

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Dissertação de Mestrado

Aprimoramento de um método híbrido de localização de faltas em linhas
de transmissão com dados de um terminal

Mirella Ilka Pereira da Silveira

Campina Grande - Paraíba - Brasil

Agosto, 2022

Mirella Ilka Pereira da Silveira

Aprimoramento de um método híbrido de localização de faltas em linhas
de transmissão com dados de um terminal

**Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Uni-
versidade Federal de Campina Grande como parte
dos requisitos necessários para obtenção do grau
de Mestre em Engenharia Elétrica.**

Área de concentração: Processamento da energia

Orientadores:

Washington Luiz Araújo Neves, Ph.D.

Raphael Leite de Andrade Reis, D.Sc.

Campina Grande - Paraíba - Brasil

Agosto, 2022

S587a Silveira, Mirella Ilka Pereira da.
Aprimoramento de um método híbrido de localização de faltas em linhas de transmissão com dados de um terminal / Mirella Ilka Pereira da Silveira. - Campina Grande, 2022.
113 f. il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2022.
"Orientação: Prof. Dr. Washington Luiz Araújo Neves, Prof. Dr. Raphael Leite de Andrade Reis."
Referências.

1. Ondas Viajantes. 2. Linhas de Transmissão. 3. Componentes Fundamentais. 4. Localização de Faltas- Localização de Faltas. I. Neves, Washington Luiz Araújo. II. Reis, Raphael Leite de Andrade. III. Título.

CDU 621.37(043)

Aprimoramento de um método híbrido de localização de faltas em linhas de transmissão com dados de um terminal

MIRELLA ILKA PEREIRA DA SILVEIRA

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 11/08/2022

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

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

FLAVIO BEZERRA COSTA, D.Sc., Michigan Technological University
Examinador(a)

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

CAMPINA GRANDE - PB



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 DA APRESENTAÇÃO DA DISSERTAÇÃO, REALIZADA EM 11 DE AGOSTO DE 2022 (Nº745)

CANDIDATA: **MIRELLA ILKA PEREIRA DA SILVEIRA**. COMISSÃO EXAMINADORA: DAMÁSIO FERNANDES JÚNIOR D. Sc., UFCG, Presidente da Comissão, WASHINGTON LUIZ ARAÚJO NEVES, Ph.D., UFCG, RAPHAEL LEITE DE ANDRADE REIS, D.Sc., UFPB, Orientadores, FLAVIO BEZERRA COSTA, D.Sc., Michigan Technological University, examinador externo. TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Aprimoramento de um método híbrido de localização de faltas em linhas de transmissão com dados de um terminal. HORA DE INÍCIO: **15h00** – LOCAL: **Sala Virtual**. Dando início aos trabalhos, o presidente, após declarar o objetivo principal da reunião, apresenta ao público, a Comissão e o aluno, a quem concede a palavra para dissertar oral e sucintamente, sobre o tema de sua defesa de Dissertação. Passando então a discorrer dentro do prazo estabelecido, sobre o tema aludido, a candidata é a seguir, arguida pelos examinadores, dentro das normas estabelecidas. Terminada a arguição, passa a Comissão em caráter secreto, a proceder à avaliação e julgamento da dissertação, concluindo por atribuir-lhe o conceito APROVADO e aceitando sua defesa de dissertação com vistas à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica e por aprovar o seu conhecimento técnico-científico, como adequados ao cumprimento do programa de Mestrado. Declara então o presidente, que a candidata está apta a matricular-se em sua tese de doutorado, de acordo com as instruções normativas do CFE. Fica o(a) candidato(a) obrigado(a) a submeter a dissertação de seu trabalho final, dentro do prazo estipulado na Resolução 002/96-CPgEE. Nada mais havendo a declarar, eu, Leandro Ferreira de Lima, lavro a presente ata, que é assinada eletronicamente por mim, e pelos membros da Comissão Julgadora. Campina Grande, 11 de Agosto de 2022.

LEANDRO FERREIRA DE LIMA
Secretário

DAMÁSIO FERNANDES JÚNIOR D. Sc., UFCG
Presidente da Comissão e Examinador Interno

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

RAPHAEL LEITE DE ANDRADE REIS, D.Sc., UFPB
Orientador

FLAVIO BEZERRA COSTA, D.Sc., Michigan Technological University
Examinador Externo

MIRELLA ILKA PEREIRA DA SILVEIRA
Candidata

2 - APROVAÇÃO

2.1. Segue a presente Ata de Defesa da Proposta de Tese (Exame de Qualificação) do candidato **MIRELLA ILKA PEREIRA DA SILVEIRA**, assinada eletronicamente pela Comissão Examinadora acima identificada.

2.2. No caso de examinadores externos que não possuam credenciamento de usuário externo ativo no SEI, para igual assinatura eletrônica, os examinadores internos signatários **certificam** que os examinadores externos acima identificados participaram da defesa da tese e tomaram conhecimento do teor deste documento.



Documento assinado eletronicamente por **LEANDRO FERREIRA DE LIMA, SECRETÁRIO (A)**, em 15/08/2022, às 08:13, 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 DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 15/08/2022, às 09:52, 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 DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 15/08/2022, às 10:08, 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 15/08/2022, às 13:43, 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 **MIRELLA ILKA PEREIRA DA SILVEIRA ALBUQUERQUE, Usuário Externo**, em 15/08/2022, às 20:03, 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 **2624482** e o código CRC **BA288A15**.

Resumo

Métodos híbridos de localização de faltas de um terminal normalmente utilizam funções baseadas em componentes fundamentais para criar uma janela de busca que contém o ponto de defeito, e funções baseadas na teoria de ondas viajantes para detectar a onda refletida à partir do curto-circuito. Um dos desafios que envolvem essas técnicas está no modo em que a janela de busca é definida, uma vez que em sua maioria é determinada empiricamente e a onda refletida do ponto de falta pode se encontrar além dos limites da janela, proporcionando erros de estimação. Dessa forma, propõe-se neste trabalho o aprimoramento de um método híbrido clássico reportado na literatura, em que uma nova formulação para calcular a janela de busca é apresentada. A janela de busca proposta é baseada no erro combinado da resistência de falta e da corrente de carga. Para tanto, avaliações do método proposto e do método clássico foram realizadas por meio de simulações de curtos-circuitos no *Alternative Transients Program* (ATP). O método proposto apresentou um melhor desempenho para os cenários avaliados. Além disso, uma avaliação do impacto dos modelos de Bergeron e JMarti em técnicas de localização de faltas foi realizada. Para tanto, vários algoritmos de localização de faltas de um e dois terminais, baseados em componentes fundamentais e na teoria de ondas viajantes, foram considerados.

Palavras-chave: Componentes Fundamentais, Linhas de transmissão, Localização de faltas, Ondas viajantes.

Abstract

Hybrid terminal fault location methods typically use functions based on fundamental components to create a search window that contains the fault point, and functions based on traveling wave theory to detect the reflected wave from the short circuit. One of the challenges involving these techniques is the way in which the search window is defined, since most of it is empirically determined and the wave reflected from the fault point can be found beyond the limits of the window, causing estimation errors. Thus, this work proposes the improvement of a classic hybrid method reported in the literature, in which a new formulation to calculate the search window is presented. The proposed search window is based on the combined error of fault resistance and load current. Therefore, evaluations of the proposed method and the classical method were carried out through short-circuit simulations in the *Alternative Transients Program* (ATP). The proposed method presented a better performance for the evaluated scenarios. In addition, an evaluation of the impact of the Bergeron and JMarti models on fault location techniques was carried out. For that, several one- and two-terminal fault location algorithms, based on fundamental components and traveling wave theory, were considered.

Keywords: Impedance method. Fault location. Transmission lines. Traveling waves.

Agradecimentos

Agradeço a Deus por ser meu guia, meu ajudador. Por me permitir chegar até aqui. Pelas portas abertas, pelo seu amor. Sem Ele nada seria possível. Meu melhor amigo.

Agradeço aos meus pais pela educação que me deram, por me ensinar a lutar pelos meus sonhos, pelo amor que sempre me deram e por sempre acreditar que tudo é possível.

Agradeço ao meu esposo pelo companheirismo, motivação e por sempre segurar a minha mão. Por me acompanhar em toda a minha trajetória, por se fazer presente em cada momento, por comprar os meus sonhos e me ajudar a fazê-los acontecer. Te amo meu amor.

À toda a minha família. Em especial a minha avó Inalva, pelas palavras de ânimo, de motivação. Aos meus sogros pelas orações, pelo carinho e conselhos. À minha mãe postiça, dona Juci, que nunca mediu esforços para me ajudar.

Aos meus professores orientadores, professor Washington Neves e Raphael Leite, pela confiança em mim depositada, pelos ensinamentos, pela amizade, compreensão e orientação. Sou muito grata.

À todos os meus amigos. Aos meus amigos da UFCG, Fábio e Darlanny. Aos meus amigos da UACSA, Edivaldo e Gabriel, que desde a graduação se fazem presentes em minha vida. As minhas amigas Julyane, Nathália, Edjane, por acompanharem minha trajetória, por compreenderem minha ausência, por toda torcida e amizade.

Agradeço a todos que de maneira direta ou indireta contribuíram para a realização desse sonho... Sem vocês nada seria possível.

GRATIDÃO!!!

Lista de abreviaturas e siglas

ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
AT	Curto-circuito envolvendo a fase A e terra
BT	Curto-circuito envolvendo a fase B e terra
CT	Curto-circuito envolvendo a fase C e terra
AB	Curto-circuito envolvendo as fases A e B
BC	Curto-circuito envolvendo as fases B e C
CA	Curto-circuito envolvendo as fases C e A
ABT	Curto-circuito envolvendo as fases A, B e terra
BCT	Curto-circuito envolvendo as fases B, C e terra
CAT	Curto-circuito envolvendo as fases C, A e terra
ABC	Curto-circuito envolvendo as fases A, B e C
B	Susceptância em derivação da LT
C	Capacitância por unidade de comprimento
G	Condutância <i>shunt</i> da LT
\hat{I}_L	Corrente medida na barra L
\hat{I}_A	Fasor de corrente de falta da fase A
\hat{I}_B	Fasor de corrente de falta da fase B
\hat{I}_C	Fasor de corrente de falta da fase C
\hat{I}_{Apre}	Fasor de corrente de pré-falta da fase A
\hat{I}_{Bpre}	Fasor de corrente de pré-falta da fase B

\hat{I}_{Cpre}	Fasor de corrente de pré-falta da fase C
\hat{I}_F	Corrente de falta que passa pela resistência de falta
\hat{I}_{pre}	Corrente pré-falta ou corrente de carga
I_R	Corrente no terminal receptor
I_S	Corrente no terminal emissor
L	Indutância por unidade de comprimento
LT	Linha de Transmissão
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
R_L	Resistência série por unidade de comprimento
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SIN	Sistema Interligado Nacional
SIR	<i>Source Impedance Ratio</i>
T	Período do sinal
TC	Transformador de Corrente
TI	Transformadores para Instrumento
TPC	Transformador de Potencial Capacitivo
\hat{V}_L	Tensão medida na barra L
V_R	Tensão no terminal receptor
V_S	Tensão no terminal emissor
X_L	Reatância por unidade de comprimento
Y	Matriz Admitância
Y_c	Admitância característica

Z_{app}	Impedância aparente
Z_c	Impedância de surto
Z_L	Impedância série da LT
Z_{l0}	Impedância de sequência zero
Z_{l1}	Impedância de sequência positiva
Z_m	Impedância mútua da LT
Z_p	Impedância própria da LT
$\Delta \hat{I}_L$	Corrente incremental ou corrente pura de falta

Lista de símbolos

ℓ	Comprimento da LT
k	Fator de distribuição de corrente
k_0	Fator de compensação de sequência zero
ϕ	Ângulo do fator de distribuição de corrente
Γ	Coefficiente de reflexão
T	Coefficiente de refração
v	Velocidade de propagação de ondas viajantes

Lista de ilustrações

Figura 2.1 – Fluxograma da classificação dos principais modelos de LT.	9
Figura 2.2 – Circuito para modelo de linhas a parâmetros distribuídos.	10
Figura 2.3 – Ondas viajantes progressivas e regressivas.	12
Figura 2.4 – Circuito equivalente ao modelo de <i>Bergeron</i> para uma LT sem perdas. . .	13
Figura 2.5 – Circuito para modelo de linhas a parâmetros distribuídos dependentes da frequência.	17
Figura 3.1 – Fluxo dos dados de corrente e tensão até chegarem as funções de proteção e localização de faltas.	21
Figura 3.2 – Esquema de janelamento aplicado a um sinal de corrente.	22
Figura 3.3 – Equivalente monofásico de um SEP trifásico submetido a uma condição de falta.	25
Figura 3.4 – Princípio da superposição aplicado a uma LT genérica. (a)Rede de pré- falta. (b)Rede pura de falta (c)Rede de pós-falta.	27
Figura 3.5 – Diagrama de <i>Bewley</i>	30
Figura 3.6 – Ondas Viajantes incidente, transmitida e refletida.	30
Figura 3.7 – Sinal de tensão senoidal mais ruído.	35
Figura 3.8 – Coeficientes <i>wavelet</i> TWDR.	35
Figura 3.9 – Sinal de tensão proveniente da simulação de um curto-circuito monofá- sico no ATP (a) sinal de tensão da fase A (b) coeficientes <i>wavelet</i> da fase A.	36
Figura 3.10–Exemplo explicativo da técnica reportada em Xinzhou <i>et al.</i> (2002). . . .	39
Figura 5.1 – Representação do sistema elétrico analisado.	53
Figura 5.2 – Parâmetros utilizados para modelar a LT a partir do modelo JMarti. . . .	53
Figura 5.3 – Parâmetros geométricos da torre de transmissão.	54
Figura 5.4 – Influência do ponto de aplicação do curto-circuito.	61
Figura 5.5 – Erro da corrente de carga ao longo da LT.	62
Figura 5.6 – Influência da resistência de falta para as técnicas avaliadas.	63
Figura 5.7 – Influência do ângulo de incidência de falta.	64

Figura 5.8 – Estimação fasorial da tensão da fase A para curtos-circuitos com $R_F = 1\Omega$ e diferentes ângulos de incidência de falta.	65
Figura 5.9 – Influência de faltas monofásicas para os algoritmos avaliados.	66
Figura 5.10–Influência de faltas monofásicas com $R_F = 100\Omega$	67
Figura 5.11–Influência do tipo de falta	69
Figura 6.1 – Parâmetros utilizados para modelar a LT utilizando Bergeron.	73
Figura 6.2 – Resultados obtidos para os métodos de localização fasoriais quando a LT é modelada por Bergeron e JMarti.	76
Figura 6.3 – Fator de tensão da Fase A para LT modelada por Bergeron e JMarti quando um curto-circuito é aplicado a 10km do terminal de medição com $R_F = 1\Omega$ e $\Theta = 30^\circ$	77
Figura 6.4 – Resultados obtidos para os métodos GA e XI para LT modeladas por Bergeron e JMarti.	78
Figura 6.5 – Comparação dos coeficientes wavelet dos modelos de JMarti e Bergeron.	78
Figura 6.6 – Resultados obtidos para as técnicas fasoriais quando submetidos a dados de LT transposta e não transposta modelada por JMarti.	80
Figura 6.7 – Resultados obtidos para as técnicas fasoriais quando submetidos a dados de LT transposta e não transposta modelada por Bergeron.	81
Figura 6.8 – Influência da transposição da LT para os métodos de Gale <i>et al.</i> (1993) e Xinzhou <i>et al.</i> (2002).	82
Figura 6.9 – Resultados obtidos para o método reportado em Gale <i>et al.</i> (1993) para simulações com LT modelada por Bergeron.	83
Figura 6.10–Resultados obtidos para o método reportado em Xinzhou <i>et al.</i> (2002) para simulações com LT modelada por Bergeron.	84
Figura 6.11–Resultados obtidos para o método reportado em Gale <i>et al.</i> (1993) para simulações com LT modelada por JMarti.	85
Figura 6.12–Resultados obtidos para o método reportado em Xinzhou <i>et al.</i> (2002) para simulações com LT modelada por JMarti.	85
Figura 7.1 – SEP de 230 kV com LT adjacente ao terminal de medição.	88
Figura 7.2 – Fluxograma do método proposto.	91
Figura 8.1 – Influência da distância de falta para os casos simulados.	94

Figura 8.2 – Coeficientes wavelet da corrente para falta aplicada a 80 km	95
Figura 8.3 – Influência da resistência de falta para os casos simulados.	96
Figura 8.4 – Influência da resistência de falta para a técnica tradicional e a proposta. .	98
Figura 8.5 – Influência do ângulo de incidência de falta para os algoritmos proposto e tradicional.	99
Figura 8.6 – Influência de faltas AT para XI e AP.	100
Figura 8.7 – Influência de faltas BC, BCT e ABC para XI e AP	101

Lista de tabelas

Tabela 1.1 – Extensão da rede básica de corrente alternada do SIN em 2021.	2
Tabela 3.1 – Fasores de entrada para algoritmos de localização de faltas de um terminal.	23
Tabela 4.1 – Resumo da revisão bibliográfica	51
Tabela 5.1 – Dados das fontes.	54
Tabela 5.2 – Cenários Avaliados.	56
Tabela 5.3 – Cenários avaliados para faltas monofásicas.	66
Tabela 5.4 – Cenários avaliados para faltas monofásicas com $R_F = 100 \Omega$	67
Tabela 5.5 – Casos considerados para avaliar a influência do tipo de falta	68
Tabela 6.1 – Parâmetros avaliados.	75
Tabela 8.1 – Casos Avaliados.	96
Tabela 8.2 – Casos avaliados.	100

Sumário

Lista de ilustrações	vii
Lista de tabelas	x
Sumário	xi
1 Introdução	1
1.1 Motivação	4
1.2 Objetivos	5
1.3 Contribuições da dissertação	6
1.3.1 Trabalhos publicados	6
1.4 Organização do texto	6
2 Modelos de linhas de transmissão	8
2.1 Modelos a parâmetros distribuídos	9
2.1.1 Modelo de Bergeron	12
2.2 Modelos a parâmetros distribuídos dependentes na frequência	14
2.2.1 Modelo reportado em Marti (1982)	18
2.3 Síntese do capítulo	18
3 Localização de faltas em linhas de transmissão	20
3.1 Dados de entrada de algoritmos de localização de faltas	20
3.2 Localização de faltas baseadas em componentes fundamentais	21
3.2.1 Estimação Fasorial	22
3.2.1.1 Algoritmo de Fourier de Ciclo Completo	23
3.2.2 Princípio da Superposição	25
3.2.2.1 Fator de carga e fator de distribuição de corrente	27
3.3 Localização de faltas baseadas no domínio do tempo	29
3.3.1 Detecção de ondas viajantes	32
3.4 Métodos híbridos de localização de faltas	37
3.4.1 Técnica reportada em Xinzhou <i>et al.</i> (2002)	38
3.5 Síntese do capítulo	40
4 Revisão Bibliográfica	41

4.1	Técnicas baseadas em componentes fundamentais	41
4.2	Técnicas baseadas no domínio do tempo	44
4.3	Funções de dois terminais	44
4.3.1	Funções de um terminal	45
4.3.1.1	Métodos Híbridos	48
4.4	Síntese do capítulo	49
5	Análise comparativa de métodos de localização de faltas baseados em fasores	52
5.1	Metodologia de análise	52
5.1.1	Notação adotada	54
5.2	Apresentação dos métodos avaliados	56
5.2.1	Método de Takagi (TK)	56
5.2.2	Método de Takagi Modificado (TKM)	57
5.2.3	Método Wiszniewski (WZ)	57
5.2.4	Método de Eriksson (ER)	58
5.2.5	Método de Novosel (NV)	59
5.3	Avaliação de desempenho das técnicas baseadas em componentes fundamentais	60
5.3.1	Análise do Ponto de Aplicação do Curto-Circuito	60
5.3.2	Influência da Resistência de Falta	62
5.3.3	Influência do Ângulo de Incidência de Falta	64
5.3.4	Influência do Tipo de Falta	65
5.4	Síntese do Capítulo	70
6	Impacto de modelos de LT em técnicas de localização de faltas	71
6.1	Metodologia das avaliações	72
6.2	Apresentação dos métodos avaliados	74
6.2.1	Método de Gale <i>et al.</i> (1993) (GA)	74
6.2.2	Método de Xinzhou <i>et al.</i> (2002) (XI)	74
6.3	Avaliação do desempenho das técnicas para os modelos de Bergeron e J. Martí	75
6.4	Impacto da transposição de LT sob métodos de localização de faltas	79
6.5	Influência da velocidade de propagação de ondas viajantes	82
6.6	Resumo do capítulo	86

7 Método proposto	87
7.1 Síntese do capítulo	91
8 Avaliação do método proposto	93
8.1 Análises comparativas entre os métodos avaliados	93
8.1.1 Influência da Distância de Falta	94
8.1.2 Influência da Resistência de Falta	96
8.1.3 Influência do Ângulo de Incidência de Falta	99
8.1.4 Influência do Tipo de Falta	100
9 Conclusões	103
Referências	107

Capítulo 1

Introdução

A responsabilidade de coordenar e controlar as ações referentes à operação dos sistemas de geração e transmissão de energia elétrica do Sistema Interligado Nacional (SIN) é do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), órgão este que também atua na ampliação da rede de transmissão de energia de instalações com tensões nominais iguais ou superiores a 230 kV, que compõem a rede básica de transmissão. Segundo o sumário executivo do Plano da Operação Elétrica de Médio Prazo do SIN (PAR/PEL), estima-se que no ano de 2026 o SIN seja formado por 201.942 km de extensão de linhas de transmissão, mais de 50.000 km a mais do que já se tinha no ano de 2021 (ONS, 2022a).

Neste cenário, as linhas de transmissão (LT) são responsáveis por transportar energia elétrica desde a geração até os centros consumidores. No Brasil, grande parte do sistema de transmissão da energia elétrica é composto por LT de corrente alternada, uma vez que facilitam a elevação e a redução da tensão por meio das subestações transformadoras. Todavia, a transmissão em corrente contínua pode ser vantajosa para transmissões a longas distâncias, pois proporciona a redução de perdas e custos, além de serem amplamente utilizadas para conectar sistemas elétricos que possuem frequências diferentes (SILVEIRA; OLIVEIRA, 2013). A primeira conexão em corrente contínua foi implantada em 1986, com nível de tensão de 600 kV que interliga a usina de Itaipu e o sudeste brasileiro. Atualmente, o SIN conta com mais de dez mil quilômetros de LT em corrente contínua, sendo a tensão de 800 kV a mais elevada em termos da operação do sistema de transmissão, que escoar energia da usina de Belo

Monte (ITAIPU, 2022).

Nesta conjuntura, por estarem mais expostas e devido as suas grandes extensões, as LT estão mais suscetíveis à ocorrência de distúrbios. Assim, para reduzir os danos causados por tais perturbações, o emprego de algoritmos de localização de faltas que indiquem de maneira confiável, rápida e precisa o local do curto-circuito é fundamental para que as equipes de manutenção atuem de maneira mais rápida, garantindo a estabilidade e minimizando os impactos na continuidade do fornecimento de energia elétrica. Desse modo, o aumento da demanda energética e das interligações dos Sistemas Elétricos de Potência (SEP) existentes tem motivado a melhoria dos equipamentos de controle, proteção e localização de faltas. O aprimoramento desses equipamentos visa reduzir os períodos de instabilidade, possibilitando uma maior confiabilidade, qualidade e economia dos SEP (SAHA *et al.*, 2010). Na Tabela 1.1, a extensão de linhas de corrente alternada do SIN, para o ano de 2021, de acordo com os níveis de tensão para transmissão é apresentada (ONS, 2022a).

Tabela 1.1 – Extensão da rede básica de corrente alternada do SIN em 2021.

Tensão (kV)	Extensão de linha (km)
750	2.683
500/525	63.660
440	6.858
345	10.358
230	64.332
Total	147.891

Dentre os métodos de localização de curtos-circuitos reportados na literatura, os algoritmos baseados em componentes de frequência fundamental, conhecidos como métodos baseados em impedância, foram e ainda são tipicamente utilizados em aplicações com réles de proteção convencionais (REIS, 2019). Tais técnicas utilizam, basicamente, fasores de tensão e corrente para estimar o local do defeito. Apesar de sua simples implementação, geralmente sua precisão é afetada em razão da influência de parâmetros como da corrente de carga, resistência de falta, algoritmos de estimação fasorial, entre outros (DAS *et al.*, 2014). Entretanto, com o progresso atual da tecnologia dos conversores analógicos digitais (A/D) de altas taxas de amostragem e do processamento de sinais aplicados em dispositivos de proteção mais recentes, a implementação de mé-

todos baseados no domínio do tempo, a exemplo dos métodos baseados na teoria de ondas viajantes, tem se tornado possível, os quais destacam-se pela exatidão de seus resultados (GUZMÁN *et al.*, 2018).

Neste contexto, os pontos de ocorrência de faltas podem ser estimados por meio de algoritmos que dependem de medições oriundas de um ou mais terminais monitorados da LT. Em geral, técnicas baseadas na teoria de ondas viajantes que utilizam informações de dois terminais são relatadas como sendo mais robustas por depender apenas da detecção de ondas incidentes de cada extremidade da linha. Já as técnicas que utilizam informações de um terminal necessitam da detecção da primeira onda refletida do ponto de falta, além da detecção da onda incidente (REIS, 2019). A detecção da primeira onda refletida do ponto de ocorrência do curto-circuito ainda é alvo de investigações ao redor do mundo, uma vez que pode ser confundida com ondas refletidas ou refratadas de outras discontinuidades do sistema, a depender da topologia do SEP (SILVEIRA *et al.*, 2020) (GUZMÁN *et al.*, 2018). Neste cenário, algoritmos híbridos de um terminal que combinam funções baseadas em fasores e na teoria de ondas viajantes podem ser vantajosos para detectar ondas refletidas provenientes de curtos-circuitos (XINZHOU *et al.*, 2002) (SHARMA; MYNAM, 2019).

Ainda que técnicas que dependem de medições procedentes de dois terminais da LT sejam descritas como mais robustas, estas necessitam de canais de comunicação para troca de dados em aplicações em tempo real, podendo dispor de esquemas de sincronização ou não. Por outro lado, os algoritmos que utilizam dados de apenas um terminal da linha não necessitam de tais canais de comunicação, nem de seus dispositivos associados, apresentando-se, portanto, como uma alternativa de menor custo e um recurso a ser utilizado em sistemas de monitoramento de dois terminais quando canais de comunicação encontram-se indisponíveis (REIS, 2019).

Diferentes técnicas de localização de faltas que utilizam dados de um terminal são reportadas na literatura, tanto para métodos baseados em componentes fundamentais, quanto para métodos baseados na teoria de ondas viajantes. Entretanto, sabe-se que parâmetros de falta como resistência e ângulo de incidência, além de medições provenientes de transformadores para instrumentos podem se configurar como fontes de erros, afetando a precisão de tais métodos (SAHA *et al.*, 2010) (SILVEIRA *et al.*, 2020). De

maneira análoga, a depender do modelo de linha utilizado para realizar estudos de localização de curtos-circuitos em LT, os resultados estimados podem ser mais precisos e próximos da realidade ou não. Trabalhos que avaliam a influência dos modelos de LT sobre o desempenho dos algoritmos de localização de faltas ainda são escassos na literatura. Entretanto, investigar o desempenho dos métodos de localização de faltas em LT sobre a influência do modelo de linha é primordial quando se quer obter resultados mais precisos, principalmente para métodos de um terminal, que necessitam da detecção correta de ondas refletidas do ponto de falta, cujas ondas podem apresentar maior grau de distorção e atenuação causadas por modelos de LT mais realistas.

Portanto, apesar dos desafios em se localizar faltas com dados de um terminal, o aprimoramento de tais soluções pode resultar em economia de recursos e aumentar a confiabilidade da localização do distúrbio, o que subsidia o trabalho das equipes de operação e manutenção das concessionárias. Neste sentido, aliar a praticidade da implementação de técnicas baseadas em fasores com a exatidão das técnicas baseadas em ondas viajantes têm proporcionado grandes avanços no estudo de técnicas híbridas de um terminal, sendo até mesmo embarcadas em relés mais recentes (SHARMA; MYNAM, 2019).

1.1 Motivação

Técnicas de localização de faltas que utilizam informações de apenas um terminal da linha surgem como soluções alternativas quando canais de comunicação não se encontram disponíveis. Além disso, mostram-se atrativas, principalmente pelo custo associado à aquisição de equipamentos quando comparadas à técnicas de dois terminais. A não necessidade de canais de comunicação e dispositivos de sincronização tornam os métodos de um terminal mais econômicos em suas aplicações. Entretanto, a necessidade da detecção correta de ondas refletidas do ponto de ocorrência do distúrbio impõem desafios maiores à implementação dessas rotinas, dado que tais surtos podem ser confundidos com outras ondas presentes no SEP. Neste sentido, algoritmos de localização híbridos baseados em componentes fundamentais e na teoria de ondas viajantes de um terminal têm se mostrado vantajosos em identificar corretamente a

onda refletida do ponto de falta. Geralmente, algoritmos híbridos de localização de curtos-circuitos em LT utilizam conjuntamente funções fasoriais e de ondas viajantes. Basicamente, funcionam da seguinte forma: o método fasorial estima a localização da falta, em seguida, uma janela de busca é criada para detectar a onda refletida do ponto de ocorrência do defeito. Posteriormente, o método baseado na teoria de ondas viajantes refina o resultado obtido pelo método fasorial detectando, na maioria das vezes, corretamente a onda refletida do ponto de falta (SHARMA; MYNAM, 2019). Apesar desses algoritmos se mostrarem vantajosos, algumas limitações como a determinação empírica da janela de busca, a influência do tamanho da janela e a detecção não automática das ondas viajantes são fatores que evidenciam a necessidade de aprimorar tais soluções, cujo tema é o foco deste trabalho.

1.2 Objetivos

O objetivo principal desta dissertação consiste em aprimorar um método híbrido clássico de localização de curtos-circuitos em LT com dados de apenas um terminal monitorado da LT reportado na literatura. Para tanto, os objetivos específicos são:

- Realizar análise de sensibilidade de parâmetros de falta, como resistência e ângulo de incidência, distância do curto-circuito para métodos de localização de um terminal baseados em componentes fundamentais, a fim de entender os desafios que envolvem estas técnicas;
- Realizar análises de sensibilidade para diferentes métodos de localização de faltas, considerando modelos de LT a parâmetros distribuídos constantes e dependentes da frequência, a saber: modelo de Bergeron e modelo de JMartí, respectivamente;
- Validar a técnica proposta por meio de simulações, análises de sensibilidade e análises comparativas com o método híbrido tradicional proposto em Xinzhou *et al.* (2002), por meio da variação dos seguintes parâmetros de falta: localização do curto-circuito, tipo de falta, ângulo de incidência de falta e resistência de falta.

1.3 Contribuições da dissertação

As principais contribuições desta dissertação são: o aprimoramento de uma técnica híbrida de localização de curtos-circuitos de um terminal, por meio da criação de uma janela de busca baseada no erro combinado da corrente de carga e da resistência de falta e o desenvolvimento de análises de sensibilidade para métodos de localização de faltas considerando modelos de LT a parâmetros distribuídos constantes e dependentes na frequência.

1.3.1 Trabalhos publicados

Publicação do artigo:

SILVEIRA, M. I. P.; REIS, R. L. A. ; NEVES, W. L. A. . Localização de Curtos-Circuitos em Linhas de Transmissão: Desafios para os Métodos Baseados no Domínio do Tempo com Dados de Um Terminal. In: Congresso Brasileiro de Automática-CBA. 2020.

1.4 Organização do texto

Esta dissertação encontra-se estruturada em 9 capítulos. Além deste capítulo introdutório, têm-se:

No segundo capítulo, uma fundamentação teórica sobre modelos de LT.

No terceiro capítulo são apresentados fundamentos básicos de técnicas de localização de faltas baseadas em componentes fundamentais e na teoria de ondas viajantes.

No quarto capítulo, apresenta-se uma revisão bibliográfica acerca de métodos de localização de faltas de um e dois terminais baseados no domínio do tempo e em componentes fundamentais.

No capítulo 5, as análises de sensibilidade para os métodos baseados em componentes fundamentais e os resultados obtidos são descritos.

No capítulo 6, apresenta-se as análises realizadas para métodos de localização de faltas baseados em componentes fundamentais e ondas viajantes sob a perspectiva do modelo de LT utilizado para os estudos.

No capítulo 7, o método proposto é apresentado.

No capítulo 8, a validação do método proposto é feita por meio de análises comparativas com o método híbrido reportado em Xinzhou *et al.* (2002).

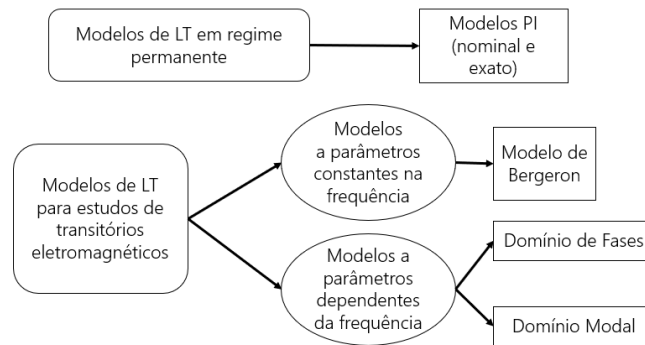
No capítulo 9, apresentam-se as conclusões do trabalho e as perspectivas para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Modelos de linhas de transmissão

Para compreender os aspectos que envolvem o processo de localização de curtos-circuitos, faz-se necessário conhecer os principais modelos de LT, uma vez que tais modelos estão diretamente relacionados a exatidão das técnicas de localização de faltas. Modelos mais realísticos, a exemplo de modelos a parâmetros distribuídos dependentes da frequência, apresentam de maneira mais detalhada os fenômenos de distorção e atenuação dos surtos, podendo influenciar o desempenho dos algoritmos de localização de distúrbios, principalmente daqueles que necessitam detectar a onda refletida do ponto de falta. Basicamente, as LT podem ser modeladas considerando parâmetros concentrados ou distribuídos constantes ou dependentes da frequência (RESTREPO *et al.*, 2008) (ARAÚJO; NEVES, 2005). Um fluxograma da classificação dos principais modelos de LT é mostrado na Figura 2.1.

Figura 2.1 – Fluxograma da classificação dos principais modelos de LT.



Fonte: autoria própria.

Os modelos de LT em regime permanente são representados por modelos a parâmetros concentrados, dois exemplos comuns que encontramos na literatura são os modelos pi exato e o pi nominal. No entanto, para estudo de transitórios eletromagnéticos, os modelos a parâmetros concentrados não são considerados uma boa representação, uma vez que não consideram o tempo de propagação de ondas eletromagnéticas. Ou seja, em modelos a parâmetros concentrados as ondas de corrente e tensão são percebidas instantaneamente nos terminais receptor e emissor da LT, situação diferente da que ocorre na prática, pois essas ondas dispõem um determinado tempo para se propagarem ao longo da linha. Em linhas curtas, por exemplo, esse tempo é tão pequeno que na maioria dos casos pode ser considerado desprezível. Dessa forma, os modelos a parâmetros distribuídos são mais apropriados para representar linhas de transmissão em estudos de transitórios, a exemplo dos modelos de Bergeron e JMarti (RESTREPO *et al.*, 2008). Apesar de existirem modelos mais sofisticados (TAVIGHI *et al.*, 2015), apenas os modelos de Bergeron e JMarti serão apresentados nesta fundamentação teórica, uma vez que são objeto de estudo desse trabalho.

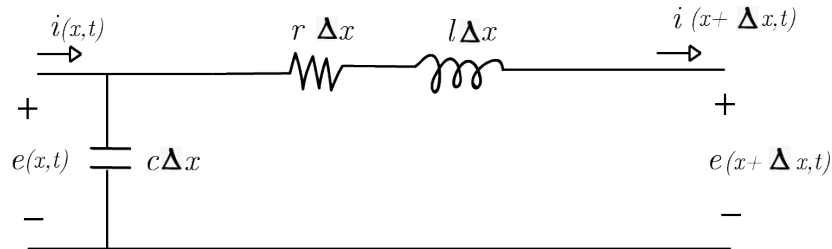
2.1 Modelos a parâmetros distribuídos

Modelos de LT a parâmetros distribuídos consideram o efeito de propagação de ondas sobre o comprimento dos condutores. Neste caso, os parâmetros longitudinais e transversais das LT são distribuídos ao longo do seu comprimento, de modo que são

relacionados com o comportamento da tensão ou corrente diante de curtos-circuitos ou operações como de manobras e chaveamentos (MARTI, 1982) (ARAÚJO; NEVES, 2005).

Os modelos de linhas a parâmetros distribuídos são embasados na solução das equações de onda da tensão e corrente. Na Figura 2.2, o circuito equivalente de uma componente incremental de uma LT monofásica é mostrado, sendo l a indutância série da linha por unidade de comprimento, c a capacitância *shunt* da linha por unidade de comprimento, r a resistência por unidade de comprimento, $e(x,t)$ e $i(x,t)$ a tensão e corrente a um ponto x da linha, respectivamente, e $i(x+\Delta x,t)$ e $e(x+\Delta x,t)$ a corrente e a tensão a uma posição $x+\Delta x$ da linha, respectivamente.

Figura 2.2 – Circuito para modelo de linhas a parâmetros distribuídos.



Fonte: autoria própria.

As relações entre a tensão e a corrente para uma LT sem perdas, ou seja, com a resistência $r=0$, podem ser obtidas por:

$$e(x + \Delta x, t) = e(x, t) - l\Delta x \frac{\partial}{\partial t} i(x + \Delta x, t), \quad (2.1)$$

$$i(x + \Delta x, t) = i(x, t) - c\Delta x \frac{\partial}{\partial t} e(x + \Delta x, t). \quad (2.2)$$

Reescrevendo as equações (2.1) e (2.2) quando Δx tende a zero, obtém-se o seguinte par de equações diferenciais:

$$-\frac{\partial e(x, t)}{\partial x} = l \frac{\partial i(x, t)}{\partial t}, \quad (2.3)$$

$$-\frac{\partial i(x, t)}{\partial x} = c \frac{\partial e(x, t)}{\partial t}. \quad (2.4)$$

Derivando (2.3) em relação a x e substituindo em (2.4), obtêm-se (2.5) e derivando (2.4) em relação a x e substituindo em (2.3) obtêm-se (2.6), as quais são chamadas equações de ondas. Estas equações descrevem o comportamento das tensões e correntes em qualquer segmento de uma linha monofásica sem perdas.

$$\frac{\partial^2 e(x, t)}{\partial x^2} = lc \frac{\partial^2 e(x, t)}{\partial t^2}, \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial^2 i(x, t)}{\partial x^2} = lc \frac{\partial^2 i(x, t)}{\partial t^2}. \quad (2.6)$$

As soluções das equações (2.5) e (2.6) podem ser obtidas aplicando-se a Transformada de Laplace, e posteriormente, sua inversa para obter a resposta no domínio do tempo, cujas soluções são dadas por:

$$e(x, t) = A(t - x/v)u(t - x/v) + B(t + x/v)u(t + x/v), \quad (2.7)$$

$$i(x, t) = \frac{1}{Z_c} A(t - x/v)u(t - x/v) - \frac{1}{Z_c} B(t + x/v)u(t + x/v). \quad (2.8)$$

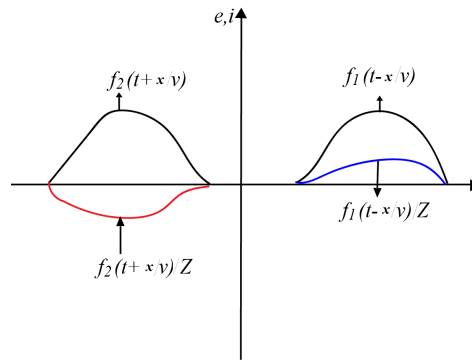
Fazendo $f_1 = A.u(t - x/v)$ e $f_2 = B.u(t + x/v)$, tem-se:

$$e(x, t) = f_1(t - x/v) + f_2(t + x/v), \quad (2.9)$$

$$i(x, t) = f_1(t - x/v)/Z_c + f_2(t + x/v)/Z_c, \quad (2.10)$$

sendo Z_c a impedância característica da linha dada por $Z_c = \sqrt{l/c}$ e v a velocidade de propagação de ondas viajantes na linha, dada por $v = 1/\sqrt{lc}$. Nas equações (2.9) e (2.10), f_1 e f_2 são ondas progressivas e regressivas, respectivamente, conforme ilustrado na Figura 2.3.

Figura 2.3 – Ondas viajantes progressivas e regressivas.



Fonte: autoria própria.

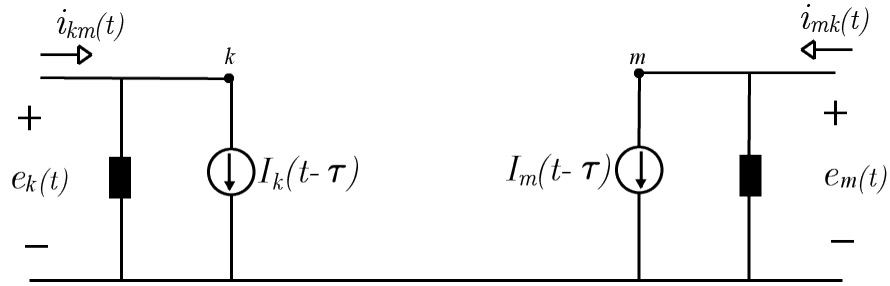
2.1.1 Modelo de Bergeron

O modelo de Bergeron, ou método das características, é um modelo de LT a parâmetros distribuídos. Neste modelo, o fenômeno de propagação de energia em uma LT é considerado, de tal forma que ao passo em que a onda de tensão ou corrente se propaga ao longo da linha, a mesma fica suscetível aos efeitos de atenuação e dispersão, dependendo um determinado instante de tempo para ser refletida ou refratada por uma das extremidades (DOMMEL, 1969). Partindo das equações (2.10) e (2.9), obtém-se (ARAÚJO; NEVES, 2005):

$$e(x, t) + Z_c i(x, t) = 2f_1(x - vt), \quad (2.11)$$

$$e(x, t) + Z_c i(x, t) = 2f_2(x + vt). \quad (2.12)$$

As equações (2.11) e (2.12) são equivalentes a uma onda progressiva e regressiva, respectivamente. Considere a Figura 2.4, que refere-se ao circuito equivalente ao modelo de Bergeron para uma LT sem perdas. Assumindo que τ seja o tempo que uma onda leva para percorrer de um terminal para o outro, $e + Z_c i$ permanece constante ao longo da LT tanto no terminal k , quanto no terminal m .

Figura 2.4 – Circuito equivalente ao modelo de *Bergeron* para uma LT sem perdas.


Fonte: autoria própria.

Dessa forma,

$$e_m(t - \tau) + Z_c i_{mk}(t - \tau) = e_k(t) + Z_c (-i_{km}(t)), \quad (2.13)$$

do circuito da Figura 2.4, tem-se, que:

$$i_{km}(t) = -1/Z_c e_k(t) - I_k(t - \tau), \quad (2.14)$$

$$i_{mk}(t) = -1/Z_c e_m(t) - I_m(t - \tau), \quad (2.15)$$

sendo,

$$I_k(t - \tau) = -1/Z_c e_m(t - \tau) - i_{mk}(t - \tau), \quad (2.16)$$

$$I_m(t - \tau) = -1/Z_c e_k(t - \tau) - i_{km}(t - \tau), \quad (2.17)$$

em que I_k e I_m são fontes de correntes históricas e τ o tempo de trânsito da linha. Para sistemas de múltiplas fases, as linhas são desacopladas pelo método de decomposição modal, o qual utiliza matrizes de transformações constantes com componentes reais, acarretando em resultados exatos para linhas balanceadas. Por outro lado, para linhas desbalanceadas, a matriz de transformação pode não ser mais constante uma vez que tais matrizes são dependentes da frequência.

Linhas polifásicas

Para linhas polifásicas as equações de Bergeron são válidas ao substituir a tensão e corrente por vetores $[e]$ e $[i]$, respectivamente, e l e c por matrizes. Analogamente, as equações (2.5) e (2.6), as equações para linhas polifásicas sem perdas, são (ARAÚJO; NEVES, 2005):

$$\frac{\partial^2[e]}{\partial x^2} = [l][c] \frac{\partial^2[e]}{\partial t^2} = [P] \frac{\partial^2[e]}{\partial t^2}, \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial^2[i]}{\partial x^2} = [c][l] \frac{\partial^2[i]}{\partial t^2} = [P]^T \frac{\partial^2[i]}{\partial t^2}. \quad (2.19)$$

As matrizes $[P]$ e $[P]^T$ são matrizes cheias devido ao acoplamento mútuo entre as fases, o que torna a solução das equações (2.18) e (2.19) complicada. Para tanto, usa-se uma transformação de variáveis, conhecida como transformação modal.

2.2 Modelos a parâmetros distribuídos dependentes na frequência

Os modelos de LT a parâmetros distribuídos dependentes na frequência levam em consideração os efeitos da frequência sobre os parâmetros da linha. Por considerar a variação da frequência em uma determinada faixa, estes modelos podem melhor representar os fenômenos de propagação de ondas eletromagnéticas (WELTON, 2010) (HOSHMEH; SCHMIDT, 2017). Entretanto, tais modelos requisitam maior complexidade matemática e custo computacional em relação ao tempo de simulação (RESTREPO *et al.*, 2008), a exemplo de técnicas computacionais como da convolução recursiva, transformada inversa de Fourier, entre outras (MARTINEZ-VELASCO; GUSTAVSEN, 2001). Podem ser classificados em modelos desenvolvidos no domínio modal ou de fases, requerendo a transformação da resposta do domínio da frequência para o domínio do tempo. As tensões e correntes em um determinado ponto x da LT são descritas pelos vetores $V(x, \omega)$ e $I(x, \omega)$, respectivamente, conforme (ARAÚJO; NEVES, 2005):

$$-\frac{\partial}{\partial x}[V(x, \omega)] = [Z(\omega)][I(x, \omega)], \quad (2.20)$$

$$-\frac{\partial}{\partial x}[I(x, \omega)] = [Y(\omega)][V(x, \omega)], \quad (2.21)$$

sendo $Z(\omega)$ e $Y(\omega)$ as matrizes de impedância série e admitância em derivação da LT em unidade de comprimento, respectivamente. As equações de propagação, são dadas por:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2}[V(x, \omega)] = [P(\omega)][V(x, \omega)], \quad (2.22)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2}[I(x, \omega)] = [P(\omega)]^t[I(x, \omega)], \quad (2.23)$$

em que $[P(\omega)] = [Z(\omega)][Y(\omega)]$ e $[P(\omega)]^t = [Y(\omega)][Z(\omega)]$. A solução geral das equações (2.22) e (2.23), são:

$$[V(x, \omega)] = e^{-[\Gamma_V(\omega)]x}[V_p(\omega)] + e^{[\Gamma_V(\omega)]x}[V_r(\omega)], \quad (2.24)$$

$$[I(x, \omega)] = e^{-[\Gamma_i(\omega)]x}[I_p(\omega)] + e^{[\Gamma_i(\omega)]x}[I_r(\omega)], \quad (2.25)$$

em que $[V_p(\omega)]$ e $[V_r(\omega)]$ representam as ondas progressivas e regressivas de tensão, e, $[I_p(\omega)]$ e $[I_r(\omega)]$, as ondas progressivas e regressivas de corrente, respectivamente, no ponto $x = 0$. Sendo que $[\Gamma_V(\omega)] = \sqrt{[P(\omega)]}$ e $[\Gamma_i(\omega)] = \sqrt{[P(\omega)]^t}$, são matrizes constantes de propagação para a tensão e corrente, respectivamente. Diferenciando (2.25) em relação a x e substituindo em (2.23), obtém-se (ARAÚJO; NEVES, 2005):

$$[Y_c(\omega)][V(x, \omega)] = e^{-[\Gamma_i(\omega)]x}[I_p(\omega)] - e^{[\Gamma_i(\omega)]x}[I_r(\omega)]. \quad (2.26)$$

sendo $[Y_c(\omega)]$ a matriz impedância característica, dada por:

$$[Y_c(\omega)] = (\sqrt{Y(\omega)Z(\omega)})^{-1}[Y(\omega)]. \quad (2.27)$$

Somando-se as equações (2.26) e (2.25), têm-se:

$$[Y_c(\omega)][V(x, \omega)] + [I(x, \omega)] = 2e^{-\Gamma(\omega)x}[I_p(\omega)]. \quad (2.28)$$

Para uma linha de transmissão com comprimento d , ou seja, de um terminal a outro, cujas condições de contorno são $x = 0$ no início da LT e $x = d$ no final da LT:

$$[Y_c(\omega)][V(0, \omega)] + [I(0, \omega)] = 2[I_p(\omega)], \quad (2.29)$$

$$[Y_c(\omega)][V(d, \omega)] + [I(d, \omega)] = 2e^{-[\Gamma_i(\omega)]d}[I_p(\omega)]. \quad (2.30)$$

Rearranjando (2.29) e (2.30):

$$[Y_c(\omega)][V(d, \omega)] + [I(d, \omega)] = e^{-[\Gamma_i(\omega)]d}[Y_c(\omega)][V(0, \omega)] + [I(0, \omega)], \quad (2.31)$$

pode-se escrever as condições de contorno:

Em $x = 0$,

$$[V(0, \omega)] = [V_k(\omega)]$$

$$[I(0, \omega)] = [I_k(\omega)] \quad (2.32)$$

Em $x = d$,

$$[V(d, \omega)] = [V_m(\omega)]$$

$[I(d, \omega)] = [I_m(\omega)]$, (2.33) sendo $[I_k(\omega)]$ e $[I_m(\omega)]$ as correntes que entram nos terminais k e m da LT, respectivamente. Substituindo (2.31) em (2.32) e (2.33), obtém-se:

$$[Y_c(\omega)][V_m(\omega)] - [I_m(\omega)] = e^{-[\Gamma_i(\omega)]d}[Y_c(\omega)][V_k(\omega)] + [I_k(\omega)]. \quad (2.34)$$

A equação abaixo também é verdadeira para LT linear e bilateral:

$$[Y_c(\omega)][V_k(\omega)] - [I_k(\omega)] = e^{-[\Gamma_i(\omega)]d}[Y_c(\omega)][V_m(\omega)] + [I_m(\omega)]. \quad (2.35)$$

O termo

$$[A(\omega)] = e^{-[\Gamma_i(\omega)]d} \quad (2.36)$$

é a função de propagação. Substituindo (2.36) em (2.34) e (2.35), obtém-se:

$$[I_k(\omega)] = [Y_c(\omega)][V_k(\omega)] + [I_{kh}(\omega)] \quad (2.37)$$

$$[I_m(\omega)] = [Y_c(\omega)][V_m(\omega)] + [I_{mh}(\omega)] \quad (2.38)$$

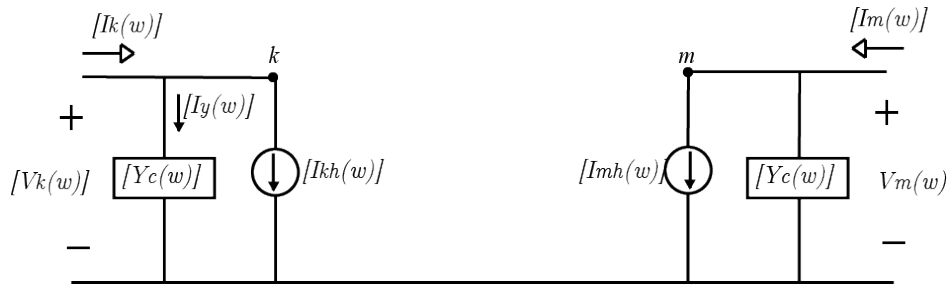
sendo,

$$[I_{kh}(\omega)] = -[A(\omega)]([Y_c(\omega)][V_k(\omega)] + [I_{km}(\omega)]) \quad (2.39)$$

$$[I_{mh}(\omega)] = -[A(\omega)]([Y_c(\omega)][V_m(\omega)] + [I_{mk}(\omega)]). \quad (2.40)$$

Portanto, o circuito equivalente da Figura 2.5 pode ser obtido.

Figura 2.5 – Circuito para modelo de linhas a parâmetros distribuídos dependentes da frequência.



Fonte: autoria própria.

Os termos $[\Gamma_i]$ e $[A(\omega)]$ podem ser obtidos por meio do cálculo de autovalores e autovetores de $[P(\omega)]$ e $[P(\omega)]^t$, sendo:

$$[P(\omega)] = [T_V(\omega)]diag[p_k(\omega)][T_V(\omega)]^{-1} \quad (2.41)$$

$$[P(\omega)]^t = [T_i(\omega)]diag[p_k(\omega)][T_i(\omega)]^{-1}. \quad (2.42)$$

A $diag[p_k(\omega)]$ é uma matriz diagonal cujos elementos não nulos são os k -ésimos autovalores de $[P(\omega)]$ ou de $[P(\omega)]^t$, uma vez que os autovalores de $[P(\omega)]$ são os mesmos de $[P(\omega)]^t$. Por meio das equações acima, pode-se mostrar que:

$$[T_V(\omega)] = ([T_i(\omega)]^{-1})^t, \quad (2.43)$$

as colunas da matriz de $[T_V(\omega)]$ são autovetores de $[P(\omega)]$ e as colunas da matriz $[T_i(\omega)]$ são autovetores de $[P(\omega)]^t$. Dessa forma,

$$[\Gamma_i(\omega)] = \sqrt{[P(\omega)]^t} = [T_i(\omega)]diag[\gamma_k(\omega)][T_i(\omega)]^{-1} \quad (2.44)$$

sendo $\gamma_k(\omega) = \sqrt{p_k(\omega)}$ ($k=1,2,\dots,n$). Logo, a função de propagação é dada por:

$$[A(\omega)] = e^{[-\Gamma_i(\omega)]d} = [T_i(\omega)]diag[e^{-\gamma_k(\omega)}][T_i(\omega)]^{-1}. \quad (2.45)$$

Se os parâmetros da LT (l , c e r) são funções da frequência, todos os termos das equações (2.34) e (2.35) são determinados. Para obter os resultados no domínio do tempo, é necessário o cálculo de convoluções que podem ser realizados no domínio modal ou de fases.

2.2.1 Modelo reportado em Marti (1982)

O modelo de J. Martí consiste em um modelo de LT a parâmetros distribuídos variantes na frequência que utiliza o domínio modal. Basicamente, três fases desacopladas (modos) do sistema com velocidades de propagação e matriz admitância próprias são obtidas por meio da aplicação de uma transformada modal às variáveis de entrada que têm como objetivo diagonalizar as matrizes $[P(\omega)]$ e $[P(\omega)]^t$. Dessa forma, as equações de onda são obtidas de modo que:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2}[V_{mod}(x, \omega)] = diag[p_k(\omega)][V_{mod}(x, \omega)] \quad (2.46)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2}[I_{mod}(x, \omega)] = diag[p_k(\omega)][I_{mod}(x, \omega)] \quad (2.47)$$

em que $[V_{mod}(x, \omega)] = [T_V(\omega)]^{-1}[V(x, \omega)]$ e $[I_{mod}(x, \omega)] = [T_i(\omega)]^{-1}I(x, \omega)$ são vetores de tensão e corrente modais. Para converter os valores do domínio modal para o domínio de fases, convoluções são aplicadas (ARAÚJO; NEVES, 2005). Na transição entre os domínios de fases e modos, a matriz de transformação é considerada como sendo real e constante, a fim de reduzir o esforço computacional devido à resolução de integrais de convolução.

2.3 Síntese do capítulo

Neste capítulo, uma breve fundamentação teórica sobre alguns modelos de LT foi apresentada. Basicamente, os modelos de LT são classificados em duas categorias: os

modelos em regime permanente e os modelos de LT para estudos em regime transitório, sendo o segundo podendo ser independente ou dependente na frequência.

Os modelos de LT em regime permanente consideram que os parâmetros da LT são concentrados, e por isso, não são adequados para estudos de transitórios eletromagnéticos, uma vez que não levam em consideração o tempo que as ondas eletromagnéticas dispõem para viajar de um terminal ao outro da LT.

No tocante aos modelos para estudos em regime transitório, dois modelos foram apresentados: o modelo de Bergeron, o qual representa os parâmetros da LT de modo constante e o modelo de JMartí, que opera com os parâmetros dependentes da frequência. Por depender da frequência, este último é mais indicado para estudos de transitórios eletromagnéticos, principalmente de localização de faltas, uma vez tendem a representar os fenômenos eletromagnéticos de modo mais fidedigno e próximo do que ocorre na realidade. Apesar de existirem vários modelos reportados na literatura, apenas o modelo de Bergeron e JMarti foram apresentados, uma vez que fazem parte dos estudos realizados neste trabalho.

Capítulo 3

Localização de faltas em linhas de transmissão

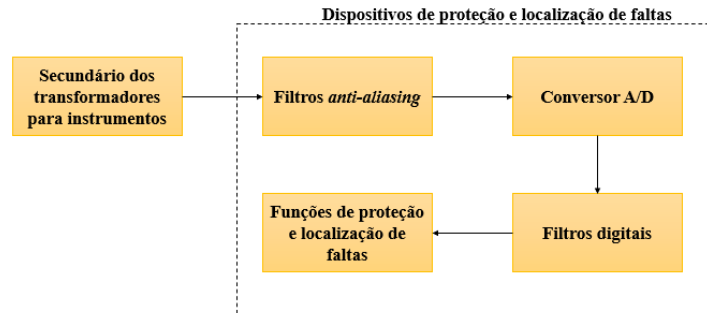
Os métodos de localização de faltas são, de modo geral, classificados em quatro grupos: os métodos baseados em componentes fundamentais, métodos baseados em componentes de alta frequência, métodos baseados em inteligência artificial e métodos baseados na teoria de ondas viajantes (SAHA *et al.*, 2010). Em relação a quantidade de terminais em que são feitas as medições, podem ser classificados em métodos que utilizam informações de um, dois ou multi-terminais da linha. Neste capítulo, uma fundamentação teórica sobre técnicas de localização de faltas baseadas em componentes fundamentais e na teoria de ondas viajantes é realizada, uma vez que são objeto de estudo desta dissertação.

3.1 Dados de entrada de algoritmos de localização de faltas

As informações de entrada de algoritmos de localização de faltas são, basicamente, sinais de tensão e/ou corrente oriundos dos terminais secundários de transformadores para instrumentos (TI), como os transformadores de potencial capacitivo (TPC) e transformadores de corrente (TC). Estes sinais originados dos TI têm caráter analógico, e antes mesmo de serem utilizados pelas funções de localização, são submetidos a um processo de filtragem analógica por meio de filtros *anti-aliasing*, cuja finalidade é evitar a sobreposição de espectros, dado que tal fenômeno pode provocar a perda de dados

no decorrer da conversão do sinal analógico em digital, sendo a frequência de corte do filtro determinada por meio do teorema de Nyquist (PHADKE; THORP, 2009) (SAHA *et al.*, 2010). Para ilustrar as etapas em que os dados de tensão e corrente são submetidos, desde a sua saída do secundário dos TI até chegar aos dispositivos de proteção e localização de faltas, um fluxograma é apresentado na Figura 3.1.

Figura 3.1 – Fluxo dos dados de corrente e tensão até chegarem as funções de proteção e localização de faltas.



Fonte: adaptado de (REIS, 2019)

Uma vez que os dados de tensão e corrente passam pelas etapas mostradas na Figura 3.1 e encontram-se discretizados, podem ser utilizados como entrada dos algoritmos de localização de faltas.

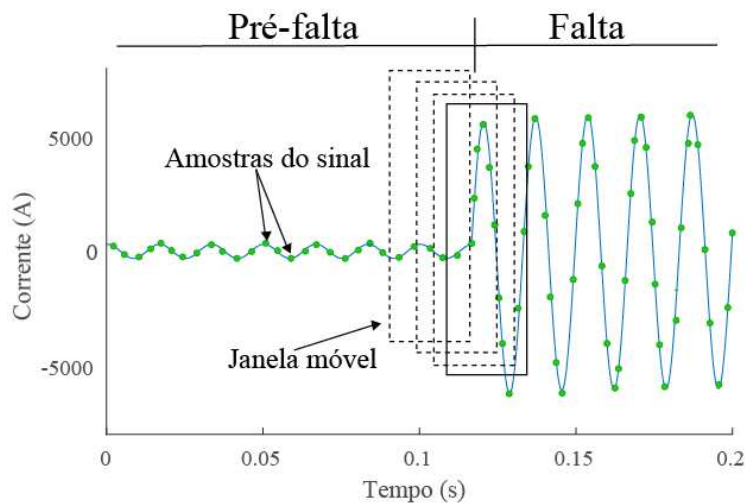
3.2 Localização de faltas baseadas em componentes fundamentais

Técnicas de localização de faltas baseadas em componentes fundamentais utilizam o cálculo dos fasores de tensão e corrente, medidos em um ou mais terminais da linha, os quais são obtidos por meio de algoritmos de estimação fasorial. Basicamente, os algoritmos de estimação fasorial consistem em filtros digitais que recebem um conjunto de amostras discretizadas e janeladas para realizar a estimação dos fasores associados (PHADKE; THORP, 2009). Diversas técnicas de estimação fasorial são reportadas na literatura, a exemplo dos filtros baseados na transformada discreta de Fourier (PHADKE; THORP, 2009), do filtro cosseno modificado (HART *et al.*, 2000), dos que se baseiam na teoria dos mínimos quadrados (SILVA, 2009), entre outros.

3.2.1 Estimação Fasorial

No que tange a aplicação de algoritmos de estimação fasorial aos sinais de entrada de algoritmos de localização de curtos-circuitos baseados em componentes fundamentais, filtros *anti-aliasing* normalmente do tipo Butterworth, de 2ª ou 3ª ordem, são aplicados aos sinais analógicos para limitar a banda de frequência do sinal (REIS *et al.*,). Após a discretização dos sinais, realiza-se o janelamento das amostras por meio de uma janela de tamanho tipicamente fixa, que desliza no tempo e percorre todo o sinal, sendo uma amostra adicionada e uma descartada a cada passo de tempo de modo que a amplitude e a fase do fasor são estimados para cada janela do sinal (PHADKE; THORP, 2009), conforme ilustrado na Figura 3.2.

Figura 3.2 – Esquema de janelamento aplicado a um sinal de corrente.



Fonte: autoria própria.

Da Figura 3.2, observa-se que durante o regime permanente, o janelamento é realizado com dados do sinal antes da falta. Entretanto, após a incidência do curto-circuito, pode-se observar um período de transição que contém amostras do sinal com e sem falta. Para que os algoritmos de localização de falta funcionem corretamente, os algoritmos de estimação fasorial devem considerar janelas que contêm amostras apenas do sinal de pré-falta e de falta, uma vez que o fasor de amostras do período de transição pode

afetar o desempenho de técnicas de localização de curtos-circuitos baseadas em fasores (COURY *et al.*, 2007).

Para a aplicação da maioria dos métodos de localização de curtos-circuitos baseados em componentes fundamentais, faz-se necessário primeiro classificar o tipo de falta ocorrido. Dessa forma, a depender do tipo de falta, os fasores a serem utilizados como dados de entradas de algoritmos de localização de curtos-circuitos baseados em componentes fundamentais de um terminal estão dispostos na Tabela 3.1, em que $k_0 = \frac{Z_{L0}}{Z_{L1}} - 1$ consiste no fator de compensação de sequência zero, o qual é responsável por contrabalançar o acoplamento mútuo de sequência zero entre a fase envolvida no curto-circuito e as que não estão (SILVA, 2009), \hat{V}_L e \hat{I}_L são os fasores de tensão e corrente registrados na barra monitorada, $\Delta\hat{I}_L$ é a corrente incremental e \hat{I}_{pre} a corrente de pré-falta (DAS *et al.*, 2014).

Tabela 3.1 – Fasores de entrada para algoritmos de localização de faltas de um terminal.

Tipo de Falta	\hat{V}_L	\hat{I}_L	$\Delta\hat{I}_L$
AT	\hat{V}_A	$\hat{I}_A + k_0\hat{I}_0$	$\hat{I}_A - \hat{I}_{Apre}$
BT	\hat{V}_B	$\hat{I}_B + k_0\hat{I}_0$	$\hat{I}_B - \hat{I}_{Bpre}$
CT	\hat{V}_B	$\hat{I}_C + k_0\hat{I}_0$	$\hat{I}_C - \hat{I}_{Cpre}$
AB, ABT, ABC	$\hat{V}_A - \hat{V}_B$	$\hat{I}_A - \hat{I}_B$	$(\hat{I}_A - \hat{I}_{Apre}) - (\hat{I}_B - \hat{I}_{Bpre})$
BC, BCT, ABC	$\hat{V}_B - \hat{V}_C$	$\hat{I}_B - \hat{I}_C$	$(\hat{I}_B - \hat{I}_{Bpre}) - (\hat{I}_C - \hat{I}_{Cpre})$
CA, CAT, ABC	$\hat{V}_C - \hat{V}_A$	$\hat{I}_C - \hat{I}_A$	$(\hat{I}_C - \hat{I}_{Cpre}) - (\hat{I}_A - \hat{I}_{Apre})$

Fonte: (DAS *et al.*, 2014).

Apesar de várias técnicas de classificação de curtos-circuitos serem reportadas na literatura, neste trabalho, avaliar-se-á apenas o desempenho das técnicas de localização de curtos-circuitos baseadas em componentes fundamentais. Deste modo, parte-se do pressuposto de que os curtos-circuitos são classificados corretamente.

3.2.1.1 Algoritmo de Fourier de Ciclo Completo

A representação de sinais periódicos pode ser feita utilizando a série de Fourier por meio de uma soma de funções trigonométricas de senos e cossenos (JÚNIOR *et al.*, 2020). Para ilustrar tal fato, considere um sinal $x(t)$ periódico, em que t representa o tempo, sendo $x(t) = x(t + T)$, onde T é o período do sinal, sendo a frequência

fundamental igual a $f = 1/T$. A Série de Fourier é dada por:

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{+\infty} a_n \cos(2\pi nft) + \sum_{n=1}^{+\infty} b_n \sen(2\pi nft), \quad (3.1)$$

sendo:

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} x(t) dt, \quad (3.2)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} x(t) \cos(2\pi nft) dt, \quad (3.3)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} x(t) \sen(2\pi nft) dt, \quad (3.4)$$

em que a_n e b_n são os coeficientes da série de Fourier. A equação (3.1) pode ser reescrita conforme:

$$x(t) = \sum_{n=0}^{+\infty} A_n \cos(2\pi nft + \Theta_n), \quad (3.5)$$

sendo A_n e Θ_n o módulo e a fase do sinal, respectivamente, que são dados por:

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}, \quad (3.6)$$

$$\Theta_n = \arctan \frac{-b_n}{a_n}. \quad (3.7)$$

As componentes real (X_{real}) e imaginária (X_{imag}) de um fasor podem ser encontradas utilizando o algoritmo de Fourier de Ciclo Completo para um sinal digital $x(m)$, conforme (PHADKE; THORP, 2009):

$$X_{real}(k) = \frac{2}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x(k - N + m) \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{N}m\right), \quad (3.8)$$

$$X_{imag}(k) = -\frac{2}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x(k - N + m) \cdot \sen\left(\frac{2\pi}{N}m\right), \quad (3.9)$$

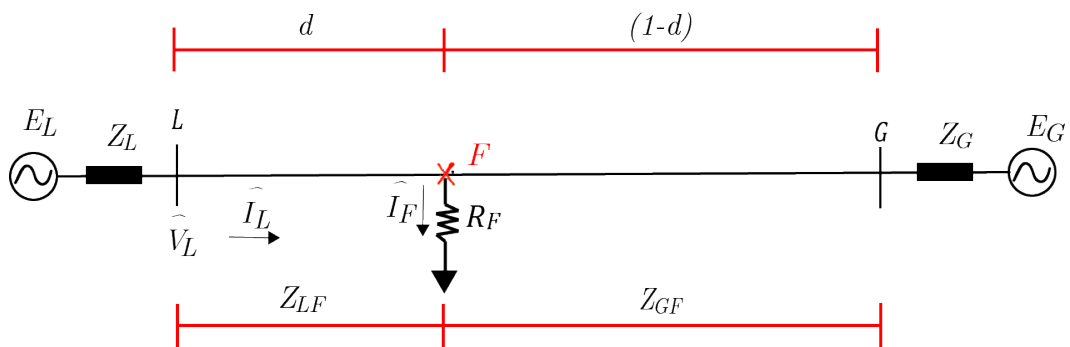
em que N é o número de amostras por ciclo e $x(k - N + m)$ consiste na m -ésima amostra da k -ésima janela de dados do sinal x janelado.

3.2.2 Princípio da Superposição

O princípio da superposição é uma técnica muito útil para análise de circuitos elétricos, dado que sua utilização permite reduzir sistemas complexos em vários sistemas mais simples (IRWIN; NELMS, 1939). Para análises de curtos-circuitos, o uso desta técnica possibilita separar a rede sob condição de falta em duas redes diferentes: a rede de pré-falta e a rede de falta. A rede de pré-falta, como o nome sugere, compreende as tensões e correntes de carga durante a operação normal do sistema, enquanto que a rede de falta corresponde às oscilações dos sinais de tensão e corrente produzidas a partir do curto-circuito. Dessa forma, as contribuições de tensão e corrente dos estados de pré-falta e de falta podem ser analisadas separadamente, facilitando o entendimento e as análises.

O princípio da superposição é utilizado, tipicamente nas abordagens de métodos de localização de faltas baseados em componentes fasoriais. Para tanto, considere o SEP ilustrado na Figura 3.3, o qual representa o sistema equivalente monofásico de um sistema trifásico genérico submetido a um curto-circuito ocorrido no ponto F .

Figura 3.3 – Equivalente monofásico de um SEP trifásico submetido a uma condição de falta.



Fonte: autoria própria.

A impedância aparente medida entre a barra L e o ponto de falta é dada por:

$$Z_{app} = \frac{\hat{V}_L}{\hat{I}_L} = Z_{LF} + R_F \frac{\hat{I}_F}{\hat{I}_L}, \quad (3.10)$$

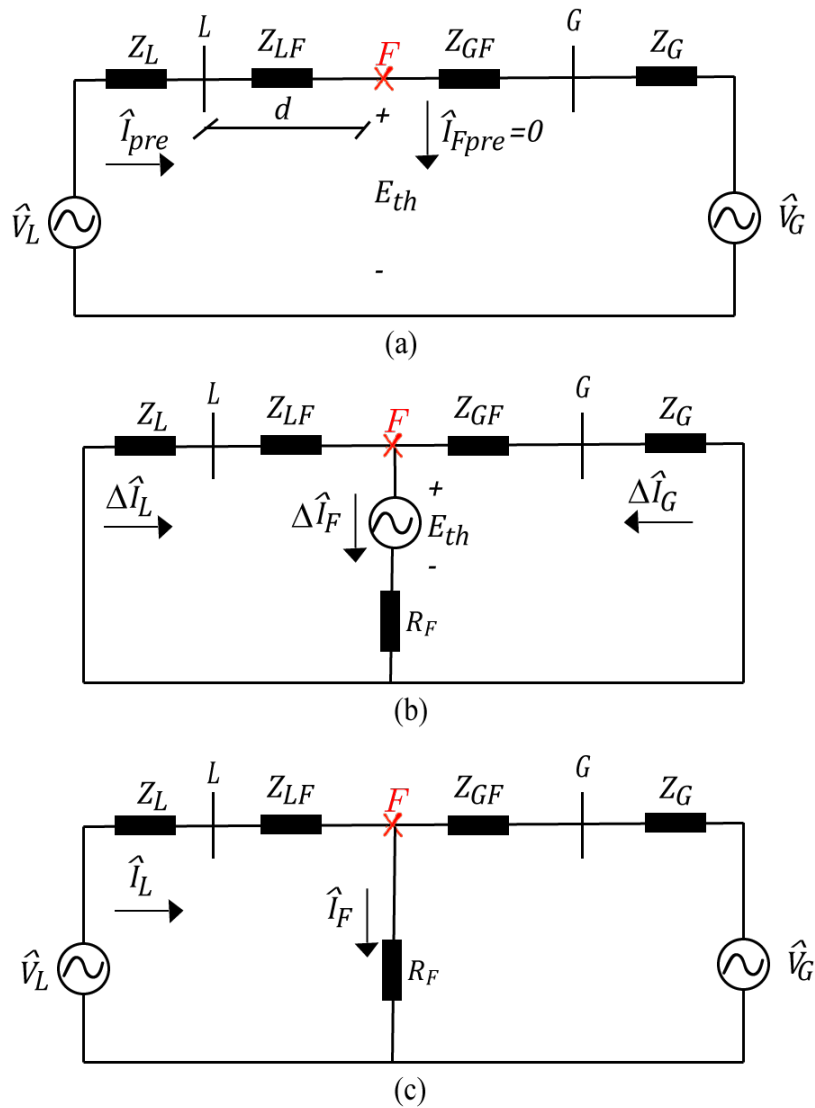
em que \hat{V}_L e \hat{I}_L são os fasores de tensão e corrente registrados na barra L , respectivamente, a equação (3.10) serve de base para os métodos baseados em componentes

fundamentais de um terminal. O SEP da Figura 3.3 pode ser dividido em três circuitos aplicando-se o princípio da superposição, conforme disposto na Figura 3.4. Na Figura 3.4(a), a rede está operando na condição de pré-falta, dessa forma uma tensão de circuito aberto (corrente nula) entre o ponto de falta e o neutro é definida por \hat{E}_{th} . Já no circuito de falta, apresentado na Figura 3.4(b), a tensão no ponto de falta (F) é igual à tensão na resistência de falta (R_F). Assim, as tensões e correntes em qualquer ponto da rede sob falta são definidas pelo somatório dos elementos de pré-falta e do circuito de falta, e portanto, a corrente incremental ($\Delta\hat{I}_L$), é dada por:

$$\Delta\hat{I}_L = \hat{I}_L - \hat{I}_{pre}, \quad (3.11)$$

sendo \hat{I}_L a corrente total medida no período de falta e \hat{I}_{pre} a corrente de pré-falta, ou também denominada de corrente de carga.

Figura 3.4 – Princípio da superposição aplicado a uma LT genérica. (a) Rede de pré-falta. (b) Rede pura de falta (c) Rede de pós-falta.



Fonte: autoria própria.

3.2.2.1 Fator de carga e fator de distribuição de corrente

O fator de carga (n_s) e o fator de distribuição de corrente (k) são dois parâmetros que advêm da aplicação do princípio da superposição, e são muito utilizados em funções de localização de faltas baseados em componentes fundamentais de um terminal (SILVEIRA, 2007). Ambos são grandezas complexas que podem influenciar o desempenho de tais métodos. Devido ao fato de que grande parte dos métodos baseados

em fasores adotam a parte imaginária para estimar a localização de falta, a influência do fator de carga e distribuição de corrente sobre a estimação desses algoritmos pode aumentar diante do aumento de suas fases (DALCASTAGNÊ *et al.*, 2007). Por isso, é importante investigar o impacto desses parâmetros.

O fator de carga (n_s) é dado por (SILVEIRA, 2007):

$$\frac{\hat{I}_L}{\Delta\hat{I}_L} = |n_s|e^{j\alpha}. \quad (3.12)$$

O ângulo de n_s (α) somente é nulo se não houver fluxo de potência entre as barras. Todavia, se a corrente incremental ($\Delta\hat{I}_L$) for muito maior do que a corrente de carga (\hat{I}_{pre}), α terá um valor próximo de zero, isto é, $\Delta\hat{I}_L$ estará praticamente em fase com \hat{I}_L .

Já o fator de distribuição de corrente é dado por (SILVEIRA, 2007):

$$k = \frac{\Delta\hat{I}_L}{\hat{I}_F} = |k|e^{j\phi}, \quad (3.13)$$

em que a corrente \hat{I}_F é a corrente que passa pela resistência de falta (ou seja, pelo ponto de falta e o neutro da rede), a qual não pode ser medida diretamente. No entanto, como $\hat{I}_{fpre} = 0$ (não existe corrente de falta antes da ocorrência do curto-circuito), têm-se:

$$\hat{I}_F = \Delta\hat{I}_F, \quad (3.14)$$

e

$$\Delta\hat{I}_F = \Delta\hat{I}_L + \Delta\hat{I}_G. \quad (3.15)$$

Por inspeção na Figura 3.4, obtém-se:

$$\Delta\hat{I}_L = \frac{\hat{E}_{th}}{Z_{LF} + Z_L}, \quad (3.16)$$

e

$$\Delta\hat{I}_G = \frac{E_{th}}{Z_G + Z_{GF}}. \quad (3.17)$$

Substituindo, (3.16) e (3.17) em (3.15), e (3.15) e (3.16) em (3.13), obtém-se:

$$k = \frac{Z_G + (1-d)Z_{l1}}{Z_G + Z_L + Z_{l1}}. \quad (3.18)$$

Desta forma, percebe-se que o fator de distribuição de corrente k não depende das amplitudes ou fases das tensões \hat{V}_L e \hat{V}_G , mas apenas da configuração da rede, ou seja,

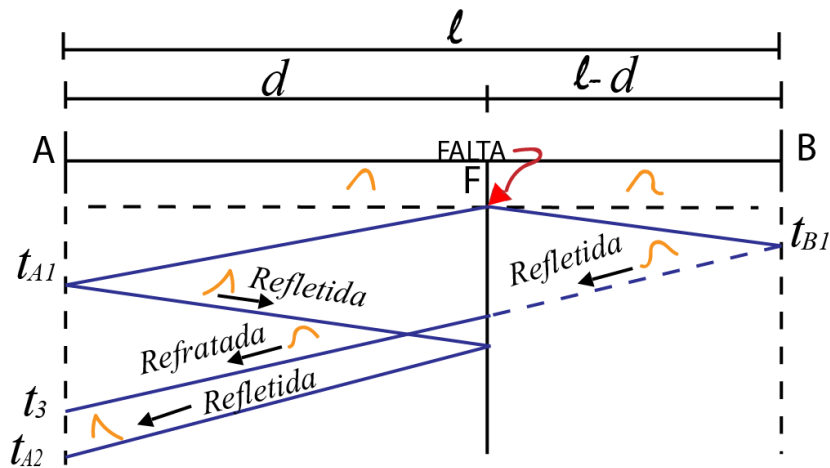
da impedância da LT, das impedâncias das fontes e da localização da falta (d). Neste sentido, ϕ será nulo se o sistema for homogêneo, ou seja, se o ângulo de Z_L , Z_G e Z_{l1} forem iguais. Segundo Wiszniewski (1983), se Z_L , Z_G e Z_c possuir ângulos de fase similares, o maior valor de Θ é esperado quando a falta ocorrer na extremidade da linha, mas mesmo nesse caso, geralmente, não ultrapassa 10° (WISZNIEWSKI, 1983).

3.3 Localização de faltas baseadas no domínio do tempo

O conceito de ondas viajantes em linhas de transmissão pode ser melhor compreendido pelo diagrama de Bewley, ou diagrama espaço-tempo, a exemplo do ilustrado na Figura 3.5, em que as relações tempo-espaço são apresentadas por meio da chegada de ondas incidentes, refletidas e refratadas nos terminais A e B da LT.

A ocorrência de um curto-circuito no ponto F produz ondas de tensão e corrente que se propagam a partir do ponto do defeito para ambos os terminais da linha. Ao encontrar uma descontinuidade, a exemplo dos barramentos A e B, essas ondas refletem e retornam ao ponto de ocorrência do distúrbio, onde novas reflexões e refrações acontecerão até serem completamente amortecidas e o estado de pós-falta seja alcançado (GUZMÁN *et al.*, 2018). A primeira onda que atinge o terminal monitorado (terminal A, por exemplo) é denominada onda incidente, sendo as duas ondas originadas dela denominadas ondas refletidas e refratadas (transmitidas). Basicamente, essas ondas satisfazem as leis de Kirchhoff (BEWLEY, 1963).

Figura 3.5 – Diagrama de Bewley.



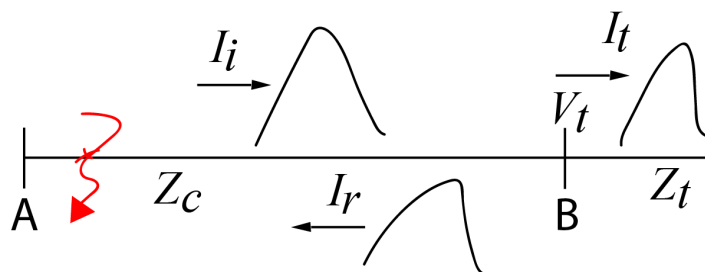
Fonte: autoria própria.

Para melhor compreender os eventos decorrentes de ondas viajantes em LT, a relação entre as ondas viajantes de tensão e corrente pode ser estabelecida por:

$$Z_c = \frac{V_i}{I_i} = -\frac{V_r}{I_r}, \quad (3.19)$$

sendo Z_c a impedância de surto da linha, V_i e I_i as ondas incidentes de tensão e corrente, respectivamente, e V_r e I_r as ondas refletidas de tensão e corrente, respectivamente. Quando as ondas incidentes de tensão e corrente atingem um terminal da linha, uma parte da mesma reflete e a outra refrata, conforme ilustrado na Figura 3.6. A relação entre as ondas incidente, refletida e transmitida depende da impedância vista do ponto de descontinuidade (Z_i), de acordo com a equação (3.20) (GUZMÁN *et al.*, 2018):

Figura 3.6 – Ondas Viajantes incidente, transmitida e refletida.



Fonte: Fonte: autoria própria.

$$Z_t = \frac{V_i + V_r}{I_i + I_r}. \quad (3.20)$$

Por meio de manipulações algébricas entre as equações (3.19) e (3.20), a relação entre as correntes refletida e incidente pode ser obtida, segundo (GUZMÁN *et al.*, 2018):

$$\Gamma = \frac{I_r}{I_i} = \frac{Z_c - Z_t}{Z_c + Z_t}, \quad (3.21)$$

em que Γ é o coeficiente de reflexão. Similarmente, a relação entre a corrente refratada e a corrente incidente resulta na obtenção do coeficiente de refração (Υ), conforme:

$$\Upsilon = \frac{I_t}{I_i} = \frac{2Z_c}{Z_c + Z_t}. \quad (3.22)$$

Conhecendo-se os tempos t_{A1} e t_{A2} apresentados na Figura 3.5, a distância do ponto de falta, d , referente à barra A, utilizando dados de um terminal da linha, pode ser calculada por (GALE *et al.*, 1993):

$$d = v \frac{t_{A2} - t_{A1}}{2}, \quad (3.23)$$

e, para dois terminais da linha:

$$d = v \frac{\ell + v(t_{A1} - t_{B1})}{2}, \quad (3.24)$$

em que v é a velocidade de propagação das ondas, t_{A1} o tempo em que a primeira frente de onda (incidente) é detectada no ponto de medição (barra A), t_{A2} o tempo de propagação da primeira onda refletida do ponto de falta e t_{B1} o tempo em que a onda incidente é detectada no ponto de medição (barra B). A velocidade de propagação de modo aéreo das ondas para uma LT sem perdas é definida por $v = 1/\sqrt{l c}$, sendo l e c a indutância e capacitância do modo aéreo por unidade de comprimento, respectivamente. Diante da independência de sincronização de dados entre os terminais da LT, as técnicas baseadas em medições de um terminal tornam-se mais simples, contudo, são mais passíveis a erros devido à necessidade de se identificar corretamente as ondas refletidas do ponto de falta t_{A2} , as quais podem ser confundidas com ondas refratadas em outros pontos do SEP, a exemplo do instante t_3 ilustrado na Figura 3.5 (REIS, 2019).

3.3.1 Detecção de ondas viajantes

Para detectar os instantes de chegada das ondas viajantes induzidas por curtos-circuitos nos terminais da linha de transmissão, diversas ferramentas matemáticas podem ser encontradas na literatura para auxiliar o processo de localização de faltas, a exemplo do filtro *differentiator-smoother* (GUZMÁN *et al.*, 2018), da transformada de Park (LOPES *et al.*, 2014) e da transformada *wavelet* (COSTA; SOUZA, 2011).

No que tange à transformada *wavelet*, um sinal pode ser representado de maneira simultânea nos domínios do tempo e da frequência. Em 1992, Daubechies iniciou os estudos e conceituou a Transformada *Wavelet* Discreta (TWD) (DAUBECHIES, 1992). A Transformada *Wavelet* Discreta (TWD) foi originalmente a mais utilizada (SAHA *et al.*, 2010), apesar da existência da Transformada *Wavelet* Discreta Redutante (TWDR), ter sido amplamente utilizada na detecção de transitórios rápidos de falta em SEP (PERCIVAL; WALDEN, 2000). Costa e Souza (2011) recomendam a TWDR como a técnica mais apropriada para detectar transitórios, uma vez que não utiliza o processo de subamostragem por dois, necessário pela TWD, trazendo como consequências a perda de resolução dos sinais no tempo.

Mallat (1989) propôs um algoritmo baseado em processos de filtragem para calcular a TWD. Basicamente, o cálculo é realizado pela convolução dos coeficientes de aproximação c_{i-1} com os filtros passa-baixas (g) e passa-altas (h), como se segue:

$$c_i(k) = \sum_n g(n - 2k)c_{i-1}(n), \quad (3.25)$$

$$d_i(k) = \sum_n h(n - 2k)c_{i-1}(n), \quad (3.26)$$

em que c_i e d_i são os coeficientes de aproximação e detalhe da escala i . Como pode-se perceber, a subamostragem por dois é utilizada no cálculo dos coeficientes descritos nas equações (3.25) e (3.26). Em conformidade com as equações (3.25) e (3.26), os coeficientes de aproximação e detalhe da primeira escala são calculados, por:

$$c_1(k) = \sum_n g(n - 2k)c_0(n), \quad (3.27)$$

$$d_1(k) = \sum_n h(n - 2k)c_0(n), \quad (3.28)$$

sendo $c_1(k)$ e $d_1(k)$ os coeficientes de aproximação e detalhe da primeira escala, respectivamente, e c_0 o sinal original a ser filtrado. Os filtros passa-altas, $h(k)$ e $g(k)$ dependem da *wavelet* mãe utilizada (DAUBECHIES, 1992). Segundo Ngu *et al.* (2009), a *wavelet* mãe Daubechies 4, ou db4, é uma das mais apropriadas para realizar uma detecção rápida dos transitórios em sistemas de potência, e foi implementada, nesta dissertação, para auxiliar o processo de detecção de ondas viajantes. Dessa forma, os coeficientes do filtro passa-baixas da TWD para a *wavelet* db4, são dados por:

$$g(1) = \frac{1 + \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, \quad (3.29)$$

$$g(2) = \frac{3 + \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, \quad (3.30)$$

$$g(3) = \frac{3 - \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, \quad (3.31)$$

$$g(4) = \frac{1 - \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}. \quad (3.32)$$

E do filtro passa-altas, por:

$$h(1) = g(4), \quad (3.33)$$

$$h(2) = -g(3), \quad (3.34)$$

$$h(3) = g(2), \quad (3.35)$$

$$h(4) = -g(1). \quad (3.36)$$

O algoritmo rápido para o cálculo dos coeficientes *wavelet* da TWDR é calculado conforme (COSTA; SOUZA, 2011):

$$w(k) = \sum_{l=1}^L h(l)x(k + l - L), \quad (3.37)$$

desde que $\exists\{x(k - L + 1), \dots, x(k - 1), x(k)\}$; sendo $w(k)$ os coeficientes *wavelet* do sinal x (tensão ou corrente), h os coeficientes do filtro passa altas *wavelet* e $L = 4$ para a *wavelet* db4. Os filtros *wavelet* da TWDR, são obtidos diretamente dos filtros da TWD, conforme:

$$\check{g}(l) = \frac{g(l)}{\sqrt{2}}, \quad (3.38)$$

$$\check{h}(l) = \frac{h(l)}{\sqrt{2}} \quad (3.39)$$

em que $\check{g}(l)$ e $\check{h}(l)$, são os filtros escala e *wavelet* da TWDR, respectivamente.

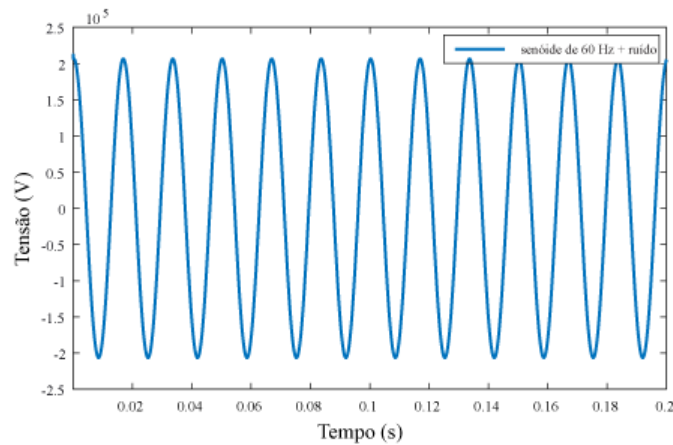
Descreve-se nesta seção o método de detecção implementado para detectar os instantes de tempo em que as ondas viajantes atingem o terminal monitorado da linha de transmissão.

A transformada *wavelet* foi utilizada para auxiliar no processo de detecção das estampas de tempo em que as ondas viajantes atingem o terminal monitorado da LT. Para tanto, a TWDR foi escolhida por não utilizar o processo de subamostragem por dois da TWD, o que resulta numa melhor resolução dos sinais, possibilitando uma detecção mais rápida em comparação à TWD.

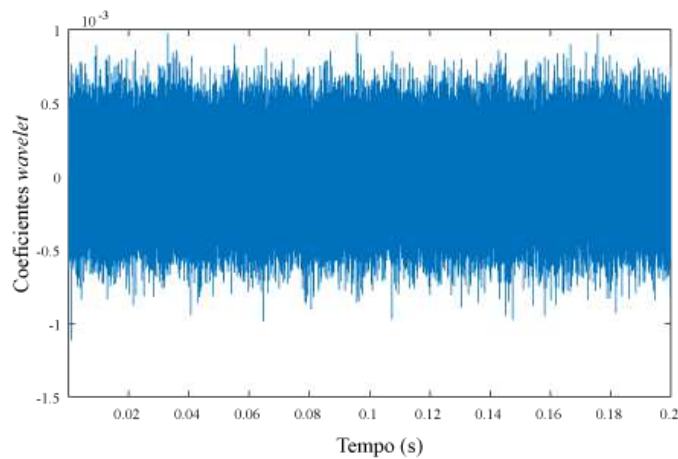
Basicamente, a transformada *wavelet* atua como um filtro. As ondas viajantes são fenômenos tipicamente de alta frequência, que são geradas a partir da ocorrência de curtos-circuitos. Desta forma, o filtro passa-altas, h , da TWDR foi implementado para filtrar as componentes de alta frequência dos sinais de corrente e tornar a visualização e a detecção das ondas viajantes de maneira mais simples.

Os sinais de tensão e corrente senoidais provenientes de SEP, em regime permanente, são compostos basicamente pela componente fundamental, harmônicos e ruídos com distribuição de probabilidade normal (COSTA; SOUZA, 2011). Desse modo, o sinal sem distúrbios representado na Figura 3.7, por exemplo, é composto pela componente de frequência fundamental (60Hz), e, ruído branco, cuja relação sinal-ruído igual a 70 db foi submetido à entrada do filtro passa-altas da TWDR. A resposta obtida na saída está ilustrada na Figura 3.8.

Figura 3.7 – Sinal de tensão senoidal mais ruído.



Fonte: autoria própria.

Figura 3.8 – Coeficientes *wavelet* TWDR.

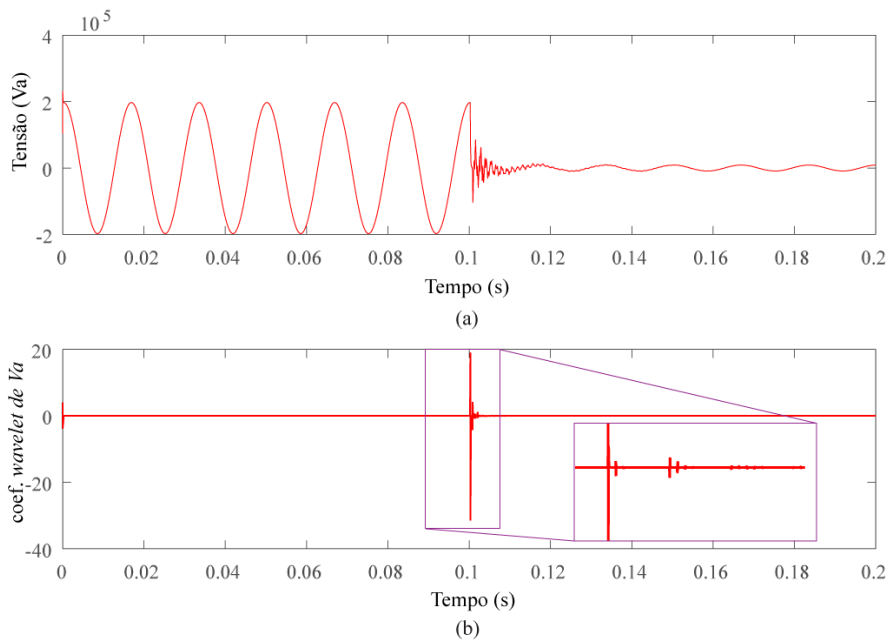
Fonte: autoria própria.

Observa-se na saída do filtro, vide Figura 3.8, que os coeficientes *wavelet* de baixa amplitude são obtidos, uma vez que o sinal de entrada é praticamente uma senoide pura e devido à banda de passagem do filtro, a amplitude dos coeficientes *wavelet* é pequena (COSTA; SOUZA, 2011).

No entanto, quando um sinal de tensão e/ou corrente proveniente de um distúrbio, que contém transitórios de altas frequências, gerados por curtos-circuitos, por exemplo,

é submetido a um processo de filtragem da TWDR a partir do filtro passa-altas h , picos são notados nos instantes em que as ondas viajantes atingem o(s) terminal(is) da linha. Na Figura 3.9, o registro oscilográfico da tensão medida em um dos terminais da LT dos coeficiente wavelet, obtido a partir da simulação de um curto-circuito no ATP, é ilustrado.

Figura 3.9 – Sinal de tensão proveniente da simulação de um curto-circuito monofásico no ATP (a) sinal de tensão da fase A (b) coeficientes *wavelet* da fase A.



Fonte: autoria própria.

Neste sentido, na Figura 3.9 (a), observa-se que a tensão permaneceu em regime permanente até o instante de 0.1 s. No entanto, após tal instante uma variação abrupta da tensão ocasionada por um curto-circuito é observada, de modo que transitórios de falta são gerados. Dessa forma, ondas viajantes são criadas e começam a se propagar ao longo da LT. Quando o sinal ilustrado na Figura 3.9 (a) passa pelo filtro da TWDR, picos e vales são obtidos na saída do filtro nos instantes de tempo em que as ondas viajantes são identificadas no(s) terminal(is) da LT. O primeiro pico representa o instante que a onda incidente é medida no terminal de medição. À medida que essas ondas refletem e refratam dos pontos de discontinuidades da LT, picos são formados

na saída do filtro passa-alta da TWDR, conforme 3.9 (b).

Dessa forma, o processo de detecção envolve, basicamente, a detecção dos vales e/ou picos referentes aos instantes de tempo que as ondas incidentes e/ou refletidas são percebidas no(s) terminal(is) de medição da LT.

Sabe-se que o primeiro pico que aparece na resposta do filtro *wavelet* refere-se à onda que incide no terminal vinda do ponto de falta. Detectar o instante que essa onda atinge o terminal da linha é uma tarefa simples quando comparada à detecção da onda refletida do ponto de defeito. Na literatura, técnicas que estimam o instante de tempo em que as ondas incidentes atingem os terminais da LT são bastante difundidas, principalmente para uso em algoritmos de localização de faltas que utilizam informações de dois terminais da LT (LOPES *et al.*, 2014) (COSTA *et al.*, 2010). Alguns destes algoritmos consideram que os coeficientes *wavelet* encontram-se abaixo de um determinado limiar para o regime permanente de operação, de modo que quando uma variação acima dos limites definidos é detectada, o algoritmo é sensibilizado e a estampa de tempo referente a essa variação é calculada, viabilizando a estimação do local da falta (COSTA; SOUZA, 2011). Todavia, a maioria desses processos não detectam, por muitas vezes, o primeiro pico ou vale que aparece na saída da TWDR, e sim, a sua subida ou descida, respectivamente. No entanto, estas técnicas podem ser sensíveis a ruídos e detecções errôneas podem surgir, dessa forma, de modo que detectar o pico pode ser uma alternativa, sobretudo para aplicações de um terminal.

3.4 Métodos híbridos de localização de faltas

Os métodos de localização de faltas híbridos consistem na junção de duas ou mais técnicas para estimar o ponto de ocorrência de curto-circuito. As limitações de técnicas baseadas em impedância, por exemplo, podem ser superadas quando utilizadas em conjunto com outros métodos, a exemplo dos baseados na teoria de ondas viajantes. Dentre os métodos híbridos que podem ser encontrados na literatura, destaca-se a técnica híbrida que utiliza uma janela geral para estimar a onda refletida do ponto de falta. Tipicamente o ponto de defeito é estimado, inicialmente, por um método baseado em componentes fundamentais e, posteriormente, o resultado obtido é refinado por meio

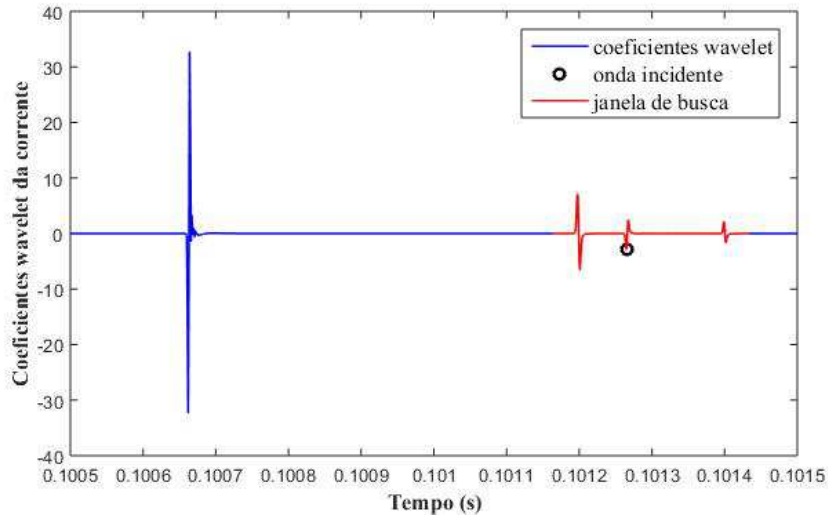
do uso da técnica baseada na teoria de ondas viajantes, cujo objetivo é de reduzir o erro de estimação (XINZHOU *et al.*, 2002).

3.4.1 Técnica reportada em Xinzhou et al. (2002)

A técnica reportada em (XINZHOU *et al.*, 2002) utiliza uma janela de busca empírica para estimar o local de falta. A técnica fasorial reportada em Wiszniewski (1983) é utilizada para estimar a localização de falta, inicialmente. Uma vez estimada a localização pelo método fasorial, uma janela geral é construída e, por meio do uso da Transformada *wavelet*, a onda viajante contida dentro dessa janela, que possua a mesma polaridade da onda incidente, é detectada e o local de falta é novamente estimado por meio da rotina baseada na teoria de ondas viajantes de um terminal. A janela construída utiliza a localização estimada por Wiszniewski (1983) e o comprimento da LT, conforme equação (3.40):

$$x = d_f \pm 10\%L, \quad (3.40)$$

sendo x os limites da referida janela, d_f a localização estimada pelo método fasorial e L , o comprimento da LT. Um exemplo da aplicação da técnica é mostrado na Figura 3.10, em que um curto-circuito monofásico foi aplicado a 90 km do terminal monitorado, com resistência de falta de 10 Ω e ângulo de incidência de falta de 90°.

Figura 3.10 – Exemplo explicativo da técnica reportada em Xinzhou *et al.* (2002).

Fonte: autoria própria.

A partir da Figura 3.10, observa-se que o primeiro pico é negativo e corresponde ao tempo em que a onda incidente atingiu o terminal monitorado. Como o pico da onda incidente é negativo, a onda refletida do ponto de falta também terá polaridade negativa, tal afirmação pode ser confirmada conforme equação (3.21) do coeficiente de reflexão de ondas viajantes. A impedância de terminação da LT, Z_t , é dada pelo paralelo da resistência de falta e da impedância característica da LT. Dessa forma, para que as ondas refletidas de corrente tenham a mesma polaridade da onda incidente, é necessário apenas que $Z_c > 0$, o que é verdade. Neste exemplo, o local de falta estimado pelo método fasorial foi de 94,74 km, resultando em um erro percentual de 2,37%. A janela de busca compreende toda a faixa em vermelho da Figura 3.10 definida pela equação (3.40). O primeiro pico negativo referente à onda refletida está destacado na Figura 3.10, que resulta em uma distância de falta de 89,73 km e um erro percentual de 0,13%. Dessa forma, conclui-se que o algoritmo híbrido foi capaz de refinar o resultado e reduzir o erro de localização de falta.

3.5 Síntese do capítulo

Neste capítulo uma fundamentação teórica sobre técnicas de localização de faltas baseadas em componentes fundamentais e na teoria de ondas viajantes foi apresentada.

Para estimar o local da falta por meio do uso de técnicas de localização baseadas em componentes fundamentais, os fasores dos sinais de tensão e corrente precisam ser previamente estimados. Além disso, os fasores de entrada dos algoritmos baseados em componentes fundamentais são definidos por meio de uma prévia classificação da falta ocorrida. Estes algoritmos são normalmente reportados como de simples implementação e demandam uma baixa taxa de amostragem.

Já os métodos baseados na teoria de ondas viajantes se baseiam na detecção das estampas de tempo em que as ondas geradas por faltas são medidas no terminal, ou terminais monitorados da LT. A aplicabilidade dessas técnicas depende da alta taxa de amostragem dos sinais de entrada, para que seja possível a detecção das ondas viajantes, uma vez que estas são fenômenos de alta frequência.

Por fim, o algoritmo híbrido clássico reportado em (XINZHOU *et al.*, 2002) foi apresentado. O qual utiliza funções baseadas em componentes fundamentais e na teoria de ondas viajantes para refinar a estimação do local de defeito.

Capítulo 4

Revisão Bibliográfica

Curtos-circuitos podem ocorrer nos diferentes elementos do SEP. Por estarem mais expostas e devido as grandes distâncias que percorrem, as LT estão mais suscetíveis a ocorrência de faltas (SAHA *et al.*, 2010). Para evitar longos períodos de interrupção e garantir a continuidade e confiabilidade do fornecimento de energia elétrica, a aplicação de métodos de localização de faltas em dispositivos de proteção são imprescindíveis. Dessa forma, o estudo de técnicas de localização de faltas vêm crescendo ao longo dos anos e têm proporcionado o avanço tecnológico dos equipamentos de proteção e de aquisição de dados (REPORT, 1955), (SAHA *et al.*, 2010). Dentre as técnicas de localização de faltas para linhas de transmissão reportadas na literatura, duas serão objeto de estudo deste trabalho: as técnicas baseadas em componentes fundamentais e as técnicas baseadas na teoria de ondas viajantes. Sendo assim, neste capítulo uma revisão bibliográfica de tais técnicas são apresentadas.

4.1 Técnicas baseadas em componentes fundamentais

Técnicas baseadas em componentes fundamentais foram e ainda são tipicamente utilizadas em relés de proteção tradicionais. Tais técnicas utilizam os fasores de corrente e tensão medidos em uma ou ambas as extremidades da linha para estimar a localização da falta, em que requererem baixas taxas de amostragem e pouco esforço computacional para sua execução. Apesar de serem reportados como de simples implementação, essas rotinas são sensíveis a fatores como resistência de falta, corrente de

carga, efeito capacitivo da LT, saturação de TC, entre outros, que podem afetar diretamente o desempenho dos métodos de localização de faltas baseadas em componentes fasoriais (SAHA *et al.*, 2010) (DAS *et al.*, 2014) (GAMA, 2018) .

Os primeiros métodos de localização de curtos-circuitos baseados em componentes fundamentais propostos utilizavam informações de apenas um terminal da linha. A não necessidade do uso de canais de comunicação e da sincronização de dados foram fatores cruciais que impulsionaram a proposição de tais soluções. Dentre as técnicas de localização baseadas em componentes fundamentais de um terminal que podem ser encontradas na literatura, o método de reatância simples reportado em (SAHA *et al.*, 2010), parte do pressuposto de que o sistema é homogêneo e que as correntes das barras local e remoto apresentam o mesmo ângulo de fase, e portanto, a impedância de falta é puramente resistiva. Dessa forma, tal método elimina a resistência de falta do cálculo da estimação do local do curto-circuito considerando apenas as componentes imaginárias dos fasores de tensão e corrente monitorados. Contudo, para sistemas não homogêneos, as correntes nos terminais da LT não se encontram em fase, de modo que a impedância de falta é um número complexo e apresenta uma reatância adicional ao curto-circuito. Dito isto, omitir esta reatância introduz um erro nas estimativas dos locais de ocorrência do defeito (IEEE, 2005).

Takagi *et al.* (1982), por sua vez, com o objetivo de melhorar o desempenho do método da reatância simples, introduziu no seu equacionamento componentes do circuito de pré-falta e de falta, os quais podem ser analisados por meio do princípio da superposição, conforme descrito na seção 3.2.3. No entanto, a técnica assume que a corrente de carga permanece a mesma antes e durante o curto-circuito, o que pode resultar em uma fonte de erros de estimação. Além disso, o método assume que a rede de transmissão é homogênea, ou seja, que a impedância da fonte local e remota possuem o mesmo ângulo de impedância da LT. Dessa forma, o sucesso do método depende do grau de homogeneidade da rede. A fim de melhorar o método proposto, Takagi *et al.* (1982) apresenta o método de Takagi modificado, o qual utiliza a rede de sequência zero para compensar um sistema não homogêneo e a corrente de sequência zero ao invés da corrente pura de falta. Apesar do método mostrar-se superior em relação ao método de Takagi (TAKAGI *et al.*, 1982), a estimativa do local de falta depende do

conhecimento do valor da impedância de sequência zero da fonte do terminal remoto.

Já o método reportado em Eriksson *et al.* (1985), também de um terminal, utiliza o fator de distribuição de corrente em seu equacionamento e os parâmetros de impedância da fonte para tentar superar o erro de reatância, de carga ou de não homogeneidade do sistema (DAS *et al.*, 2014). No entanto, a depender de como os parâmetros utilizados para o equacionamento são obtidos, a estimativa da localização do curto-circuito pode ser afetada. Basicamente, a distância da falta é estimada a partir de uma equação quadrática que pode assumir dois valores possíveis. O valor obtido entre zero e um pu é escolhido como sendo a estimativa da localização da falta.

Novosel *et al.* (1998) propõem uma versão modificada do método apresentado em Eriksson *et al.* (1985) e assume o modelo de carga de impedância constante. Todavia, a técnica só pode ser aplicada em LT radiais, uma vez que todas as cargas servidas pela LT são agrupadas no final do alimentador.

Com o objetivo de compensar o erro introduzido pelo efeito da resistência de falta, Wiszniewski (1983) propõe um método de um terminal. Contudo, o sucesso do algoritmo depende dos valores assumidos para o fator de distribuição de corrente e do ângulo de fase da impedância, o que a depender da configuração da rede concomitantemente às suposições feitas para estimar o local de falta, os erros de localização podem ser significativos.

Dispostos a considerar o efeito capacitivo da LT em suas formulações, Alves (2008) e Salim *et al.* (2011) apresentam métodos baseados em componentes fundamentais de um terminal. Todavia, consideram impedâncias de falta puramente resistivas, o que pode ocasionar em erros de estimação da localização do curto-circuito, de forma análoga aos métodos da reatância simples e de Takagi.

Com vistas a reduzir os erros causados pela corrente de carga e não homogeneidade do sistema, bem como a não necessidade de classificação do tipo de falta, algoritmos de dois terminais foram propostos. Dentre eles, pode-se citar os algoritmos descritos em He *et al.* (2011), Johns e Jamali (1990), Tziouvaras *et al.* (2001), entre outros. Contudo, dentre as limitações de tais funcionalidades estão a necessidade de sincronização de dados dos terminais da LT e das fontes conectadas aos terminais da linha.

Assim, cada algoritmo baseado em componentes fundamentais tem requisitos espe-

cíficos de dados de entrada e faz certas suposições para estimar a distância do ponto de defeito. Essas suposições podem ou não ser verdadeiras, a depender das condições de falta avaliadas. Dessa forma, nenhum algoritmo de localização de faltas tem ótimo desempenho para vários cenários de localização de faltas diferentes. Escolher a melhor abordagem para localizar faltas a partir de uma ampla seleção de algoritmos de localização de faltas baseados em impedância é, portanto, uma tarefa difícil e requer uma compreensão detalhada do princípio de funcionamento por trás de cada algoritmo de localização de faltas.

4.2 Técnicas baseadas no domínio do tempo

As técnicas de localização de faltas baseadas no domínio do tempo utilizam as estampas de tempo, identificadas em um ou mais terminais da LT para estimar o local de curto-circuito. Desse modo, podem, basicamente, utilizar dados de um, dois, ou mais terminais da linha.

4.3 Funções de dois terminais

Os métodos de localização de faltas baseados em ondas viajantes que utilizam informações de dois terminais monitorados da linha, são comumente reportados como mais robustos frente a métodos de um terminal, uma vez que não necessitam da detecção de ondas refletidas do ponto de falta. Neste cenário, Jian *et al.* (1998) propuseram uma nova concepção para localização de faltas a partir de dois terminais, em que duas velocidades de propagação são utilizadas e obtidas a partir da frequência dominante dos distúrbios por meio de parâmetros de dilatação da transformada *wavelet*. Contudo, a necessidade da identificação das frequências dominantes dos sinais monitorados para estimar duas velocidades de propagação se configura como uma das limitações da técnica proposta, além disso, na época já existiam algoritmos de dois terminais reportados na literatura que utilizavam somente uma velocidade de propagação das ondas viajantes baseadas nos parâmetros da LT, e que exibiram melhores resultados (GALE *et al.*, 1993).

Com o propósito de eliminar as limitações impostas pelo uso da velocidade de propagação, Gilany *et al.* (2006) apresentaram uma técnica que não depende da velocidade, mas que requer a detecção de ondas refletidas do ponto de falta, recaindo nas mesmas limitações de algoritmos de um terminal. Além disso, o método necessita de um equipamento conectado ao TPC para detectar altas frequências dos sinais de tensão, o que pode impossibilitar sua aplicabilidade devido à aquisição de dispositivos adicionais. Similamente a Gilany *et al.* (2006), Feng *et al.* (2008) propôs um método que não depende da velocidade das ondas viajantes e que utiliza a transformada *wavelet* na detecção dos transitórios, entretanto, o uso de *Global Positioning System* (GPS) para sincronizar os instantes iniciais dos transitórios representa uma limitação do método, uma vez que a perda de sincronização entre os terminais da linha pode resultar em erros na estimativa dos locais de ocorrência dos curtos-circuitos.

O interesse dos pesquisadores em busca de novas formulações imunes a necessidade de sincronização entre os terminais da linha tem proporcionado o desenvolvimento de novas técnicas, a exemplo dos trabalhos reportados em Lopes (2016) e Lopes *et al.* (2017), nos quais, métodos que não necessitam de sincronização de dados são propostos. Todavia, em Lopes (2016), o método só pode ser aplicado para faltas aterradas, enquanto em Lopes *et al.* (2017) a necessidade de detecção de ondas refletidas recai nas limitações impostas por algoritmos de um terminal. Além disso, algumas técnicas de dois terminais são dependentes de parâmetros da linha, como comprimento e velocidade de propagação e todas requerem canais de comunicação, que podem ser sincronizados ou não, para troca de informações. Neste sentido, estimativas imprecisas podem ser obtidas em caso de falta de sincronização entre os canais, caso o método necessite de canais de comunicação sincronizados. Ademais, a necessidade do canal de comunicação pode aumentar os custos com aquisição de equipamentos, de modo que funções de um terminal seriam mais interessantes, caso melhores soluções fossem encontradas.

4.3.1 Funções de um terminal

Técnicas que utilizam dados de apenas um terminal da linha surgem como soluções alternativas quando canais de comunicação não se encontram disponíveis, além de serem atrativas do ponto de vista econômico.

O interesse por pesquisadores em funções baseadas em ondas viajantes que utilizam dados de um terminal remontam ao século passado. Uma das primeiras técnicas foi proposta por Crossley e McLaren (1983), em que o conceito de correlação, entre ondas progressivas e regressivas para determinar o tempo que a onda incidente e a respectiva onda refletida atinge o terminal monitorado, de modo a estimar a zona de proteção associada ao local do curto-circuito, foi proposto. Nesse aspecto, McLaren e Rajendra (1985) apresentaram melhorias no esquema proposto por Crossley e McLaren (1983), entretanto a escassez de avaliações, sobretudo considerando casos para resistências de faltas elevadas e ângulos de incidência próximos a 0° , não possibilitou aferir a viabilidade e o desempenho dessas técnicas.

Com a intenção de melhorar a técnica proposta por Crossley e McLaren (1983), Shehab-Eldin e McLaren (1988) propuseram o uso de duas janelas de tamanhos diferentes na função de correlação, sendo uma janela curta e outra longa. Todavia, determinar o tamanho ideal da janela é uma tarefa difícil, visto que janelas muito longas dificultam a detecção das ondas refletidas, ao passo que janelas curtas aumentam a probabilidade do algoritmo detectar transitórios que não procedem do curto-circuito.

No mesmo sentido, com o objetivo de determinar o intervalo de tempo entre as primeiras frentes de ondas incidentes e refletidas do ponto de falta, Christopoulos *et al.* (1988) propuseram um esquema de proteção de LT que se baseia na amplitude dos sinais de tensão para estimar o local do distúrbio. Segundo os próprios autores, o esquema é falho para faltas próximas ao terminal monitorado da linha e para faltas monofásicas com ângulos de incidência inferiores a 10° . Apesar de um conjunto considerável de avaliações terem sido realizadas, análises dos sinais de tensão provenientes de TPC não foram realizadas.

Posteriormente, Jie *et al.* (1999) propuseram um algoritmo adaptativo que usa duas funções de correlação para aumentar a magnitude dos picos da função referida. Como em Crossley e McLaren (1983), os autores removeram os valores médios dos sinais de tensão e corrente com vistas a eliminar a influência da componente CC na função de correlação. Todavia, este mecanismo não elimina o impacto de componentes de baixa frequência, podendo comprometer a detecção correta dos picos. Procedimentos similares ao proposto por Crossley e McLaren (1983) são reportados em Aurangzeb

et al. (2000), Aurangzeb *et al.* (2001) e Jamali e Ghezljeh (2004), no entanto os algoritmos não identificam as ondas refletidas de forma automática, sendo necessária a realização de análises manuais para realizar tal identificação.

Ainda no cenário de técnicas que utilizam funções de correlação, Liang *et al.* (2000) apresentaram uma função baseada na transformada *wavelet* obtida a partir de três escalas. Contudo, o SEP praticamente sem ruído utilizado nas simulações e a falta de testes considerando cenários críticos como faltas com ângulos de incidência de falta próximos a 0° , podem ser considerados como limitações do trabalho. Neste âmbito, destaca-se o trabalho proposto por Reis (2019), que utiliza a Transformada de *Park* para correlação entre ondas progressivas e regressivas, o que elimina a necessidade de classificar previamente o tipo de falta, além de apresentar bom desempenho para maiores resistências.

Visando contornar as limitações inerentes à identificação da onda refletida do ponto de falta, Liu *et al.* (2012) propuseram um método que utiliza velocidades do modo aéreo e do modo terra. A partir da detecção das ondas incidentes desses modos é possível estimar a localização do curto-circuito. No entanto, a velocidade de propagação do modo terra depende de parâmetros como a resistividade do solo, que nem sempre estão disponíveis, o que pode ocasionar imprecisões na utilização da técnica. Ademais, a aplicação desta técnica é restrita a faltas monofásicas, o que limita sua aplicação para outros tipos de curtos-circuitos. Métodos similares que utilizam modos terra e aéreos direta ou indiretamente são encontrados em Xu e Dong (2014), Lei *et al.* (2015).

Para contornar as dificuldades acerca do modo terra, Spoor e Zhu (2006) reportaram uma técnica que utiliza apenas velocidades de modo aéreo. A localização do curto-circuito é determinada a partir da detecção da onda incidente e da onda refletida do ponto de falta, a qual é feita com base na polaridade das ondas. Todavia, como em Kale *et al.* (2012), Eng e Ramar (2009), Xie *et al.* (2013) e Altay *et al.* (2014), testes para topologias que possuem linhas curtas adjacentes não são realizados, o que configura-se como uma limitação do trabalho, dado que ondas refletidas do ponto de falta podem ser confundidas com ondas refletidas e/ou refratadas de outras terminações do sistema elétrico.

Em Guzmán *et al.* (2018), um método baseado em *Repeating Travel Time* (RTT)

é proposto, sendo a estimativa da onda refletida indicada pela análise de tempos esperados de chegada das ondas *Expected Traveling Wave* (ETW). Testes indicando o funcionamento do algoritmo são apresentados, entretanto a atenuação de ondas refletidas devido a parâmetros de falta pode prejudicar no desempenho do método. Além disso, detecções incorretas das ondas viajantes refletidas podem ocorrer para cenários com linhas adjacentes curtas conectadas ao terminal monitorado.

4.3.1.1 Métodos Híbridos

Diante das dificuldades de se determinar corretamente as ondas refletidas, pesquisas têm sido realizadas na tentativa de propor soluções aliando os benefícios da exatidão de técnicas baseadas em ondas viajantes com a simplicidade de aplicações fasórias. Nestes casos, segundo Xinzhou *et al.* (2002), os métodos híbridos têm a capacidade de combinar a robustez dos algoritmos baseados em fasores para garantir a estimação da região de ocorrência do curto-circuito, e a exatidão dos algoritmos baseados em ondas viajantes para estimar corretamente o local de falta. Conforme Xinzhou *et al.* (2002), o método híbrido é capaz de superar as desvantagens dos métodos baseados em fasores e dos métodos baseados na teoria de ondas viajantes quando são aplicados sozinhos.

Em Xinzhou *et al.* (2002), por exemplo, a região da LT submetida à falta é estimada a partir de um limiar pré-definido pelos autores, o qual compreende 10% do comprimento da LT para a direita e para a esquerda a partir do local estimado pelo método fasorial. Uma vez determinada a região que supostamente ocorreu o curto-circuito, o algoritmo detecta a onda viajante contida na região de busca. Apesar dos bons resultados obtidos pelos autores, a onda refletida do ponto de falta pode estar além dos limites pré-definidos de 10%, uma vez que o erro relacionado à estimação dos métodos fasoriais dependem dos parâmetros de falta, principalmente da resistência de falta (PHADKE; THORP, 2009), ou até mesmo dos TI (DAS *et al.*, 2014) (REIS, 2019).

De modo a aprimorar o método proposto em Xinzhou *et al.* (2002), uma expressão matemática é utilizada para indicar o campo de busca da onda refletida em Dong *et al.* (2008). Basicamente, a equação matemática é ajustável para uma faixa de erro de 3%, que aumenta com a distância do curto-circuito e não depende da resistência de

falta. No entanto, sabe-se que as técnicas fasoriais são sensíveis a resistências de faltas elevadas, sendo maiores os erros de estimação, geralmente, obtidos para resistências de faltas elevadas. Portanto, o método proposto em Dong *et al.* (2008) pode não estimar corretamente a região de ocorrência do curto-circuito.

Técnicas híbridas semelhantes a proposta por Xinzhou *et al.* (2002), que utilizam 10% do comprimento da LT para definir uma região de busca da onda refletida, são reportadas em Zheng *et al.* (2008) e Zheng *et al.* (2009). No entanto, recaem nas mesmas limitações do método proposto por Xinzhou *et al.* (2002). Além disso, também configuram-se como limitações desses trabalhos a baixa taxa de amostragem e precisão comprometida para ângulos de incidência de falta de 0° . Métodos similares são denotados em Huang *et al.* (2011), Schweitzer *et al.* (2016), Sharma e Mynam (2019) e Pathirana *et al.* (2002).

4.4 Síntese do capítulo

Apresenta-se na Tabela 4.1, uma síntese do levantamento bibliográfico realizado nesta dissertação. No que tange às técnicas baseadas em componentes fundamentais, sabe-se que grande parte delas têm suas estimações influenciadas pelo aumento da resistência do curto-circuito. Além disso, a necessidade do uso de parâmetros da linha e da fonte se configuram como fontes de erros, uma vez que existe a necessidade da estimação correta desses valores para que os algoritmos baseados em fasores possam funcionar corretamente.

No que concerne aos métodos baseados em ondas viajantes de um terminal, sabe-se da dificuldade em se detectar corretamente a onda refletida do ponto de falta, uma vez que essas ondas podem ser confundidas com ondas refletidas e até mesmo refratadas de outros pontos de descontinuidades do SEP. Já os métodos baseados em ondas viajantes de dois terminais, apesar de mais robustos, dependem de canais de comunicação que podem necessitar de sincronização ou não. Quanto a algoritmos que dependem de canais de comunicação sincronizados, uma possível perda de referência entre os canais se configura como uma fonte de erros, visto que pode levar a uma estimação incorreta do local da falta.

Além disso, têm-se disponível na literatura alguns métodos que utilizam o conceito tanto de métodos fasoriais quanto de técnicas baseadas em ondas viajantes. Sabe-se que a precisão de tais métodos pode ser afetada pelas limitações de ambas as técnicas. No entanto, alinhar as vantagens de ambos os métodos pode trazer resultados promissores. Dentre as limitações desta classe de métodos encontra-se, principalmente, o uso de janelas de buscas, para determinar a região da linha em que ocorreu a falta, não adaptativas. Sabe-se que o erro de estimação das técnicas fasoriais pode ser expressivo a depender dos parâmetros de falta, principalmente da resistência, e, portanto, a janela utilizada pode não cobrir a área que realmente aconteceu o curto-circuito, fazendo com que o algoritmo baseado em ondas viajantes detecte incorretamente a onda refletida da falta.

Diante disso, nesta dissertação propõe-se um aprimoramento das técnicas híbridas baseadas em componentes fundamentais e na teoria de ondas viajantes, na qual, uma janela de busca apropriada e adaptativa, que é função da resistência de falta e da corrente de carga, é proposta, de modo a superar uma das limitações dos métodos híbridos tradicionais. Além do mais, a detecção proposta de ondas viajantes é feita de maneira automática, algo que raramente ocorre na proposição de tais soluções.

Tabela 4.1 – Resumo da revisão bibliográfica

Autores	QTM		CM	RPLT	PROCEDIMENTO UTILIZADO			COR
	1	2			PI	DT	AE	
(DAS <i>et al.</i> , 2014)	X	-	CF	X	-	-	-	
(TAKAGI <i>et al.</i> , 1982)	X	-	CF	X	-	-	-	
(ERIKSSON <i>et al.</i> , 1985)	X	-	CF	X	-	-	-	
(NOVOSEL <i>et al.</i> , 1998)	X	-	CF	X	-	-	-	
(WISZNIEWSKI, 1983)	X	-	CF	X	-	-	-	
(HE <i>et al.</i> , 2011)	-	X	CF	X	-	-	-	
(JOHNS; JAMALI, 1990)	-	X	CF	X	-	-	-	
(TZIOUVARAS <i>et al.</i> , 2001)	-	X	CF	X	-	-	-	
(CROSSLEY; MCLAREN, 1983)	X	-	OV	-	-	X	X	
(MCLAREN; RAJENDRA, 1985)	X	-	OV	-	-	X	X	
(SHEHAB-ELDIN; MCLAREN, 1988)	X	-	OV	-	-	X	X	
(CHRISTOPOULOS <i>et al.</i> , 1988)	X	-	OV	-	-	-	-	
(LIANG <i>et al.</i> , 2000)	X	-	OV	-	-	X	-	
(REIS, 2019)	X	-	OV	-	-	X	X	
(SPOOR; ZHU, 2006)	X	-	OV	-	-	X	-	
(GILANY <i>et al.</i> , 2006)	-	X	-OV	-	-	X	-	
(GALE <i>et al.</i> , 1993)	X	X	OV	-	-	-	-	
(LOPES, 2016)	-	X	OV	-	-	X	-	
(XINZHOU <i>et al.</i> , 2002)	X	-	MH	-	-	X	-	
(DONG <i>et al.</i> , 2008)	X	-	MH	-	-	X	-	
(XINZHOU <i>et al.</i> , 2002)	X	-	MH	-	-	X	-	
(ZHENG <i>et al.</i> , 2008)	X	-	MH	-	-	X	-	
MÉTODO PROPOSTO	X	-	MH	-	-	X	-	

LEGENDA:

QTM = QUANTIDADE DE TERMINAIS MONITORADOS

CM = CLASSIFICAÇÃO DO MÉTODO

RPLT = REQUER PARÂMETROS DA LINHA DE TRANSMISSÃO

PI = PROCESSO ITERATIVO

DT = DETECÇÃO DE TRANSITÓRIOS

AE = ANÁLISE ESPECTRAL

COR = CORRELAÇÃO CF = COMPONENTES FUNDAMENTAIS OV = ONDAS VIAJANTES MH = MÉTODO HÍBRIDO

Capítulo 5

Análise comparativa de métodos de localização de faltas baseados em fasores

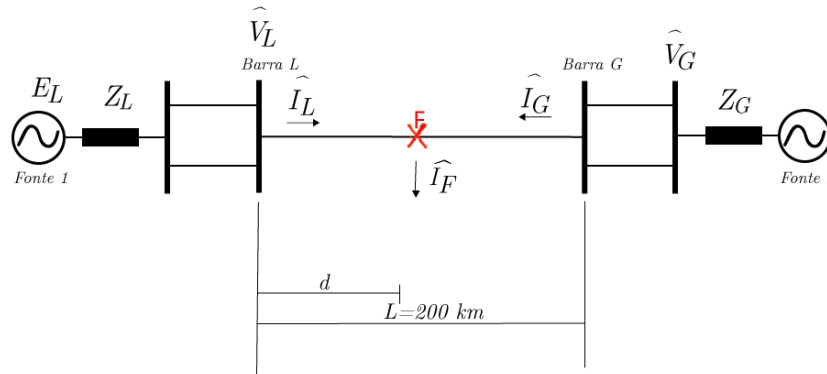
Avalia-se, neste capítulo, o desempenho de técnicas de localização de curtos-circuitos de um terminal baseadas em componentes fundamentais, por meio de análises de sensibilidade de parâmetros de falta, que podem se configurar como fontes de erros na estimação do ponto de ocorrência do distúrbio. Para tanto, inicia-se este capítulo apresentando a metodologia utilizada durante os estudos e as técnicas avaliadas. Por fim, apresenta-se os resultados e discussões por meio de comparações de desempenho das referidas funcionalidades.

5.1 Metodologia de análise

O sistema elétrico teste de 230 kV/60 Hz, representado na Figura 5.1 foi utilizado para realizar as avaliações. Este SEP é composto por uma LT de 200 km de comprimento e linhas de 80 km adjacentes às barras L e G . Para tanto, curtos-circuitos foram aplicados ao longo da linha de 200 km, a fim de realizar as análises das técnicas de localização baseadas em componentes fundamentais. As LT foram modeladas a partir de parâmetros distribuídos dependentes na frequência, cujo modelo de linha escolhido foi o modelo de JMartí (MARTI, 1982). Os parâmetros utilizados para a modelagem estão ilustrados na Figura 5.2. Conforme Figura 5.2, a perfeita transposição dos condutores foi considerada, uma vez que, segundo ONS (2022b), LT com comprimentos

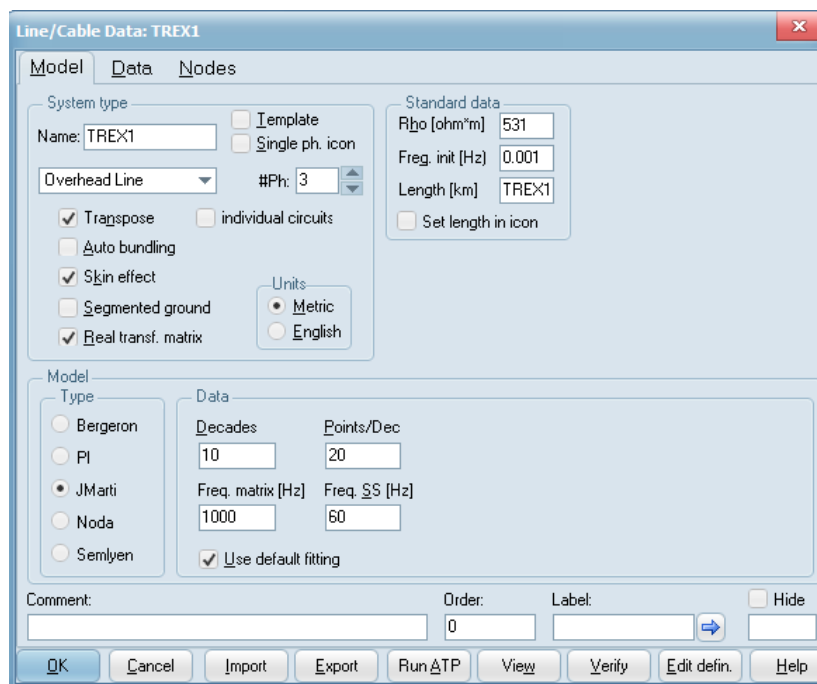
maiores do que 100 km devem ser transpostas. Além disso, o efeito corona e a matriz real de transformação de impedância também foram assinaladas.

Figura 5.1 – Representação do sistema elétrico analisado.



Fonte: autoria própria.

Figura 5.2 – Parâmetros utilizados para modelar a LT a partir do modelo JMarti.

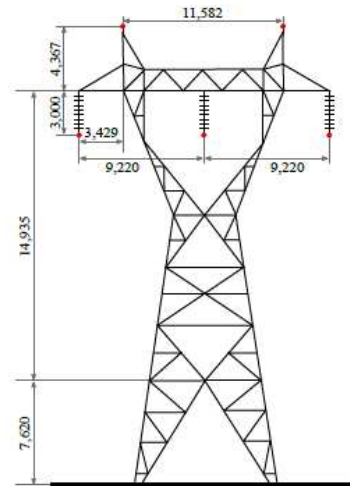


Fonte: autoria própria.

Os dados geométricos da torre de transmissão utilizados para modelar a LT são

de uma linha real do SIN (REIS, 2019), os quais encontram-se ilustrados na Figura 5.3. Os parâmetros do condutor são do tipo MCM 636.0 MCM 26/7 por fase, e a resistividade do solo igual a $531 \Omega.m$. As medições de tensão e corrente repassadas aos algoritmos localizadores de faltas são fornecidos por um TPC e TC reportados na literatura (IEEE, 2004). Os dados das fontes estão dispostos na Tabela 5.1.

Figura 5.3 – Parâmetros geométricos da torre de transmissão.



Fonte: (REIS, 2019).

Tabela 5.1 – Dados das fontes.

Fontes	Tensão (kV)	Sequência Positiva (Ω)	Sequência Zero (Ω)
\hat{E}_L	$230 \angle 0^\circ$	$0,0346 + j0,3005$	$0,4177 + j1,5238$
\hat{E}_G	$225,4 \angle 15^\circ$	$0,0346 + j0,3005$	$0,4177 + j1,5238$

5.1.1 Notação adotada

Para proporcionar uma melhor compreensão dos métodos aqui denotados, uma mesma notação foi adotada, a qual é apresentada na Figura 5.1. Desta forma, o terminal 'Barra L' representa o terminal monitorado ou de medição, e 'Barra G' o terminal remoto, sendo: $\hat{V}_L, \hat{V}_G, \hat{I}_L$ e \hat{I}_G os fasores de tensão e corrente nos terminais da

linha e Z_L e Z_G as impedâncias equivalentes de Thévenin entre as fontes e o barramento vizinho.

Na prática, os sinais de tensão e corrente provenientes de SEP não são senóides puras, pois além da componente fundamental, apresentam em sua constituição componentes harmônicas e ruídos com distribuição de probabilidade normal (COSTA *et al.*, 2010). Assim, um ruído gaussiano branco com SNR de 70 dB, valor típico em sistemas elétricos de potência devido aos equipamentos de medição (DJURIĆ; DJURIŠIĆ, 2008), foi adicionado aos sinais de tensão e corrente obtidos a partir das simulações realizadas no ATP, para proporcionar a entrada de sinais mais realísticos nos algoritmos de localização. Para evitar a sobreposição de espectros foram aplicados aos sinais de entrada dos algoritmos de localização de faltas filtros anti-aliasing do tipo Butterworth de terceira ordem, com frequências de corte de 180 Hz para os algoritmos baseados em fasores. O algoritmo de Fourier de ciclo completo (PHADKE; THORP, 2009) foi implementado para realizar a estimação fasorial dos sinais utilizados como entradas das técnicas aqui avaliadas. Os sinais de tensão e corrente foram amostrados a uma frequência de 960 Hz, taxa esta normalmente utilizada em aplicações de técnicas de localização de faltas baseadas em impedância (PHADKE; THORP, 2009). Foram utilizados fasores calculados após 1,5 ciclos do instante inicial da falta para estimar o ponto de curto-circuito. Para efeitos comparativos, o erro percentual de localização de falta para cada simulação foi calculado por:

$$\varepsilon(\%) = \frac{|d - \tilde{d}|}{L} \cdot 100\%, \quad (5.1)$$

em que d é a distância real da falta, \tilde{d} a distância estimada do ponto de curto-circuito e L o comprimento da LT em km. Ao todo, uma quantidade de 282 simulações de falta foram realizadas no ATP, que compreendem uma combinação dos parâmetros apresentados na Tabela 5.2. Basicamente, foram simulados cenários com resistências de faltas (R_F) de 1, 10, 100 e 200 Ω , além de ângulos de incidência de falta (Θ) com valores de 0, 30, 60 e 90 graus e diferentes tipos de faltas, a saber: falta monofásicas (AT), bifásicas (BC), bifásicas-terra (BCT) e faltas trifásicas (ABC).

Tabela 5.2 – Cenários Avaliados.

Modelo de LT	R_f	Θ	Tipos de Faltas	Distância da Falta
J.Martí	1, 10, 100, 200	0,01;30;60;90	AT, BC, BCT, ABC	10:10:190

A seguir, uma breve descrição dos métodos avaliados é apresentada.

5.2 Apresentação dos métodos avaliados

Algoritmos baseados em componentes fundamentais requerem a classificação correta do tipo de falta, sendo este tópico não avaliado nesta dissertação, uma vez que não se configura como estudo central. Para tanto, admite-se que os cenários aqui avaliados foram classificados quanto ao tipo de falta de maneira aceitável. Um total de cinco métodos clássicos de localização de faltas baseados em fasores de um terminal foram avaliados, a saber: método de Takagi (TK) (TAKAGI *et al.*, 1982), método de Takagi modificado (TKM) (TAKAGI *et al.*, 1982), método de Wiszniewski (WZ) (WISZNIEWSKI, 1983), método de Eriksson(ER) (ERIKSSON *et al.*, 1985) e método de Novosel (NV) (NOVOSEL *et al.*, 1998).

Por conveniência, a equação (3.10) será replicada na equação (5.2) para facilitar o entendimento dos métodos avaliados neste trabalho.

$$Z_{app} = \frac{\hat{V}_L}{\hat{I}_L} = Z_{LF} + R_F \frac{\hat{I}_F}{\hat{I}_L}. \quad (5.2)$$

Dito isto, apresenta-se a seguir uma breve descrição dos métodos avaliados.

5.2.1 Método de Takagi (TK)

O método de Takagi (TAKAGI *et al.*, 1982) faz uso de dados de pré-falta para reduzir a influência do carregamento do sistema a partir do uso da corrente incremental. Como $\hat{I}_F = \frac{\Delta \hat{I}_L}{k}$, equação (3.13), e $Z_{LF} = dZ_{l1}$, tem-se que, substituindo em (5.2):

$$\hat{V}_L \Delta \hat{I}_L^* = dZ_{l1} \Delta \hat{I}_L^* + R_f \frac{1}{k}, \quad (5.3)$$

em que $*$ é um operador que representa o conjugado complexo de um número complexo. O método TK considera que a rede é homogênea, o que implica que R_F e k são

reais. Dessa forma, a estimativa da localização da falta é calculada pelas componentes imaginárias da Equação (5.3), conforme:

$$d_f = \frac{\text{imag}(\hat{V}_L \cdot \Delta \hat{I}_L)}{\text{imag}(Z_{L1} \cdot \hat{I}_L \cdot \Delta \hat{I}_L)}. \quad (5.4)$$

5.2.2 Método de Takagi Modificado (TKM)

O método de Takagi modificado consiste em uma outra versão do método apresentado em Takagi *et al.* (1982). Basicamente, o método de Takagi modificado substitui o uso da corrente pura de falta pela corrente de sequência zero (\hat{I}_{L0}), além de considerar o ângulo ϕ do fator de distribuição de corrente k . Dessa forma, a localização do curto-circuito pelo método TKM é estimada por:

$$d_f = \frac{\text{imag}(\hat{V}_L \cdot 3\hat{I}_{L0} \cdot e^{-j\phi})}{\text{imag}(Z_{L1} \cdot \hat{I}_L \cdot 3\hat{I}_{L0} e^{-j\phi})}. \quad (5.5)$$

5.2.3 Método Wiszniewski (WZ)

A técnica reportada em Wiszniewski (1983), utiliza em sua formulação as grandezas de pré-falta e o fator de distribuição de corrente. Partindo da Equação (5.2), e por meio da análise dos circuitos apresentados da Figura 3.4, utilizando os conceitos do princípio da superposição, sabe-se que $\hat{I}_F = \Delta \hat{I}_L \cdot k$ e $\Delta \hat{I}_L = \hat{I}_L - \hat{I}_{pre}$, portanto, substituindo, temos que:

$$Z_{app} = Z_{LF} + R_F \frac{\hat{I}_L - \hat{I}_{pre}}{k \cdot \hat{I}_L \cdot e^{j\phi}}. \quad (5.6)$$

A Equação (5.6) pode ser separada em partes reais e imaginárias, conforme (WISZNIEWSKI, 1983):

$$X_{app} = X_{LF} + \frac{R_F \cdot b}{k}, \quad (5.7)$$

$$R_{app} = R_{LF} + \frac{R_F \cdot a}{k} \quad (5.8)$$

sendo,

$$a = \text{real} \left(\frac{\hat{I}_L - \hat{I}_{pre}}{\hat{I}_L \cdot e^{j\phi}} \right) \quad (5.9)$$

$$b = \text{imag} \left(\frac{\hat{I}_L - \hat{I}_{pre}}{\hat{I}_L \cdot e^{j\phi}} \right). \quad (5.10)$$

Para eliminar $\frac{R_f}{k}$ da Equação (5.7), considera-se que:

$$\tan(\phi_L) = \frac{X_{LF}}{R_{LF}}, \quad (5.11)$$

em que ϕ_L é o ângulo de fase da impedância da linha, e, portanto:

$$\frac{R_F}{k} = \frac{R_A \tan(\phi_L) - X_{app}}{a \cdot \tan(\phi_L) - b}. \quad (5.12)$$

Dessa forma, o local da falta é estimado por:

$$d = \frac{X_{app}}{X_{LF}} - \frac{\text{real}(Z_{app}) \tan \left(\frac{\text{imag}(Z_{LF})}{\text{real}(Z_{LF})} \right) - \text{imag}(Z_{app})}{\frac{a}{b} \cdot \tan \left(\frac{\text{imag}(Z_{LF})}{\text{real}(Z_{LF})} \right) - 1}. \quad (5.13)$$

5.2.4 Método de Eriksson (ER)

O método de Eriksson utiliza os parâmetros de impedância da fonte em seu equationamento para tentar superar o erro de reatância causado pela resistência de falta, corrente de carga e não homogeneidade do sistema (DAS *et al.*, 2014). Substituindo a equação (3.18), na equação (5.2), tem-se que:

$$\hat{V}_L = dZ_{L1}I_L + R_F \cdot \left(\frac{Z_G + Z_c + Z_L}{Z_G + (1-d)Z_c} \right) \cdot \Delta I_L. \quad (5.14)$$

Simplificando e reorganizando os termos, obtém-se a equação quadrática:

$$d^2 - k_1 d + k_2 - k_3 R_F = 0, \quad (5.15)$$

em que k_1 , k_2 e k_3 são coeficientes da equação quadrática constituídos por tensão, corrente, impedância da linha e da fonte, conforme:

$$k_1 = i + jl = 1 + \frac{Z_G}{Z_{l1}} + \left(\frac{\hat{V}_L}{\hat{I}_L \cdot Z_{l1}} \right), \quad (5.16)$$

$$k_2 = m + jn = \left(\frac{Z_G}{Z_{l1}} + 1 \right) \left(\frac{\hat{V}_L}{Z_{l1} \cdot \hat{I}_L} \right), \quad (5.17)$$

$$k_3 = o + jp = \frac{\Delta \hat{I}_L}{Z_{l1} \cdot \hat{I}_L} \left(1 + \frac{Z_G + Z_L}{Z_{l1}} \right). \quad (5.18)$$

Por conseguinte, a distância de falta é estimada por:

$$d = \frac{\left(i - \frac{ol}{p}\right) \pm \sqrt{\left(i - \frac{ol}{p}\right)^2 - 4\left(m - \frac{ol}{p}\right)}}{2}, \quad (5.19)$$

sendo Z_G a impedância do terminal remoto e Z_L a impedância do terminal local. A equação possui duas raízes, para tanto, o possível local do curto-circuito, que é dado em pu, deve ser escolhido pela raiz que tem como resultado valor entre zero e um. Como o método ER faz uso de informações do terminal remoto, e avalia-se nesta dissertação apenas técnicas de um terminal, a impedância das fontes, Z_G , foi admitida como sendo igual a impedância da fonte Z_L , ou seja:

$$Z_L = Z_G = \frac{\Delta \hat{V}_L}{\Delta \hat{I}_L}, \quad (5.20)$$

sendo $\Delta \hat{V}_L = \hat{V}_L - \hat{V}_{pre}$. Além disso, a técnica permite estimar a resistência de falta, de acordo com:

$$R_f = \frac{n - dl}{p}. \quad (5.21)$$

5.2.5 Método de Novosel (NV)

A técnica de Novosel é uma versão modificada do método de Eriksson *et al.* (1985), e assume um modelo de carga de impedância constante, segundo:

$$Z_{carga} = R + jX = \frac{V_{pre}}{I_{pre}} - Z_{l1}. \quad (5.22)$$

Semelhante ao método de ER, as constantes da equação (5.15), são definidas por:

$$k_1 = i + jl = 1 + \frac{Z_{carga}}{Z_{l1}} + \left(\frac{\hat{V}_L}{\hat{I}_L \cdot Z_{l1}}\right), \quad (5.23)$$

$$k_2 = m + jn = \left(\frac{Z_{carga}}{Z_{l1}} + 1\right) \left(\frac{\hat{V}_L}{Z_{l1} \cdot \hat{I}_L}\right), \quad (5.24)$$

$$k_3 = o + jp = \frac{\Delta \hat{I}_L}{Z_{l1} \cdot \hat{I}_L} \left(1 + \frac{Z_{carga} + Z_L}{Z_{l1}}\right). \quad (5.25)$$

Similarmente ao método de Eriksson, a localização do curto-circuito é obtida em pu, sendo o resultado da estimativa escolhida para a raiz que possuir valor entre zero e um. Para efeitos comparativos o erro de localização de faltas é dado por:

$$\varepsilon = \frac{d - \tilde{d}}{\ell} \cdot 100, \quad (5.26)$$

em que d é a distância real da falta até a barra monitorada, \tilde{d} a distância estimada na simulação e ℓ o comprimento da linha.

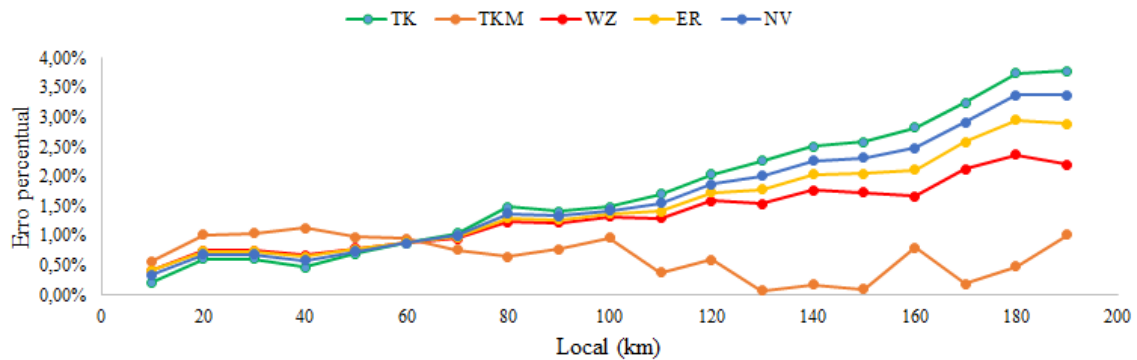
5.3 Avaliação de desempenho das técnicas baseadas em componentes fundamentais

As técnicas foram avaliadas por meio da variação de parâmetros de localização de faltas. Desse modo, apresenta-se os resultados e discussões obtidos por meio da variação do ponto de aplicação da falta, da resistência de falta, do ângulo de incidência e do tipo de falta.

5.3.1 Análise do Ponto de Aplicação do Curto-Circuito

Realiza-se nesta etapa uma análise da influência do ponto de aplicação da falta em relação ao terminal de medição. Para tanto, curtos-circuitos monofásicos, com resistência de falta de 1Ω e ângulo de incidência de $\Theta=90^\circ$ foram aplicados ao longo da LT em estudo, em que um total de 19 casos foram avaliados, variando-se o local da falta do quilômetro 10 ao 190, em passos de 10 km. Apresenta-se na Figura 5.4 os resultados obtidos em forma de gráfico de erros para cada técnica avaliada.

Figura 5.4 – Influência do ponto de aplicação do curto-circuito.



Fonte: autoria própria.

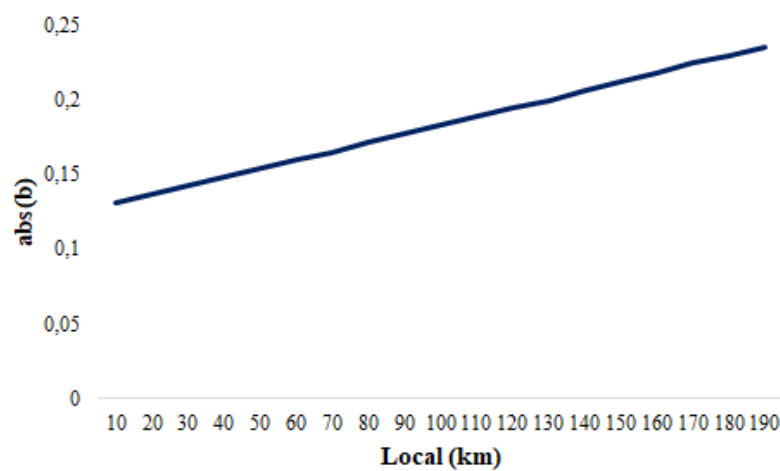
Da Figura 5.4, percebe-se que para todas as técnicas avaliadas, com exceção do método TKM, o erro percentual de localização aumenta para distúrbios distantes do terminal de medição. Isso se dá pela influência do efeito capacitivo da linha, que não é considerada em nenhuma das formulações dos métodos avaliados e que aumenta à medida que o curto-circuito se distancia do terminal monitorado (SAHA *et al.*, 2010). Além disso, o erro relacionado à corrente de carga também aumenta para faltas distantes do terminal monitorado.

O erro da corrente de carga pode ser calculado a partir do coeficiente imaginário b , dado pela Equação (5.10), uma vez que os métodos baseados em componentes fundamentais estimam o local da falta a partir dos coeficientes imaginários das equações. A fim de ilustrar este erro, apresenta-se em forma de gráfico o valor estimado de " b " para os cenários avaliados nesta seção, na Figura 5.5.

Dessa forma, o erro da corrente de carga aumenta para curtos-circuitos mais distantes do ponto de medição, isto porque quando o curto-circuito ocorre próximo ao terminal remoto, a contribuição do corrente de falta do terminal local diminui, proporcionando um aumento no erro de reatância (DAS *et al.*, 2014). Tal fato não pode ser observado para o método TKM, uma vez que a corrente de carga não é utilizada na formulação deste algoritmo. Isto porque tal algoritmo usa em sua formulação a corrente de sequência zero, ao contrário dos algoritmos de TK, WZ, NV e ER, que utilizam em suas formulações a corrente pura de falta, que intrinsecamente necessita

da corrente de carga (\hat{I}_{pre}) como entrada.

Figura 5.5 – Erro da corrente de carga ao longo da LT.



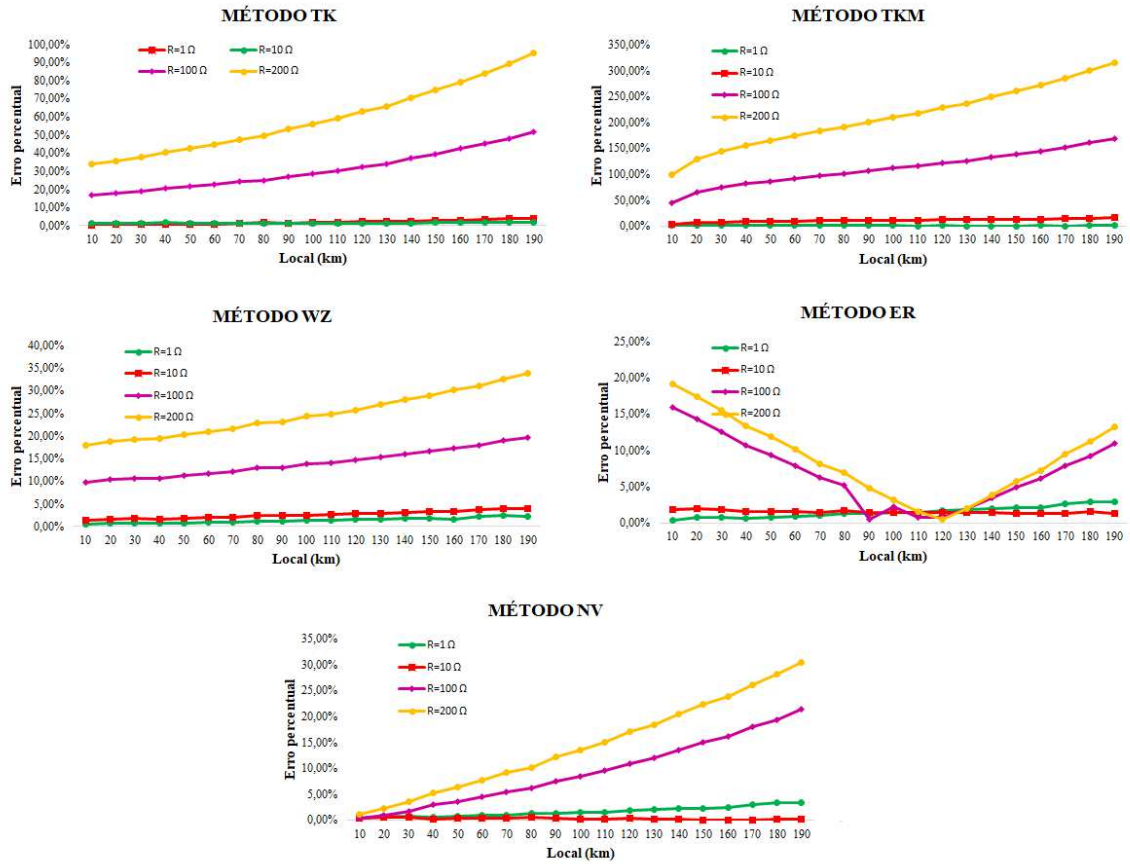
Fonte: autoria própria.

Além disso, da Figura 5.4, para os cenários avaliados em que apenas a distância do ponto de medição foi variada, maiores desvios foram obtidos para o método TK para faltas distantes do terminal de medição, com erros da ordem de 7,5 km para o curto-circuito aplicado a 190 km. De fato, os métodos WZ, ER e NV fazem uso de outros parâmetros, como do fator de distribuição de corrente, para minimizar os erros na estimação do ponto de ocorrência do distúrbio. O método TKM apresentou o melhor desempenho para os cenários avaliados nesta primeira seção.

5.3.2 Influência da Resistência de Falta

Avalia-se nesta seção o desempenho dos algoritmos sob a influência da resistência de curto-circuito. Para tanto, curtos-circuitos monofásicos foram simulados ao longo da LT, variando o local de aplicação de falta de 10 em 10 km, iniciando no quilômetro 10 até o 190. O ângulo de incidência de falta foi mantido em 90° e a resistência de falta foi variada para os valores de 1, 10, 100 e 200 Ω, resultando em 76 casos simulados. Apresenta-se na Figuras 5.6 os resultados obtidos para cada técnica.

Figura 5.6 – Influência da resistência de falta para as técnicas avaliadas.



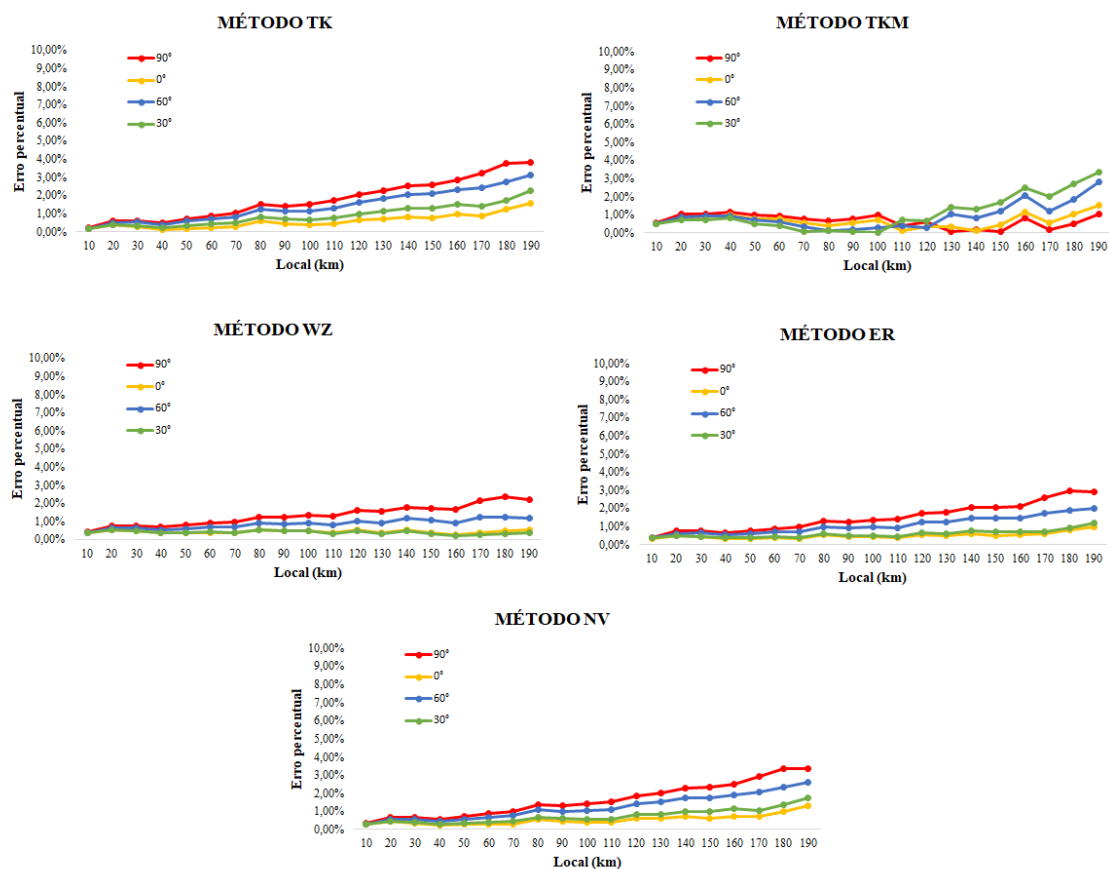
Fonte: autoria própria.

Da Figura 5.6, observa-se que, no geral, os desvios aumentam abruptamente para curtos-circuitos com resistências de faltas elevadas (100 e 200 Ω), para todas as técnicas aqui avaliadas. No entanto, o algoritmo TKM não convergiu para a maioria dos cenários com resistência maiores do que 100 Ω e apresentou o pior desempenho, em que erros da ordem de 300% foram obtidos e os desvios obtidos em km foram maiores do que o próprio comprimento da LT. Para os algoritmos de TK, ER, NV e WZ, o maior erro foi da ordem de 190 km, 39 km, 67 km e 61 km, respectivamente. Portanto, constata-se que, de fato, o desempenho de técnicas de localização de faltas de um terminal baseada em fasores são consideravelmente afetadas por valores mais elevados de resistência de falta, conforme limitação já reportada na literatura.

5.3.3 Influência do Ângulo de Incidência de Falta

Nesta etapa, avalia-se o desempenho das técnicas frente a variação do ângulo de incidência de falta. Para tanto, curtos-circuitos monofásicos foram aplicados de 10 em 10 km ao longo da LT, com resistência de falta mantida em 1Ω e ângulos de incidência de falta de 0° , 30° , 60° e 90° , resultando em um total de 76 simulações de curtos-circuitos. Os resultados obtidos para cada método são apresentados em forma de gráfico do erro percentual, conforme disposto na Figura 5.7.

Figura 5.7 – Influência do ângulo de incidência de falta.



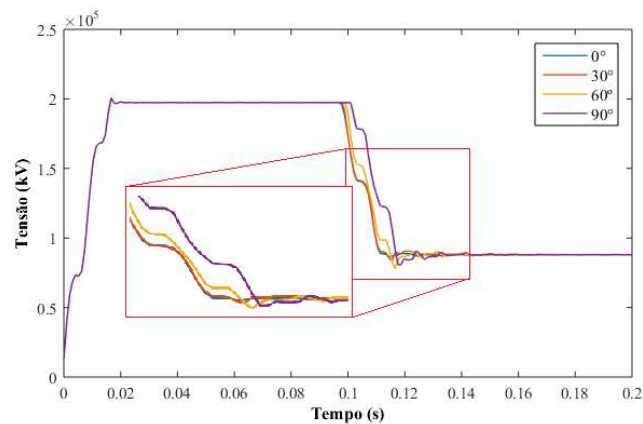
Fonte: autoria própria.

Da Figura 5.7, observa-se que o desempenho dos algoritmos baseados em componentes fundamentais são pouco influenciados pela variação do ângulo de incidência de falta. Dos resultados apresentados, o maior erro percentual foi obtido para o método

TK, equivalente a 7,5 km, quando o curto-circuito foi aplicado a 190 km do terminal de medição, com ângulo de incidência de falta de 90°.

O procedimento de estimação fasorial utilizado pelas técnicas baseadas em componentes fundamentais ameniza o impacto de variáveis que dependem do ângulo de incidência de falta. Dessa forma, apresenta-se na Figura 5.8, os fasores de tensão da fase A para uma falta monofásica a 190 km do terminal monitorado, com $R_F = 1 \Omega$ e ângulos de 0°, 30°, 60° e 90°.

Figura 5.8 – Estimação fasorial da tensão da fase A para curtos-circuitos com $R_F = 1 \Omega$ e diferentes ângulos de incidência de falta.



Fonte: autoria própria.

Observa-se na Figura 5.8 que maiores oscilações de tensão são verificadas para faltas com ângulos de 90° e 60°, o que pode ter ocasionado maiores desvios nas estimativas de falta ilustradas na Figura 5.7 para faltas com ângulos de incidência de 90° para o SEP em estudo.

5.3.4 Influência do Tipo de Falta

Apresenta-se nesta seção os resultados obtidos para a avaliação dos diferentes tipos de falta considerados (vide Tabela 5.3). Inicialmente, compara-se o desempenho dos algoritmos avaliados por meio da aplicação apenas de faltas monofásicas, uma vez que esses tipos de faltas representam mais de 50% dos curtos-circuitos presentes em SEP (SAHA *et al.*, 2010). Para tanto, um total de 228 cenários de curtos-circuitos,

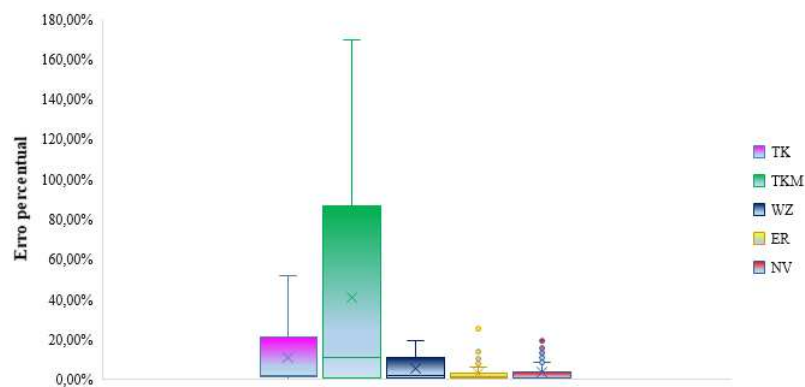
resultante de uma combinação das variáveis descritas na Tabela 5.3, foram considerados nesta primeira análise. Dessa forma, os resultados obtidos são apresentados em forma de *boxplots*, para cada algoritmo avaliado, conforme disposto na Figura 5.9.

Tabela 5.3 – Cenários avaliados para faltas monofásicas.

Tipo	Θ (°)	R_F (Ω)	Distância (km)
AT	0, 30, 60, 90	1, 10, 100	10:10:190

O *boxplot* é uma ferramenta utilizada para analisar variáveis quantitativas, e tem capacidade de fornecer medidas estatísticas como mínimo, primeiro, segundo e terceiro quartis, máximo e *outliers*. Os quartis são grupos que possuem 1/4 ou 25% dos valores inclusos no conjunto de dados. O retângulo no meio é composto pelas medidas dos primeiros, segundo e terceiros quartis, sendo que a linha inferior do retângulo representa o primeiro quartil, a superior o terceiro e a do meio a mediana do conjunto de dados, ou segundo quartil.

Figura 5.9 – Influência de faltas monofásicas para os algoritmos avaliados.



Fonte: autoria própria.

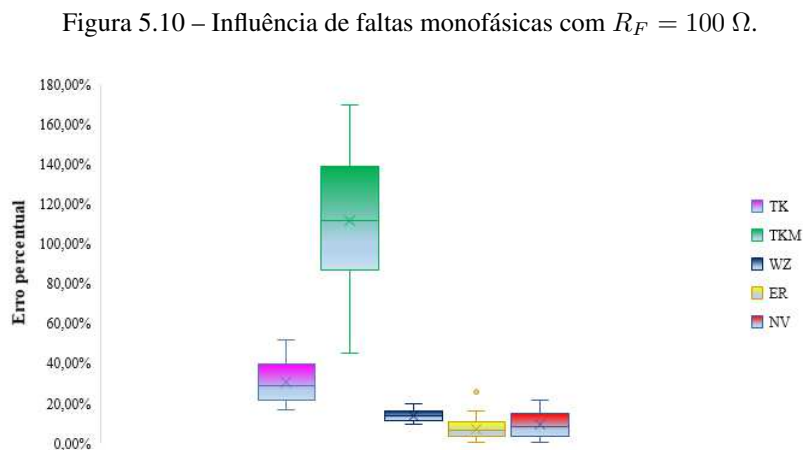
Da Figura 5.9, verifica-se que dos cenários avaliados, o método TKM apresentou o pior desempenho, uma maior dispersão dos dados por meio da largura da caixa foi obtido, além da mediana e do máximo valor, que representa maiores desvios dos erros percentuais obtidos em comparação aos outros algoritmos. De fato, o método TKM foi o mais influenciado pelo aumento da resistência de falta em comparação

aos outros métodos, em que erros da ordem de 160% foram obtidos para os casos avaliados nesta etapa. Já os métodos ER e NV apresentaram os melhores resultados, mesmo apresentando alguns *outliers* com erros percentuais da ordem de 25% e 22%, respectivamente.

Com o objetivo de verificar o algoritmo que apresentou o melhor desempenho para altas resistências, os resultados obtidos para o conjunto de dados referentes à combinação dos curtos-circuitos apresentados na Tabela 5.4 são mostrados na Figura 5.10.

Tabela 5.4 – Cenários avaliados para faltas monofásicas com $R_F = 100 \Omega$.

Tipo	Θ (°)	R_F (Ω)	Distância (km)
AT	0, 30, 60, 90	100	10:10:190



Fonte: autoria própria.

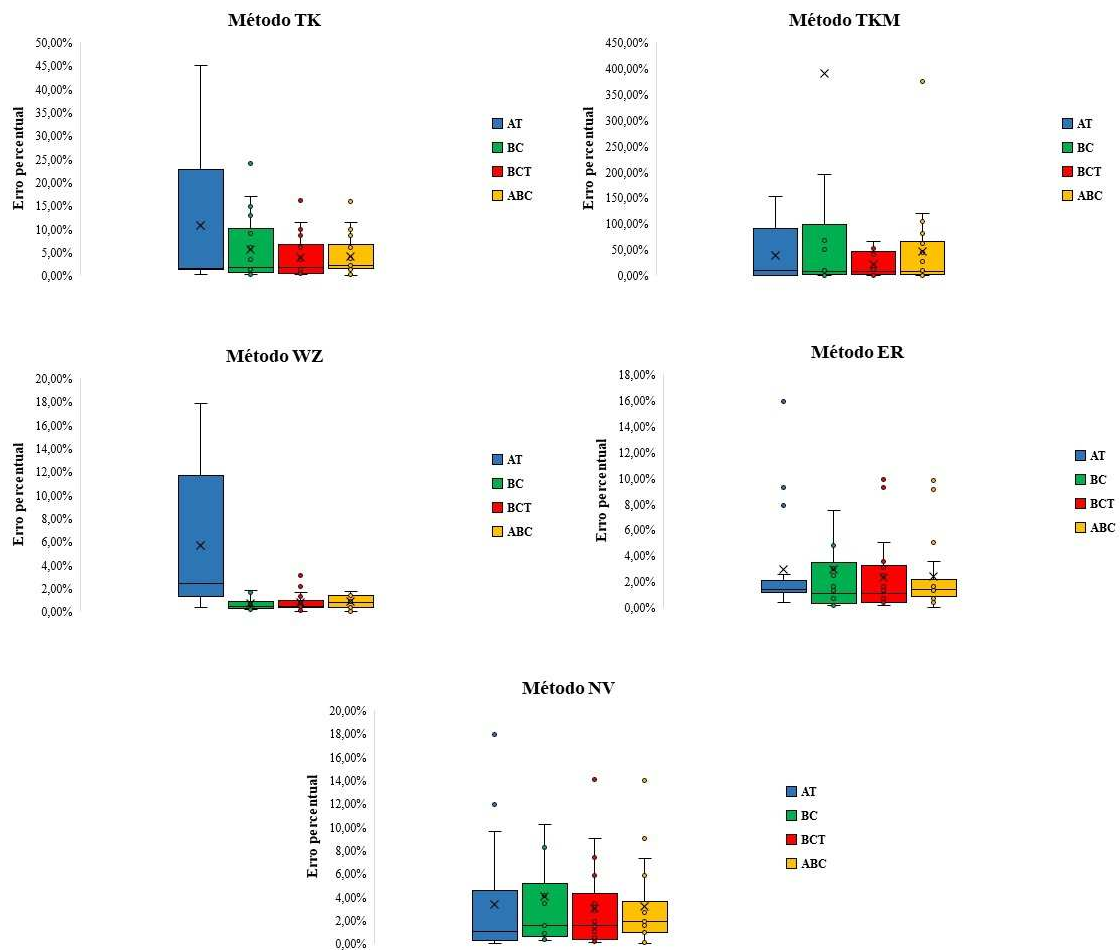
Verifica-se na Figura 5.10, que o método WZ apresentou menor dispersão dos resultados, devido a largura do retângulo ser mais estreita em comparação aos outros métodos. No entanto, o algoritmo WZ apresentou mediana maior do que os métodos ER e NV. Novamente o método TKM apresentou o pior desempenho para os cenários avaliados, seguido do método TK. Os métodos ER e WZ também apresentaram bons desempenhos em comparação aos outros algoritmos avaliados, no entanto, apresentam uma maior variabilidade dos resultados obtidos em comparação ao método WZ.

No que concerne às faltas bifásicas (BC e BCT) e trifásicas (ABC), um total de 288 simulações de faltas foram realizadas, seguindo os parâmetros descritos na Tabela 5.5. Nestes testes, o algoritmo TKM também foi avaliado, apesar do mesmo só ser aplicado para faltas monofásicas, visto que utiliza em seu equacionamento a corrente de sequência zero. Para tanto, os casos considerados para essa análise estão dispostos na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Casos considerados para avaliar a influência do tipo de falta

Tipo de Falta	R_f	Θ	Distância da Falta (km)
AT, BC, BCT, ABC	1, 10, 100	0, 30, 60, 90	10, 50, 90, 110, 130, 170

Figura 5.11 – Influência do tipo de falta



Fonte: autoria própria

Dos resultados obtidos, o método TKM apresentou um erro global médio de 125% e não convergiu para a maioria dos casos avaliados, o que já era esperado, principalmente para faltas bifásicas e trifásicas devido ao uso da corrente de sequência zero. Já o método ER apresentou o melhor desempenho para o conjunto de faltas monofásicas avaliadas quando comparado aos outros algoritmos. O método WZ apresentou o menor erro médio global de localização de faltas de 2,029% e o melhor desempenho para faltas bifásicas e trifásicas, configurando-se como o algoritmo que apresentou melhor o desempenho para o conjunto de cenários avaliados. De fato, o erro de localização é minimizado devido ao uso de mais dados do SEP como grandezas de pré-falta e fator

de distribuição de corrente. Portanto, os algoritmos WZ, ER e NV apresentaram os melhores resultados com erros de estimação menores do que os métodos TK e TKM. Todos os algoritmos testados foram sensíveis a curtos-circuitos com altas resistências de falta. No entanto, o ângulo de incidência de falta não foi fator determinante para sensibilizar os algoritmos testados neste capítulo. Também foi constatado que à medida que o local do curto-circuito se distancia do terminal monitorado, o erro de localização tende a aumentar devido ao erro da corrente de carga.

5.4 Síntese do Capítulo

Neste capítulo, uma avaliação de técnicas de localização de faltas clássicas baseadas em componentes fundamentais de um terminal foi apresentada. No total 5 algoritmos foram avaliados por meio de análises de desempenho frente a diferentes parâmetros de falta, tais como: distância do curto-circuito ao ponto de medição, resistência de falta, ângulo de incidência de falta e tipo de falta.

Dos resultados obtidos, foi constatado que o método TKM não convergiu para os cenários avaliados para curtos-circuitos bifásicos e trifásicos. Além disso, como já reportado na literatura, os algoritmos de localização baseados em componentes fundamentais avaliados neste capítulo mostraram-se sensíveis a curtos-circuitos com elevada resistência de falta, bem como para faltas que ocorrem distantes do terminal de medição (SAHA *et al.*, 2010). Os métodos reportados em ER e NV apresentaram melhores desempenhos para tipos de faltas monofásicas, já o algoritmo reportado em WZ apresentou melhores desempenhos para faltas bifásicas e trifásicas, além de apresentar o menor erro médio global de localização de faltas para os cenários avaliados.

Capítulo 6

Impacto de modelos de LT em técnicas de localização de faltas

O avanço da tecnologia tem proporcionado a melhoria de dispositivos de localização de faltas de LT. Algoritmos de localização de curtos-circuitos cada vez mais robustos têm sido propostos e incorporados a dispositivos de proteção reais. No entanto, antes mesmo desses algoritmos serem embarcados em equipamentos, uma série de testes devem ser realizados para avaliar suas funcionalidades e seus desempenhos. Geralmente, testes em *softwares* do tipo *Electromagnetic Transients Program* (EMTP), são utilizados como artifício para validar as aplicabilidades dessas novas técnicas.

Dentre as muitas variáveis que podem influenciar o desempenho das técnicas de localização de faltas, o modelo de LT utilizado durante os estudos é uma delas. Da literatura, sabe-se que modelos a parâmetros distribuídos dependentes na frequência representam com maior fidelidade os transitórios eletromagnéticos provenientes de faltas (RIBEIRO *et al.*, 2020).

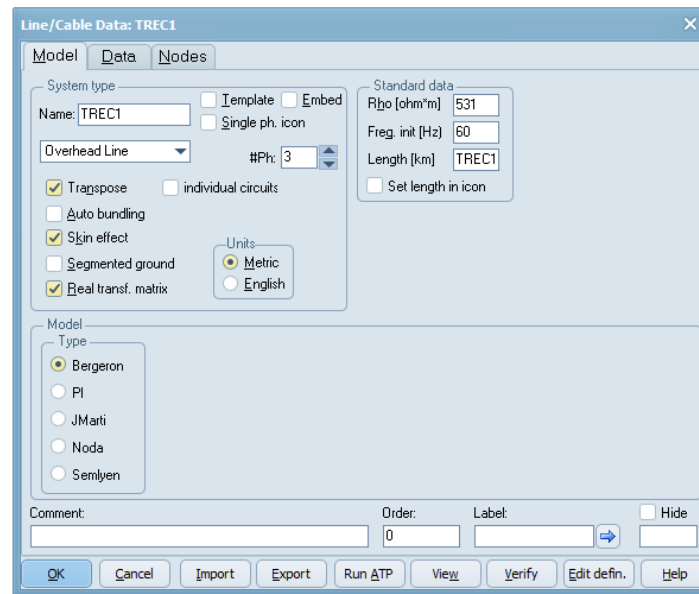
No entanto, apesar de muitos trabalhos realizarem estudos considerando modelos de LT a parâmetros distribuídos constantes e dependentes na frequência (REIS, 2019), trabalhos que comparam o desempenho desses modelos frente a técnicas de localização de faltas ainda são escassos na literatura. Portanto, de modo a preencher esta lacuna, neste capítulo, uma avaliação sobre o impacto de modelos de LT frente a diferentes métodos de localização de faltas baseados em componentes fundamentais e em ondas viajantes é realizada.

Dessa forma, sete algoritmos de localização de faltas foram escolhidos para que análises de sensibilidade, considerando modelos de linha a parâmetros distribuídos constantes (Bergeron) e dependentes na frequência (JMartí), possam ser feitas. Dos sete algoritmos avaliados, cinco são baseados em componentes fundamentais (descritos no capítulo 5), um baseado na teoria de ondas viajantes de dois terminais e um algoritmo híbrido de um terminal. Apesar de se esperar que os métodos baseados em componentes fundamentais não sejam influenciados por modelos a parâmetros distribuídos, uma vez que têm como base de suas formulações, em sua maioria, os modelos a parâmetros concentrados, tais avaliações serão realizadas como forma de investigação e validação dos resultados.

6.1 Metodologia das avaliações

O sistema elétrico ilustrado na Figura 5.1 foi utilizado para realizar as simulações de curtos-circuitos. Basicamente, os curtos-circuitos foram aplicados ao longo da LT de 200 km e inicialmente a perfeita transposição dos condutores foi considerada. As LT foram modeladas a partir do bloco *Line Cable Constant* (LCC) do ATPDraw (CENTER, 1987), em que dois modelos de linha de transmissão foram implementados: o modelo de JMarti (MARTI, 1982) e o modelo de Bergeron (DOMMEL, 1969). Os parâmetros de entrada para a modelagem de JMarti estão descritos na Figura 5.2, e do modelo de Bergeron na Figura 6.1.

Figura 6.1 – Parâmetros utilizados para modelar a LT utilizando Bergeron.



Fonte: autoria própria.

Sabe-se que o modelo de J.Martí considera os parâmetros da LT distribuídos e dependentes na frequência, dessa forma uma faixa que abrange as frequências do sinal deve ser definida. Como a frequência típica de amostragem utilizada para aplicação de métodos de localização baseados na teoria de ondas viajantes é de 1 MHz, a frequência inicial definida, conforme Figura 5.2, foi de 0.001 Hz, considerando 10 décadas, sendo a frequência máxima adotada de 1 MHz. Além disso, considerou-se na modelagem das LT o efeito pelicular (*Skin effect*), condutores simples (opção "*Auto-bundling*" desmarcada) e a opção "*Overhead Line*" foi selecionada para LT aéreas. Ademais, a opção "*segmented ground*" não foi marcada, uma vez que foi considerado condutores terra continuamente aterrados.

As medições de tensão e corrente foram repassadas aos algoritmos localizadores de faltas por um modelo digital de TPC e TC (COMMITTEE *et al.*, 2004). Para efeitos comparativos, o erro de localização de faltas foi estimado a partir da Equação (5.1). Filtros anti-aliasing do tipo Butterworth de terceira ordem, com frequências de corte de 180 Hz para o algoritmo baseado em fasores e 400 kHz para o algoritmo baseado em ondas viajantes foram implementados. Os sinais de entrada dos algoritmos de

localização são discretizados a uma frequência de amostragem de 960 Hz para o método de Takagi e a 1 MHz para o método baseado na teoria de ondas viajantes.

6.2 Apresentação dos métodos avaliados

Conforme descrito na seção 6.1, sete métodos serão avaliados para dois tipos de modelos de linhas, o modelo de Bergeron e o modelo de JMarti. Cinco métodos baseados em componentes fundamentais foram avaliados: os métodos de TK, TKM, WZ, ER e NV. Além deles, avaliar-se-á o desempenho das técnicas reportadas em Gale *et al.* (1993), a qual é baseada na teoria de ondas viajantes e utiliza dois terminais da LT para estimar o ponto de curto-circuito, e Xinzhou *et al.* (2002), uma técnica híbrida de um terminal. Para tanto, realiza-se a seguir uma breve descrição dos métodos de Gale *et al.* (1993) e Xinzhou *et al.* (2002).

6.2.1 Método de Gale et al. (1993) (GA)

A técnica reportada em (GALE *et al.*, 1993) é baseada na teoria de ondas viajantes e utiliza informações de dois terminais da linha para estimar o ponto de defeito. Basicamente, o algoritmo depende apenas da detecção das ondas incidentes em ambos os terminais da linha. Assim, a distância da falta estimada por (conforme Figura 3.5):

$$d = v \frac{\ell + v(t_{A1} - t_{B1})}{2}, \quad (6.1)$$

em que t_{A1} e t_{B1} são os instantes que a onda incidente é detectada no terminal A e terminal B, respectivamente v é a velocidade de ondas viajantes e ℓ o comprimento da LT.

6.2.2 Método de Xinzhou et al. (2002) (XI)

A técnica reportada em Xinzhou *et al.* (2002) utiliza um método baseado em componentes fundamentais para determinar a região de ocorrência da falta e refinar o resultado a partir de soluções baseadas na teoria de ondas viajantes. Por utilizar mais de uma técnica de localização é chamada de método híbrido. Basicamente, esta técnica funciona da seguinte forma: em primeiro lugar o ponto de defeito é estimado pela

técnica fasorial reportada em Wiszniewski (1983), em seguida, uma janela de busca que contém o local da falta é calculada empiricamente, sendo a distância estimada pelo método fasorial o centro dessa janela e $\pm 10\%$ do comprimento da linha imposto como limites da referida janela. Após essa etapa, a onda viajante refletida do ponto de falta é detectada como sendo a primeira onda, que possui a mesma polaridade da onda incidente, que está dentro da janela de busca. Para auxiliar no processo de detecção de ondas viajantes a transformada *wavelet* é utilizada em (XINZHOU *et al.*, 2002).

6.3 Avaliação do desempenho das técnicas para os modelos de Bergeron e J. Martí

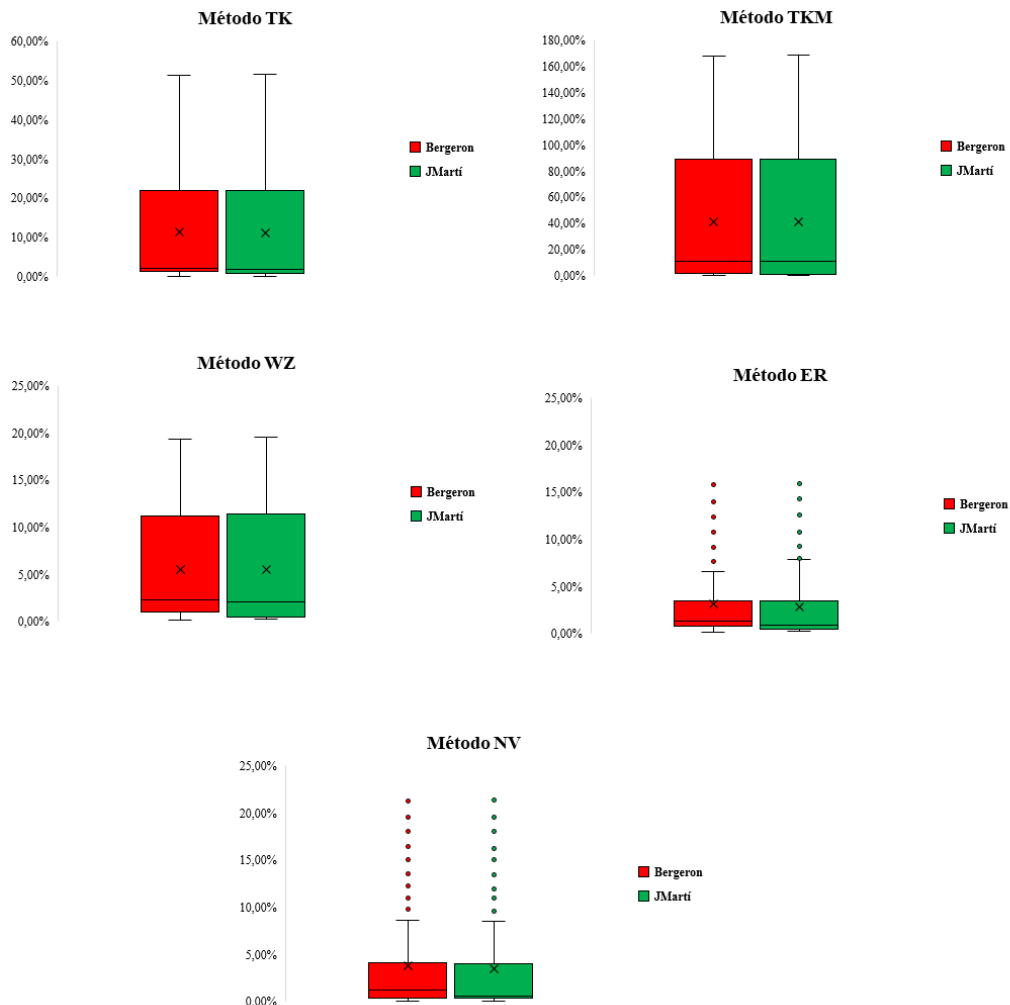
Avalia-se nesta primeira etapa o desempenho dos algoritmos de localização de faltas sob a influência de dois modelos de LT, a saber: o modelo de Bergeron (BG) e o modelo de JMarti (JM). Neste cenário, um total de 456 cenários de falta foram simulados no ATP, os quais constituem de uma combinação dos parâmetros disponíveis na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Parâmetros avaliados.

Modelo de LT	R_f	Θ	Tipos de Faltas	Distância da Falta
BG, JM	1, 10, 100	0,01;30;60;90	AT	10:10:190

Os resultados obtidos foram avaliados por meio de *boxplots*. Desta forma, apresenta-se inicialmente na Figura 6.2, os resultados obtidos para os algoritmos baseados em componentes fundamentais para o modelo de LT de Bergeron e JMarti.

Figura 6.2 – Resultados obtidos para os métodos de localização fasoriais quando a LT é modelada por Bergeron e JMarti.



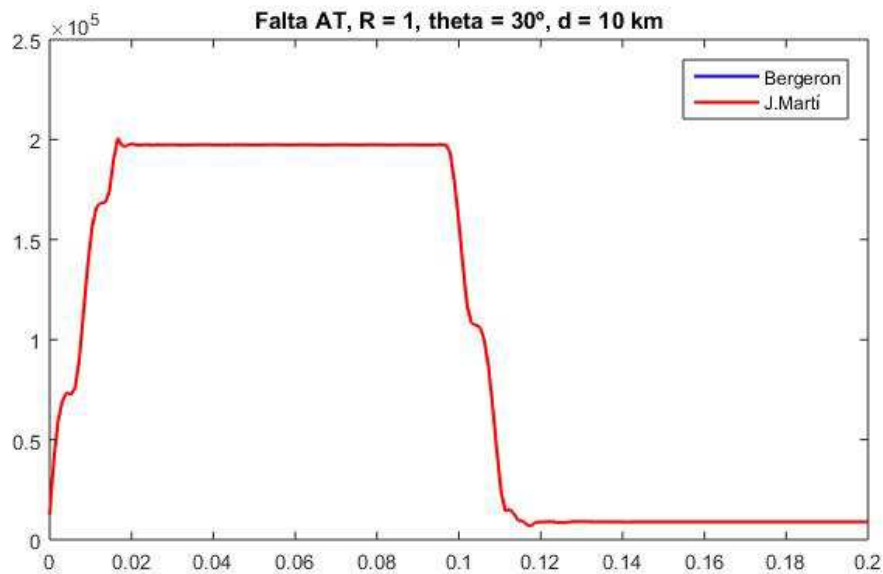
Fonte: autoria própria.

Da Figura 6.2, no geral, não são observados desvios significativos quando os modelos de LT de Bergeron e JMarti são utilizados para estimar o ponto de falta a partir de algoritmos de localização de faltas baseados em componentes fundamentais. De fato, como ambos os modelos de linha foram ajustados para que o cálculo de seus parâmetros ocorresse para a frequência fundamental (60 Hz), os desempenhos das técnicas de localização de curtos-circuitos avaliadas foram semelhantes, uma vez que as mesmas dependem apenas dos fasores estimados na mesma frequência em que os parâmetros da linha foram calculados. Desvios significativos foram obtidos para todos os méto-

dos apresentados na Figura 6.2, tais desvios são decorrentes dos cenários em que a resistência de falta simulada foi a de 100Ω , como reportado no capítulo 5.

Para fins de ilustração, mostra-se na Figura 6.3 os fasores de tensão da fase A para os referidos modelos quando uma curto-circuito monofásico (AT) é aplicado a 10 km do terminal de medição com $R_F = 1 \Omega$ e $\Theta = 30^\circ$.

Figura 6.3 – Fator de tensão da Fase A para LT modelada por Bergeron e JMarti quando um curto-circuito é aplicado a 10km do terminal de medição com $R_F = 1 \Omega$ e $\Theta = 30^\circ$.

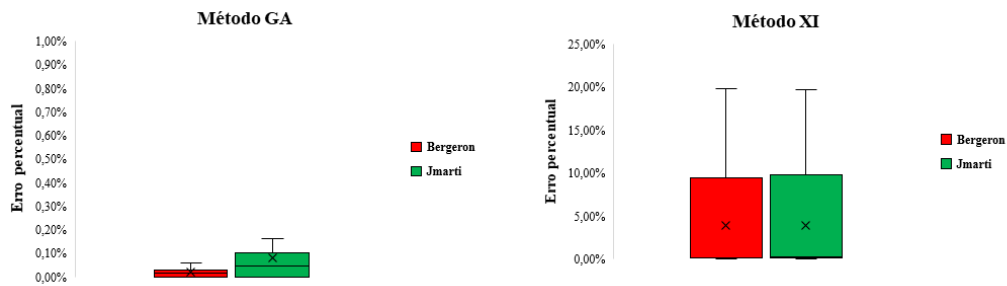


Fonte: autoria própria.

Da Figura 6.3, verifica-se que a curva para ambos os modelos avaliados são as mesmas, uma vez que o fasor referente ao modelo de JMarti está sobreposto do modelo de Bergeron, ou seja, para o cenário avaliado não houve desvio quanto ao cálculo dos fasores para os dois modelos, desta forma as estimações do local de falta foram as mesmas.

Apresenta-se na Figura 6.4 os resultados obtidos para as técnicas GA e XI. Para ambos os métodos a velocidade das ondas viajantes foram estimadas a partir de um processo de energização da linha, cujas velocidades obtidas foram de $v = 295.857,9882 \text{ km/s}$ e $v = 297.619,05 \text{ km/s}$ para os modelos de Bergeron e JMarti, respectivamente.

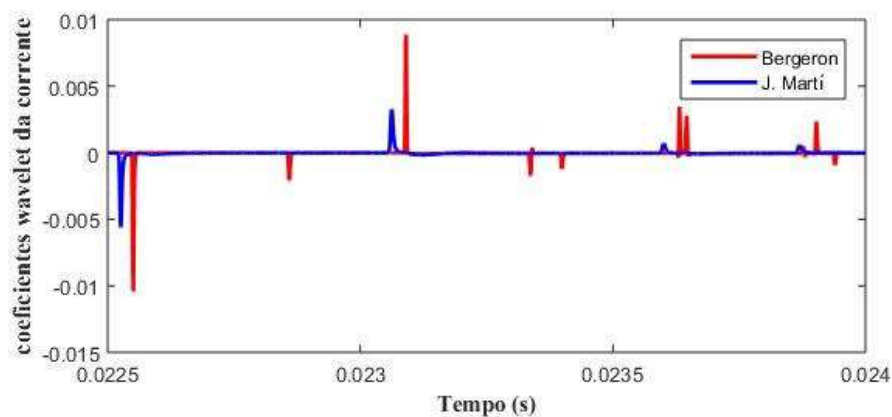
Figura 6.4 – Resultados obtidos para os métodos GA e XI para LT modeladas por Bergeron e JMarti.



Fonte: autoria própria.

Da Figura 6.4, verifica-se que maiores desvios foram obtidos para os cenários avaliados a partir do modelo de JMarti para ambas as técnicas. De fato, o modelo de Bergeron representa as LT de modo mais próximo do ideal o que permite obter resultados com menores desvios. Porém na prática, as ondas viajantes são submetidas aos fenômenos de atenuação e dispersão, que são mais visíveis no modelo de JMarti, conforme Figura 6.5, que representa os coeficientes *wavelet* obtidos a partir da simulação da abertura de uma chave.

Figura 6.5 – Comparação dos coeficientes wavelet dos modelos de JMarti e Bergeron.



Fonte: autoria própria.

Na Figura 6.5, percebe-se que os picos referentes as ondas viajantes obtidas a partir do modelo de JMarti sofrem uma atenuação e dispersão maior em comparação ao

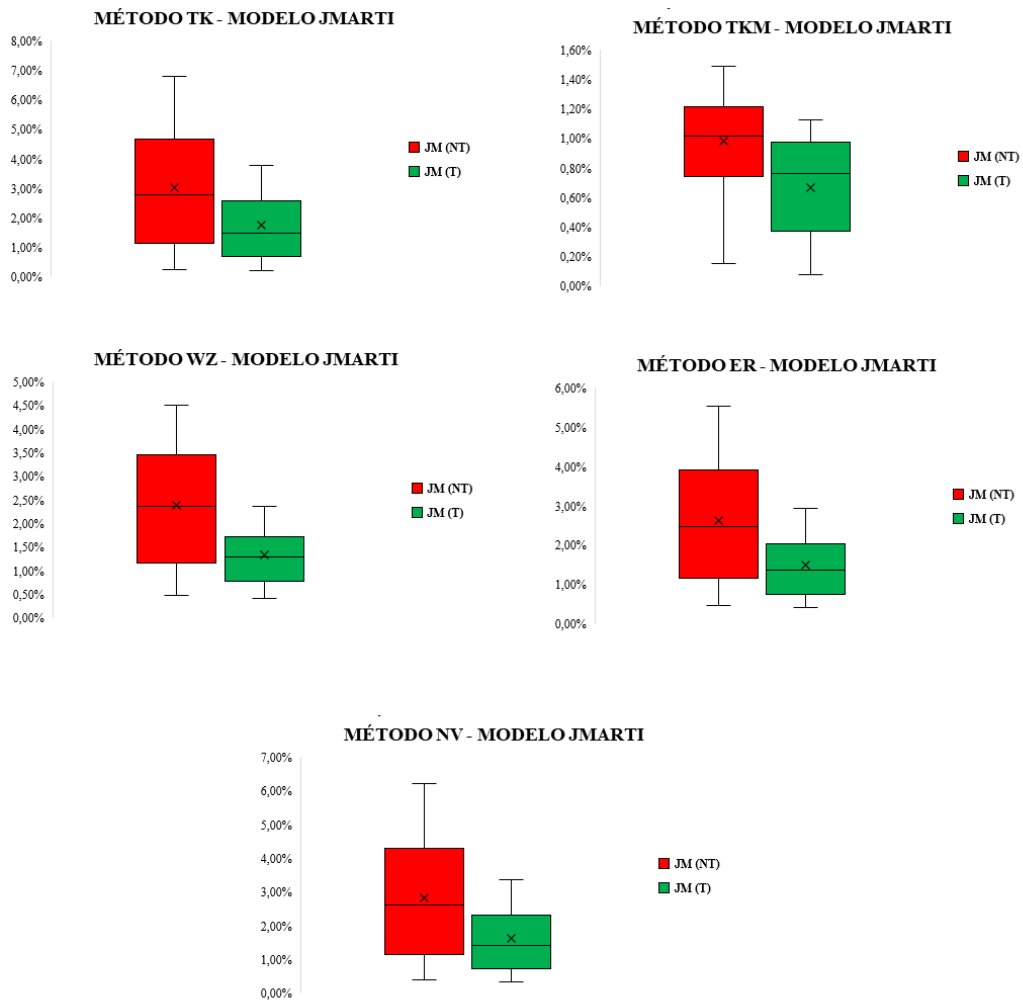
modelo de Bergeron, devido a dependência da frequência dos seus parâmetros. Neste sentido, o modelo de JMarti representa com mais afinco os transitórios de falta e por conseguinte, as ondas viajantes, de modo mais próximo do que ocorre na realidade e portanto deve ser utilizado em testes para validar técnicas de localização de faltas em LT.

6.4 Impacto da transposição de LT sob métodos de localização de faltas

Devido a própria geometria da LT e das diferentes distâncias entre as fases e a terra existe um acoplamento mútuo e, portanto, desequilíbrios podem surgir. Este desequilíbrio ocorre mais nas tensões e correntes de operação na frequência nominal nos terminais da LT para linhas não transpostas. Para minimizar os efeitos desse desbalanço o método de transpor as LT é usado para reduzir e balancear as tensões e correntes entre as fases. A transposição de LT consiste, basicamente, em alterar a disposição física dos condutores de fase, de modo que um determinado condutor ocupe todas as posições de uma linha com configuração particular, geralmente os condutores trocam de posição a cada um terço da LT (DAS *et al.*, 2014). Ao calcular os parâmetros de sequência da LT, as linhas de transmissão são assumidas para ser transpostas (WILLIAM *et al.*, 2002). A transposição iguala o acoplamento mútuo entre as três fases e reduz a matriz de impedância de sequência para uma matriz diagonal. Os elementos da diagonal da matriz impedância são formados pelas impedâncias da linha de sequência enquanto os elementos fora da diagonal são zero, indicando que não há impedância mútua. Embora a transposição de linha seja vantajosa, ela introduz complicações no projeto de uma linha de transmissão, e também aumenta o custo devido a estruturas de suporte adicionais e requisitos da coluna do isolador (DAS *et al.*, 2014). Desse modo, avalia-se nesta seção o desempenho dos algoritmos de localização de faltas sob a influência das não transposição e transposição perfeita dos condutores. Para tanto, avaliou-se cenários compostos pelos modelos de Bergeron e JMarti, cujas faltas foram aplicadas ao longo da LT, de 10 a 190 km em passos de 10 km, com resistência de falta de 1Ω e ângulo de incidência de falta de 90° . Na Figura 6.6, os resultados obtidos são apresentados para as técnicas baseadas em componentes fundamentais quando o

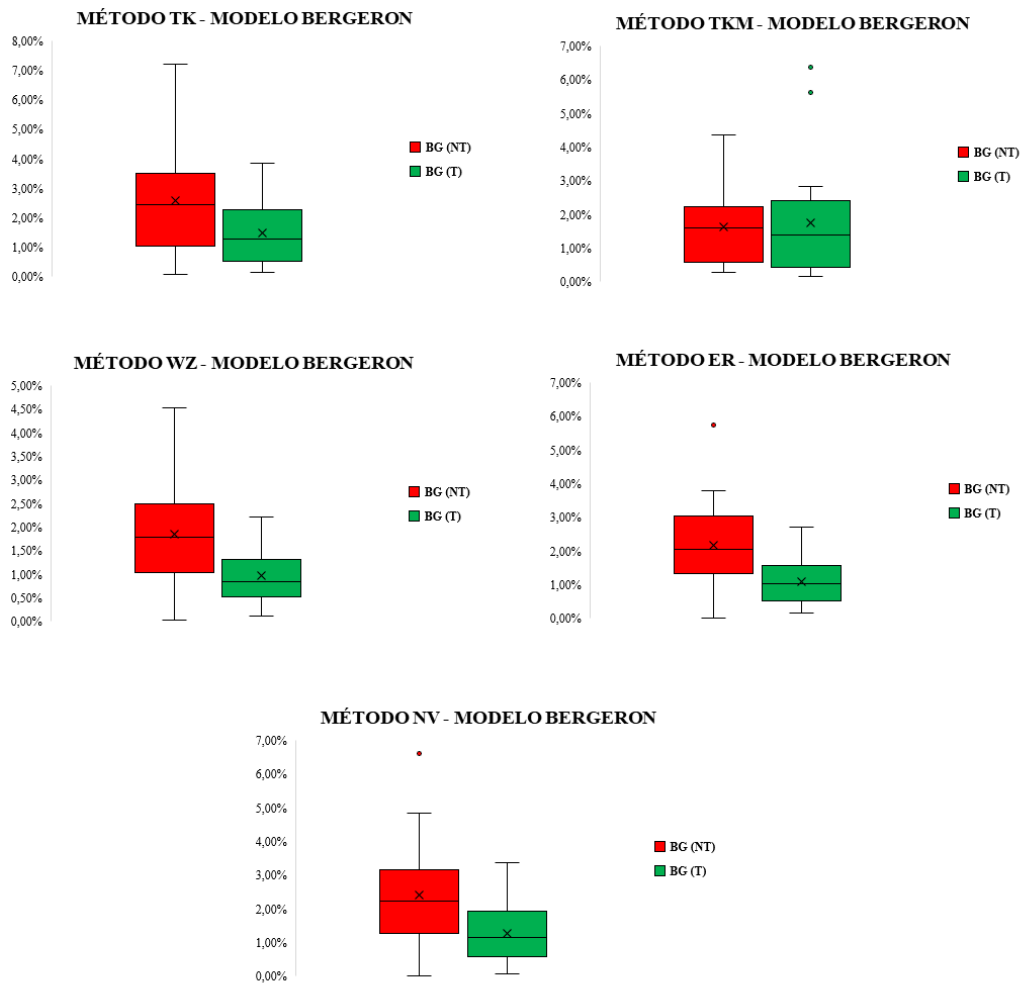
modelo de JMarti é utilizado e na Figura 6.7, quando a LT é modelada a partir de Bergeron.

Figura 6.6 – Resultados obtidos para as técnicas fasoriais quando submetidos a dados de LT transposta e não transposta modelada por JMarti.



Fonte: autoria própria.

Figura 6.7 – Resultados obtidos para as técnicas fasoriais quando submetidos a dados de LT transposta e não transposta modelada por Bergeron.



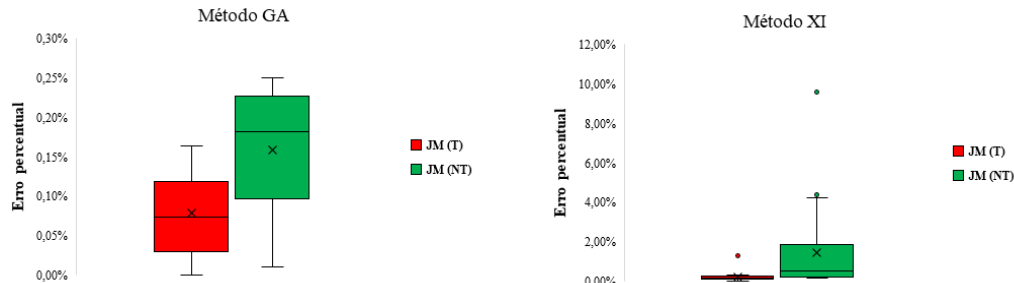
Fonte: autoria própria.

Das Figuras 6.6 e 6.7, são observados maiores desvios quando a LT é configurada como não transposta. De fato, algoritmos de localização de falta baseados em impedância requerem informações de impedâncias de sequência positiva e zero de uma LT para estimar a distância até a falta. Uma vez que técnicas baseadas em componentes fundamentais assumem que as redes de sequência sejam desacopladas umas das outras, uma linha de transmissão não transposta afetar o desempenho dessas técnicas.

Avalia-se agora o desempenho dos métodos reportados em GA e XI para LT transposta e não transposta apenas para o modelo de JMarti. As velocidades de energização

das LT obtidas foram de 297.840,65 km/s para LT não transposta e 297.619,05 km/s para a transposta. Os resultados obtidos estão ilustrados na Figura 6.8.

Figura 6.8 – Influência da transposição da LT para os métodos de Gale *et al.* (1993) e Xinzhou *et al.* (2002).



Fonte: autoria própria.

Observa-se, na Figura 6.8, que novamente maiores desvios foram obtidos para LT não transpostas em ambos os métodos, o que já era esperado, devido aos elementos de impedância mútua presentes na matriz de impedância, o que ocasiona o aumento dos desvios obtidos para LT não transpostas. Dessa forma, cenários com LT não transpostas tendem a aumentar o erro de algoritmos de localização de faltas.

6.5 Influência da velocidade de propagação de ondas viajantes

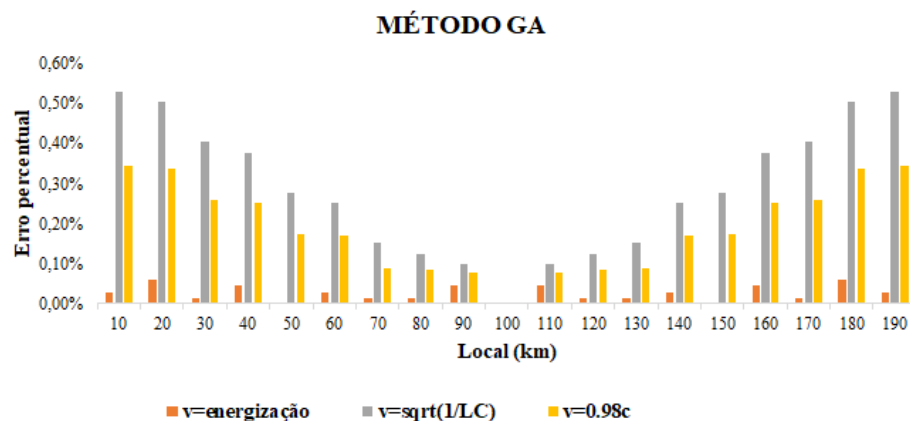
A velocidade de propagação de ondas viajantes é uma variável utilizada para estimar curtos-circuitos em LT, como pode ser observado nas equações (3.23) e (3.24). No entanto, esta variável pode ser estimada de formas diferentes. Tipicamente, v é determinada em função dos parâmetros de sequência da LT, os quais podem ser fornecidos pelas concessionárias com certas imprecisões. Além disso, a depender das configurações do sistema, do modelo de LT utilizado durante os estudos, da transposição ou não de linhas, a estimação de v pode ser afetada.

Desse modo, apresenta-se nesta seção uma avaliação dos métodos de Gale *et al.* (1993) e Xinzhou *et al.* (2002), que utilizam funções baseadas na teoria de ondas viajantes que dependem de v , para diferentes valores de velocidade das ondas viajantes, as quais serão estimadas das seguintes formas:

- a partir do processo de energização da LT, tanto para os modelo de JMarti quanto para o modelo de Bergeron.
- considerando que as perdas da LT em que as ondas viajantes se propagam são desprezíveis, por meio da velocidade de modo aéreo, em que $v = \frac{1}{\sqrt{lc}}$, sendo l e c a indutância e capacitância de sequência positiva da LT, apenas para o modelo de Bergeron.
- de modo empírico aproximando para valores próximos a velocidade da luz, $v = 0.98c$, em que c é dado por 300.000,00 km/s (LOPES *et al.*, 2014) (COSTA *et al.*, 2010).

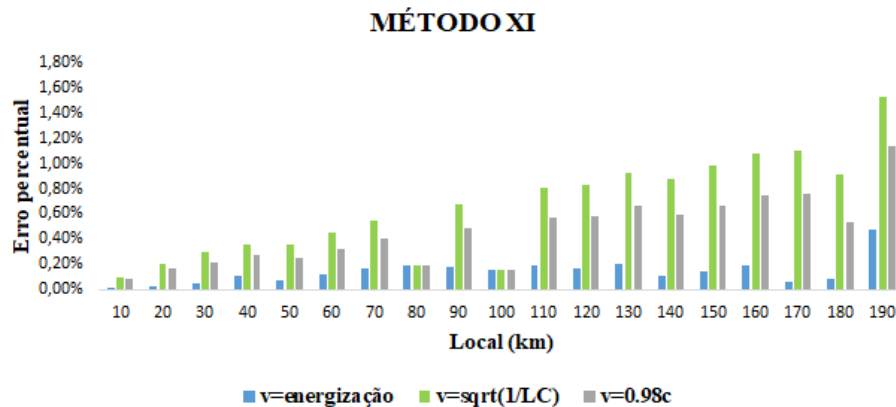
Apresenta-se na Figura 6.9 e 6.10 os resultados obtidos para faltas com resistência igual a 1Ω e ângulo de incidência de falta igual a 90° , sendo a LT modelada à partir do modelo de Bergeron em que as técnicas de GA e XI foram utilizadas para estimar os locais de falta.

Figura 6.9 – Resultados obtidos para o método reportado em Gale *et al.* (1993) para simulações com LT modelada por Bergeron.



Fonte: autoria própria.

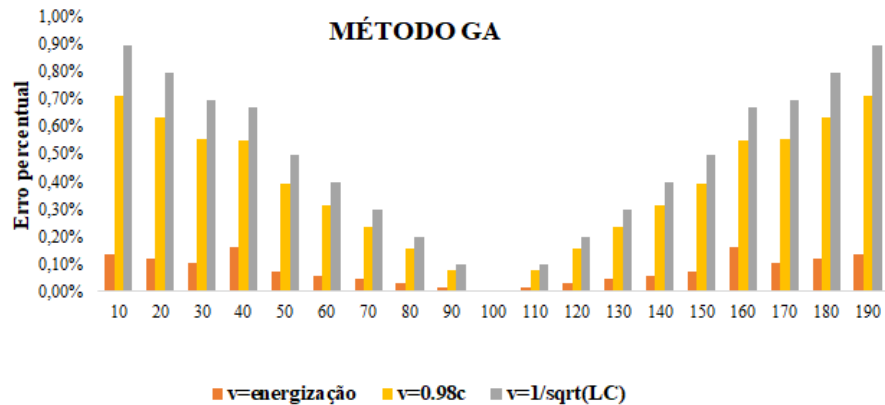
Figura 6.10 – Resultados obtidos para o método reportado em Xinzhou *et al.* (2002) para simulações com LT modelada por Bergeron.



Fonte: autoria própria.

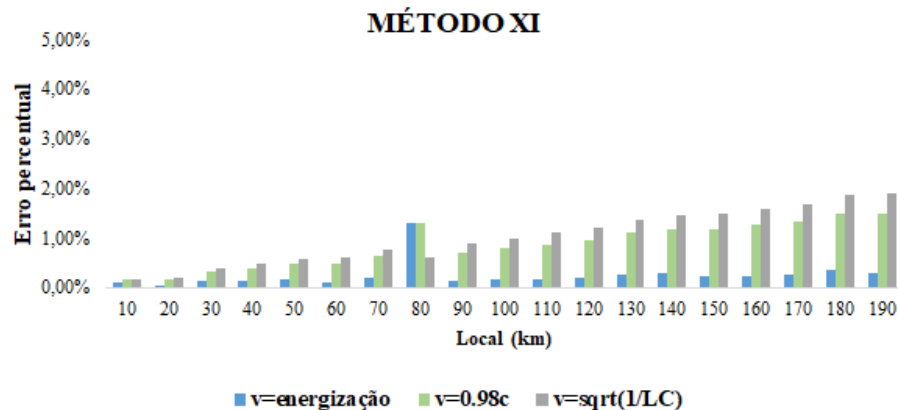
A partir das Figuras 6.9 e 6.10, verifica-se que menores erros são obtidos quando a velocidade é estimada a partir da manobra de energização da LT. Os piores casos foram obtidos quando a velocidade foi estimada por meio dos parâmetros de sequência positiva informados pela concessionária. De fato, tais parâmetros podem trazer consigo certas imprecisões, devido a erros de medição, por exemplo. Nestes casos, a velocidade aproximada, empiricamente, para 98% da velocidade da luz apresentou melhores resultados do que a velocidade determinada pelos parâmetros da LT por estar mais próxima do valor encontrado pelo processo de energização. Resultados semelhantes foram obtidos para curtos-circuitos simulados por meio do modelo JMarti, conforme Figuras 6.11 e 6.12.

Figura 6.11 – Resultados obtidos para o método reportado em Gale *et al.* (1993) para simulações com LT modelada por JMarti.



Fonte: autoria própria.

Figura 6.12 – Resultados obtidos para o método reportado em Xinzhou *et al.* (2002) para simulações com LT modelada por JMarti.



Fonte: autoria própria.

Portanto, dos resultados obtidos nas avaliações realizadas, constata-se que quando a velocidade de propagação de ondas viajantes obtida por meio do processo de energização da LT é utilizada para estimar a localização do curto-circuito, a minimização dos desvios obtidos pode ser verificada. Dessa forma, é recomendado o uso da velocidade de energização na aplicação de técnicas baseadas em ondas viajantes, a fim de minimizar os erros de estimação de localização de faltas.

6.6 Resumo do capítulo

Avaliou-se neste o capítulo o desempenho de sete algoritmos de localização de faltas baseados em funções fasoriais e na teoria de ondas viajantes para dois modelos de LT. Vários cenários foram simulados considerando a LT modelada a partir dos modelos de Bergeron e JMarti.

Dos resultados obtidos, foi constatado que os métodos baseados em componentes fundamentais pouco foram influenciados pela modelagem de LT utilizada durante os estudos. No entanto, os resultados obtidos para as técnicas baseadas na teoria de ondas viajantes mostrou que quando o modelo de JMarti é utilizado nas avaliações maiores desvios são obtidos, uma vez que este modelo representa de modo mais fiel a atenuação e dispersão de ondas viajantes.

Avaliou-se também a transposição de LT, como era esperado, maiores desvios foram obtidos quando a não transposição da LT foi considerada. No que concerne à avaliação da velocidade de propagação de ondas viajantes, melhores resultados foram obtidos quando estimada a partir do processo de energização da LT.

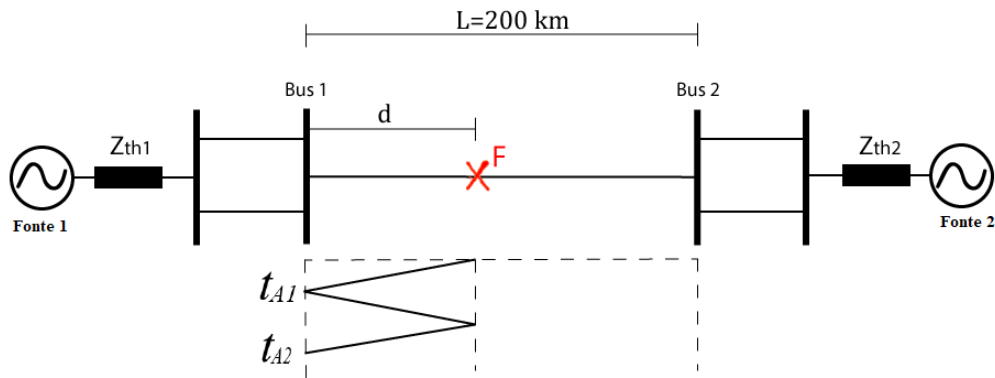
Capítulo 7

Método proposto

Uma melhoria para o método híbrido tradicional de localização de faltas em LT que utiliza informações de um terminal de medição, reportado em Xinzhou *et al.* (2002), é apresentada. Conforme a equação (7.1) e Figura 7.1, a distância da falta (d) pode ser estimada a partir da detecção da onda que incide no terminal de monitorado (t_{A1}), do conhecimento da velocidade das ondas viajantes na LT (v) e da detecção do instante de tempo em que a onda viajante do ponto de falta reflete no terminal monitorado (t_{A2}) (GALE *et al.*, 1993). No entanto, a detecção correta da onda refletida ainda é objeto de estudo entre os pesquisadores, uma vez que pode ser confundida com reflexões provenientes de outras descontinuidades do SEP. Dessa forma, o método apresentado consiste em propor uma janela de busca mais confiável para detectar a referida onda t_{A2} .

$$d = v \frac{(t_{A2} - t_{A1})}{2}. \quad (7.1)$$

Figura 7.1 – SEP de 230 kV com LT adjacente ao terminal de medição.



Fonte: autoria própria.

Para compreender os procedimentos utilizados na implantação do método híbrido proposto, apresenta-se abaixo as etapas de funcionamento do algoritmo tradicional reportado em Xinzhou *et al.* (2002):

- Estima-se a localização do curto-circuito a partir do método fasorial proposto em Wiszniewski (1983);
- Uma janela de busca empírica é criada a partir do local estimado no item anterior para detectar a onda refletida do ponto de falta por meio de técnicas baseadas em ondas viajantes, dada por $[d - 10\%l, d, d + 10\%l]$, em que d é a distância de falta estimada no item anterior e l o comprimento da LT;
- Uma vez criada a janela de busca, a primeira onda viajante (suposta onda refletida a partir da falta) que está inserida dentro da janela e que possua a mesma polaridade da onda incidente é detectada, sendo a transformada *wavelet* utilizada para auxiliar no processo de detecção de ondas.

De acordo com Xinzhou *et al.* (2002), o maior erro do algoritmo baseado em impedância está dentro de uma região de 10% do comprimento da LT, o que sugere que a distância real do ponto de defeito é garantida no limite definido pelos autores. No entanto, sabe-se que a depender das características de falta, a onda refletida induzida

pelo curto-circuito pode estar além do limiar predefinido, uma vez que vários fatores afetam o desempenho das técnicas baseadas em componentes fundamentais (DAS *et al.*, 2014). Devido aos fatores limitantes dos métodos baseados em componentes fundamentais tipicamente reportados na literatura e constatados nas análises realizadas no capítulo 5 (SAHA *et al.*, 2010), o método proposto nesta dissertação considera o erro de localização de falta introduzido pelo efeito combinado da resistência de falta e da corrente de carga para construir uma janela de busca capaz de detectar a onda refletida. O erro de localização de falta introduzido pelo efeito combinado da resistência de falta e da corrente de carga é determinado a partir das equações (5.6), (5.7) e (5.10), como se segue (equação (7.2)), uma vez que os métodos baseados em componentes fundamentais utilizam a parte imaginária dos fasores estimados para calcular a distância de falta nas suas formulações.

$$\Delta X = X_{app} - X_{LF} = \frac{R_F}{k} \text{Im} \left(\frac{\hat{I}_L - \hat{I}_{pre}}{\hat{I}_L e^{j\phi}} \right), \quad (7.2)$$

em que X_{app} é a reatância aparente medida no terminal da LT e X_{LF} é a reatância de sequência positiva calculada no ponto de defeito.

Uma vez que o erro de localização de curto-circuito pode ser determinado a partir da equação (7.2), uma janela de busca é proposta para detectar a onda refletida do ponto de falta, conforme (7.3):

$$s_{w1} = d_F \pm \frac{\Delta X}{X_+}, \quad (7.3)$$

sendo s_{w1} a janela de busca, X_+ a reatância de sequência positiva da linha e d_F a distância da falta estimada pelo método baseado em componentes fundamentais. Assim como no método clássico o algoritmo utilizado para estimar o local do curto-circuito por componentes fundamentais foi o reportado em Wiszniewski (1983).

Como visto, o erro de localização de falta expresso na equação (7.2) é determinado pelo efeito combinado da resistência de falta e da corrente de carga, no entanto, não é garantido que, para baixas resistências de falta a onda refletida estará dentro dos limites estabelecidos na equação (7.3), tendo em vista que os métodos baseados em fasores pouco são afetados por resistências de falta baixas. Assim, uma nova janela de

busca foi criada para ser usada quando a equação (7.3) não tiver o tamanho suficiente para detectar ondas induzidas por faltas. A nova janela de busca é construída com base na média aritmética dos erros absolutos (em km), da contribuição do erro referente à resistência de falta (equação (7.4)) e à corrente de carga (equação (7.5)), conforme equação (7.6):

$$erro(R_F) = \frac{R_F}{k} = \frac{R_F \cdot \hat{I}_F}{\Delta \hat{I}_L}, \quad (7.4)$$

$$erro(\hat{I}_L) = Im \left(\frac{\hat{I}_L - \hat{I}_{pre}}{\hat{I}_L e^{j\phi}} \right), \quad (7.5)$$

$$s_{w2} = d_F \pm \frac{\left| \frac{R_F/k}{X+} \right| + \left| Im \left(\frac{\hat{I}_L - \hat{I}_{pre}}{\hat{I}_L e^{j\phi}} \right) \cdot d_F \right|}{2}. \quad (7.6)$$

Como o erro referente a resistência de falta (equação (7.4)) é dado em ohms (Ω) e a janela construída tem por unidade o quilômetro (km), o erro proporcional a resistência de falta foi dividido pela reatância de sequência positiva da linha. Já o erro relacionado à corrente de carga (equação (7.5)), é um valor adimensional e é proporcional a distância de ocorrência do curto-circuito (d_F).

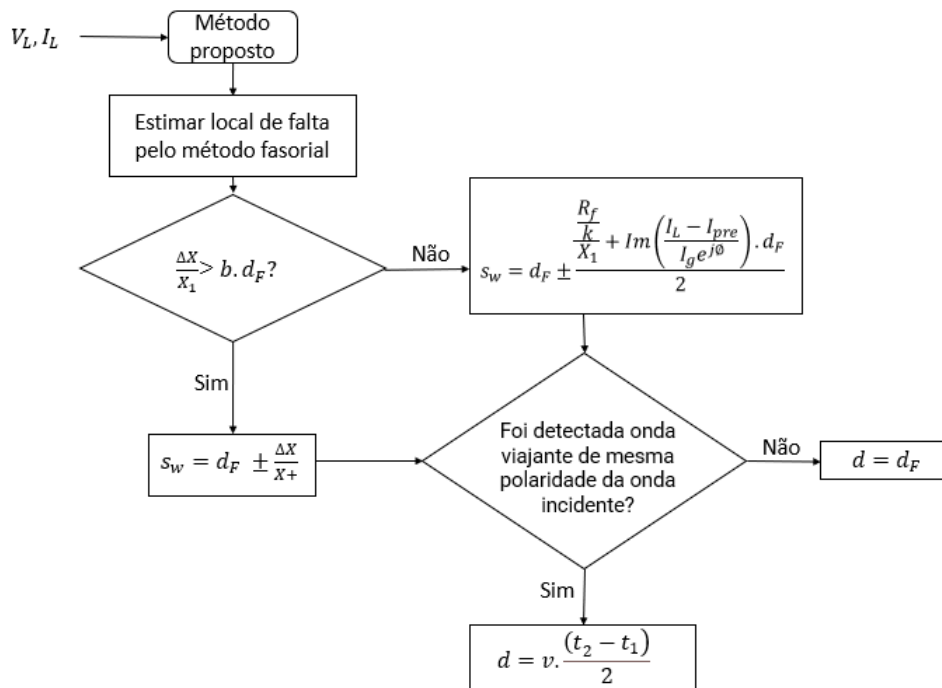
Desse modo, o método consiste na detecção da onda refletida do surto a partir de duas janelas de pesquisa baseadas no erro combinado de localização proveniente dos efeitos da corrente de carga e da resistência de falta.

Na Figura 7.2, a metodologia utilizada para estimar corretamente o local de falta é apresentada. Como pode ser visto, inicialmente o método proposto estima a localização do curto-circuito a partir da técnica WZ, a qual apresentou os melhores resultados na avaliação realizada no capítulo 5. Para acelerar o processo de seleção da janela de busca, o algoritmo testa se $\Delta X/X+ > b \cdot d_F$, sendo b descrito na equação (5.10). Se essa condição for verdadeira, presume-se que a contribuição relativa à resistência de falta é maior do que a contribuição da corrente de carga, e portanto, s_{w1} é usada como janela de busca. Caso contrário, s_{w2} é selecionada. Uma vez determinada a janela de busca, o algoritmo detecta a onda refletida como sendo a primeira onda viajante que possui a mesma polaridade da onda incidente e que esteja contida dentro da janela, assim como no método híbrido tradicional. Caso a última condição não esteja satisfeita,

ou seja, não for detectada a onda viajante em questão, o algoritmo estima o local de falta a partir do método fasorial utilizado.

A transformada *wavelet* foi utilizada como ferramenta para detectar os surtos provenientes de falta. Apenas sinais de corrente foram utilizados como dados de entrada do algoritmo baseado em ondas viajantes, de modo a evitar que os resultados sejam influenciados pelas respostas em frequência dos TPC.

Figura 7.2 – Fluxograma do método proposto.



Fonte: autoria própria.

7.1 Síntese do capítulo

Foi apresentado, neste capítulo, o aprimoramento da janela de busca para detectar a onda refletida do ponto de falta do método híbrido clássico. Geralmente, a janela de busca reportada na literatura é uma janela fixa, a qual depende do ponto de falta estimado pelo método fasorial e do comprimento da LT. No entanto, a onda refletida pode estar além dos limites dessa janela a depender dos parâmetros de falta do curto-circuito. Dessa forma, uma janela adaptativa pode melhorar a exatidão dos métodos

híbridos. Portanto, um novo conceito para criar a janela de busca para detectar a onda refletida do ponto de falta foi apresentado, em que duas janelas de busca são construídas por meio do uso do erro combinado da resistência de falta e da corrente de carga. A primeira janela é baseada no erro combinado dado em km. A segunda janela, é baseada no erro médio aritmético da resistência de falta e da corrente de carga. A segunda janela é apenas usada no algoritmo proposto quando o erro de resistência é menor do que o erro da corrente de carga, uma vez que tal situação proporciona a criação de janelas com tamanhos insuficientes para detectar ondas refletidas, isso ocorre, principalmente para faltas próximas ao terminal monitorado com baixa resistência de falta.

Capítulo 8

Avaliação do método proposto

A avaliação de desempenho do método aprimorado para estimar a localização de faltas em linhas de transmissão com dados de um terminal foi realizada por meio das seguintes etapas:

- Análises comparativas com o método fasorial WZ utilizado no algoritmo híbrido;
- Análises comparativas com o método híbrido tradicional reportado em Xinzhou *et al.* (2002).

O método proposto foi apenas comparado com o método WZ e XI para verificar os ganhos da aplicação do método híbrido em relação ao método fasorial e a melhoria de desempenho na detecção da onda refletida em comparação com o método XI. Para tanto, utilizou-se o SEP descrito na seção 6.1. A frequência amostral utilizada para as simulações foi de 1 MHz (SCHWEITZER *et al.*, 2016) para o método baseado na teoria de ondas viajantes e de 960 Hz para o método baseado em impedância (PHADKE; THORP, 2009). Os registros oscilográficos obtidos pela simulação via ATP foram processados por meio de avaliações *offline*. Para efeitos comparativos, o erro de localização de faltas foi estimado a partir da Equação (5.1)

8.1 Análises comparativas entre os métodos avaliados

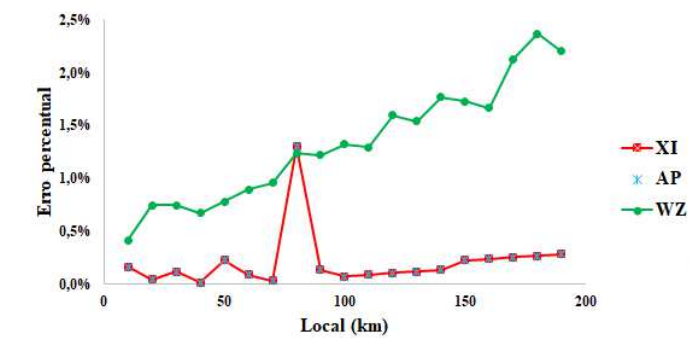
A etapa de avaliação do algoritmo proposto (AP) foi feita a partir de comparações de desempenho com o método XI e WZ. Para tanto, avaliou-se o desempenho dos

algoritmos por meio de análises de sensibilidade de parâmetros que podem afetar seus desempenhos. Tais avaliações são necessárias para compreender os ganhos obtidos com a implementação do método proposto. Dessa forma, a análise comparativa entre os métodos é dividida em quatro partes. Inicialmente, faz-se uma análise dos resultados para curtos-circuitos aplicados em diferentes locais da LT. Em segundo lugar, avalia-se o desempenho dos algoritmos sob a influência da resistência de falta. Depois, avalia-se os algoritmos sob a influência do ângulo de incidência de falta, e por fim, um conjunto de casos são avaliados a partir da combinação das variáveis selecionadas.

8.1.1 Influência da Distância de Falta

Avalia-se nesta subseção, o desempenho dos algoritmos proposto, WZ e XI diante da variação da distância do ponto de medição até o local de ocorrência do curto-circuito. Para tanto, curtos-circuitos monofásicos com $R_F = 1\Omega$, e $\Theta = 90^\circ$, foram simulados ao longo da LT de 10 ao km 190, em passos de 10 km, totalizando assim, 19 casos. Na Figura 8.1, os resultados obtidos são ilustrados.

Figura 8.1 – Influência da distância de falta para os casos simulados.

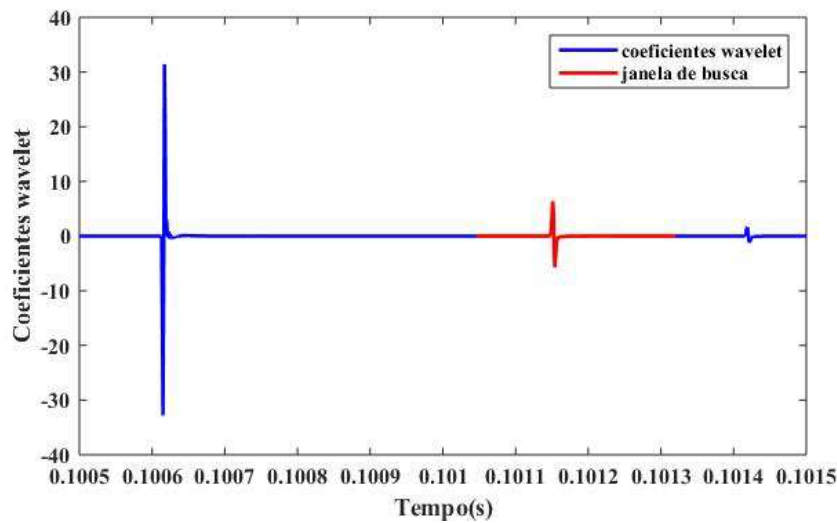


Fonte: autoria própria.

Da Figura 8.1, observa-se que os desvios obtidos para os casos avaliados do algoritmo híbrido proposto foram exatamente os mesmos obtidos para o algoritmo XI e menores em comparação com o método fatorial WZ. Isto se deve ao fato da janela de busca dos métodos híbridos terem tamanhos suficientes para detectar a onda refletida induzida pela falta como a primeira onda contida na janela, exceto para o curto-circuito a 80

km do terminal de medição, uma vez que a sobreposição da onda refletida a partir do ponto de falta com a onda refletida do terminal da LT adjacente causou uma inversão da polaridade da onda resultante, levando os métodos a estimarem a distância de falta pela técnica baseada em componentes fundamentais, conforme Figura 8.2 (a polaridade da onda indicada na janela de busca é inversa a polaridade da onda incidente).

Figura 8.2 – Coeficientes wavelet da corrente para falta aplicada a 80 km



Fonte: autoria própria.

Além disso, para a maioria dos casos, exceto para a falta aplicada à 80 km do terminal de medição, os desvios obtidos foram inferiores a 0,50% para AP e XZ. Isso significa que o ponto de ocorrência do curto-circuito foi estimado corretamente, o que implica que a onda refletida foi detectada dentro da janela de busca proposta para ambos os métodos. Tais valores de desvios são típicos de resultados obtidos por técnicas baseadas em ondas viajantes. Já para o método WZ, os desvios obtidos foram maiores e se intensificaram à medida que a aplicação do curto-circuito se distanciou do terminal monitorado, cujo resultado já era esperado, típico da aplicação de métodos fasoriais de um terminal.

8.1.2 Influência da Resistência de Falta

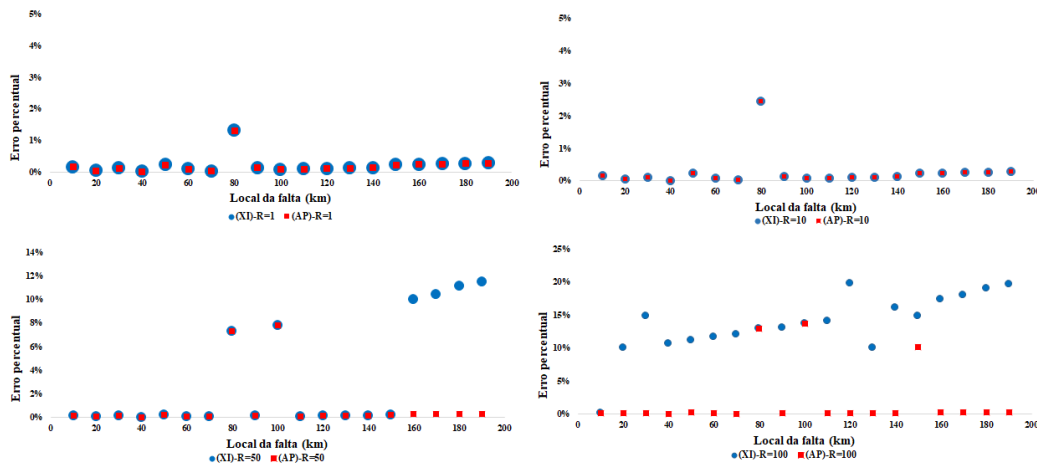
Avalia-se nesta etapa o desempenho do método proposto a partir de análises comparativas com XZ, por meio da variação da resistência de falta para diferentes cenários. Neste sentido, apresenta-se na Tabela 8.1, os casos avaliados que consistem em uma combinação dos parâmetros descritos, perfazendo um total de 76 cenários.

Tabela 8.1 – Casos Avaliados.

Tipo de Falta	$R_f(\Omega)$	Θ (°)	Distância da Falta
AT	1, 10, 50, 100	90	10:10:190

Na Figura 8.3, os resultados obtidos para os métodos são apresentados.

Figura 8.3 – Influência da resistência de falta para os casos simulados.



Fonte: autoria própria.

A partir da Figura 8.3, percebe-se que para o método híbrido proposto, os desvios obtidos para a maioria dos casos ficaram abaixo de 1%. No entanto, para curtos-circuitos a 80 km (comprimento da linha adjacente ao terminal de medição) e 100 km (no meio da linha avaliada), os desvios aumentaram à medida que a resistência da falta avaliada aumentou, isto ocorreu para ambos os métodos e se deve ao fato da sobreposição de ondas de viajantes nesses locais, o que causou inversão de polaridade

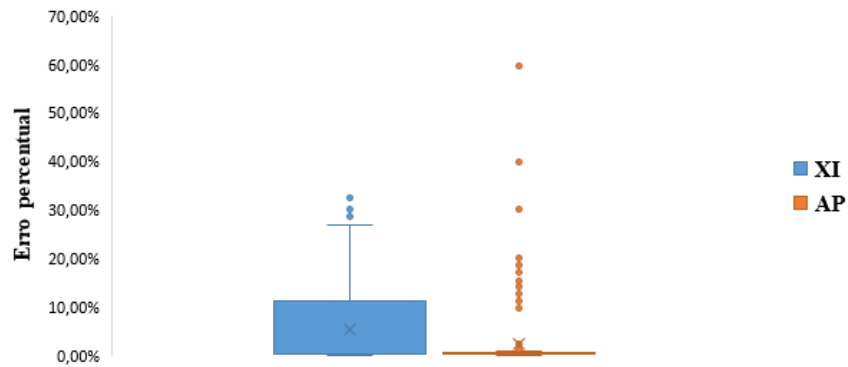
para curto-circuitos a 80 km e atenuação dessas ondas para curtos-circuitos no meio da linha (100 km), fazendo com que os métodos não fossem capazes de detectar a onda refletida do ponto de falta corretamente e, portanto, estimando o ponto de defeito a partir da técnica baseada em impedância.

Quanto aos casos em que os desvios do método proposto foram consideráveis, deve-se ao fato de que o algoritmo detectou mais de uma onda com mesma polaridade da onda incidente, sendo que a primeira onda detectada na janela de busca se referia a surtos refletidos/refratados de outras descontinuidades do SEP. No entanto, foi avaliado que mesmo para esses casos, a onda refletida do ponto de falta está contida dentro da janela de busca do método proposto. Já para o método XI, a onda refletida está fora da janela criada, e por isso, a localização da falta foi estimada pela detecção de uma outra onda viajante ou pelo método fasorial utilizado.

A região de busca construída a partir do método tradicional não foi capaz de detectar corretamente a onda refletida do ponto de falta para 95% dos casos simulados com $R_F = 100 \Omega$. Nesses cenários, a onda refletida estava além dos limites predefinidos pelo método, sendo que na maioria das vezes não foi detectada nenhuma onda refletida dentro da janela de busca, fazendo com que o local de curto-circuito fosse estimado pela técnica baseada em componentes fundamentais e então, maiores desvios fossem obtidos, uma vez que tais funcionalidades são sensíveis ao aumento da resistência de falta. Além disso, para alguns cenários em que a falta foi aplicada na segunda metade da LT, as distâncias estimadas pelo método XI foram maiores do que o próprio comprimento da LT. Isto foi observado para cenários em que o ponto de aplicação do curto-circuito foi maior do que 170 km com $R_F = 100 \Omega$.

Para validar o desempenho do algoritmo proposto quanto à variação da resistência de falta, na Figura 8.4, um *boxplot* dos desvios obtidos para ambos os métodos é apresentado.

Figura 8.4 – Influência da resistência de falta para a técnica tradicional e a proposta.



Fonte: autoria própria.

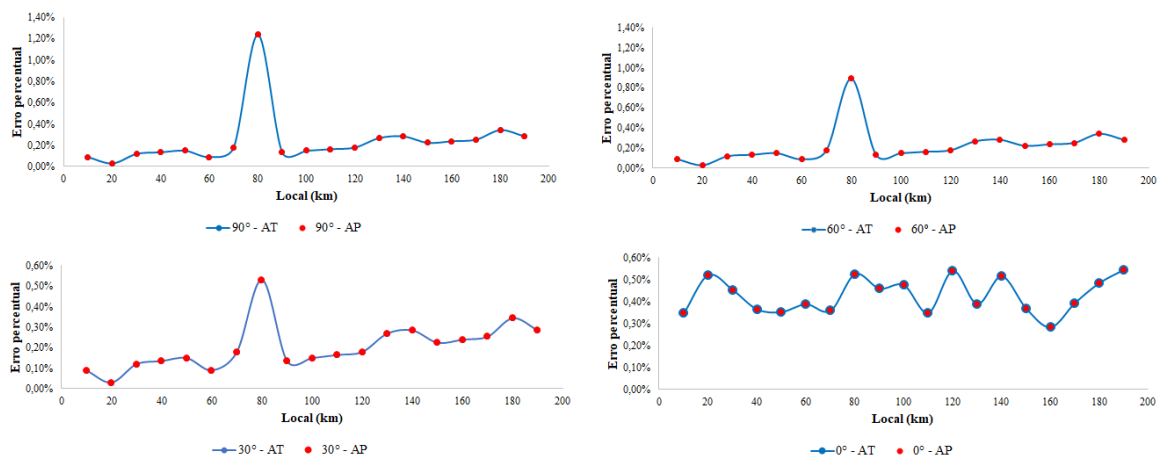
Da Figura 8.4, pode ser verificado alguns *outliers* nos resultados obtidos para o algoritmo proposto. No entanto, verifica-se também uma menor variabilidade dos erros percentuais para o algoritmo proposto em comparação com o algoritmo XI, além da média que também foi menor para AP, cujos valores obtidos foi de 4,1914% para AP, contra 12,7251% para XI. É importante frisar que mesmo nos cenários em que os erros obtidos para AP foram maiores (*outliers*), a onda refletida verdadeira foi encontrada dentro da janela de busca, muito embora não tenha sido detectada como sendo a primeira onda.

De um total de 76 casos avaliados, em 84% deles, o método proposto detectou corretamente a onda refletida a partir da falta. Dos 16% em que o método não estimou corretamente o ponto de ocorrência do distúrbio, 10% refere-se a cenários em que a onda refletida foi detectada de modo incorreto, mas encontra-se dentro da janela de busca. Os outros 6% fazem parte dos curtos-circuitos aplicados a 80 e 100 km, em que as ondas sofreram inversão de polaridade ou atenuação de transitórios. Em contrapartida, o método híbrido tradicional acertou 50% dos casos avaliados, os outros 50% são referentes a estimação por técnica fasorial ou detecção de uma onda refletida que não se refere a onda proveniente do ponto de falta. Assim, diante da exposição dos resultados, conclui-se que o método híbrido proposto mostrou melhor desempenho para análise de resistência de falta do que o método híbrido tradicional.

8.1.3 Influência do Ângulo de Incidência de Falta

Avalia-se, nesta subseção, o desempenho do algoritmo proposto e do algoritmo XI sob a influência do ângulo de incidência de falta, com base em simulações realizadas considerando curtos-circuitos monofásicos, com $R_F = 1 \Omega$, e ângulos de incidência iguais a 0° , 30° , 60° e 90° . Na Figura 8.5, os resultados obtidos nesta etapa são apresentados para ambas as técnicas.

Figura 8.5 – Influência do ângulo de incidência de falta para os algoritmos proposto e tradicional.



Fonte: autoria própria.

Pode-se verificar a partir da Figura 8.5, que os mesmos desvios foram obtidos para ambos os algoritmos. De fato, o ângulo de incidência de falta não afeta de modo significativo o erro dos algoritmos baseados em componentes fundamentais, o que permite que a janela de busca de ambos os métodos tenha tamanho suficiente para detectar a onda refletida da falta quando esta possui amplitude suficiente para ser detectada e a mesma polaridade da onda incidente. Além disso, pode-se observar que, para ângulos iguais a 0° , os desvios foram maiores, uma vez que não foi possível estimar a localização dos curtos-circuitos por ondas viajantes. Curtos-circuitos que ocorrem próximos ao zero da tensão tipicamente não lançam ondas viajantes ou apresentam transitórios atenuados, levando ambos os algoritmos a estimarem a localização da falta pela técnica baseada em componente fundamental. Já para as faltas a 80 km, houve uma inversão de polaridade da onda refletida devido a existência de LT adjacentes de mesmo comprimento do local de falta.

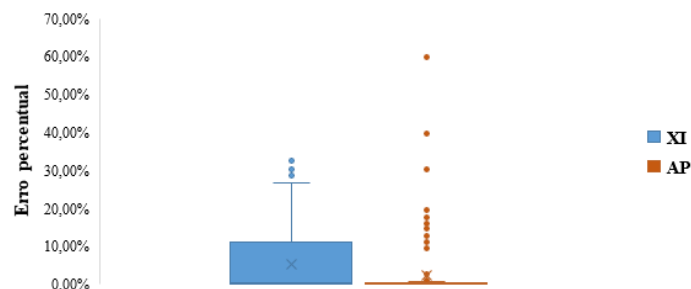
8.1.4 Influência do Tipo de Falta

Nesta última subseção da análise comparativa entre os métodos proposto e tradicional, faz-se um estudo do desempenho das técnicas acerca da influência do tipo de falta. Para tanto, apresenta-se na Figura 8.6 os resultados obtidos para o conjunto de cenários avaliados descritos na primeira e segunda linhas da Tabela 8.2, e na Figura 8.7 para os casos avaliados conforme terceira linha da Tabela 8.2.

Tabela 8.2 – Casos avaliados.

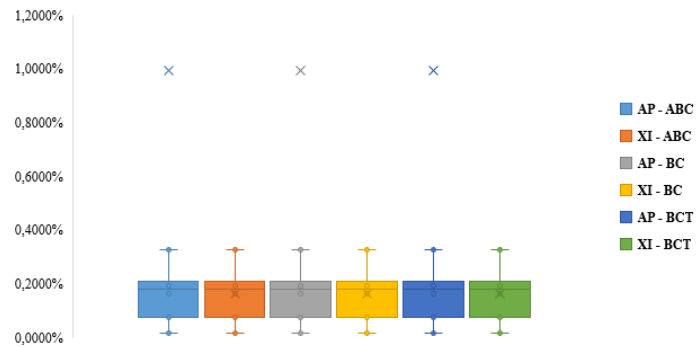
Tipo de Falta	R_f	Θ°	Distância da Falta (km)
AT	200	90	10:10:190
AT	1, 10, 100,	90, 30, 60, 0	10:10:190
BC, BCT, ABC	1, 10, 100	90	0, 50, 90, 110, 150, 170

Figura 8.6 – Influência de faltas AT para XI e AP.



Fonte: autoria própria.

Figura 8.7 – Influência de faltas BC, BCT e ABC para XI e AP



Fonte: autoria própria

Pode-se verificar a partir da Figura 8.6 que para os cenários avaliados, são observados alguns *outliers* nos resultados obtidos para o algoritmo proposto. O total de casos simulados representados na Figura 8.6 foi de 247 cenários, dos quais 15 *outliers* foram obtidos, ou seja, 6% dos casos avaliados. Além disso, foi observado que para todos os casos representados pelos *outliers*, com exceção de curtos-circuitos localizados a 80 km, a onda refletida do ponto de falta foi visualizada dentro da janela de busca, porém não detectada devido à existência de mais de uma onda refletida na região de busca construída para curtos-circuitos distantes do terminal monitorado e com altas resistências de falta ao mesmo tempo, o que causou a detecção incorreta da onda refletida. Ainda dos resultados obtidos, foi observado que o método proposto apresentou uma menor dispersão dos erros percentuais em comparação ao algoritmo tradicional, além da média que também foi menor para AP, cujos valores obtidos foi de 2,7374 % para AP, contra 6,3825 % para XI.

Da Figura 8.7, verifica-se poucas diferenças dos resultados obtidos para o AP e XI. Os *outliers* presentes em AP ocorreram devido à existência de mais de uma onda viajante, com mesma polaridade da onda incidente, dentro da janela de busca para curtos-circuitos a 170 km do terminal de medição e com resistência de falta de 100 Ω . Nestes casos, o desvio obtido pelo método fasorial não foi tão grande, mas devido aos parâmetros de falta a janela criada do algoritmo proposto foi superestimada. No entanto, garante-se que a onda viajante refletida está contida dentro da janela de busca.

Portanto, a partir das análises realizadas foi verificado que o método proposto aprimorou o método híbrido apresentado em Xinzhou *et al.* (2002) na criação de uma janela de busca baseada nos erros de reatância e corrente de carga, diminuindo o empirismo apresentado em XI, sobretudo nos casos de curtos-circuitos com altas resistências, uma vez que a janela de busca criada pelo método proposto foi suficiente para detectar a onda refletida da falta, enquanto que nas avaliações realizadas para o método XI, a onda refletida se encontrou fora da região de busca.

Assim, constata-se que o método híbrido proposto foi mais eficiente para os cenários avaliados do que o método XI e de que é possível alcançar bons resultados por meio do aprimoramento de técnicas híbridas.

Capítulo 9

Conclusões

Um método híbrido de localização de faltas em linhas de transmissão que utiliza informações de apenas um terminal da LT foi apresentado. A técnica utiliza o erro combinado da resistência de falta e da corrente de carga para criar uma janela de busca que contenha a onda refletida da falta. Apesar da robustez das técnicas baseadas em ondas viajantes de dois terminais, por necessitar apenas da detecção da onda que incide da falta nos terminais de medição, a aplicação de técnicas de um terminal surge como uma solução alternativa quando uma perda de referência ocorre entre os dispositivos de sincronização, ou até mesmo da falha de canais de comunicação.

O algoritmo proposto consiste no aprimoramento de um método híbrido já existente reportado na literatura, que utiliza uma janela de busca fixa e empírica para detectar a onda refletida da falta. No entanto, a onda refletida pode estar além dos limites pré-definidos, uma vez que o erro de localização depende dos parâmetros de falta. Basicamente, o algoritmo híbrido estima o local da falta a partir de uma pré estimação realizada por um algoritmo baseado em componentes fundamentais, em que uma janela de busca é criada a partir dessa localização para detectar a onda refletida do ponto de falta por meio de técnicas baseadas em ondas viajantes.

Diferentemente de técnicas clássicas reportadas na literatura que utilizam janelas criadas de modo empírico, o método proposto baseia-se na criação de duas janelas de busca que dependem do erro combinado da resistência de falta e da corrente de carga, como dito anteriormente. A utilização deste erro permite que a janela de busca seja autoadaptativa, uma vez que o erro combinado é diferente para cada tipo de falta

simulada. Essa autoadaptação da janela é necessária uma vez que o sucesso do método híbrido depende da estimação do local do curto-circuito por técnicas baseadas em componentes fundamentais. É sabido que algoritmos baseados em fasores têm seus desempenhos afetados por altas resistências. Neste sentido, o tamanho da janela de busca deve ser diretamente proporcional ao erro de localização estimado por componentes fundamentais. Então, duas janelas foram propostas, a primeira baseada no próprio erro combinado em km, a qual funciona, basicamente para altas resistências, e uma janela construída a partir da média desses erros, que detecta as ondas viajantes para curtos-circuitos com baixas resistências.

Para avaliar o desempenho do método proposto, diversos cenários de faltas foram simulados no ATP, em que o desempenho do algoritmo proposto foi comparado ao desempenho do algoritmo tradicional sob as mesmas condições. Para tanto, foram considerados diferentes cenários para curtos-circuitos simulados ao longo da linha para tipos diferentes de faltas, ângulos de incidência e resistência de falta variadas. Dos resultados obtidos, foi constatado que o algoritmo proposto obteve melhor resultado principalmente quando cenários com resistências de faltas de 100 e 200 Ω foram avaliados.

De fato, o método híbrido proposto tem um desempenho semelhante ao método híbrido tradicional para curtos-circuitos que ocorrem com baixas resistências de faltas e distâncias próximas ao terminal monitorado, uma vez que o erro estimado pelo método baseado em componentes fundamentais ocorre dentro dos limites da região de busca da onda refletida do método híbrido tradicional e do método híbrido proposto.

Para faltas AT, menores desvios foram obtidos para o algoritmo proposto em relação ao algoritmo tradicional. De fato, para curto-circuitos simulados com altas resistências e distantes da linha, ao mesmo tempo, ou não, a janela de busca do método tradicional não foi capaz de detectar ondas refletidas, pois o algoritmo fasorial estimou a distância de falta com erros além dos limites predefinidos pelo referido método. Assim, o desempenho do método híbrido proposto é superior ao desempenho do método híbrido tradicional, principalmente para curtos-circuitos que ocorrem para faltas monofásicas. Além disso, mesmo para faltas monofásicas em que a onda refletida não foi detectada corretamente pelo algoritmo tradicional, constatou-se que, para os cenários avaliados,

a verdadeira onda refletida encontra-se dentro da janela de busca construída, só não foi detectada como a primeira da janela.

Por outro lado, para curtos-circuitos distantes do terminal monitorado e com altas resistências de falta, o método tradicional não foi capaz de detectar a onda refletida da falta, no entanto, o não envolvimento do modo terra, para curtos-circuitos BC e ABC causou uma estimativa precisa do método fasorial utilizado, permitindo a detecção correta da onda refletida.

Além disso, avaliou-se o desempenho de métodos baseados em componentes fundamentais e ondas viajantes de um e dois terminais sob a influência de diferentes modelos de LT (Bergeron e JMarti) utilizados para simular os curtos-circuitos. Como esperado, os cenários em que o modelo de Bergeron foi considerado apresentaram menores desvios para os métodos baseados na teoria de ondas viajantes. Em contrapartida, maiores desvios foram obtidos para os cenários simulados considerando o modelo de JMarti, e, por isso, tal modelo deve ser utilizado preferencialmente ao modelo de Bergeron, uma vez que representa os transitórios de modo mais realístico, permitindo que resultados mais confiáveis e próximos da realidade sejam obtidos.

Ainda sobre as avaliações realizadas para os modelos de LT, os resultados obtidos para métodos baseados em impedância foram muito semelhantes para os dois modelos avaliados, o que já era esperado, uma vez que os métodos baseados em componentes fundamentais utilizam apenas a estimação dos fasores medidos no terminal da LT, e para isso necessitam de uma baixa taxa de amostragem, não permitindo que os efeitos causados por ondas viajantes, como atenuação e dispersão, por exemplo, possam ser visualizados nem considerados para esses casos.

Ademais, a velocidade de propagação de ondas viajantes em LT foi avaliada de três maneiras diferentes, sendo a velocidade determinada pelo processo de energização da LT mais indicada para uso prático.

Para continuação da pesquisa realizada neste trabalho, propõe-se os seguintes temas para os trabalhos futuros:

- Avaliação do método híbrido considerando diferentes tipos de técnicas de detecção de transitórios;

- Avaliação do método proposto considerando diferentes técnicas baseadas em componentes fundamentais;
- Avaliação do desempenho da técnica proposta para SEP com LT com compensação série;
- Realizar análise de sensibilidade para diferentes relações sinal-ruído;
- Avaliar os modelos de LT para linhas não transpostas e compará-los;
- Realizar avaliação dos transdutores.

Referências

- ALTAY, O.; GURSOY, E.; KALENDERLI, O. Single end travelling wave fault location on transmission systems using wavelet analysis. In: IEEE. *2014 ICHVE International Conference on High Voltage Engineering and Application*. [S.l.], 2014. p. 1–4.
- ALVES, W. M. Adaptação do método de wiszniewski para agregar maiorexatidão à localização de faltas em linhas de transmissão com dados de um terminal. Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.
- ARAÚJO, A. E. A.; NEVES, W. L. A. *Cálculos de transitórios eletromagnéticos em sistemas de energia*. [S.l.]: Editora UFMG, 2005.
- AURANGZEB, M.; CROSSLEY, P.; GALE, P. Fault location on a transmission line using high frequency travelling waves measured at a single line end. In: IEEE. *2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No. 00CH37077)*. [S.l.], 2000. v. 4, p. 2437–2442.
- AURANGZEB, M.; CROSSLEY, P.; GALE, P. Fault location using the high frequency travelling waves measured at a single location on a transmission line. In: IET. *2001 Seventh International Conference on Developments in Power System Protection (IEE)*. [S.l.], 2001. p. 403–406.
- BEWLEY, L. V. *Traveling waves on transmission systems*. [S.l.]: Dover, 1963. v. 1104.
- CENTER, L. E. *ATP - Alternative Transient Program: Rule book*. [S.l.], 1987.
- CHRISTOPOULOS, C.; THOMAS, D.; WRIGHT, A. Scheme, based on travelling-waves, for the protection of major transmission lines. In: IET. *IEE Proceedings C-Generation, Transmission and Distribution*. [S.l.], 1988. v. 135, n. 1, p. 63–73.
- COMMITTEE, I. P. S. R. *et al.* Emtpp reference models for transmission line relay testing. URL <http://www.pes-psrc.org>, 2004.
- COSTA, F.; SOUZA, B. A. Fault-induced transient analysis for realtime fault detection and location in transmission lines. In: *International Conference on Power Systems Transients*. [S.l.: s.n.], 2011.
- COSTA, F. B. *et al.* Uma técnica de diagnóstico em tempo real de distúrbios transitórios baseada na transformada walvelet para uso em registradores digitais de perturbação. Universidade Federal de Campina Grande, 2010.

- COURY, D. V.; OLESKOVICZ, M.; GIOVANINI, R. *Proteção digital de sistemas elétricos de potência: dos relés eletromecânicos aos microprocessados inteligentes*. [S.l.]: SEL/EESC/USP, 2007.
- CROSSLEY, P.; MCLAREN, P. Distance protection based on travelling waves. *IEEE transactions on power apparatus and systems*, IEEE, n. 9, p. 2971–2983, 1983.
- DALCASTAGNÊ, A. L. *et al.* Método iterativo para localização de faltas em linhas de transmissão a partir de fasores não-sincronizados. Florianópolis, SC, 2007.
- DAS, S.; SANTOSO, S.; GAIKWAD, A.; PATEL, M. Impedance-based fault location in transmission networks: theory and application. *IEEE access*, IEEE, v. 2, p. 537–557, 2014.
- DAUBECHIES, I. *Ten lectures on wavelets*. [S.l.]: SIAM, 1992.
- DJURIĆ, M. B.; DJURIŠIĆ, Ž. R. Frequency measurement of distorted signals using fourier and zero crossing techniques. *Electric Power Systems Research*, Elsevier, v. 78, n. 8, p. 1407–1415, 2008.
- DOMMEL, H. W. Digital computer solution of electromagnetic transients in single-and multiphase networks. *IEEE transactions on power apparatus and systems*, IEEE, n. 4, p. 388–399, 1969.
- DONG, X.; SHI, S.; CUI, T.; LU, Q. Optimizing solution of fault location using single terminal quantities. *Science in China Series E: Technological Sciences*, Springer, v. 51, n. 6, p. 761–772, 2008.
- ENG, N. E.; RAMAR, K. Single-ended traveling wave based fault location on two terminal transmission lines. In: IEEE. *TENCON 2009-2009 IEEE Region 10 Conference*. [S.l.], 2009. p. 1–4.
- ERIKSSON, L.; SAHA, M. M.; ROCKEFELLER, G. An accurate fault locator with compensation for apparent reactance in the fault resistance resulting from remote-end infeed. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, IEEE, n. 2, p. 423–436, 1985.
- FENG, Z.; JUN, L.; LI, Z.; ZHIHAO, Y. A new fault location method avoiding wave speed and based on traveling waves for ehv transmission line. In: IEEE. *2008 Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*. [S.l.], 2008. p. 1753–1757.
- GALE, P.; CROSSLEY, P.; BINGYIN, X.; YAOZHONG, G.; CORY, B.; BARKER, J. Fault location based on travelling waves. In: IET. *1993 Fifth International Conference on Developments in Power System Protection*. [S.l.], 1993. p. 54–59.
- GAMA, J. R. Estudo de sensibilidade paramétrica de algoritmos de localização de faltas baseados na análise de componentes fundamentais. 2018.
- GILANY, M.; IBRAHIM, D. khalil *et al.* 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.

- GUZMÁN, A.; KASZTENNY, B.; TONG, Y.; MYNAM, M. V. Accurate and economical traveling-wave fault locating without communications. In: IEEE. *2018 71st Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE)*. [S.l.], 2018. p. 1–18.
- HART, D. G.; NOVOSEL, D.; SMITH, R. A. Modified cosine filters. *S. Patent*, v. 6154687, 2000.
- HE, Z.; MAI, R.; HE, W.; QIAN, Q. Phasor-measurement-unit-based transmission line fault location estimator under dynamic conditions. *IET generation, transmission & distribution*, IET, v. 5, n. 11, p. 1183–1191, 2011.
- HOSHMEH, A.; SCHMIDT, U. A full frequency-dependent cable model for the calculation of fast transients. *Energies*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 10, n. 8, p. 1158, 2017.
- HUANG, T.-x.; DONG, X.-z.; SHI, S.-x.; WANG, B. Applicable range analysis of optimized single-terminal fault location algorithm. In: IEEE. *2011 International Conference on Advanced Power System Automation and Protection*. [S.l.], 2011. v. 2, p. 831–835.
- IEEE. Emtp reference models for transmission line relay testing. 2004.
- IEEE. *Guide for Determining Fault Location on AC Transmission and Distribution Lines*. 2005.
- IRWIN, J. D.; NELMS, R. M. *Basic engineering circuit analysis*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1939.
- ITAIPU. *Integracao ao sistema brasileiro - Itaipu Binacional*. [S.l.], 2022.
- JAMALI, S.; GHEZELJEH, A. Fault location on transmission line using high frequency travelling waves. IET, 2004.
- JIAN, Q.; XIANGXUN, C.; JIANCHAO, Z. Travelling wave fault location of transmission line using wavelet transform. In: IEEE. *POWERCON'98. 1998 International Conference on Power System Technology. Proceedings (Cat. No. 98EX151)*. [S.l.], 1998. v. 1, p. 533–537.
- JIE, L.; ELANGO VAN, S.; DEVOTTA, J. Adaptive travelling wave protection algorithm using two correlation functions. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 14, n. 1, p. 126–131, 1999.
- JOHNS, A.; JAMALI, S. Accurate fault location technique for power transmission lines. In: IET. *IEE Proceedings C-Generation, Transmission and Distribution*. [S.l.], 1990. v. 137, n. 6, p. 395–402.
- JÚNIOR, L. G. T. *et al.* Aplicações da série de fourier em análise de sinais elétricos. Universidade Federal Rural do Semi-Árido, 2020.
- KALE, V.; BHIDE, S.; BEDEKAR, P. Fault location estimation based on wavelet analysis of traveling waves. In: IEEE. *2012 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*. [S.l.], 2012. p. 1–5.

- LEI, A.; DONG, X.; SHI, S. A novel method to identify the travelling wave reflected from the fault point or the remote-end bus. In: IEEE. *2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting*. [S.l.], 2015. p. 1–5.
- LIANG, J.; ELANGOVA, S.; DEVOTTA, J. Application of wavelet transform in travelling wave protection. *International journal of electrical power & energy systems*, Elsevier, v. 22, n. 8, p. 537–542, 2000.
- LIU, Y.; SHENG, G.; HE, Z.; JIANG, X. A traveling wave fault location method for earth faults based on mode propagation time delays of multi-measuring points. *Prz. elektrotechn*, v. 88, n. 3a, p. 254–258, 2012.
- 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. *et al.* Localização de faltas em tempo real baseada na teoria de ondas viajantes usando dados não sincronizados de dois terminais. Universidade Federal de Campina Grande, 2014.
- MALLAT, S. *A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation*, *IEEE T. Pattern Anal.*, 11, 674–693. 1989.
- 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.
- MARTINEZ-VELASCO, J.; GUSTAVSEN, B. Overview of overhead line models and their representation in digital simulations. In: *Proceedings International Conference on Power Systems Transients (IPSTâ2001)*. [S.l.: s.n.], 2001. p. 1–6.
- MCLAREN, P.; RAJENDRA, S. Travelling-wave techniques applied to the protection of teed circuits:-principle of travelling-wave techniques. *IEEE transactions on power apparatus and systems*, IEEE, n. 12, p. 3544–3550, 1985.
- NGU, E.; MONTAÑO, R.; RAMAR, K.; COORAY, V. Influence of various transmission line models on the wavelet transformation based fault location methods. In: IEEE. *2009 IEEE International Conference on Signal and Image Processing Applications*. [S.l.], 2009. p. 48–52.
- NOVOSEL, D.; HART, D.; HU, Y.; MYLLYMAKI, J. *System for locating faults and estimating fault resistance in distribution networks with tapped loads*. [S.l.]: Google Patents, 1998. US Patent 5,839,093.
- ONS. *Extensao da rede basica de transmissao*. Disponível em: <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>. Acesso em 23 de Julho de 2022. [S.l.], 2022.

ONS. *Requisitos mínimos para linhas de transmissão aéreas*. [S.l.], 2022.

PATHIRANA, V.; MCLAREN, P.; DIRKS, E. Investigation of a hybrid travelling wave/impedance relay principle. In: IEEE. *IEEE CCECE2002. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Conference Proceedings (Cat. No. 02CH37373)*. [S.l.], 2002. v. 1, p. 48–53.

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

PHADKE, A. G.; THORP, J. S. *Computer relaying for power systems*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2009.

REIS, R.; NEVES, W.; JR, D. F.; LOPES, F. Influência de transformadores para instrumentos e filtros anti-aliasing sobre localizadores de faltas baseados na teoria de ondas viajantes.

REIS, R. L. d. A. *Aprimoramento de soluções de localização de curtos-circuitos em linhas de transmissão*. Tese (Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Campina Grande, 2019.

REPORT, A. C. Bibliography and summary of fault location methods [includes discussion]. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems*, IEEE, v. 74, n. 3, p. 1423–1428, 1955.

RESTREPO, L. H.; DELGADO, G. C.; CASTRO-ARANDA, F. Modelos de línea de transmisión para transitorios electromagnéticos en sistemas de potencia. *Energía y computación*, v. 16, n. 1, 2008.

RIBEIRO, L. M.; CUNHA, G. A.; RIBEIRO, E. P.; BRITTO, A. G.; LOPES, 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.

SAHA, M. M.; IZYKOWSKI, J.; ROSOŁOWSKI, E. *Fault location on power networks*. [S.l.]: Springer, 2010. v. 2.

SALIM, R.; SALIM, K.; BRETAS, A. Further improvements on impedance-based fault location for power distribution systems. *IET Generation, Transmission & Distribution*, IET, v. 5, n. 4, p. 467–478, 2011.

SCHWEITZER, E. O.; KASZTENNY, B.; MYNAM, M. V. Performance of time-domain line protection elements on real-world faults. In: IEEE. *2016 69th Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE)*. [S.l.], 2016. p. 1–17.

SHARMA, S.; MYNAM, M. V. Experiência em campo com um relé de linhas de transmissão de ultra-alta-velocidade e localizador de faltas por ondas viajantes. In: *45th Annual Western Protective Relay Conference Spokane*. [S.l.: s.n.], 2019.

SHEHAB-ELDIN, E.; MCLAREN, P. Travelling wave distance protection-problem areas and solutions. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 3, n. 3, p. 894–902, 1988.

- SILVA, K. M. Estimação de fasores baseada na transformada wavelet para uso na proteção de distância de linhas de transmissão. Universidade Federal de Campina Grande, 2009.
- SILVEIRA, E. G.; OLIVEIRA, F. J. de. Localização de faltas em linhas de transmissão em corrente contínua segmentadas. *ForScience*, v. 1, n. 1, p. 33–48, 2013.
- SILVEIRA, E. G. da. Localização de faltas em linhas de transmissão: desenvolvimento de novos algoritmos e implementação de sistema computacional para aplicações práticas. Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.
- SILVEIRA, M. I. da; RAPHAEL, L. d. A.; NEVES, W. L. Localização de curtos-circuitos em linhas de transmissão: Desafios para os métodos baseados no domínio do tempo com dados de um terminal. In: *Congresso Brasileiro de Automática-CBA*. [S.l.: s.n.], 2020. v. 2, n. 1.
- SPOOR, D.; ZHU, J. G. Improved single-ended traveling-wave fault-location algorithm based on experience with conventional substation transducers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 21, n. 3, p. 1714–1720, 2006.
- TAKAGI, T.; YAMAKOSHI, Y.; YAMAURA, M.; KONDOW, R.; MATSUSHIMA, T. Development of a new type fault locator using the one-terminal voltage and current data. *IEEE Transactions on Power apparatus and systems*, IEEE, n. 8, p. 2892–2898, 1982.
- TAVIGHI, A.; MARTÍ, J.; GUTIÉRREZ-ROBLES, J. Comparison of the fdline and ulm frequency dependent emtp line models with a reference laplace solution. In: *Proc. Int. Conf. on Power Systems Transients (IPST 2015)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–8.
- TZIOUVARAS, D. A.; ROBERTS, J. B.; BENMOUYAL, G. New multi-ended fault location design for two-or three-terminal lines. IET, 2001.
- WELTON, D. M. Transmission lines: Theory, types and application. *Electrical Engineering Developments*, Nova Science Publishers, 2010.
- WILLIAM, H. K. *et al.* Distribution system modeling and analysis. *Ed.: CRC Press, USA*, 2002.
- WISZNIEWSKI, A. Accurate fault impedance locating algorithm. In: IET. *IEE Proceedings C-Generation, Transmission and Distribution*. [S.l.], 1983. v. 130, n. 6, p. 311–314.
- XIE, F.; HADDAD, A.; GRIFFITHS, H. Single-ended fault location method based on wavelet theory: Application to a double-circuit transmission line. In: IEEE. *2013 48th International Universities' Power Engineering Conference (UPEC)*. [S.l.], 2013. p. 1–6.
- XINZHOU, D.; ZHENG, C.; XUANZHOU, H.; KEHONG, W.; CHENGMU, L. Optimizing solution of fault location. In: IEEE. *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*. [S.l.], 2002. v. 3, p. 1113–1117.

XU, F.; DONG, X. A novel single-ended traveling wave fault location method based on reflected wave-head of adjacent bus. IET, 2014.

ZHENG, X.; LI, X.; DING, J.; DUAN, Z. Study on impedance-traveling wave assembled algorithm in one-terminal fault location system for transmission lines. In: IEEE. *2008 Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*. [S.l.], 2008. p. 1723–1726.

ZHENG, X.; LI, X.; DING, J.; ZHANG, Y. Design and implementation of one-terminal fault location system based on impedance-traveling wave assembled algorithm. In: IEEE. *2009 International Conference on Sustainable Power Generation and Supply*. [S.l.], 2009. p. 1–5.