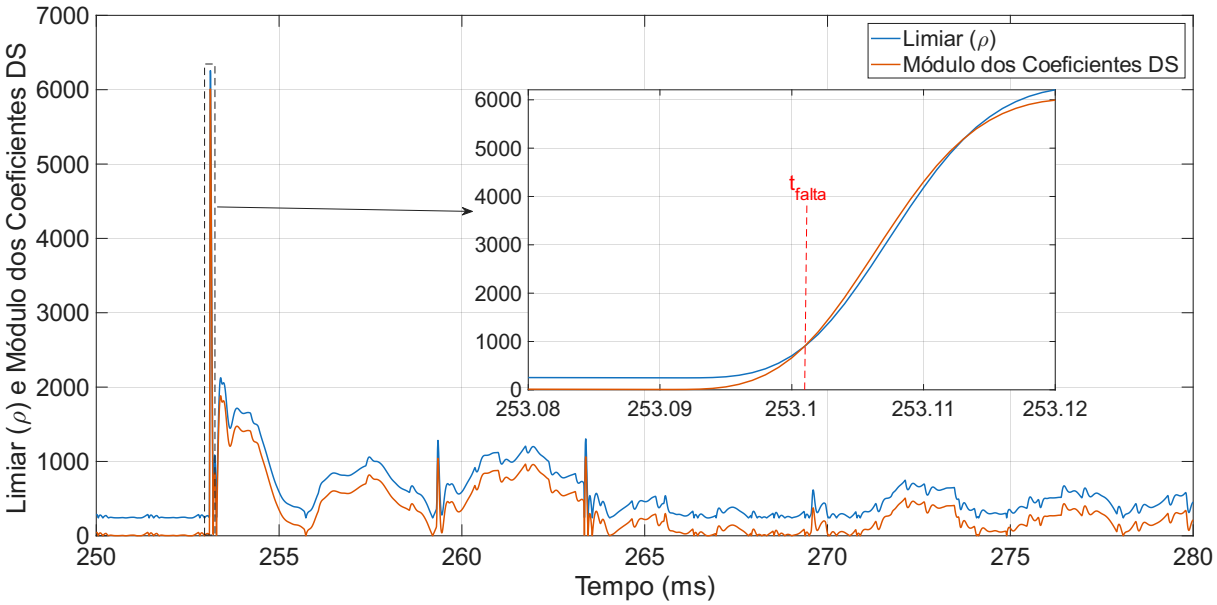
Fonte: Próprio autor.

Com base na Figura 23, verifica-se que o desvio padrão dos dados de tensão (σ_V) e o fator característico (F_{CS}) do sistema são calculados considerando o intervalo de tempo entre 150 e 250 ms, no qual o sistema HVDC está operando em regime permanente. Conforme proposto em MELO, NEVES e FERNANDES JR (2018), a janela de 100 ms foi utilizada para o cálculo de tais parâmetros. De forma geral, o cálculo desses parâmetros deve ser realizado a partir de um intervalo contendo apenas amostras em regime permanente e com duração suficiente para fornecer estimativas estatisticamente representativas das características do sinal monitorado. Para o caso específico de falta apresentado na Figura 23, foram calculados os valores dos parâmetros do limiar de detecção: σ_V = 239,831 e F_{CS} = 1,0013. Embora os sinais estejam em regime permanente, os valores de σ_V e F_{CS} dependem das características estatísticas do sinal monitorado naquele instante, podendo sofrer variações em função do ponto de operação do sistema. Por essa razão, esses parâmetros são estimados a partir da própria janela de pré-falta, permitindo que o limiar acompanhe automaticamente as condições operativas do sistema.

Com a obtenção dos valores dos parâmetros σ_V e F_{CS}, o limiar autoadaptativo ($\rho(t)$) é calculado para cada instante de tempo por meio da Equação (4.3) e seu valor é comparado com o valor absoluto do coeficiente do filtro DS para aquele instante de tempo ($|c(t)|$). Caso seja verificado, em algum instante, que o valor de $|c(t)|$ é superior ao limiar autoadaptativo, conclui-se que foi verificado um transitório eletromagnético no sistema e tal instante (t_{falta}) é gravado para ser utilizado nas etapas de classificação e localização de faltas. Para exemplificar essa operação, na Figura 24 estão representados os valores absolutos dos coeficientes DS e os valores do limiar autoadaptativo considerando a falta

apresentada na Figura 23.

Figura 24 – Comparação do limiar autoadaptativo com os valores absolutos dos coeficientes DS.



Fonte: Próprio autor.

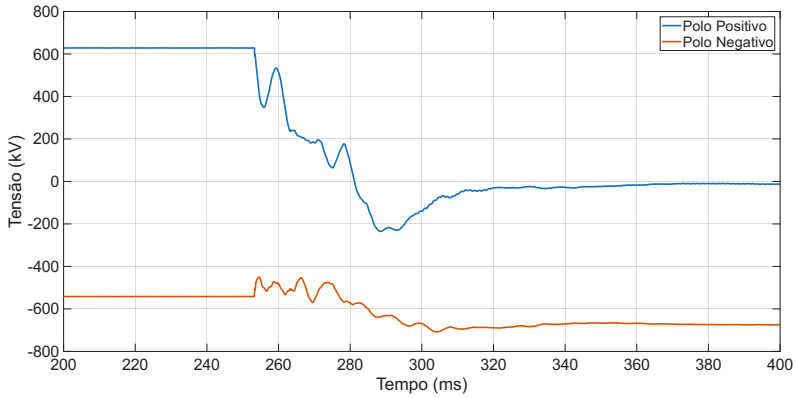
Para o caso de falta apresentado na Figura 24, o instante em que o valor absoluto dos coeficientes DS torna-se superior ao limiar autoadaptativo é em t_{falta} = 253,101 ms. Dessa forma, esse instante de tempo é salvo para utilização nas etapas de classificação e localização de faltas, conforme será detalhado nas próximas seções.

4.3.2 Classificação

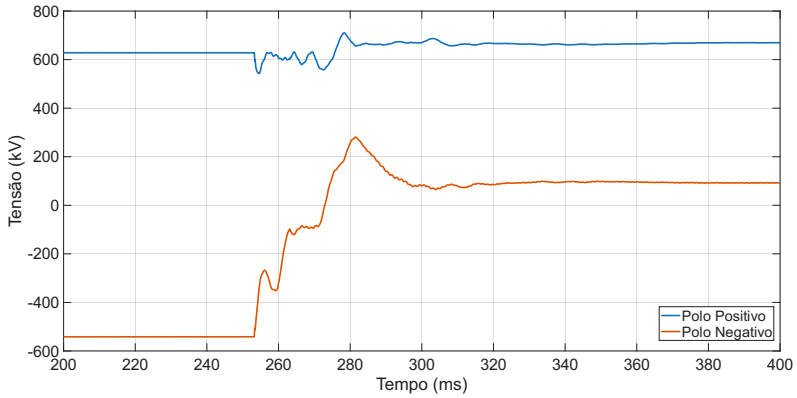
A metodologia proposta para classificação das faltas em sistemas HVDC bipolares baseia-se na análise dos sinais de tensão monitorados em apenas um terminal do sistema HVDC, sem necessidade de canal de comunicação ou sincronização de dados. A lógica de decisão é formulada a partir de grandezas físicas diretamente associadas à magnitude e à distribuição da perturbação entre os polos positivo e negativo do sistema, de forma a distinguir faltas monopolares (polo+:terra ou polo–:terra) de faltas bipolares (polo:polo).

A fim de visualizar a variação do sinal de tensão do sistema HVDC frente a incidência de diferentes tipos de faltas na LT, na Figura 25 são apresentados os gráficos das tensões monitoradas nos polos do terminal retificador para os distintos tipos de faltas analisados. Tais gráficos foram obtidos considerando uma falta localizada a 975 km do terminal de monitoramento e com uma resistência de falta igual a 50 Ω.

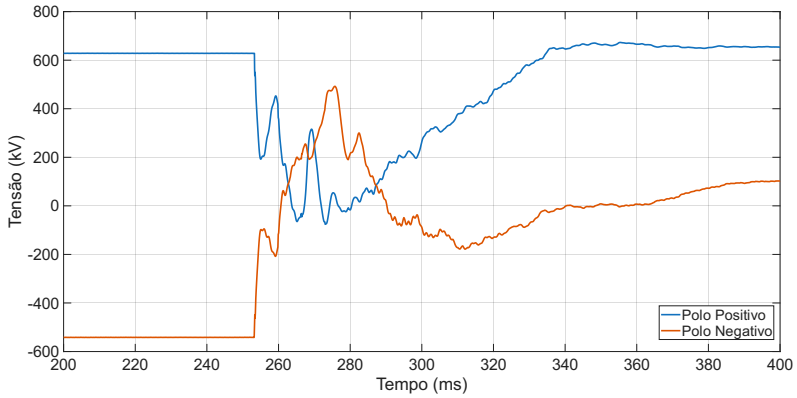
Figura 25 – Tensão no sistema HVDC para os diferentes tipos de falta: a) polo+:terra, b) polo-:terra e c) polo:polo.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Próprio autor.

De acordo com a Figura 25, conclui-se que a variação dos sinais de tensão, instantes após a incidência da falta, é distinta para cada tipo de falta analisada. Para as faltas que envolvem apenas um polo, seja positivo ou negativo, e a terra, verifica-se uma significativa diferença entre as variações do nível de tensão nos dois polos. No polo diretamente impactado pela falta, observa-se uma queda acentuada no nível de tensão, enquanto no outro polo a variação é menor, resultante do afundamento de tensão

causado pela falta no sistema. Já para as faltas do tipo polo:polo, verificam-se variações acentuadas e similares nos níveis de tensão em ambos os polos do sistema.

Baseado na análise descrita acima, foram formuladas regras para classificar a falta em polo+:terra, polo-:terra ou polo:polo. O método utiliza o instante de falta que foi identificado pelo algoritmo de detecção de faltas, baseado na aplicação do filtro DS, conforme detalhado na seção 4.3.1. A partir deste instante de referência, a classificação é realizada em três etapas principais: (*i*) extração de grandezas de tensão, (*ii*) cálculo de um índice de simetria entre os polos e (*iii*) tomada de decisão entre falta bipolar e monopolar, seguida da identificação do polo sob falta no caso monopolar. O detalhamento dessas etapas estão apresentadas a seguir.

Considerando que $Vr_{pos}(t)$ e $Vr_{neg}(t)$ sejam as tensões monitoradas nos polos positivo e negativo do terminal retificador em cada instante de tempo t e denotando por t_{falta} o instante de detecção da falta e por $W = [t \geq t_{falta}]$ a janela de tempo pós-falta, definem-se os seguintes parâmetros:

- Tensões no polo positivo ($Vrpos, f$) e negativo ($Vrneg, f$) no instante de falta:

$$Vrpos, f = Vr_{pos}(t_{falta}), \tag{4.4}$$

$$Vrneg, f = Vr_{neg}(t_{falta}). \tag{4.5}$$

- Valor mínimo ($Vr_{pos,\min}$) e máximo ($Vr_{neg,\max}$) do sinal de tensão monitorado no polo positivo e negativo do terminal retificador, respectivamente:

$$Vr_{pos,\min} = \min_{t \in \mathcal{W}} Vrpos(t), \tag{4.6}$$

$$Vr_{neg,\max} = \max_{t \in \mathcal{W}} Vrpos(t). \tag{4.7}$$

- Variação máxima de tensão no polo positivo (ΔVr_{pos}) e negativo (ΔVr_{neg}):

$$\Delta Vr_{pos} = \left| Vrpos, f - Vr_{pos,\min} \right|, \tag{4.8}$$

$$\Delta Vr_{neg} = \left| Vrneg, f - Vr_{neg,\max} \right|. \tag{4.9}$$

- Energias transitórias associadas aos polos positivo e negativo:

$$E_{pos} = \sum_{t \in \mathcal{W}} \left(Vr_{pos}(t) - Vrpos, f \right)^2, \tag{4.10}$$

$$E_{neg} = \sum_{t \in \mathcal{W}} \left(Vr_{neg}(t) - Vrneg, f \right)^2. \tag{4.11}$$

As grandezas ΔVr_{pos} e ΔVr_{neg} representam o desvio máximo do sinal de tensão na janela pós-falta nos polos positivo e negativo, respectivamente. Já os parâmetros

E_{pos} e E_{neg} quantificam a energia transitória entre os sinais de tensão na janela pós-falta e o valor de tensão medido no instante de falta nos polos positivo e negativo, respectivamente. Essa métrica, frequentemente utilizada em processamento de sinais e em técnicas baseadas em energia, mede a intensidade da discrepância entre os sinais observados e seus valores de referência. Em faltas monopolares, prevê-se que a maior parte da variação e da energia esteja concentrada no polo diretamente envolvido (polo positivo ou negativo), enquanto o outro polo é menos afetado. Em faltas bipolares, ambos os polos participam de forma mais significativa da dinâmica pós-falta.

Como os parâmetros de desvio máximo de tensão e energia transitória entre os sinais de tensão são dependentes das condições de falta (resistência, distância), propõe-se a utilização de uma métrica relativa. Para avaliar o nível de variação dos sinais de tensão monitorados nos polos do terminal retificador do sistema HVDC, é utilizada a simetria relativa entre os polos por meio dos índices de simetria de magnitude da tensão (r_V), conforme apresentado na Equação a seguir.

$$r_V = \frac{min(\Delta Vr_{pos}, \Delta Vr_{neg})}{max(\Delta Vr_{pos}, \Delta Vr_{neg})} \tag{4.12}$$

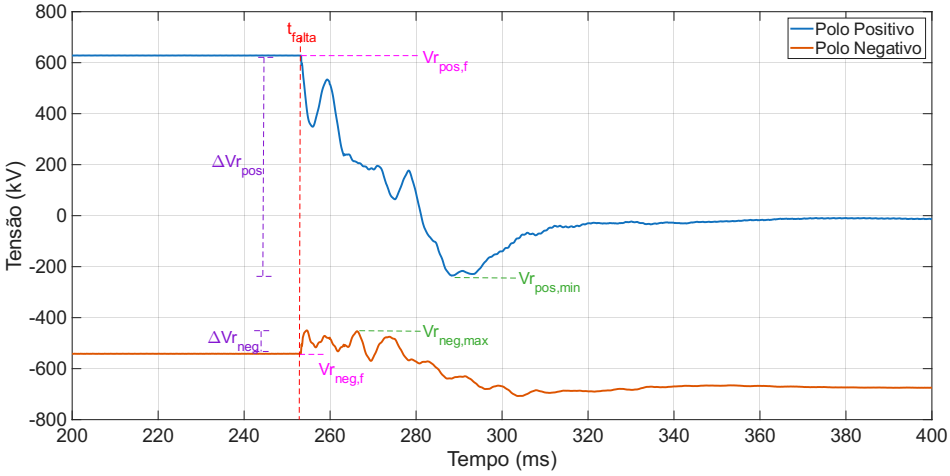
O índice apresentado acima assume valores no intervalo entre 0 e 1. Valores próximos de zero indicam uma forte assimetria entre os sinais de tensão monitorados nos polos, ou seja, a tensão de um dos polos sofreu variações bem mais significativas do que a do outro polo. Todavia, valores próximos de um indicam uma dinâmica semelhante entre os sinas de tensão de ambos os polos. O indicador r_V fornece uma medida global da simetria da falta analisada.

A classificação entre falta bipolar (polo:polo) e monopolar (polo+:terra ou polo-:terra) é realizada comparando-se o índice r_V com o limiar igual 0,5. A adoção desse limiar fundamenta-se na definição matemática do índice de simetria (r_V), cuja faixa de valores é naturalmente limitada ao intervalo entre 0 e 1. Nessa escala normalizada, valores próximos de 1 indicam participação praticamente equivalente dos dois polos, enquanto valores próximos de 0 refletem forte dominância de apenas um polo. Assim, o valor 0,5 representa o ponto médio entre esses dois regimes extremos, constituindo um fator de diferenciação entre as faltas. Caso r_V seja superior a 0,5, a falta é classificada como bipolar, caso contrário a falta é classificada como monopolar. Essa escolha preserva a coerência física do indicador e evita a introdução de coeficientes empíricos dependentes de condições específicas de operação do sistema. Portanto, ao situar o limiar exatamente no centro da faixa possível de simetria, estabelece-se um critério objetivo e independente de ajustes de engenharia, adequado para distinguir eventos que envolvem contribuição substancial dos dois polos daqueles em que a resposta dinâmica é nitidamente concentrada em um único polo.

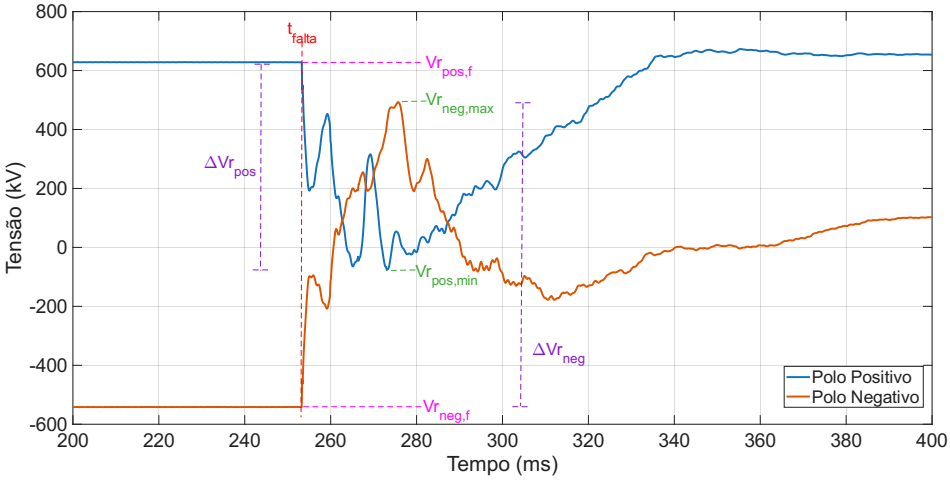
Caso a falta seja identificada como monopolar com base nos critérios definidos anteriormente, a decisão entre polo+:terra e polo-:terra baseia-se na dominância das grandezas ΔVr_{pos}, ΔVr_{neg}, E_{pos} e E_{neg}. De forma consistente com a física do problema, a regra de classificação entre faltas polo+:terra e polo-:terra é formulada com base nos seguintes critérios: (*i*) em faltas do tipo polo+:terra, é verificado uma maior variação máxima de tensão e energia transitória dos sinas de tensão no polo positivo, ou seja, $\Delta Vr_{pos} \geq \Delta Vr_{neg}$ e $E_{pos} \geq E_{neg}$ e (*ii*) em faltas do tipo polo-:terra, o desempenho é análogo para o polo negativo, ou seja, $\Delta Vr_{neg} \geq \Delta Vr_{pos}$ e $E_{neg} \geq E_{pos}$.

Para exemplificar a aplicação do método proposto, na Figura 26 estão apresentados os principais parâmetros do processo de classificação para as faltas polo+:terra e polo:polo apresentadas na Figura 25.

Figura 26 – Parâmetros para aplicação do método de classificação para faltas do tipo: a) polo+:terra e b) polo:polo.



(a)



(b)

Fonte: Próprio autor.

Considerando os exemplos apresentados na Figura 26, o instante de falta (f_{falta}) é obtido por meio do método apresentado na seção 4.3.1, que utiliza o limiar de detecção autoadaptativo. De posse desse instante, torna-se possível aplicar a metodologia proposta para classificação de faltas. Na Tabela 5 estão apresentados os valores obtidos para os parâmetros de tensão nos polos do retificador no instante de falta e o valor máximo e mínimo de tensão verificado nos polos negativo e positivo, respectivamente. Adicionalmente, também são apresentados os parâmetros calculados para implementação do método de classificação.

Tabela 5 – Parâmetros obtidos dos sinais de tensão para aplicação do método de classificação de faltas para os exemplos de falta polo+:terra e polo:polo.

	Falta	
Parâmetros	**Polo+:Terra**	**Polo:Polo**
$t_{falta}(ms)$	$253,29$	$253,59$
$Vrpos, f(kV)$	$617,79$	$603,18$
$Vrneg, f(kV)$	$-531,21$	$-516,61$
$Vr_{pos,\min}(kV)$	$-235,21$	$-76,01$
$Vr_{neg,\max}(kV)$	$-449,91$	$492,18$
$\Delta Vr_{pos}(kV)$	$853,00$	$679,18$
$\Delta Vr_{neg}(kV)$	$81,29$	$1008,80$
E_{pos}	$579,07.10^{14}$	$127,14.10^{14}$
E_{neg}	$23,97.10^{14}$	$457,66.10^{14}$
r_V	$0,0953$	$0,6733$

Com base na análise dos dados apresentados na Tabela 5, verifica-se que o índice de simetria de magnitude da tensão (r_V) é igual a 0,0953 no caso da falta polo+:terra e a 0,6733 para a polo:polo. Portanto, comparando esses valores com o limar de 0,5, o método classificaria corretamente as faltas.

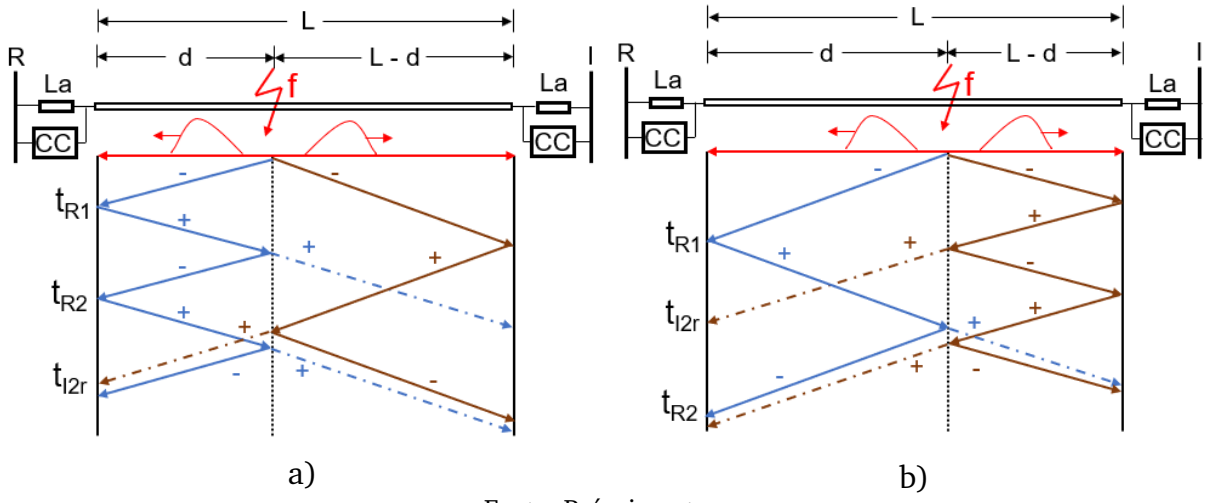
4.3.3 Localização

Após detectar e classificar as faltas, propõe-se calcular a distância da falta incidente na LT do sistema HVDC. Tal cálculo é realizado utilizando os dados de tensão no polo positivo ou negativo do terminal retificador do sistema. Para faltas do tipo polo+:terra e polo:polo utilizam-se os dados monitorados no polo positivo do retificador, enquanto para as faltas do tipo polo-:terra, os dados monitorados no polo negativo são utilizados.

Como apresentado na seção 4.2, as terminações das LTs do sistema HVDC analisado apresentam impedância predominantemente capacitiva. Consequentemente, para transitórios eletromagnéticos de alta frequência, tal como a propagação de ondas viajantes, a impedância da terminação da LT é muito menor do que sua impedância característica. Portanto, assim como foi apresentado na subseção 2.3.2.1, o coeficiente

de reflexão do sinal de tensão nas terminações da linha e no ponto de falta é negativo. Baseado nisso, na Figura 27 são apresentados os diagramas de Bewley do sinal de tensão para uma falta aplicada na primeira metade ($d < 0,5l$) e segunda metade ($d > 0,5l$) da extensão da LT.

Figura 27 – Diagrama de Bewley do sinal de tensão para uma falta aplicada na a) primeira metade e b) segunda metade da LT.



Fonte: Próprio autor.

Da Figura 27, os parâmetros t_{R1} e t_{R2} representam os instantes de chegada, no terminal de monitoramento, da primeira e segunda frentes de onda refletidas no ponto de falta, respectivamente. Já t_{I2r} é o instante de tempo de chegada no terminal de monitoramento da frente de onda refletida no terminal inversor e refratada no ponto de falta em direção ao retificador.

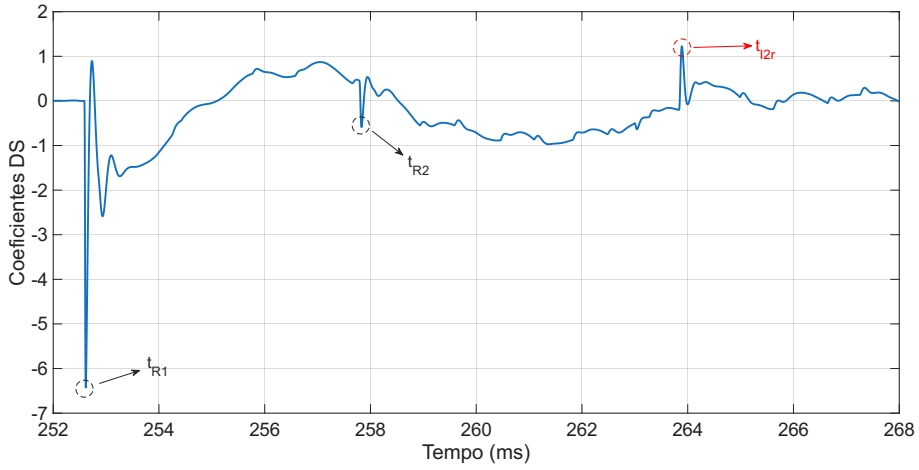
Para uma determinada velocidade de propagação das ondas viajantes (v_p), tem-se que a relação entre a distância da falta para o retificador (d) e os instantes de tempo t_{R1} e t_{R2} é dada pela Equação (2.30), conforme apresentado no Capítulo 2. Dessa forma, a identificação precisa dos instantes t_{R1} e t_{R2} é essencial para assegurar a confiabilidade do método de um terminal de localização de faltas. Tal identificação representa um dos principais desafios na aplicação dos métodos de um terminal baseados em ondas viajantes, pois há inúmeras ondas que são refletidas e refratadas nas descontinuidades do sistema após a incidência da falta. Tais ondas podem ser identificadas, de forma equivocada, como o instante t_{R2}.

Com base na análise da Figura 27 verifica-se que independentemente do local de falta, as ondas viajantes de tensão que incidem no terminal retificador apresentam polaridades iguais nos instantes t_{R1} e t_{R2}, enquanto as polaridades das ondas incidentes nos instantes t_{R1} e t_{I2r} são distintas, o que evidencia um padrão característico útil para a localização. Ademais, para uma falta localizada na primeira metade da LT, a onda

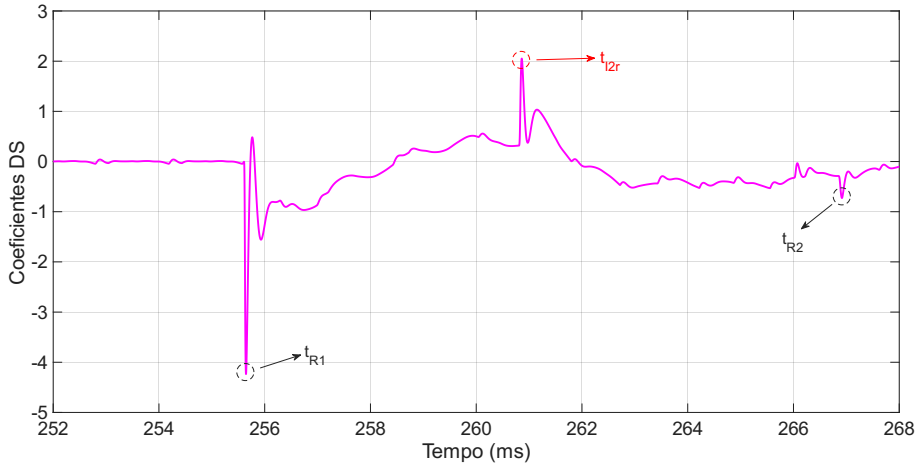
refletida no ponto de falta atinge o retificador antes da refletida no terminal inversor e refratada no ponto de falta, ou seja, t_{R2} é menor que t_{I2r}. Por outro lado, quando a falta ocorre na segunda metade da LT, a dinâmica se inverte e o instante t_{I2r} torna-se menor que t_{R2}.

Para exemplificar o fenômeno descrito, na Figura 28 são apresentados os gráficos dos coeficientes do filtro DS aplicado ao sinal de tensão para uma falta localizada a 775 km (primeira metade da linha) e a 1.675 km (segunda metade da linha) do terminal de monitoramento. A falta considerada é do tipo polo+:terra e apresenta uma resistência de 100 Ω.

Figura 28 – Coeficientes do filtro DS aplicado ao sinal de tensão para uma falta na a) Primeira metade e b) Segunda metade da LT.



(a)



(b)

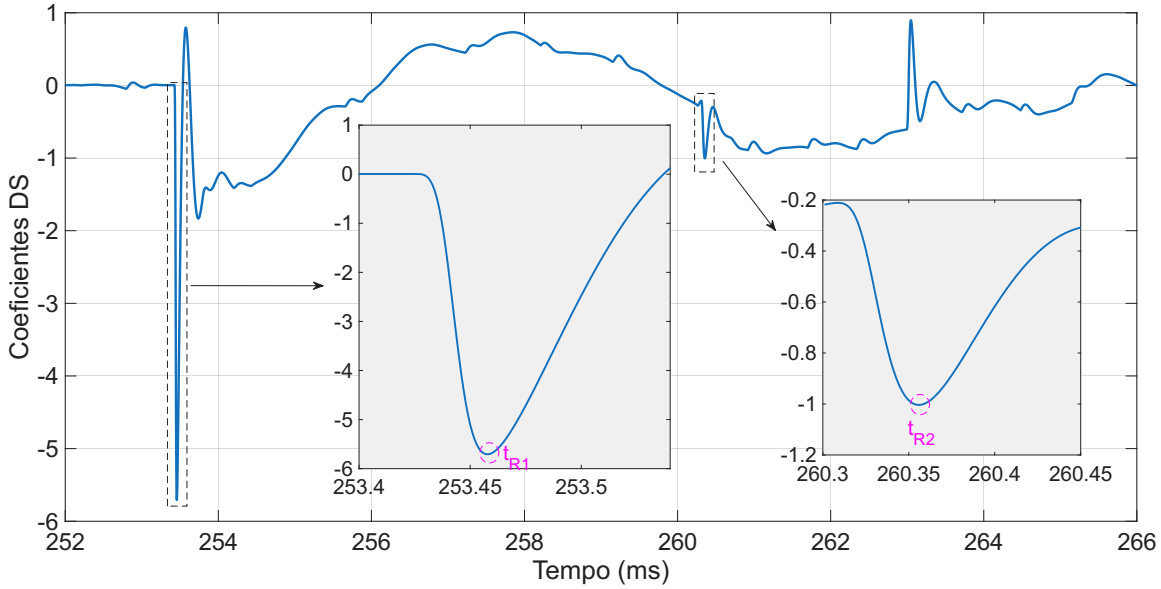
Fonte: Próprio autor.

Como base na Figura 28, nota-se que, tanto para uma falta aplicada na primeira quanto na segunda metade da linha, os coeficientes do filtro DS apresentam os seus maiores valores de vales absolutos nos instantes correspondentes à chegada das ondas

refletidas no ponto de falta. Por meio da comparação das Figuras 27.a) com 28.a) e 27.b) com 28.b), comprova-se que, de fato, as polaridades das ondas refletidas no ponto de falta são as mesmas e que a ordem de detecção dos instantes de tempo t_{R2} e t_{I2r} são distintos para uma falta aplicada na primeira e segunda metade da linha.

Adicionalmente, ao utilizar o DS para filtrar os sinais de tensão, a saída do filtro corresponde a uma parábola, conforme ilustrado detalhadamente no gráfico da Figura 29. Tal gráfico representa os coeficientes DS para uma falta polo+:terra, incidente a 1.025 km do retificador e com uma resistência de 100 Ω.

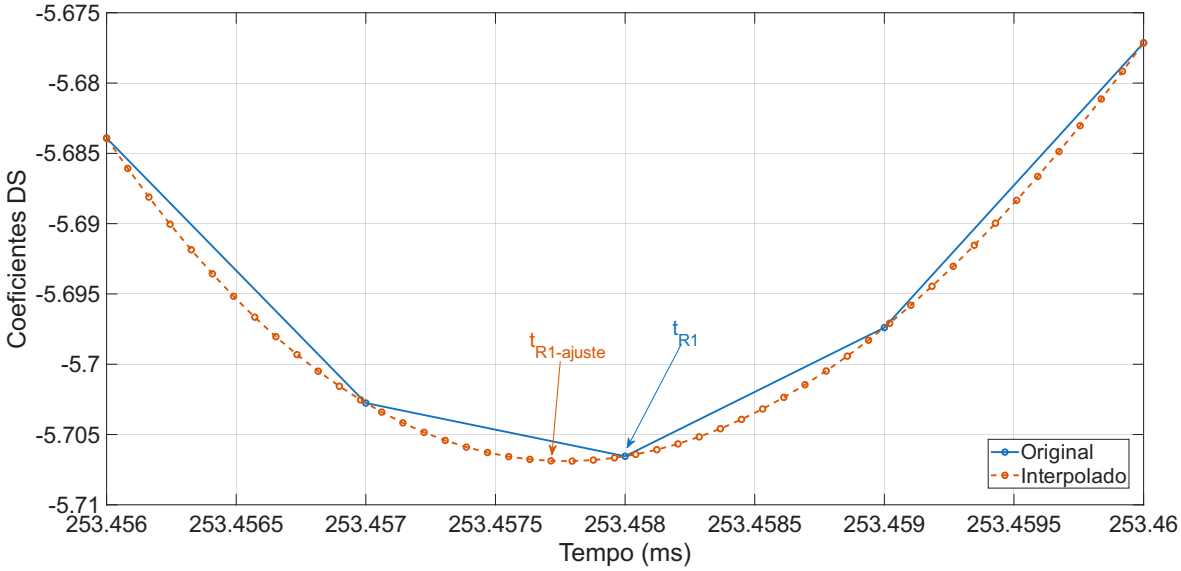
Figura 29 – Parábolas no gráfico dos coeficientes do filtro DS no processo de detecção dos instantes t_{R1} e t_{R2}.



Fonte: Próprio autor.

Como verificado na Figura 29, a saída do filtro DS nas proximidades dos instantes t_{R1} e t_{R2} apresenta um formato de parábola. Dessa forma, como vantagem adicional desse filtro, destaca-se a possibilidade de interpolação de suas saídas a fim de aprimorar a precisão na detecção dos instantes de chegada das frentes de onda refletidas no ponto de falta no terminal de monitoramento (SCHWEITZER et al., 2014; SCHWEITZER et al., 2016). Portanto, neste trabalho é utilizado o método de interpolação do tipo *spline* por meio da seleção de dois pontos de amostragem imediatamente anteriores e dois pontos de amostragem imediatamente posteriores ao instante de tempo t_{R1} e t_{R2}. A partir desses pontos é realizada a interpolação a fim de aumentar a resolução do processo de amostragem e elevar a precisão do método, assim como está demonstrado na Figura 30. Na referida figura estão apresentadas as amostras dos dados originais da simulação e as amostras geradas pelo processo de interpolação, que permitem identificar o novo instante ajustado, denominado de $t_{R1-ajuste}$.

Figura 30 – Interpolação via *spline* para a detecção do instante $t_{R1-ajuste}$.



Fonte: Próprio autor.

Ressalta-se que o mesmo procedimento apresentado na Fig. 30 é realizado para detecção do instante de chegada da segunda frente de onda refletida no ponto de falta, denominado $t_{R2-ajuste}$. Consequentemente, com a obtenção dos instantes de tempo $t_{R1-ajuste}$ e $t_{R2-ajuste}$, torna-se possível calcular a distância da falta em relação ao terminal retificador por meio da Equação (2.30).

Após o processo de interpolação de dados da saída do filtro DS, nota-se que os valores de pico verificados no sinal original e no sinal interpolado diferem por algumas amostras. Neste contexto, destaca-se que embora as diferenças entre os instantes de incidência estimados usando o sinal original e o sinal interpolado não sejam significativas, em um processo real de localização de faltas, a aplicação da interpolação de dados pode implicar em reduções do erro absoluto da ordem de centenas de metros para poucas dezenas de metros, promovendo uma maior exatidão na aplicação do método (LOPES et al., 2019a).

Na Tabela 6 está apresentado o desempenho do método de localização de faltas baseado em dados monitorados em um terminal considerando o processo com e sem interpolação. Ressalta-se que os resultados apresentados consideram a falta descrita na Figura 29, a qual está localizada a 1.025 km de distância do terminal de monitoramento.

Tabela 6 – Exemplo da aplicação da interpolação na saída do filtro DS para uma falta incidente a 1.025 km do terminal de monitoramento.

	Localização Sem Interpolação	**Localização Com Interpolação**
t_{R1} (μs)	253458,000	253457,796
t_{R2} (μs)	260356,000	260355,469
Localização (km)	1025,387	1025,339
Erro (m)	387,70	339,16

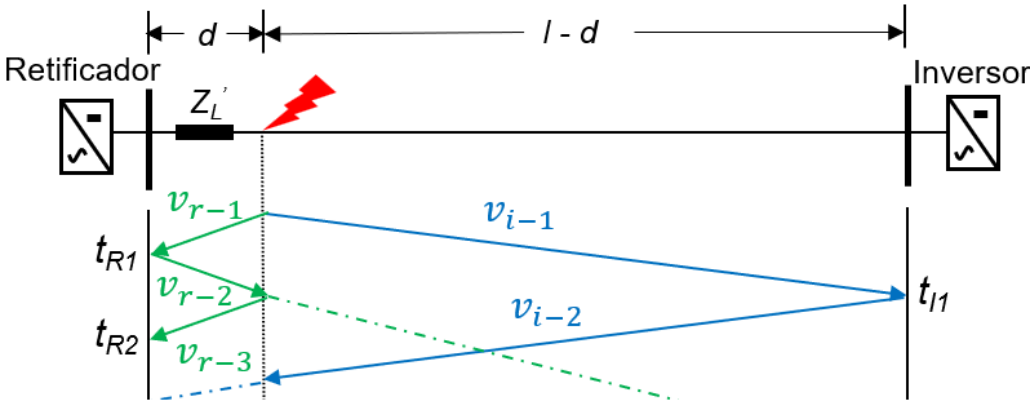
De acordo com os dados apresentados na Tabela 6, verifica-se que o erro absoluto de localização foi de 387,70 m e 339,16 m para os casos sem e com interpolação, respectivamente. Portanto, o uso da interpolação *spline* reduziu o erro absoluto de localização em cerca de 48,5 m.

4.3.4 Fator de Ajuste da Velocidade de Propagação das Ondas Viajantes

Conforme apresentado em diversos estudos na literatura, uma das principais fontes de erro de localização de faltas via aplicação do método de um terminal baseado em OVs é a consideração de um valor fixo para velocidade de propagação das OVs na implementação computacional (VIEIRA et al., 2023; VIEIRA et al., 2022; FERNANDES et al., 2020).

Nos métodos clássicos baseados em ondas viajantes, assume-se frequentemente uma velocidade de propagação constante ao longo da linha de transmissão — tipicamente um pouco menor que a velocidade da luz (KASZTENNY et al., 2016). Todavia, na operação em tempo real, essa velocidade varia ao longo da linha, em função de parâmetros elétricos distribuídos, de variações de frequência e de efeitos de dispersão e atenuação das ondas viajantes, principalmente em sistemas HVDC (HONG et al., 2025). Essas variações constituem uma fonte de erro nos algoritmos de localização de faltas baseados em OVs. Para ilustrar este fenômeno, a Figura 31 apresenta o diagrama de Bewley para uma falta localizada próxima ao terminal de monitoramento.

Figura 31 – Diagrama de Bewley para uma falta próxima do terminal de monitoramento.



Fonte: Próprio autor.

Da Figura 31, tem-se que $Z_L^{'}$ representa a impedância do trecho da LT entre o ponto de falta e o terminal de monitoramento. Os parâmetros v_{r-1}, v_{r-2} e v_{r-3} representam as velocidades das ondas viajantes para cada trecho da sua trajetória de propagação em direção ao terminal retificador. Nesse contexto, tem-se que as relações entre distância da falta (d) e os instantes de tempo t_{R1} e t_{R2} são dadas pelas Equações 4.13 e 4.14:

$$t_{R1} = \frac{d}{v_{r-1}}, \tag{4.13}$$

$$t_{R2} = \frac{d}{v_{r-1}} + \frac{d}{v_{r-2}} + \frac{d}{v_{r-3}}. \tag{4.14}$$

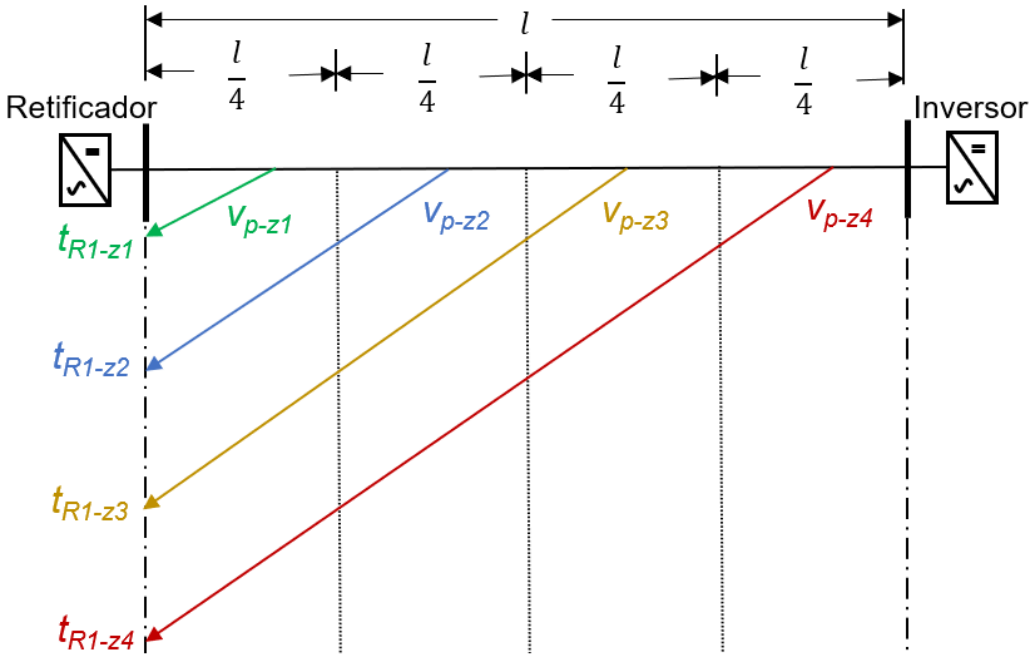
Subtraindo a Equação 4.14 da 4.13, obtém-se que a distância de falta, para o método de localização de um terminal, pode ser calculada por meio da Equação 4.15, apresentada abaixo.

$$d = \frac{(t_{R2} - t_{R1})v_{r-2}v_{r-3}}{v_{r-2} + v_{r-3}}. \tag{4.15}$$

Baseado na Equação 4.15, conclui-se que, quando considerado que as velocidades v_{r-2} e v_{r-3} são iguais, aplica-se o método clássico de localização de faltas de um terminal, conforme apresentado na Equação 2.30. Comumente, tal consideração pode ser feita na aplicação do método em sistemas com LTs curtas. Todavia, ao passo que a extensão das linhas de transmissão aumenta, a sua impedância equivalente se eleva, atenuando a velocidade de propagação das ondas viajantes. Portanto, à medida em que a distância percorrida pela onda viajante ao longo da extensão da LT aumenta, pode ser verificada uma considerável atenuação na velocidade de propagação das ondas. Tal atenuação acarreta valores diferentes para v_{r-2} e v_{r-3}.

Para mitigar os efeitos da variabilidade da v_p, esta tese propõe uma metodologia de compensação baseada na calibragem da velocidade efetiva de propagação por meio da análise dos erros de localização obtidos via a aplicação do método clássico de um terminal. Em vez de assumir uma velocidade constante para toda a extensão da LT, o método introduz fatores de correção específicos para cada zona da LT. A fim de exemplificar essa metodologia, na Figura 32 está apresentado o diagrama de Bewley considerando a LT dividida em quatro zonas, em que cada uma apresenta uma extensão de 25% do comprimento total da LT.

Figura 32 – Diagrama de Bewley considerando a LT dividida em quatro zonas para aplicação da metodologia de localização.



Fonte: Próprio autor.

De acordo com a Figura 32, os parâmetros v_{p-z1}, v_{p-z2}, v_{p-z3} e v_{p-z4} representam as velocidades de propagação das ondas viajantes para uma falta incidente na primeira, segunda, terceira e quarta zona da LT, respectivamente. Considerando que d_{real} é a verdadeira distância de falta, tem-se que:

$$d_{real} = \frac{(t_{R2} - t_{R1}).v_{efetiva}}{2}, \tag{4.16}$$

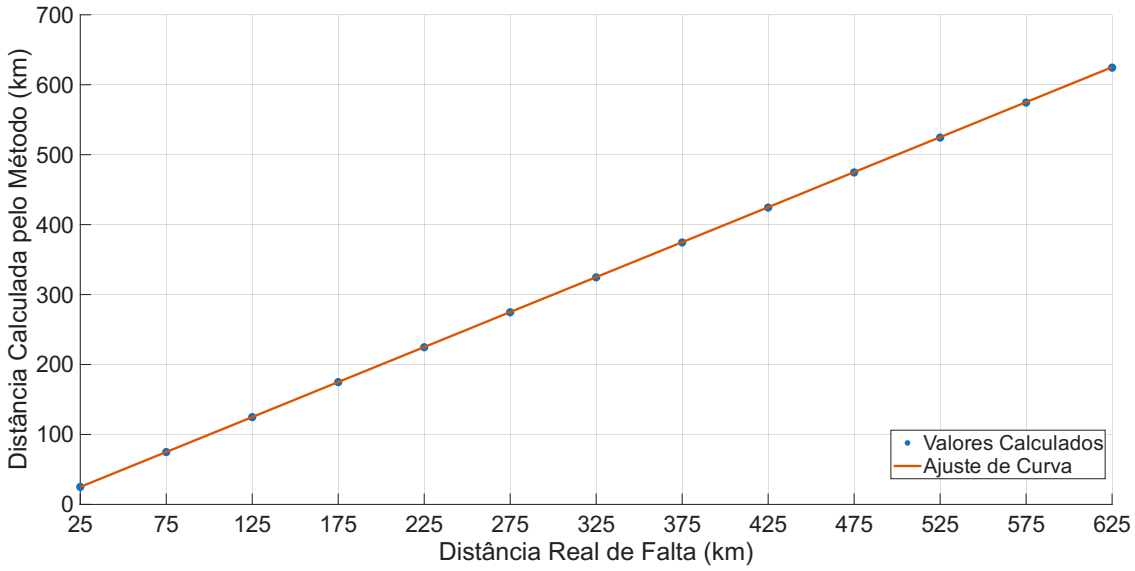
em que $v_{efetiva}$ representa a efetiva velocidade de propagação das OVs.

Dividindo a Equação (2.30) pela (4.16), tem-se que a relação entre v_p, que é a velocidade de propagação assumida na implementação do método clássico de localização de um terminal, e $v_{efetiva}$ é dada por um fator denominado k, conforme apresentado na Equação (4.17).

$$\frac{d}{d_{real}} = \frac{v_p}{v_{efetiva}} \approx k. \tag{4.17}$$

Para determinação do valor do fator k em cada zona da LT, aplica-se um ajuste pelo método dos mínimos quadrados considerando os erros obtidos na simulação de aplicação de uma falta em diferentes locais da LT. Na Figura 33 a seguir está apresentado o gráfico de dispersão entre as distâncias calculadas pelo método na simulação de uma falta polo:polo com resistência de falta de 100 Ω e as verdadeiras distâncias de aplicação da falta para a primeira zona da LT. Adicionalmente, também é apresentado o ajuste de curva considerando a relação entre a distância de falta calculada pelo método de um terminal clássico e a distância real para os casos analisados na primeira zona da LT.

Figura 33 – Ajuste de curva utilizando o método dos mínimos quadrados para aplicação da metodologia de localização.



Fonte: Próprio autor.

De acordo com o gráfico apresentado na Figura 33, o coeficiente angular obtido pelo método dos mínimos quadrados para o ajuste de curva é igual a 0,99899 para a primeira zona da LT. Esse processo de análise foi repetido para as faltas simuladas na segunda, terceira e quarta zona da LT. Dessa forma, foram obtidos também os valores dos coeficientes de ajuste da velocidade de propagação das ondas viajantes para todas as quatro zonas de análise da LT propostas, conforme apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 – Fatores de ajuste da velocidade de propagação das OVs em função da zona de incidência de falta.

Fatores de Ajuste de v_p	
k_1	$0,99898$
k_2	$0,99928$
k_3	$0,99932$
k_4	$0,99950$

Os fatores apresentados na Tabela 7 evidenciam que a velocidade efetiva de propagação das ondas viajantes não permanece constante ao longo da linha. Essa constatação reforça a hipótese central da tese de que a utilização de um valor fixo para a velocidade de propagação pode introduzir erros sistemáticos na estimativa da localização da falta.

Portanto, após a aplicação do método clássico de localização de faltas de um terminal baseado na TOV, é necessário verificar a zona correspondente à distância calculada. Por exemplo, caso a distância calculada esteja na segunda zona da LT, utiliza-se o fator k_2 para realizar o ajuste na velocidade de propagação e recalcular o novo local de falta. Dessa forma, relacionando a Tabela 7 com os parâmetros v_{p-z1}, v_{p-z2}, v_{p-z3} e v_{p-z4} apresentados na Figura 32, tem-se que a velocidade a ser considerada em função da zona de incidência da falta é dada pelas seguintes equações:

$$v_{p-z1} = \frac{v_p}{k_1}, \tag{4.18}$$

$$v_{p-z2} = \frac{v_p}{k_2}, \tag{4.19}$$

$$v_{p-z3} = \frac{v_p}{k_3}, \tag{4.20}$$

$$v_{p-z4} = \frac{v_p}{k_4}, \tag{4.21}$$

em que v_p é a velocidade de propagação das ondas viajantes estimada conforme apresentado na Seção 4.2.

Ressalta-se que os fatores de ajuste apresentados na Tabela 7 são obtidos durante uma etapa prévia de parametrização do método e não necessitam ser recalculados a cada ocorrência de falta. Em uma aplicação real, a parametrização desses fatores pode ser realizada a partir de avaliações *off-line* desenvolvidas com modelos eletromagnéticos da LT variantes com a frequência, utilizando os dados de projeto normalmente empregados na configuração de sistemas de proteção e localização de faltas. Alternativamente, os fatores também podem ser refinados a partir do histórico de faltas reais cuja localização tenha sido posteriormente confirmada. Como os parâmetros físicos da LT tendem a permanecer praticamente constantes ao longo do tempo, espera-se que os fatores de

ajuste apresentem elevada estabilidade operacional, não demandando recalibrações frequentes. Eventuais atualizações seriam recomendadas apenas em situações específicas, tais como alterações significativas na configuração da linha, modificações relevantes nos terminais do sistema HVDC ou quando análises periódicas indicarem desvios sistemáticos entre as localizações estimadas e as efetivamente verificadas em campo.

Dessa forma, o fator de ajuste proposto deve ser interpretado como um parâmetro de calibração do sistema de localização, análogo aos ajustes tradicionalmente empregados em funções de proteção, cuja finalidade é compensar os efeitos de dispersão, atenuação e dependência da frequência que afetam a velocidade efetiva de propagação das ondas viajantes ao longo da linha.

Por fim, a avaliação do método é realizada via métricas de desempenho que serão apresentadas na próxima seção.

4.4 AVALIAÇÃO DO MÉTODO

O processo de classificação de faltas é avaliado em função do percentual de acerto na classificação dos 1.764 casos de faltas apresentados na Tabela 4. A etapa de classificação é implementada via a análise dos sinais de tensão monitorados no terminal retificador do sistema HVDC a fim de diferenciar as faltas polo:polo, polo+:terra e polo-:terra.

Além disso, a eficácia da etapa de localização das faltas é avaliada por meio do cálculo dos erros absolutos para cada falta analisada, conforme apresentado na Equação (4.22).

$$EA = |d_{real} - d_{est}|, \tag{4.22}$$

em que d_{real} é a localização real da falta e d_{est} representa a distância de falta calculada pelo método.

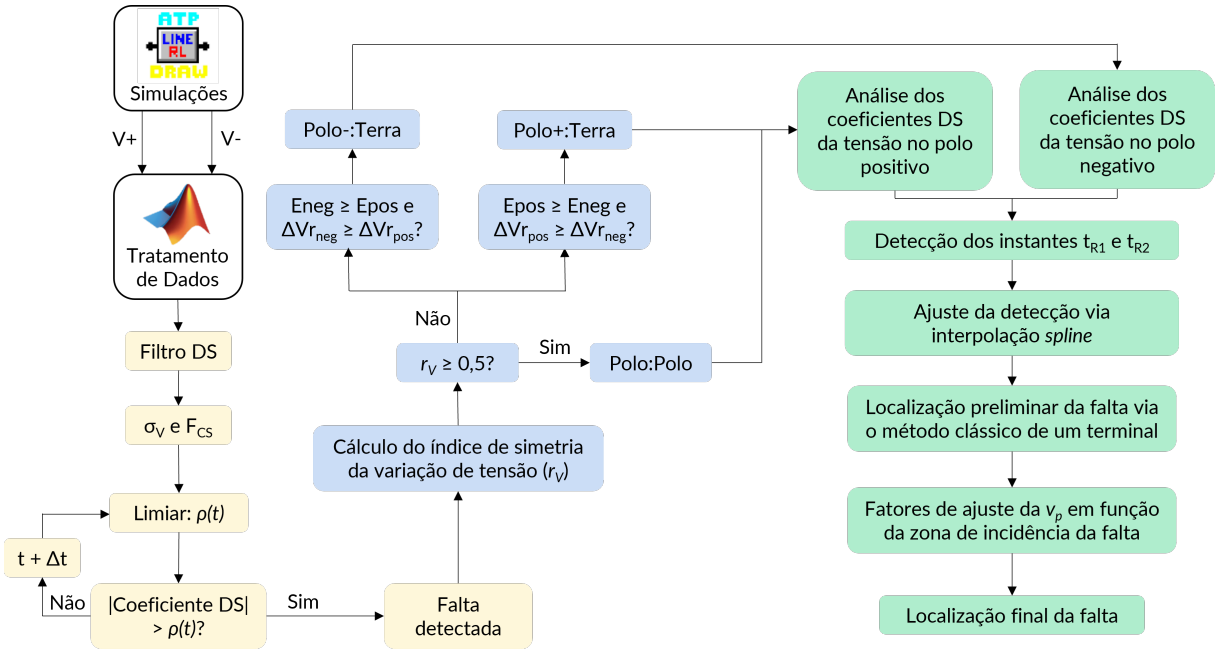
Por fim, ressalta-se que a eficácia das etapas de classificação e localização será avaliada em função da resistência, tipo e distância de falta, conforme será detalhado no Capítulo 5.

4.5 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentadas as metodologias propostas para classificar e localizar faltas em LTs HVDC. Cada etapa do processo conta com suas respectivas regras de validação e implementação, que se baseiam na análise dos sinais de tensão monitorados nos polos positivo e negativo do terminal retificador. Os coeficientes do filtro DS são calculados e representam as principais ferramentas de análise dos sinais

de tensão. Na Figura 34 é apresentado um diagrama de blocos que sintetiza o método proposto.

Figura 34 – Diagrama de blocos do método proposto para classificação e localização de faltas.



Fonte: Próprio autor.

Da Figura 34, o tratamento de dados realizado no Matlab® refere-se ao cálculo dos coeficientes do filtro DS aplicado aos sinais de tensão monitorados. O conjunto dos blocos amarelos da Figura 34 caracteriza o processo de detecção da falta por meio da comparação entre os valores absolutos dos coeficientes do filtro DS e o limiar de detecção autoadaptativo. Na etapa de classificação das faltas, representada pelos blocos de cor azul, são aplicadas as regras formuladas para determinar quais são os polos envolvidos na falta. Os blocos verdes representam a etapa de localização das faltas, em que é proposto um fator de ajuste no valor da velocidade de propagação das ondas viajantes em função da zona de incidência da falta.

Ressalta-se que todas as etapas de classificação e localização de faltas são avaliadas considerando diferentes tipos, distâncias e resistências de falta. Com isso, torna-se possível avaliar a influência de tais parâmetros no desempenho do método. A análise dos resultados obtidos é apresentada no próximo capítulo.

Capítulo 5

Análise dos Resultados

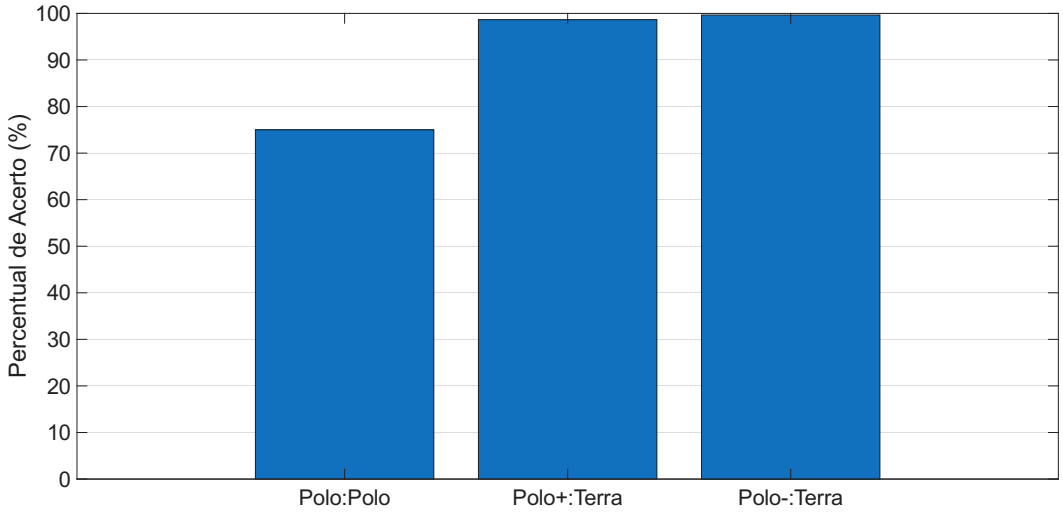
Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos na avaliação do método proposto para classificação e localização de faltas.

5.1 CLASSIFICAÇÃO

5.1.1 Análise do Método Proposto

A métrica utilizada para avaliar o desempenho do processo de classificação corresponde ao percentual de faltas corretamente classificadas pelo método dentre todas as analisadas, conforme apresentado na Tabela 4. Em função das regras formuladas na seção 4.3.2, as faltas podem ser classificadas em polo+:terra, polo-:terra ou polo:polo. Na Figura 35 está apresentado um gráfico de colunas com o percentual de acerto no processo de classificação em função do tipo de falta.

Figura 35 – Percentual de acerto do processo de classificação para cada tipo de falta.

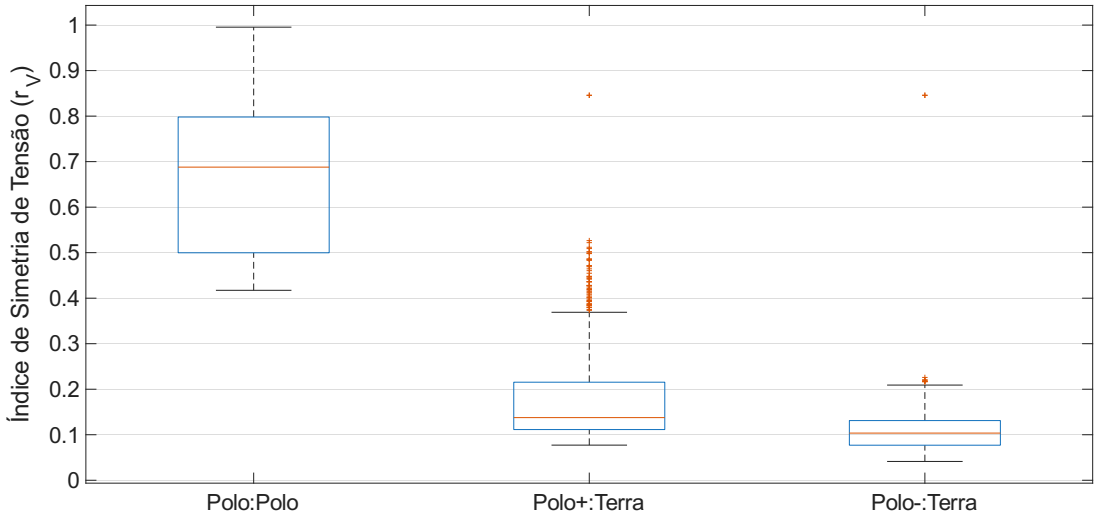


Fonte: Próprio autor.

A análise dos resultados apresentados a Figura 35 demonstra que a acurácia no processo de classificação de faltas polo:polo, polo+:terra e polo-:terra foi de 75,0%, 98,6% e 99,6%, respectivamente. Dessa forma, constata-se que a eficácia do método é influenciada pelo tipo de falta, pois os erros associados às faltas polo:polo foram superiores aos observados para as faltas monopolares.

Adicionalmente, na Figura 36 está apresentado um gráfico *boxplot* com os valores calculados para o índice de simetria de tensão (r_V) para as faltas analisadas. O *boxplot* consiste em um tipo de gráfico composto por cinco índices: o valor máximo, representado pela cauda superior; o quartil superior, representado pelo limite superior da caixa; a mediana, representada pela linha intermediária da caixa; o quartil inferior, representado pelo limite inferior da caixa; e o valor mínimo, representado pela cauda inferior. O quartil superior, a mediana e o quartil inferior representam, respectivamente, o erro máximo verificado em 75%, 50% e 25% dos casos analisados. Além dos cinco índices apresentados, os dados com valores discrepantes no conjunto de amostras são representados no gráfico *boxplot* como pontos, denominados *outliers*.

Figura 36 – *Boxplot* dos valores do índice de simetria do sinal de tensão (r_V) em função do tipo de falta.

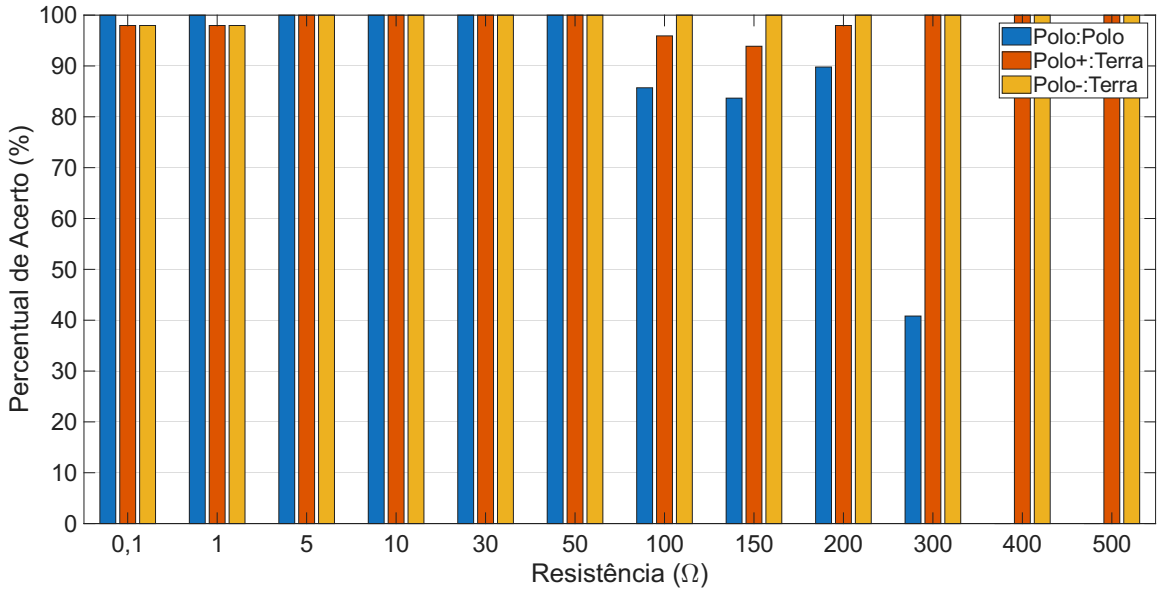


Fonte: Próprio autor.

Ressalta-se que o índice de simetria, apresentado na Figura 36, é o principal parâmetro no processo decisório de diferenciação entre faltas polo:polo e monopolares (polo+:terra ou polo-:terra), conforme descrito na seção 4.3.2. Caso o índice seja superior a 0,5, a falta é classificada em polo:polo e, caso contrário, conclui-se que a falta envolve apenas um polo. Por meio da análise do *boxplot* apresentado, verifica-se que, de fato, a grande maioria das faltas polo:polo apresenta um índice de simetria superior a 0,5 e, por outro lado, as faltas polo+:terra e polo-:terra apresentam valores inferiores a 0,5 para o índice de simetria. Do total de 588 casos de falta polo:polo analisados, 147 apresentaram valores de r_V inferiores a 0,5, o que acarreta erros no processo de classificação de faltas.

A fim de investigar as causas dos erros obtidos no processo de classificação, especialmente para faltas polo:polo, na Figura 37 está apresentado um gráfico de colunas com os percentuais de acerto no processo de classificação em função do tipo e resistência de falta.

Figura 37 – Percentual de acerto de classificação em função do tipo e resistência de falta.

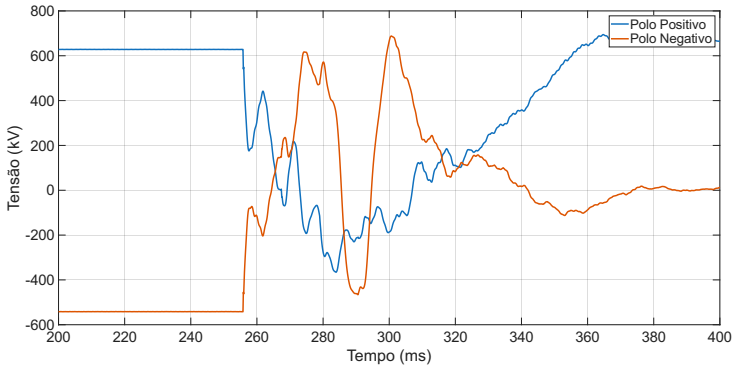


Fonte: Próprio autor.

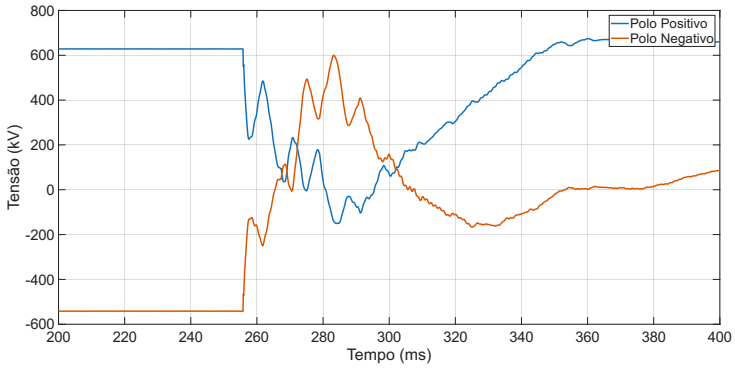
Baseada na análise da Figura 37, conclui-se que a eficácia do método é reduzida à medida que a resistência de falta aumenta para faltas do tipo polo:polo. Em faltas bipolares com baixa resistência de falta, a conexão elétrica entre os dois polos apresenta baixa impedância, permitindo que correntes elevadas circulem diretamente entre eles. Esse fenômeno resulta em fortes perturbações simultâneas nos dois polos, produzindo variações de tensão de amplitude semelhante. Consequentemente, o índice de simetria de tensão (r_V) tende a assumir valores elevados, facilitando a identificação da falta como bipolar.

Por outro lado, para faltas com alta resistência, a corrente de curto-circuito entre os polos é reduzida. Consequentemente, o acoplamento elétrico entre os polos enfraquece e as perturbações monitoradas no terminal retificador tornam-se menos intensas e mais assimétricas, pois a impedância adicional introduzida pela falta passa a limitar a transferência de energia entre os polos. Como resultado, um dos polos passa a apresentar uma dinâmica dominante, enquanto o outro, manifesta apenas um transitório residual. Essa assimetria crescente desloca o índice de simetria para valores mais próximos daqueles típicos de faltas monopolares, levando o algoritmo a classificar algumas faltas polo:polo como polo+:terra ou polo–:terra. A fim de visualizar essa dinâmica, na Figura 38 estão apresentados os sinais de tensão para uma falta polo:polo com diferentes resistências de falta.

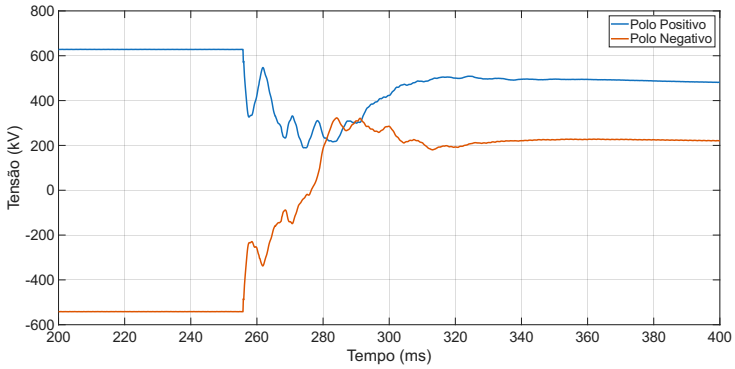
Figura 38 – Tensão no sistema HVDC para faltas polo:polo com diferentes resistências: a) 1 Ω, b) 50 Ω, c) 200 Ω e d) 500 Ω.



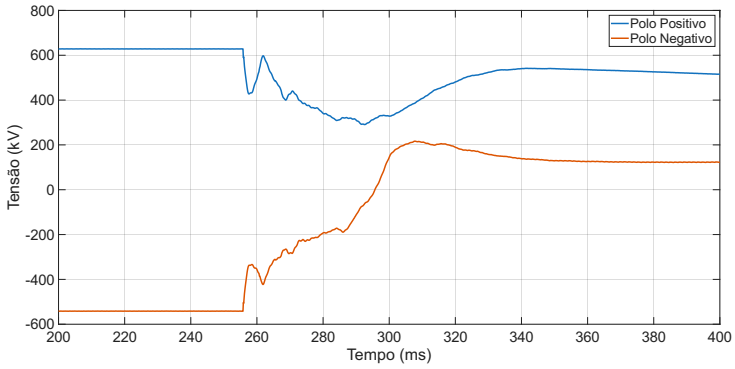
(a)



(b)



(c)



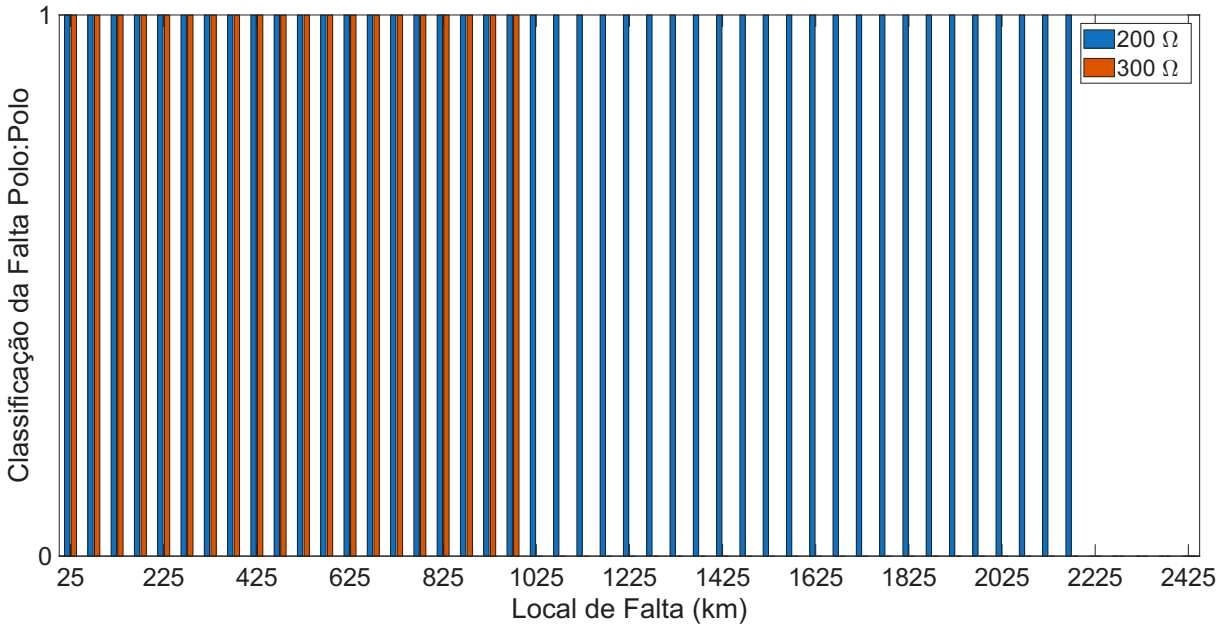
(d)

Fonte: Próprio autor.

Conforme apresentado na Figura 38, a dinâmica dos sinais de tensão monitorados em ambos os polos do terminal retificador é diferente em função da resistência de falta. Para faltas polo:polo com baixa resistência, verifica-se um afundamento de tensão acentuado tanto no polo positivo quanto negativo do sistema HVDC. Todavia, à medida em que a resistência de falta aumenta, o afundamento de tensão em um dos polos torna-se menos severo.

Além da resistência de falta, também foi avaliada a influência da localização da falta na eficácia do método proposto para faltas polo:polo. Com base na Figura 37, nota-se que, para as faltas polo:polo com uma resistência de 200 e 300 Ω, a eficácia do método foi de aproximadamente 90% e 40%, respectivamente. Nesse contexto, na Figura 39 está apresentado um gráfico de barras com o desempenho do método no processo de classificação dessas faltas em função do local de incidência. Ressalta-se que o valor 1 no gráfico indica uma classificação correta da falta e o valor 0 um erro no processo de classificação.

Figura 39 – Eficácia do método no processo de classificação de faltas polo:polo com resistência de falta de 200 e 300 Ω.



Fonte: Próprio autor.

Conforme apresentado na Figura 39, a eficácia do método é atenuada à medida em que a incidência da falta se distancia do terminal de monitoramento para as faltas polo:polo com elevada resistência. À medida que o local de falta se afasta do terminal de monitoramento, os sinais monitorados pelo terminal são cada vez mais filtrados pela própria linha HVDC. Para uma falta bipolar, a corrente de curto-circuito que circula entre os polos depende não apenas da resistência de falta, mas também da impedância equivalente do trecho da LT entre o ponto de falta e o terminal de monitoramento.

Quanto maior essa distância, maior a impedância série vista do terminal, o que reduz a corrente de falta e, consequentemente, as variações de tensão. Em resistências de falta já relativamente altas, como 200 e 300 Ω, esse efeito se soma à limitação imposta pela própria resistência de falta e faz com que os sinais de tensão cheguem ao terminal bastante amortecidos.

Além da atenuação provocada pela impedância equivalente do trecho da LT, há também deformação da forma de onda ao longo da linha. As ondas viajantes produzidas pela falta sofrem reflexões e refrações em descontinuidades de impedância, o que altera a relação entre os transitórios dos dois polos quando observados em apenas um terminal. Para faltas distantes, superposições de frentes diretas e refletidas podem fazer com que um dos polos apresente um transitório ligeiramente mais intenso que o outro. Isso degrada o índice de simetria usado pelo método e aproxima a assinatura de faltas bipolares daquelas observadas em algumas faltas monopolares, especialmente na faixa de resistências mais elevadas, conforme apresentado na Figura 39.

Diferentemente do que foi verificado no processo de classificação de faltas polo:polo, a resistência e o local de incidência de falta não afetam a eficácia do método proposto para as faltas polo+:terra e polo-:terra. As faltas monopolares não sofrem deterioração significativa na taxa de acerto ao aumentar a resistência ou a distância de falta, pois a topologia permanece assimétrica por natureza: um polo é diretamente aterrado enquanto o outro permanece isolado. Assim, a dominância das grandezas de variação de tensão em um único polo persiste mesmo quando a corrente de falta diminui, preservando a eficácia do método.

5.1.2 Análise com Ruído

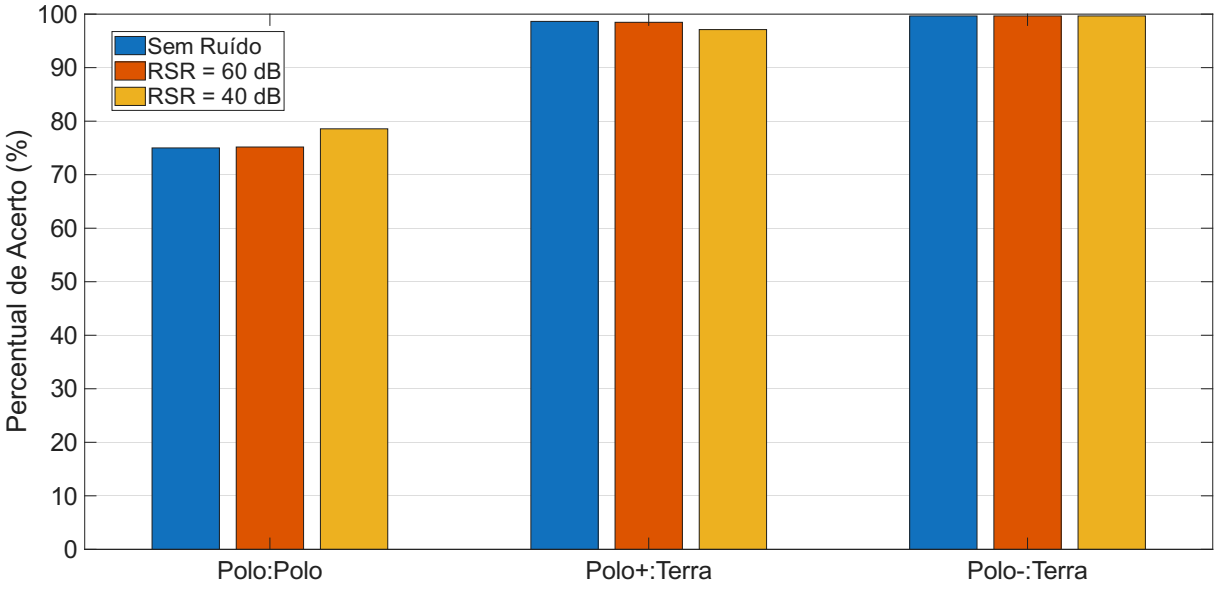
Até então, os resultados apresentados consideram a medição do sinal de tensão sem a presença de ruído. Todavia, na operação em tempo real, os sinais medidos podem estar sujeitos a interferências e limitações dos equipamentos de aquisição, interferência eletromagnéticas e condições dinâmicas do sistema, o que pode degradar a qualidade do sinal e afetar diretamente a precisão da detecção dos instantes de chegada das frentes de onda.

Nesse contexto, de modo a avaliar o desempenho do método de classificação de faltas frente a presença de ruídos na medição dos sinais, foram realizadas simulações inserindo um ruído branco com Relação Sinal Ruído (RSR) de 60 dB e 40 dB aos sinais de tensão monitorados nos terminais da linha de transmissão. Dessa forma, busca-se avaliar o método em cenários mais realistas a fim de verificar a sua robustez não apenas em condições ideais, mas também diante de cenários com a degradação natural do sinal.

É importante destacar que há trabalhos que reportam valores de RSR na faixa

de 40 a 50 dB na literatura para linhas de transmissão em CA (GARVANOV; DIMITROV; MILOJEVIĆ, 2014). Entretanto, como os níveis de ruído podem variar de um sistema para outro, não há consenso quanto aos valores de RSR que melhor representam a operação real de sistemas elétricos (LOPES et al., 2020). Desse modo, baseada na avaliação apresentada em RIBEIRO (2024) para avaliação de linhas de transmissão HVDC, foram considerados os valores de 60 e 40 dB para a RSR neste estudo. Na Figura 40 está apresentado um gráfico de colunas com o percentual de acerto no processo de classificação de faltas em função do nível de ruído do sinal de tensão monitorado.

Figura 40 – Percentual de acerto no processo de classificação de faltas em função do ruído do sinal de tensão.

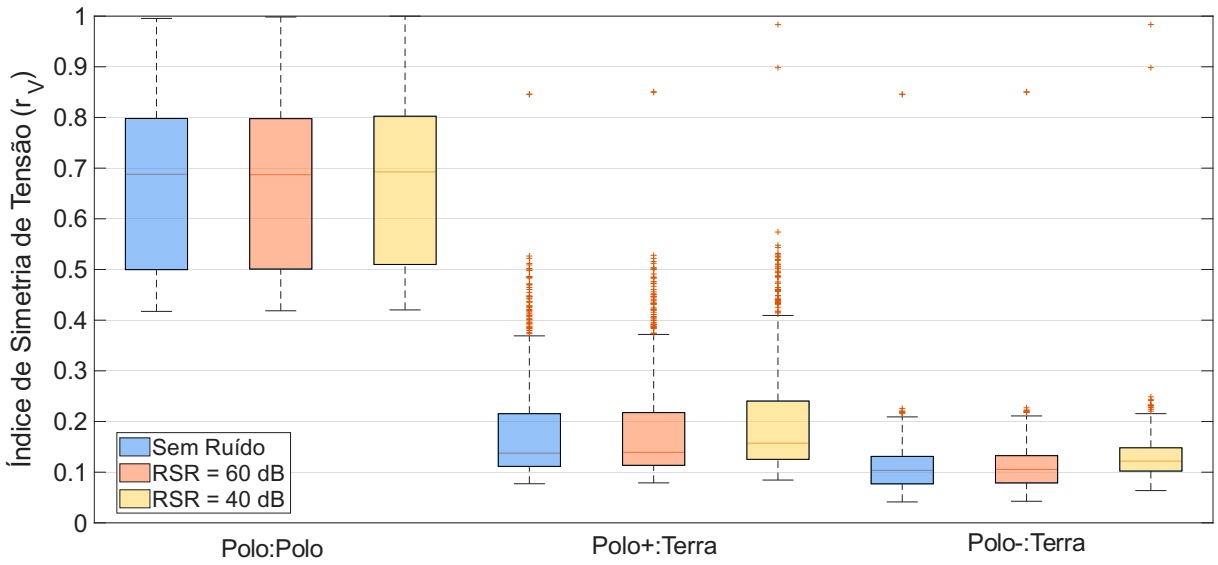


Fonte: Próprio autor.

Da Figura 40, conclui-se que a inserção de ruído ao sinal de tensão monitorado não compromete de maneira significativa a eficácia do método proposto, o que indica uma robustez para aplicação em condões mais próximas da operação real. O percentual de acerto no processo de classificação das faltas polo:polo foi de 75, 75,17 e 78,57 % para os cenários com o sinal sem ruído, com RSR de 60 e 40 dB, respectivamente. Já para as faltas envolvendo terra, o método apresenta acerto praticamente pleno e superior a 98% em todos os cenários, independentemente da qualidade do sinal medido.

Complementarmente, na Figura 41 está apresentado um *boxplot* que representa a distribuição dos valores do índice de simetria de tensão (r_V) para cada tipo de falta sob diferentes níveis de ruído.

Figura 41 – *Boxplot* dos valores dos índices de simetria do sinal de tensão (r_V) para cada falta em função do ruído do sinal.



Fonte: Próprio autor.

Da análise da Figura 41, verifica-se que os valores do índice r_V permanecem concentrados em níveis superiores a 0,5 para a maioria dos casos de faltas polo:polo, independentemente do nível de ruído do sinal. Já nas faltas envolvendo a terra, os índices apresentam valores significativamente menores, conforme esperado, dada a assimetria introduzida pelo afundamento de tensão em um dos polos do sistema.

De forma geral, mesmo com a presença de ruído, as distribuições associadas aos três tipos de faltas continuam claramente separadas: a faixa de valores de para faltas Polo:Polo mantém-se muito superior às faixas resultantes das faltas envolvendo terra. Esse fato reforça a robustez do uso do índice r_V como parâmetro principal para diferenciação entre faltas polo:polo e aquelas que envolvem apenas um polo, mesmo com a presença de ruído nos sinais monitorados.

5.2 LOCALIZAÇÃO

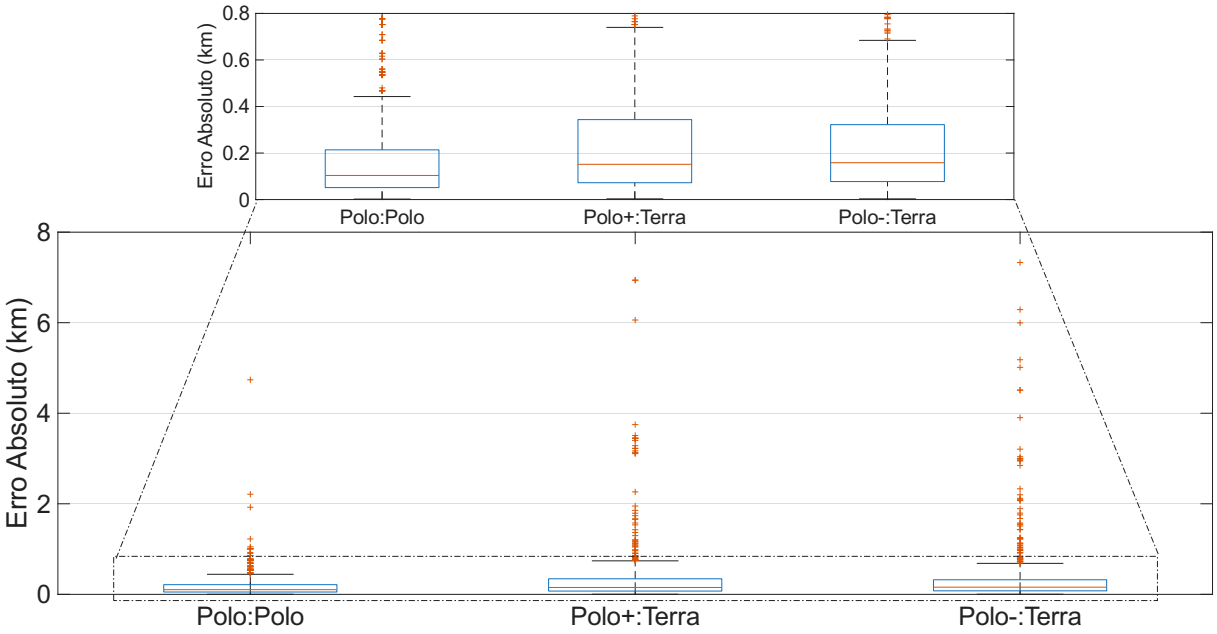
5.2.1 Análise do Método Proposto

A avaliação da etapa de localização é realizada por meio do cálculo dos erros absolutos para cada caso de falta analisado. Nesta seção será avaliada a influência do tipo, resistência e localização da falta no desempenho do método proposto.

Inicialmente, a influência do tipo de falta no desempenho do método é avaliada por meio de um gráfico *boxplot*, o qual sintetiza os erros absolutos obtidos para cada tipo de falta. O gráfico *boxplot* apresentado na Figura 42 representa a distribuição dos erros absolutos do processo de localização das faltas do tipo polo+:terra, polo-:terra e

polo:polo.

Figura 42 – *Boxplot* dos erros absolutos de localização para cada tipo de falta.



Fonte: Próprio autor.

Da Figura 42, verifica-se que o desempenho do método é afetado pela variação do tipo de falta. Para faltas do tipo polo:polo, o método apresentou erros menores do que os obtidos para as faltas do tipo polo+:terra e polo-:terra. No mais, verifica-se que há pontos no *boxplot* que apresentam erros superiores em relação aos demais erros obtidos. Estes pontos correspondem aos erros obtidos para localização de faltas incidentes exatamente no meio da LT e àquelas incidentes próximas ao terminal remoto. Comumente, tal problema é verificado nos métodos de localização de faltas baseados em ondas viajantes que utilizam dados monitorados apenas em um terminal devido ao processo de sobreposição das ondas viajantes que atingem o terminal de monitoramento, assim como será descrito em detalhes posteriormente.

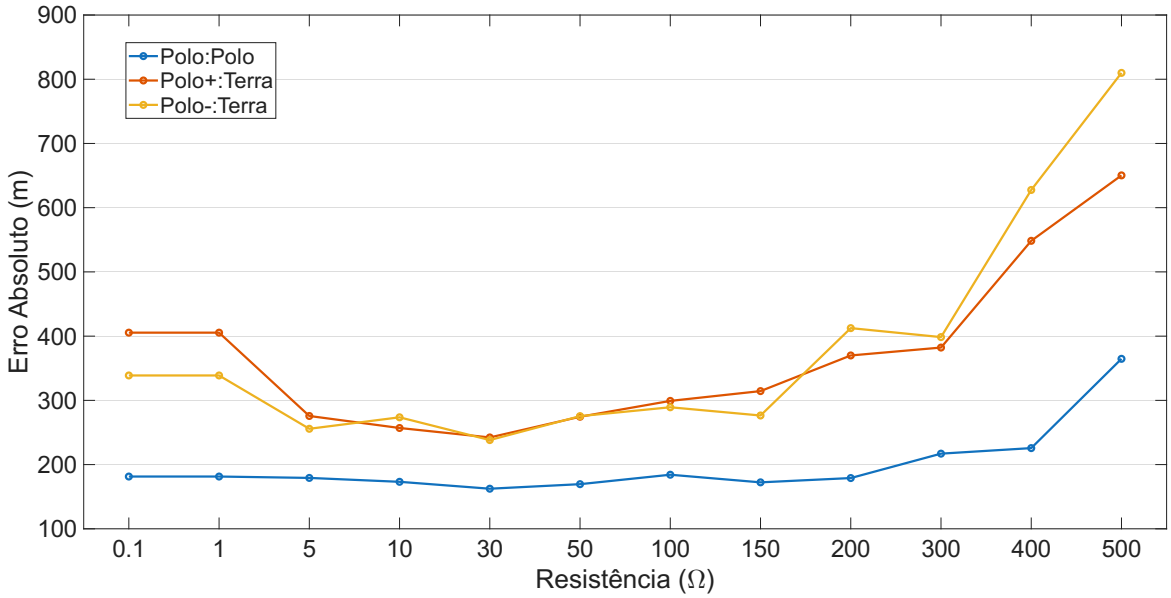
Baseado na Figura 42, verifica-se que os erros máximos obtidos foram iguais a 4,74 km, 6,94 km e 7,33 km para as faltas do tipo polo:polo, polo+:terra e polo-:terra, respectivamente. Todavia, é relevante destacar que tais erros foram obtidos para faltas incidentes exatamente no meio da linha, ponto no qual a amplitude da onda viajante que atinge o terminal de monitoramento é demasiadamente atenuada devido à sobreposição das ondas viajantes, o que compromete o desempenho dos métodos baseados na detecção de tais ondas. Verifica-se que a mediana dos erros obtidos para as faltas do tipo polo:polo, polo+:terra e polo-:terra foram iguais a 103,67 m, 151,65 m e 158,36 m, respectivamente. Tais erros apresentam valores absolutos inferiores à extensão equivalente de um vão de torre HVDC, que é de aproximadamente 480 m (FERNANDES

et al., 2020).

No mais, as médias gerais dos erros absolutos apresentados na Figura 42 são iguais a 193,83 m, 368,73 m e 377,89 m para as faltas do tipo polo:polo, polo+:terra e polo-:terra, respectivamente, o que demonstra que o método de localização de faltas apresenta erros absolutos menores para as faltas do tipo polo:polo. A média geral dos erros obtidos para todos os tipos de falta é igual a 313,48 m, que representa cerca de 0,013% do comprimento da LT (2.450 km).

A fim de investigar as causas dos erros de localização, a eficácia do método é avaliada em função da resistência de falta, conforme apresentado na Figura 43. Este gráfico apresenta a média dos erros absolutos de localização para cada tipo e resistência de falta.

Figura 43 – Média dos erros absolutos de localização para cada resistência de falta.



Fonte: Próprio autor.

De acordo com a Figura 43, conclui-se que os erros obtidos para as faltas polo:polo são menores do que os obtidos para as faltas que envolvem apenas apenas um polo, independentemente da resistência de falta. Esse desempenho está diretamente relacionado ao fenômeno *mixing mode*, que ocorre devido ao acoplamento eletromagnético existente entre os condutores da linha de transmissão (MAGALHÃES; LOPES, 2021).

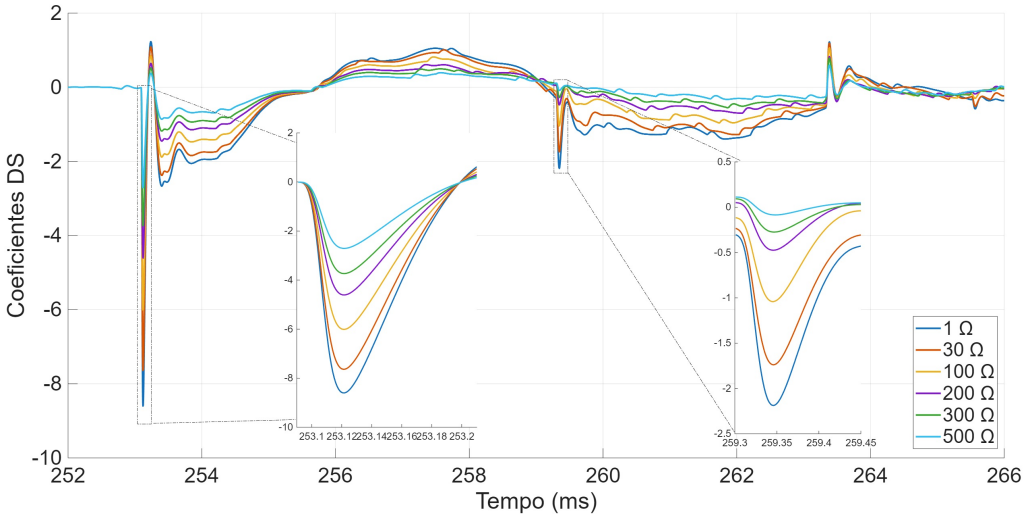
Em uma falta polo:polo, a perturbação excita predominantemente o modo aéreo, cuja propagação é mais estável e menos influenciada pelo acoplamento mútuo entre os polos. Como resultado, as ondas viajantes associadas a esse modo sofrem menor distorção ao longo da linha. Por outro lado, nas faltas que envolvem apenas um polo, a excitação assimétrica da linha promove uma contribuição mais intensa do modo terra, que apresenta forte interação com o modo aéreo ao longo da propagação. Esse

acoplamento resulta em um aumento do *mixing mode*, fazendo com que os modos se acoplem, produzindo sinais com maior distorção e superposição modal.

Adicionalmente, conforme apresentado na Figura 43, verifica-se que a eficácia do método é inversamente proporcional à resistência de falta. Esse resultado é condizente com a teoria de aplicação de localização de faltas baseada em ondas viajantes, pois, como apresentado na seção 2.4, a amplitude da OV lançada no ponto de falta reduz à medida em que resistência de falta aumenta. Tal redução pode comprometer a detecção correta dos instantes de tempo t_{R1} e t_{R2}.

A fim de avaliar a influência da atenuação da amplitude da onda viajante em função da resistência de falta, na Figura 44 estão apresentados os gráficos dos coeficientes do filtro DS aplicado ao sinal de tensão monitorado no polo positivo do retificador. Tais gráficos foram obtidos considerando uma falta do tipo polo+:terra, localizada a 925 km do retificador e com resistências de falta de 1 Ω, 30 Ω, 100 Ω, 200 Ω, 300 Ω e 500 Ω.

Figura 44 – Coeficientes do filtro DS aplicado ao sinal de tensão para faltas com resistência igual a 1 Ω, 30 Ω, 100 Ω, 200 Ω, 300 Ω e 500 Ω.



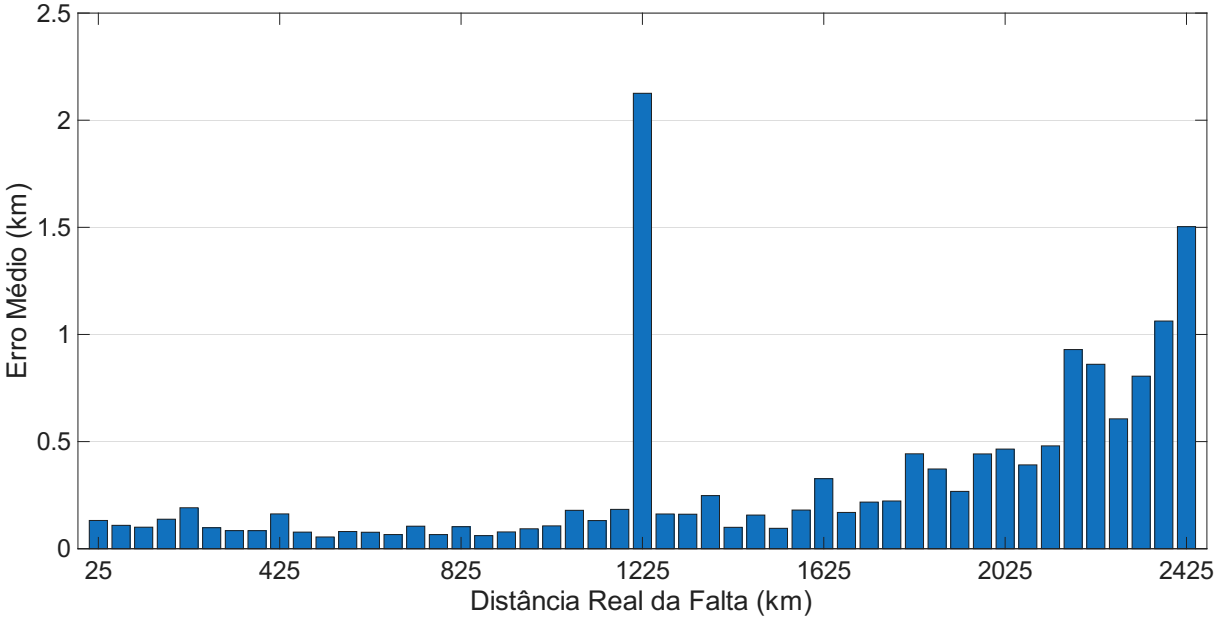
Fonte: Próprio autor.

Com base na análise do gráfico apresentado na Figura 44, verifica-se que a amplitude dos coeficientes do filtro DS é atenuada com o aumento da resistência de falta. Embora o aumento da resistência de falta atenue a amplitude dos coeficientes do filtro DS, essa redução não compromete a etapa de detecção do instante t_{R1}. Após a detecção da falta via o limiar de detecção autoadaptativo, o método identifica o instante t_{R1} a partir da detecção, via interpolação *spline*, do pico do coeficiente do filtro DS. Como esse pico permanece bem definido para todos os casos analisados, a estimativa de t_{R1} mantém elevada precisão. Todavia, a detecção do instante de chegada da segunda frente de onda refletida no ponto de falta no terminal (t_{R2}) pode ser afetada pela redução significativa

da amplitude da onda à medida que a resistência de falta aumenta. Para faltas com resistências elevadas, a amplitude da onda viajante resultante que atinge o terminal de monitoramento no instante (t_{R2}) pode ser nula, inviabilizando a sua identificação pelos métodos baseados na TOV. Este fato torna o processo de detecção da segunda frente de onda refletida no ponto de falta sujeito a erros inerentes dos métodos de ondas viajantes.

Por fim, a influência do local da falta na performance do método é avaliada por meio do gráfico de barras apresentado na Figura 45, que apresenta a média do erros absolutos de localização de todos os tipos de faltas em função da distância de sua incidência na LT. Nesse caso, o terminal de referência é o retificador, considerado como o terminal de monitoramento.

Figura 45 – Média dos erros absolutos de localização para cada local de falta.



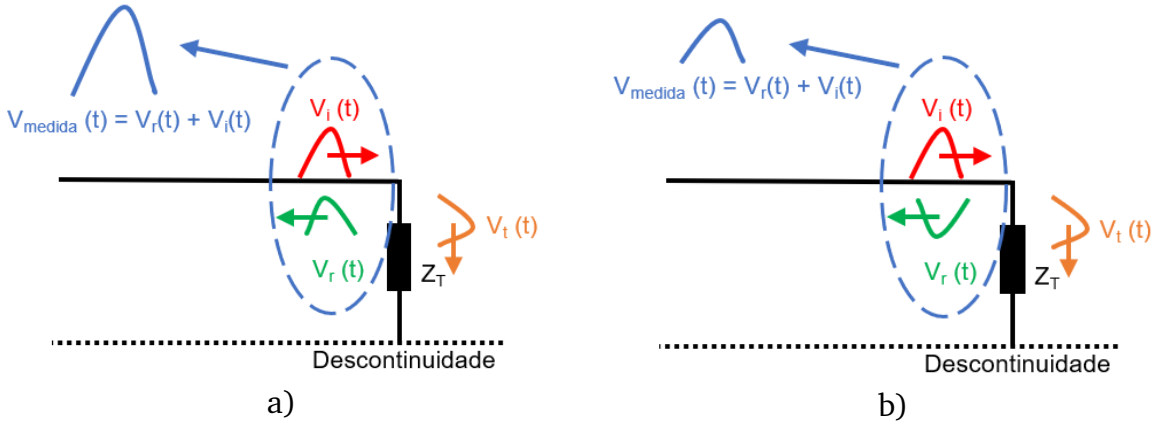
Fonte: Próprio autor.

Da Figura 45, conclui-se que a eficácia do método é inversamente proporcional à distância da falta com relação ao terminal de monitoramento. Além disso, destaca-se que o desempenho do método é demasiadamente afetado para os casos de faltas incidentes exatamente no meio da LT (1.225 km). A relação de proporcionalidade inversa entre a distância da falta com relação ao terminal de monitoramento e a eficácia do método pode ser justificada pelo seguinte fato: quanto maior a distância da incidência de falta, maior será o intervalo de tempo entre a detecção dos instantes t_{R1} e t_{R2}. Consequentemente, um número maior de ondas viajantes vão alcançar o terminal de monitoramento, o que pode elevar o impacto da sobreposição das ondas viajantes. Complementarmente, para faltas mais distantes do terminal de monitoramento, verifica-se uma maior dispersão e um maior amortecimento das ondas viajantes, além do fato da variação da frequência que influenciar na velocidade de propagação das OVs. Tal fato justifica o aumento dos

erros absolutos de localização à medida em que a distância de incidência de falta com relação ao terminal de monitoramento aumenta.

Ademais, os altos erros de localização obtidos para as faltas incidentes no meio da LT podem ser justificados pelo fato que os métodos baseados na TOV detectam a amplitude resultante das ondas viajantes que atingem o terminal de monitoramento. A amplitude resultante corresponde à soma das amplitudes de todas as ondas viajantes verificadas em um determinado instante de tempo, em que tal fenômeno é denominado sobreposição das ondas viajantes. Este fenômeno pode resultar em um efeito construtivo, para o caso em que as ondas somadas apresentam a mesma polaridade, ou um efeito destrutivo, quando as amplitudes das ondas somadas têm polaridades distintas. Para exemplificar o processo de sobreposição de ondas, na Figura 46 estão representadas as interferências construtivas e destrutivas.

Figura 46 – Fenômenos de sobreposição de ondas: a) interferência construtiva e b) interferência destrutiva.

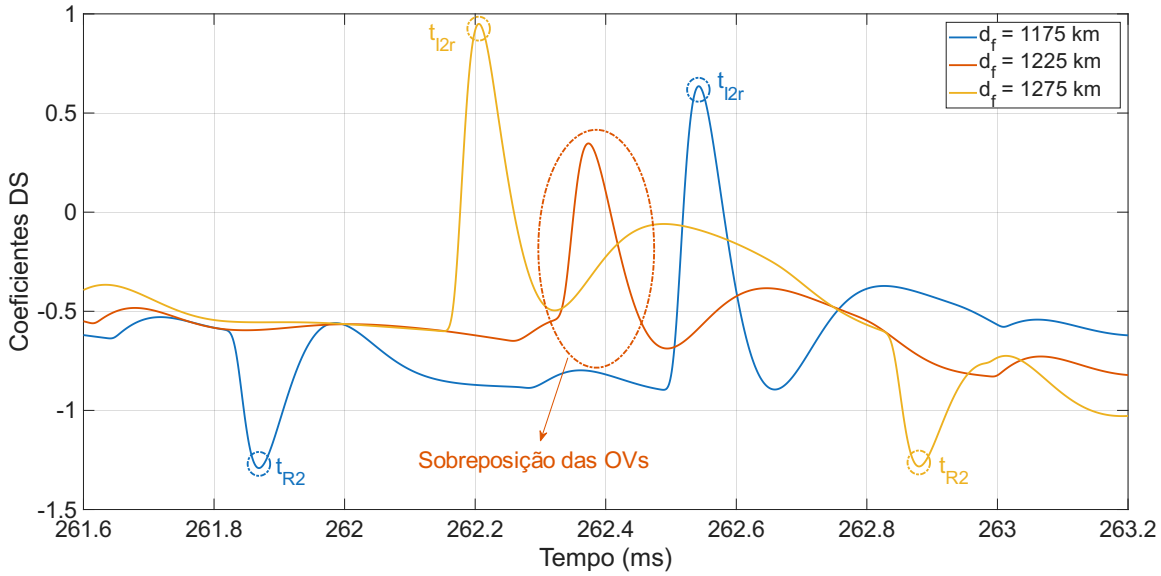


Fonte: Próprio autor.

Da Figura 46, tem-se que $V_i(t)$, $V_r(t)$ e $V_t(t)$ representam a amplitude da onda viajante de tensão incidente, refletida e refratada na descontinuidade da LT, respectivamente. Ressalta-se que a onda medida pelos métodos baseados em ondas viajantes é resultante da soma entre $V_i(t)$ e $V_r(t)$ em um determinado instante de tempo. Portanto, para ondas incidentes e refletidas com a mesma polaridade, a interferência construtiva aumenta a amplitude da onda a ser detectada, assim como está apresentado na Figura 46.a). Por outro lado, com apresentado na Figura 46.b), a interferência destrutiva ocorre com a soma de ondas com polaridades distintas, o que acarreta na redução da amplitude da onda a ser medida pelo método. Com a amplitude da onda resultante reduzida, o seu processo de detecção se torna mais desafiador. Além disso, para os casos de interferência destrutiva que resultem em uma amplitude da onda viajante nula, torna-se inviável realizar a sua detecção utilizando os métodos baseados na TOV.

Para exemplificar o efeito destrutivo da sobreposição das ondas no processo de detecção do instante t_{R2} para os casos de faltas incidentes no meio da LT, na Figura 47 estão apresentados os coeficientes do filtro DS para as faltas do tipo polo+:terra incidentes a uma distância de 1175 km, 1225 km (meio da LT) e 1275 km do terminal retificador.

Figura 47 – Coeficientes DS para uma falta localizada a 1175 km, 1225 km (meio da LT) e 1275 km do terminal retificador.



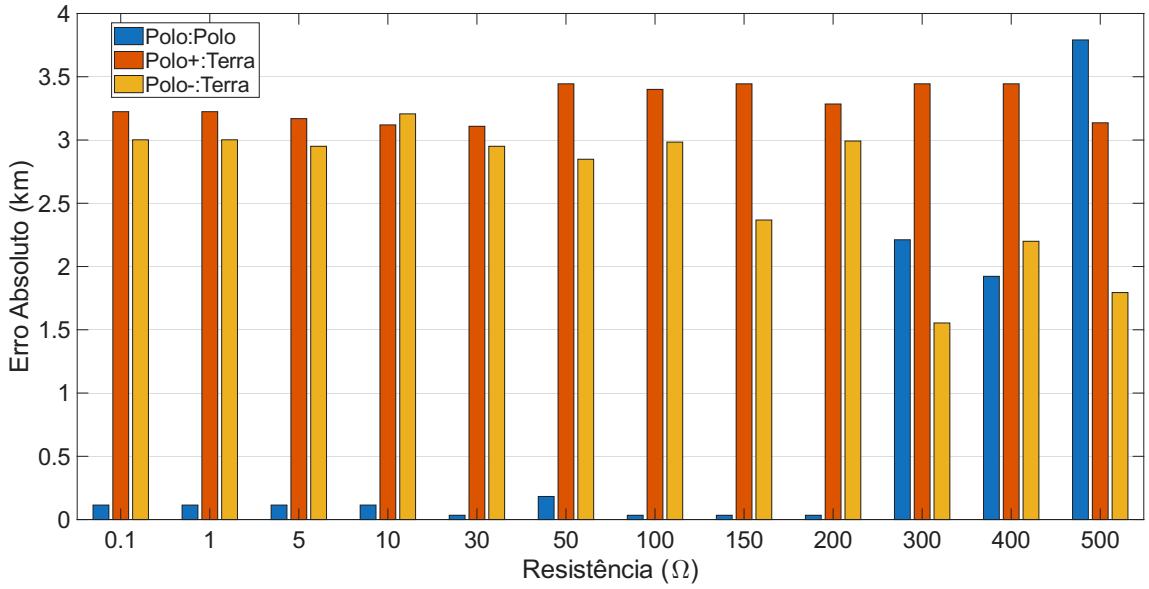
Fonte: Próprio autor.

Da análise da Figura 47, constata-se perceptivelmente a diferença entre os instantes t_{R2} e t_{I2r} para as faltas incidentes a 1175 e 1275 km do terminal retificador. O instante de tempo t_{R2} corresponde à detecção da segunda frente de onda refletida no ponto de falta, sendo o de interesse na aplicação do método. Já o instante t_{I1r} se refere à detecção da frente de onda refletida no terminal remoto e refratada no ponto de falta em direção ao terminal de monitoramento, assim como foi apresentado na Figura 8. Além disso, verifica-se que, para uma falta incidente na primeira metade da LT, a onda refletida no ponto de falta atinge o terminal de monitoramento antes da onda refletida no terminal oposto e refratada no ponto de falta. Dessa forma, tem-se que t_{R2} é menor que t_{I2r}. Já para as faltas incidentes na segunda metade da LT, tem-se que t_{R2} é maior que t_{I2r}.

Todavia, ao analisar a falta incidente exatamente no meio da LT, verifica-se que os instantes de tempo t_{R2} e t_{I2r} são aproximadamente iguais. Dessa forma, como as polaridades das ondas viajantes correspondentes aos instantes t_{R2} e t_{I2r} são opostas, a amplitude da onda viajante medida pelo método é atenuada devido ao processo de interferência destrutiva.

Adicionalmente, os resultados apresentados na Figura 45 destacam um considerável aumento na média dos erros absolutos de localização para as faltas incidentes exatamente no meio da LT. A fim de investigar o desempenho do método frente a esses casos, na Figura 48 são apresentados os erros absolutos obtidos para as faltas incidentes exatamente no meio da LT em função do tipo e resistência.

Figura 48 – Erros absolutos de localização para faltas incidentes no meio da LT.

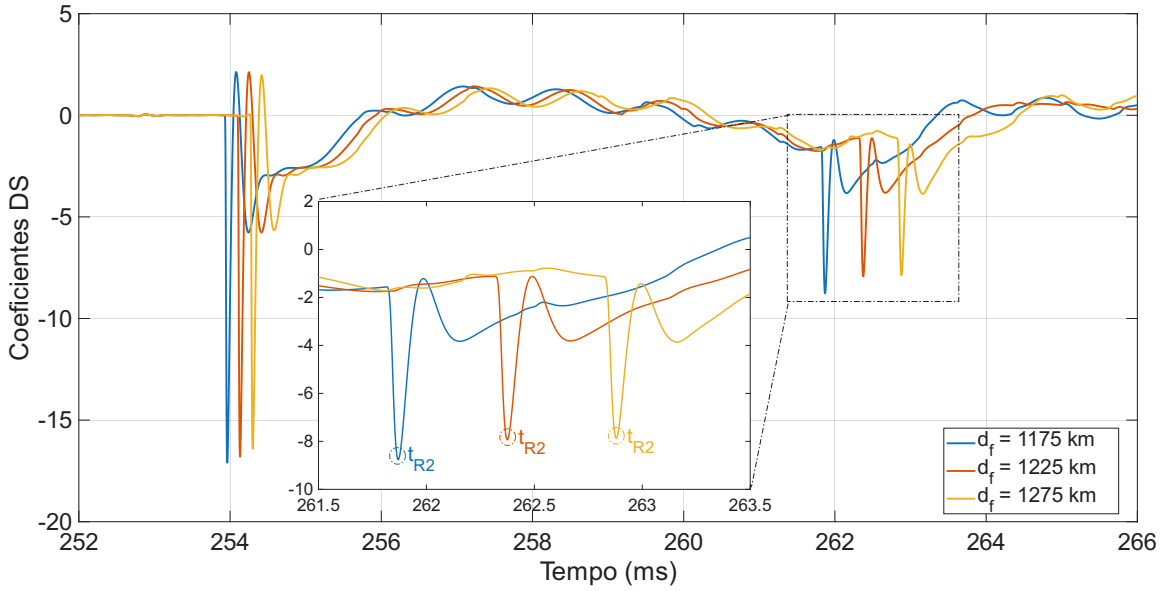


Fonte: Próprio autor.

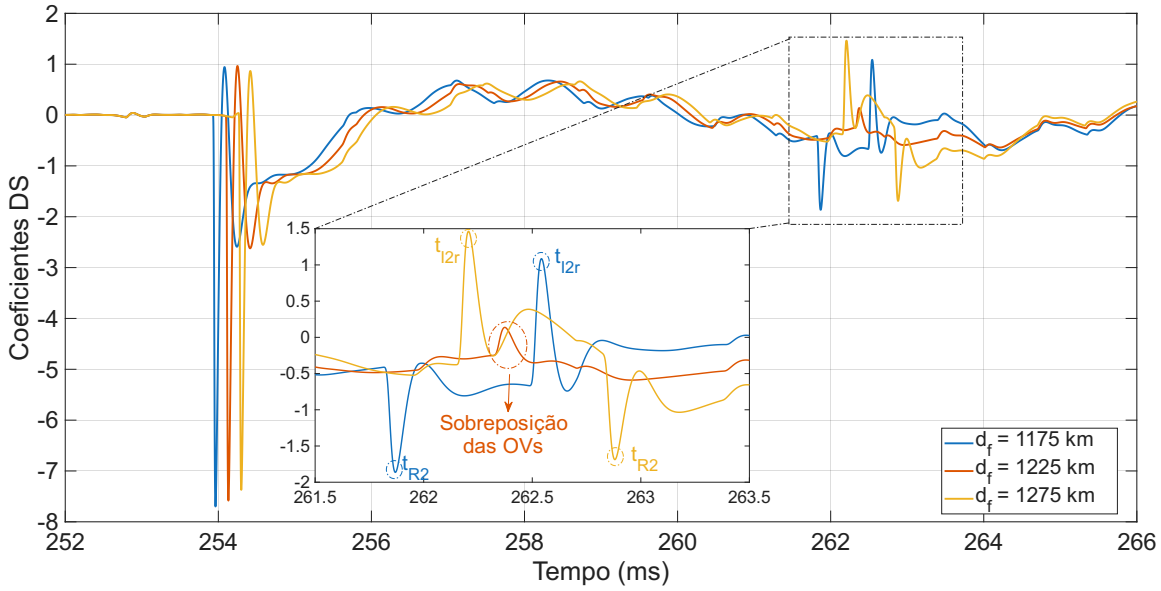
Com base na análise da Figura 48, verifica-se que, para as faltas do tipo polo+:terra e polo-:terra, os erros absolutos são superiores a 2 km para a grande maioria dos valores de resistência de falta. Isto ocorre devido à sobreposição das ondas viajantes, assim como foi apresentado no gráfico da Figura 47. Em contrapartida, para as faltas do tipo polo:polo, os erros de localização são significativamente elevados apenas para os casos com resistência de falta de 300, 400 e 500 Ω.

Para avaliar a influência da resistência de falta no desempenho da localização de faltas do tipo polo:polo do método proposto, foram realizadas análises dos coeficientes DS para as faltas polo:polo com dois valores de resistência de falta: 10 e 500 Ω. Para cada resistência de falta, foram analisados os coeficientes DS para a incidência de falta a 1175 km, 1225 km (meio da LT) e 1275 km, conforme apresentado na Figura 49.

Figura 49 – Coeficientes DS para uma falta polo:polo com R_f = a) 10 Ω e b) 500 Ω.



(a)



(b)

Fonte: Próprio autor.

Por meio de uma análise comparativa entre os gráficos apresentados nas Figuras 49.a) e 49.b), verifica-se que não há onda refletida no terminal oposto e refratada no ponto de falta para a resistência de falta de 10 Ω. Por outro lado, quando a resistência de falta é elevada, o fenômeno de refração das ondas viajantes oriundas de uma falta polo:polo ocorre.

A diferença entre o desempenho das ondas viajantes observado para a resistência de falta de 10 e 500 Ω decorre da interação entre a impedância de falta e a impedância característica da linha, que determina o coeficiente de reflexão das ondas viajantes,

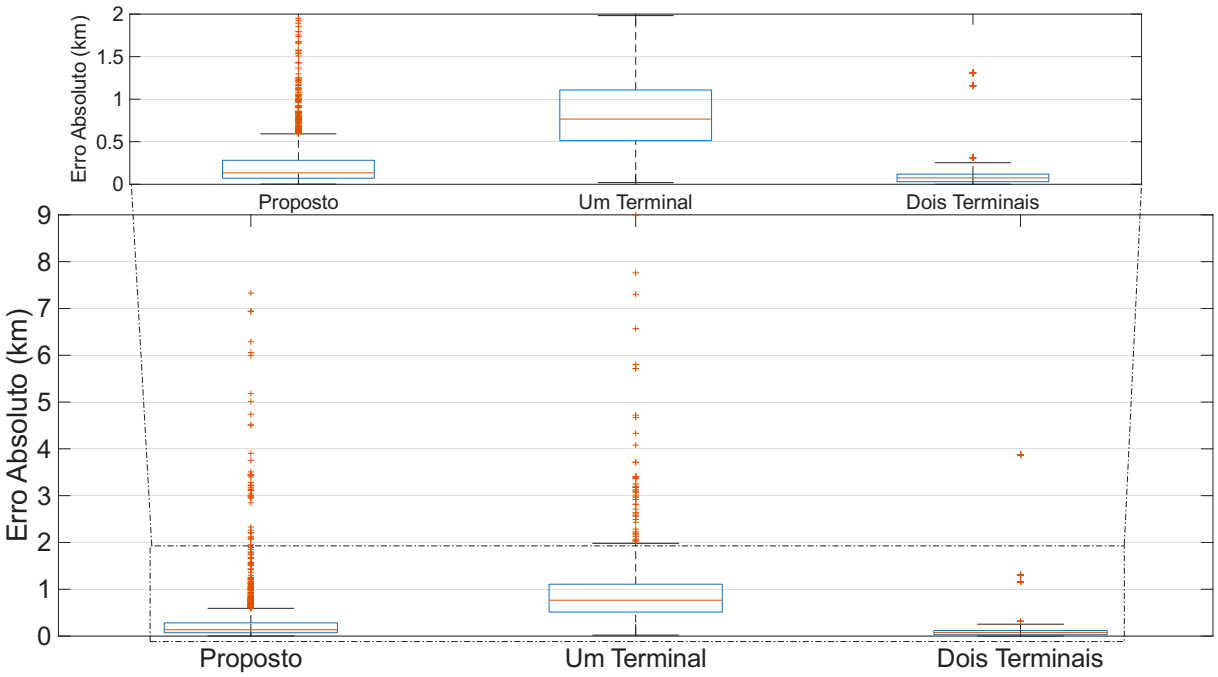
conforme apresentado na Equação (2.18). No caso de $R_f = 10\ \Omega$, a falta se aproxima de um curto-circuito, gerando um colapso abrupto de tensão que domina o transitório e gera forte amortecimento da componente de alta frequência. Assim, a energia incidente da OV é majoritariamente absorvida no terminal remoto e a onda refletida remanescente torna-se praticamente indistinguível após a filtragem DS. Por outro lado, quando $R_f = 500\ \Omega$, a impedância da falta aproxima-se da impedância característica da linha, reduzindo a absorção de energia no ponto de defeito e permitindo a formação de uma reflexão da OV ao atingir o terminal remoto. Tal reflexão interage com a onda refletida no ponto de falta, resultando em sobreposição destrutiva que dificulta a identificação precisa de t_{R2}, conforme apresentado na Figura 49.b).

5.2.2 Comparação com os Métodos Clássicos

Com o objetivo de comparar o desempenho do método proposto com o dos métodos clássicos reportados na literatura, os métodos clássicos de localização de faltas de um e dois terminais foram implementados. Ressalta-se que a distância de falta estimada pelo método de dois terminais é calculada por meio da Equação (2.28) e pelo método de um terminal é calculada pela Equação (2.30), conforme apresentado na seção 2.4.

Nesse contexto, apresentam-se a seguir os gráficos para comparar os resultados obtidos por cada método em função do local, da resistência e do tipo de falta. Doravante, os termos “Proposto”, “Um Terminal” e “Dois Terminais” referem-se, respectivamente, aos resultados do método proposto neste trabalho, do método clássico de localização de faltas baseado em dados de tensão monitorados apenas no terminal retificador do sistema HVDC e do método clássico de dois terminais. Inicialmente, o *boxplot* apresentado na Figura 50 evidencia os erros absolutos de localização obtidos na aplicação de cada um dos métodos analisados.

Figura 50 – *Boxplot* dos erros absolutos de localização para cada método.



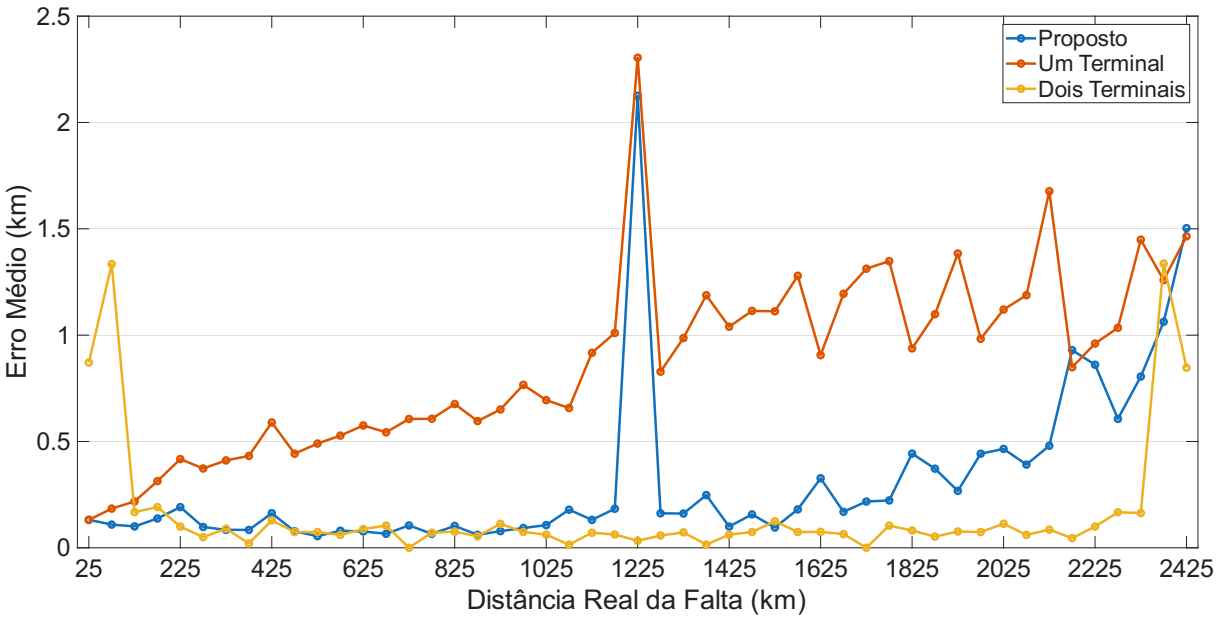
Fonte: Próprio autor.

De acordo com a Figura 50, verifica-se que o desempenho do método proposto é superior ao do método clássico de um terminal. Adicionalmente, o método clássico de dois terminais foi o que apresentou os menores erros absolutos de localização, todavia ele necessita de um canal de comunicação sincronizado para monitorar os dados em ambos os terminais do sistema. Ressalta-se que problemas relacionados à perda de sincronização entre os terminais não foi avaliado neste trabalho.

Complementarmente, destaca-se que a média obtida para os erros absolutos na aplicação do método proposto, de um terminal e de dois terminais foi igual a 313,48 m, 874,40 m e 216,11 m, respectivamente. Dessa forma, conclui-se que o método proposto reduz a média geral dos erros obtidos em cerca de 560 m em relação ao método clássico de um terminal. Além disso, os erros máximos obtidos na aplicação foram de 7,32 km, 8,99 km e 3,88 km para o método proposto, de um terminal e dois terminais, respectivamente.

Para investigar os erros obtidos na aplicação de cada método, na Figura 51 está apresentado um gráfico com erros médios obtidos em função da distância de falta em relação ao terminal retificador.

Figura 51 – Média dos erros absolutos para cada método em função do local de incidência de falta.



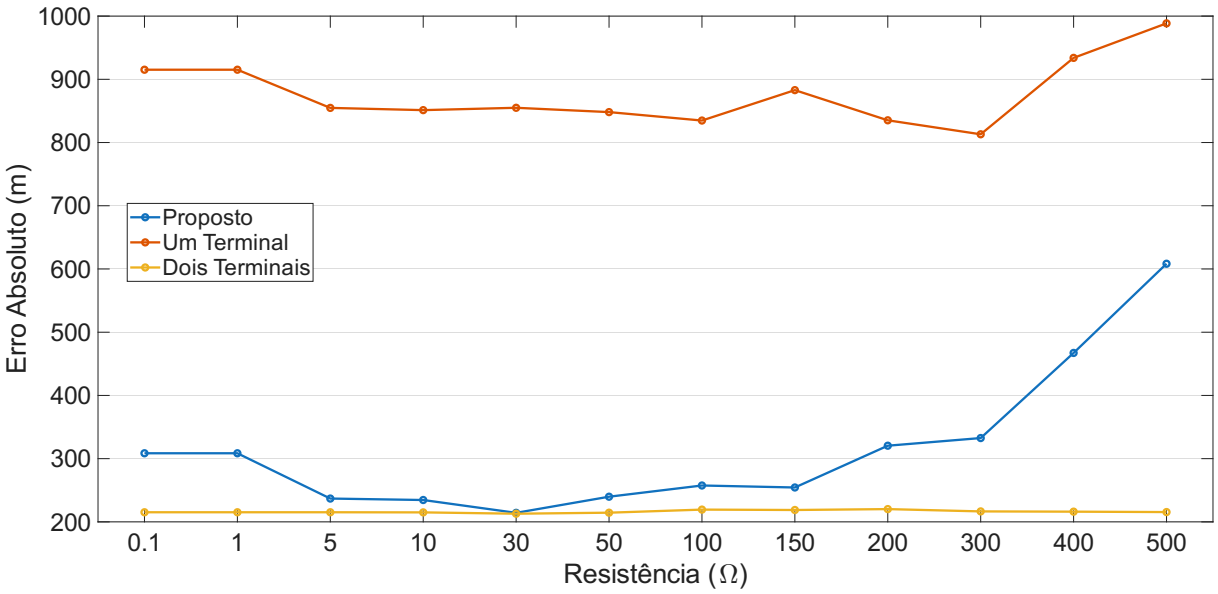
Fonte: Próprio autor.

O gráfico apresentado acima evidencia que os erros médios obtidos para o método proposto são inferiores aos obtidos no método clássico de um terminal em praticamente todas as distâncias de falta analisadas. Destaca-se também o desempenho superior do método proposto na aplicação de faltas próximas ao terminal de monitoramento quando comparado com o método clássico de dois terminais. Ressalta-se que o método de dois terminais apresenta erros absolutos maiores à medida em que a incidência da falta se aproxima de um dos terminais.

No método de dois terminais, o desempenho deteriora-se quando a falta ocorre próxima a um dos extremos da linha, pois a assimetria entre os tempos de chegada das frentes de onda em cada terminal aumenta significativamente. Nessas situações, a frente de onda que se propaga em direção ao terminal mais próximo chega quase instantaneamente, enquanto a onda que percorre toda a extensão da LT até o terminal oposto está sujeita a maior atenuação, dispersão e distorção ao longo do trajeto. Além disso, a impedância equivalente do trecho entre o ponto de falta e o terminal mais distante é superior à impedância equivalente entre o ponto de falta e o terminal mais próximo, o que pode resultar em diferentes níveis de atenuação e, consequentemente, em variações na velocidade aparente de propagação das OVs em cada sentido.

Além disso, o desempenho dos métodos é avaliado em função da resistência de falta, conforme apresentado na Figura 52. Tal gráfico representa a média dos erros absolutos obtidos na aplicação de cada método em função da resistência de falta.

Figura 52 – Média dos erros absolutos para cada método em função da resistência de falta.



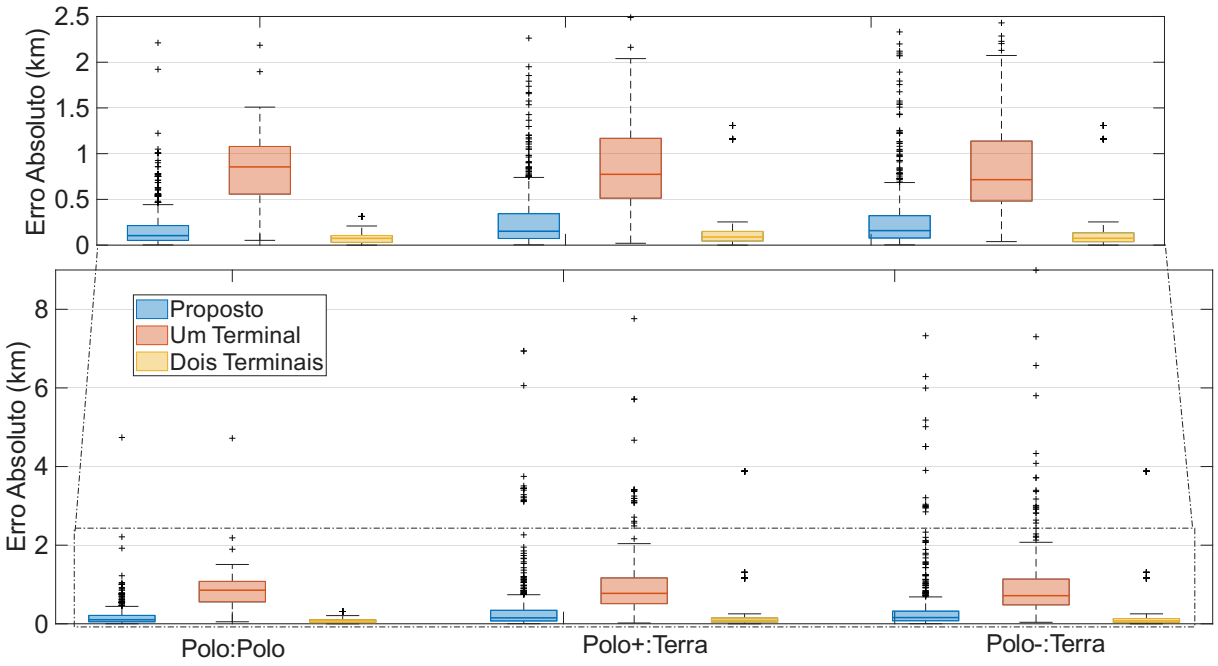
Fonte: Próprio autor.

De acordo com a Figura 52, verifica-se que os erros médios obtidos na aplicação do método clássico de um terminal foram superiores aos observados para o método proposto em todos os valores de resistência de falta analisados. Ademais, conforme discutido na Seção 5.2.1, o desempenho dos métodos baseados na monitoração de dados em apenas um terminal é inversamente proporcional à resistência de falta.

No caso do método de dois terminais, a localização da falta depende exclusivamente da detecção da primeira frente de onda que chega a cada terminal, não sendo necessária a identificação das frentes refletidas no ponto de falta, cujas amplitudes são fortemente atenuadas à medida que a resistência de falta aumenta. Dessa forma, por utilizar apenas as ondas incidentes e comparar seus tempos de chegada em cada terminal de monitoramento, o método de dois terminais mantém desempenho praticamente constante mesmo para faltas de alta resistência.

Por fim, o desempenho de cada método foi avaliado em função do tipo de falta, como apresentado no *boxplot* da Figura 53. Tal gráfico apresenta os erros absolutos obtidos para cada método em função do tipo de falta.

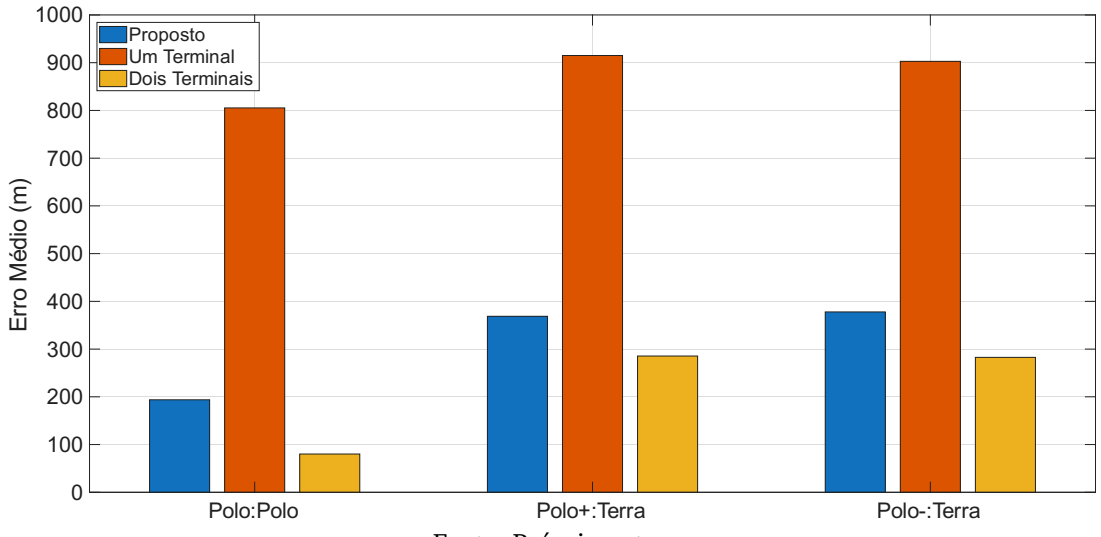
Figura 53 – *Boxplot* dos erros absolutos de localização para cada método em função do tipo de falta.



Fonte: Próprio autor.

De acordo com os dados apresentados no gráfico, conclui-se que o método de um terminal apresentou os maiores erros absolutos, enquanto o método de dois terminais obteve os menores erros absolutos para todos os tipos de faltas analisados. A fim de sintetizar os dados apresentados na Figura 53, no gráfico da Figura 54 está apresentado um gráfico de barras com as médias obtidos para os erros absolutos na implantação de cada método em função do tipo de falta.

Figura 54 – Média dos erros absolutos para cada método em função do tipo de falta.



Fonte: Próprio autor.

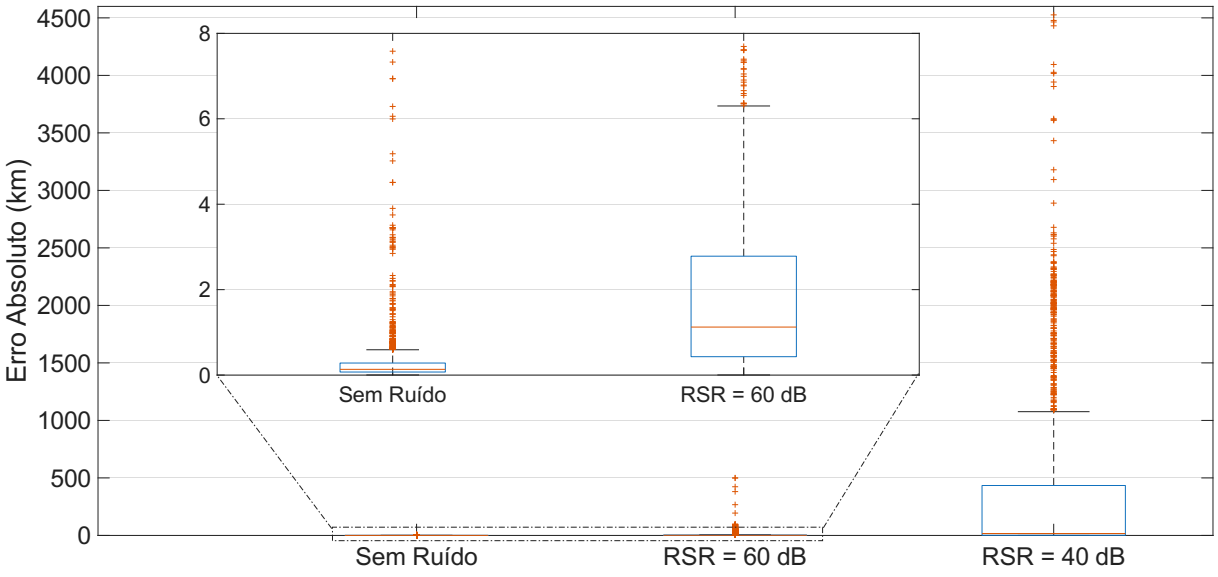
Baseada na análise do gráfico apresentado, observa-se que o método de um terminal concentra as maiores médias de erro, com valores superiores a 800 m para os três tipos de falta. Por outro lado, o método de dois terminais apresenta as menores médias, destacando-se o valor mínimo de 80,18 m para a falta polo:polo. Ademais, os resultados obtidos com o método proposto mostram uma redução significativa em relação ao método clássico de um terminal.

De modo geral, os resultados da Figura 54 evidenciam que os erros associados às faltas envolvendo apenas um polo são superiores aos verificados nos casos que envolvem ambos os polos, independentemente do método analisado. A média geral dos erros para as faltas polo:polo, considerando os três métodos, foi de 359,77 m, enquanto as médias para as faltas polo+:terra e polo-:terra foram de 523,09 m e 521,13 m, respectivamente.

5.2.3 Análise com Ruído

De modo análogo ao apresentado na seção 5.1.2 para avaliação do método de classificação, nesta seção serão apresentados os resultados obtidos para o processo de localização de faltas considerando a presença de ruído. Nesse contexto, foram realizadas simulações com a inserção de ruído branco, considerando valores de RSR de 60 dB e 40 dB nos sinais de tensão monitorados. Na Figura 55 está apresentado um gráfico *boxplot* com os erros absolutos de localização de faltas em função do nível de ruído adicionado ao sinal de tensão monitorado.

Figura 55 – *Boxplot* dos erros absolutos de localização em função do nível de ruído do sinal.



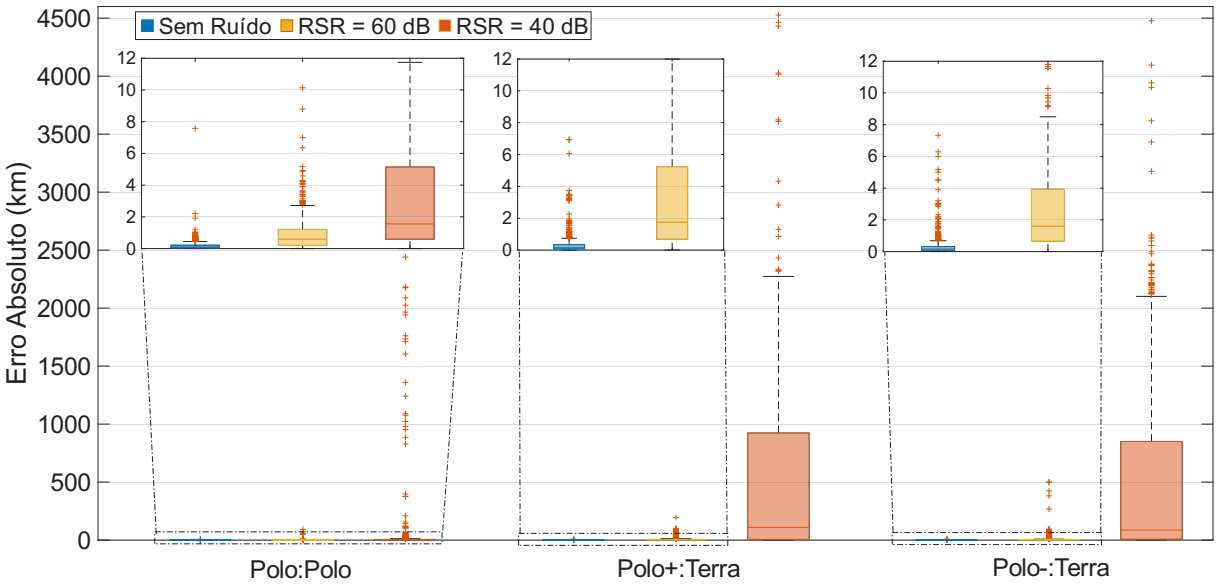
Fonte: Próprio autor.

De acordo com a análise da Figura 55, conclui-se que o desempenho do método é afetado pela presença de ruído no sinal monitorado. As médias gerais para os casos

sem ruído adicionado ao sinal de tensão, com a adição de um ruído branco com RSR de 60 dB e 40 dB, foram iguais a 0,315 km; 7,21 km e 391,0 km, respectivamente. No caso sem a presença de ruído, os erros permanecem muito baixos, indicando que a identificação dos instantes de chegada da primeira (t_{R1}) e segunda frente de onda (t_{R2}) ocorre de forma precisa. Já para os casos com a adição de ruído (RSR de 60 dB e, sobretudo, 40 dB), observa-se o aumento da mediana, da dispersão e da ocorrência de valores extremos de erros de localização de faltas, o que reflete a redução progressiva da capacidade do método em detectar corretamente os instantes t_{R1} e t_{R2}. Portanto, como a aplicação do método depende da correta detecção dos instantes t_{R1} e t_{R2}, desvios de poucos microssegundos podem resultar em erros de magnitude considerável, dada a elevada velocidade de propagação das ondas.

A fim de investigar a influência do tipo de falta no processo de localização de faltas em função do nível de ruído do sinal monitorado, na Figura 56 está apresentado um *boxplot* com os erros obtidos para cada tipo de falta.

Figura 56 – *Boxplot* dos erros absolutos de localização em função do tipo de falta e do nível de ruído do sinal.



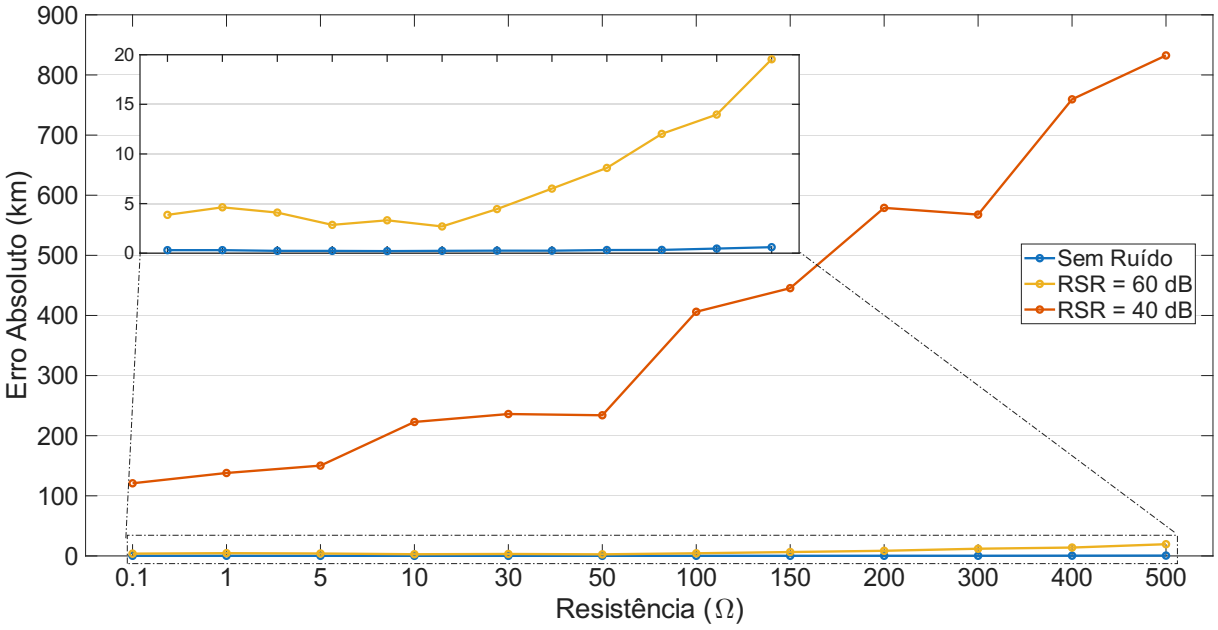
Fonte: Próprio autor.

A Figura 56 apresenta a distribuição dos erros absolutos de localização para diferentes tipos de falta sob as três condições de ruído. Verifica-se que, embora o aumento do ruído reduza a precisão em todos os cenários, o impacto é significativamente menor nas faltas polo:polo, que apresentam erros mais concentrados e menos sensíveis às variações de RSR quando comparadas às faltas envolvendo terra. Conforme apresentado na seção 5.2, em faltas do tipo polo:polo, a perturbação excita predominantemente o modo diferencial, cuja propagação é mais estável e menos afetada pelo acoplamento mútuo entre os polos. Por outro lado, nas faltas que envolvem apenas um polo, a

excitação assimétrica da linha intensifica a participação do modo comum, que apresenta forte interação com o modo diferencial ao longo do percurso. Esse acoplamento aumenta o fenômeno de *mixing mode*, promovendo superposição modal e elevando a distorção dos sinais, o que dificulta a identificação precisa das frentes de onda.

Por fim, a eficácia do método foi avaliada em função da resistência de falta considerando os diferentes níveis de ruído adicionados ao sinal de tensão, conforme apresentado na Figura 57.

Figura 57 – Média dos erros absolutos de localização para cada resistência de falta em função do nível de ruído do sinal.



Fonte: Próprio autor.

Os resultados da Figura 57 indicam que as médias dos erros absolutos de localização de falta para o caso com a adição de ruído com RSR de 40 dB foram superiores aos obtidos nos casos sem ruído e com o ruído de RSR de 60 dB para todas as diferentes resistências de falta analisadas. Tal resulto é esperado pois, conforme apresentado na seção 5.2, a amplitude da OV lançada no ponto de falta reduz à medida em que a resistência de falta aumenta.

Além disso, destaca-se que a resistência de falta atua como um elemento que altera o conteúdo espectral da frente incidente, reduzindo a intensidade das altas frequências que caracterizam o início do transitório gerado pela falta. Em faltas de baixa resistência, a descontinuidade é bem definida, o que facilita a detecção mesmo na presença de ruído para determinados casos.

5.3 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados e analisados os resultados numéricos referentes à eficácia do método proposto para a classificação e localização de faltas em LTs de um sistema HVDC. O desempenho do método de classificação foi satisfatório, sendo que o percentual de acerto no processo foi de 75,0%, 98,6% e 99,6% para as faltas polo:polo, polo+:terra e polo-:terra, respectivamente. Além disso, o desempenho do método foi avaliado frente a inserção de ruído no sinal de tensão monitorado. De forma geral, foi comprovada a robustez do método pois o seu desempenho não foi afetado devido a presença de ruído nos sinais monitorados.

Na etapa de localização foi realizada uma avaliação detalhada acerca da influência da variação do tipo, resistência e local da falta na eficácia do método proposto. Ressalta-se que os erros de localização obtidos na aplicação do método foram comparados com os obtidos na aplicação dos métodos clássicos de localização de faltas via OVs de um e dois terminais. Foi verificado que a aplicação do método proposto reduz significativamente os erros obtidos em comparação ao método clássico de um terminal. Por fim, o desempenho do método proposto foi analisado com a adição de ruídos com RSR de 60 e 40 dB ao sinal de tensão monitorado. Dos resultados obtidos, verificou-se que o desempenho do método é afetado à medida em que se aumenta o nível de ruído, especialmente para os casos de faltas polo+:terra e polo-:terra.

Ressalta-se que os ganhos observados neste capítulo confirmam a relevância da estratégia de ajuste da velocidade de propagação das ondas viajantes no processo de localização de faltas, principal contribuição científica da tese. Com base nos resultados obtidos, torna-se possível apresentar as principais conclusões do trabalho desenvolvido e as propostas para desenvolvimento de atividades futuras, tal como será detalhado no próximo capítulo.

Capítulo 6

Conclusões

Um método para classificação e localização de faltas em linhas de transmissão HVDC foi proposto. Este método é baseado na teoria de ondas viajantes e utiliza os dados de tensão monitorados apenas em um terminal do sistema. Além disso, o filtro *Differentiator-Smoother* foi utilizado no processamento dos sinais de tensão, permitindo a identificação dos instantes de chegada das ondas viajantes geradas pela falta no terminal de monitoramento.

Os fundamentos acerca da teoria de ondas viajantes e os princípios da aplicação do filtro DS foram apresentados. O sistema utilizado na análise do método proposto foi modelado no programa ATP/ATPDraw e representa o bipolo HVDC do Rio Madeira. Além disso, as linhas de transmissão do sistema foram modeladas a parâmetros distribuídos dependentes da frequência utilizando o modelo JMarti. Tal modelagem é mais adequada para a avaliação do método proposto, pois reproduz de forma mais realista os fenômenos de atenuação e dispersão das ondas viajantes observados em sistemas HVDC reais.

A fim de classificar as faltas, foram propostas regras em função do nível de variação de tensão após a incidência da falta. Como tal variação depende das condições de falta, foi proposta a utilização da métrica relativa do índice de simetria em magnitude. Para a etapa de localização, foi proposto um fator de ajuste da velocidade de propagação das ondas viajantes em função da zona de incidência da falta, a qual é calculada inicialmente via o método clássico de localização de um terminal baseado em ondas viajantes.

A eficácia do método proposto foi avaliada por meio da simulação de diferentes casos de faltas, que foram gerados via variação do tipo, resistência e distância de falta. Para representar as altas taxas de resolução dos relés digitais atuais, foi utilizada uma frequência de amostragem de 1 MHz nas simulações. Para cada caso analisado, os dados de tensão monitorados apenas no terminal retificador do sistema são importados para o Matlab®. Neste *software* o método para classificação e localização de faltas é implementado por meio do cálculo dos coeficientes do filtro DS aplicado aos sinais de tensão. Ademais, a eficácia do método foi analisada considerando a inserção de ruído nos sinais de tensão monitorados a fim de aproximar as condições de simulação da operação real.

Os resultados demonstraram que o método de classificação das faltas proposto se

mostrou eficaz em 99,6%; 98,6% e 75,0% dos casos de faltas polo-:terra, polo+:terra e polo:polo, respectivamente. Dessa forma, observa-se que o desempenho do método é reduzido para os casos de faltas polo:polo. Esse comportamento está associado, principalmente, ao aumento dos erros de classificação para faltas com elevada resistência, uma vez que a resistência de falta limita a transferência de energia entre os polos. Adicionalmente, constatou-se que o desempenho do método de classificação é imune à presença de ruído nos sinais monitorados. Esse resultado indica que as regras de classificação propostas, fundamentadas na análise dos níveis de afundamento de tensão provocados pela falta, são robustas para classificar corretamente a grande maioria dos casos analisados. Tal característica reforça a relevância do método proposto, uma vez que a identificação prévia dos polos envolvidos na falta pode contribuir para a aceleração dos procedimentos de diagnóstico e recomposição do sistema HVDC.

Na etapa de localização de faltas foi proposto um fator de ajuste na velocidade de propagação das OVs e aplicado um processo de interpolação via *spline* para aperfeiçoar a detecção dos instantes de chegada da primeira (t_{R1}) e segunda (t_{R2}) frentes de onda refletidas no ponto de falta no terminal de monitoramento. Os resultados obtidos demonstraram que a eficácia do método é afetada pelo tipo de falta, em que os erros absolutos de localização foram mais elevados para faltas do tipo polo:terra em comparação com as faltas polo:polo. Tal resultado pode ser justificado pelo fenômeno *mixing mode*, caracterizado por um problema que ocorre nos casos de faltas aterradas quando as soluções exigem a análise de reflexões e/ou refrações de ondas viajantes. No mais, com exceção dos casos de faltas localizadas exatamente no meio da LT, a maioria dos erros absolutos permaneceu abaixo do equivalente ao comprimento de um vão de torre HVDC, demonstrando um bom desempenho do método.

Adicionalmente, observou-se que a eficácia do método é inversamente proporcional à resistência de falta, que atenua a amplitude da onda viajante de tensão lançada no ponto de falta em direção aos terminais da linha de transmissão. Desse modo, quanto maior a resistência de falta, menor a amplitude da onda que atinge o terminal de monitoramento e, consequentemente, mais complexo se torna o processo de detecção das frentes de onda. Logo, para faltas com elevadas resistências, o desempenho do método de localização pode ser afetado.

Complementarmente, verificou-se que a precisão do método de localização é inversamente proporcional à distância da falta em relação ao terminal de monitoramento. Isto ocorre devido ao processo de sobreposição das ondas viajantes e à atenuação da velocidade de propagação das ondas viajantes pela resistência da linha de transmissão. Foi verificado também que o método apresentou erros mais significativos para os casos de faltas incidentes exatamente no meio da LT. Tal fato decorre do processo da sobreposição de duas ondas viajantes principais: a que é refletida pelo ponto de falta e a que é refletida

no terminal oposto e refratada no ponto de falta. Complementarmente, de forma a investigar a atenuação da eficácia do método para as faltas incidentes no meio da LT, foi realizada uma análise dos coeficientes do filtro DS para todas as faltas polo+:terra e polo:polo. Dos resultados obtidos, foi verificado que para as faltas polo:terra a sobreposição destrutiva das ondas viajantes na detecção do instante de tempo t_{R2} é verificada para todos os valores de resistência de falta analisados. Entretanto, para as faltas polo:polo, a interferência destrutiva das ondas viajantes ocorre apenas para faltas com elevada resistência.

De forma complementar, foi realizada uma análise comparativa dos resultados obtidos pelo método de localização proposto com os obtidos na aplicação dos métodos clássicos de um e dois terminais baseados na teoria de ondas viajantes. Dos resultados obtidos, tem-se que a média geral dos erros absolutos foi igual a 313,48 m, 874,40 m e 216,11 m na aplicação do método proposto, de um terminal e dois terminais, respectivamente. Dessa forma, conclui-se que o método proposto, baseado na aplicação do fator de ajuste na velocidade de propagação das ondas, reduziu a média absoluta dos erros em aproximadamente 560 m em relação ao método clássico de um terminal. Ademais, foi evidenciado que os erros obtidos para os casos de falta que envolvem a terra são superiores aos obtidos para os casos de falta polo:polo, independentemente do método analisado.

Dentre as contribuições alcançadas nesta pesquisa, destaca-se a proposição da técnica de ajuste da velocidade de propagação das ondas viajantes em função da zona de incidência da falta na linha de transmissão. Diferentemente dos métodos clássicos de localização baseados em ondas viajantes, que assumem uma velocidade de propagação constante ao longo de toda a LT, o método proposto assume que os efeitos de dispersão, atenuação e dependência da frequência influenciam a propagação das ondas viajantes e, consequentemente, a precisão da localização de faltas. Nesse contexto, foram definidos fatores de ajuste específicos para diferentes zonas da linha, permitindo compensar os desvios sistemáticos observados na aplicação do método clássico. Os resultados demonstraram que essa abordagem reduziu significativamente os erros de localização. Dessa forma, verificou-se que o ajuste da velocidade de propagação constitui uma alternativa eficaz para aumentar a precisão dos métodos de localização baseados em ondas viajantes sem a necessidade de medições adicionais ou canais de comunicação sincronizados.

Adicionalmente, o desempenho do método proposto foi analisado considerando a inserção de ruído no sinal de tensão monitorado. Dos resultados apresentados, conclui-se que o desempenho do método é afetado à medida que o nível de ruído aumenta, especialmente para os casos com alta resistência de falta. Embora o ruído reduza a precisão do método para todos os cenários, o impacto é significativamente menor nas

faltas polo:polo quando comparado com as faltas que envolvem a terra.

Ressalta-se ainda que o método proposto para classificação e localização de faltas utiliza exclusivamente os dados de tensão monitorados em um único terminal do sistema HVDC, eliminando a necessidade de dispositivos de monitoramento instalados em ambos os terminais da LT e de canais de comunicação sincronizados. Tal característica reduz a complexidade de implementação e os custos associados à aplicação prática do método. Além disso, os resultados obtidos evidenciam que a combinação entre a classificação baseada na análise das variações de tensão e a estratégia de ajuste da velocidade de propagação das ondas viajantes permite identificar as características da falta e estimar sua localização com elevada precisão. Dessa forma, o método desenvolvido apresenta potencial para contribuir com a redução dos tempos de recomposição de sistemas HVDC após a ocorrência de faltas, favorecendo a continuidade do serviço de transmissão de energia elétrica.

A despeito dos resultados satisfatórios obtidos, o método proposto apresenta algumas limitações técnicas. Na etapa de classificação, foi constatada uma redução na eficácia para os casos de falta polo:polo com elevada resistência de falta. Já na etapa de localização, verificou-se a elevação dos erros de localização obtidos para faltas com alta resistência ou incidentes distantes ao terminal de monitoramento. No mais, constatou-se que faltas incidentes exatamente no meio da LT constituem um cenário particularmente desafiador para o método proposto, visto que a sobreposição da onda viajante refletida no ponto de falta com a onda refratada dificulta a identificação da frente de onda resultante, aumentando a incerteza associada à estimativa da localização da falta. Todavia, é importante destacar que esse desempenho é inerente a todos os métodos de um terminal baseados na teoria das ondas viajantes e não representa uma limitação específica do método proposto.

Além disso, foi verificado que a presença de ruído no sinal monitorado reduz a acurácia do método, especialmente para os casos de faltas que envolvem a terra. Destaca-se ainda que a implementação prática do método proposto requer a determinação prévia do fator de ajuste da velocidade de propagação das ondas viajantes. Embora essa etapa demande uma parametrização inicial, ela é realizada apenas uma vez para cada sistema e contribui para a melhoria da precisão da localização de faltas.

Como sugestões para trabalhos futuros, as seguintes atividades podem ser desenvolvidas:

- Validação do método desenvolvido em registros obtidos em dispositivos reais de monitoramento de sistemas HVDC;
- Avaliação da aplicação do método proposto para sistemas HVDC baseados na

tecnologia VSC e com múltiplos terminais;

- Desenvolvimento de técnicas adaptativas para determinação automática dos fatores de ajuste da velocidade de propagação das ondas viajantes a partir de registros de faltas ou dados operacionais do sistema;
- Aprimoramento de técnicas de filtragem que viabilizem a correta detecção do instante de tempo de chegada da segunda frente de onda no terminal de monitoramento (t_{R2}), especialmente em situações com alto nível de ruído nos sinais monitorados;
- Modelagem do divisor resistivo de tensão, equipamento utilizado para aquisição do sinal de tensão em sistemas HVDC, para verificar sua influência na aplicação do método;
- Avaliação da influência das condições operativas do sistema HVDC, como diferentes níveis de carregamento e estratégias de controle dos conversores, no desempenho do método proposto.

REFERÊNCIAS

ANDO, M.; SCHWEITZER, E.; BAKER, R. Development and Field-Data Evaluation of Single-End Fault Locator for Two-Terminal HVDC Transmission Lines-Part 2: Algorithm and Evaluation. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, IEEE, n. 12, p. 3531–3537, 1985.

ANDRADE, L. D.; LEÃO, T. P. D. Travelling Wave Based Fault Location Analysis for Transmission Lines. In: EDP SCIENCES. **EPJ Web of Conferences**. [S.l.], 2012. v. 33, p. 04005.

ARRILLAGA, J.; LIU, Y. H.; WATSON, N. R. **Flexible Power Transmission: the HVDC Options**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2007.

BARNES, M.; DIRK, V. H.; TEEUWSEN, S. P.; MAGNUS, C. HVDC Systems in Smart Grids. **Proceedings of the IEEE**, IEEE, v. 105, n. 11, p. 2082–2098, 2017.

BUREK, A.; BALCEREK, P.; BJORKLUND, H.; REZMER, J.; SIKORSKI, T. New Single Ended Fault Locator for HVDC Lines. In: IEEE. **2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe)**. [S.l.], 2018. p. 1–6.

CHUCO, B.; WATANABE, E. A Comparative Study of Dynamic Performance of HVDC System Based on Conventional VSC and MMC-VSC. In: IEEE. **2010 IREP Symposium Bulk Power System Dynamics and Control-VIII (IREP)**. [S.l.], 2010. p. 1–6.

COSTA, F.; SOUZA, B.; BRITO, N. A Wavelet-Based Algorithm to Analyze Oscillographic Data With Single and Multiple Disturbances. In: IEEE. **2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century**. [S.l.], 2008. p. 1–8.

COSTA, F. B. Boundary Wavelet Coefficients for Real-Time Detection of Transients Induced by Faults and Power-Quality Disturbances. **IEEE Transactions on power delivery**, IEEE, v. 29, n. 6, p. 2674–2687, 2014.

COSTA, F. B.; SOBRINHO, A. H. P.; ANSALDI, M.; ALMEIDA, M. A. D. The Effects of the Mother Wavelet for Transmission Line Fault Detection and Classification. In: IEEE. **Proceedings of the 2011 3rd International Youth Conference on Energetics (IYCE)**. [S.l.], 2011. p. 1–6.

COSTA, F. B.; SOUZA, B.; BRITO, N. S. D. Real-time Detection of Fault-induced Transients in Transmission Lines. **Electronics letters**, IET, v. 46, n. 11, p. 753–755, 2010.

DATTA, B.; CHATTERJEE, S. A Literature Review on Use of Bewley's Lattice Diagram. In: IEEE. **2012 1st International Conference on Power and Energy in NERIST (ICPEN)**. [S.l.], 2012. p. 1–4.

DEWE, M.; SANKAR, S.; ARRILLAGA, J. The Application of Satellite Time References to HVDC Fault Location. **IEEE Transactions on Power Delivery**, IEEE, v. 8, n. 3, p. 1295–1302, 1993.

EPE. EPE-DEE-NT-072/2021-r0 - Expansão das Interligações Regionais - Diagnóstico Inicial. Empresa de Pesquisa Energética - EPE, 2021.

EPE. EPE-DEE-RE-018/2022-rev3 - Estudo de Expansão das Interligações Regionais - Parte II: Expansão da Capacidade de Exportação da Região Nordeste. Empresa de Pesquisa Energética - EPE, 2023.

EPE. EPE-DEE-RE-071/2025-rev0 - Estudo de Expansão das Interligações Regionais - Parte III: Expansão da Capacidade de Exportação da Região Nordeste e Importação da Região Sul. Empresa de Pesquisa Energética - EPE, 2025.

FAYAZI, M.; JOORABIAN, M.; SAFFARIAN, A.; MONADI, M. A Single-ended Traveling Wave Based Fault Location Method Using DWT in Hybrid Parallel HVAC/HVDC Overhead Transmission Lines on the Same Tower. **Electric Power Systems Research**, Elsevier, v. 220, p. 109302, 2023.

FERNANDES, P.; HONORATO, T.; LOPES, F.; SILVA, K.; GONÇALVES, H. Evaluation of Travelling Wave-Based Fault Location Methods Applied to HVDC Systems. **Electric Power Systems Research**, Elsevier, v. 189, p. 106619, 2020.

FERNANDES, P. C. **Um Novo Método de Localização de Faltas Baseado em Ondas Viajantes para Aplicações em Linhas de Transmissão de Corrente Contínua**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília, 2020.

GARVANOV, I.; DIMITROV, L.; MILOJEVIĆ, Z. Corona EHV AC Transmission Lines as Noise Source in the Environment. In: IEEE. **2014 18th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA)**. [S.l.], 2014. p. 1–4.

GILANY, M.; KHALILl, D. Traveling-Wave-Based Fault-Location Scheme for Multiend-Aged Underground Cable System. **IEEE Transactions on Power Delivery**, IEEE, v. 22, n. 1, p. 82–89, 2006.

GLOVER, J. D.; SARMA, M. S.; OVERBYE, T. **Power System Analysis & Design, SI Version**. [S.l.]: Cengage Learning, 2017.

HE, Z.; LIAO, K.; LI, X. P.; LIN, S.; YANG, J.; MAI, R. Natural Frequency-Based Line Fault Location in HVDC Lines. **IEEE Transactions on Power Delivery**, IEEE, v. 29, n. 2, p. 851–859, 2013.

HONG, H.; CHENG, Z.; YANG, H.; ZHANG K. SHI, S.; ZHANG, W.; ZHUO, Z.; DONG, W. Wave-Speed-Independent Traveling Wave Fault Location Method for Flexible DC Transmission Lines. **Energies**, MDPI, v. 18, n. 22, p. 5924, 2025.

HOSSAM-ELDIN, A.; LOTFLY, A.; ELGAMAL, M.; EBEED, M. Combined Traveling Wave and Fuzzy Logic Based Fault Location in Multi-Terminal HVDC Systems. In: IEEE. **2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)**. [S.l.], 2016. p. 1–6.

JOVCIC, D. **High Voltage Direct Current Transmission: Converters, Systems and DC Grids**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2019.

KASZTENNY, B.; GUZMÁN, A.; FISCHER, N.; MYNAM, M.; TAYLOR, D. Practical Setting Considerations for Protective Relays that Use Incremental Quantities and Traveling Waves. In: **proceedings of the 43rd Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA**. [S.l.: s.n.], 2016.

KRZYSZTOF, G.; KOWALIK, R.; RASOLOMAMPIONONA, D. Regular Paper Traveling Wave Fault Location in Power Transmission Systems: an Overview. **J. Electrical Systems**, v. 7, n. 3, p. 287–296, 2011.

LIMA, H. B. **Uma Nova Metodologia Baseada na Teoria de Ondas Viajantes para Detecção Ótima de Frentes de Onda em Sistemas HVDC**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Campina Grande, 2024.

LIU, L.; XIE, F.; KANG, X.; HAO, Z.; LEKIC, A.; POPOV, M. Parameter Fitting-Based Traveling Wave Fault Location Method for Multi-Terminal DC grids. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, Elsevier, v. 164, p. 110412, 2025.

LIU, X.; OSMAN, A.; MALIK, O. Hybrid Traveling Wave/Boundary Protection for Monopolar HVDC Line. **IEEE Transactions on Power Delivery**, IEEE, v. 24, n. 2, p. 569–578, 2009.

LIU, Y.; SHENG, G.; HE, Z.; JIANG, X. A Traveling Wave Fault Location Method for Earth Faults Based on Bode Propagation Time Delays of Multi-Measuring Points. **Przeglad Elektrotechniczny**, v. 2012, n. 03a, p. 254–258, 2012.

LOPES, F.; RIBEIRO, N.; CUNHA, G.; HONORATO, T.; SILVA, K. Electrical Noise Simulation: a Practical Approach for ATP/ATPDRAW Studies. In: IEEE. **2020 Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS)**. [S.l.], 2020. p. 1–6.

LOPES, F. V. Settings-Free Traveling-Wave-Based Earth Fault Location Using Unsynchronized Two-Terminal Data. **IEEE Transactions on Power Delivery**, IEEE, v. 31, n. 5, p. 2296–2298, 2016.

LOPES, F. V.; DANTAS, K. M.; SILVA, K. M.; COSTA, F. B. Accurate Two-Terminal Transmission Line Fault Location Using Traveling Waves. **IEEE Transactions on Power Delivery**, IEEE, v. 33, n. 2, p. 873–880, 2017.

LOPES, F. V.; KÜSEL, B.; SILVA, K. M. Traveling Wave-Based Fault Location on Half-Wavelength Transmission Lines. **IEEE Latin America Transactions**, IEEE, v. 14, n. 1, p. 248–253, 2016.

LOPES, F. V.; LEITE, E.; RIBEIRO, J. P.; LOPES, L.; PIARDI, A. Using the Differentiator-Smoother Filter to Analyze Traveling Waves on Transmission Lines: Fundamentals Settings and Implementation. In: **Intern. Conf. on Power Systems Transientes**. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–6.

LOPES, F. V.; NEVES, W. L. A.; JR., E. J. S. L.; RIBEIRO, J. P. G. Aplicação do Filtro Differentiator-Smoother Durante a Análise de Ondas Viajantes em Linhas de Transmissão. **Anais da Sociedade Brasileira de Automática**, v. 1, n. 1, 2019.

LUZ, G.; CARVALHO JR., D.; GOMES JR., S. HVDC Transmission Line Modeling Analysis in PSCAD and ATP Programs. In: **XIII Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning**. [S.l.: s.n.], 2014.

MAGALHÃES, F. M.; LOPES, F. V. Mathematical Study on Traveling Waves Phenomena on Three Phase Transmission Lines–Part II: Reflection and Refraction Matrices. **IEEE Transactions on Power Delivery**, IEEE, v. 37, n. 2, p. 1161–1170, 2021.

MARTI, J. R. Accurate Modelling of Frequency-Dependent Transmission Lines in Electromagnetic Transient Simulations. **IEEE Transactions on power apparatus and systems**, IEEE, n. 1, p. 147–157, 1982.

MEAH, K.; ULA, S. Comparative Evaluation of HVDC and HVAC Transmission Systems. In: IEEE. **2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting**. [S.l.], 2007. p. 1–5.

MELO, Y.; NEVES, W.; FERNANDES JR, D. Fault Detection and Localization for HVDC Transmission Lines. In: IEEE. **2018 Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)**. [S.l.], 2018. p. 1–5.

MELO, Y. M. P. **Uma Técnica para Detecção de Faltas em Linhas de Transmissão de Corrente Contínua por Meio da Energia Derivada de Sinais.** Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Campina Grande, 2018.

MIRZAEI, M.; KADIR, M. Z. A.; MOAZAMI, E.; HIZAM, H. Review of Fault Location Methods for Distribution Power System. **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, v. 3, n. 3, p. 2670–2676, 2009.

MURTHY, P. K.; AMARNATH, J.; KAMAKSHIAH, S.; SINGH, B. Wavelet Transform Approach for Detection and Location of Faults in HVDC System. In: IEEE. **2008 IEEE Region 10 and the Third International Conference on Industrial and Information Systems**. [S.l.], 2008. p. 1–6.

NANAYAKKARA, O. K.; RAJAPAKSE, A. D.; WACHAL, R. Location of DC Line Faults in Conventional HVDC Systems With Segments of Cables and Overhead Lines Using Terminal Measurements. **IEEE Transactions on Power Delivery**, IEEE, v. 27, n. 1, p. 279–288, 2012.

NANAYAKKARA, O. K.; RAJAPAKSE, A. D.; WACHAL, R. Traveling-Wave-Based Line Fault Location in Star-Connected Multiterminal HVDC Systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, IEEE, v. 27, n. 4, p. 2286–2294, 2012.

NEVES, A. B. F.; KUSEL, B. F.; ZARONI, D. M.; PADOVANI, E.; AMBONI, G. P. M.; SILVA, K. M.; BERNARDO, R. L. Desafios na Operação dos Bipolos 800 kV Xingu/Estreito e Xingu/Terminal Rio. **XXV SNPTEE Seminário Nacional de Producao e Transmissao de Energia Eléctrica, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2019**, SNPTEE, 2019.

ONS. RT-ONS DPL 0137/2026 - Relatório de Análise Estatística de Desligamentos Forçados de Linhas de Transmissão Referente ao Ano de 2025. **Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS**, 2026.

PERCIVAL, D. B.; WALDEN, A. T. **Wavelet methods for time series analysis**. [S.l.]: Cambridge university press, 2000. v. 4.

PIERRI, E.; BINDER, O.; HEMDAN, N. G. A.; KURRAT, M. Challenges and Opportunities for a European HVDC Grid. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 70, p. 427–456, 2017.

PILLAY, C. J.; KABEYA, M.; DAVIDSON, I. E. Transmission Systems: HVAC vs HVDC. In: **5th NA International Conference on Industrial Engineering and Operations Management**. [S.l.: s.n.], 2020. v. 10.

PRACA, A.; ARAKAKI, H.; ALVES, S. R.; ERIKSSON, K.; GRAHAM, J.; BILEDT, G. Itaipu HVDC Transmission System 10 Years Operational Experience. In: **CIGRÉ Regional Meeting, V SEPOPE, Recife, Brasil**. [S.l.: s.n.], 1996. v. 19.

RASHID, M. H. **Power Electronics Handbook: Devices, Circuits and Applications**. [S.l.]: Elsevier, 2010.

REIS, R. L. A. **Aprimoramento de Soluções de Localização de Curto-Circuitos em Linhas de Transmissão.** Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Campina Grande, 2019.

REIS, R. L. A.; LOPES, F. V.; NEVES, W. L. A.; JR., D. F.; RIBEIRO, C. M. S.; CUNHA, G. A. An Improved Single-Ended Correlation-Based Fault Location Technique Using Traveling Waves. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, Elsevier, v. 132, p. 107167, 2021.

RIBEIRO, C. M. S. **Double-ended Traveling Wave-Based Method for Pole-to-Ground Fault Location on HVDC Transmission Lines**. Tese (Doutorado) — Universidade de Brasília, 2024.

RIBEIRO, L. M. A.; CUNHA, G. A.; A., R. E. P.; BRITTO A. G. M., L. F. V. Analysis of Traveling Waves Propagation Characteristics Considering Different Transmission Line EMTP Models. In: IEEE. **2020 Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS)**. [S.l.], 2020. p. 1–6.

RIBERIO, L. M. A.; CUNHA, G. A.; BRITO, A. G. M.; RIBEIRO, E. P. A.; LOPES, F. Impact of Transmission Line Modeling Aspects on TW-based Fault Location Studies. **Electric Power Systems Research**, Elsevier, v. 196, p. 107204, 2021.

ROBERT, R. Efeito Pelicular. **Revista Brasileira de Física**, Departamento de Física - Universidade Federal do Paraná, 2000.

SAHA, M. M.; IZYKOWSKI, J. J.; ROSOLOWSKI, E. **Fault Location on Power Networks**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2009.

SCHWEITZER, E. O.; GUZMÁN, A.; MYNAM, M.; ZKENDZIC, V.; KASZTENNY, B.; GALLACHER, C.; MARX, S. Accurate Single-End Fault Location and Line-Length Estimation Using Traveling Waves. In: **13th International Conference on Developments in Power System Protection**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–6.

SCHWEITZER, E. O.; GUZMÁN, A.; MYNAM, M. V.; SKENDZIC, V.; KASZTENNY, B.; MARX, S. Locating Faults by the Traveling Waves they Launch. In: IEEE. **2014 67th Annual Conference for Protective Relay Engineers**. [S.l.], 2014. p. 95–110.

SEL. SEL-T400L Data Sheet: Time-Domain Line Protection. Schweitzer Engineering Laboratories - SEL, 2021. Disponível em: <https://selinc.com/api/download/116461/>.

SETREUS, J.; BERTLING, L. Introduction to HVDC Technology for Reliable Electrical Power Systems. In: IEEE. **Proceedings of the 10th International Conference on Probablistic Methods Applied to Power Systems**. [S.l.], 2008. p. 1–8.

SHARMA, S. Comparison Between LCC and VSC. **International Journal of Scientific Research Engineering & Technology (IJSRET)**, v. 2, n. 7, p. 445–449, 2013.

SILVA, A. S.; SANTOS, R. C.; TORRES, J. A.; COURY, D. V. An Accurate Method for Fault Location in HVDC Systems Based on Pattern Recognition of DC Voltage Signals. **Electric Power Systems Research**, Elsevier, v. 170, p. 64–71, 2019.

SILVA, D. M. d. **Wavelet-Based Analysis and Detection of Fault-Induced Transients in HVDC Systems**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2018.

SILVA JR., F. C. **Proteção de Linhas de Transmissão Aéreas de Sistemas LCC-HVDC Monopolares Baseada em Ondas Viajantes Utilizando um Terminal**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2018.

SOARES, E. P. P. R.; ASSIS, L. O.; MENA, R.; FERNANDEZ, L. M. R. Current Status and Future Trends of Offshore Wind Power in Europe. **Energy**, Elsevier, v. 202, p. 117787, 2020.

SONGLI, F.; RENFENG, Y.; QIAN, A. European Supergrid Project and Its Enlightenment to China's Power Grid. **Automation of Electric Power Systems**, v. 39, n. 10, p. 6–15, 2015.

SUONAN, J.; GAO, S.; SONG, G.; JIAO, Z.; KANG, X. A Novel Fault-Location Method for HVDC Transmission Lines. **IEEE Transactions on Power Delivery**, IEEE, v. 25, n. 2, p. 1203–1209, 2009.

VASANTH, S.; YEAP, Y. M.; UKIL, A. Fault Location Estimation for VSC-HVDC System Using Artificial Neural Network. In: IEEE. **2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON)**. [S.l.], 2016. p. 501–504.

VIANNA, E. A. d. L.; MONTEIRO, F. E.; SILVA, E. P. A Primeira Manutenção Preventiva de 72 Meses no back-to-back da Subestação Coletora de Porto Velho/RO. **XXV SNPTEE Seminário Nacional de Producao e Transmissao de Energia Eléctrica, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2019**, SNPTEE, 2019.

VIEIRA, J. C. C. **Diagnóstico de Faltas em um Sistema HVDC Bipolar Baseado na Teoria de Ondas Viajantes Utilizando Dados de Um Terminal**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Campina Grande, 2021.

VIEIRA, J. C. C.; FERNANDES JR., D.; NEVES, W. L. A.; LOPES, F. V. Challenges in Application of the Traveling Wave-Based Fault Location Methods Applied to HVDC Systems: Evaluation of Classical One-and Two-Terminal Methods. In: IEEE. **2022 20th International Conference on Harmonics & Quality of Power (ICHQP)**. [S.l.], 2022. p. 1–6.

VIEIRA, J. C. C.; FERNANDES JR., D.; NEVES, W. L. A.; LOPES, F. V. Fault Diagnosis in Bipolar HVDC Systems Based on Traveling Wave Theory by Monitoring Data From One Terminal. **Electric Power Systems Research**, Elsevier, v. 223, p. 109594, 2023.

WU, J.; LI, H.; WANG, G.; LIANG, Y. An Improved Traveling-Wave Protection Scheme for LCC-HVDC Transmission Lines. **IEEE Transactions on Power Delivery**, IEEE, v. 32, n. 1, p. 106–116, 2016.

XIA, Y.; LI, Z.; XI, Y.; WU, G.; PENG W.; MU, L. Accurate Fault Location Method for Multiple Faults in Transmission Networks Using Travelling Waves. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, IEEE, 2024.

YUANSHENG, L.; GANG, W.; HAIFENG, L. Time-Domain Fault-Location Method on HVDC Transmission Lines Under Unsynchronized Two-End Measurement and Uncertain Line Parameters. **IEEE Transactions on Power Delivery**, IEEE, v. 30, n. 3, p. 1031–1038, 2015.

YUE, L. Research on HVDC Single-Ended Fault Traveling Wave Location Method Based on Fastica. In: IEEE. **2016 International Conference on Audio, Language and Image Processing (ICALIP)**. [S.l.], 2016. p. 509–514.

ZANETTA JR., L. C. **Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência Vol. 52**. [S.l.]: EdUSP, 2003.

ZIMATH, S.; RAMOS, M. Comparison of Impedance and Travelling Wave Fault Location Using Real Faults. In: IEEE. **IEEE PES T&D 2010**. [S.l.], 2010. p. 1–5.