



**LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS PARALELAS  
BASEADA NA TEORIA DE ONDAS VIAJANTES UTILIZANDO  
DADOS DE UM TERMINAL**

**FERNANDO MARINHO DE MAGALHÃES JÚNIOR**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS PARALELAS BASEADA  
NA TEORIA DE ONDAS VIAJANTES UTILIZANDO DADOS DE UM  
TERMINAL

FERNANDO MARINHO DE MAGALHÃES JÚNIOR

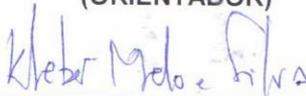
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA  
ELÉTRICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO  
PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.

APROVADA POR:



---

FELIPE VIGOLVINO LOPES, Dr., ENE/UNB  
(ORIENTADOR)



---

KLEBER MELO E SILVA, Dr., ENE/UNB  
(EXAMINADOR INTERNO)



---

FERNANDA CASEÑO TRINDADE ARIOLI, Dr., UNICAMP  
(EXAMINADOR EXTERNO)

Brasília, 01 de julho de 2019.

## FICHA CATALOGRÁFICA

DE MAGALHÃES JÚNIOR, FERNANDO MARINHO

Localização de Faltas em Linhas Paralelas Baseada na Teoria de Ondas Viajantes Utilizando Dados de Um Terminal. [Distrito Federal] 2019.

xxxii, 153p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Mestre, Engenharia Elétrica, 2019).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia

1. Linha de Transmissão

2. Linhas Paralelas

3. Localização de Faltas

4. Ondas Viajantes

I. ENE/FT/UnB

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

DE MAGALHÃES JR., F. M. (2019). Localização de Faltas em Linhas Paralelas Baseada na Teoria de Ondas Viajantes Utilizando Dados de Um Terminal. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGEE.DM-722/2019, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 153p.

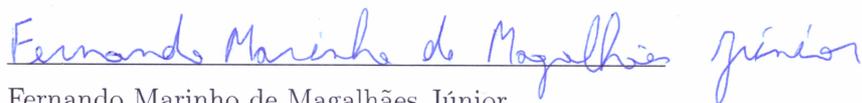
## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Fernando Marinho de Magalhães Júnior

TÍTULO: Localização de Faltas em Linhas Paralelas Baseada na Teoria de Ondas Viajantes Utilizando Dados de Um Terminal.

GRAU: Mestre ANO: 2019

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



Fernando Marinho de Magalhães Júnior

Universidade de Brasília (UnB)

Campus Darcy Ribeiro

Faculdade de Tecnologia (FT)

Departamento de Engenharia Elétrica (ENE)

CEP 70910-900 - Brasília - DF - Brasil

*À minha esposa Renata, meus filhos Felipe e Heitor, meus pais Fernando e Edinalva, minha  
irmã Renata e meus sobrinhos Maria Clara e Carlos Eduardo, DEDICO.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço acima de tudo a Deus, criador de tudo e de todas as possibilidades.

Aos meus pais por toda dedicação e apoio ao longo de minha vida e por todo suporte para que eu me dedicasse aos estudos, desde a mais tenra idade.

À minha esposa Renata pelo incentivo para que eu fosse em busca do mestrado e apoio durante todo o seu decorrer.

Aos meus filhos Felipe e Heitor pelos momentos de alegria, tornando a jornada de elaboração deste trabalho mais suave.

Ao meu orientador, Professor Felipe, pela excelente orientação, sem a qual não teria sido possível a conclusão deste trabalho.

Ao Professor Kleber e aos meus amigos do Laboratório de Proteção de Sistemas Elétricos da Universidade de Brasília pelo excelente convívio e apoio durante este período.

Aos colegas, professores e funcionários da Universidade de Brasília que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

À Agência Nacional de Energia Elétrica pelo apoio dado para a realização deste curso.

## RESUMO

Neste trabalho propõe-se um método de localização de faltas baseado na teoria das ondas viajantes de um terminal para linhas paralelas que possam ser consideradas transpostas e desacopladas. Este método detecta a primeira onda lançada pela falta, utilizando um limiar de detecção previamente estabelecido, e se aproveita da topologia do sistema para detectar e classificar de maneira segura uma segunda onda vinda da direção da falta, utilizando um elemento direcional e um limiar adaptativo, a partir da qual a localização da falta é estimada. Para propor este método foi necessário desenvolver um modelo teórico para quantificar corretamente as ondas lançadas, refletidas e refratadas no sistema para linhas trifásicas, considerando as situações das faltas clássicas, que incluem, em sua maior parte, as faltas assimétricas. Para implementar este método é necessário classificar previamente o tipo de falta. Para tirar maior proveito do método de localização de faltas é necessário detectar corretamente o tipo de falta de maneira rápida. Dessa forma, foi desenvolvido um novo método de classificação de faltas rápido em que são necessárias apenas a medição das primeiras ondas incidentes de modo aéreo e terra no terminal monitorado. Testes com simulações em massa foram feitos para validar o método proposto e comparar com o método de localização de faltas de um terminal para linhas paralelas baseado na teoria das ondas viajantes selecionado dentre os existentes na literatura.

**Palavras-chave:** Linha de transmissão, linhas paralelas, localização de faltas, ondas viajantes.

## ABSTRACT

In this study a new single-ended traveling wave-based fault location method for parallel lines that can be considered transposed and decoupled is presented. This method detects the first wave launched by the fault, using a previously defined threshold, and takes advantage of the system topology to accurately detect and classify a second wave that comes from the fault, using an directional element and an adaptive threshold, from which the fault location is estimated. To propose this method, a theoretical model that correctly quantify the waves launched, reflected and refracted in a system with three-phase lines, considering classical faults situations, including mostly asymmetrical faults, was developed. To implement this method is necessary previously classify the fault type. To take full advantage of the fault location method is necessary quickly and correctly identify the fault type. Therefore, its presented a new quick fault classification method which only requires the measurement of the first incident aerial mode and earth mode waves. Massive simulation were carried out to validate the proposed method and compare with the selected single-ended traveling wave-based fault location method for parallel lines method among the described in the literature.

**Keywords:** Fault location, parallel lines, transmission lines, traveling waves.

# SUMÁRIO

<b>Sumário</b>	i
<b>Lista de Figuras</b>	vi
<b>Lista de Tabelas</b>	ix
<b>Siglas</b>	xi
<b>Lista de Símbolos</b>	xiii
<b>Capítulo 1 – Introdução</b>	1
1.1 Contextualização do tema . . . . .	1
1.2 Motivação . . . . .	2
1.3 Objetivo do trabalho . . . . .	6
1.4 Contribuições e Publicações . . . . .	7
1.5 Organização do texto . . . . .	8
<b>Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica</b>	10
2.1 Importância da localização de faltas em linhas de transmissão . . . . .	10
2.2 Características da localização de faltas utilizando a teoria das ondas viajantes .	10
2.3 Classificação da localização de faltas utilizando a teoria das ondas viajantes . . .	12
2.4 Métodos de localização de faltas baseado na teoria de ondas viajantes utilizando dados de um terminal . . . . .	14
2.5 Síntese da revisão bibliográfica . . . . .	22
<b>Capítulo 3 – Fundamentação teórica da propagação de ondas viajantes em linhas de transmissão devido a faltas</b>	25
3.1 Propagação de ondas viajantes em linha de transmissão monofásica . . . . .	25
3.1.1 Modelo da linha de transmissão monofásica a parâmetros distribuídos . .	25
3.1.2 Reflexão e refração das ondas . . . . .	29
3.1.2.1 Coeficientes em terminações . . . . .	30

3.1.2.2	Coeficientes em junção com três ou mais elementos . . . . .	31
3.1.2.3	Comportamento em terminações puramente capacitiva e puramente indutiva . . . . .	33
3.2	Propagação de ondas viajantes em linha de transmissão trifásica . . . . .	36
3.2.1	Modelo de linha de transmissão trifásica a parâmetros distribuídos . . . . .	36
3.2.2	Relações das componentes de fase das ondas viajantes em linhas trifásicas . . . . .	39
3.2.3	Modelo de falta para linhas trifásicas . . . . .	40
3.2.4	Origem e propagação de ondas viajantes devido a faltas em linhas trifásicas . . . . .	42
3.2.5	Reflexão e refração das ondas em linhas trifásicas . . . . .	48
3.2.5.1	Coeficientes de reflexão em junção com três elementos em linhas trifásicas . . . . .	49
3.2.5.2	Matrizes de coeficientes de reflexão e refração no ponto de falta para linhas de transmissão trifásicas . . . . .	51
3.2.6	Modelo analítico de previsão de propagação de ondas viajantes de corrente em sistemas trifásicos . . . . .	54
<b>Capítulo 4 – Classificação de Faltas Utilizando a Teoria das Ondas Viajantes</b>		<b>56</b>
4.1	Motivação . . . . .	56
4.2	Histórico e visão geral do método de classificação de faltas proposto . . . . .	57
4.3	Fundamento teórico . . . . .	57
4.4	Métodos propostos na literatura . . . . .	58
4.4.1	Método proposto por Dong <i>et al.</i> (2009) . . . . .	59
4.4.2	Método proposto por Sharafi <i>et al.</i> (2011) . . . . .	59
4.5	Método proposto . . . . .	59
4.5.1	Limiares para detecção de ondas de corrente para fins de classificação de faltas . . . . .	63
4.5.1.1	Limiar de modo aéreo para detecção da primeira frente de onda . . . . .	63
4.5.1.2	Limiar de modo aéreo para fins de diferenciação de faltas monofásicas de faltas bifásicas com terra ( $L'_1$ ) . . . . .	63
4.5.1.3	Limiar de modo terra para detecção da primeira frente de onda ( $L_0$ ) . . . . .	66
4.5.2	Faltas bifásicas com terra com ângulo de incidência de $90^\circ$ . . . . .	68
4.5.3	Aplicação do método proposto em linhas de transmissão paralelas . . . . .	69
<b>Capítulo 5 – Localização de Faltas em Linhas Paralelas Baseada na Teoria de Ondas Viajantes Usando Dados de Um Terminal</b>		<b>71</b>
5.1	Introdução . . . . .	71
5.2	Topologia do sistema e medições, parâmetros e condições necessários para localizar a falta . . . . .	72

5.3	Processamento de sinais para extração das ondas viajantes de corrente . . . . .	74
5.4	Necessidade de seleção de modo aéreo específico para cada tipo de falta . . . . .	75
5.5	Identificação da linha de transmissão de onde a onda detectada proveio . . . . .	76
5.6	Filtro direcional para eliminação do efeito das linhas adjacentes . . . . .	78
5.6.1	Demonstração do Filtro Direcional Proposto . . . . .	78
5.6.2	Aplicação do Filtro Direcional Proposto . . . . .	80
5.6.3	Exemplo de aplicação do Filtro Direcional Proposto . . . . .	81
5.7	Necessidade de utilizar apenas a primeira e a segunda frentes de onda de modo aéreo provenientes da direção da falta . . . . .	83
5.8	Limiares de detecção . . . . .	85
5.8.1	Limiar para detecção da primeira frente de onda de corrente de modo aéreo	86
5.8.2	Limiar para detecção da segunda frente de onda de corrente de modo aéreo	90
5.8.3	Exemplo de Aplicação . . . . .	90
5.9	Classificação da segunda frente de onda e estimativa do local da falta . . . . .	92
5.9.1	Caso em que a segunda frente de onda é a refletida no terminal local e depois refletida no ponto de falta . . . . .	93
5.9.2	Caso em que a segunda frente de onda provém do terminal remoto . . . . .	94
5.9.2.1	Formulação para o caso em que a segunda frente de onda é a refletida no terminal remoto e refratada no ponto de falta . . . . .	95
5.9.2.2	Formulação para o caso em que a segunda frente de onda é a refratada no terminal remoto que retorna pela linha sã . . . . .	95
5.10	Casos especiais . . . . .	95
5.10.1	Onda originalmente gerada pela falta não é a primeira frente de onda detectada . . . . .	96
5.10.2	Chegada simultânea da primeira e segunda frentes de onda . . . . .	96
5.10.3	Ocorrência de falta em distância crítica . . . . .	97
5.11	Aplicação do algoritmo de localização de faltas . . . . .	99
<b>Capítulo 6 – Resultados e Análises das Simulações</b>		<b>102</b>
6.1	Método de localização de faltas em linhas paralelas baseada na teoria de ondas viajantes usando dados de um terminal proposto por Guangbin . . . . .	102
6.2	Sistema de aquisição de sinais simulado . . . . .	103
6.3	Sistema simulado . . . . .	105
6.4	Ângulo de incidência mínimo . . . . .	108
6.5	Testes realizados . . . . .	109
6.6	Ajuste do método de localização de faltas . . . . .	110
6.7	Resultado das simulações . . . . .	110
6.7.1	Faltas sólidas na Linha 1 com ângulo de incidência de 90° . . . . .	110
6.7.1.1	Resultados para o método de classificação de faltas . . . . .	111

6.7.1.2	Resultados para o método proposto . . . . .	111
6.7.1.3	Resultados para o método proposto por Guangbin . . . . .	111
6.7.2	Faltas na Linha 1 com resistência de falta de 100 $\Omega$ e ângulo de incidência de 25° . . . . .	114
6.7.2.1	Resultados para o método de classificação de faltas . . . . .	114
6.7.2.2	Resultados para o método proposto . . . . .	114
6.7.2.3	Resultados para o método proposto por Guangbin . . . . .	116
6.7.3	Faltas sólidas na Linha 2 com ângulo de incidência de 90° . . . . .	116
6.7.3.1	Resultados para o método de classificação de faltas . . . . .	117
6.7.3.2	Resultados para o método proposto . . . . .	117
6.7.3.3	Resultados para o método proposto por Guangbin . . . . .	118
6.7.4	Faltas na Linha 2 com resistência de falta de 100 $\Omega$ e ângulo de incidência de 25° . . . . .	119
6.7.4.1	Resultados para o método de classificação de faltas . . . . .	121
6.7.4.2	Resultados para o método proposto . . . . .	121
6.7.4.3	Resultados para o método proposto por Guangbin . . . . .	122
6.8	Análise dos resultados . . . . .	125
6.8.1	Método de classificação de faltas . . . . .	125
6.8.2	Método proposto neste trabalho . . . . .	126
6.8.3	Método proposto por Guangbin . . . . .	126
6.8.4	Comparativo entre os métodos de localização de faltas . . . . .	127
<b>Capítulo 7 – Conclusões e Propostas de Trabalhos Futuros</b>		<b>130</b>
<b>Referências Bibliográficas</b>		<b>134</b>
<b>Apêndice A – Condições de contorno para cálculo das ondas de corrente lançadas para faltas em linhas de transmissão trifásicas</b>		<b>142</b>
A.1	Falta AT . . . . .	142
A.2	Falta BT . . . . .	143
A.3	Falta CT . . . . .	143
A.4	Falta ABT . . . . .	143
A.5	Falta BCT . . . . .	144
A.6	Falta CAT . . . . .	144
A.7	Falta AB . . . . .	144
A.8	Falta BC . . . . .	145
A.9	Falta CA . . . . .	145
A.10	Falta ABC . . . . .	145

---

<b>Apêndice B – Aplicação de modelo analítico de previsão de propagação de ondas viajantes de corrente em sistemas trifásicos</b>	<b>147</b>
B.1 Caso estudado . . . . .	148
B.2 Descrição do método analítico . . . . .	149
B.3 Aplicação do método analítico . . . . .	149
B.4 Simulação em ATP . . . . .	151
B.5 Comparação entre método analítico e simulação em ATP . . . . .	151

## LISTA DE FIGURAS

3.1	Linha monofásica a dois condutores sem influência do solo. . . . .	26
3.2	Ondas viajantes em uma linha monofásica com perdas. . . . .	29
3.3	Terminação de linha de transmissão monofásica. . . . .	30
3.4	Ponto de junção no terminal de linha de transmissão monofásica. . . . .	32
3.5	Corrente refletida e refratada em uma terminação puramente capacitiva. . . . .	35
3.6	Corrente refletida e refratada em uma terminação puramente indutiva. . . . .	35
3.7	Modelo da linha de transmissão trifásica a parâmetros distribuídos. . . . .	37
3.8	Modelo de falta para sistemas trifásicos. . . . .	41
4.1	Fluxograma do método de classificação de faltas proposto por Dong <i>et. al.</i> . . . .	60
4.2	Fluxograma do método de classificação de faltas proposto por Sharafi <i>et. al.</i> . . . .	61
4.3	Fluxograma do método de classificação de faltas proposto neste trabalho. . . . .	62
4.4	Falta bifásica com terra sólida na Linha 1 com ângulo de incidência de 90° - ondas modais obtidas por meio da Transformada de Clarke referenciada na fase A. . . . .	68
4.5	Falta bifásica com terra sólida na Linha 1 com ângulo de incidência de 45° - ondas modais obtidas por meio da Transformada de Clarke referenciada na fase A. . . . .	69
5.1	Topologia do sistema e medições e parâmetros necessários para localizar a falta. . . . .	73
5.2	Incidência de onda de corrente modal proveniente da Linha 1. . . . .	76
5.3	Sobreposição de onda de corrente modal vinda da Linha 1 com onda de corrente modal vinda de linha adjacente. . . . .	79
5.4	Demonstração do Filtro Direcional - eliminação do efeito de onda proveniente de linha adjacente quando há sobreposição com segunda frente de onda. . . . .	82
5.5	Demonstração do Filtro Direcional - eliminação do efeito de onda proveniente de linha adjacente. . . . .	82
5.6	Diagrama de Treliça de Bewley para caso com linhas adjacentes - faltas envolvendo a terra. . . . .	84
5.7	Diagrama de Treliça de Bewley para caso com linhas adjacentes - faltas sem envolver a terra. . . . .	85
5.8	Exemplo de aplicação dos limiares para detecção da primeira e segunda frentes de onda. . . . .	91
5.9	Incidência da primeira e segunda frentes de onda vindas da direção da falta. . . . .	92
6.1	Sistema simulado. . . . .	106

6.2	Valores para o limiares para fins de diferenciação de faltas monofásicas de faltas bifásicas com terra para o sistema simulado. . . . .	108
6.3	Valores para o limiares para fins de diferenciação de faltas monofásicas de faltas bifásicas com terra para o sistema simulado - zoom. . . . .	109
6.4	Resultados para o método proposto - faltas monofásicas na Linha 1 com ângulo de incidência de $90^\circ$ e falta sólida. . . . .	112
6.5	Resultados para o método proposto - faltas bifásicas com terra na Linha 1 com ângulo de incidência de $90^\circ$ e falta sólida. . . . .	112
6.6	Resultados para o método proposto - faltas bifásicas sem terra e trifásicas na Linha 1 com ângulo de incidência de $90^\circ$ e falta sólida. . . . .	112
6.7	Resultados para o método proposto por Guangbin - faltas monofásicas na Linha 1 com ângulo de incidência de $90^\circ$ e falta sólida. . . . .	113
6.8	Resultados para o método proposto por Guangbin - faltas bifásicas com terra na Linha 1 com ângulo de incidência de $90^\circ$ e falta sólida. . . . .	113
6.9	Resultados para o método proposto por Guangbin - faltas bifásicas sem terra e trifásicas na Linha 1 com ângulo de incidência de $90^\circ$ e falta sólida. . . . .	113
6.10	Resultados para o método proposto - faltas monofásicas na Linha 1 com ângulo de incidência de $25^\circ$ e resistência de falta de $100 \Omega$ . . . . .	114
6.11	Resultados para o método proposto - faltas bifásicas com terra na Linha 1 com ângulo de incidência de $25^\circ$ e resistência de falta de $100 \Omega$ . . . . .	115
6.12	Resultados para o método proposto - faltas bifásicas sem terra e trifásicas na Linha 1 com ângulo de incidência de $25^\circ$ e resistência de falta de $100 \Omega$ . . . . .	115
6.13	Resultados para o método proposto por Guangbin - faltas monofásicas na Linha 1 com ângulo de incidência de $25^\circ$ e resistência de falta de $100 \Omega$ . . . . .	116
6.14	Resultados para o método proposto por Guangbin - faltas bifásicas com terra na Linha 1 com ângulo de incidência de $25^\circ$ e resistência de falta de $100 \Omega$ . . . . .	116
6.15	Resultados para o método proposto por Guangbin - faltas bifásicas sem terra e trifásicas na Linha 1 com ângulo de incidência de $25^\circ$ e resistência de falta de $100 \Omega$ . . . . .	117
6.16	Resultados para o método proposto - faltas monofásicas na Linha 2 com ângulo de incidência de $90^\circ$ e falta sólida. . . . .	118
6.17	Resultados para o método proposto - faltas bifásicas com terra na Linha 2 com ângulo de incidência de $90^\circ$ e falta sólida. . . . .	118
6.18	Resultados para o método proposto - faltas bifásicas sem terra e trifásicas na Linha 2 com ângulo de incidência de $90^\circ$ e falta sólida. . . . .	119
6.19	Resultados para o método proposto por Guangbin - faltas monofásicas na Linha 2 com ângulo de incidência de $90^\circ$ e falta sólida. . . . .	120
6.20	Resultados para o método proposto por Guangbin - faltas bifásicas com terra na Linha 2 com ângulo de incidência de $90^\circ$ e falta sólida. . . . .	120
6.21	Resultados para o método proposto por Guangbin - faltas bifásicas sem terra e trifásicas na Linha 2 com ângulo de incidência de $90^\circ$ e falta sólida. . . . .	121
6.22	Resultados para o método proposto - faltas monofásicas na Linha 2 com ângulo de incidência de $25^\circ$ e resistência de falta de $100 \Omega$ . . . . .	122

6.23	Resultados para o método proposto - faltas bifásicas com terra na Linha 2 com ângulo de incidência de $25^\circ$ e resistência de falta de $100 \Omega$ . . . . .	122
6.24	Resultados para o método proposto - faltas bifásicas sem terra e trifásicas na Linha 2 com ângulo de incidência de $25^\circ$ e resistência de falta de $100 \Omega$ . . . . .	123
6.25	Resultados para o método proposto por Guangbin - faltas monofásicas na Linha 2 com ângulo de incidência de $25^\circ$ e resistência de falta de $100 \Omega$ . . . . .	124
6.26	Resultados para o método proposto por Guangbin - faltas bifásicas com terra na Linha 2 com ângulo de incidência de $25^\circ$ e resistência de falta de $100 \Omega$ . . . . .	124
6.27	Resultados para o método proposto por Guangbin - faltas bifásicas sem terra e trifásicas na Linha 2 com ângulo de incidência de $25^\circ$ e resistência de falta de $100 \Omega$ . . . . .	125
6.28	<i>Boxplot</i> para os métodos testados. . . . .	128
6.29	<i>Boxplot</i> para os métodos testados - zoom na cauda superior do método proposto neste trabalho. . . . .	129
6.30	<i>Boxplot</i> para os métodos testados - zoom na cauda superior do método proposto por Guangbin. . . . .	129
A.1	Ondas lançadas para faltas AT. . . . .	142
A.2	Ondas lançadas para faltas ABT. . . . .	143
A.3	Ondas lançadas para faltas AB. . . . .	144
A.4	Ondas lançadas para faltas ABT. . . . .	146
B.1	Sistema utilizado para aplicação do modelo de previsão de propagação de ondas geradas por faltas em linhas de transmissão trifásicas. . . . .	148
B.2	Diagrama de Treliça de Bewley para o caso estudado - faltas envolvendo a terra. . . . .	150
B.3	Falta BT - Simulação ATP. . . . .	153
B.4	Falta BT - Comparativo da Simulação em ATP com o Método Analítico - Corrente Local. . . . .	154
B.5	Falta BT - Comparativo da Simulação em ATP com o Método Analítico - Corrente Remota. . . . .	154

## LISTA DE TABELAS

2.1	Resumo da revisão bibliográfica de métodos de localização de faltas baseado na teoria de ondas viajantes utilizando dados de um terminal. . . . .	24
3.1	Valores das admitâncias do modelo de falta para cada tipo de falta. . . . .	41
3.2	Parâmetros para obtenção das ondas de corrente lançadas. . . . .	43
3.3	Condições de contorno para faltas com terra e falta trifásica. . . . .	43
3.4	Condições de contorno para faltas sem terra e assimétricas. . . . .	43
3.5	Ondas viajantes de corrente lançadas nas fases. . . . .	44
3.6	Ondas viajantes de corrente modais lançadas - Clarke A. . . . .	45
3.7	Ondas viajantes de corrente modais lançadas - Clarke B. . . . .	46
3.8	Ondas viajantes de corrente modais lançadas - Clarke C. . . . .	47
3.9	Equivalência entre as matrizes de reflexão e refração para corrente no ponto de falta referenciadas em cada fase. . . . .	54
4.1	Relações das ondas viajantes de corrente para cada tipo de falta. . . . .	58
4.2	Ondas viajantes de corrente modais com resistência de falta $R_f$ - Dong. . . . .	64
4.3	Valores considerados para as tensões pré-falta - limiar para fins de diferenciação de faltas monofásicas de faltas bifásicas com terra. . . . .	65
4.4	Limiar de modo aéreo para fins de diferenciação de faltas monofásicas de faltas bifásicas com terra. . . . .	65
4.5	Limiar de modo aéreo para fins de diferenciação de faltas monofásicas de faltas bifásicas com terra - tabela simplificada. . . . .	66
4.6	Onda de modo terra lançada para cada tipo de falta. . . . .	66
4.7	Valores considerados para as tensões pré-falta - modo terra. . . . .	67
4.8	Limiar a ser considerado para cada tipo de falta - modo terra. . . . .	67
5.1	Parâmetros das linhas de transmissão paralelas monitoradas. . . . .	73
5.2	Modo aéreo da onda viajante de corrente a ser utilizado para cada tipo de falta. . . . .	75
5.3	Onda de modo aéreo de interesse lançada para cada tipo de falta. . . . .	87
5.4	Valores considerados para as tensões pré-falta. . . . .	88
5.5	Tensão utilizada como referência para o ângulo de incidência para cada tipo de falta. . . . .	88
5.6	Limiar a ser considerado para cada tipo de falta - modo aéreo. . . . .	89
5.7	Limiar para cada classificação obtida para a falta - modo aéreo. . . . .	89
5.8	Parâmetros utilizados na estimativa do local da falta. . . . .	93

---

6.1	Parâmetros para o sistema simulado. . . . .	107
6.2	Parâmetros utilizados para ajuste do método de localização de faltas. . . . .	110
B.1	Parâmetros para o sistema utilizado para aplicação do modelo de previsão de propagação de ondas geradas por faltas em linhas de transmissão trifásicas. . . .	149
B.2	Onda de corrente no terminal L - falta BT. . . . .	152
B.3	Onda de corrente no ponto de falta, sentido terminal L para terminal R - falta BT. . . . .	152
B.4	Onda de corrente no ponto de falta, sentido terminal R para terminal L - falta BT. . . . .	153
B.5	Onda de corrente no terminal R - falta BT. . . . .	153

## LISTA DE SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
PVI	Parcela Variável por Indisponibilidade
TPC	Transformador de Potencial Capacitivo
TC	Transformador de Corrente
GPS	<i>Global Positioning System</i>
AIEE	<i>American Institute of Electrical Engineers</i>
LKT	Lei de Kirchhoff das Tensões
LKC	Lei de Kirchhoff das Correntes
AT	Falta entre a fase A e a terra em sistemas trifásicos
BT	Falta entre a fase B e a terra em sistemas trifásicos
CT	Falta entre a fase C e a terra em sistemas trifásicos
ABT	Falta entre a fases A, a fase B e a terra em sistemas trifásicos
BCT	Falta entre a fases B, a fase C e a terra em sistemas trifásicos
CAT	Falta entre a fases C, a fase A e a terra em sistemas trifásicos
AB	Falta entre as fases A e B em sistemas trifásicos
BC	Falta entre as fases B e C em sistemas trifásicos
CA	Falta entre as fases C e A em sistemas trifásicos
ABC	Falta trifásica em sistemas trifásicos
Linha 1	Linha de transmissão monitorada 1
Linha 2	Linha de transmissão monitorada 2
Filtro DS	Filtro <i>Differentiator Smoother</i>

ATP            *Alternative Transients Program*

IEEE          *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\Delta t$	Período de amostragem.
$t$	Tempo.
$x$	Posição de obtenção de tensão e corrente em uma linha de transmissão.
$\Delta x$	Variação no comprimento de uma linha de transmissão.
$R$	Resistência série por unidade de comprimento de uma linha de transmissão monofásica a dois condutores.
$L$	Indutância série por unidade de comprimento de uma linha de transmissão monofásica a dois condutores.
$G$	Condutância <i>shunt</i> por unidade de comprimento de uma linha de transmissão monofásica a dois condutores.
$C$	Capacitância <i>shunt</i> por unidade de comprimento de uma linha de transmissão monofásica a dois condutores.
$v$	Tensão em uma linha de transmissão monofásica a dois condutores.
$i$	Corrente em uma linha de transmissão monofásica a dois condutores.
$V$	Transformada de Laplace da tensão em uma linha de transmissão monofásica a dois condutores.
$I$	Transformada de Laplace da corrente em uma linha de transmissão monofásica a dois condutores.
$Z$	Impedância série por unidade de comprimento de uma linha de transmissão monofásica a dois condutores.
$Y$	Admitância <i>shunt</i> por unidade de comprimento de uma linha de transmissão monofásica a dois condutores.
$\gamma$	Constante de propagação de uma linha de transmissão monofásica a dois condutores.
$F_1$	Transformada de Laplace da função genérica 1 do tempo.

---

$F_2$	Transformada de Laplace da função genérica 2 do tempo.
$Z_{car}$	Impedância característica de uma linha de transmissão monofásica a dois condutores.
$\omega$	Frequência angular.
$a$	Parte real da constante de propagação de uma linha de transmissão monofásica a dois condutores ou constante de atenuação.
$b$	Parte imaginária da constante de propagação de uma linha de transmissão monofásica a dois condutores ou constante de fase.
$v_p$	Velocidade de propagação das ondas em uma linha de transmissão monofásica a dois condutores.
$u$	Função degrau unitário.
$f_1$	Função genérica 1 do tempo.
$f_2$	Função genérica 2 do tempo.
$V^+(x, s)$	Onda progressiva de tensão no domínio de laplace.
$V^-(x, s)$	Onda regressiva de tensão no domínio de laplace.
$I^+(x, s)$	Onda progressiva de corrente no domínio de laplace.
$I^-(x, s)$	Onda regressiva de corrente no domínio de laplace.
$v_{sp}$	Velocidade de propagação das ondas em uma linha de transmissão monofásica a dois condutores sem perdas.
$Z_s$	Impedância de surto em uma linha de transmissão monofásica a dois condutores.
$V_1$	Onda de tensão vinda da linha de transmissão monofásica a dois condutores.
$I_1$	Onda de corrente vinda da linha de transmissão monofásica a dois condutores.
$V_2$	Onda de tensão refletida para a linha de transmissão monofásica a dois condutores.
$I_2$	Onda de corrente refletida para a linha de transmissão monofásica a dois condutores.
$V_3$	Onda de tensão refratada para a terminação da linha de transmissão monofásica a dois condutores.

---

$I_3$	Onda de corrente refratada para a terminação da linha de transmissão monofásica a dois condutores.
$Z_t$	Impedância da terminação da linha de transmissão monofásica a dois condutores.
$\rho_i$	Coefficiente de reflexão para corrente em uma linha de transmissão monofásica a dois condutores.
$\Gamma_i$	Coefficiente de refração para corrente em uma linha de transmissão monofásica a dois condutores.
$Z_A$	Impedância característica do elemento do ramo A da junção de três elementos monofásicos.
$Z_B$	Impedância característica do elemento do ramo B da junção de três elementos monofásicos.
$Z_C$	Impedância característica do elemento do ramo C da junção de três elementos monofásicos.
$V_{1A}$	Onda de tensão incidente vinda do ramo A da junção de três elementos monofásicos.
$I_{1A}$	Onda de corrente incidente vinda do ramo A da junção de três elementos monofásicos.
$V_{2A}$	Onda de tensão refletida para o ramo A da junção de três elementos monofásicos.
$I_{2A}$	Onda de corrente refletida para o ramo A da junção de três elementos monofásicos.
$V_{3B}$	Onda de tensão refratada para o ramo B da junção de três elementos monofásicos.
$I_{3B}$	Onda de corrente refratada para o ramo B da junção de três elementos monofásicos.
$V_{3C}$	Onda de tensão refratada para o ramo C da junção de três elementos monofásicos.
$I_{3C}$	Onda de corrente refratada para o ramo C da junção de três elementos monofásicos.
$Z_{eq}$	Impedância equivalente dos ramos B e C da junção de três elementos monofásicos.

$\rho_{ig}$	Coeficiente de reflexão para corrente para junção de três elementos monofásicos.
$\Gamma_{ig}$	Coeficiente de refração para corrente que flui para os ramos B e C somados para junção de três elementos monofásicos.
$\Gamma_{igB}$	Coeficiente de refração para corrente que flui para o ramo B para junção de três elementos monofásicos.
$\Gamma_{igC}$	Coeficiente de refração para corrente que flui para o ramo C para junção de três elementos monofásicos.
$I_1^C$	Onda de corrente incidente em uma terminação puramente capacitiva.
$I_1^L$	Onda de corrente incidente em uma terminação puramente indutiva.
$I_2^C$	Onda de corrente refletida em uma terminação puramente capacitiva.
$I_2^L$	Onda de corrente refletida em uma terminação puramente indutiva.
$I_3^C$	Onda de corrente refratada em uma terminação puramente capacitiva.
$I_3^L$	Onda de corrente refratada em uma terminação puramente indutiva.
$C_t$	Capacitância da terminação da linha de transmissão monofásica a dois condutores.
$I_D$	Amplitude da onda de corrente vinda da linha de transmissão monofásica a dois condutores, considerando a onda como um degrau.
$\tau_C$	Constante de tempo para a reflexão e refração de onda em linha de transmissão monofásica a dois condutores conectada em terminação puramente capacitiva.
$L_t$	Indutância da terminação da linha de transmissão monofásica a dois condutores.
$\tau_L$	Constante de tempo para a reflexão e refração de onda em linha de transmissão monofásica a dois condutores conectada em terminação puramente indutiva.
$R_{aa}$	Resistência série por unidade de comprimento na fase A de uma linha de transmissão trifásica.
$R_{bb}$	Resistência série por unidade de comprimento na fase B de uma linha de transmissão trifásica.
$R_{cc}$	Resistência série por unidade de comprimento na fase C de uma linha de transmissão trifásica.

---

$R_{ab}$	Resistência série mútua por unidade de comprimento entre as fases A e B de uma linha de transmissão trifásica.
$R_{bc}$	Resistência série mútua por unidade de comprimento entre as fases B e C de uma linha de transmissão trifásica.
$R_{ca}$	Resistência série mútua por unidade de comprimento entre as fases C e A de uma linha de transmissão trifásica.
$L_{aa}$	Indutância série por unidade de comprimento na fase A de uma linha de transmissão trifásica.
$L_{bb}$	Indutância série por unidade de comprimento na fase B de uma linha de transmissão trifásica.
$L_{cc}$	Indutância série por unidade de comprimento na fase C de uma linha de transmissão trifásica.
$L_{ab}$	Indutância série mútua por unidade de comprimento entre as fases A e B de uma linha de transmissão trifásica.
$L_{bc}$	Indutância série mútua por unidade de comprimento entre as fases B e C de uma linha de transmissão trifásica.
$L_{ca}$	Indutância série mútua por unidade de comprimento entre as fases C e A de uma linha de transmissão trifásica.
$G_{ta}$	Condutância por unidade de comprimento entre a fase A e a terra de uma linha de transmissão trifásica.
$G_{tb}$	Condutância por unidade de comprimento entre a fase B e a terra de uma linha de transmissão trifásica.
$G_{tc}$	Condutância por unidade de comprimento entre a fase C e a terra de uma linha de transmissão trifásica.
$G_{ab}$	Condutância por unidade de comprimento entre as fases A e B de uma linha de transmissão trifásica.
$G_{bc}$	Condutância por unidade de comprimento entre as fases B e C de uma linha de transmissão trifásica.
$G_{ca}$	Condutância por unidade de comprimento entre as fases C e A de uma linha de transmissão trifásica.
$C_{ta}$	Capacitância por unidade de comprimento entre a fase A e a terra de uma linha de transmissão trifásica.

---

$C_{tb}$	Capacitância por unidade de comprimento entre a fase B e a terra de uma linha de transmissão trifásica.
$C_{tc}$	Capacitância por unidade de comprimento entre a fase C e a terra de uma linha de transmissão trifásica.
$C_{ab}$	Capacitância mútua por unidade de comprimento entre as fases A e B de uma linha de transmissão trifásica.
$C_{bc}$	Capacitância mútua por unidade de comprimento entre as fases B e C de uma linha de transmissão trifásica.
$C_{ca}$	Capacitância mútua por unidade de comprimento entre as fases C e A de uma linha de transmissão trifásica.
$v_a$	Tensão entre a fase A e a terra em uma linha de transmissão trifásica.
$v_b$	Tensão entre a fase B e a terra em uma linha de transmissão trifásica.
$v_c$	Tensão entre a fase C e a terra em uma linha de transmissão trifásica.
$i_a$	Corrente na fase A em uma linha de transmissão trifásica.
$i_b$	Corrente na fase B em uma linha de transmissão trifásica.
$i_c$	Corrente na fase C em uma linha de transmissão trifásica.
$G_{aa}$	Condutância por unidade de comprimento aa definida para uma linha de transmissão trifásica.
$G_{bb}$	Condutância por unidade de comprimento bb definida para uma linha de transmissão trifásica.
$G_{cc}$	Condutância por unidade de comprimento cc definida para uma linha de transmissão trifásica.
$C_{aa}$	Capacitância por unidade de comprimento aa definida para uma linha de transmissão trifásica.
$C_{bb}$	Capacitância por unidade de comprimento bb definida para uma linha de transmissão trifásica.
$C_{cc}$	Capacitância por unidade de comprimento cc definida para uma linha de transmissão trifásica.
$M_{CA}$	Matriz da transformada de Clake referenciada na fase A.
$M_{CB}$	Matriz da transformada de Clake referenciada na fase B.

$M_{CC}$	Matriz da transformada de Clarke referenciada na fase C.
$M$	Matriz de transformada modal genérica.
$abc$	Domínio de fases para sistemas trifásicos.
$\alpha\beta 0$	Domínio modal para sistemas trifásicos.
$v_\alpha$	Tensão de modo aéreo $\alpha$ em uma linha de transmissão trifásica.
$v_\beta$	Tensão de modo aéreo $\beta$ em uma linha de transmissão trifásica.
$v_0$	Tensão de modo terra em uma linha de transmissão trifásica.
$i_\alpha$	Corrente de modo aéreo $\alpha$ em uma linha de transmissão trifásica.
$i_\beta$	Corrente de modo aéreo $\beta$ em uma linha de transmissão trifásica.
$i_0$	Corrente de modo terra em uma linha de transmissão trifásica.
$R_p$	Resistência série própria por unidade de comprimento em uma linha de transmissão trifásica.
$R_m$	Resistência série mútua por unidade de comprimento em uma linha de transmissão trifásica.
$L_p$	Indutância série própria por unidade de comprimento em uma linha de transmissão trifásica.
$L_m$	Indutância série mútua por unidade de comprimento em uma linha de transmissão trifásica.
$G_p$	Condutância <i>shunt</i> própria por unidade de comprimento em uma linha de transmissão trifásica.
$G_m$	Condutância <i>shunt</i> mútua por unidade de comprimento em uma linha de transmissão trifásica.
$C_p$	Capacitância <i>shunt</i> própria por unidade de comprimento em uma linha de transmissão trifásica.
$C_m$	Capacitância <i>shunt</i> mútua por unidade de comprimento em uma linha de transmissão trifásica.
$R_\alpha$	Resistência série de modo aéreo $\alpha$ em uma linha de transmissão trifásica.
$R_\beta$	Resistência série de modo aéreo $\beta$ em uma linha de transmissão trifásica.
$R_0$	Resistência série de modo terra em uma linha de transmissão trifásica.

---

$L_\alpha$	Indutância série de modo aéreo $\alpha$ em uma linha de transmissão trifásica.
$L_\beta$	Indutância série de modo aéreo $\beta$ em uma linha de transmissão trifásica.
$L_0$	Indutância série de modo terra em uma linha de transmissão trifásica.
$G_\alpha$	Condutância <i>shunt</i> de modo aéreo $\alpha$ em uma linha de transmissão trifásica.
$G_\beta$	Condutância <i>shunt</i> de modo aéreo $\beta$ em uma linha de transmissão trifásica.
$G_0$	Condutância <i>shunt</i> de modo terra em uma linha de transmissão trifásica.
$C_\alpha$	Capacitância <i>shunt</i> de modo aéreo $\alpha$ em uma linha de transmissão trifásica.
$C_\beta$	Capacitância <i>shunt</i> de modo aéreo $\beta$ em uma linha de transmissão trifásica.
$C_0$	Capacitância <i>shunt</i> de modo terra em uma linha de transmissão trifásica.
$Z_\alpha$	Impedância característica de modo aéreo $\alpha$ em uma linha de transmissão trifásica.
$Z_\beta$	Impedância característica de modo aéreo $\beta$ em uma linha de transmissão trifásica.
$Z_0$	Impedância característica de modo terra em uma linha de transmissão trifásica.
$Y_A$	Admitância entre a fase A e a terra no modelo de falta para sistemas trifásicos.
$Y_B$	Admitância entre a fase B e a terra no modelo de falta para sistemas trifásicos.
$Y_C$	Admitância entre a fase C e a terra no modelo de falta para sistemas trifásicos.
$Y_{AB}$	Admitância entre as fases A e B no modelo de falta para sistemas trifásicos.
$Y_{BC}$	Admitância entre as fases B e C no modelo de falta para sistemas trifásicos.
$Y_{CA}$	Admitância entre as fases C e A no modelo de falta para sistemas trifásicos.
$\mathbf{Y}_F$	Matriz admitância do ramo de falta para o modelo de falta para sistemas trifásicos.
$R_f$	Resistência de falta.
$e_{aF}$	Tensão pré-falta entre a fase A e a terra em uma linha de transmissão trifásica.
$e_{bF}$	Tensão pré-falta entre a fase B e a terra em uma linha de transmissão trifásica.

$e_{cF}$	Tensão pré-falta entre a fase C e a terra em uma linha de transmissão trifásica.
$e_{abF}$	Tensão pré-falta entre as fases A e B em uma linha de transmissão trifásica.
$e_{bcF}$	Tensão pré-falta entre as fases B e C em uma linha de transmissão trifásica.
$e_{caF}$	Tensão pré-falta entre as fases C e A em uma linha de transmissão trifásica.
$v_{ov}^a$	Onda de tensão lançada entre a fase A e a terra por falta em uma linha de transmissão trifásica.
$v_{ov}^b$	Onda de tensão lançada entre a fase B e a terra por falta em uma linha de transmissão trifásica.
$v_{ov}^c$	Onda de tensão lançada entre a fase C e a terra por falta em uma linha de transmissão trifásica.
$v_{ov}^{ab}$	Onda de tensão lançada entre as fases A e B por falta em uma linha de transmissão trifásica.
$v_{ov}^{bc}$	Onda de tensão lançada entre as fases B e C por falta em uma linha de transmissão trifásica.
$v_{ov}^{ca}$	Onda de tensão lançada entre as fases C e A por falta em uma linha de transmissão trifásica.
$i_{ov}^a$	Onda de corrente lançada na fase A por falta em uma linha de transmissão trifásica.
$i_{ov}^b$	Onda de corrente lançada na fase B por falta em uma linha de transmissão trifásica.
$i_{ov}^c$	Onda de corrente lançada na fase C por falta em uma linha de transmissão trifásica.
$V_{1A}^{abc}$	Vetor de onda de tensão, no domínio de fases, incidente vinda do ramo A da junção de três elementos trifásicos.
$I_{1A}^{abc}$	Vetor de onda de corrente, no domínio de fases, incidente vinda do ramo A da junção de três elementos trifásicos.
$V_{2A}^{abc}$	Vetor de onda de tensão, no domínio de fases, refletida para o ramo A da junção de três elementos trifásicos.
$I_{2A}^{abc}$	Vetor de onda de corrente, no domínio de fases, refletida para o ramo A da junção de três elementos trifásicos.
$V_{3B}^{abc}$	Vetor de onda de tensão, no domínio de fases, refratada para o ramo B da junção de três elementos trifásicos.

$I_{3B}^{abc}$	Vetor de onda de corrente, no domínio de fases, refratada para o ramo B da junção de três elementos trifásicos.
$V_{3C}^{abc}$	Vetor de onda de tensão, no domínio de fases, refratada para o ramo C da junção de três elementos trifásicos.
$I_{3C}^{abc}$	Vetor de onda de corrente, no domínio de fases, refratada para o ramo C da junção de três elementos trifásicos.
$Z_A^{abc}$	Matriz que relaciona as ondas de tensão e corrente no domínio de fases para o elemento do ramo A.
$Z_B^{abc}$	Matriz que relaciona as ondas de tensão e corrente no domínio de fases para o elemento do ramo B.
$Z_C^{abc}$	Matriz que relaciona as ondas de tensão e corrente no domínio de fases para o elemento do ramo C.
$\rho_{ig}^{\alpha\beta 0}$	Matriz de coeficientes de reflexão para corrente no domínio modal para junção de três elementos trifásicos.
$\Gamma_{igB}^{\alpha\beta 0}$	Matriz de coeficientes de refração para corrente, no domínio modal, que flui para o ramo B para junção de três elementos trifásicos.
$\Gamma_{igC}^{\alpha\beta 0}$	Matriz de coeficientes de refração para corrente, no domínio modal, que flui para o ramo C para junção de três elementos trifásicos.
$Z_{car}^{abc}$	Matriz que relaciona as ondas de tensão e corrente no domínio de fases para a linha de transmissão trifásica.
$\rho_{iAT}^{MCA}$	Matriz de coeficientes de reflexão para corrente no ponto de falta entre a fase A e a terra, no domínio modal utilizando a transformada de Clake referenciada na fase A.
$\rho_{iBT}^{MCA}$	Matriz de coeficientes de reflexão para corrente no ponto de falta entre a fase B e a terra, no domínio modal utilizando a transformada de Clake referenciada na fase A.
$\rho_{iCT}^{MCA}$	Matriz de coeficientes de reflexão para corrente no ponto de falta entre a fase C e a terra, no domínio modal utilizando a transformada de Clake referenciada na fase A.
$\rho_{iABT}^{MCA}$	Matriz de coeficientes de reflexão para corrente no ponto de falta entre a fase A, a fase B e a terra, no domínio modal utilizando a transformada de Clake referenciada na fase A.

$\rho_{iBCT}^{MCA}$	Matriz de coeficientes de reflexão para corrente no ponto de falta entre a fase B, a fase C e a terra, no domínio modal utilizando a transformada de Clake referenciada na fase A.
$\rho_{iCAT}^{MCA}$	Matriz de coeficientes de reflexão para corrente no ponto de falta entre a fase C, a fase A e a terra, no domínio modal utilizando a transformada de Clake referenciada na fase A.
$\rho_{iAB}^{MCA}$	Matriz de coeficientes de reflexão para corrente no ponto de falta entre as fases A e B, no domínio modal utilizando a transformada de Clake referenciada na fase A.
$\rho_{iBC}^{MCA}$	Matriz de coeficientes de reflexão para corrente no ponto de falta entre as fases B e C, no domínio modal utilizando a transformada de Clake referenciada na fase A.
$\rho_{iCA}^{MCA}$	Matriz de coeficientes de reflexão para corrente no ponto de falta entre as fases C e A, no domínio modal utilizando a transformada de Clake referenciada na fase A.
$\rho_{iABC}^{MCA}$	Matriz de coeficientes de reflexão para corrente no ponto de falta trifásica, no domínio modal utilizando a transformada de Clake referenciada na fase A.
$\Gamma_{iAT}^{MCA}$	Matriz de coeficientes de refração para corrente no ponto de falta entre a fase A e a terra, no domínio modal utilizando a transformada de Clake referenciada na fase A.
$\Gamma_{iBT}^{MCA}$	Matriz de coeficientes de refração para corrente no ponto de falta entre a fase B e a terra, no domínio modal utilizando a transformada de Clake referenciada na fase A.
$\Gamma_{iCT}^{MCA}$	Matriz de coeficientes de refração para corrente no ponto de falta entre a fase C e a terra, no domínio modal utilizando a transformada de Clake referenciada na fase A.
$\Gamma_{iABT}^{MCA}$	Matriz de coeficientes de refração para corrente no ponto de falta entre a fase A, a fase B e a terra, no domínio modal utilizando a transformada de Clake referenciada na fase A.
$\Gamma_{iBCT}^{MCA}$	Matriz de coeficientes de refração para corrente no ponto de falta entre a fase B, a fase C e a terra, no domínio modal utilizando a transformada de Clake referenciada na fase A.
$\Gamma_{iCAT}^{MCA}$	Matriz de coeficientes de refração para corrente no ponto de falta entre a fase C, a fase A e a terra, no domínio modal utilizando a transformada de Clake referenciada na fase A.

$\Gamma_{iAB}^{MCA}$	Matriz de coeficientes de refração para corrente no ponto de falta entre as fases A e B, no domínio modal utilizando a transformada de Clake referenciada na fase A.
$\Gamma_{iBC}^{MCA}$	Matriz de coeficientes de refração para corrente no ponto de falta entre as fases B e C, no domínio modal utilizando a transformada de Clake referenciada na fase A.
$\Gamma_{iCA}^{MCA}$	Matriz de coeficientes de refração para corrente no ponto de falta entre as fases C e A, no domínio modal utilizando a transformada de Clake referenciada na fase A.
$\Gamma_{iABC}^{MCA}$	Matriz de coeficientes de refração para corrente no ponto de falta trifásica, no domínio modal utilizando a transformada de Clake referenciada na fase A.
$\rho_{ig}^{MCB}$	Matriz de coeficientes de reflexão para corrente, no domínio modal utilizando a transformada de Clake referenciada na fase B, para junção de três elementos trifásicos.
$\Gamma_{igC}^{MCB}$	Matriz de coeficientes de reflexão para corrente, no domínio modal utilizando a transformada de Clake referenciada na fase B, que flui para o ramo C para junção de três elementos trifásicos.
$\rho_{iAT}^{MCB}$	Matriz de coeficientes de reflexão para corrente no ponto de falta entre a fase A e a terra, no domínio modal utilizando a transformada de Clake referenciada na fase B.
$\rho_{iBT}^{MCB}$	Matriz de coeficientes de reflexão para corrente no ponto de falta entre a fase B e a terra, no domínio modal utilizando a transformada de Clake referenciada na fase B.
$\rho_{iCT}^{MCB}$	Matriz de coeficientes de reflexão para corrente no ponto de falta entre a fase C e a terra, no domínio modal utilizando a transformada de Clake referenciada na fase B.
$\rho_{iABT}^{MCB}$	Matriz de coeficientes de reflexão para corrente no ponto de falta entre a fase A, a fase B e a terra, no domínio modal utilizando a transformada de Clake referenciada na fase B.
$\rho_{iBCT}^{MCB}$	Matriz de coeficientes de reflexão para corrente no ponto de falta entre a fase B, a fase C e a terra, no domínio modal utilizando a transformada de Clake referenciada na fase B.
$\rho_{iCAT}^{MCB}$	Matriz de coeficientes de reflexão para corrente no ponto de falta entre a fase C, a fase A e a terra, no domínio modal utilizando a transformada de Clake referenciada na fase B.

$\rho_{iAB}^{MCB}$	Matriz de coeficientes de reflexão para corrente no ponto de falta entre as fases A e B, no domínio modal utilizando a transformada de Clake referenciada na fase B.
$\rho_{iBC}^{MCB}$	Matriz de coeficientes de reflexão para corrente no ponto de falta entre as fases B e C, no domínio modal utilizando a transformada de Clake referenciada na fase B.
$\rho_{iCA}^{MCB}$	Matriz de coeficientes de reflexão para corrente no ponto de falta entre as fases C e A, no domínio modal utilizando a transformada de Clake referenciada na fase B.
$\rho_{iABC}^{MCB}$	Matriz de coeficientes de reflexão para corrente no ponto de falta trifásica, no domínio modal utilizando a transformada de Clake referenciada na fase B.
$\Gamma_{iAT}^{MCB}$	Matriz de coeficientes de refração para corrente no ponto de falta entre a fase A e a terra, no domínio modal utilizando a transformada de Clake referenciada na fase B.
$\Gamma_{iBT}^{MCB}$	Matriz de coeficientes de refração para corrente no ponto de falta entre a fase B e a terra, no domínio modal utilizando a transformada de Clake referenciada na fase B.
$\Gamma_{iCT}^{MCB}$	Matriz de coeficientes de refração para corrente no ponto de falta entre a fase C e a terra, no domínio modal utilizando a transformada de Clake referenciada na fase B.
$\Gamma_{iABT}^{MCB}$	Matriz de coeficientes de refração para corrente no ponto de falta entre a fase A, a fase B e a terra, no domínio modal utilizando a transformada de Clake referenciada na fase B.
$\Gamma_{iBCT}^{MCB}$	Matriz de coeficientes de refração para corrente no ponto de falta entre a fase B, a fase C e a terra, no domínio modal utilizando a transformada de Clake referenciada na fase B.
$\Gamma_{iCAT}^{MCB}$	Matriz de coeficientes de refração para corrente no ponto de falta entre a fase C, a fase A e a terra, no domínio modal utilizando a transformada de Clake referenciada na fase B.
$\Gamma_{iAB}^{MCB}$	Matriz de coeficientes de refração para corrente no ponto de falta entre as fases A e B, no domínio modal utilizando a transformada de Clake referenciada na fase B.
$\Gamma_{iBC}^{MCB}$	Matriz de coeficientes de refração para corrente no ponto de falta entre as fases B e C, no domínio modal utilizando a transformada de Clake referenciada na fase B.

$\Gamma_{iCA}^{MCB}$	Matriz de coeficientes de refração para corrente no ponto de falta entre as fases C e A, no domínio modal utilizando a transformada de Clake referenciada na fase B.
$\Gamma_{iABC}^{MCB}$	Matriz de coeficientes de refração para corrente no ponto de falta trifásica, no domínio modal utilizando a transformada de Clake referenciada na fase B.
$\rho_{ig}^{MCC}$	Matriz de coeficientes de reflexão para corrente, no domínio modal utilizando a transformada de Clake referenciada na fase C, para junção de três elementos trifásicos.
$\Gamma_{igC}^{MCC}$	Matriz de coeficientes de reflexão para corrente, no domínio modal utilizando a transformada de Clake referenciada na fase C, que flui para o ramo C para junção de três elementos trifásicos.
$\rho_{iAT}^{MCC}$	Matriz de coeficientes de reflexão para corrente no ponto de falta entre a fase A e a terra, no domínio modal utilizando a transformada de Clake referenciada na fase C.
$\rho_{iBT}^{MCC}$	Matriz de coeficientes de reflexão para corrente no ponto de falta entre a fase B e a terra, no domínio modal utilizando a transformada de Clake referenciada na fase C.
$\rho_{iCT}^{MCC}$	Matriz de coeficientes de reflexão para corrente no ponto de falta entre a fase C e a terra, no domínio modal utilizando a transformada de Clake referenciada na fase C.
$\rho_{iABT}^{MCC}$	Matriz de coeficientes de reflexão para corrente no ponto de falta entre a fase A, a fase B e a terra, no domínio modal utilizando a transformada de Clake referenciada na fase C.
$\rho_{iBCT}^{MCC}$	Matriz de coeficientes de reflexão para corrente no ponto de falta entre a fase B, a fase C e a terra, no domínio modal utilizando a transformada de Clake referenciada na fase C.
$\rho_{iCAT}^{MCC}$	Matriz de coeficientes de reflexão para corrente no ponto de falta entre a fase C, a fase A e a terra, no domínio modal utilizando a transformada de Clake referenciada na fase C.
$\rho_{iAB}^{MCC}$	Matriz de coeficientes de reflexão para corrente no ponto de falta entre as fases A e B, no domínio modal utilizando a transformada de Clake referenciada na fase C.
$\rho_{iBC}^{MCC}$	Matriz de coeficientes de reflexão para corrente no ponto de falta entre as fases B e C, no domínio modal utilizando a transformada de Clake referenciada na fase C.

$\rho_{iCA}^{MCC}$	Matriz de coeficientes de reflexão para corrente no ponto de falta entre as fases C e A, no domínio modal utilizando a transformada de Clake referenciada na fase C.
$\rho_{iABC}^{MCC}$	Matriz de coeficientes de reflexão para corrente no ponto de falta trifásica, no domínio modal utilizando a transformada de Clake referenciada na fase C.
$\Gamma_{iAT}^{MCC}$	Matriz de coeficientes de refração para corrente no ponto de falta entre a fase A e a terra, no domínio modal utilizando a transformada de Clake referenciada na fase C.
$\Gamma_{iBT}^{MCC}$	Matriz de coeficientes de refração para corrente no ponto de falta entre a fase B e a terra, no domínio modal utilizando a transformada de Clake referenciada na fase C.
$\Gamma_{iCT}^{MCC}$	Matriz de coeficientes de refração para corrente no ponto de falta entre a fase C e a terra, no domínio modal utilizando a transformada de Clake referenciada na fase C.
$\Gamma_{iABT}^{MCC}$	Matriz de coeficientes de refração para corrente no ponto de falta entre a fase A, a fase B e a terra, no domínio modal utilizando a transformada de Clake referenciada na fase C.
$\Gamma_{iBCT}^{MCC}$	Matriz de coeficientes de refração para corrente no ponto de falta entre a fase B, a fase C e a terra, no domínio modal utilizando a transformada de Clake referenciada na fase C.
$\Gamma_{iCAT}^{MCC}$	Matriz de coeficientes de refração para corrente no ponto de falta entre a fase C, a fase A e a terra, no domínio modal utilizando a transformada de Clake referenciada na fase C.
$\Gamma_{iAB}^{MCC}$	Matriz de coeficientes de refração para corrente no ponto de falta entre as fases A e B, no domínio modal utilizando a transformada de Clake referenciada na fase C.
$\Gamma_{iBC}^{MCC}$	Matriz de coeficientes de refração para corrente no ponto de falta entre as fases B e C, no domínio modal utilizando a transformada de Clake referenciada na fase C.
$\Gamma_{iCA}^{MCC}$	Matriz de coeficientes de refração para corrente no ponto de falta entre as fases C e A, no domínio modal utilizando a transformada de Clake referenciada na fase C.
$\Gamma_{iABC}^{MCC}$	Matriz de coeficientes de refração para corrente no ponto de falta trifásica, no domínio modal utilizando a transformada de Clake referenciada na fase C.
$\epsilon_d$	Limiar $\epsilon_d$ para o método de classificação de faltas de Dong.

$\delta_d$	Limiar $\delta_d$ para o método de classificação de faltas de Dong.
$\phi_d$	Limiar $\phi_d$ para o método de classificação de faltas de Dong.
$\delta_s$	Limiar $\delta_s$ para o método de classificação de faltas de Sharafi.
$\lambda_s$	Limiar $\lambda_s$ para o método de classificação de faltas de Sharafi.
$\epsilon_s$	Limiar $\epsilon_s$ para o método de classificação de faltas de Sharafi.
$L_1$	Limiar para detecção da primeira frente de onda de modo aéreo para fins de classificação de faltas.
$L_0$	Limiar para detecção da primeira frente de onda de modo terra para fins de classificação de faltas.
$L'_1$	Limiar de modo aéreo para fins de diferenciação de faltas monofásicas de faltas bifásicas com terra.
$i_{d\alpha}$	Corrente de modo aéreo $\alpha$ referenciada à Transformada de Dong.
$i_{d\beta}$	Corrente de modo aéreo $\beta$ referenciada à Transformada de Dong.
$i_{d\gamma}$	Corrente de modo aéreo $\gamma$ referenciada à Transformada de Dong.
$i_{d0}$	Corrente de modo terra referenciada à Transformada de Dong.
$i_{d\alpha}^1$	Amplitude da primeira frente de onda de corrente de modo aéreo $\alpha$ referenciada à Transformada de Dong.
$i_{d\beta}^1$	Amplitude da primeira frente de onda de corrente de modo aéreo $\beta$ referenciada à Transformada de Dong.
$i_{d\gamma}^1$	Amplitude da primeira frente de onda de corrente de modo aéreo $\gamma$ referenciada à Transformada de Dong.
$i_{d0}^1$	Amplitude da primeira frente de onda de corrente de modo terra referenciada à Transformada de Dong.
$P$	Polaridade da onda de interesse.
$\Lambda_1$	Limiar 1 para fins de diferenciação de faltas monofásicas de faltas bifásicas com a terra.
$\Lambda_2$	Limiar 2 para fins de diferenciação de faltas monofásicas de faltas bifásicas com a terra.
$\Lambda_3$	Limiar 3 para fins de diferenciação de faltas monofásicas de faltas bifásicas com a terra.

$l_{L1}$	Comprimento da Linha 1.
$l_{L2}$	Comprimento da Linha 2.
$v_{L1}$	Velocidade de propagação da onda de corrente de modo aéreo na Linha 1.
$v_{L2}$	Velocidade de propagação da onda de corrente de modo aéreo na Linha 2.
$z_{\alpha L1}$	Impedância de surto de modo aéreo da Linha 1.
$z_{\alpha L2}$	Impedância de surto de modo aéreo da Linha 2.
$z_{0L1}$	Impedância de surto de modo terra da Linha 1.
$z_{0L2}$	Impedância de surto de modo terra da Linha 2.
$i_{inc}$	Onda de corrente de modo aéreo incidente.
$i_{med1}^{L1}$	Onda de corrente de modo aéreo medida na Linha 1, quando a onda incidente provém da Linha 1.
$i_{med2}^{L1}$	Onda de corrente de modo aéreo medida na Linha 2, quando a onda incidente provém da Linha 1.
$z_{SL}$	Impedância de surto de modo aéreo do sistema conectado ao terminal monitorado.
$\rho_{L1}$	Coefficiente de reflexão para corrente de modo aéreo no terminal monitorado para ondas que provém da Linha 1.
$\Gamma_{L2}$	Coefficiente de refração para corrente de modo aéreo no terminal monitorado para ondas que provém da Linha 1 e refratam para a Linha 2.
$Z_{eqL1}$	Impedância de surto de modo aéreo equivalente vista por ondas que provém da Linha 1.
$R_{L1}$	Relação entre as ondas de corrente de modo aéreo medidas na Linha 1 e na Linha 2.
$R_{L2}$	Relação entre as ondas de corrente de modo aéreo medidas na Linha 2 e na Linha 1.
$i_{adj}$	Onda de corrente de modo aéreo incidente proveniente de linha adjacente conectada ao terminal monitorado.
$i_{adj1}$	Onda de corrente de modo aéreo proveniente de linha adjacente conectada ao terminal monitorado que refrata para a Linha 1.

$i_{adj2}$	Onda de corrente de modo aéreo proveniente de linha adjacente conectada ao terminal monitorado que refrata para a Linha 2.
$Z_{eqADJ}$	Impedância de surto de modo aéreo equivalente vista por ondas que provêm de linha adjacente conectada ao terminal monitorado.
$\Gamma_{ADJ1}$	Coefficiente de refração para corrente de modo aéreo no terminal monitorado para ondas que provêm de linha adjacente e refratam para a Linha 1.
$\Gamma_{ADJ2}$	Coefficiente de refração para corrente de modo aéreo no terminal monitorado para ondas que provêm de linha adjacente e refratam para a Linha 2.
$C_{adj}$	Constante definida para aplicação do Filtro Direcional.
$i_{orig1}^{L1}$	Onda de corrente de modo aéreo que deveria ser medida na Linha 1, quando a onda incidente provêm da Linha 1, se não houvesse sobreposição com onda proveniente de linha adjacente.
$i_{orig2}^{L1}$	Onda de corrente de modo aéreo que deveria ser medida na Linha 2, quando a onda incidente provêm da Linha 1, se não houvesse sobreposição com onda proveniente de linha adjacente.
$i_{med1}^{L2}$	Onda de corrente de modo aéreo medida na Linha 1, quando a onda incidente provêm da Linha 2.
$i_{med2}^{L2}$	Onda de corrente de modo aéreo medida na Linha 2, quando a onda incidente provêm da Linha 2.
$FA$	Fator de atenuação.
$E_{MAX}$	Valor de pico da tensão fase-terra do sistema avaliado.
$\theta_{lim}$	Ângulo de incidência da falta.
$l_{maior}$	Comprimento da maior linha monitorada.
$v_{min}$	Menor velocidade de propagação de onda de corrente de modo aéreo dentre as velocidades de propagação das linhas monitoradas.
$f_a$	Frequência de amostragem.
$E_{cat}$	Maior variação da linha de maior comprimento ao longo do dia.
$i_{falta}$	Onda de corrente gerada pela falta.
$i_{refletida}$	Onda de corrente refletida no terminal local e depois refletida no ponto de falta.

$i_{refratada}$	Onda de corrente refletida no terminal remoto e refratada no ponto de falta.
$i_{sa}$	Onda de corrente refratada no terminal remoto que retorna pela linha sã.
$d_{est}$	Estimativa do local da falta.
$t_0$	Instante de tempo de ocorrência da falta.
$t_1$	Instante de tempo de chegada da primeira frente de onda de corrente que vem da direção da falta.
$t_2$	Instante de tempo de chegada da segunda frente de onda de corrente que vem da direção da falta.
$t_{orig}$	Instante de tempo de chegada da onda de corrente originalmente gerada pela falta.
$l_{falta}$	Comprimento da linha com falta.
$l_{sa}$	Comprimento da linha sã.
$v_{falta}$	Velocidade de propagação da onda de corrente de modo aéreo na linha com falta.
$v_{sa}$	Velocidade de propagação da onda de corrente de modo aéreo na linha sã.
$d_{sim}$	Distância de falta em que a onda originalmente gerada pela falta chega no mesmo instante da onda que retorna pela linha sã.
$d_{cr}$	Distância de crítica associada a sobreposição da onda refletida no terminal local e depois refletida no ponto de falta com a onda refratada no terminal remoto e refratada no ponto de falta.
$d_{cs}$	Distância de crítica associada a sobreposição da onda refletida no terminal local e depois refletida no ponto de falta com a onda refratada no terminal remoto que retorna pela linha sã.
$d_c$	Distância crítica utilizada no algoritmo de localização de faltas.
$NDS$	Número de amostras do Filtro DS.
$d_{est}^{refl}$	Vetor de estimativas do local da falta para o caso de onda classificada como refletida no terminal local e depois refletida no ponto de falta.
$d_{est}^{fal}$	Vetor de estimativas do local da falta para o caso de onda classificada como refletida no terminal remoto e refratada no ponto de falta.

---

$d_{est}^{sa}$	Vetor de estimativas do local da falta para o caso de onda classificada como refratada no terminal remoto que retorna pela linha sã.
$q_{erro\%}$	Erro do porcentual de quantização de um conversor analógico-digital.
$N$	Número de bits do conversor analógico-digital.
$Z_{st}$	Impedância de surto da linha de transmissão utilizada para aplicação do modelo de previsão de propagação de ondas geradas por faltas em linhas de transmissão trifásicas.
$R_{tL}$	Resistência do terminal local do sistema utilizado para aplicação do modelo de previsão de propagação de ondas geradas por faltas em linhas de transmissão trifásicas.
$R_{tR}$	Resistência do terminal remoto do sistema utilizado para aplicação do modelo de previsão de propagação de ondas geradas por faltas em linhas de transmissão trifásicas.
$\tau_{LOC}$	Tempo de trânsito entre a falta e o terminal local na linha de transmissão utilizada para aplicação do modelo de previsão de propagação de ondas geradas por faltas em linhas de transmissão trifásicas.
$\tau_{REM}$	Tempo de trânsito entre a falta e o terminal remoto na linha de transmissão utilizada para aplicação do modelo de previsão de propagação de ondas geradas por faltas em linhas de transmissão trifásicas.
$i_{ovBT}^{MCA}$	Vetor de onda de corrente lançada por falta entre a fase B e a terra, no domínio modal utilizando a transformada de Clarke referenciada na fase A.

### 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

O sistema elétrico de potência brasileiro tem crescido em tamanho e complexidade, com aumento considerável no número de linhas de transmissão a cada ano (ANEEL, 2016a). Paralelamente a isto, a sociedade brasileira tem exigido cada vez mais qualidade na prestação do serviço de energia elétrica, o que se reflete em incentivos econômicos para que as empresas concessionárias de linhas de transmissão de energia prestem o serviço com o maior índice de continuidade possível (ANEEL, 2016b). A regulamentação vigente, emitida pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), estabelece um desconto financeiro, denominado Parcela Variável por Indisponibilidade (PVI), na receita da empresa concessionária de transmissão caso a linha de transmissão saia de operação, sendo o desconto mais severo caso a linha saia intempestivamente e mais brando caso a linha saia de maneira programada. Este desconto na receita da concessionária também é proporcional ao tempo em que a linha de transmissão ficou fora de operação. Dessa forma, as concessionárias têm o sinal econômico para manter a linha de transmissão disponível para operação o maior tempo possível e com o tempo para as manutenções que necessitem de desligamento sendo o menor possível. Também há o incentivo econômico para que, em caso de desligamento intempestivo, o restabelecimento seja feito o mais rápido possível.

Uma das principais causas de desligamentos intempestivos nas linhas de transmissão são os curtos-circuitos, doravante denominados neste trabalho de faltas (ANEEL, 2018). As faltas podem ser de natureza transitória, ou seja, são extintas após o desligamento da linha, sendo ela religada automaticamente com sucesso, ou permanente, sendo que neste caso é necessária a intervenção de uma equipe de manutenção no local para reparar a linha de transmissão e colocá-la em serviço novamente. Dessa forma, no caso de faltas permanentes, o conhecimento da localização em que a falta ocorreu pode acelerar o restabelecimento da linha, tendo em vista

que a equipe de manutenção poupará o tempo em que ficaria à procura do local do defeito (SAHA *et al.*, 2010). Nesse sentido, quanto mais precisa for a estimativa do local da falta, menor o tempo de recomposição do sistema (SAHA *et al.*, 2010). No caso de faltas de natureza transitória, a estimativa da localização da falta gera dados que podem ajudar nas manutenções preventivas da linha, indicando pontos de defeito incipientes (AIEE Committee Report, 1955; KULKARNI *et al.*, 2014). No caso de detecção de defeitos incipientes, cabe destacar que há potencial ganho na redução no tempo de manutenção preventiva, aumentando o tempo de disponibilidade da linha de transmissão (AIEE Committee Report, 1955; KULKARNI *et al.*, 2014). Em todos estes cenários, quanto mais precisa for a estimativa do local da falta, mais acelerado será o restabelecimento da linha ou mais eficiente será a manutenção preventiva.

## 1.2 MOTIVAÇÃO

Os métodos de localização de faltas em linha de transmissão se classificam em métodos baseados em componentes fundamentais, métodos baseados em componentes de alta frequência, métodos baseados em inteligência artificial e métodos baseados na teoria das ondas viajantes. Podemos subclassificar esses tipos em métodos que necessitam de informações de um terminal da linha, métodos que necessitam de informações dos dois terminais da linha e métodos que utilizam informações de mais de dois terminais, abrangendo neste último caso, mais de uma linha. Também podemos subclassificar em métodos que necessitam das medições de tensão e corrente, métodos que necessitam apenas de medição de tensão e métodos que necessitam apenas de medição de corrente (SAHA *et al.*, 2010).

Dentre as classes de métodos descritos acima, sabe-se que os métodos baseados em componentes fundamentais são os mais utilizados devido ao baixo custo e fácil implantação (SAHA *et al.*, 2010), porém são susceptíveis a mais fontes de erro como sensibilidade à imprecisão nos parâmetros de linha fornecidos, sensibilidade a erros provenientes do algoritmo de estimação de fasores associado e, no caso de utilização de apenas um terminal, sensibilidade à resistência de falta e não-homogeneidade do sistema (SCHWEITZER, 1988; SAHA *et al.*, 2010).

De modo geral, métodos baseados em componentes fundamentais requerem que a falta esteja presente por alguns ciclos para obter resultados precisos. Isso pode ser um problema para rede

de alta tensão, tendo em vista que faltas podem ser eliminadas em menos que dois ciclos. Além disso, métodos baseados em componentes fundamentais podem não ser aplicáveis em linhas com compensação série ou linhas próximas a linhas com compensação série, pois a combinação do capacitor série e sua proteção contra sobretensão cria uma queda de tensão dependente da corrente, que ocasiona uma dependência da impedância com a corrente, o que não é levado em conta nas equações de localização de faltas baseadas em componentes fundamentais (GUZMÁN *et al.*, 2018).

Os métodos baseados em componentes de alta frequência são técnicas mais caras, complexas, que necessitam de altas taxas de amostragem para representação confiável das altas frequências e, em geral, grande esforço computacional para a realização da análise espectral dos transitórios. Por isso, o uso desses métodos tem sido limitado em aplicações reais, dificultando a sua popularização e difusão na literatura (LOPES, 2014).

Já os métodos baseados em inteligência artificial, embora seja relatado um bom desempenho na literatura, sabe-se que possuem aplicação restrita em campo, principalmente por consistirem em técnicas complexas com alto esforço computacional associado. Além disso, estes métodos são bastante dependentes das características do sistema monitorado e, portanto, requerem, em sua grande maioria, a atualização dos algoritmos sempre que ocorrem alterações na configuração do sistema elétrico de potência em análise (LOPES, 2014).

Ondas viajantes têm sido estudadas como um fenômeno há um longo tempo (BEWLEY, 1931). Aproveitando a teoria desenvolvida, métodos de localização de faltas baseados na teoria das ondas viajantes têm sido desenvolvidos por apresentarem uma maior precisão com relação aos métodos baseados em componentes fundamentais (SCHWEITZER *et al.*, 2014). Com o desenvolvimento e uso de proteções rápidas para linhas de transmissão, o tempo de eliminação dos defeitos para condições mais críticas têm diminuído, reduzindo o tempo de oscilografia dos dados do período de falta, o que pode prejudicar a precisão dos métodos baseados em componentes fundamentais (KEZUNOVIC; PERUNICIC, 1995). Aliado a isto, pesquisas têm sido feitas na área de técnicas para redução do tempo de abertura dos disjuntores, o que pode agravar, em futuro próximo, o problema mencionado anteriormente (PENG *et al.*, 2014; PENG *et al.*, 2016).

Apesar das vantagens dos métodos de localização de faltas baseados na teoria de ondas

viajantes, há desvantagens em relação aos outros métodos, quais sejam:

- a) Necessitam de equipamentos com taxa de amostragem alta, por volta de 1 MHz;
- b) Métodos de dois terminais, que são os mais confiáveis e consolidados comercialmente, necessitam de canal de comunicação dedicado ou dispositivo que faça o sincronismo com precisão, pois pequenos erros no tempo se traduzem em grandes erros na estimativa do local da falta;
- c) Métodos de um terminal não são capazes de localizar faltas próximas aos terminais, pois as primeira e a segunda frentes de onda são indistinguíveis entre si.
- d) Métodos de um terminal podem apresentar erros muito grandes quando a segunda frente de onda é classificada incorretamente;
- e) Faltas que ocorrem no momento em a tensão está próxima de zero são de difícil detecção, o que inviabiliza a utilização do método de ondas viajantes para localizar a falta.

As ondas viajantes em linhas de transmissão se apresentam como fenômenos de alta frequência (SAHA *et al.*, 2010). Em linhas de transmissão de alta tensão, os sinais de tensão são captados por meio do Transformador de Potencial Capacitivo (TPC) e os sinais de corrente por meio do Transformador de Corrente (TC) (JOHNS; SALMAN, 1995). Ocorre que os TPCs, por possuírem elementos capacitivos e indutivos na sua constituição, não apresentam uma resposta em frequência que permite a reprodução com fidelidade do sinal primário em uma ampla banda. Dessa forma, ele é projetado para apresentar uma resposta em frequência que reproduza com fidelidade sinais na frequência fundamental da rede. Conforme explicado, os TPCs distorcem os sinais de alta frequência, não sendo adequados para a detecção das ondas viajantes de tensão (TZIOUVARAS *et al.*, 2000). Já os TCs apresentam uma resposta em frequência que permite a reprodução com fidelidade do sinal primário em uma ampla banda, sendo adequado para a detecção de sinais de alta frequência como os gerados pelas ondas viajantes de corrente (TZIOUVARAS *et al.*, 2000).

Devido a capacitância parasita que existe no TPC, é possível a detecção da primeira onda de tensão no secundário do TPC com a sua polaridade e tempo de chegada preservados (SCHWEITZER *et al.*, 2016). Isto é suficiente para utilizar esta onda em métodos de

localização de faltas que necessitam apenas da medição da primeira frente de onda, como é o caso de método de localização de faltas baseado na teoria de ondas viajantes de dois terminais. Sendo assim, não é possível utilizar ondas de tensão para localizar faltas utilizando apenas um terminal, tendo em vista que estes métodos necessitam da medição de uma segunda frente de onda. Na prática, são utilizadas apenas as ondas de corrente, pois a precisão de métodos de dois terminais não é afetada pela utilização de ondas de tensão ou corrente.

Um dos motivos de preocupação com relação às medições nos TCs para aplicações em proteção e localização de faltas é a possibilidade de sua saturação, que pode fazer com que a forma de onda vista no secundário do TC seja bastante distorcida com relação ao seu primário (JOHNS; SALMAN, 1995; SAHA *et al.*, 2010). O TC fica mais susceptível à saturação quanto maior for a corrente no seu primário e quanto maior for a carga ligada no seu secundário (TZIOUVARAS *et al.*, 2000). Em geral, quando ocorre uma falta no sistema elétrico, a corrente no primário do TC se eleva, podendo haver a sua saturação, justamente no momento em que é necessária uma medição precisa da corrente para utilização em aplicações de proteção e localização de faltas (TZIOUVARAS *et al.*, 2000; PHADKE; THORP, 2009). No entanto, a saturação do TC não é um problema para métodos de localização de faltas baseados em ondas viajantes que detectam somente a primeira onda, pois o transitório de falta só é percebido após a chegada da primeira onda viajante de corrente (SILVA *et al.*, 2004; SAHA *et al.*, 2010). Para métodos que utilizam ondas refletidas, a saturação do TC também não é problema, pois ela só ocorrerá, na pior situação, um sexto de ciclo após a início do transitório de faltas (PAN *et al.*, 2004), ou seja, cerca de 2,79 ms depois da chegada da primeira onda viajante em um sistema de 60 Hz. Considerando que em linhas aéreas as ondas viajantes de corrente trafegam a aproximadamente 98% da velocidade da luz (aproximadamente 293796 km/s) (ZIMATH *et al.*, 2010), o tempo de 2,79 ms é suficiente para as ondas viajantes de corrente subsequentes percorram cerca de 820 km, podendo a saturação do TC ser um problema para faltas que ocorram no final de linhas com cerca de 410 km. Como a maior linha de transmissão de corrente alternada aérea licitada no Brasil desde o ano 2000 tem cerca de 443 km (ANEEL, 2016a), a saturação do TC não será o problema para detecção das ondas viajantes de corrente.

O método baseado na teoria das ondas viajantes consolidado comercialmente é o que utiliza dados de corrente de dois terminais com sincronização do tempo, encontrado, por exemplo, nos

seguintes dispositivos: SEL (2017) e GE (2019). Esta sincronização é geralmente alcançada via *Global Positioning System* (GPS) (SCHWEITZER *et al.*, 2014). Nestes casos, a perda do sinal GPS ou do canal de comunicação ou um problema no GPS que produza um erro de sincronização de tempo entre terminais considerável poderá comprometer o supramencionado método. Destaca-se que basta um erro de sincronização da ordem de milissegundos para comprometer o método de localização da faltas, tendo em vista que as ondas viajantes de corrente nas linhas aéreas viajam a uma velocidade de aproximadamente 98% da velocidade da luz (ZIMATH *et al.*, 2010). Neste sentido, métodos de dois terminais que utilizam dados de corrente têm sido desenvolvidos no sentido de eliminar a necessidade de sincronização de dados de tempo dos terminais (LOPES *et al.*, 2015; LOPES, 2016; LOPES *et al.*, 2018), sendo uma evolução com relação ao método tradicional de dois terminais (GALE *et al.*, 1993). Embora nestes métodos desenvolvidos não seja mais necessário o sincronismo de tempo via GPS entre os terminais da linha monitorada, ainda é necessária a utilização de um canal de comunicação.

Os métodos baseados na teoria de ondas viajantes de um terminal que utilizam apenas dados de corrente não necessitam de sincronização de tempo nem de canal de comunicação (GALE *et al.*, 1993). Apesar dessas aparentes vantagens, eles não são fáceis de implementar de maneira confiável (GALE *et al.*, 1993), pois é necessário a detecção de duas frentes de onda, sendo a primeira a da onda originalmente gerada pela falta e uma segunda onda, sendo necessário que esta segunda onda tenha percorrido um caminho que envolva a distância do terminal monitorado para a falta e que seja conhecido o caminho que esta onda percorreu. Assim, é de grande interesse da comunidade científica e das concessionárias de transmissão a investigação da implementação destes métodos de maneira confiável.

### 1.3 OBJETIVO DO TRABALHO

O objetivo deste trabalho é propor um método de localização de faltas baseado na teoria de ondas viajantes usando apenas dados de corrente de um terminal para linhas paralelas, comparando com o existente na literatura.

Foi desenvolvido por Guangbin *et al.* (2013) um método de localização de faltas de um terminal para linhas paralelas utilizando apenas dados de corrente, que utiliza esta topologia

para auxiliar na identificação das ondas de interesse para a localização de faltas. Este método foi avaliado neste trabalho, sendo identificadas as suas fragilidades. Nesta linha foi desenvolvido um novo algoritmo que supera a maior parte destas fragilidades. Para o desenvolvimento deste novo algoritmo, foi necessária uma investigação mais aprofundada acerca da propagação de ondas viajantes em sistemas com faltas, em especial em sistemas com faltas assimétricas, o qual é mencionado, mas não é demonstrado matematicamente na literatura. Apesar de não ter sido o objetivo primário deste trabalho de pesquisa, os resultados obtidos aqui foram cientificamente relevantes, podendo servir de base para trabalhos futuros como, por exemplo, na área de localização de faltas e proteção.

Também foi pertinente o desenvolvimento de um método de classificação de faltas rápido, de maneira a manter a vantagem do funcionamento do método de localização de faltas em cenários de rápida extinção do defeito, pois o método de localização de faltas desenvolvido depende da classificação de faltas para a correta seleção do modo aéreo a ser utilizado. Este método de classificação de faltas desenvolvido pode ser utilizado para outras aplicações, sendo uma contribuição adicional deste trabalho de pesquisa.

## 1.4 CONTRIBUIÇÕES E PUBLICAÇÕES

Dentre as contribuições científicas deste trabalho, destaca-se:

- a) Desenvolvimento de um método para calcular analiticamente os transitórios de falta gerados por ondas viajantes em linhas de transmissão trifásicas transpostas, que se aplica aos casos de faltas assimétricas, sendo demonstradas quantitativamente as ondas no domínio modal lançadas para cada tipo clássico de falta, bem como as matrizes de coeficientes de refração e reflexão no ponto de falta (Capítulo 3);
- b) Desenvolvimento de um método de classificação de faltas em que são necessárias apenas a medição das primeiras ondas incidentes de modo aéreo e terra no terminal monitorado (Capítulo 4);
- c) Desenvolvimento de um método de localização de faltas baseado na teoria das ondas viajantes de um terminal para linhas paralelas que possam ser consideradas transpostas

e desacopladas (Capítulo 5).

Os estudos desenvolvidos durante o mestrado possibilitaram a publicação dos seguintes artigos em anais de conferências internacionais e nacionais:

- a) MAGALHÃES, J. F. M. de; MONTEIRO, B. C. R.; LOPES, F. V. Using current traveling waves to implement directional elements in parallel lines. In: 2017 WORKSHOP ON COMMUNICATIONS NETWORKS AND POWER SYSTEMS (WCNPS). Brasília, 2017. (MAGALHÃES *et al.*, 2017);
- b) MAGALHÃES, J. F. M. de; LOPES, F. V. Single-ended traveling wave-based fault location method for parallel lines. In: 2018 SIMPOSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELETRICOS (SBSE). Niterói, 2018. (MAGALHÃES; LOPES, 2018).

## 1.5 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este trabalho está organizado como segue:

- a) No Capítulo 2 é realizada uma revisão bibliográfica acerca da evolução dos métodos de localização de faltas em linhas de transmissão utilizando a teoria de ondas viajantes, com enfoque para métodos que utilizam dados de apenas um terminal;
- b) No Capítulo 3 é feita uma revisão teórica do modelo de linha de transmissão a parâmetros distribuídos, bem como a origem e propagação de ondas viajantes lançadas por faltas em sistemas trifásicos;
- c) No Capítulo 4 é apresentado um novo método de classificação de faltas desenvolvido;
- d) No Capítulo 5 é apresentado um novo método de localização de faltas de um terminal baseado na teoria de ondas viajantes usando dados de um terminal para linhas paralelas;
- e) No Capítulo 6 são apresentados os resultados e análises de simulações realizadas para os métodos de classificação de faltas e localização de faltas propostos, comparando-os com o método selecionado dentre os existentes na literatura;

- 
- f) No Capítulo 7 são mostradas as conclusões acerca dos resultados deste trabalho de pesquisa e propostas de trabalhos futuros envolvendo o tema.

# REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentada uma revisão bibliográfica dos métodos de localização de faltas baseados na teoria das ondas viajantes, com enfoque para os métodos de um terminal, objeto de estudo deste trabalho.

## 2.1 IMPORTÂNCIA DA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Métodos de localização de faltas são de grande importância para as empresas concessionárias de transmissão de energia elétrica e para operadores desses sistemas de transmissão, sendo uma disciplina estudada desde antes de 1940 (SCHWEITZER *et al.*, 2014). Isto motivou o *American Institute of Electrical Engineers* (AIEE) a apresentar uma revisão bibliográfica dos algoritmos de localização de faltas propostos entre 1933 e 1955 (AIEE Committee Report, 1955). A importância deste tema permanece até os dias atuais, sendo objeto de estudo por engenheiros e pesquisadores (SAHA *et al.*, 2010; IEEE Power System Relaying Committee, 2015).

## 2.2 CARACTERÍSTICAS DA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS UTILIZANDO A TEORIA DAS ONDAS VIAJANTES

Os métodos de localização de faltas baseados na teoria das ondas viajantes estão se expandindo, pois a estimativa do local da falta não é afetada pela resistência de falta, fluxo de potência na linha e impedâncias das fontes que alimentam as linhas. Adicionalmente, estes métodos apresentam uma precisão maior comparados com os métodos baseados em componentes fundamentais (ANCELL; PAHALAWATHTHA, 1994).

No entanto, a precisão dos métodos de localização de faltas baseados na teoria de ondas

viajantes depende do ângulo de incidência da falta, da taxa de amostragem, da quantidade de ruído presente no sinal medido e, no caso de método de um terminal, da localização da falta, pois neste caso, faltas próximas ao barramento diminuem sua precisão. No melhor cenário, a precisão desses métodos de localização de faltas será da ordem de  $\pm \frac{1}{2} \Delta t$ , onde  $\Delta t$  é o período de amostragem (ANCELL; PAHALAWATHTHA, 1994). Em termos aplicações práticas, que geralmente utilizam uma taxa de amostragem de 1 MHz, é esperada uma precisão da ordem de um vão de torre (500 m) (GUZMÁN *et al.*, 2018).

Do ponto de vista do processamento de sinais, distorção por dispersão se refere a um fenômeno em que uma onda viajante lançada pela falta em que ela varia do seu valor inicial ao seu valor final fixo instantaneamente (degrau somado a um valor constante) é vista no terminal monitorado como um sinal que varia do seu valor inicial ao seu valor final fixo com um formato de rampa, sendo que a inclinação desta rampa diminui proporcionalmente à distância que a onda viajou (GUZMÁN *et al.*, 2018). Devido a variação da velocidade de propagação das ondas em linhas de transmissão com a frequência do sinal aplicado, demonstrada no Capítulo 3, e pelo fato do sinal gerado por faltas poderem ser considerados um degrau (JOHNS; SALMAN, 1995), ocorrerá uma distorção por dispersão do sinal, que poderá induzir erros na detecção dos tempos de chegada das ondas, sendo este erro proporcional à distância percorrida pela onda viajante (GUZMÁN *et al.*, 2018). Um estudo realizado em Lopes (2014) mostra que este erro se encontra dentro de limites razoáveis para linhas de transmissão de corrente alternada de até 900 km.

É possível utilizar, para localizar faltas, as ondas captadas nas fases ou as ondas modais, calculadas conforme procedimento mostrado no Capítulo 3. Pelos fundamentos mostrados no Capítulo 3, recomenda-se utilizar as ondas modais no processo de localização de faltas. Dentre as ondas modais, é possível utilizar as ondas de modo aéreo ou a onda de modo terra, sendo preferível utilizar as ondas de modo aéreo por serem menos dependentes da resistividade do solo, terem menos atenuação e a sua velocidade de propagação variar menos com a frequência, minimizando o efeito de distorção por dispersão (ANCELL; PAHALAWATHTHA, 1994; JIAN *et al.*, 1998; SCHWEITZER *et al.*, 2014). Utilizar as ondas de modo aéreo, portanto aumenta a precisão da localização estimada da falta.

A principal desvantagem dos métodos baseados na teoria das onda viajantes é que nenhum

deles é capaz de localizar faltas que ocorrem em momento em que a tensão está próxima do zero, pois nesta situação pode não ser possível detectar a onda viajante lançada (ANCELL; PAHALAWATHTHA, 1992). Apesar de não ser o cenário mais provável para uma falta ocorrer, tal situação é factível. Sendo assim, os métodos baseados em componentes fundamentais devem ser usados nestas situações para localizar a falta (GUZMÁN *et al.*, 2018).

## 2.3 CLASSIFICAÇÃO DA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS UTILIZANDO A TEORIA DAS ONDAS VIAJANTES

Os primeiros trabalhos envolvendo o desenvolvimento da teoria das ondas viajantes para linhas de transmissão de energia remontam a 1931 (BEWLEY, 1931; BEWLEY, 1933). Com a teoria estabelecida, ela passou a ser utilizada para localizar faltas em sistemas de transmissão, sendo que os seguintes artigos apresentam de forma compilada as técnicas de localização de faltas utilizando a teoria das ondas viajantes: Stringfield *et al.* (1957) e Gale *et al.* (1993). Nestes artigos, a teoria das ondas viajantes é revisada e os métodos de localização de faltas em linhas de transmissão são classificados, sendo os principais tipos apresentados e descritos a seguir:

- a) Tipo A: Método de um terminal que capta os transitórios gerados pela falta. Necessita que a linha esteja conectada em um barramento que permita a reflexão da onda gerada pela falta, para então esta onda ser novamente refletida no ponto de falta, sendo detectada;
- b) Tipo B: Método de dois terminais que se utiliza do auxílio de pulso produzido por circuito instalado no terminal da linha, sendo este pulso detectado nos dois terminais;
- c) Tipo C: Método de um terminal que se utiliza de pulso produzido por um circuito instalado no terminal da linha e posterior detecção da reflexão deste pulso na falta;
- d) Tipo D: Método de dois terminais que detecta apenas as primeiras ondas em cada terminal. Necessita que os dois terminais tenham a mesma base de tempo, ou seja, estejam sincronizados.

Dentre os métodos de localização de faltas baseados na teoria das ondas viajantes, os tipos B e C se utilizam do lançamento de pulso gerado por circuito instalado no terminal da linha

para localizar o defeito enquanto que os tipos A e D se utilizam apenas do transitório gerado pela falta. Uma das vantagens dos métodos que utilizam apenas o transitório gerado pela falta é que não é necessária a instalação de dispositivos na linha de transmissão, bastando ter um equipamento com taxa de amostragem suficientemente alta conectado nos terminais da linha de transmissão monitorada (GALE *et al.*, 1993).

Embora métodos de dois terminais sejam mais fáceis implementar, é necessário estabelecer uma referência de tempo sincronizada entre os equipamentos dos dois terminais, o que torna isto mais custoso e complicado tecnicamente do ponto de vista dos equipamentos a serem instalados na linha (GALE *et al.*, 1993). Já os métodos de um terminal não necessitam de canais de comunicação, porém são mais difíceis de implementar, tendo em vista a necessidade de detecção de uma primeira e de uma segunda onda, sendo esta última geralmente a refletida no ponto de falta, o que não é trivial (GALE *et al.*, 1993). Dessa forma, para o uso na prática dos métodos baseados na teoria das ondas viajantes, os que utilizam dados de dois terminais têm sido preferidos em relação aos que utilizam dados de apenas um terminal, pois neste último a correta identificação das ondas se faz muito complexa com as atuais técnicas e ainda não garante a sua correta identificação em todas as situações (GUZMÁN *et al.*, 2018).

Desconsiderando a dificuldade de encontrar a onda correta para métodos de um terminal, façamos uma análise dos erros a que os métodos de um terminal e dois terminais estão sujeitos. Em geral, métodos de dois terminais têm uma fonte extra de erro comparado com métodos de um terminal, que é o erro de sincronização. Quando a referência de tempo é proveniente de satélites, é usual esperar um erro de  $1 \mu\text{s}$  em cada terminal de linha. Adicionalmente, a maioria dos satélites não provê compensação para antenas ou tempo de propagação nos cabos, podendo criar outra fonte de erro, aumentando o erro esperado para  $2 \mu\text{s}$  em cada terminal de linha. Nos métodos de dois terminais que utilizam fibras ópticas dedicadas para sincronização, o erro esperado é de 80 ns. Por outro lado, em relação aos métodos de dois terminais, os métodos de um terminal podem apresentar um maior erro no tempo de detecção das ondas devido ao efeito da distorção por dispersão, que é maior neste caso, pois as distâncias percorridas pelas ondas utilizadas para localizar a falta são maiores, considerando uma mesma situação de falta. Pelo explicado acima, espera-se que os métodos de um terminal sejam mais precisos que os métodos de dois terminais que utilizam sincronização via GPS, ao passo que são menos precisos que os

métodos de dois terminais que utilizam fibras ópticas dedicadas para sincronização (GUZMÁN *et al.*, 2018).

## 2.4 MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS BASEADO NA TEORIA DE ONDAS VIAJANTES UTILIZANDO DADOS DE UM TERMINAL

Dentre a classificação dos métodos de localização de faltas baseados na teoria das ondas viajantes apresentados em Gale *et al.* (1993), se destaca o Tipo A, o qual utiliza apenas os transitórios de corrente gerados pela falta em apenas um terminal, sendo este o objeto de estudo deste trabalho. Os métodos baseados na teoria de ondas viajantes que utilizam dados de um terminal não são fáceis de implementar, uma vez que dependem da detecção de duas ondas, sendo a primeira onda proveniente do transitório de falta e uma segunda onda, sendo geralmente esta segunda a refletida no ponto de falta (GALE *et al.*, 1993). Os problemas que podem ocorrer são (SCHWEITZER *et al.*, 2014; GUZMÁN *et al.*, 2018):

- a) Detecção de uma onda proveniente de uma linha adjacente curta conectada ao terminal monitorado no lugar da onda de interesse;
- b) A onda refletida no ponto de falta pode ser confundida com a onda que reflete no barramento remoto e refrata no ponto de falta. A sequência desses dois eventos depende do local da falta e a onda que reflete no barramento remoto e refrata no ponto de falta pode ser detectável ou não, a depender do tipo de falta e da resistência de falta;
- c) Se existir linha paralela de comprimento menor que a linha monitorada, a onda que retorna por esta linha paralela, pode ser detectada como a onda de interesse.

Além dessas dificuldades elencadas acima, existe a seguinte dificuldade de ordem prática inerente a métodos de um terminal, podendo ser minimizada com uma maior taxa de amostragem combinada com técnicas de processamentos de sinais, porém nunca será eliminada: Para faltas próximas ao terminal monitorado, a primeira onda medida e a onda refletida no ponto de falta podem ter uma diferença de tempo muito pequena de forma que, a depender da taxa de amostragem utilizada e da técnica de processamento de sinais usada para extração dessas ondas viajantes, não seja possível distinguir a primeira onda incidente da onda refletida no

ponto de falta (ANCELL; PAHALAWATHTHA, 1992; ANCELL; PAHALAWATHTHA, 1994; SCHWEITZER *et al.*, 2014). O mesmo problema poderá ocorrer para faltas próximas do terminal remoto, sendo que as ondas que se tornam indistinguíveis são a primeira onda incidente e a onda refletida no terminal remoto e refratada no ponto de falta. Este último caso poderá ser um problema para métodos que utilizam esta onda refletida no terminal remoto e refratada no ponto de falta para localizar a falta.

Os problemas listados no primeiro parágrafo poderiam ser tratados utilizando as características únicas de reflexão no ponto de falta para faltas assimétricas, conforme apresentado no Capítulo 3. No entanto, isto não é possível, tendo em vista que a razão entre as duas ondas de modo aéreo permanece constante, mesmo após a reflexão ou refração no ponto da falta assimétrica (DAVYDOVA; HUG, 2018).

Uma outra possibilidade de contornar estes problemas é utilizar a diferença de velocidade entre ondas de modo aéreo e terra conforme proposto por Liu *et al.* (2012). Este método detecta a primeira onda de modo aéreo e a primeira onda de modo terra. Como essas ondas têm velocidade diferentes, é possível estimar a distância de falta desde que as velocidades destas ondas sejam conhecidas. Embora tenha sido dado um tratamento no artigo, o método ainda pode apresentar uma maior imprecisão devido à utilização do modo terra, pois a velocidade de propagação deste modo depende dos parâmetros de modo terra, que por sua vez dependem da resistividade do solo. Além disso, o modo terra apresenta uma maior dispersão por distorção em relação ao modo aéreo, o que ocasiona um maior erro na detecção dos tempos de chegada das ondas. Estas limitações não impedem a estimativa do local da falta caso a onda de modo terra exista. Isto evidencia a maior limitação desse método, que é a sua incapacidade de estimar a localização de faltas que não envolvam a terra (faltas bifásicas em sistemas trifásicos) ou simétricas (faltas trifásicas em sistemas trifásicos), pois neste caso a onda de modo terra não existirá, conforme demonstrado no Capítulo 3.

Em Xu & Dong (2014) é proposto um método de verificação de direcionalidade das ondas subsequentes à primeira onda, o qual se utiliza das leituras de corrente nas outras linhas conectadas ao terminal monitorado. Com a informação da primeira onda e dos coeficientes de reflexão e refração no barramento monitorado, é possível estabelecer a relação que deve ser satisfeita para que uma segunda onda seja classificada como a onda que vem da direção da falta

ou como a onda que vem da direção da linha adjacente. A partir da detecção das primeiras ondas de modo aéreo e terra que provêm da direção da linha adjacente e da direção do ponto de falta, é feito o cálculo dos intervalos de tempo entre a chegada das ondas de modo aéreo e de modo terra para as duas situações. Com o conhecimento destes intervalos de tempo e do comprimento da linha adjacente escolhida (recomenda-se utilizar a de menor comprimento), é possível estabelecer uma formulação para localizar a falta. No entanto, este método sofre dos mesmos problemas inerentes ao método proposto por Liu *et al.* (2012). Pelo fato do método proposto por Liu *et al.* (2012) apresentar formulação mais simples e não depender do comprimento de nenhuma linha nem de valores de coeficientes de reflexão e refração, é preferível utilizar ele ao invés do proposto por Xu & Dong (2014).

Em Lei *et al.* (2015a), os autores propõem um método para identificar se a segunda onda detectada pelo localizador de falta se trata da onda refletida no ponto de falta ou da onda refletida no terminal remoto e depois refratada no ponto de falta. O método proposto é válido apenas para faltas monofásicas e se utiliza do fenômeno de acoplamento das grandezas de modo aéreo e de modo terra, que ocorre no ponto de falta para faltas monofásicas. Os coeficientes de reflexão e refração de acoplamento entre as grandezas modais para faltas monofásicas são apresentados, percebendo-se que as polaridades relativas entre as seguintes duas ondas são diferentes para a reflexão e refração no ponto de falta: A primeira dessas ondas é a onda aérea gerada pela reflexão ou refração da onda aérea no ponto de falta e a segunda é a onda aérea gerada pela reflexão ou refração da onda de modo terra no ponto de falta. Esta característica é utilizada para classificar a segunda onda detectada em refletida no ponto de falta ou refletida no terminal remoto e depois refratada no ponto de falta. É enfatizado no artigo que há uma zona morta em três localizações de falta, onde não é possível fazer a identificação proposta, pois há superposição das ondas de interesse. No entanto, este método não trata do problema da possível detecção da onda proveniente de linha adjacente curta conectada ao terminal monitorado como a onda de interesse para classificação. Além disso, como este método se baseia na existência da componente de modo terra, utilizando-a indiretamente, ele sofre dos mesmos problemas inerentes ao método proposto por Liu *et al.* (2012). Pelo fato do método proposto por Liu *et al.* (2012) apresentar formulação mais simples, não ser susceptível aos problemas gerados por linhas adjacentes curtas conectadas ao terminal monitorado, funcionar para todos os casos de faltas envolvendo a terra e não apresentar as citadas zonas mortas, é preferível utilizar ele ao

invés do proposto por Lei *et al.* (2015a).

O método proposto em Lei *et al.* (2015a) é melhorado em Lei *et al.* (2015b), proposto pelos mesmos autores. Neste algoritmo, é utilizado o método de classificação da segunda onda vinda da direção da falta proposto anteriormente, sendo que as ondas vindas da falta são identificadas através de um elemento direcional de corrente que utiliza a medição de corrente da linha monitorada e a medição de corrente da linha mais longa conectada no terminal monitorado. No entanto, a falta pode ocorrer em uma distância maior que a maior linha conectada ao terminal monitorado, fazendo com que a onda refletida no outro terminal da linha sã e que retorna para o terminal monitorado seja identificada como uma onda que provém da falta. Há também o problema da superposição das ondas que vêm das linhas adjacentes com as ondas de interesse, o qual não foi tratado. Por derivar do método proposto em Lei *et al.* (2015a), apresentando adicionalmente apenas a solução para o problema gerado por linhas adjacentes curtas conectadas ao terminal monitorado, é preferível utilizar o método proposto por Liu *et al.* (2012), pelas mesmas razões apresentadas no parágrafo anterior.

Visando contornar os problemas associados à utilização da onda de modo terra, direta ou indiretamente, Kale *et al.* (2012) propôs um método de localização de faltas de um terminal que utiliza apenas as ondas de modo aéreo. A primeira onda de modo aéreo lançada pela falta é detectada para então uma segunda onda de interesse de modo aéreo ser detectada e classificada como a onda refletida no ponto de falta ou a onda refletida no terminal remoto e refratada no ponto de falta. A referida classificação é feita a partir da polaridade relativa da segunda onda de interesse em relação à primeira, onde a polaridade é a mesma da primeira onda para ondas refletidas no ponto de falta e a polaridade é inversa em relação à primeira onda para ondas refletidas no terminal remoto e refratada no ponto de falta. A mesma abordagem para diferenciar as ondas provenientes da reflexão no ponto de falta das ondas provenientes do terminal remoto e que refratam no ponto de falta já havia sido proposta em Spoor & Zhu (2006). No entanto, o problema da possível detecção de onda proveniente de linha adjacente curta conectada ao terminal monitorado como a segunda onda de interesse não é tratado. Além disso, é assumido que o coeficiente de reflexão no terminal remoto é positivo, o que só ocorrerá se pelo menos mais outras duas linhas estiverem conectadas no terminal remoto.

Da mesma forma que Kale *et al.* (2012), os seguintes métodos de um terminal foram propos-

tos na literatura, os quais não tratam da problemática de detecção errônea da onda de interesse devido à existência de linhas adjacentes curtas conectadas ao terminal monitorado: Spoor & Zhu (2006), Eng & Ramar (2009), Xie *et al.* (2013) e Altay *et al.* (2014). No entanto, devido às sucessivas reflexões das ondas lançadas pelas faltas no sistema, pode ocorrer, a depender do local da falta, das ondas provenientes de linhas adjacentes curtas serem detectadas antes da onda esperada de interesse, induzindo um erro na estimativa da localização da falta por onda viajante de um terminal que pode ser tão grande quanto a janela de busca utilizada para localizar a segunda onda de interesse. Por isso, os métodos que utilizam as duas primeiras ondas, desprezando as ondas vindas das linhas adjacentes, tendem a ser mais robustos. Uma das formas de classificar as ondas sucessivas como provenientes de linhas adjacentes ou da linha com falta é por meio de um elemento direcional.

Uma classe de métodos de um terminal foram propostos na literatura objetivando suplantar as dificuldades elencadas no primeiro parágrafo. Estes algoritmos de um terminal utilizam métodos baseados em componentes fundamentais e, a partir do erro estimado destes métodos, preveem uma janela no tempo em que a onda refletida na falta deverá ser detectada. Estes métodos buscam resolver o conflito entre robustez e precisão, tendo vista que os métodos baseados em componentes fundamentais de um terminal são robustos, mas não são precisos e os métodos baseados em ondas viajantes de um terminal são precisos, mas não são robustos. Exemplos dessa classe de métodos propostos na literatura estão presentes nos seguintes artigos: Xinzhou *et al.* (2002), Xinzhou *et al.* (2008), Zheng *et al.* (2008), Zheng *et al.* (2009), Huang *et al.* (2011) e Schweitzer *et al.* (2016). No entanto, a precisão desta classe de métodos depende da precisão dos métodos baseados em componentes fundamentais, servindo a detecção por ondas viajantes para melhorar a precisão do método baseado em componentes fundamentais e não ao contrário. Dessa forma, a depender a situação, este método poderá ser tão impreciso quanto os métodos baseados em componentes fundamentais.

Visando suplantar as dificuldades inerentemente relacionadas aos métodos de um terminal utilizando apenas as ondas de modo aéreo, sem utilizar do auxílio de métodos baseados em componentes fundamentais e tratando dos problemas associados a linhas adjacentes curtas conectadas ao terminal monitorado, foram propostos algoritmos na literatura ao longo do tempo, os quais serão apresentados a partir deste ponto do texto.

Em Ancell & Pahalawaththa (1994) é proposto um novo algoritmo de localização de faltas de um terminal utilizando a teoria das ondas viajantes. É mostrado que os intervalos de tempo entre a chegada da primeira onda e o das sucessivas reflexões no ponto de falta são constantes. Sabendo desta propriedade, um método chamado de critério de máxima verossimilhança é aplicado ao sinal gerado pela falta. É mostrado que para determinar o intervalo de tempo das sucessivas reflexões, basta encontrar o máximo de uma função obtida a partir de um equacionamento matemático que considera que a função densidade de probabilidade será maximizada quando o intervalo de tempo das sucessivas reflexões for aplicado nesta função. Vale destacar que este método leva em consideração o fenômeno de acoplamento modal que ocorre no ponto de falta para faltas assimétricas. Este método tem um bom potencial de uso, porém uma limitação sua é que as sucessivas ondas refletidas podem ser atenuadas a ponto de não serem devidamente detectadas, prejudicando a performance do método, mesmo que a falta ocorra em um momento em que ondas viajantes da maior amplitude possível são geradas.

Em Batty *et al.* (1997) é proposto um método de identificação da direcionalidade das ondas de corrente que chegam em uma subestação cujo barramento está conectado a três ou mais linhas de transmissão, estando disponível a medição de corrente em todas elas. O método considera que a polaridade da onda de corrente na linha de onde a onda proveio é diferente da polaridade das ondas de corrente medidas nas outras linhas. Este método é posteriormente validado com dados de campo, cuja demonstração consta em Thomas *et al.* (2001). O elemento direcional proposto tem o potencial de utilização em métodos de localização de faltas de um terminal baseados na teoria de ondas viajantes, tendo em vista que ele pode distinguir entre as ondas provenientes da linha com falta das ondas provenientes de outras linhas conectadas ao barramento monitorado.

Em Chen *et al.* (2009) é proposta a combinação do método clássico de dois terminais (Tipo D) com o método clássico de um terminal (Tipo A). Um programa é desenvolvido de modo a verificar manualmente se a estimativa do local da falta feita automaticamente utilizando o esquema Tipo D está correta ou se há erro de sincronização via GPS. Sabendo que o esquema Tipo D pode apresentar um erro máximo de 20 km devido a um possível erro de sincronização via GPS, faz-se uma janela de busca manual de modo a encontrar a onda refletida no ponto de falta ou a onda refletida no terminal remoto e refratada no ponto de falta. Através de análise

realizada por funcionário treinado, são obtidos os tempos de chegada das ondas de interesse, resultando em uma nova estimativa do local da falta, corrigindo possíveis erros de sincronização via GPS. Dois exemplos de aplicação real deste método proposto são mostrados, sendo que no primeiro não há erro de sincronização via GPS e no segundo, mostra-se que foi possível corrigir este erro. Uma desvantagem deste método é a falta de automatização e, além disso, a depender da situação, o erro na estimativa do local da falta pode ser da mesma ordem de grandeza do erro devido à imprecisão na sincronização via GPS.

Em Guangbin *et al.* (2013) é proposto um método de localização de faltas de um terminal para linhas que estão inseridas em um sistema que possua caminhos paralelos de retorno, a exemplo de linhas paralelas. Neste método, para contornar o problema da necessidade de detecção da onda viajante refletida na falta, propõe-se detectar a onda refratada no terminal remoto e que retorna pelo caminho composto por linhas sãs. Os autores informam que, no terminal monitorado, dentre as ondas geradas pelo transitório de falta com mesma polaridade da primeira onda incidente, a onda que retorna pelo caminho composto por linhas sãs terá magnitude maior que as outras. A desvantagem deste método é que podem existir topologias no sistema de tal forma que a afirmativa acima não seja verdade, o que pode ocasionar a detecção da onda errada, levando a um grande erro na estimativa do local da falta. Em Zhang *et al.* (2018), a mesma ideia foi utilizada para algoritmos de proteção para linhas paralelas e, portanto sofre da mesma limitação do método de localização de faltas correlato. Visando contornar esta limitação, é sugerido em Zhang *et al.* (2018) implementar o algoritmo de proteção no terminal com maior número de linhas conectadas, podendo esta sugestão ser seguida para o método de localização de faltas correlato.

Em Davydova & Hug (2017) é proposto um novo algoritmo de proteção baseado em ondas viajantes de corrente utilizando dados de apenas um terminal para linhas de transmissão. Destaca-se neste artigo a proposição de um elemento direcional similar ao proposto em Batty *et al.* (1997), porém com uma solução para detectar a direcionalidade quando somente existem dois elementos conectados no barramento da subestação monitorada.

Em Guzmán *et al.* (2018) é apresentado um método de localização de faltas de um terminal com a utilização combinada de duas abordagens, as quais seguem a mesma linha de raciocínio apresentada em Ansell & Pahalawaththa (1994). A abordagem de Repetição dos Tempos de

Chegada das Ondas ou RTT (*Repeating Travel Time*) leva em consideração que as ondas que refletem no ponto de falta o farão várias vezes, ocorrendo o mesmo para as ondas que refletem no terminal remoto e refratam no ponto de falta, retornando ao terminal monitorado. Para cada onda detectada são calculados dois intervalos de tempo em relação à primeira onda detectada, sendo que considera-se na primeira hipótese que se trata da onda refletida no ponto de falta e na segunda hipótese considera-se que se trata da onda refletida no terminal remoto e refratada no ponto de falta. Após isto, cria-se um vetor com todas as diferenças de tempo possíveis entre todas as ondas detectadas. Compara-se os intervalos de tempo deste vetor com os intervalos de tempo considerados nas hipóteses levantadas primeiramente, sendo contado quantas vezes os tempos combinam, levando em conta uma tolerância de  $10 \mu\text{s}$  segundos sugerida. O intervalo de tempo que tiver a maior contagem é o considerado para calcular a localização da falta. A abordagem de Tempos Esperados de Chegada das Ondas ou ETW (*Expected Traveling Wave*) constrói matematicamente vários possíveis padrões de repetição de chegadas de ondas viajantes no terminal local devido à faltas em várias localizações. Com base neste padrão é verificado em qual deles se encaixa o sinal observado durante a falta, sendo a estimativa do local de falta utilizada a associada a este padrão. Utilizando essas duas abordagens e uma formulação apresentada no artigo que leva em consideração o número de vezes em que as ondas atingem os critérios estabelecidos, é possível ordenar as hipóteses dos possíveis locais de falta do mais provável para o menos provável. Testes são apresentados no artigo com simulações e dados de campo, mostrando que o método localizou corretamente as faltas. Este método tem um bom potencial de uso, porém uma limitação sua é que as sucessivas ondas refletidas podem ser atenuadas a ponto de não serem devidamente detectadas, prejudicando a performance do método, mesmo que a falta ocorra em um momento em que ondas viajantes da maior amplitude possível são geradas. Além disso, em uma situação em que existam linhas adjacentes curtas conectadas ao terminal monitorado, que a falta esteja localizada próxima do terminal remoto e que o coeficiente de refração no ponto de falta é pequeno, pode acontecer do método estimar como distância de falta o comprimento da linha adjacente, se tratando do mesmo problema que ocorre quando a onda vinda da linha adjacente é erroneamente classificada como a onda refletida no ponto de falta.

Visando contribuir para o desenvolvimento de métodos de localização de faltas baseados na teoria de ondas viajantes que não necessitem de canais de comunicação e contornem os

problemas acima expostos, propõe-se nesta dissertação método de um terminal para linhas paralelas que possam ser consideradas transpostas e desacopladas. Uma das vantagens desse método é que ele é capaz de localizar a falta sob condições de eliminação rápida do defeito, porém necessita da informação da classificação da falta. Sendo assim, também é proposto neste trabalho um algoritmo que classifica a falta sob condições de eliminação rápida do defeito, de modo que esta vantagem do método de localização de faltas seja mantida. A limitação do método de localização de faltas proposto é que ele necessita ser aplicado a linhas paralelas que possam ser consideradas transpostas e desacopladas, sendo necessárias mais pesquisas no futuro para que todas as limitações aqui expostas sejam superadas.

## 2.5 SÍNTESE DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A síntese da revisão bibliográfica de métodos de localização de faltas baseados na teoria de ondas viajantes utilizando dados de um terminal está apresentada na Tabela 2.1, sendo incluído o método de localização de faltas proposto neste trabalho. Os métodos foram agrupados na tabela de forma a mostrar os caminhos tomados ao longo do tempo para resolução dos principais problemas associados a esta classe de métodos. Comentários sobre esta evolução estão apresentados a seguir.

Os métodos apresentados em Liu *et al.* (2012), Xu & Dong (2014) e Lei *et al.* (2015b), sendo este último o método apresentado em Lei *et al.* (2015a) melhorado, se utilizam das ondas de modo terra para resolver os principais problemas associados a métodos de um terminal. Estes métodos apresentam resultados satisfatórios, mas somente são aplicáveis em faltas que envolvem a terra. Comparados com os métodos que utilizam apenas as ondas de modo aéreo, os que utilizam ondas de modo terra apresentam uma precisão menor devido a maior atenuação e dispersão por distorção das ondas de modo terra e a maior incerteza dos parâmetros terra.

Os métodos apresentados em Kale *et al.* (2012), Spoor & Zhu (2006), Eng & Ramar (2009), Xie *et al.* (2013) e Altay *et al.* (2014) utilizam apenas ondas de modo aéreo, mas somente se preocupam em classificar a segunda frente de onda, ignorando o problema da detecção de ondas provenientes de linhas adjacentes no lugar da onda de interesse. Caso haja linha adjacente conectada no terminal monitorado, estes métodos apresentam um desempenho muito ruim.

Visando resolver os principais problemas associados aos métodos de um terminal utilizando apenas as ondas de modo aéreo foram propostos os métodos apresentados em Xinzhou *et al.* (2002), Xinzhou *et al.* (2008), Zheng *et al.* (2008), Zheng *et al.* (2009), Huang *et al.* (2011) e Schweitzer *et al.* (2016), que utilizam do auxílio de métodos baseados em fasores (componentes fundamentais) de um terminal para detectar corretamente a segunda frente de onda de interesse. No entanto, esta classe de métodos pode apresentar grande imprecisão a depender das condições da falta.

O método proposto em Chen *et al.* (2009) visa suplantar as dificuldades associadas ao método baseado na teoria de ondas viajantes de um terminal que utiliza apenas ondas de modo aéreo associando-o com método baseado na teoria de ondas viajantes de dois terminais. No entanto, devido à análises que necessitam ser feitas, este método não é automático, necessitando de um profissional treinado para estimar o local da falta. Além disso, a depender das condições da falta e da magnitude do erro de sincronismo, a precisão do método pode ser comprometida.

Visando resolver os principais problemas associados aos métodos de um terminal utilizando apenas as ondas de modo aéreo sem depender do auxílio de outros métodos de localização de faltas, foram propostos os métodos apresentados em Ancell & Pahalawaththa (1994) e Guzmán *et al.* (2018), que se utilizam do padrão gerado pelas ondas ao longo do tempo e algoritmos de correlação para estimar o local da falta. Esta classe de método necessita da medição de várias frentes de onda que incidem no terminal monitorado. Como estas ondas se originam de reflexões e refrações da onda originalmente gerada pela falta no sistema, elas podem estar bastante atenuadas a ponto de não serem detectadas ondas suficientes para estabelecer a correlação, prejudicando o desempenho desta classe de métodos.

Visando resolver os principais problemas associados aos métodos de um terminal utilizando apenas as ondas de modo aéreo, sem depender do auxílio de outros métodos de localização de faltas e sem necessitar medir várias frentes de onda que incidem no terminal monitorado, foi proposto em Guangbin *et al.* (2013) método que se utiliza topologia de linhas paralelas para detectar corretamente as frentes de onda de interesse. A desvantagem é que este método se aplica apenas para a topologia de linhas paralelas e pode falhar em algumas situações específicas.

Se baseando no método apresentado em Guangbin *et al.* (2013), foi desenvolvido neste trabalho um novo método, que visa suplantar as principais dificuldades observadas no método

original, se aplicando para linhas paralelas que podem ser consideradas transpostas e desacopladas. O estudo desenvolvido neste trabalho dá um passo adiante no desenvolvimento de método de localização de faltas que supere as principais desvantagens dos métodos apresentados anteriormente e não necessite da topologia de linhas paralelas para ser aplicado. Sugestões que podem ser seguidas para alcançar este objetivo estão apresentadas no Capítulo 7.

**Tabela 2.1.** Resumo da revisão bibliográfica de métodos de localização de faltas baseado na teoria de ondas viajantes utilizando dados de um terminal.

Referência	Característica						
	OT	LA	SO	CF	CO	AT	LP
Liu <i>et al.</i> (2012)	✓	✓	—	—	—	✓	—
Xu & Dong (2014)	✓	✓	—	—	—	✓	—
Lei <i>et al.</i> (2015a)	✓	—	✓	—	—	✓	—
Lei <i>et al.</i> (2015b)	✓	✓	✓	—	—	✓	—
Kale <i>et al.</i> (2012)	—	—	✓	—	—	✓	—
Spoor & Zhu (2006)	—	—	✓	—	—	✓	—
Eng & Ramar (2009)	—	—	✓	—	—	✓	—
Xie <i>et al.</i> (2013)	—	—	✓	—	—	✓	—
Altay <i>et al.</i> (2014)	—	—	✓	—	—	✓	—
Xinzhou <i>et al.</i> (2002)	—	✓	✓	✓	—	✓	—
Xinzhou <i>et al.</i> (2008)	—	✓	✓	✓	—	✓	—
Zheng <i>et al.</i> (2008)	—	✓	✓	✓	—	✓	—
Zheng <i>et al.</i> (2009)	—	✓	✓	✓	—	✓	—
Huang <i>et al.</i> (2011)	—	✓	✓	✓	—	✓	—
Schweitzer <i>et al.</i> (2016)	—	✓	✓	✓	—	✓	—
Chen <i>et al.</i> (2009)	—	✓	✓	—	—	—	—
Ancell & Pahalawaththa (1994)	—	✓	—	—	✓	✓	—
Guzmán <i>et al.</i> (2018)	—	✓	—	—	✓	✓	—
Guangbin <i>et al.</i> (2013)	—	✓	✓	—	—	✓	✓
Método Proposto	—	✓	✓	—	—	✓	✓

**Legenda:**

OT: Utiliza onda de modo terra;

LA: Leva em consideração as linhas adjacentes;

SO: Classifica a segunda frente de onda;

CF: Utiliza auxílio de método baseado em fasores;

CO: Utiliza critério de correlação;

AT: Método automático;

LP: Somente aplicável em linhas paralelas.

**Fonte:** Autoria própria.

# FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DA PROPAGAÇÃO DE ONDAS VIAJANTES EM LINHAS DE TRANSMISSÃO DEVIDO A FALTAS

Neste capítulo serão apresentados os fundamentos teóricos da propagação de ondas viajantes em linhas de transmissão devido a faltas, os quais são utilizados nos métodos de localização de faltas baseados na teoria de ondas viajantes. O enfoque deste capítulo serão as ondas viajantes de corrente, tendo em vista que o método proposto e o método avaliado se utilizam apenas delas para localizar a falta.

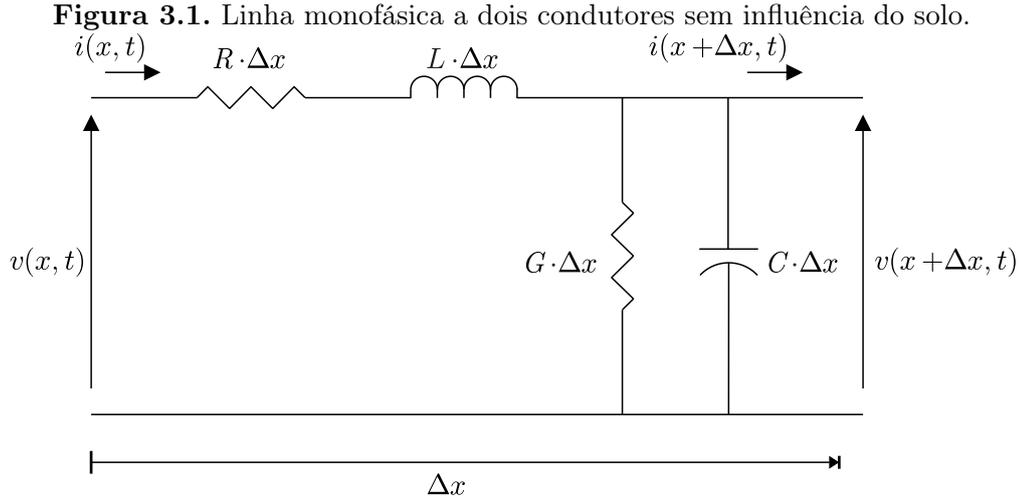
### 3.1 PROPAGAÇÃO DE ONDAS VIAJANTES EM LINHA DE TRANSMISSÃO MONOFÁSICA

Nesta seção serão apresentados os princípios de propagação de ondas viajantes em linhas de transmissão monofásicas. Estes princípios serão utilizados para entender a propagação destas ondas em linhas de transmissão trifásicas.

#### 3.1.1 Modelo da linha de transmissão monofásica a parâmetros distribuídos

Nesta seção será apresentado o modelo de linha de transmissão monofásica considerando o solo ideal (resistividade nula) apresentando em Araújo & Neves (2008). Este modelo é matematicamente igual ao modelo de linha de transmissão monofásica a dois condutores construída com materiais imperfeitos apresentada em Guru & Hiziroglu (2009), no qual o solo é desconsiderado. Dessa forma, para as demonstrações a seguir, considere a linha de transmissão monofásica a dois condutores mostrada na Figura 3.1.

Aplicando a Lei de Kirchhoff das Tensões (LKT) e a Lei de Kirchhoff das Correntes (LKC)



**Fonte:** Adaptado de Guru & Hiziroglu (2009).

(IRWIN; NELMS, 2015) no circuito da Figura 3.1, obtêm-se (3.1) e (3.2), respectivamente.

$$-v(x, t) + R \cdot \Delta x \cdot i(x, t) + L \cdot \Delta x \cdot \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} + v(x + \Delta x, t) = 0 \quad (3.1)$$

$$i(x, t) - i(x + \Delta x, t) - G \cdot \Delta x \cdot v(x + \Delta x, t) - C \cdot \Delta x \cdot \frac{\partial v(x + \Delta x, t)}{\partial t} = 0 \quad (3.2)$$

Reorganizando (3.1) e (3.2) e fazendo o limite de  $\Delta x$  tendendo a zero, obtêm-se (3.3) e (3.4).

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

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

A solução destas equações diferenciais será apresentada conforme abordagem mostrada em Zanetta Júnior (2003) e em Schweitzer *et al.* (2014). Aplicando a Transformada de Laplace em relação à variável  $t$  em (3.3) e em (3.4) e assumindo condições iniciais nulas, definindo a impedância série da linha como sendo  $Z = R + s \cdot L$  e a admitância *shunt* da linha como sendo  $Y = G + s \cdot C$ , obtêm-se (3.5) e (3.6).

$$\frac{\partial V(x, s)}{\partial x} = -Z \cdot I(x, s) \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial I(x, s)}{\partial x} = -Y \cdot V(x, s) \quad (3.6)$$

Define-se uma nova variável, chamada de constante de propagação, como sendo  $\gamma = \sqrt{Z \cdot Y}$  (SCHWEITZER *et al.*, 2014). Substituindo (3.6) na expressão resultante da diferenciação de

(3.5) com relação à variável  $x$ , obtém-se (3.7). Substituindo (3.5) na expressão resultante da diferenciação de (3.6) com relação à variável  $x$ , obtém-se (3.8).

$$\frac{\partial^2 V(x, s)}{\partial x^2} = \gamma^2 \cdot V(x, s) \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial^2 I(x, s)}{\partial x^2} = \gamma^2 \cdot I(x, s) \quad (3.8)$$

A solução geral para as equações diferenciais representadas por (3.7) e por (3.8) é dada por (SIMMONS, 1991), conforme apresentado em (3.9) e (3.10).

$$V(x, s) = Z_{car}(s)F_1(s)e^{-\gamma x} + Z_{car}(s)F_2(s)e^{\gamma x} \quad (3.9)$$

$$I(x, s) = F_1(s)e^{-\gamma x} - F_2(s)e^{\gamma x} \quad (3.10)$$

O valor de  $Z_{car}(s)$  pode ser deduzido aplicando as soluções em (3.5) ou em (3.6), obtendo a impedância característica da linha de transmissão, dada por (3.11) (SCHWEITZER *et al.*, 2014). Usualmente a impedância característica  $Z_{car}(s)$  aparece na equação de corrente (SCHWEITZER *et al.*, 2014) (ZANETTA JÚNIOR, 2003), porém neste trabalho optou-se por incluí-la na equação de tensão, o que evidencia as ondas de corrente sem alterar a solução.

$$Z_{car}(s) = \sqrt{\frac{Z}{Y}} \quad (3.11)$$

Para obter a solução no domínio do tempo é necessário aplicar a Inversa da Transformada de Laplace em (3.9) e em (3.10). Para que isto seja possível, uma análise no domínio da frequência para os parâmetros da linha é feita, bastando para tal fazer a parte real do operador  $s$  nula, ou seja, fazer  $s = j \cdot \omega$  (OGATA, 2001). Aplicando este conceito, é possível separar a parte real da imaginária da constante de propagação  $\gamma$ , pois  $\gamma = \sqrt{(R + j \cdot \omega \cdot L)(G + j \cdot \omega \cdot C)}$ , sendo  $\gamma = a + j \cdot b$ , onde  $a$  é a constante de atenuação e  $b$  é a constante de fase (SCHWEITZER *et al.*, 2014). Definindo a velocidade de propagação conforme (3.12), sendo o seu sentido físico explicado adiante, obtém-se (3.13) e (3.14).

$$v_p = \frac{\omega}{b} \quad (3.12)$$

$$V(x, s) = Z_{car}(s)F_1(s)e^{-ax}e^{-s\frac{x}{v_p}} + Z_{car}(s)F_2(s)e^{ax}e^{s\frac{x}{v_p}} \quad (3.13)$$

$$I(x, s) = F_1(s)e^{-ax}e^{-s\frac{x}{v_p}} - F_2(s)e^{ax}e^{s\frac{x}{v_p}} \quad (3.14)$$

Aplicando a Inversa da Transformada de Laplace em (3.13) e em (3.14), obtêm-se (3.15) e (3.16), sendo  $u$  a representação do degrau unitário.

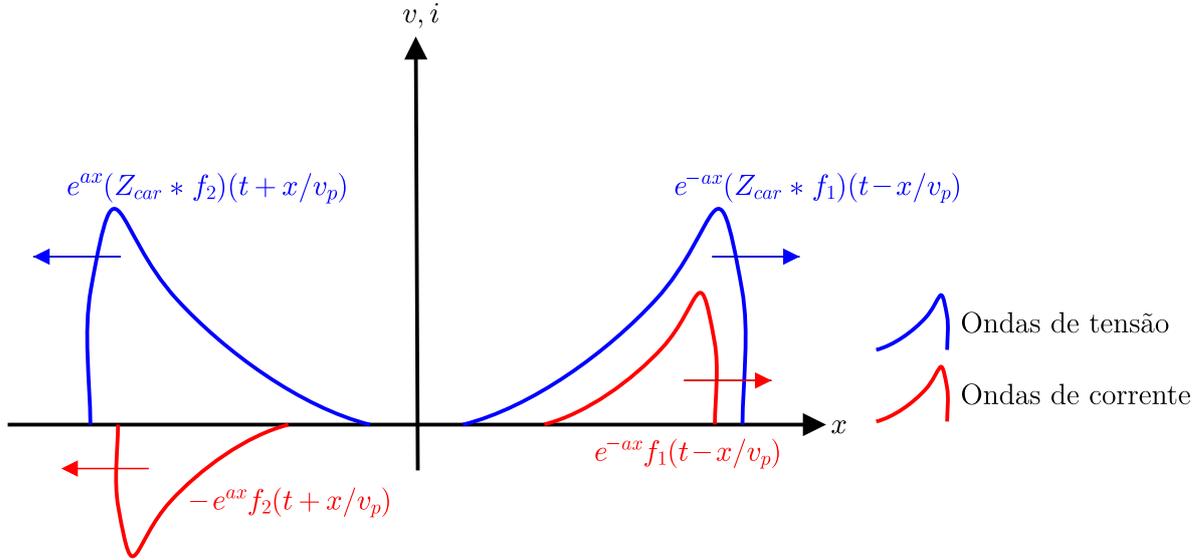
$$v(x, t) = (Z_{car} * f_1) \left( t - \frac{x}{v_p} \right) u \left( t - \frac{x}{v_p} \right) e^{-ax} + (Z_{car} * f_2) \left( t + \frac{x}{v_p} \right) u \left( t + \frac{x}{v_p} \right) e^{ax} \quad (3.15)$$

$$i(x, t) = f_1 \left( t - \frac{x}{v_p} \right) u \left( t - \frac{x}{v_p} \right) e^{-ax} - f_2 \left( t + \frac{x}{v_p} \right) u \left( t + \frac{x}{v_p} \right) e^{ax} \quad (3.16)$$

O significado físico da primeira parcela de (3.15) e da primeira parcela de (3.16) são ondas de tensão e corrente, respectivamente, viajando no sentido positivo de  $x$  a uma velocidade  $v_p$  e com atenuação exponencial conforme a onda avança no sentido positivo de  $x$ , sendo chamadas de ondas progressivas ( $V^+(x, s)$  e  $I^+(x, s)$  no domínio de laplace). De maneira similar, o significado físico da segunda parcela de (3.15) e da segunda parcela de (3.16) são ondas de tensão e corrente, respectivamente, viajando no sentido negativo de  $x$  a uma velocidade  $v_p$  e com atenuação exponencial conforme a onda avança no sentido negativo de  $x$ , sendo chamadas de ondas regressivas ( $V^-(x, s)$  e  $I^-(x, s)$  no domínio de laplace). O sinal negativo antes da segunda parcela de (3.16) indica que a onda de corrente regressiva tem o seu sinal invertido em relação à onda de corrente progressiva, quando se considera a mesma referência de corrente. A Figura 3.2 mostra graficamente a solução das equações de onda da linha de transmissão monofásica. As ondas de tensão e corrente que se propagam na linha de transmissão são sempre proporcionais entre si pela razão da impedância característica, conforme mostrado em (3.17), onde o sinal depende da direção da corrente em relação ao referencial adotado e se as ondas são progressivas ou regressivas.

$$V^\pm(x, s) = \pm Z_{car}(s) I^\pm(x, s) \quad (3.17)$$

As perdas na linha de transmissão são representadas matematicamente como uma atenuação exponencial nas ondas que se propagam na linha. Esta atenuação é dependente da frequência da onda que trafega pela linha, tendo em vista que a variável  $a$  depende de  $\omega$ . Já a velocidade de propagação depende da frequência da onda que se propaga na linha de transmissão, tanto pelo fato da variável  $\omega$  aparecer diretamente na expressão que define  $v_p$ , como pelo fato da variável  $b$  depender de  $\omega$ . Alia-se a isto o fato de que os próprios parâmetros por unidade de comprimento das linhas de transmissão variam com a frequência do sinal que se propaga na linha (MARTI, 1982).

**Figura 3.2.** Ondas viajantes em uma linha monofásica com perdas.**Fonte:** Autoria própria.

Para a aplicação de localização de faltas considera-se a velocidade de propagação constante (SCHWEITZER *et al.*, 2014), pois as ondas viajantes se apresentam como fenômenos de alta frequência (SAHA *et al.*, 2010), fazendo com que possa ser considerado que  $\gamma = j\omega\sqrt{L \cdot C}$ , pois  $\omega L \gg R$  e  $\omega C \gg G$ , o que resulta na expressão de velocidade de propagação (3.18), que é equivalente à velocidade de propagação de uma linha sem perdas. Para obter esta velocidade ou se faz uma medição da velocidade de propagação em um teste de energização de linha ou calcula-se utilizando (3.18). Pelas mesmas razões, utiliza-se a impedância de surto da linha de transmissão nos métodos de localização da faltas, calculada conforme (3.19), ao invés da impedância característica.

$$v_{sp} = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \quad (3.18)$$

$$Z_s = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (3.19)$$

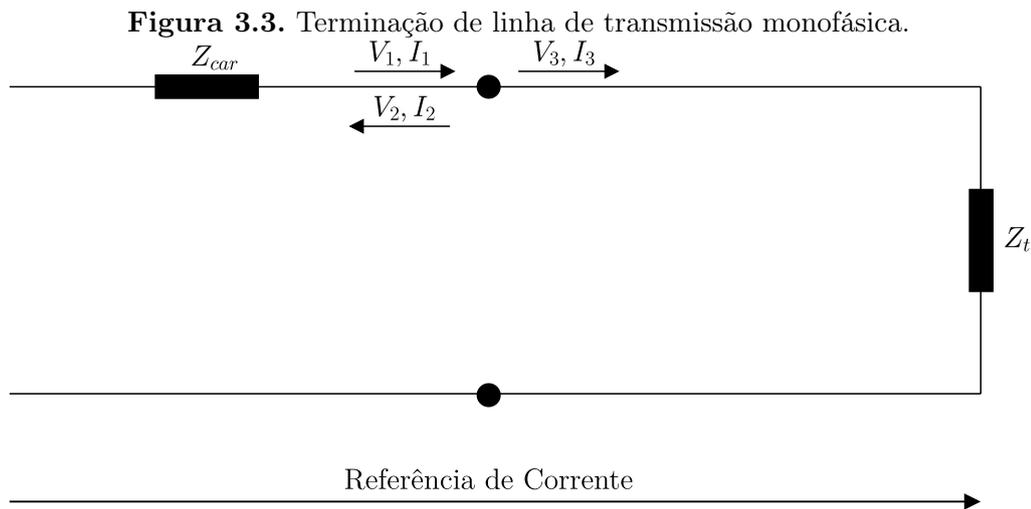
### 3.1.2 Reflexão e refração das ondas

A solução da equação de onda apresentada na Seção 3.1.1 descreve a propagação de ondas em linhas de transmissão monofásicas, sendo que a relação entre tensão e corrente é constante e igual à impedância característica. No entanto, quando as ondas que se propagam ao longo de uma linha atingem uma descontinuidade, a relação entre tensão e corrente deve ser igual à impedância característica da linha e também igual à impedância do sistema que está ligado à

linha neste ponto. Para que esta condição seja satisfeita, ocorre o fenômeno físico da reflexão e refração de ondas. Neste fenômeno, parte da onda incidente na descontinuidade será refletida de volta para a linha e outra parte será refratada para o sistema a jusante. Este entendimento físico acima explanado e as demonstrações mostradas nesta seção foram baseadas no trabalho de Greenwood (1991).

### 3.1.2.1 Coeficientes em terminações

Considere que uma onda propagando-se em uma linha de transmissão com impedância característica  $Z_{car}$  chega a um ponto de descontinuidade, caracterizado pela junção da linha de transmissão monofásica com uma impedância  $Z_t$ , conforme indicado na Figura 3.3.



**Fonte:** Autoria própria.

Denomina-se as ondas incidentes de tensão e corrente de  $V_1$  e  $I_1$ , respectivamente. Como a onda incidente trafega na linha de transmissão com impedância característica  $Z_{car}$ , então a relação apresentada em (3.20) é válida.

$$V_1 = Z_{car} I_1 \quad (3.20)$$

Assume-se a existência de ondas refletidas de tensão e corrente chamadas de  $V_2$  e  $I_2$ , respectivamente. Sabendo que elas trafegam na linha de transmissão com impedância característica  $Z_{car}$  e que esta onda de corrente é regressiva, a relação apresentada em (3.21) é válida.

$$V_2 = -Z_{car} I_2 \quad (3.21)$$

Assume-se que parte das ondas refratarão para a terminação de impedância  $Z_t$ . Chamando estas ondas de tensão e corrente de  $V_3$  e  $I_3$ , respectivamente, tem-se a relação apresentada em (3.22).

$$V_3 = Z_t I_3 \quad (3.22)$$

Para que a continuidade da tensão e corrente sejam respeitadas, a LKT e a LKC no ponto de junção devem permanecer válidas. Sabendo que as ondas incidentes e refletidas estão sobrepostas na linha de transmissão, pode-se deduzir (3.23) e (3.24).

$$V_1 + V_2 = V_3 \quad (3.23)$$

$$I_1 + I_2 = I_3 \quad (3.24)$$

Substituindo (3.20), (3.21) e (3.22) em (3.23) e, posteriormente, substituindo (3.24) na expressão obtida e reorganizando-a, obtêm-se (3.25). Em (3.25) é definido o coeficiente de reflexão  $\rho_i$ , pois ele é um valor que multiplicado pela onda de corrente incidente resulta na onda de corrente refletida.

$$I_2 = \rho_i I_1 \rightarrow \rho_i = \frac{Z_{car} - Z_t}{Z_{car} + Z_t} \quad (3.25)$$

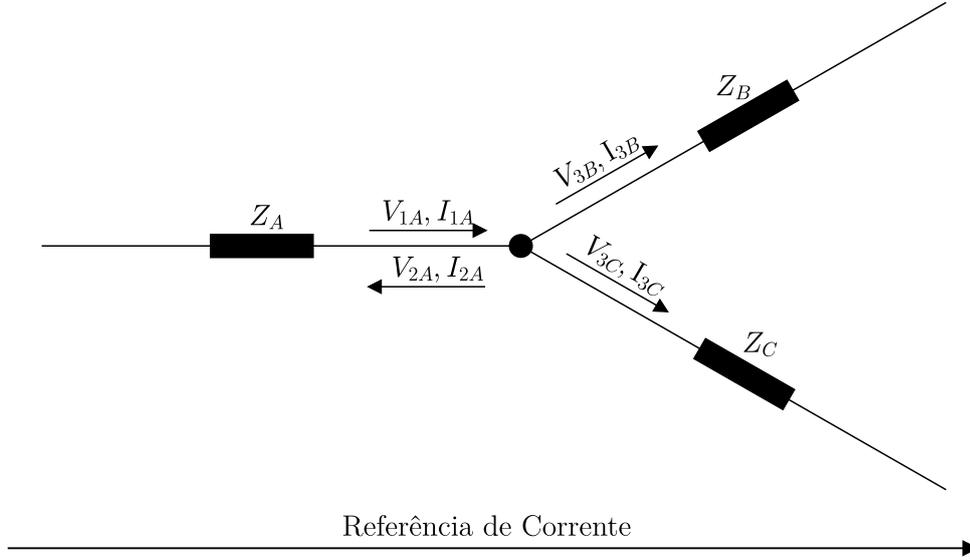
De (3.24), sabe-se que  $I_2 = I_1 - I_3$ . Substituindo em (3.26) e reorganizando obtêm-se (3.26). Em (3.26) é definido o coeficiente de refração  $\Gamma_i$ , pois ele é um valor que multiplicado pela onda de corrente incidente resulta na onda de corrente refratada.

$$I_3 = \Gamma_i I_1 \rightarrow \Gamma_i = (1 + \rho_i) = \frac{2Z_{car}}{Z_{car} + Z_t} \quad (3.26)$$

### 3.1.2.2 Coeficientes em junção com três ou mais elementos

Considere uma junção onde a linha de transmissão com impedância característica  $Z_A$ , de onde provêm as ondas de tensão e corrente, se ramifica nas terminações  $Z_B$  e  $Z_C$ , conforme Figura 3.4.

Pela Figura 3.4, as ondas incidentes de tensão e corrente são  $V_{1A}$  e  $I_{1A}$ , respectivamente. As ondas refletidas de tensão e corrente são  $V_{2A}$  e  $I_{2A}$ , respectivamente. As ondas refratadas de tensão e corrente para o ramo  $B$  são  $V_{3B}$  e  $I_{3B}$ , respectivamente. As ondas refratadas de tensão e corrente para o ramo  $C$  são  $V_{3C}$  e  $I_{3C}$ , respectivamente. Sabendo disto e que a onda

**Figura 3.4.** Ponto de junção no terminal de linha de transmissão monofásica.**Fonte:** Adaptado de Greenwood (1991).

de corrente refletida é regressiva, pode-se deduzir (3.27), (3.28), (3.29) e (3.30).

$$V_{1A} = Z_A I_{1A} \quad (3.27)$$

$$V_{2A} = -Z_A I_{2A} \quad (3.28)$$

$$V_{3B} = Z_B I_{3B} \quad (3.29)$$

$$V_{3C} = Z_C I_{3C} \quad (3.30)$$

Para que a continuidade da tensão e corrente sejam respeitadas, a LKT e a LKC no ponto de junção devem permanecer válidas. Sabendo que as ondas incidentes e refletidas estão sobrepostas na linha de transmissão, podemos deduzir (3.31) e (3.32).

$$V_{1A} + V_{2A} = V_{3B} = V_{3C} \quad (3.31)$$

$$I_{1A} + I_{2A} = I_{3B} + I_{3C} \quad (3.32)$$

Substituindo (3.27), (3.28), (3.29) e (3.30) em (3.31), obtêm-se:

$$Z_A I_{1A} - Z_A I_{2A} = Z_B I_{3B} = Z_C I_{3C} \quad (3.33)$$

Sabe-se que o equivalente do paralelo de duas admitâncias é a soma algébrica de cada admitância, sendo a admitância definida como o inverso da impedância (IRWIN; NELMS, 2015).

Dessa forma, define-se a expressão (3.34), que será utilizada para a definição dos coeficientes que serão mostrados adiante.

$$\frac{1}{Z_{eq}} = \frac{1}{Z_B} + \frac{1}{Z_C} \quad (3.34)$$

De (3.33), chega-se a conclusão que  $I_{3B} = \frac{Z_C}{Z_B} I_{3C}$  ou  $I_{3C} = \frac{Z_B}{Z_C} I_{3B}$ . Substituindo em (3.32) e depois manipulando a equação obtida e substituindo em (3.33), pode-se manipular o resultado obtido de modo a chegar em (3.35), (3.36) e (3.37). Em (3.35) é definido o coeficiente de reflexão  $\rho_{ig}$ , pois ele é um valor que multiplicado pela onda de corrente incidente resulta na onda de corrente refletida. De forma similar, em (3.36) e em (3.37), são definidos os coeficientes de refração  $\Gamma_{igB}$  e  $\Gamma_{igC}$ , pois são valores que multiplicados pela onda de corrente incidente resultam na onda de corrente refratada para o ramo B e para o ramo C, respectivamente.

$$I_{2A} = \rho_{ig} I_{1A} \rightarrow \rho_{ig} = \frac{Z_A - Z_{eq}}{Z_A + Z_{eq}} \quad (3.35)$$

$$I_{3B} = \Gamma_{igB} I_{1A} \rightarrow \Gamma_{igB} = \frac{Z_{eq}}{Z_B} \Gamma_{ig} \rightarrow \Gamma_{ig} = \frac{2Z_A}{Z_A + Z_{eq}} \quad (3.36)$$

$$I_{3C} = \Gamma_{igC} I_{1A} \rightarrow \Gamma_{igC} = \frac{Z_{eq}}{Z_C} \Gamma_{ig} \rightarrow \Gamma_{ig} = \frac{2Z_A}{Z_A + Z_{eq}} \quad (3.37)$$

Todas deduções realizadas nesta seção podem ser feitas para junções com quantas ramificações se queiram, sendo obtidas as mesmas expressões para os coeficientes de reflexão e refração, com a diferença de que o valor de  $Z_{eq}$  a ser utilizado é o obtido através da associação em paralelo das impedâncias dos ramos conectados à linha no ponto de junção.

### 3.1.2.3 Comportamento em terminações puramente capacitiva e puramente indutiva

Será analisado nesta seção o formato das ondas de corrente refletidas e refratadas quando as onda que se propagam em uma linha de transmissão monofásica atingem terminações puramente capacitiva e puramente indutiva. A análise se baseou no trabalho de Greenwood (1991) e se restringirá ao caso onde as ondas de corrente incidentes têm a forma de um degrau, pois esta é a forma de onda gerada pelas faltas (JOHNS; SALMAN, 1995).

Para fazer a análise, chama-se a onda incidente de  $I_1^C$  e  $I_1^L$ , a onda de corrente refletida de  $I_2^C$  e  $I_2^L$  e a onda de corrente refratada de  $I_3^C$  e  $I_3^L$ , sendo que o sobrescrito  $C$  representa o caso de

terminação capacitiva e o sobrescrito  $L$  representa o caso de terminação indutiva. Admite-se que a onda incidente é a função degrau unitário multiplicada por  $I_D$  e que as terminações capacitiva e indutiva com capacitância e indutância  $C_t$  e  $L_t$ , respectivamente, possuem a impedância no domínio de laplace iguais a  $\frac{1}{s \cdot C_t}$  e  $s \cdot L_t$ , respectivamente. A partir destas premissas e (3.25) e (3.26), obtêm-se a onda refletida e a onda refratada em função da onda incidente no domínio de laplace, conforme (3.38), (3.39), (3.40) e (3.41).

$$I_2^C(s) = \frac{s - \tau_C}{s + \tau_C} \frac{I_D}{s} \rightarrow \tau_C = \frac{1}{Z_{car} C_t} \quad (3.38)$$

$$I_3^C(s) = \frac{2}{s + \tau_C} I_D \rightarrow \tau_C = \frac{1}{Z_{car} C_t} \quad (3.39)$$

$$I_2^L(s) = \frac{\tau_L - s}{\tau_L + s} \frac{I_D}{s} \rightarrow \tau_L = \frac{Z_{car}}{L_t} \quad (3.40)$$

$$I_3^L(s) = \frac{2\tau_L}{\tau_L + s} \frac{I_D}{s} \rightarrow \tau_L = \frac{Z_{car}}{L_t} \quad (3.41)$$

Para obter as respostas no tempo apresentadas em (3.42), (3.43), (3.44), (3.45) aplica-se a transformada inversa de laplace em (3.38), (3.39), (3.40) e (3.41), respectivamente, sendo necessário, no primeiro e no terceiro caso, utilizar o recurso da expansão em frações parciais em um passo intermediário (OGATA, 2001).

$$i_2^C(t) = (2e^{-\tau_C t} - 1) I_D \quad (3.42)$$

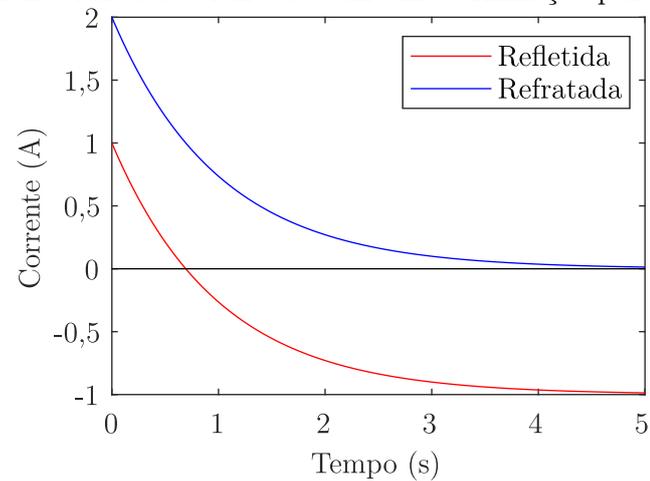
$$i_3^C(t) = 2 \cdot e^{-\tau_C t} \cdot I_D \quad (3.43)$$

$$i_2^L(t) = (1 - 2e^{-\tau_L t}) I_D \quad (3.44)$$

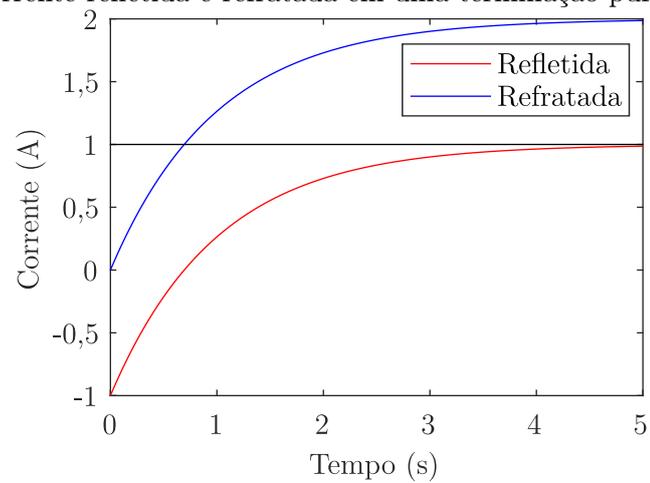
$$i_3^L(t) = 2(1 - e^{-\tau_L t}) I_D \quad (3.45)$$

Os gráficos das Figuras 3.5 e 3.6 representam a corrente refletida  $i_2$  e a corrente refratada  $i_3$  em função do tempo  $t$  para os casos de terminação capacitiva e indutiva, respectivamente. Foi considerado o valor de 1 segundo para  $\tau_C$  e  $\tau_L$  e um valor de 1 Ampere para  $I_D$ . Pode-se verificar, por (3.42), (3.43), (3.44) e (3.45), que a velocidade de decaimento da corrente depende das constantes de tempo, decaindo mais rápido quando maior for esta constante.

Comparando o comportamento das curvas das Figuras 3.5 e 3.6 com (3.25) e (3.26), percebe-se que tanto do ponto de vista da reflexão de corrente como do ponto de vista da refração de corrente, as terminações puramente capacitivas se comportam inicialmente como curto-circuito e após passado um tempo suficientemente longo em relação à constante de tempo

**Figura 3.5.** Corrente refletida e refratada em uma terminação puramente capacitiva.

**Fonte:** Autoria própria.

**Figura 3.6.** Corrente refletida e refratada em uma terminação puramente indutiva.

**Fonte:** Autoria própria.

$\tau_C$ , se comportam como circuito aberto, enquanto que as terminações puramente indutivas se comportam inicialmente como circuito aberto e após passado um tempo suficientemente longo em relação à constante de tempo  $\tau_L$ , se comportam como curto-circuito.

## 3.2 PROPAGAÇÃO DE ONDAS VIAJANTES EM LINHA DE TRANSMISSÃO TRIFÁSICA

### 3.2.1 Modelo de linha de transmissão trifásica a parâmetros distribuídos

Na Seção 3.1 foram apresentados os fundamentos básicos da propagação de ondas em linhas de transmissão monofásicas. No entanto, os sistemas de transmissão em corrente alternada de grande potência utilizados no mundo são trifásicos, necessitando ser objeto de estudo (GRAINGER; STEVENSON JR., 1994). Dessa forma, será apresentado a seguir o modelo das linhas de transmissão trifásicas, que será o efetivamente utilizado na elaboração dos algoritmos de classificação e localização de faltas e dos testes que serão realizados ao longo deste trabalho. A compreensão do modelo de linhas de transmissão monofásicas apresentado na Seção 3.1 é fundamental para avançar na leitura do modelo de linhas de transmissão trifásicas.

Considere a linha de transmissão trifásica mostrada na Figura 3.7. Os parâmetros da linha mostrados na Figura 3.7 podem ser obtidos conforme método reportado na literatura (CARSON, 1926; GLOVER *et al.*, 2017).

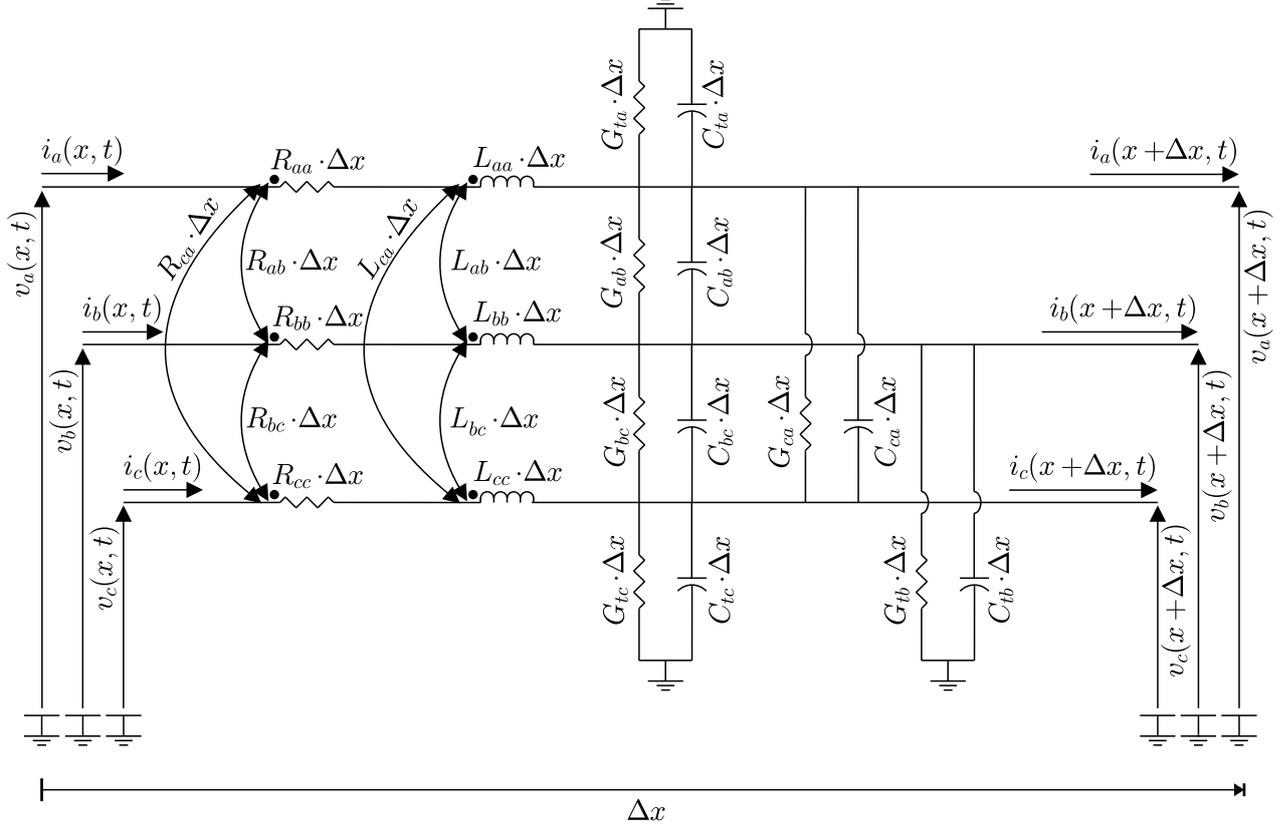
Aplicando a LKT e a LKC na fase A do circuito da Figura 3.7, obtém-se (3.46) e (3.47), respectivamente.

$$\begin{aligned} -v_a(x, t) + R_{aa} \cdot \Delta x \cdot i_a(x, t) + L_{aa} \cdot \Delta x \cdot \frac{\partial i_a(x, t)}{\partial t} + R_{ab} \cdot \Delta x \cdot i_b(x, t) + L_{ab} \cdot \Delta x \cdot \frac{\partial i_b(x, t)}{\partial t} \\ + R_{ca} \cdot \Delta x \cdot i_c(x, t) + L_{ca} \cdot \Delta x \cdot \frac{\partial i_c(x, t)}{\partial t} + v_a(x + \Delta x, t) = 0 \end{aligned} \quad (3.46)$$

$$\begin{aligned} i_a(x, t) - i_a(x + \Delta x, t) - G_{ta} \cdot \Delta x \cdot v_a(x + \Delta x, t) - C_{ta} \cdot \Delta x \cdot \frac{\partial v_a(x + \Delta x, t)}{\partial t} \\ - G_{ab} \cdot \Delta x \cdot [v_a(x + \Delta x, t) - v_b(x + \Delta x, t)] - C_{ab} \cdot \Delta x \cdot \frac{\partial [v_a(x + \Delta x, t) - v_b(x + \Delta x, t)]}{\partial t} \\ - G_{ca} \cdot \Delta x \cdot [v_a(x + \Delta x, t) - v_c(x + \Delta x, t)] - C_{ca} \cdot \Delta x \cdot \frac{\partial [v_a(x + \Delta x, t) - v_c(x + \Delta x, t)]}{\partial t} = 0 \end{aligned} \quad (3.47)$$

Reorganizando (3.46) e (3.47) e fazendo o limite de  $\Delta x$  tendendo a zero, obtém-se (3.48) e

Figura 3.7. Modelo da linha de transmissão trifásica a parâmetros distribuídos.



Fonte: Adaptado de Zanetta Júnior (2003).

(3.49).

$$\frac{\partial v_a(x, t)}{\partial x} = -R_{aa}i_a(x, t) - L_{aa}\frac{\partial i_a(x, t)}{\partial t} - R_{ab}i_b(x, t) - L_{ab}\frac{\partial i_b(x, t)}{\partial t} - R_{ca}i_c(x, t) - L_{ca}\frac{\partial i_c(x, t)}{\partial t} \quad (3.48)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial i_a}{\partial x} = & -(G_{ta} + G_{ab} + G_{ca})v_a(x, t) - (C_{ta} + C_{ab} + C_{ca})\frac{\partial v_a(x, t)}{\partial t} + G_{ab}v_b(x, t) + C_{ab}\frac{\partial v_b(x, t)}{\partial t} \\ & + G_{ca}v_c(x, t) + C_{ca}\frac{\partial v_c(x, t)}{\partial t} \end{aligned} \quad (3.49)$$

Equações semelhantes podem ser deduzidas aplicando a LKT e a LKC nas fases B e C do circuito da Figura 3.7. Estas equações, juntamente com (3.48) e (3.49) podem ser escritas em forma matricial, conforme apresentado (3.50) e (3.51), onde as seguintes variáveis auxiliares são definidas:  $G_{aa} = -(G_{ta} + G_{ab} + G_{ca})$ ,  $C_{aa} = -(C_{ta} + C_{ab} + C_{ca})$ ,  $G_{bb} = -(G_{tb} + G_{ab} + G_{bc})$ ,  $C_{bb} = -(C_{tb} + C_{ab} + C_{bc})$ ,  $G_{cc} = -(G_{tc} + G_{bc} + G_{ca})$  e  $C_{cc} = -(C_{tc} + C_{bc} + C_{ca})$ .

$$-\frac{\partial}{\partial x} \begin{bmatrix} v_a(x, t) \\ v_b(x, t) \\ v_c(x, t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{aa} & R_{ab} & R_{ca} \\ R_{ab} & R_{bb} & R_{bc} \\ R_{ca} & R_{bc} & R_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a(x, t) \\ i_b(x, t) \\ i_c(x, t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ca} \\ L_{ab} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{bc} & L_{cc} \end{bmatrix} \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} i_a(x, t) \\ i_b(x, t) \\ i_c(x, t) \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

$$-\frac{\partial}{\partial x} \begin{bmatrix} i_a(x, t) \\ i_b(x, t) \\ i_c(x, t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{aa} & G_{ab} & G_{ca} \\ G_{ab} & G_{bb} & G_{bc} \\ G_{ca} & G_{bc} & G_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a(x, t) \\ v_b(x, t) \\ v_c(x, t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{aa} & C_{ab} & C_{ca} \\ C_{ab} & C_{bb} & C_{bc} \\ C_{ca} & C_{bc} & C_{cc} \end{bmatrix} \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} v_a(x, t) \\ v_b(x, t) \\ v_c(x, t) \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

Analisando (3.50) e (3.51), verifica-se que as grandezas das três fases da linha estão acopladas entre si, tornando este conjunto de equações diferenciais de difícil solução. Para simplificar a solução deste problema pode ser aplicada uma transformação linear capaz de diagonalizar as matrizes mostradas em (3.50) e (3.51), criando novas variáveis que são desacopladas entre si. Este tipo de transformação linear é denominado de transformação modal (ZANETTA JÚNIOR, 2003). No caso da linhas de transmissão trifásicas transpostas é possível diagonalizar as matrizes utilizando a Transformada de Clarke (CLARKE, 1943; ZANETTA JÚNIOR, 2003; SCHWEITZER *et al.*, 2014). A Transformada de Clarke ainda pode ser referenciada nas fases A, B ou C (SCHWEITZER *et al.*, 2014), sendo que as suas matrizes são definidas conforme mostrado a seguir, com as seguintes notações  $\mathbf{M}_{CA}$ ,  $\mathbf{M}_{CB}$  e  $\mathbf{M}_{CC}$ , respectivamente.

$$\mathbf{M}_{CA} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.52)$$

$$\mathbf{M}_{CB} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} -1 & 2 & -1 \\ -\sqrt{3} & 0 & \sqrt{3} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.53)$$

$$\mathbf{M}_{CC} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} -1 & -1 & 2 \\ \sqrt{3} & -\sqrt{3} & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.54)$$

Define-se como  $\mathbf{M}$  a transformada modal genérica que transforma grandezas no domínio de fases ( $abc$ ) para o domínio modal ( $\alpha\beta 0$ ), sendo válidas as seguintes relações:

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (3.55)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3.56)$$

Em uma linha de transmissão trifásica transposta, as expressões descritas em (3.50) e em (3.51) apresentam a forma mostrada em (3.57) e em (3.58) (ZANETTA JÚNIOR, 2003).

$$-\frac{\partial}{\partial x} \begin{bmatrix} v_a(x, t) \\ v_b(x, t) \\ v_c(x, t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_p & R_m & R_m \\ R_m & R_p & R_m \\ R_m & R_m & R_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a(x, t) \\ i_b(x, t) \\ i_c(x, t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_p & L_m & L_m \\ L_m & L_p & L_m \\ L_m & L_m & L_p \end{bmatrix} \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} i_a(x, t) \\ i_b(x, t) \\ i_c(x, t) \end{bmatrix} \quad (3.57)$$

$$-\frac{\partial}{\partial x} \begin{bmatrix} i_a(x,t) \\ i_b(x,t) \\ i_c(x,t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_p & G_m & G_m \\ G_m & G_p & G_m \\ G_m & G_m & G_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a(x,t) \\ v_b(x,t) \\ v_c(x,t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_p & C_m & C_m \\ C_m & C_p & C_m \\ C_m & C_m & C_p \end{bmatrix} \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} v_a(x,t) \\ v_b(x,t) \\ v_c(x,t) \end{bmatrix} \quad (3.58)$$

Em linhas de transmissão trifásicas transpostas, após aplicação da transformação modal, as matrizes presentes em (3.57) e em (3.58) são diagonalizadas. Ainda é possível demonstrar que as matrizes diagonalizadas são únicas, independentemente da transformação modal utilizada para a sua diagonalização (ZANETTA JÚNIOR, 2003). Dessa forma, o sistema de equações diferenciais composto por (3.57) e (3.58) é transformado no sistema de equações diferenciais composto por (3.59) e (3.60).

$$-\frac{\partial}{\partial x} \begin{bmatrix} v_\alpha(x,t) \\ v_\beta(x,t) \\ v_0(x,t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_\alpha & 0 & 0 \\ 0 & R_\beta & 0 \\ 0 & 0 & R_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha(x,t) \\ i_\beta(x,t) \\ i_0(x,t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_\alpha & 0 & 0 \\ 0 & L_\beta & 0 \\ 0 & 0 & L_0 \end{bmatrix} \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} i_\alpha(x,t) \\ i_\beta(x,t) \\ i_0(x,t) \end{bmatrix} \quad (3.59)$$

$$-\frac{\partial}{\partial x} \begin{bmatrix} i_\alpha(x,t) \\ i_\beta(x,t) \\ i_0(x,t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_\alpha & 0 & 0 \\ 0 & G_\beta & 0 \\ 0 & 0 & G_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha(x,t) \\ v_\beta(x,t) \\ v_0(x,t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_\alpha & 0 & 0 \\ 0 & C_\beta & 0 \\ 0 & 0 & C_0 \end{bmatrix} \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} v_\alpha(x,t) \\ v_\beta(x,t) \\ v_0(x,t) \end{bmatrix} \quad (3.60)$$

Verifica-se em (3.59) e em (3.60) que os modos  $\alpha$ ,  $\beta$  e 0 estão desacoplados entre si, podendo aplicar-se as mesmas soluções apresentadas para linhas monofásicas individualmente para cada modo. As ondas viajantes associadas aos modos  $\alpha$  e  $\beta$  se propagam na mesma velocidade e apresentam impedâncias características iguais. Assim, os modos  $\alpha$  e  $\beta$  são denominados de modo aéreo e o modo 0 é denominado de modo terra (SPOOR; ZHU, 2006; ARAÚJO; NEVES, 2008; SCHWEITZER *et al.*, 2014). A interpretação física das ondas de modo aéreo e terra são de ondas que circulam entre condutores e ondas que circulam entre condutores e terra, respectivamente (ARAÚJO; NEVES, 2008). Para linhas aéreas, a velocidade de propagação de modo terra sempre é menor que a velocidade de propagação de modo aéreo, a impedância de surto do modo terra sempre é maior que a impedância de surto do modo aéreo e a atenuação do modo terra sempre é maior que a atenuação do modo aéreo (ARAÚJO; NEVES, 2008; SCHWEITZER *et al.*, 2014; KASZTENNY *et al.*, 2016).

### 3.2.2 Relações das componentes de fase das ondas viajantes em linhas trifásicas

Na Seção 3.2.1, foi demonstrada a existência de ondas viajantes no domínio modal, podendo ser deduzido (3.61), onde  $Z_\alpha$  é a impedância característica para o modo aéreo  $\alpha$ ,  $Z_\beta$  é a impedância característica para o modo aéreo  $\beta$  e  $Z_0$  é a impedância característica para o modo

terra. Sabe-se que para linhas transpostas  $Z_\beta = Z_\alpha$ , pois os parâmetros associados aos modos  $\alpha$  e  $\beta$  são iguais entre si (ZANETTA JÚNIOR, 2003), sendo esta premissa representada em (3.61).

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_\alpha & 0 & 0 \\ 0 & Z_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & Z_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (3.61)$$

É possível obter a relação das componentes de fase das ondas viajantes aplicando (3.55) e (3.56) em (3.61), obtendo (3.62).

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \mathbf{M}^{-1} \begin{bmatrix} Z_\alpha & 0 & 0 \\ 0 & Z_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & Z_0 \end{bmatrix} \mathbf{M} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3.62)$$

É possível demonstrar que para qualquer transformação modal genérica  $\mathbf{M}$ , a matriz resultante que relaciona as componentes de fase das ondas viajantes é única, sendo apresentada em (3.63) (ZANETTA JÚNIOR, 2003).

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} Z_0 + 2Z_\alpha & Z_0 - Z_\alpha & Z_0 - Z_\alpha \\ Z_0 - Z_\alpha & Z_0 + 2Z_\alpha & Z_0 - Z_\alpha \\ Z_0 - Z_\alpha & Z_0 - Z_\alpha & Z_0 + 2Z_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3.63)$$

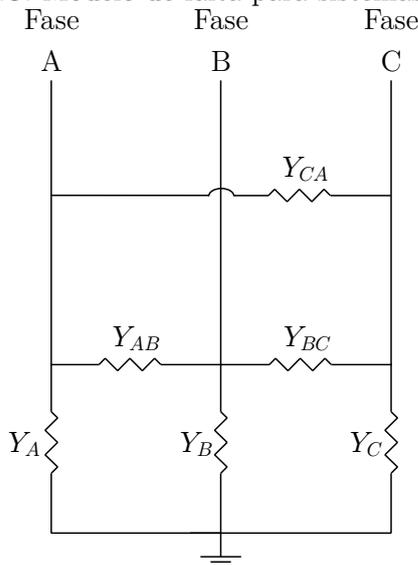
### 3.2.3 Modelo de falta para linhas trifásicas

O modelo de falta utilizado será o da Figura 3.8, que se trata do modelo apresentado em Anderson (1973), com simplificações.

A matriz admitância do ramo de falta é apresentada abaixo, sendo ela obtida a partir da Figura 3.8, observando a metodologia apresentada em Anderson (1973).

$$\mathbf{Y}_F = \begin{bmatrix} Y_A + Y_{AB} + Y_{CA} & -Y_{AB} & -Y_{CA} \\ -Y_{AB} & Y_B + Y_{AB} + Y_{BC} & -Y_{BC} \\ -Y_{CA} & -Y_{BC} & Y_C + Y_{BC} + Y_{CA} \end{bmatrix} \quad (3.64)$$

Para representar os dez tipos clássicos de falta em sistemas trifásicos (ANDERSON, 1973), faz-se os valores das admitâncias da Figura 3.8 tenderem para os valores apresentados na Tabela 3.1, onde a resistência de falta é representada por  $R_f$  e um circuito aberto é representado por uma admitância tendendo a zero.

**Figura 3.8.** Modelo de falta para sistemas trifásicos.**Fonte:** Autoria própria.**Tabela 3.1.** Valores das admitâncias do modelo de falta para cada tipo de falta.

Tipo de Falta	$Y_A$	$Y_B$	$Y_C$	$Y_{AB}$	$Y_{BC}$	$Y_{CA}$
AT	$\frac{1}{R_f}$	0	0	0	0	0
BT	0	$\frac{1}{R_f}$	0	0	0	0
CT	0	0	$\frac{1}{R_f}$	0	0	0
ABT	$\frac{1}{R_f}$	$\frac{1}{R_f}$	0	0	0	0
BCT	0	$\frac{1}{R_f}$	$\frac{1}{R_f}$	0	0	0
CAT	$\frac{1}{R_f}$	0	$\frac{1}{R_f}$	0	0	0
AB	0	0	0	$\frac{1}{R_f}$	0	0
BC	0	0	0	0	$\frac{1}{R_f}$	0
CA	0	0	0	0	0	$\frac{1}{R_f}$
ABC	$\frac{1}{R_f}$	$\frac{1}{R_f}$	$\frac{1}{R_f}$	0	0	0

**Fonte:** Autoria própria.

### 3.2.4 Origem e propagação de ondas viajantes devido a faltas em linhas trifásicas

Quando ocorre uma falta franca em um momento em que a tensão entre os pontos de falta é diferente de zero, a tensão varia abruptamente do seu valor no momento da falta para um valor próximo de zero. Esta variação é tão rápida que pode ser considerada um degrau, sendo este sinal superposto com a onda senoidal de regime permanente (JOHNS; SALMAN, 1995). Sendo assim, pode-se dizer que a onda de tensão lançada pelas faltas têm formato de degrau no ponto de falta, com amplitude igual ao negativo da tensão no momento da falta. Caso a falta ocorra através de uma resistência de falta  $R_f$ , a onda lançada ainda terá a forma de um degrau, mas a sua amplitude será menor. Conforme demonstrado na Seção 3.1 e na Seção 3.2, as ondas viajantes de corrente acompanham as ondas viajantes de tensão.

No caso de linhas de transmissão trifásicas, as ondas viajantes de corrente modais lançadas dependem do tipo de falta ocorrido. Nesta seção será apresentada uma dedução original, demonstrando quantitativamente as ondas de corrente lançadas em cada fase para cada tipo de falta e a suas correspondentes componentes modais, a qual foi baseada em Shi *et al.* (2005), Phadke & Thorp (2009). Phadke & Thorp (2009) apresenta uma tabela para as ondas de tensão lançadas para cada tipo de falta considerando a Transformada de Clarke referenciada na fase A e faltas francas ( $R_f = 0$ ). As premissas para obtenção dos resultados são mostradas, porém a demonstração é deixada para o leitor. Em Shi *et al.* (2005) é mostrada a dedução para as ondas modais de tensão e corrente lançadas apenas para faltas monofásicas sendo levado em consideração uma resistência de falta  $R_f$ . Nesta referência, é considerada a Transformada de Karenbauer, porém é mostrado o caminho para a dedução das ondas modais lançadas utilizando outras transformações.

Na Tabela 3.3 e na Tabela 3.4 são apresentadas as condições de contorno para cada tipo de falta clássico em sistemas trifásicos, onde as variáveis são definidas na Tabela 3.2. Detalhes da obtenção destas condições de contorno podem ser encontrados no Apêndice A. Aplicando-as em (3.63), podem ser obtidas as ondas lançadas nas fases para cada tipo de falta, que estão apresentadas na Tabela 3.5. Para obtenção das ondas lançadas no domínio modal, basta aplicar transformada modal desejada. As ondas modais lançadas para cada tipo de falta com referência à Transformada de Clarke referenciada nas fases A, B e C estão apresentadas na Tabela 3.6, na Tabela 3.7 e na Tabela 3.8, respectivamente. Ressalta-se que para faltas trifásicas foi feita

a consideração de que as tensões pré-falta são equilibradas, que resulta na seguinte afirmativa:

$$e_{aF} + e_{bF} + e_{cF} = 0.$$

**Tabela 3.2.** Parâmetros para obtenção das ondas de corrente lançadas.

Parâmetro	Significado
$e_{aF}$	Tensão pré-falta entre a fase A e a terra
$e_{bF}$	Tensão pré-falta entre a fase B e a terra
$e_{cF}$	Tensão pré-falta entre a fase C e a terra
$e_{abF}$	Tensão pré-falta entre as fases A e B.
$e_{bcF}$	Tensão pré-falta entre as fases B e C.
$e_{caF}$	Tensão pré-falta entre as fases C e A.
$v_{ov}^a$	Onda de tensão lançada entre a fase A e a terra
$v_{ov}^b$	Onda de tensão lançada entre a fase B e a terra
$v_{ov}^c$	Onda de tensão lançada entre a fase C e a terra
$v_{ov}^{ab}$	Onda de tensão lançada entre as fases A e B
$v_{ov}^{bc}$	Onda de tensão lançada entre as fases B e C
$v_{ov}^{ca}$	Onda de tensão lançada entre as fases C e A
$i_{ov}^a$	Onda de corrente lançada na fase A
$i_{ov}^b$	Onda de corrente lançada na fase B
$i_{ov}^c$	Onda de corrente lançada na fase C

**Fonte:** Autoria própria.

**Tabela 3.3.** Condições de contorno para faltas com terra e falta trifásica.

Tipo de Falta	$v_{ov}^a$	$v_{ov}^b$	$v_{ov}^c$	$i_{ov}^a$	$i_{ov}^b$	$i_{ov}^c$
AT	$-e_{aF} - 2R_f i_{ov}^a$	$v_{ov}^b$	$v_{ov}^c$	$i_{ov}^a$	0	0
BT	$v_{ov}^a$	$-e_{bF} - 2R_f i_{ov}^b$	$v_{ov}^c$	0	$i_{ov}^b$	0
CT	$v_{ov}^a$	$v_{ov}^b$	$-e_{cF} - 2R_f i_{ov}^c$	0	0	$i_{ov}^c$
ABT	$-e_{aF} - 2R_f i_{ov}^a$	$-e_{bF} - 2R_f i_{ov}^b$	$v_{ov}^c$	$i_{ov}^a$	$i_{ov}^b$	0
BCT	$v_{ov}^a$	$-e_{bF} - 2R_f i_{ov}^b$	$-e_{cF} - 2R_f i_{ov}^c$	0	$i_{ov}^b$	$i_{ov}^c$
CAT	$-e_{aF} - 2R_f i_{ov}^a$	$v_{ov}^b$	$-e_{cF} - 2R_f i_{ov}^c$	$i_{ov}^a$	0	$i_{ov}^c$
ABC	$-e_{aF} - 2R_f i_{ov}^a$	$-e_{bF} - 2R_f i_{ov}^b$	$-e_{cF} - 2R_f i_{ov}^c$	$i_{ov}^a$	$i_{ov}^b$	$i_{ov}^c$

**Fonte:** Autoria própria.

**Tabela 3.4.** Condições de contorno para faltas sem terra e assimétricas.

Tipo de Falta	$v_{ov}^{ab}$	$v_{ov}^{bc}$	$v_{ov}^{ca}$	$i_{ov}^a$	$i_{ov}^b$	$i_{ov}^c$
AB	$-e_{abF} - 2R_f i_{ov}^a$	$v_{ov}^{bc}$	$v_{ov}^{ca}$	$i_{ov}^a$	$-i_{ov}^a$	0
BC	$v_{ov}^{ab}$	$-e_{bcF} - 2R_f i_{ov}^b$	$v_{ov}^{ca}$	0	$i_{ov}^b$	$-i_{ov}^b$
CA	$v_{ov}^{ab}$	$v_{ov}^{bc}$	$-e_{caF} - 2R_f i_{ov}^c$	$-i_{ov}^c$	0	$i_{ov}^c$

**Fonte:** Autoria própria.

**Tabela 3.5.** Ondas viajantes de corrente lançadas nas fases.

Falta	Fase	Onda de Corrente Lançada
AT	A	$-\frac{3}{Z_0+2Z_\alpha+6R_f} e_{aF}$
	B	0
	C	0
BT	A	0
	B	$-\frac{3}{Z_0+2Z_\alpha+6R_f} e_{bF}$
	C	0
CT	A	0
	B	0
	C	$-\frac{3}{Z_0+2Z_\alpha+6R_f} e_{cF}$
ABT	A	$-\frac{Z_0+Z_\alpha+6R_f}{(Z_\alpha+2R_f)(2Z_0+Z_\alpha+6R_f)} e_{aF} + \frac{Z_0-Z_\alpha}{(Z_\alpha+2R_f)(2Z_0+Z_\alpha+6R_f)} e_{bF}$
	B	$\frac{Z_0-Z_\alpha}{(Z_\alpha+2R_f)(2Z_0+Z_\alpha+6R_f)} e_{aF} - \frac{Z_0+2Z_\alpha+6R_f}{(Z_\alpha+2R_f)(2Z_0+Z_\alpha+6R_f)} e_{bF}$
	C	0
BCT	A	0
	B	$-\frac{Z_0+Z_\alpha+6R_f}{(Z_\alpha+2R_f)(2Z_0+Z_\alpha+6R_f)} e_{bF} + \frac{Z_0-Z_\alpha}{(Z_\alpha+2R_f)(2Z_0+Z_\alpha+6R_f)} e_{cF}$
	C	$\frac{Z_0-Z_\alpha}{(Z_\alpha+2R_f)(2Z_0+Z_\alpha+6R_f)} e_{bF} - \frac{Z_0+2Z_\alpha+6R_f}{(Z_\alpha+2R_f)(2Z_0+Z_\alpha+6R_f)} e_{cF}$
CAT	A	$\frac{Z_0-Z_\alpha}{(Z_\alpha+2R_f)(2Z_0+Z_\alpha+6R_f)} e_{cF} - \frac{Z_0+Z_\alpha+6R_f}{(Z_\alpha+2R_f)(2Z_0+Z_\alpha+6R_f)} e_{aF}$
	B	0
	C	$-\frac{Z_0+2Z_\alpha+6R_f}{(Z_\alpha+2R_f)(2Z_0+Z_\alpha+6R_f)} e_{cF} + \frac{Z_0-Z_\alpha}{(Z_\alpha+2R_f)(2Z_0+Z_\alpha+6R_f)} e_{aF}$
AB	A	$-\frac{1}{2(Z_\alpha+R_f)} (e_{aF} - e_{bF})$
	B	$\frac{1}{2(Z_\alpha+R_f)} (e_{aF} - e_{bF})$
	C	0
BC	A	0
	B	$-\frac{1}{2(Z_\alpha+R_f)} (e_{bF} - e_{cF})$
	C	$\frac{1}{2(Z_\alpha+R_f)} (e_{bF} - e_{cF})$
CA	A	$\frac{1}{2(Z_\alpha+R_f)} (e_{cF} - e_{aF})$
	B	0
	C	$-\frac{1}{2(Z_\alpha+R_f)} (e_{cF} - e_{aF})$
ABC	A	$-\frac{2Z_0+Z_\alpha+6R_f}{3(Z_0+2R_f)(Z_\alpha+2R_f)} e_{aF} + \frac{Z_0-Z_\alpha}{3(Z_0+2R_f)(Z_\alpha+2R_f)} (e_{bF} + e_{cF})$
	B	$-\frac{2Z_0+Z_\alpha+6R_f}{3(Z_0+2R_f)(Z_\alpha+2R_f)} e_{bF} + \frac{Z_0-Z_\alpha}{3(Z_0+2R_f)(Z_\alpha+2R_f)} (e_{aF} + e_{cF})$
	C	$-\frac{2Z_0+Z_\alpha+6R_f}{3(Z_0+2R_f)(Z_\alpha+2R_f)} e_{cF} + \frac{Z_0-Z_\alpha}{3(Z_0+2R_f)(Z_\alpha+2R_f)} (e_{bF} + e_{aF})$

**Fonte:** Autoria própria.

**Tabela 3.6.** Ondas viajantes de corrente modais lançadas - Clarke A.

Falta	Modo	Onda de Corrente Lançada
AT	$\alpha$	$-\frac{2}{Z_0+2Z_\alpha+6R_f}e_{aF}$
	$\beta$	0
	0	$-\frac{1}{Z_0+2Z_\alpha+6R_f}e_{aF}$
BT	$\alpha$	$\frac{1}{Z_0+2Z_\alpha+6R_f}e_{bF}$
	$\beta$	$-\frac{\sqrt{3}}{Z_0+2Z_\alpha+6R_f}e_{bF}$
	0	$-\frac{1}{Z_0+2Z_\alpha+6R_f}e_{bF}$
CT	$\alpha$	$\frac{1}{Z_0+2Z_\alpha+6R_f}e_{cF}$
	$\beta$	$\frac{\sqrt{3}}{Z_0+2Z_\alpha+6R_f}e_{cF}$
	0	$-\frac{1}{Z_0+2Z_\alpha+6R_f}e_{cF}$
ABT	$\alpha$	$-\frac{Z_0+Z_\alpha+4R_f}{(Z_\alpha+2R_f)(2Z_0+Z_\alpha+6R_f)}e_{aF} + \frac{Z_0+2R_f}{(Z_\alpha+2R_f)(2Z_0+Z_\alpha+6R_f)}e_{bF}$
	$\beta$	$\frac{\sqrt{3}(Z_0-Z_\alpha)}{3(Z_\alpha+2R_f)(2Z_0+Z_\alpha+6R_f)}e_{aF} - \frac{\sqrt{3}(Z_0+2Z_\alpha+6R_f)}{3(Z_\alpha+2R_f)(2Z_0+Z_\alpha+6R_f)}e_{bF}$
	0	$-\frac{1}{2Z_0+Z_\alpha+6R_f}(e_{aF} + e_{bF})$
BCT	$\alpha$	$\frac{1}{2Z_0+Z_\alpha+6R_f}(e_{bF} + e_{cF})$
	$\beta$	$-\frac{\sqrt{3}}{3(Z_\alpha+2R_f)}(e_{bF} - e_{cF})$
	0	$-\frac{1}{2Z_0+Z_\alpha+6R_f}(e_{bF} + e_{cF})$
CAT	$\alpha$	$-\frac{Z_0+Z_\alpha+4R_f}{(Z_\alpha+2R_f)(2Z_0+Z_\alpha+6R_f)}e_{aF} + \frac{Z_0+2R_f}{(Z_\alpha+2R_f)(2Z_0+Z_\alpha+6R_f)}e_{cF}$
	$\beta$	$-\frac{\sqrt{3}(Z_0-Z_\alpha)}{3(Z_\alpha+2R_f)(2Z_0+Z_\alpha+6R_f)}e_{aF} + \frac{\sqrt{3}(Z_0+2Z_\alpha+6R_f)}{3(Z_\alpha+2R_f)(2Z_0+Z_\alpha+6R_f)}e_{cF}$
	0	$-\frac{1}{2Z_0+Z_\alpha+6R_f}(e_{aF} + e_{cF})$
AB	$\alpha$	$-\frac{1}{2(Z_\alpha+R_f)}(e_{aF} - e_{bF})$
	$\beta$	$\frac{\sqrt{3}}{6(Z_\alpha+R_f)}(e_{aF} - e_{bF})$
	0	0
BC	$\alpha$	0
	$\beta$	$-\frac{\sqrt{3}}{3(Z_\alpha+R_f)}(e_{bF} - e_{cF})$
	0	0
CA	$\alpha$	$\frac{1}{2(Z_\alpha+R_f)}(e_{cF} - e_{aF})$
	$\beta$	$\frac{\sqrt{3}}{6(Z_\alpha+R_f)}(e_{cF} - e_{aF})$
	0	0
ABC	$\alpha$	$-\frac{1}{Z_\alpha+2R_f}e_{aF}$
	$\beta$	$-\frac{\sqrt{3}}{3(Z_\alpha+2R_f)}(e_{bF} - e_{cF})$
	0	0

Fonte: Autoria própria.

**Tabela 3.7.** Ondas viajantes de corrente modais lançadas - Clarke B.

Falta	Modo	Onda de Corrente Lançada
AT	$\alpha$	$\frac{1}{Z_0+2Z_\alpha+6R_f} e_{aF}$
	$\beta$	$\frac{\sqrt{3}}{Z_0+2Z_\alpha+6R_f} e_{aF}$
	0	$-\frac{1}{Z_0+2Z_\alpha+6R_f} e_{aF}$
BT	$\alpha$	$-\frac{2}{Z_0+2Z_\alpha+6R_f} e_{bF}$
	$\beta$	0
	0	$-\frac{1}{Z_0+2Z_\alpha+6R_f} e_{bF}$
CT	$\alpha$	$\frac{1}{Z_0+2Z_\alpha+6R_f} e_{cF}$
	$\beta$	$-\frac{\sqrt{3}}{Z_0+2Z_\alpha+6R_f} e_{cF}$
	0	$-\frac{1}{Z_0+2Z_\alpha+6R_f} e_{cF}$
ABT	$\alpha$	$\frac{Z_0+2R_f}{(Z_\alpha+2R_f)(2Z_0+Z_\alpha+6R_f)} e_{aF} - \frac{Z_0+Z_\alpha+4R_f}{(Z_\alpha+2R_f)(2Z_0+Z_\alpha+6R_f)} e_{bF}$
	$\beta$	$\frac{\sqrt{3}(Z_0+2Z_\alpha+6R_f)}{3(Z_\alpha+2R_f)(2Z_0+Z_\alpha+6R_f)} e_{aF} - \frac{\sqrt{3}(Z_0-Z_\alpha)}{3(Z_\alpha+2R_f)(2Z_0+Z_\alpha+6R_f)} e_{bF}$
	0	$-\frac{1}{2Z_0+Z_\alpha+6R_f} (e_{aF} + e_{bF})$
BCT	$\alpha$	$-\frac{Z_0+Z_\alpha+4R_f}{(Z_\alpha+2R_f)(2Z_0+Z_\alpha+6R_f)} e_{bF} + \frac{Z_0+2R_f}{(Z_\alpha+2R_f)(2Z_0+Z_\alpha+6R_f)} e_{cF}$
	$\beta$	$\frac{\sqrt{3}(Z_0-Z_\alpha)}{3(Z_\alpha+2R_f)(2Z_0+Z_\alpha+6R_f)} e_{bF} - \frac{\sqrt{3}(Z_0+2Z_\alpha+6R_f)}{3(Z_\alpha+2R_f)(2Z_0+Z_\alpha+6R_f)} e_{cF}$
	0	$-\frac{1}{2Z_0+Z_\alpha+6R_f} (e_{bF} + e_{cF})$
CAT	$\alpha$	$\frac{1}{2Z_0+Z_\alpha+6R_f} (e_{aF} + e_{cF})$
	$\beta$	$-\frac{\sqrt{3}}{3(Z_\alpha+2R_f)} (e_{cF} - e_{aF})$
	0	$-\frac{1}{2Z_0+Z_\alpha+6R_f} (e_{aF} + e_{cF})$
AB	$\alpha$	$\frac{1}{2(Z_\alpha+R_f)} (e_{aF} - e_{bF})$
	$\beta$	$\frac{\sqrt{3}}{6(Z_\alpha+R_f)} (e_{aF} - e_{bF})$
	0	0
BC	$\alpha$	$-\frac{1}{2(Z_\alpha+R_f)} (e_{bF} - e_{cF})$
	$\beta$	$\frac{\sqrt{3}}{6(Z_\alpha+R_f)} (e_{bF} - e_{cF})$
	0	0
CA	$\alpha$	0
	$\beta$	$-\frac{\sqrt{3}}{3(Z_\alpha+R_f)} (e_{cF} - e_{aF})$
	0	0
ABC	$\alpha$	$-\frac{1}{Z_\alpha+2R_f} e_{bF}$
	$\beta$	$-\frac{\sqrt{3}}{3(Z_\alpha+2R_f)} (e_{cF} - e_{aF})$
	0	0

Fonte: Autoria própria.

**Tabela 3.8.** Ondas viajantes de corrente modais lançadas - Clarke C.

Falta	Modo	Onda de Corrente Lançada
AT	$\alpha$	$\frac{1}{Z_0+2Z_\alpha+6R_f} e_{aF}$
	$\beta$	$-\frac{\sqrt{3}}{Z_0+2Z_\alpha+6R_f} e_{aF}$
	0	$-\frac{1}{Z_0+2Z_\alpha+6R_f} e_{aF}$
BT	$\alpha$	$\frac{1}{Z_0+2Z_\alpha+6R_f} e_{bF}$
	$\beta$	$\frac{\sqrt{3}}{Z_0+2Z_\alpha+6R_f} e_{bF}$
	0	$-\frac{1}{Z_0+2Z_\alpha+6R_f} e_{bF}$
CT	$\alpha$	$-\frac{2}{Z_0+2Z_\alpha+6R_f} e_{cF}$
	$\beta$	0
	0	$-\frac{1}{Z_0+2Z_\alpha+6R_f} e_{cF}$
ABT	$\alpha$	$\frac{1}{2Z_0+Z_\alpha+6R_f} (e_{aF} + e_{bF})$
	$\beta$	$-\frac{\sqrt{3}}{3(Z_\alpha+2R_f)} (e_{aF} - e_{bF})$
	0	$-\frac{1}{2Z_0+Z_\alpha+6R_f} (e_{aF} + e_{bF})$
BCT	$\alpha$	$\frac{Z_0+2R_f}{(Z_\alpha+2R_f)(2Z_0+Z_\alpha+6R_f)} e_{bF} - \frac{Z_0+Z_\alpha+4R_f}{(Z_\alpha+2R_f)(2Z_0+Z_\alpha+6R_f)} e_{cF}$
	$\beta$	$\frac{\sqrt{3}(Z_0+2Z_\alpha+6R_f)}{3(Z_\alpha+2R_f)(2Z_0+Z_\alpha+6R_f)} e_{bF} - \frac{\sqrt{3}(Z_0-Z_\alpha)}{3(Z_\alpha+2R_f)(2Z_0+Z_\alpha+6R_f)} e_{cF}$
	0	$-\frac{1}{2Z_0+Z_\alpha+6R_f} (e_{bF} + e_{cF})$
CAT	$\alpha$	$\frac{Z_0+2R_f}{(Z_\alpha+2R_f)(2Z_0+Z_\alpha+6R_f)} e_{aF} - \frac{Z_0+Z_\alpha+4R_f}{(Z_\alpha+2R_f)(2Z_0+Z_\alpha+6R_f)} e_{cF}$
	$\beta$	$-\frac{\sqrt{3}(Z_0+2Z_\alpha+6R_f)}{3(Z_\alpha+2R_f)(2Z_0+Z_\alpha+6R_f)} e_{aF} + \frac{\sqrt{3}(Z_0-Z_\alpha)}{3(Z_\alpha+2R_f)(2Z_0+Z_\alpha+6R_f)} e_{cF}$
	0	$-\frac{1}{2Z_0+Z_\alpha+6R_f} (e_{aF} + e_{cF})$
AB	$\alpha$	0
	$\beta$	$-\frac{\sqrt{3}}{3(Z_\alpha+R_f)} (e_{aF} - e_{bF})$
	0	0
BC	$\alpha$	$\frac{1}{2(Z_\alpha+R_f)} (e_{bF} - e_{cF})$
	$\beta$	$\frac{\sqrt{3}}{6(Z_\alpha+R_f)} (e_{bF} - e_{cF})$
	0	0
CA	$\alpha$	$-\frac{1}{2(Z_\alpha+R_f)} (e_{cF} - e_{aF})$
	$\beta$	$\frac{\sqrt{3}}{6(Z_\alpha+R_f)} (e_{cF} - e_{aF})$
	0	0
ABC	$\alpha$	$-\frac{1}{Z_\alpha+2R_f} e_{cF}$
	$\beta$	$-\frac{\sqrt{3}}{3(Z_\alpha+2R_f)} (e_{aF} - e_{bF})$
	0	0

Fonte: Autoria própria.

### 3.2.5 Reflexão e refração das ondas em linhas trifásicas

Para linhas polifásicas, os parâmetros elétricos e variáveis podem ser considerados em termos de matrizes e vetores. O coeficiente de reflexão e refração em sistemas polifásicos pode ser considerado, de forma semelhante, uma matriz. Para uma falta balanceada, as matrizes de reflexão e refração são diagonais, de forma que cada modo de propagação é independente dos outros. Para faltas desbalanceadas, que constituem a maior parte das faltas em linhas de transmissão, as matrizes de reflexão e refração contêm termos fora da diagonal principal. As ondas viajantes refletidas e refratadas de cada modo no ponto da falta desbalanceada contêm componentes de cada onda viajante incidente neste ponto de falta (ANCELL; PAHALAWATHTHA, 1994).

Sendo assim, em caso de equipamentos balanceados conectados nos terminais ou junções das linhas de transmissão transpostas e casos de faltas simétricas, o mesmo procedimento utilizado no caso de linhas de transmissão monofásicas pode ser utilizado para obtenção dos coeficientes de reflexão e refração para cada modo de maneira independente (ZANETTA JÚNIOR, 2003). Nestes casos, os modos de propagação são independentes entre si, não havendo acoplamento entre eles nas reflexões e refrações. Assim, cada modo pode ser avaliado de maneira independente, sendo que os valores de fase são obtidos a partir dos valores modais calculados.

Já no caso de terminações que possuam equipamentos assimétricos, linhas de transmissão não transpostas ou faltas assimétricas, haverá acoplamento entre os modos naquela junção (DOMMEL; MICHELS, 1978; ANCELL; PAHALAWATHTHA, 1994; ZANETTA JÚNIOR, 2003; PHADKE; THORP, 2009). Apesar de equipamentos não serem perfeitamente simétricos e linhas de transmissão não serem perfeitamente transpostas, fazer esta aproximação não inclui grandes erros nas análises de sistema de potência (SPOOR; ZHU, 2006). Já no caso de faltas assimétricas, a assimetria é muito grande para ser desprezada, podendo trazer impactos consideráveis no modelo de previsão de propagação de ondas caso isto não seja considerado.

Desta forma, nesta seção será mostrada uma metodologia genérica para obtenção das matrizes de coeficientes de reflexão e refração para faltas em linhas polifásicas. A metodologia genérica para obtenção das matrizes em terminações já foi apresentada em Wedepohl (1963) e em Zanetta Júnior (2003). Já para o caso de faltas, uma abordagem semelhante à que será mostrada aqui foi apresentada em Ansell & Pahalawaththa (1992) e em Wu *et al.* (2009), porém

não foi feito o detalhamento das matrizes de reflexão e refração para os dez tipos clássicos de falta em sistemas trifásicos, o qual será apresentado adiante. Estas matrizes foram obtidas previamente apenas para o caso de faltas monofásicas em Lei *et al.* (2015a) e em Lei *et al.* (2015b).

A metodologia adotada para a solução deste problema é baseado no apresentado em Wedepohl (1963). Esta metodologia é voltada para o domínio de fases, sendo necessário realizar uma transformação para obtenção das matrizes de coeficientes no domínio modal. Para obtenção do detalhamento das matrizes de reflexão e refração para os dez tipos clássicos de falta em sistemas trifásicos foram realizados cálculos intensivos, sendo necessário utilizar a Symbolic Math Toolbox do *software* MATLAB<sup>®</sup> para sua execução.

### 3.2.5.1 Coeficientes de reflexão em junção com três elementos em linhas trifásicas

A LKT e a LKC são válidas em cada uma das fases do sistema polifásico (ZANETTA JÚNIOR, 2003). Sendo assim, considerando o sistema polifásico composto por circuitos semelhantes ao da Figura 3.4 em cada fase, pode-se escrever matricialmente a LKT e a LKC. A seguir, será apresentada a demonstração das matrizes de coeficientes de reflexão e refração para junção de três elementos em sistemas trifásicos, mas que é aplicável para qualquer sistema polifásico. Os vetores de tensão e corrente com sobrescrito *abc* têm como seus elementos as componentes de fases das ondas viajantes.  $\mathbf{V}_{1A}^{abc}$  e  $\mathbf{I}_{1A}^{abc}$  representam o vetor de ondas incidentes de tensão e corrente, respectivamente,  $\mathbf{V}_{2A}^{abc}$  e  $\mathbf{I}_{2A}^{abc}$  representam o vetor de ondas refletidas de tensão e corrente, respectivamente,  $\mathbf{V}_{3B}^{abc}$  e  $\mathbf{I}_{3B}^{abc}$  representam o vetor de ondas refratadas de tensão e corrente para o ramo B, respectivamente, e  $\mathbf{V}_{3C}^{abc}$  e  $\mathbf{I}_{3C}^{abc}$  representam o vetor de ondas refratadas de tensão e corrente para o ramo C, respectivamente. O mesmo raciocínio pode ser utilizado para deduzir as matrizes de coeficientes de reflexão e refração para sistemas polifásicos para junções de quantos elementos se queiram. Aplicando a LKT e a LKC obtém-se (3.65) e (3.66).

$$\mathbf{V}_{1A}^{abc} + \mathbf{V}_{2A}^{abc} = \mathbf{V}_{3B}^{abc} = \mathbf{V}_{3C}^{abc} \quad (3.65)$$

$$\mathbf{I}_{1A}^{abc} + \mathbf{I}_{2A}^{abc} = \mathbf{I}_{3B}^{abc} + \mathbf{I}_{3C}^{abc} \quad (3.66)$$

Assume-se que são conhecidas as relações entre os vetores de tensões e correntes. Esta

relação é dada através de uma matriz de ordem numericamente igual ao número de fases do sistema e nem sempre esta matriz será diagonal, tendo em vista quase sempre há acoplamento entre as fases do sistema. Sabendo isto e que a onda de corrente refletida inverte de sentido, pode-se deduzir (3.67), (3.68), (3.69) e (3.70).

$$\mathbf{V}_{1A}^{abc} = \mathbf{Z}_A^{abc} \mathbf{I}_{1A}^{abc} \quad (3.67)$$

$$\mathbf{V}_{2A}^{abc} = -\mathbf{Z}_A^{abc} \mathbf{I}_{2A}^{abc} \quad (3.68)$$

$$\mathbf{V}_{3B}^{abc} = \mathbf{Z}_B^{abc} \mathbf{I}_{3B}^{abc} \quad (3.69)$$

$$\mathbf{V}_{3C}^{abc} = \mathbf{Z}_C^{abc} \mathbf{I}_{3C}^{abc} \quad (3.70)$$

Substituindo (3.67), (3.68), (3.69) e (3.70) em (3.65), obtém-se:

$$\mathbf{Z}_A^{abc} \mathbf{I}_{1A}^{abc} - \mathbf{Z}_A^{abc} \mathbf{I}_{2A}^{abc} = \mathbf{Z}_B^{abc} \mathbf{I}_{3B}^{abc} = \mathbf{Z}_C^{abc} \mathbf{I}_{3C}^{abc} \quad (3.71)$$

De (3.71), chega-se a conclusão que  $\mathbf{I}_{3B}^{abc} = (\mathbf{Z}_B^{abc})^{-1} \mathbf{Z}_C^{abc} \mathbf{I}_{3C}^{abc}$  ou  $\mathbf{I}_{3C}^{abc} = (\mathbf{Z}_C^{abc})^{-1} \mathbf{Z}_B^{abc} \mathbf{I}_{3B}^{abc}$ . Substituindo em (3.66) e depois manipulando a equação matricial obtida e substituindo em (3.71), pode-se manipular o resultado obtido de modo a chegar em (3.72), (3.73) e (3.74), em que as relações já estão em termos de valores modais, conforme pode ser obtido a partir de (3.56). Em (3.72) é definida a matriz de coeficientes de reflexão  $\rho_{ig}^{\alpha\beta 0}$ , pois ela é uma matriz que multiplicada pelo vetor de onda de corrente modal incidente resulta no vetor de onda de corrente modal refletida. De forma similar, em (3.73) e (3.74), são definidas as matrizes de coeficientes de refração  $\Gamma_{igB}^{\alpha\beta 0}$  e  $\Gamma_{igC}^{\alpha\beta 0}$ , pois são matrizes que multiplicadas pelo vetor de onda de corrente modal incidente resultam nos vetores de onda de corrente modal refratada para o ramo B e para o ramo C, respectivamente.

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_{2A}^{\alpha\beta 0} &= \rho_{ig}^{\alpha\beta 0} \mathbf{I}_{1A}^{\alpha\beta 0} \rightarrow \\ \rho_{ig}^{\alpha\beta 0} &= -\mathbf{M}(\mathbf{Z}_A^{abc})^{-1} [(\mathbf{Z}_A^{abc})^{-1} + (\mathbf{Z}_B^{abc})^{-1} + (\mathbf{Z}_C^{abc})^{-1}]^{-1} [(\mathbf{Z}_A^{abc})^{-1} - (\mathbf{Z}_B^{abc})^{-1} - (\mathbf{Z}_C^{abc})^{-1}] \mathbf{Z}_A^{abc} \mathbf{M}^{-1} \end{aligned} \quad (3.72)$$

$$\mathbf{I}_{3B}^{\alpha\beta 0} = \Gamma_{igB}^{\alpha\beta 0} \mathbf{I}_{1A}^{\alpha\beta 0} \rightarrow \Gamma_{igB}^{\alpha\beta 0} = 2\mathbf{M}(\mathbf{Z}_B^{abc})^{-1} [(\mathbf{Z}_A^{abc})^{-1} + (\mathbf{Z}_B^{abc})^{-1} + (\mathbf{Z}_C^{abc})^{-1}]^{-1} (\mathbf{Z}_A^{abc})^{-1} \mathbf{Z}_A^{abc} \mathbf{M}^{-1} \quad (3.73)$$

$$\mathbf{I}_{3C}^{\alpha\beta 0} = \Gamma_{igC}^{\alpha\beta 0} \mathbf{I}_{1A}^{\alpha\beta 0} \rightarrow \Gamma_{igC}^{\alpha\beta 0} = 2\mathbf{M}(\mathbf{Z}_C^{abc})^{-1}[(\mathbf{Z}_A^{abc})^{-1} + (\mathbf{Z}_B^{abc})^{-1} + (\mathbf{Z}_C^{abc})^{-1}]^{-1}(\mathbf{Z}_A^{abc})^{-1} \mathbf{Z}_A^{abc} \mathbf{M}^{-1} \quad (3.74)$$

### 3.2.5.2 Matrizes de coeficientes de reflexão e refração no ponto de falta para linhas de transmissão trifásicas

Para obter as matrizes de coeficientes de reflexão e refração no ponto de falta para linhas de transmissão trifásicas, é necessário substituir as matrizes que constam nas expressões apresentadas na Seção 3.2.5.1 adequadamente. Considera-se a matriz de impedância que representa a linha de transmissão como  $\mathbf{Z}_{car}^{abc}$ , sendo ela igual à matriz apresentada em (3.63). Considera-se a matriz admitância que representa o ramo de falta como sendo igual à  $\mathbf{Y}_F$ , conforme apresentado em (3.64). Para cada tipo de falta, faz-se os elementos da matriz  $\mathbf{Y}_F$  tenderem para os valores apresentados na Tabela 3.1. Assim, faz-se  $\mathbf{Z}_A^{abc} = \mathbf{Z}_C^{abc} = \mathbf{Z}_{car}^{abc}$  e  $\mathbf{Z}_B^{abc} = \mathbf{Y}_F^{-1}$  nas matrizes de coeficientes calculadas na Seção 3.2.5.1. Importante ressaltar que as matrizes de coeficientes de refração calculadas para o ponto de falta diz respeito a onda refratada para a outra porção da linha de transmissão e não para o ramo de falta.

As matrizes obtidas são mostradas na sequência, sendo calculadas para a Transformada de Clarke referenciada na fase A, conforme representação em sobrescrito. Os subscritos identificam cada um dos dez tipos clássicos de falta para sistemas trifásicos e os símbolos  $\rho$  e  $\Gamma$  representam as matrizes de reflexão e refração, respectivamente.

$$\rho_{iAT}^{MCA} = \begin{bmatrix} \frac{2Z_\alpha}{Z_0 + 2Z_\alpha + 6R_f} & 0 & \frac{2Z_0}{Z_0 + 2Z_\alpha + 6R_f} \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{Z_\alpha}{Z_0 + 2Z_\alpha + 6R_f} & 0 & \frac{Z_0}{Z_0 + 2Z_\alpha + 6R_f} \end{bmatrix} \quad (3.75)$$

$$\rho_{iBT}^{MCA} = \begin{bmatrix} \frac{Z_\alpha}{2Z_0 + 4Z_\alpha + 12R_f} & -\frac{\sqrt{3}Z_\alpha}{2Z_0 + 4Z_\alpha + 12R_f} & -\frac{Z_0}{Z_0 + 2Z_\alpha + 6R_f} \\ -\frac{\sqrt{3}Z_\alpha}{2Z_0 + 4Z_\alpha + 12R_f} & \frac{3Z_\alpha}{2Z_0 + 4Z_\alpha + 12R_f} & \frac{\sqrt{3}Z_0}{Z_0 + 2Z_\alpha + 6R_f} \\ -\frac{Z_\alpha}{2Z_0 + 4Z_\alpha + 12R_f} & \frac{\sqrt{3}Z_\alpha}{2Z_0 + 4Z_\alpha + 12R_f} & \frac{Z_0}{Z_0 + 2Z_\alpha + 6R_f} \end{bmatrix} \quad (3.76)$$

$$\rho_{iCT}^{MCA} = \begin{bmatrix} \frac{Z_\alpha}{2Z_0 + 4Z_\alpha + 12R_f} & \frac{\sqrt{3}Z_\alpha}{2Z_0 + 4Z_\alpha + 12R_f} & -\frac{Z_0}{Z_0 + 2Z_\alpha + 6R_f} \\ \frac{\sqrt{3}Z_\alpha}{2Z_0 + 4Z_\alpha + 12R_f} & \frac{3Z_\alpha}{2Z_0 + 4Z_\alpha + 12R_f} & -\frac{\sqrt{3}Z_0}{Z_0 + 2Z_\alpha + 6R_f} \\ -\frac{Z_\alpha}{2Z_0 + 4Z_\alpha + 12R_f} & -\frac{\sqrt{3}Z_\alpha}{2Z_0 + 4Z_\alpha + 12R_f} & \frac{Z_0}{Z_0 + 2Z_\alpha + 6R_f} \end{bmatrix} \quad (3.77)$$

$$\rho_{iABT}^{MCA} = \begin{bmatrix} \frac{Z_\alpha(3Z_0 + 2Z_\alpha + 10R_f)}{2(Z_\alpha + 2R_f)(2Z_0 + Z_\alpha + 6R_f)} & -\frac{\sqrt{3}Z_\alpha(Z_0 + 2R_f)}{2(Z_\alpha + 2R_f)(2Z_0 + Z_\alpha + 6R_f)} & \frac{Z_0}{2Z_0 + Z_\alpha + 6R_f} \\ \frac{\sqrt{3}Z_\alpha(Z_0 + 2R_f)}{2(Z_\alpha + 2R_f)(2Z_0 + Z_\alpha + 6R_f)} & \frac{Z_\alpha(Z_0 + 2Z_\alpha + 6R_f)}{2(Z_\alpha + 2R_f)(2Z_0 + Z_\alpha + 6R_f)} & \frac{\sqrt{3}Z_0}{2Z_0 + Z_\alpha + 6R_f} \\ -\frac{Z_\alpha}{4Z_0 + 2Z_\alpha + 12R_f} & \frac{\sqrt{3}Z_\alpha}{4Z_0 + 2Z_\alpha + 12R_f} & \frac{2Z_0}{2Z_0 + Z_\alpha + 6R_f} \end{bmatrix} \quad (3.78)$$

$$\rho_{iBCT}^{MCA} = \begin{bmatrix} \frac{Z_\alpha}{2Z_0 + Z_\alpha + 6R_f} & 0 & -\frac{2Z_0}{2Z_0 + Z_\alpha + 6R_f} \\ 0 & \frac{Z_\alpha}{Z_\alpha + 2R_f} & 0 \\ -\frac{Z_\alpha}{2Z_0 + Z_\alpha + 6R_f} & 0 & \frac{2Z_0}{2Z_0 + Z_\alpha + 6R_f} \end{bmatrix} \quad (3.79)$$

$$\rho_{iCAT}^{MCA} = \begin{bmatrix} \frac{Z_\alpha(3Z_0 + 2Z_\alpha + 10R_f)}{2(Z_\alpha + 2R_f)(2Z_0 + Z_\alpha + 6R_f)} & \frac{\sqrt{3}Z_\alpha(Z_0 + 2R_f)}{2(Z_\alpha + 2R_f)(2Z_0 + Z_\alpha + 6R_f)} & \frac{Z_0}{2Z_0 + Z_\alpha + 6R_f} \\ \frac{\sqrt{3}Z_\alpha(Z_0 + 2R_f)}{2(Z_\alpha + 2R_f)(2Z_0 + Z_\alpha + 6R_f)} & \frac{Z_\alpha(Z_0 + 2Z_\alpha + 6R_f)}{2(Z_\alpha + 2R_f)(2Z_0 + Z_\alpha + 6R_f)} & -\frac{\sqrt{3}Z_0}{2Z_0 + Z_\alpha + 6R_f} \\ \frac{Z_\alpha}{4Z_0 + 2Z_\alpha + 12R_f} & -\frac{\sqrt{3}Z_\alpha}{4Z_0 + 2Z_\alpha + 12R_f} & \frac{2Z_0}{2Z_0 + Z_\alpha + 6R_f} \end{bmatrix} \quad (3.80)$$

$$\rho_{iAB}^{MCA} = \begin{bmatrix} \frac{3Z_\alpha}{4(Z_\alpha + R_f)} & -\frac{\sqrt{3}Z_\alpha}{4(Z_\alpha + R_f)} & 0 \\ \frac{\sqrt{3}Z_\alpha}{4(Z_\alpha + R_f)} & \frac{Z_\alpha}{4(Z_\alpha + R_f)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.81)$$

$$\rho_{iBC}^{MCA} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{Z_\alpha}{Z_\alpha + R_f} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.82)$$

$$\rho_{iCA}^{MCA} = \begin{bmatrix} \frac{3Z_\alpha}{4(Z_\alpha + R_f)} & \frac{\sqrt{3}Z_\alpha}{4(Z_\alpha + R_f)} & 0 \\ \frac{\sqrt{3}Z_\alpha}{4(Z_\alpha + R_f)} & \frac{Z_\alpha}{4(Z_\alpha + R_f)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.83)$$

$$\rho_{iABC}^{MCA} = \begin{bmatrix} \frac{Z_\alpha}{Z_\alpha + 2R_f} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{Z_\alpha}{Z_\alpha + 2R_f} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{Z_0}{Z_0 + 2R_f} \end{bmatrix} \quad (3.84)$$

$$\Gamma_{iAT}^{MCA} = \begin{bmatrix} \frac{Z_0 + 6R_f}{Z_0 + 2Z_\alpha + 6R_f} & 0 & -\frac{2Z_0}{Z_0 + 2Z_\alpha + 6R_f} \\ 0 & 1 & 0 \\ \frac{Z_\alpha}{Z_0 + 2Z_\alpha + 6R_f} & 0 & \frac{2Z_\alpha + 6R_f}{Z_0 + 2Z_\alpha + 6R_f} \end{bmatrix} \quad (3.85)$$

$$\Gamma_{iBT}^{MCA} = \begin{bmatrix} \frac{2Z_0 + 3Z_\alpha + 12R_f}{2Z_0 + 4Z_\alpha + 12R_f} & \frac{\sqrt{3}Z_\alpha}{2Z_0 + 4Z_\alpha + 12R_f} & \frac{Z_0}{Z_0 + 2Z_\alpha + 6R_f} \\ \frac{\sqrt{3}Z_\alpha}{2Z_0 + 4Z_\alpha + 12R_f} & \frac{2Z_0 + Z_\alpha + 12R_f}{2Z_0 + 4Z_\alpha + 12R_f} & -\frac{\sqrt{3}Z_0}{Z_0 + 2Z_\alpha + 6R_f} \\ \frac{Z_\alpha}{2Z_0 + 4Z_\alpha + 12R_f} & -\frac{\sqrt{3}Z_\alpha}{2Z_0 + 4Z_\alpha + 12R_f} & \frac{2Z_\alpha + 6R_f}{Z_0 + 2Z_\alpha + 6R_f} \end{bmatrix} \quad (3.86)$$

$$\Gamma_{iCT}^{MCA} = \begin{bmatrix} \frac{2Z_0 + 3Z_\alpha + 12R_f}{2Z_0 + 4Z_\alpha + 12R_f} & -\frac{\sqrt{3}Z_\alpha}{2Z_0 + 4Z_\alpha + 12R_f} & \frac{Z_0}{Z_0 + 2Z_\alpha + 6R_f} \\ \frac{\sqrt{3}Z_\alpha}{2Z_0 + 4Z_\alpha + 12R_f} & \frac{2Z_0 + Z_\alpha + 12R_f}{2Z_0 + 4Z_\alpha + 12R_f} & \frac{\sqrt{3}Z_0}{Z_0 + 2Z_\alpha + 6R_f} \\ -\frac{2Z_0 + 4Z_\alpha + 12R_f}{Z_\alpha} & \frac{2Z_0 + 4Z_\alpha + 12R_f}{\sqrt{3}Z_\alpha} & \frac{Z_0 + 2Z_\alpha + 6R_f}{2Z_\alpha + 6R_f} \\ \frac{Z_\alpha}{2Z_0 + 4Z_\alpha + 12R_f} & \frac{\sqrt{3}Z_\alpha}{2Z_0 + 4Z_\alpha + 12R_f} & \frac{2Z_\alpha + 6R_f}{Z_0 + 2Z_\alpha + 6R_f} \end{bmatrix} \quad (3.87)$$

$$\Gamma_{iABT}^{MCA} = \begin{bmatrix} \frac{Z_0Z_\alpha + 2R_f(4Z_0 + 3Z_\alpha + 12R_f)}{2(Z_\alpha + 2R_f)(2Z_0 + Z_\alpha + 6R_f)} & \frac{\sqrt{3}Z_\alpha(Z_0 + 2R_f)}{2(Z_\alpha + 2R_f)(2Z_0 + Z_\alpha + 6R_f)} & -\frac{Z_0}{2Z_0 + Z_\alpha + 6R_f} \\ \frac{\sqrt{3}Z_\alpha(Z_0 + 2R_f)}{2(Z_\alpha + 2R_f)(2Z_0 + Z_\alpha + 6R_f)} & \frac{3Z_0Z_\alpha + 2R_f(4Z_0 + 5Z_\alpha + 12R_f)}{2(Z_\alpha + 2R_f)(2Z_0 + Z_\alpha + 6R_f)} & -\frac{\sqrt{3}Z_0}{2Z_0 + Z_\alpha + 6R_f} \\ -\frac{Z_\alpha}{4Z_0 + 2Z_\alpha + 12R_f} & -\frac{\sqrt{3}Z_\alpha}{4Z_0 + 2Z_\alpha + 12R_f} & \frac{Z_\alpha + 6R_f}{2Z_0 + Z_\alpha + 6R_f} \end{bmatrix} \quad (3.88)$$

$$\Gamma_{iBCT}^{MCA} = \begin{bmatrix} \frac{2Z_0 + 6R_f}{2Z_0 + Z_\alpha + 6R_f} & 0 & \frac{2Z_0}{2Z_0 + Z_\alpha + 6R_f} \\ 0 & \frac{2R_f}{Z_\alpha + 2R_f} & 0 \\ \frac{Z_\alpha}{2Z_0 + Z_\alpha + 6R_f} & 0 & \frac{Z_\alpha + 6R_f}{2Z_0 + Z_\alpha + 6R_f} \end{bmatrix} \quad (3.89)$$

$$\Gamma_{iCAT}^{MCA} = \begin{bmatrix} \frac{Z_0Z_\alpha + 2R_f(4Z_0 + 3Z_\alpha + 12R_f)}{2(Z_\alpha + 2R_f)(2Z_0 + Z_\alpha + 6R_f)} & -\frac{\sqrt{3}Z_\alpha(Z_0 + 2R_f)}{2(Z_\alpha + 2R_f)(2Z_0 + Z_\alpha + 6R_f)} & -\frac{Z_0}{2Z_0 + Z_\alpha + 6R_f} \\ \frac{\sqrt{3}Z_\alpha(Z_0 + 2R_f)}{2(Z_\alpha + 2R_f)(2Z_0 + Z_\alpha + 6R_f)} & \frac{3Z_0Z_\alpha + 2R_f(4Z_0 + 5Z_\alpha + 12R_f)}{2(Z_\alpha + 2R_f)(2Z_0 + Z_\alpha + 6R_f)} & \frac{\sqrt{3}Z_0}{2Z_0 + Z_\alpha + 6R_f} \\ -\frac{Z_\alpha}{4Z_0 + 2Z_\alpha + 12R_f} & \frac{\sqrt{3}Z_\alpha}{4Z_0 + 2Z_\alpha + 12R_f} & \frac{Z_\alpha + 6R_f}{2Z_0 + Z_\alpha + 6R_f} \end{bmatrix} \quad (3.90)$$

$$\Gamma_{iAB}^{MCA} = \begin{bmatrix} \frac{Z_\alpha + 4R_f}{4(Z_\alpha + R_f)} & \frac{\sqrt{3}Z_\alpha}{4(Z_\alpha + R_f)} & 0 \\ \frac{\sqrt{3}Z_\alpha}{4(Z_\alpha + R_f)} & \frac{3Z_\alpha + 4R_f}{4(Z_\alpha + R_f)} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.91)$$

$$\Gamma_{iBC}^{MCA} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{R_f}{Z_\alpha + R_f} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.92)$$

$$\Gamma_{iCA}^{MCA} = \begin{bmatrix} \frac{Z_\alpha + 4R_f}{4(Z_\alpha + R_f)} & -\frac{\sqrt{3}Z_\alpha}{4(Z_\alpha + R_f)} & 0 \\ -\frac{\sqrt{3}Z_\alpha}{4(Z_\alpha + R_f)} & \frac{3Z_\alpha + 4R_f}{4(Z_\alpha + R_f)} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.93)$$

$$\Gamma_{iABC}^{MCA} = \begin{bmatrix} \frac{2R_f}{Z_\alpha + 2R_f} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2R_f}{Z_\alpha + 2R_f} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2R_f}{Z_0 + 2R_f} \end{bmatrix} \quad (3.94)$$

Pode-se verificar que as matrizes de coeficientes de reflexão e refração para corrente no ponto de falta considerando a Transformação de Clarke referenciadas nas fases A, B e C apresentam equivalências entre si. Estas equivalências são sintetizadas na Tabela 3.9, onde os sobrescritos *MCA*, *MCB* e *MCC* representam as matrizes obtidas utilizando as referências nas fases A, B e C, respectivamente.

**Tabela 3.9.** Equivalência entre as matrizes de reflexão e refração para corrente no ponto de falta referenciadas em cada fase.

Equivalência Entre Matrizes de Reflexão	Equivalência Entre Matrizes de Refração
$\rho_{iABC}^{MCA} = \rho_{iABC}^{MCB} = \rho_{iABC}^{MCC}$	$\Gamma_{iABC}^{MCA} = \Gamma_{iABC}^{MCB} = \Gamma_{iABC}^{MCC}$
$\rho_{iAT}^{MCA} = \rho_{iBT}^{MCB} = \rho_{iCT}^{MCC}$	$\Gamma_{iAT}^{MCA} = \Gamma_{iBT}^{MCB} = \Gamma_{iCT}^{MCC}$
$\rho_{iBT}^{MCA} = \rho_{iCT}^{MCB} = \rho_{iAT}^{MCC}$	$\Gamma_{iBT}^{MCA} = \Gamma_{iCT}^{MCB} = \Gamma_{iAT}^{MCC}$
$\rho_{iCT}^{MCA} = \rho_{iAT}^{MCB} = \rho_{iBT}^{MCC}$	$\Gamma_{iCT}^{MCA} = \Gamma_{iAT}^{MCB} = \Gamma_{iBT}^{MCC}$
$\rho_{iABT}^{MCA} = \rho_{iBCT}^{MCB} = \rho_{iCAT}^{MCC}$	$\Gamma_{iABT}^{MCA} = \Gamma_{iBCT}^{MCB} = \Gamma_{iCAT}^{MCC}$
$\rho_{iBCT}^{MCA} = \rho_{iCAT}^{MCB} = \rho_{iABT}^{MCC}$	$\Gamma_{iBCT}^{MCA} = \Gamma_{iCAT}^{MCB} = \Gamma_{iABT}^{MCC}$
$\rho_{iCAT}^{MCA} = \rho_{iABT}^{MCB} = \rho_{iBCT}^{MCC}$	$\Gamma_{iCAT}^{MCA} = \Gamma_{iABT}^{MCB} = \Gamma_{iBCT}^{MCC}$
$\rho_{iAB}^{MCA} = \rho_{iBC}^{MCB} = \rho_{iCA}^{MCC}$	$\Gamma_{iAB}^{MCA} = \Gamma_{iBC}^{MCB} = \Gamma_{iCA}^{MCC}$
$\rho_{iBC}^{MCA} = \rho_{iCA}^{MCB} = \rho_{iAB}^{MCC}$	$\Gamma_{iBC}^{MCA} = \Gamma_{iCA}^{MCB} = \Gamma_{iAB}^{MCC}$
$\rho_{iCA}^{MCA} = \rho_{iAB}^{MCB} = \rho_{iBC}^{MCC}$	$\Gamma_{iCA}^{MCA} = \Gamma_{iAB}^{MCB} = \Gamma_{iBC}^{MCC}$

Fonte: Autoria própria.

### 3.2.6 Modelo analítico de previsão de propagação de ondas viajantes de corrente em sistemas trifásicos

Com base no que foi apresentado na Seção 3.2, é possível prever a propagação de ondas viajantes de corrente em sistemas de trifásicos de maneira analítica, o que facilita a elaboração

de algoritmos de proteção, classificação e localização de faltas baseados na teoria de ondas viajantes. Um exemplo numérico deste método analítico está apresentado no Apêndice B. Neste exemplo fica claro o acoplamento entre os modos aéreo e terra no ponto de falta, que ocorre quando a falta é assimétrica e envolve a terra.

## CAPÍTULO 4

# CLASSIFICAÇÃO DE FALTAS UTILIZANDO A TEORIA DAS ONDAS VIAJANTES

Neste capítulo é apresentado um novo método de classificação de faltas, que necessita como dados de entrada apenas da medição das primeiras ondas de corrente incidentes de modo aéreo e terra, detectadas caso ultrapassem os seus respectivos limiares, cujos ajustes são fixos. A classificação da falta obtida por meio deste algoritmo é usada para selecionar o modo aéreo que será utilizado no algoritmo de localização de faltas proposto.

### 4.1 MOTIVAÇÃO

Uma das vantagens do método de localização de faltas proposto é que ele é capaz de localizar a falta mesmo em situações em que ela é eliminada rapidamente, como em casos de atuação de proteções ultra-rápidas e disjuntores de abertura rápida. No entanto, este método de localização de faltas necessita da classificação da falta para selecionar adequadamente o modo aéreo a ser utilizado. Sendo assim, foi necessário utilizar um método que fosse capaz de classificar a falta nestas situações, pois a sua não utilização implicaria na perda da citada vantagem do método de localização de faltas.

Dentre os métodos existentes na literatura, foram identificados dois que necessitam como dados de entrada apenas da medição das primeiras ondas incidentes de modo aéreo e terra, os quais são apresentados nos seguintes artigos: Dong *et al.* (2009) e Sharafi *et al.* (2011). Baseado neles, foi proposto um novo método, que consiste em sua evolução.

## 4.2 HISTÓRICO E VISÃO GERAL DO MÉTODO DE CLASSIFICAÇÃO DE FALTAS PROPOSTO

Foi proposto em Dong *et al.* (2009) um método de classificação de faltas que necessita apenas da medição das primeiras ondas viajantes de corrente, sendo necessários ajustes de quatro limiares, sendo o primeiro para detecção das ondas de modo aéreo, o segundo para detecção da onda de modo terra ( $\epsilon_d$ ), o terceiro para acomodar erros de computação e de medição ( $\delta_d$ ) e o quarto obtido empiricamente ( $\phi_d$ ).

Em Sharafi *et al.* (2011) é proposto outro método de classificação de faltas baseado nos mesmos princípios apresentados em Dong *et al.* (2009), sendo necessário ajustar quatro limiares. Dois destes limiares são obtidos empiricamente ( $\delta_s, \lambda_s$ ) e os limiares para detecção das ondas de modo terra ( $\epsilon_s$ ) e de modo aéreo podem ser calculados. A principal diferença entre os métodos é a forma com que os equacionamentos são feitos. Em comparação com o método proposto em Dong *et al.* (2009), o método proposto em Sharafi *et al.* (2011) não utiliza comparações de polaridades e as comparações são realizadas com uma quantidade menor de equações. Em Sharafi *et al.* (2011), o motivo desta alteração em relação ao método proposto em Dong *et al.* (2009) não é justificada. No entanto, a utilização de equacionamento mais simples para realizar o mesmo objetivo justifica as alterações realizadas.

O método proposto neste trabalho se baseia no mesmo equacionamento proposto em Sharafi *et al.* (2011), com alterações realizadas de maneira reduzir a quantidade de limiares utilizados e facilitar os seus ajustes. São utilizados o limiar para detecção das primeiras ondas de modo aéreo ( $L_1$ ), o limiar para detecção da primeira onda de modo terra ( $L_0$ ) e o limiar de modo aéreo para diferenciação de faltas monofásicas de faltas bifásicas com terra ( $L'_1$ ). Estes limiares podem ser calculados a partir das informações da linha de transmissão monitorada.

## 4.3 FUNDAMENTO TEÓRICO

O fundamento teórico deste método de classificação de faltas é apresentado em Dong *et al.* (2009). A Transformação de Dong é aplicada, conforme equacionamento apresentado em (4.1), sendo que esta transformação é baseada na Transformação de Karrenbauer (KARRENBAUER,

1967 apud DOMMEL, 1969). Pode ser observado que em (4.1) são calculadas três ondas de modo aéreo ( $i_{d\alpha}$ ,  $i_{d\beta}$  e  $i_{d\gamma}$ ) e uma onda de modo terra ( $i_{d0}$ ) (DONG *et al.*, 2009).

$$\begin{bmatrix} i_{d\alpha} \\ i_{d\beta} \\ i_{d0} \\ i_{d\gamma} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

As condições de contorno para cada tipo de falta clássica em sistemas trifásicos são apresentadas na Tabela 3.3 e na Tabela 3.4. Aplicando estas condições de contorno em (4.1) e considerando um sistema equilibrado antes da falta ( $i_a + i_b + i_c = 0$ ), é possível construir as relações válidas para cada tipo de falta apresentadas na Tabela 4.1, sendo válidas para faltas que ocorrem por meio de uma resistência de falta.

**Tabela 4.1.** Relações das ondas viajantes de corrente para cada tipo de falta.

Tipo de Falta	$3i_{d\alpha}$	$3i_{d\gamma}$	$3i_{d\beta}$	$3i_{d0}$
AT	$i_a$	0	$i_a$	$i_a$
BT	$-i_b$	$i_b$	0	$i_b$
CT	0	$-i_c$	$-i_c$	$i_c$
ABT	$i_a - i_b$	$i_b$	$i_a$	$i_a + i_b$
BCT	$-i_b$	$i_b - i_c$	$-i_c$	$i_b + i_c$
CAT	$i_a$	$-i_c$	$i_a - i_c$	$i_a + i_c$
AB	$2i_a$	$-i_a$	$i_a$	0
BC	$-i_b$	$2i_b$	$i_b$	0
CA	$-i_c$	$-i_c$	$-2i_c$	0
ABC	$i_a - i_b$	$i_b - i_c$	$i_a - i_c$	0

**Fonte:** Adaptado de Dong *et al.* (2009).

#### 4.4 MÉTODOS PROPOSTOS NA LITERATURA

Nesta seção serão apresentados os métodos propostos na literatura. Para aplicação deles, considere que  $i_{d\alpha}^1$  representa a amplitude da primeira frente de onda de corrente de modo aéreo  $\alpha$  referenciada à Transformada de Dong,  $i_{d\beta}^1$  representa a amplitude da primeira frente de onda de corrente de modo aéreo  $\beta$  referenciada à Transformada de Dong,  $i_{d\gamma}^1$  representa a amplitude da primeira frente de onda de corrente de modo aéreo  $\gamma$  referenciada à Transformada de Dong e  $i_{d0}^1$  representa a amplitude da primeira frente de onda de corrente de modo terra

referenciada à Transformada de Dong. Esta primeira frente de onda é detectada utilizando o limiar de modo aéreo  $L_1$ , cujo cálculo é demonstrado na Seção 4.5.1.1. Na aplicação de todos os métodos, recomenda-se buscar a primeira frente de onda de modo terra no seu tempo esperado para chegada na pior situação, que pode ser calculado utilizando os parâmetros da linha monitorada.

#### 4.4.1 Método proposto por Dong *et al.* (2009)

Com base na Tabela 4.1, foi proposto o método apresentado em Dong *et al.* (2009), conforme demonstrado no fluxograma da Figura 4.1, que utiliza apenas as amplitudes das primeiras ondas detectadas de cada modo. O símbolo  $P$  significa a extração da polaridade da onda de interesse.

#### 4.4.2 Método proposto por Sharafi *et al.* (2011)

Com base na Tabela 4.1, foi proposto o método apresentado em (SHARAFI *et al.*, 2011), conforme demonstrado no fluxograma da Figura 4.2, que utiliza apenas as amplitudes das primeiras ondas detectadas de cada modo.

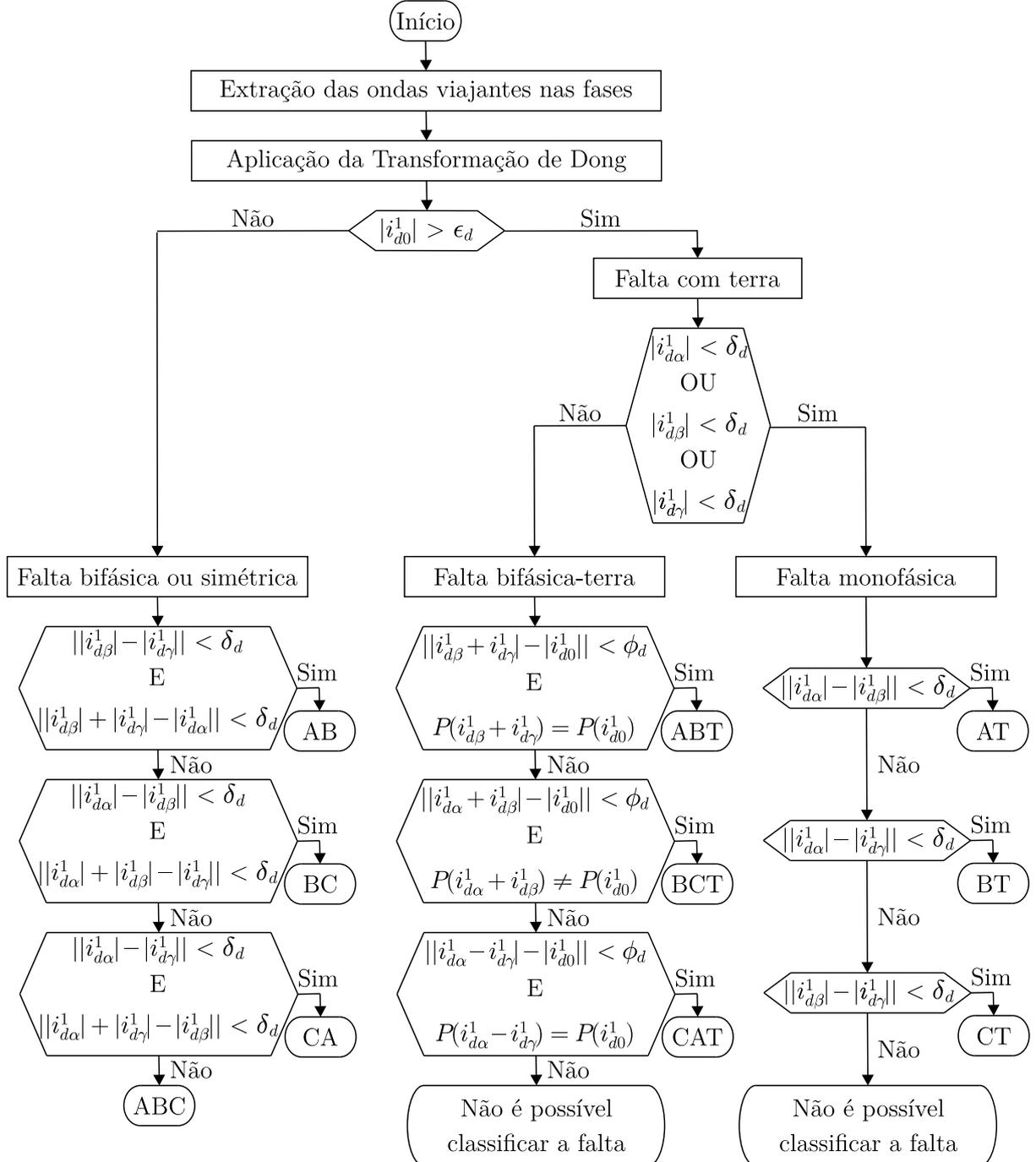
### 4.5 MÉTODO PROPOSTO

O algoritmo proposto neste trabalho é apresentado no fluxograma da Figura 4.3, sendo que os cálculos dos limiares utilizados serão apresentados na Seção 4.5.1

O método proposto neste trabalho se baseou nas equações apresentadas no método proposto por Sharafi *et al.* (2011), que consiste em uma evolução do método proposto por Dong *et al.* (2009). Pela característica apresentada, apenas o equacionamento utilizado em Sharafi *et al.* (2011) é passível de manipulação para eliminação da necessidade de utilização da maior parte dos limiares.

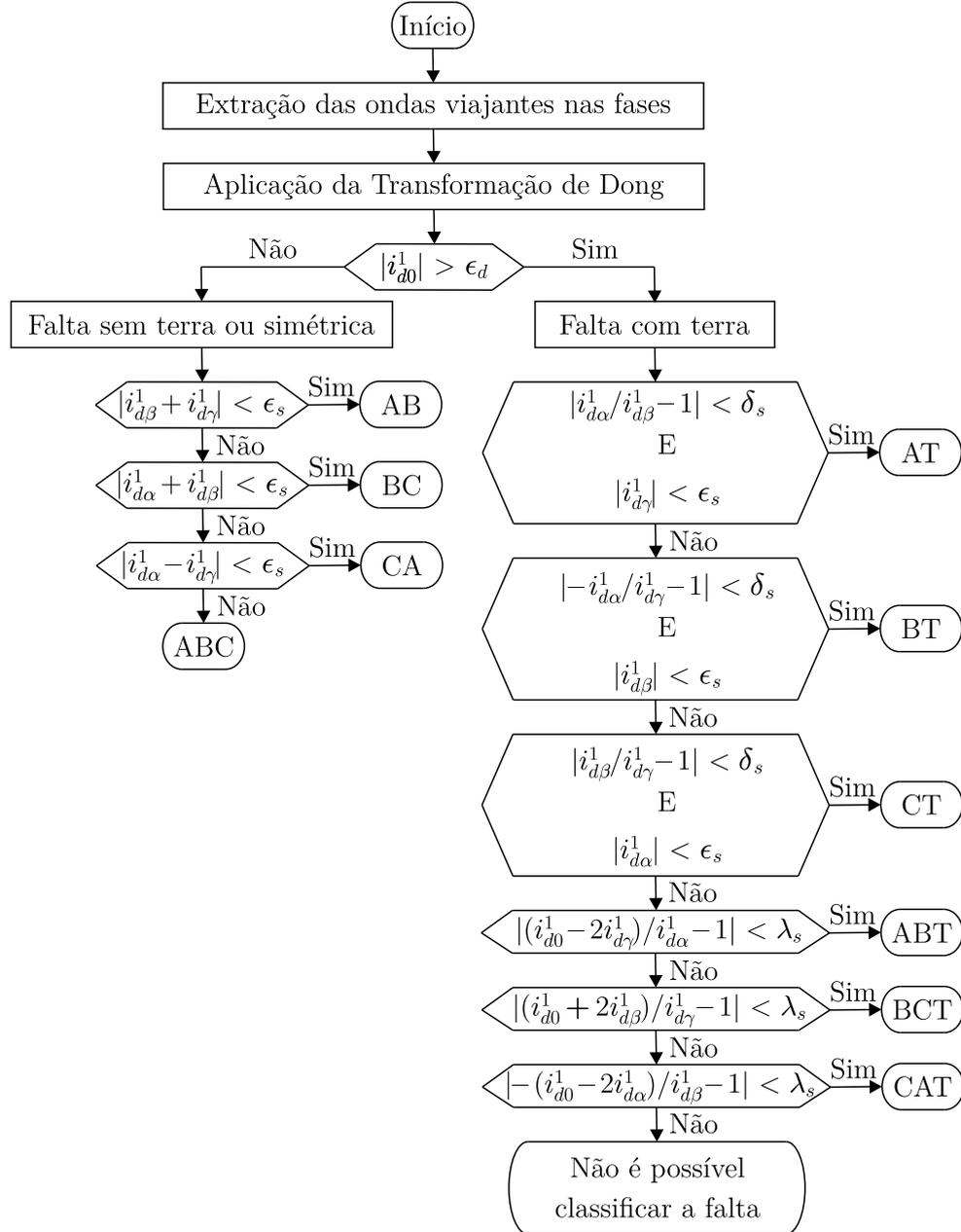
Assim, a principal vantagem do método proposto neste trabalho em relação aos anteriores é que, ao fazer comparação entre as equações, são eliminados a maior parte dos limiares neces-

Figura 4.1. Fluxograma do método de classificação de faltas proposto por Dong *et al.*

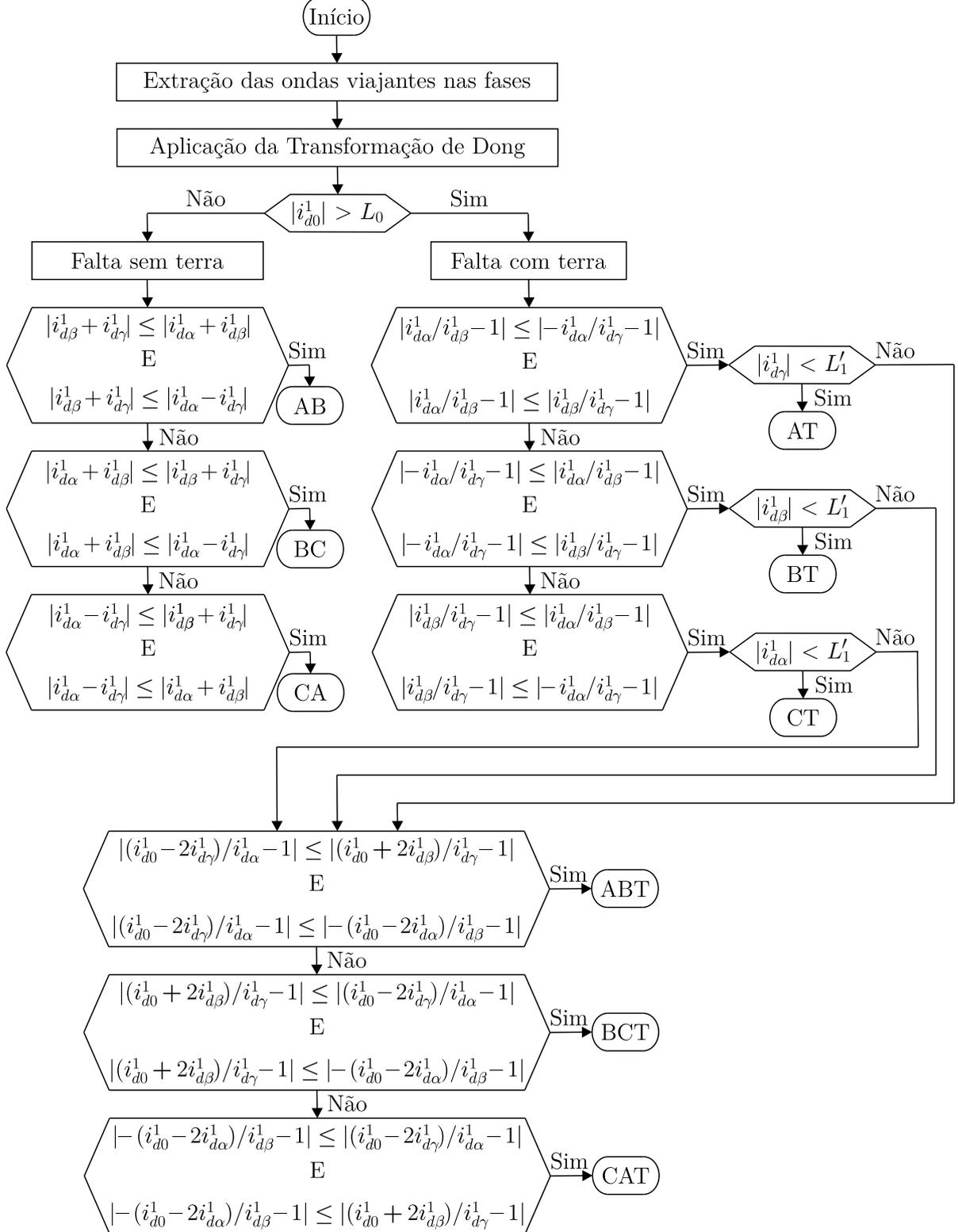


Fonte: Adaptado de Dong *et al.* (2009).

Figura 4.2. Fluxograma do método de classificação de faltas proposto por Sharafi *et. al.*



Fonte: Adaptado de Sharafi *et al.* (2011).

**Figura 4.3.** Fluxograma do método de classificação de faltas proposto neste trabalho.**Fonte:** Autoria própria.

sários. Além disso, os ajustes destes limiares podem ser calculados, tornando o seu ajuste mais simples e o método mais confiável.

Observa-se que o método proposto não é capaz de classificar faltas trifásicas, classificando-a como um dos três tipos de falta bifásica que não envolve a terra. No entanto, isto não é um problema para a correta seleção do modo aéreo a ser utilizado no método de localização de faltas proposto, pois qualquer modo aéreo pode ser utilizado para localizar faltas trifásicas, conforme mostrado no Capítulo 5.

#### **4.5.1 Limiares para detecção de ondas de corrente para fins de classificação de faltas**

Pode-se utilizar o valor das ondas lançadas pela falta como os limiares de detecção das ondas, multiplicando este valor pelo fator de atenuação  $FA$ . A demonstração deste fato será apresentada na Seção 5.8.1.

##### **4.5.1.1 Limiar de modo aéreo para detecção da primeira frente de onda**

Os limiares para detecção da primeira onda de modo aéreo, quando o tipo de falta é conhecido serão calculados na Seção 5.8.1. Como no presente caso o tipo de falta ainda não é conhecido, calculam-se todos os valores da Tabela 5.7 e utiliza-se o menor valor absoluto deles como limiar. Dessa forma, evitam-se problemas com falta de sensibilidade do método de classificação de faltas.

##### **4.5.1.2 Limiar de modo aéreo para fins de diferenciação de faltas monofásicas de faltas bifásicas com terra ( $L'_1$ )**

Para diferenciar faltas monofásicas de faltas bifásicas com a terra deve ser obtido o limiar  $L'_1$ , sendo que o seu cálculo deve ser feito de forma que ele seja menor que o menor valor absoluto esperado para as ondas de modo aéreo, utilizando a Transformação de Dong, em faltas bifásicas com terra. Para obter o valor deste limiar é elaborada a Tabela 4.2, aplicando as ondas de corrente lançadas nas fases obtidas na Tabela 3.5 em (4.1).

**Tabela 4.2.** Ondas viajantes de corrente modais com resistência de falta  $R_f$  - Dong.

Falta	Modo	Onda de Corrente Lançada
ABT	$d\alpha$	$-\frac{1}{3(Z_\alpha + 2R_f)}(e_{aF} - e_{bF})$
	$d\beta$	$-\frac{Z_0 + 2Z_\alpha + 6R_f}{3(Z_\alpha + 2R_f)(2Z_0 + Z_\alpha + 6R_f)}e_{aF} + \frac{Z_0 - Z_\alpha}{3(Z_\alpha + 2R_f)(2Z_0 + Z_\alpha + 6R_f)}e_{bF}$
	$d\gamma$	$\frac{Z_0 - Z_\alpha}{3(Z_\alpha + 2R_f)(2Z_0 + Z_\alpha + 6R_f)}e_{aF} - \frac{Z_0 + 2Z_\alpha + 6R_f}{3(Z_\alpha + 2R_f)(2Z_0 + Z_\alpha + 6R_f)}e_{bF}$
BCT	$d\alpha$	$\frac{Z_0 + 2Z_\alpha + 6R_f}{3(Z_\alpha + 2R_f)(2Z_0 + Z_\alpha + 6R_f)}e_{bF} - \frac{Z_0 - Z_\alpha}{3(Z_\alpha + 2R_f)(2Z_0 + Z_\alpha + 6R_f)}e_{cF}$
	$d\beta$	$-\frac{Z_0 - Z_\alpha}{3(Z_\alpha + 2R_f)(2Z_0 + Z_\alpha + 6R_f)}e_{bF} + \frac{Z_0 + 2Z_\alpha + 6R_f}{3(Z_\alpha + 2R_f)(2Z_0 + Z_\alpha + 6R_f)}e_{cF}$
	$d\gamma$	$-\frac{1}{3(Z_\alpha + 2R_f)}(e_{bF} - e_{cF})$
CAT	$d\alpha$	$\frac{Z_0 - Z_\alpha}{3(Z_\alpha + 2R_f)(2Z_0 + Z_\alpha + 6R_f)}e_{cF} - \frac{Z_0 + 2Z_\alpha + 6R_f}{3(Z_\alpha + 2R_f)(2Z_0 + Z_\alpha + 6R_f)}e_{aF}$
	$d\beta$	$\frac{1}{3(Z_\alpha + 2R_f)}(e_{cF} - e_{aF})$
	$d\gamma$	$\frac{Z_0 + 2Z_\alpha + 6R_f}{3(Z_\alpha + 2R_f)(2Z_0 + Z_\alpha + 6R_f)}e_{cF} - \frac{Z_0 - Z_\alpha}{3(Z_\alpha + 2R_f)(2Z_0 + Z_\alpha + 6R_f)}e_{aF}$

**Fonte:** Autoria própria.

Os valores das impedâncias de surto de modo terra e de modo aéreo da linha são conhecidos. Dessa forma, para obter um limiar a ser utilizado deve-se fazer uma estimativa para o valor da resistência de falta e para as tensões pré-falta no ponto de falta. Sabendo que as tensões em sistemas de corrente alternada trifásicos são senoidais e estão defasadas de  $120^\circ$  entre si, pode-se substituir as tensões pré-falta apresentadas na Tabela 4.2, conforme valores apresentados na Tabela 4.3, onde  $E_{MAX}$  representa o valor de pico da tensão fase-terra do sistema e  $\theta_{lim}$  representa o ângulo de incidência da falta conforme Tabela 5.5. Assim, obtém-se a Tabela 4.4, que pode ser simplificada na Tabela 4.5, tendo em vista que serão utilizados apenas os módulos dos valores. Desta forma, para obter  $L'_1$ , basta utilizar o menor valor dentre os obtidos na Tabela 4.5, multiplicado pelo fator de atenuação  $FA$ . Isto será suficiente para atender ao critério de que este limiar deverá ser menor que o menor valor absoluto esperado para as ondas de modo aéreo, utilizando a Transformação de Dong em faltas bifásicas com terra. Ressalta-se que o comportamento dos limiares  $\Lambda_1$ ,  $\Lambda_2$  e  $\Lambda_3$  frente a variação do ângulo de incidência  $\theta_{lim}$  deve ser levado em consideração para definição do valor mínimo de  $\theta_{lim}$  em que o método de classificação de faltas funcionará corretamente.

**Tabela 4.3.** Valores considerados para as tensões pré-falta - limiar para fins de diferenciação de faltas monofásicas de faltas bifásicas com terra.

Tipo de Falta	Tensão pré-falta	
	Original	Considerado
ABT	$e_{aF} - e_{bF}$	$\sqrt{3}E_{MAX} \text{sen}(\theta_{lim})$
ABT	$e_{aF}$	$E_{MAX} \text{sen}(\theta_{lim} - 30^\circ)$
ABT	$e_{bF}$	$E_{MAX} \text{sen}(\theta_{lim} - 150^\circ)$
BCT	$e_{bF} - e_{cF}$	$\sqrt{3}E_{MAX} \text{sen}(\theta_{lim})$
BCT	$e_{bF}$	$E_{MAX} \text{sen}(\theta_{lim} - 30^\circ)$
BCT	$e_{cF}$	$E_{MAX} \text{sen}(\theta_{lim} - 150^\circ)$
CAT	$e_{cF} - e_{aF}$	$\sqrt{3}E_{MAX} \text{sen}(\theta_{lim})$
CAT	$e_{cF}$	$E_{MAX} \text{sen}(\theta_{lim} - 30^\circ)$
CAT	$e_{aF}$	$E_{MAX} \text{sen}(\theta_{lim} - 150^\circ)$

**Fonte:** Autoria própria.**Tabela 4.4.** Limiar de modo aéreo para fins de diferenciação de faltas monofásicas de faltas bifásicas com terra.

Falta	Modo	Limiar
ABT	$d\alpha$	$-\frac{\sqrt{3}}{3(Z_\alpha + 2R_f)} E_{MAX} \text{sen} \theta_{lim}$
	$d\beta$	$\frac{E_{MAX}[-(Z_0 + 2Z_\alpha + 6R_f) \text{sen}(\theta_{lim} - 30^\circ) + (Z_0 - Z_\alpha) \text{sen}(\theta_{lim} - 150^\circ)]}{3(Z_\alpha + 2R_f)(2Z_0 + Z_\alpha + 6R_f)}$
	$d\gamma$	$\frac{E_{MAX}[(Z_0 - Z_\alpha) \text{sen}(\theta_{lim} - 30^\circ) - (Z_0 + 2Z_\alpha + 6R_f) \text{sen}(\theta_{lim} - 150^\circ)]}{3(Z_\alpha + 2R_f)(2Z_0 + Z_\alpha + 6R_f)}$
BCT	$d\alpha$	$\frac{E_{MAX}[(Z_0 + 2Z_\alpha + 6R_f) \text{sen}(\theta_{lim} - 30^\circ) - (Z_0 - Z_\alpha) \text{sen}(\theta_{lim} - 150^\circ)]}{3(Z_\alpha + 2R_f)(2Z_0 + Z_\alpha + 6R_f)}$
	$d\beta$	$\frac{E_{MAX}[-(Z_0 - Z_\alpha) \text{sen}(\theta_{lim} - 30^\circ) + (Z_0 + 2Z_\alpha + 6R_f) \text{sen}(\theta_{lim} - 150^\circ)]}{3(Z_\alpha + 2R_f)(2Z_0 + Z_\alpha + 6R_f)}$
	$d\gamma$	$-\frac{\sqrt{3}}{3(Z_\alpha + 2R_f)} E_{MAX} \text{sen} \theta_{lim}$
CAT	$d\alpha$	$\frac{E_{MAX}[(Z_0 - Z_\alpha) \text{sen}(\theta_{lim} - 30^\circ) - (Z_0 + 2Z_\alpha + 6R_f) \text{sen}(\theta_{lim} - 150^\circ)]}{3(Z_\alpha + 2R_f)(2Z_0 + Z_\alpha + 6R_f)}$
	$d\beta$	$\frac{\sqrt{3}}{3(Z_\alpha + 2R_f)} E_{MAX} \text{sen} \theta_{lim}$
	$d\gamma$	$\frac{E_{MAX}[(Z_0 + 2Z_\alpha + 6R_f) \text{sen}(\theta_{lim} - 30^\circ) - (Z_0 - Z_\alpha) \text{sen}(\theta_{lim} - 150^\circ)]}{3(Z_\alpha + 2R_f)(2Z_0 + Z_\alpha + 6R_f)}$

**Fonte:** Autoria própria.

**Tabela 4.5.** Limiar de modo aéreo para fins de diferenciação de faltas monofásicas de faltas bifásicas com terra - tabela simplificada.

Símbolo	Limiar
$\Lambda_1$	$\left  \frac{\sqrt{3}}{3(Z_\alpha + 2R_f)} E_{MAX} \text{sen } \theta_{lim} \right $
$\Lambda_2$	$\left  \frac{E_{MAX}[(Z_0 + 2Z_\alpha + 6R_f) \text{sen}(\theta_{lim} - 30^\circ) - (Z_0 - Z_\alpha) \text{sen}(\theta_{lim} - 150^\circ)]}{3(Z_\alpha + 2R_f)(2Z_0 + Z_\alpha + 6R_f)} \right $
$\Lambda_3$	$\left  \frac{E_{MAX}[(Z_0 - Z_\alpha) \text{sen}(\theta_{lim} - 30^\circ) - (Z_0 + 2Z_\alpha + 6R_f) \text{sen}(\theta_{lim} - 150^\circ)]}{3(Z_\alpha + 2R_f)(2Z_0 + Z_\alpha + 6R_f)} \right $

**Fonte:** Autoria própria.

#### 4.5.1.3 Limiar de modo terra para detecção da primeira frente de onda ( $L_0$ )

As ondas de modo terra são idênticas para cada tipo de falta, independentemente se for utilizada a Transformada de Dong ou qualquer referência para a Transformada de Clarke, como pode ser observado em (4.1), na Tabela 3.6, na Tabela 3.7, e na Tabela 3.8. Dessa forma, pode-se construir a Tabela 4.6, que mostra a onda de modo terra lançada para cada tipo de falta, sendo omitidas as faltas simétricas e as que não envolvem a terra, pois nestes casos não é lançada onda de modo terra.

**Tabela 4.6.** Onda de modo terra lançada para cada tipo de falta.

Tipo de Falta	Onda de Modo Terra Lançada
AT	$-\frac{1}{Z_0 + 2Z_\alpha + 6R_f} e_{aF}$
BT	$-\frac{1}{Z_0 + 2Z_\alpha + 6R_f} e_{bF}$
CT	$-\frac{1}{Z_0 + 2Z_\alpha + 6R_f} e_{cF}$
ABT	$-\frac{1}{2Z_0 + Z_\alpha + 6R_f} (e_{aF} + e_{bF})$
BCT	$-\frac{1}{2Z_0 + Z_\alpha + 6R_f} (e_{bF} + e_{cF})$
CAT	$-\frac{1}{2Z_0 + Z_\alpha + 6R_f} (e_{aF} + e_{cF})$

**Fonte:** Autoria própria.

Os valores das impedâncias de surto de modo terra e de modo aéreo da linha são conhecidos. Dessa forma, para obter um limiar a ser utilizado deve-se fazer uma estimativa para o valor da resistência de falta e para as tensões pré-falta no ponto de falta. Sabendo que as tensões em sistemas de corrente alternada trifásicos são senoidais e estão defasadas de  $120^\circ$  entre si, pode-se substituir as tensões pré-falta apresentadas na Tabela 4.6, conforme valores apresentados

na Tabela 4.7, onde  $E_{MAX}$  representa o valor de pico da tensão fase-terra do sistema e  $\theta_{lim}$  representa o ângulo de incidência da falta conforme Tabela 5.5.

**Tabela 4.7.** Valores considerados para as tensões pré-falta - modo terra.

Tipo de Falta	Tensão pré-falta	
	Original	Considerado
AT	$e_{aF}$	$E_{MAX} \text{ sen } \theta_{lim}$
BT	$e_{bF}$	$E_{MAX} \text{ sen } \theta_{lim}$
CT	$e_{cF}$	$E_{MAX} \text{ sen } \theta_{lim}$
ABT	$e_{aF} + e_{bF}$	$E_{MAX} \text{ sen } (\theta_{lim} - 90^\circ)$
BCT	$e_{bF} + e_{cF}$	$E_{MAX} \text{ sen } (\theta_{lim} - 90^\circ)$
CAT	$e_{cF} + e_{aF}$	$E_{MAX} \text{ sen } (\theta_{lim} - 90^\circ)$

**Fonte:** Autoria própria.

Substituindo as tensões pré-falta consideradas na Tabela 4.7 nas equações das ondas lançadas apresentadas na Tabela 4.6 obtém-se a Tabela 4.8, que indica o limiar a ser utilizado para cada tipo de falta.

**Tabela 4.8.** Limiar a ser considerado para cada tipo de falta - modo terra.

Tipo de Falta	Limiar
Monofásica	$\left  -\frac{1}{Z_0 + 2Z_\alpha + 6R_f} E_{MAX} \text{ sen } \theta_{lim} \right $
Bifásica com terra	$\left  -\frac{1}{2Z_0 + Z_\alpha + 6R_f} E_{MAX} \text{ sen } (\theta_{lim} - 90^\circ) \right $

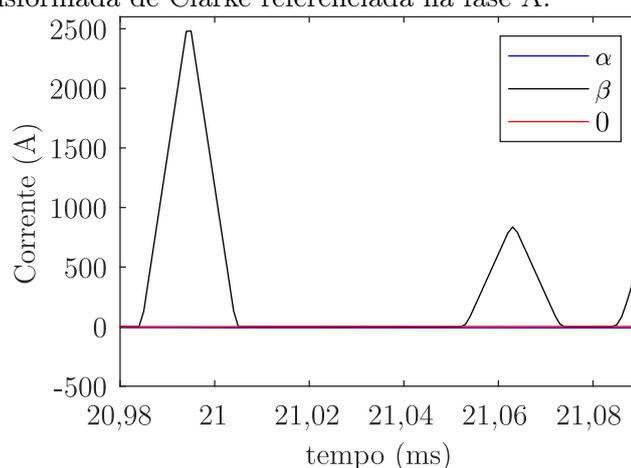
**Fonte:** Autoria própria.

Como o tipo de falta ainda não é conhecido, calculam-se todos os valores da Tabela 4.8, utilizando o menor valor como limiar, evitando problemas com falta de sensibilidade do método de classificação de faltas. Dos parâmetros utilizados na Tabela 4.8, sabe-se que os valores de  $Z_0$ ,  $Z_\alpha$  e  $E_{MAX}$  são conhecidos. Assim, os valores de  $R_f$  e  $\theta_{lim}$  devem ser ajustados para a sensibilidade desejada, tornando o algoritmo sensível a faltas e evitando a detecção errônea de ruídos como ondas. Pelas características dos valores apresentados na Tabela 4.8, não é recomendado utilizar um valor de  $\theta_{lim}$  próximo de  $0^\circ$  ou  $90^\circ$  para o ajuste, pois isto faria como que qualquer ruído fosse detectado como onda, o que não é desejável.

### 4.5.2 Faltas bifásicas com terra com ângulo de incidência de $90^\circ$

Pela Tabela 4.8, observa-se que para faltas bifásicas envolvendo a terra com ângulo de incidência próximo de  $90^\circ$ , poderá ocorrer a classificação desta falta como falta bifásica sem envolver a terra. Isto ocorrerá, pois a onda de modo terra lançada pela falta será próxima de zero, tornando difícil a sua detecção. Exemplo de situação em que isto ocorre ( $\theta_{lim} = 90^\circ$ ) e de situação em que isto não ocorre ( $\theta_{lim} = 45^\circ$ ), são mostradas nas simulações a seguir, que utilizam o sistema de potência, o sistema de aquisição de sinais e os limiares apresentados no Capítulo 6, sendo simuladas faltas sólidas na Linha 1 entre a fase B, a fase C e a terra, na distância de 15 km. Os resultados estão apresentados na Figura 4.4 e na Figura 4.5.

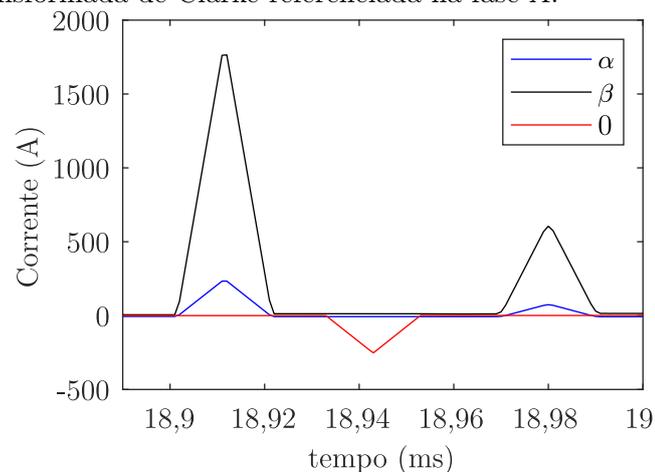
**Figura 4.4.** Falta bifásica com terra sólida na Linha 1 com ângulo de incidência de  $90^\circ$  - ondas modais obtidas por meio da Transformada de Clarke referenciada na fase A.



**Fonte:** Autoria própria.

No entanto, a situação exposta não será um problema para o método de localização de faltas, pois faltas ABT serão classificadas como faltas AB, faltas BCT serão classificadas como faltas BC e faltas CAT serão classificadas como CA, não alterando a seleção do modo aéreo a ser utilizado para localizar a falta, conforme pode ser observado na Tabela 5.2. Isto ocorre, pois nesta situação as correntes das fases envolvidas com a falta terão amplitude iguais e polaridades distintas no momento do lançamento da onda, o que faz como que a característica da falta bifásica com terra se iguale à característica da falta bifásica sem terra correspondente, conforme pode ser observado na Tabela 4.1.

**Figura 4.5.** Falta bifásica com terra sólida na Linha 1 com ângulo de incidência de  $45^\circ$  - ondas modais obtidas por meio da Transformada de Clarke referenciada na fase A.



**Fonte:** Autoria própria.

### 4.5.3 Aplicação do método proposto em linhas de transmissão paralelas

O método de classificação de faltas proposto se baseia na relação das componentes modais. Dessa forma em situação de aplicação do método em linhas de transmissão paralelas, independentemente da linha com falta, a medição em quaisquer das linhas poderá ser utilizada para obter a classificação da falta, tendo em vista que as relações não mudam ao refratar em junções com equipamentos balanceados e linhas transpostas. Assim, opta-se por utilizar a medição da linha que apresentar a maior onda inicial de modo aéreo, dentre as apresentadas na Tabela 5.2. Dessa forma, as instruções a seguir mostram a aplicação do método de classificação de faltas proposto.

- a) Obtêm-se os sinais digitalizados de corrente nas três fases das duas linhas paralelas na taxa de amostragem mínima de 1 MHz;
- b) Obtêm-se as correntes de modo aéreo a partir da Transformada de Clarke referenciada em cada uma das três fases ( $M_{CA}$ ,  $M_{CB}$  e  $M_{CC}$ ), totalizando seis sinais de corrente de modo aéreo;
- c) Aplica-se o Filtro DS, apresentado na Seção 5.3, em todos sinais de corrente de modo aéreo, obtendo os sinais de onda de corrente de modo aéreo;
- d) Calculam-se os limiares para detecção de ondas de corrente para fins de classificação de faltas, conforme procedimento apresentado na Seção 4.5.1. Estes limiares devem ser cal-

culados para os parâmetros das duas linhas de transmissão monitoradas, sendo utilizados os menores valores, de forma a evitar problemas com falta de sensibilidade do método de classificação de faltas;

- e) Para as ondas correntes de modo aéreo obtidas a partir da Transformada de Clarke referenciada em cada uma das três fases, detecta-se a primeira onda, sendo o instante de tempo associado a onda de maior amplitude chamado de tempo para classificação;
- f) A linha de transmissão selecionada para aplicação do algoritmo de classificação de faltas é a associada à onda de maior amplitude obtida no passo anterior;
- g) Obtêm-se as correntes modais a partir da Transformada de Dong, apresentada na Seção 4.3;
- h) Aplica-se o Filtro DS, apresentado na Seção 5.3, em todos sinais de corrente modais obtidos a partir da Transformada de Dong, obtendo os sinais de ondas de corrente modais de Dong;
- i) Classifica-se a falta a partir do procedimento descrito no fluxograma da Figura 4.3, onde os valores para as ondas de corrente de modo aéreo de Dong são aplicados no tempo para classificação obtido anteriormente. O valor para a onda de corrente de modo terra de Dong é aplicado no tempo em que a primeira onda de modo terra é detectada.

# LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS PARALELAS BASEADA NA TEORIA DE ONDAS VIAJANTES USANDO DADOS DE UM TERMINAL

Neste capítulo é apresentado um novo método de localização de faltas de um terminal baseado na teoria de ondas viajantes que utiliza apenas dados de corrente para linhas paralelas que possam ser consideradas transpostas e desacopladas. Este método utiliza esta topologia para contornar as principais dificuldades associadas a esta classe de métodos.

## 5.1 INTRODUÇÃO

A velocidade de propagação das ondas em linhas de transmissão podem ser obtidas por meio dos parâmetros das linhas ou por meio de testes de energização. Com este conhecimento e a medição de um intervalo de tempo, estima-se o caminho percorrido pelas ondas. Sendo assim, basta selecionar um intervalo de tempo cujas ondas tenham percorrido um caminho que envolva a distância da falta, de modo a estabelecer uma formulação para estimar o local da falta. Assim funcionam os métodos de localização de faltas baseados na teoria de ondas viajantes. Os que utilizam apenas um terminal, objeto de estudo deste trabalho, obtêm este intervalo de tempo medindo apenas o tempo de chegada de ondas que incidem no terminal monitorado. Desta forma, esta classe de métodos necessita medir a onda originalmente gerada pela falta e uma outra onda, sendo em geral a onda refletida no terminal monitorado e depois refletida no ponto de falta ou a onda refletida no terminal remoto e refratada no ponto de falta.

Analisando as Figuras 5.6 e 5.7, observa-se que as ondas que refletem no barramento remoto de linha adjacente conectada ao terminal monitorado incidem neste mesmo terminal monitorado. A depender do local da falta, esta onda será a segunda onda a incidir no terminal monitorado, sendo que ela não pode ser utilizada para localizar a falta, uma vez que não per-

correu a distância da falta. Desta forma, deve ser utilizada alguma solução para que estas ondas não sejam levadas em consideração para localizar a falta.

Observando novamente as Figuras 5.6 e 5.7, vê-se que a depender do local da falta, a segunda frente de onda que vem da direção da falta pode ser a onda que refletiu no terminal monitorado e depois refletiu no ponto de falta ou a onda que refletiu no terminal remoto e depois refratou no ponto de falta. Assim, fazer a distinção entre estes dois casos é fundamental.

O método proposto neste capítulo utiliza a topologia de linhas paralelas para contornar as principais dificuldades associadas aos métodos de localização de falta de um terminal baseado na teoria das ondas viajantes.

Utilizar a topologia de linhas paralelas requer que seja identificada de qual linha as ondas detectadas provieram, sendo este objetivo alcançado com o procedimento apresentado na Seção 5.5.

O problema da detecção de uma onda proveniente de uma linha adjacente curta conectada ao terminal monitorado no lugar da onda de interesse é contornado aplicando o Filtro Direcional Proposto apresentado na Seção 5.6, que faz com que só sejam detectadas ondas vindas da direção da falta.

O problema da correta classificação da segunda frente de onda vinda da direção da falta é contornado aplicando a metodologia descrita na Seção 5.9 e na Seção 5.10.

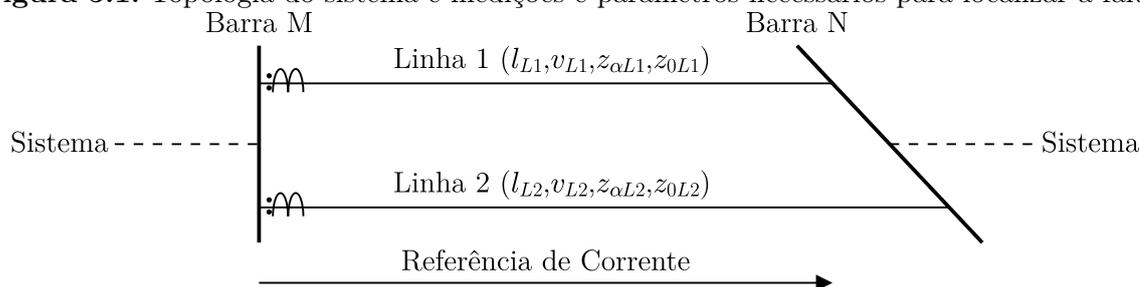
Por fim, o algoritmo de localização de faltas será apresentado de forma organizada na Seção 5.11.

## 5.2 TOPOLOGIA DO SISTEMA E MEDIÇÕES, PARÂMETROS E CONDIÇÕES NECESSÁRIOS PARA LOCALIZAR A FALTA

Definem-se linhas de transmissão paralelas como linhas que partem de uma mesma subestação local e chegam a uma mesma subestação remota, sendo estas linhas de transmissão nomeadas daqui por diante como Linha 1 e Linha 2. A Figura 5.1 mostra graficamente a topologia do sistema, o local de instalação das medições de corrente necessárias no terminal monitorado (Barra M), a referência de corrente que será utilizada e os parâmetros de cada

linha, conforme descrito na Tabela 5.1.

**Figura 5.1.** Topologia do sistema e medições e parâmetros necessários para localizar a falta.



**Fonte:** Autoria própria.

**Tabela 5.1.** Parâmetros das linhas de transmissão paralelas monitoradas.

Símbolo	Parâmetro
$l_{L1}$	Comprimento da Linha 1
$l_{L2}$	Comprimento da Linha 2
$v_{L1}$	Velocidade de propagação da onda de corrente de modo aéreo na Linha 1
$v_{L2}$	Velocidade de propagação da onda de corrente de modo aéreo na Linha 2
$z_{\alpha L1}$	Impedância de surto de modo aéreo da Linha 1
$z_{\alpha L2}$	Impedância de surto de modo aéreo da Linha 2
$z_{0L1}$	Impedância de surto de modo terra da Linha 1
$z_{0L2}$	Impedância de surto de modo terra da Linha 2

**Fonte:** Autoria própria.

O método proposto somente é aplicável a linhas de transmissão paralelas que possam ser consideradas transpostas, desacopladas e que não possuem derivação ao longo do seu trajeto, sendo que estas linhas podem apresentar características e comprimentos diferentes ou iguais entre si. O método só é capaz de estimar a localização da falta se ambas as linhas de transmissão paralelas estiverem em operação, sendo a linha com falta identificada. Para alcançar este objetivo são necessárias as medições de corrente nas três fases de cada uma das linhas paralelas no terminal escolhido para monitoramento. Também é necessário o conhecimento dos comprimentos, das impedâncias de surto e das velocidades de propagação das ondas de corrente modais em cada uma das linhas paralelas. A taxa de amostragem destas medições de corrente deverá ser suficiente para a detecção das ondas viajantes, sendo recomendado no mínimo 1 MHz (SEL, 2017).

Neste capítulo será feita a consideração de que os equipamentos conectados no terminal

monitorado são balanceados, sendo razoável esta assunção tendo em vista que os equipamentos trifásicos são construídos observando este princípio (GRAINGER; STEVENSON JR., 1994). Com relação às linhas de transmissão conectadas ao terminal monitorado, pode-se considerá-las transpostas (SPOOR; ZHU, 2006).

Conforme será mostrado na Seção 5.6, caso as impedâncias de surto das linhas de transmissão paralelas tenham valores próximos entre si, não é mais necessário conhecê-las para aplicar o Filtro Direcional Proposto, o que melhora as possibilidades de aplicação do método. Isto ocorre com frequência, pois linhas de transmissão do mesmo nível de tensão necessitam respeitar os mesmos espaçamentos elétricos de segurança, o que leva a apresentarem geometrias das disposições dos condutores semelhantes, resultando em impedâncias de surto com valores próximos entre si (GLOVER *et al.*, 2017).

O método proposto necessita que o terminal monitorado e o terminal remoto estejam conectados a sistemas que absorvam uma fração, mesmo que pequena, da energia advinda das ondas provenientes das duas linhas paralelas monitoradas. Essa assunção é razoável, tendo em vista que, além das linhas de transmissão paralelas, existirão outros equipamentos conectados no barramento monitorado. Estes equipamentos absorverão parte da energia destas ondas, conforme demonstrado no Capítulo 3.

Este método só é capaz de localizar a falta com segurança caso ela envolva somente uma das linhas. A evolução deste método de maneira a englobar faltas entre as duas linhas, que pode ocorrer quando elas estão instaladas na mesma estrutura (SHARAFI *et al.*, 2011), será objeto de trabalhos futuros.

### 5.3 PROCESSAMENTO DE SINAIS PARA EXTRAÇÃO DAS ONDAS VIAJANTES DE CORRENTE

Para extração das ondas viajantes de corrente será utilizado o Filtro *Differentiator Smoother* (Filtro DS), o qual vem sendo utilizado comercialmente, conforme apresentado nas seguintes referências: Schweitzer *et al.* (2014), Schweitzer *et al.* (2014) e SEL (2017). No entanto, é possível aplicar o método proposto utilizando outras técnicas.

Nos artigos que apresentam o Filtro DS é sugerido aplicar interpolação parabólica na sua

saída, objetivando melhorar a precisão do tempo de chegada da onda obtido. Conforme indicado nas citadas referências, aplica-se a interpolação utilizando cinco amostras, sendo a amostra central a de maior valor absoluto da saída do Filtro DS, verificada no intervalo que corresponde a onda de interesse. A interpolação só é utilizada caso o tempo de chegada obtido utilizando a interpolação esteja compreendido no intervalo de tempo correspondente às amostras utilizadas para a realização desta interpolação. Esta situação pode não ocorrer em caso de sobreposição de duas ondas sucessivas, o que pode distorcer a forma de onda obtida na saída do Filtro DS.

#### 5.4 NECESSIDADE DE SELEÇÃO DE MODO AÉREO ESPECÍFICO PARA CADA TIPO DE FALTA

A referência SEL (2017) recomenda utilizar, para as funções de proteção e localização de faltas baseadas em ondas viajantes de corrente, as ondas de corrente de modo aéreo de acordo com o tipo de falta, conforme indicado na Tabela 5.2.

**Tabela 5.2.** Modo aéreo da onda viajante de corrente a ser utilizado para cada tipo de falta.

<b>Tipo de Falta</b>	<b>Transformação Modal Utilizada</b>	<b>Modo Aéreo Utilizado</b>
AT	Clarke Referenciada na Fase A ( $M_{CA}$ )	Alfa ( $\alpha$ )
BT	Clarke Referenciada na Fase B ( $M_{CB}$ )	Alfa ( $\alpha$ )
CT	Clarke Referenciada na Fase C ( $M_{CC}$ )	Alfa ( $\alpha$ )
ABT	Clarke Referenciada na Fase C ( $M_{CC}$ )	Beta ( $\beta$ )
BCT	Clarke Referenciada na Fase A ( $M_{CA}$ )	Beta ( $\beta$ )
CAT	Clarke Referenciada na Fase B ( $M_{CB}$ )	Beta ( $\beta$ )
AB	Clarke Referenciada na Fase C ( $M_{CC}$ )	Beta ( $\beta$ )
BC	Clarke Referenciada na Fase A ( $M_{CA}$ )	Beta ( $\beta$ )
CA	Clarke Referenciada na Fase B ( $M_{CB}$ )	Beta ( $\beta$ )
ABC	Clarke Referenciada em qualquer fase ( $M_{CA}$ ou $M_{CB}$ ou $M_{CC}$ )	Alfa ou Beta ( $\alpha$ ou $\beta$ )

**Fonte:** Autoria própria.

Analisando o apresentado nas Tabelas 3.6 a 3.9 e nas Equações (3.75) a (3.94), pode-se verificar a razão da recomendação da utilização dos modos conforme a Tabela 5.2. O motivo é que esta escolha para faltas monofásicas e bifásicas sem envolver a terra faz com que as amplitudes das ondas lançadas sejam maiores, os coeficientes de reflexão e refração no ponto de

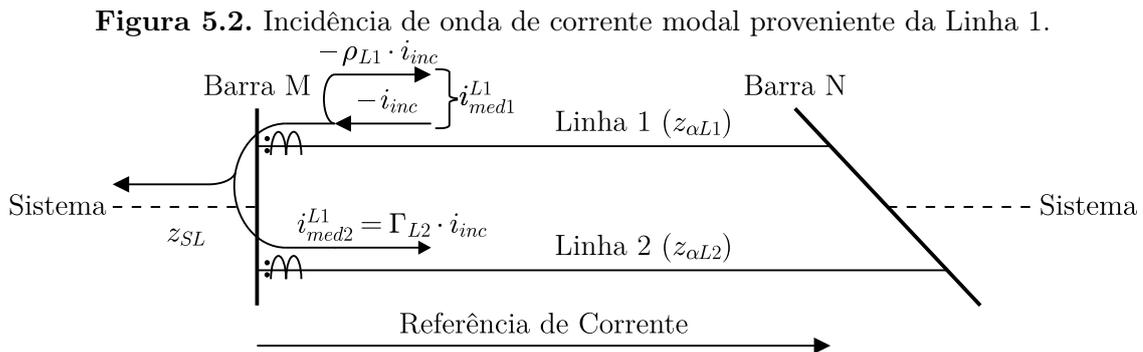
falta sejam positivos e tenham amplitudes maiores que nos outros casos. Para o caso de faltas bifásicas envolvendo a terra, o modo apresentado na Tabela 5.2 é independente dos outros modos e os coeficientes de reflexão e refração no ponto de falta são positivos. Estes fatores facilitam a detecção da primeira onda e das ondas subsequentes e possibilitam a classificação da segunda frente de onda por meio do critério de polaridade, que será detalhado na Seção 5.9.

No caso de faltas trifásicas ou simétricas, observa-se que independente do referencial da Transformada de Clarke utilizado, as ondas modais lançadas serão semelhantes e as matrizes de coeficientes de reflexão e refração serão diagonais e iguais, com todos seus elementos positivos. Assim, para este caso, pode-se utilizar qualquer onda aérea obtida utilizando a Transformada de Clarke referenciada em quaisquer das três fases.

## 5.5 IDENTIFICAÇÃO DA LINHA DE TRANSMISSÃO DE ONDE A ONDA DETECTADA PROVEIO

Para identificar de qual linha a onda detectada proveio basta verificar, dentre as ondas medidas simultaneamente nas duas linhas paralelas monitoradas, a de maior amplitude. Todas ondas medidas são verificadas simultaneamente nas duas linhas, pois quando a onda incide no terminal monitorado ela refrata para a outra linha. A dedução do método é apresentada a seguir utilizando o modo aéreo, porém ela pode ser feita para o modo terra.

A Figura 5.2 ilustra o caso em que a onda de corrente de modo aéreo detectada proveio da Linha 1, sendo refratada para a outra linha paralela com polaridade invertida, de modo a levar em consideração a inversão relativa de polaridade dos TCs com respeito às ondas de corrente incidente e refratada para a Linha 2.



**Fonte:** Autoria própria.

Considerando que o sistema tem impedância de surto  $z_{SL}$ , que a onda de corrente de modo aéreo provém da Linha 1 e que os equipamentos conectados no barramento monitorado são balanceados, podem ser calculados, conforme método descrito na Seção 3.1.2.2, os coeficientes de reflexão para corrente de modo aéreo e de refração para corrente de modo aéreo que refrata para a Linha 2, conforme (5.1) e (5.2), respectivamente.

$$\rho_{L1} = \frac{z_{\alpha L1} - Z_{eqL1}}{z_{\alpha L1} + Z_{eqL1}} \rightarrow Z_{eqL1} = \frac{z_{SL} \cdot z_{\alpha L2}}{z_{SL} + z_{\alpha L2}} \quad (5.1)$$

$$\Gamma_{L2} = \frac{Z_{eqL1}}{z_{\alpha L2}} \frac{2z_{\alpha L1}}{z_{\alpha L1} + Z_{eqL1}} \rightarrow Z_{eqL1} = \frac{z_{SL} \cdot z_{\alpha L2}}{z_{SL} + z_{\alpha L2}} \quad (5.2)$$

A onda de corrente de modo aéreo obtida a partir da medição no TC da Linha 1 é a sobreposição da onda de corrente incidente ( $-i_{inc}$ ) com a onda de corrente refletida ( $-\rho_{L1}i_{inc}$ ) e onda de corrente de modo aéreo obtida a partir da medição no TC da Linha 2 é a onda refratada com sinal invertido ( $\Gamma_{L2}i_{inc}$ ). Com este conhecimento, pode-se calcular a razão entre elas, conforme (5.3).

$$R_{L1} = \frac{-(1 + \rho_{L1})i_{inc}}{\Gamma_{L2}i_{inc}} \quad (5.3)$$

Aplicando (5.1) e (5.2) em (5.3), e eliminando a dependência da onda incidente, obtém-se (5.4).

$$R_{L1} = -\frac{z_{SL} + z_{\alpha L2}}{z_{SL}} \quad (5.4)$$

Quando a onda de corrente de modo aéreo provém da Linha 2, pode-se calcular a razão entre a onda de corrente de modo aéreo obtida a partir da medição no TC da Linha 2 e a onda de corrente de modo aéreo obtida a partir da medição no TC da Linha 1, de maneira similar a obtida anteriormente para o caso em que a onda provém da Linha 1. Nesta caso, obtém-se (5.5).

$$R_{L2} = -\frac{z_{SL} + z_{\alpha L1}}{z_{SL}} \quad (5.5)$$

Como  $z_{\alpha L1} > 0$ ,  $z_{\alpha L2} > 0$  e  $z_{SL} > 0$ , conclui-se que  $|R_{L1}| > 1$  e  $|R_{L2}| > 1$ . Desta forma, fica demonstrado que a onda de corrente de modo aéreo com maior módulo indica a linha que a onda proveio.

## 5.6 FILTRO DIRECIONAL PARA ELIMINAÇÃO DO EFEITO DAS LINHAS ADJACENTES

Um dos problemas associados a métodos de um terminal baseados na teoria de ondas viajantes é a detecção de uma onda proveniente de uma linha adjacente curta conectada ao terminal monitorado no lugar da onda de interesse, conforme já apresentado no Capítulo 2. Quando o método se baseia na detecção da onda refletida no ponto de falta, o problema surge quando a falta está localizada em uma distância do terminal monitorado maior do que a menor linha conectada a este mesmo terminal. Quando o método se baseia na detecção da onda refletida no terminal remoto e refratada no ponto de falta, o problema surge quando a falta está localizada em uma distância do terminal remoto maior do que a menor linha conectada ao terminal monitorado. Na Seção (5.7), a Figura 5.6 e a Figura 5.7 ilustram estas situações críticas para o caso de falta com terra e sem terra, respectivamente.

De modo a contemplar cenários em que ondas provenientes de linhas adjacentes incidem no terminal monitorado em instante de tempo muito próximo da segunda frente de onda vinda da direção das linhas paralelas monitoradas, foi elaborado um filtro digital, que será chamado de Filtro Direcional Proposto, de maneira a eliminar o efeito destas ondas provenientes de linhas adjacentes. Os princípios do seu desenvolvimento e o algoritmo serão apresentados nesta seção para aplicação em ondas de modo aéreo, porém pode ser verificado na dedução que ele é aplicável para ondas de modo terra.

### 5.6.1 Demonstração do Filtro Direcional Proposto

As ondas de corrente modais vindas de linhas adjacentes e refratadas para as linhas paralelas monitoradas podem ser calculadas conforme as expressões (5.6) e (5.7), pois todos equipamentos conectados ao barramento monitorado podem ser considerados balanceados, o que torna possível o cálculo dos coeficientes de refração de maneira escalar, conforme procedimento descrito na Seção 3.1.2.2.

$$i_{adj1} = \Gamma_{ADJ1} i_{adj} \rightarrow \Gamma_{ADJ1} = \frac{Zeq_{ADJ}}{z_{\alpha L1}} \frac{2z_{SL}}{z_{SL} + Zeq_{ADJ}} \rightarrow Zeq_{ADJ} = \frac{z_{\alpha L1} \cdot z_{\alpha L2}}{z_{\alpha L1} + z_{\alpha L2}} \quad (5.6)$$

$$i_{adj2} = \Gamma_{ADJ2} i_{adj} \rightarrow \Gamma_{ADJ2} = \frac{Zeq_{ADJ}}{z_{\alpha L2}} \frac{2z_{SL}}{z_{SL} + Zeq_{ADJ}} \rightarrow Zeq_{ADJ} = \frac{z_{\alpha L1} \cdot z_{\alpha L2}}{z_{\alpha L1} + z_{\alpha L2}} \quad (5.7)$$

Define-se a constante  $C_{adj}$ , conforme (5.8). Dessa forma, a partir de (5.6) e (5.7), chega-se em (5.9) e (5.10).

$$C_{adj} = \frac{2z_{SL}Z_{eqADJ}}{z_{SL} + Z_{eqADJ}}i_{adj} \quad (5.8)$$

$$i_{adj1} = \frac{C_{adj}}{z_{\alpha L1}} \quad (5.9)$$

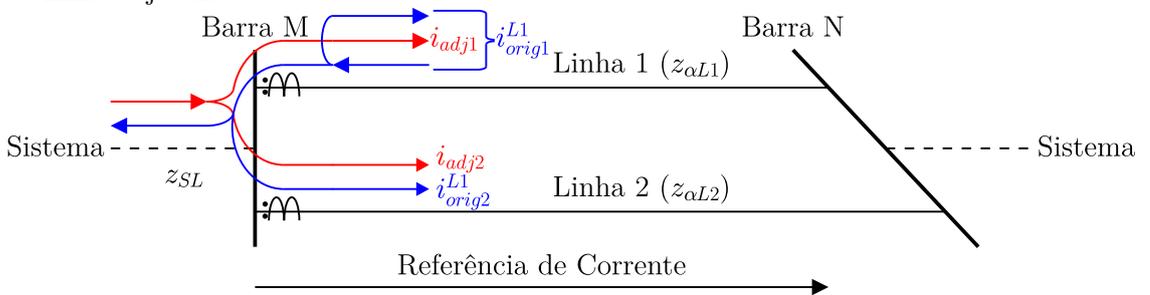
$$i_{adj2} = \frac{C_{adj}}{z_{\alpha L2}} \quad (5.10)$$

Com exceção do caso detalhado em 5.10.3, existem duas possibilidades de sobreposição entre a onda de corrente modal vinda da linha adjacente e a segunda frente de onda de corrente modal vinda da direção das linhas paralelas monitoradas:

- Sobreposição de onda de corrente modal vinda da Linha 1 com onda de corrente modal vinda de linha adjacente;
- Sobreposição de onda de corrente modal vinda da Linha 2 com onda de corrente modal vinda de linha adjacente.

A sobreposição de onda de corrente modal vinda da Linha 1 com onda de corrente modal vinda de linha adjacente é ilustrada na Figura 5.3. Neste caso, a onda de corrente modal obtida a partir das medições em cada conjunto de TCS das duas linhas monitoradas pode ser expressa conforme (5.11) e (5.12).

**Figura 5.3.** Sobreposição de onda de corrente modal vinda da Linha 1 com onda de corrente modal vinda de linha adjacente.



**Fonte:** Autoria própria.

$$i_{med1}^{L1} = i_{orig1}^{L1} + i_{adj1} \quad (5.11)$$

$$i_{med2}^{L1} = i_{orig2}^{L1} + i_{adj2} \quad (5.12)$$

O objetivo do Filtro Direcional Proposto é eliminar o efeito da onda vinda da linha adjacente, encontrando a onda original caso a linha adjacente não existisse. Assim, substituindo (5.9) em (5.11) e (5.10) em (5.12) e reorganizando, obtêm-se (5.13) e (5.14).

$$i_{orig1}^{L1} = i_{med1}^{L1} - \frac{C_{adj}}{z_{\alpha L1}} \quad (5.13)$$

$$i_{orig2}^{L1} = i_{med2}^{L1} - \frac{C_{adj}}{z_{\alpha L2}} \quad (5.14)$$

De (5.4) sabe-se que para ondas provenientes da Linha 1, a relação entre  $i_{orig1}^{L1}$  e  $i_{orig2}^{L1}$  é um valor constante e igual a  $R_{L1}$ . Caso a primeira frente de onda provenha da Linha 1, o valor de  $R_{L1}$  pode ser obtido a partir das medições nos TCs das duas linhas paralelas monitoradas. Sendo assim, dividindo (5.13) por (5.14) e reorganizando, obtêm-se (5.15).

$$C_{adj} = \frac{R_{L1} i_{med2}^{L1} - i_{med1}^{L1}}{\frac{R_{L1}}{z_{\alpha L2}} - \frac{1}{z_{\alpha L1}}} \quad (5.15)$$

Conhecido o valor de  $C_{adj}$ , pode-se obter as ondas originais caso a linha adjacente não existisse conforme (5.13) e (5.14).

Para o caso de sobreposição de onda de corrente modal vinda da Linha 2 com onda de corrente modal vinda de linha adjacente, o valor de  $C_{adj}$  pode ser obtido de maneira similar, conforme (5.16). Neste caso, as expressões (5.13) e (5.14) são adaptadas para o caso de que a onda de corrente inicial provém da Linha 2.

$$C_{adj} = \frac{R_{L2} i_{med1}^{L2} - i_{med2}^{L2}}{\frac{R_{L2}}{z_{\alpha L1}} - \frac{1}{z_{\alpha L2}}} \quad (5.16)$$

Caso as linhas paralelas monitoradas tenham características semelhantes de tal forma que possa ser considerado que  $z_{\alpha L1} = z_{\alpha L2}$ , então não é necessário conhecer as impedâncias de surto das linhas para obter as ondas originais caso a linha adjacente não existisse. Isto ocorre, pois por meio de (5.15) ou (5.16) seria possível calcular o valor de  $\frac{C_{adj}}{z_{\alpha L1}}$  ou  $\frac{C_{adj}}{z_{\alpha L2}}$  diretamente, utilizando-o em (5.13) e (5.14), sendo adaptadas quando a onda inicial provier da Linha 2.

### 5.6.2 Aplicação do Filtro Direcional Proposto

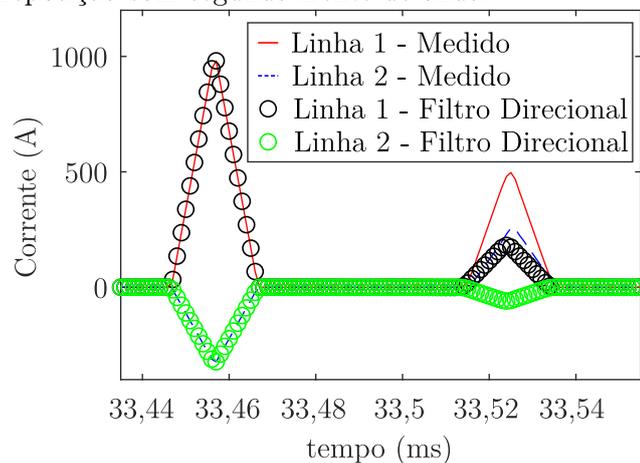
Para que a função do Filtro Direcional seja cumprida é indiferente assumir que a onda vinda das linhas monitoradas provém da Linha 1 ou da Linha 2, pois as polaridades das ondas de

corrente modais originais serão mantidas. Conforme apresentado em (5.4) e em (5.5),  $R_{L1}$  e  $R_{L2}$  são constantes, podendo ser obtidos a partir da medição da primeira frente de onda de corrente modal caso ela provenha da Linha 1 ou da Linha 2, respectivamente. Assim, para a primeira frente de onda de corrente modal, identifica-se de qual linha ela proveio conforme técnica apresentada na Seção 5.5. Caso a primeira frente de onda de corrente modal provenha da Linha 1 assume-se, para aplicação do Filtro Direcional, que as outras frentes de onda de corrente modais provêm da Linha 1, obtendo  $C_{adj}$  conforme (5.15). De maneira similar, caso a primeira frente de onda de corrente modal provenha da Linha 2 assume-se, para aplicação do Filtro Direcional, que as outras frentes de onda de corrente modais provêm da Linha 2, obtendo  $C_{adj}$  conforme (5.16). As ondas de corrente vindas da direção das linhas monitoradas são obtidas a partir de (5.13) e (5.14), adaptada para quando a onda inicial provier da Linha 2.

### 5.6.3 Exemplo de aplicação do Filtro Direcional Proposto

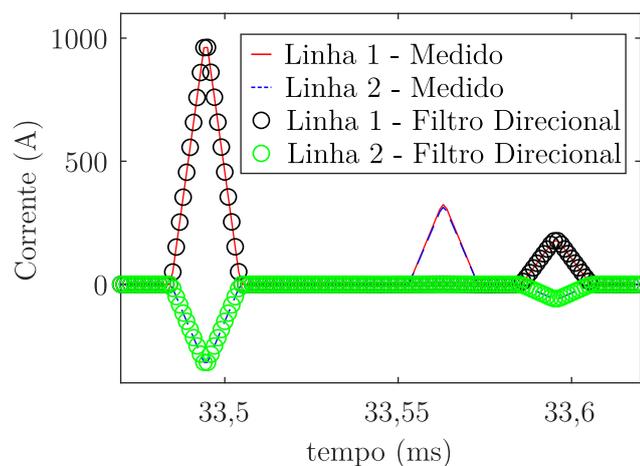
Nesta seção serão apresentados dois exemplos de aplicação do Filtro Direcional, mostrando a eliminação do efeito das ondas provenientes de linhas adjacentes. Para realizar estas simulações será utilizado o sistema de potência, o sistema de aquisição de sinais e os limiares apresentados no Capítulo 6. Em ambos os casos foram simuladas faltas sólidas na Linha 1 entre a fase A e a terra, ocorrendo no instante do valor de pico da tensão entre a fase A e a terra no ponto de falta. No primeiro caso a distância simulada da falta foi de 10 km e no segundo caso foi de 15 km. Como as linhas adjacentes conectadas ao terminal monitorado possuem a extensão de 10 km, ambos os casos ilustrarão a ação do Filtro Direcional em eliminar o efeito das linhas adjacentes, sendo que o primeiro, mostrado na Figura 5.4, mostra a situação em que houve sobreposição de onda proveniente de linha adjacente com a segunda frente de onda ao passo que no segundo, mostrado na Figura 5.5, isto não ocorre.

**Figura 5.4.** Demonstração do Filtro Direcional - eliminação do efeito de onda proveniente de linha adjacente quando há sobreposição com segunda frente de onda.



**Fonte:** Autoria própria.

**Figura 5.5.** Demonstração do Filtro Direcional - eliminação do efeito de onda proveniente de linha adjacente.

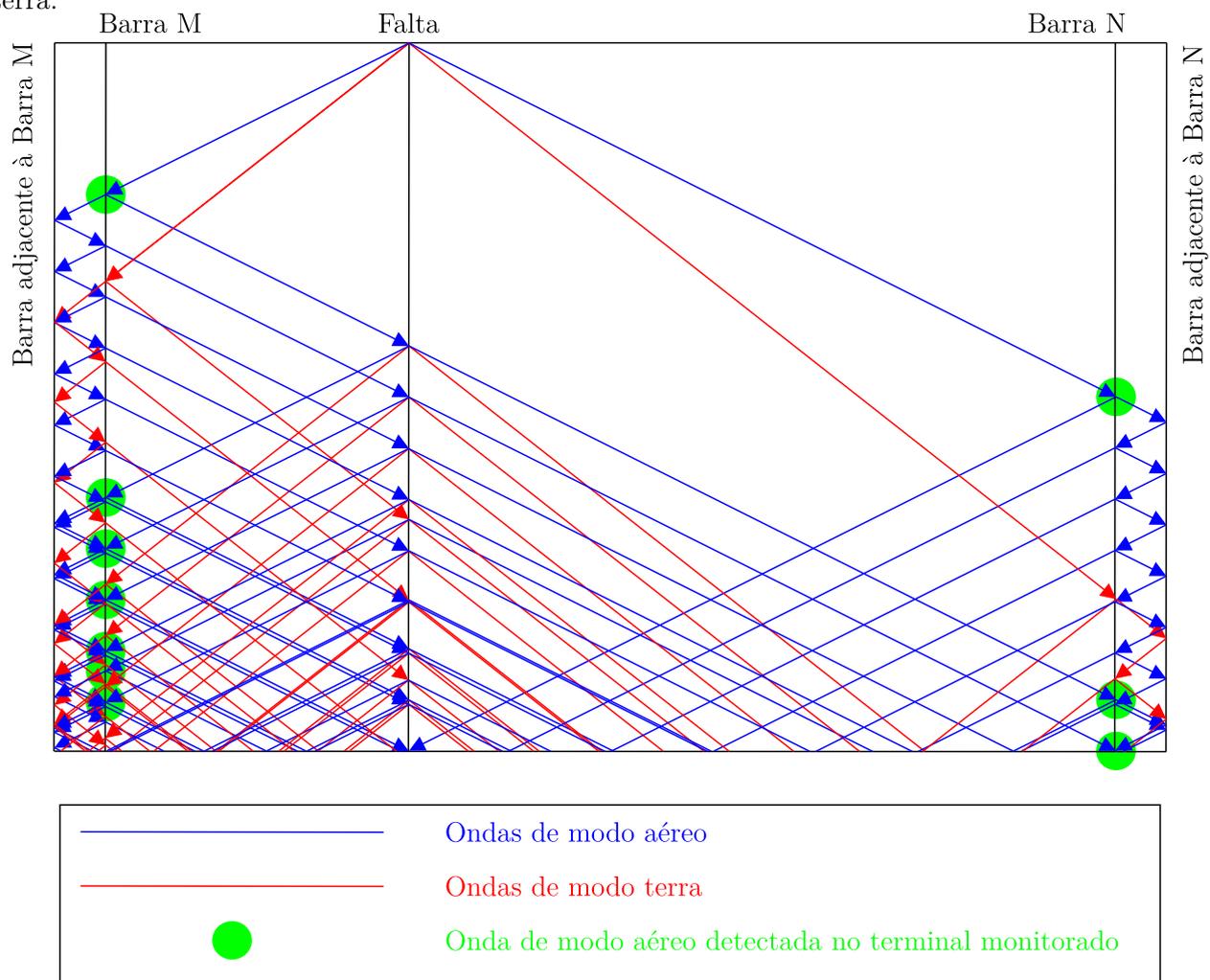


**Fonte:** Autoria própria.

## 5.7 NECESSIDADE DE UTILIZAR APENAS A PRIMEIRA E A SEGUNDA FRENTES DE ONDA DE MODO AÉREO PROVENIENTES DA DIREÇÃO DA FALTA

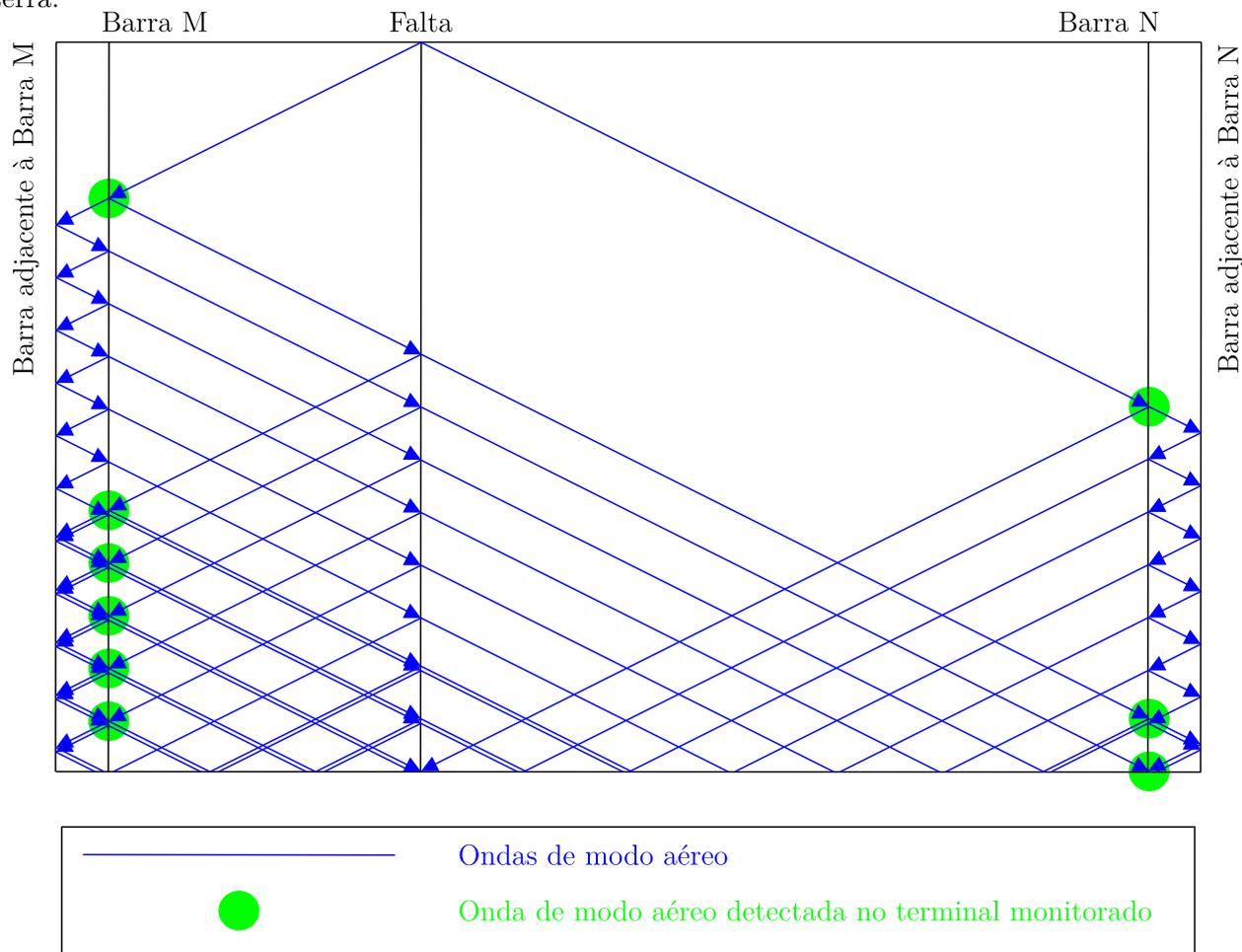
Analisando os diferentes cenários possíveis de falta e topologia do sistema, percebe-se que para localizar a falta com segurança é necessário utilizar apenas a primeira e a segunda frentes de onda de corrente de modo aéreo detectadas, sendo que a segunda frente de onda deve ser detectada utilizando os sinais de saída do Filtro Direcional. A Figura 5.6 e a Figura 5.7 apresentam diagramas de treliça de Bewley para casos de faltas que envolvem a terra e faltas que não envolvem a terra, respectivamente, considerando linhas curtas adjacentes conectadas nos dois terminais das linhas de transmissão paralelas monitoradas. As frentes de onda de corrente de modo aéreo detectadas em cada terminal de maneira independente são ilustradas na Figura 5.6 e na Figura 5.7. Percebe-se que o Filtro Direcional Proposto elimina a detecção das ondas de corrente de modo aéreo que provêm das linhas adjacentes conectadas ao terminal monitorado, mas não elimina a detecção das ondas de corrente de modo aéreo que provêm das linhas adjacentes conectadas ao terminal remoto. Além disso, as ondas de corrente de modo aéreo que provêm das linhas adjacentes conectadas ao terminal monitorado adentram nas linhas monitoradas e refletem na falta e no sistema à jusante, voltando para o terminal monitorado. Estas ondas de corrente de modo aéreo que retornam são detectadas pelo Filtro Direcional Proposto, tendo em vista que provêm da direção das linhas monitoradas. Desta forma, o Filtro Direcional Proposto só é eficiente se for aplicado juntamente com uma técnica que localize a falta corretamente utilizando apenas a primeira e a segunda frentes de ondas de corrente de modo aéreo provenientes da direção da falta.

**Figura 5.6.** Diagrama de Treliça de Bewley para caso com linhas adjacentes - faltas envolvendo a terra.



**Fonte:** Autoria própria.

**Figura 5.7.** Diagrama de Treliça de Bewley para caso com linhas adjacentes - faltas sem envolver a terra.



**Fonte:** Autoria própria.

## 5.8 LIMIARES DE DETECÇÃO

Todos limiares calculados serão positivos e devem ser aplicados ao módulo do sinal de saída do Filtro DS ou ao módulo do sinal de saída do Filtro Direcional, todos obtidos a partir da onda de corrente modal de interesse e em uma das linhas de transmissão monitoradas.

O limiar de detecção da primeira onda de modo aéreo é fixo e calculado a partir das informações do sistema e sensibilidade desejada para o algoritmo, conforme apresentado na Seção 5.8.1.

O limiar de detecção da segunda frente de onda é calculado para cada evento de falta, de maneira a possibilitar a sua detecção, pois geralmente ela é atenuada em relação à primeira frente de onda. Este procedimento é mostrado na Seção 5.8.2.

Um exemplo de gráfico dos limiares obtidos nas seções 5.8.1 e 5.8.2 para um caso simulado é mostrado na Seção 5.8.3.

### 5.8.1 Limiar para detecção da primeira frente de onda de corrente de modo aéreo

O limiar para detecção da primeira frente de onda será aplicado na onda obtida por meio das medições nos TCs, que é composta pela superposição da onda incidente com a onda refletida. Considerando que as linhas monitoradas estão em paralelo, conforme configuração apresentada na Figura 5.1, percebe-se que a impedância de surto equivalente vista pela onda incidente oscilará entre 0 e o valor da impedância de surto da outra linha, que têm valor próximo da linha em análise (GLOVER *et al.*, 2017). Desta forma, conforme mostrado em (5.1), o valor do coeficiente de reflexão no ponto de medição oscilará entre valores próximos de 0 e 1. Sendo assim, a medição da primeira frente de onda terá valor absoluto igual ou maior ao valor da onda incidente. Se a atenuação da onda devido ao tráfego na linha de transmissão não for considerada, o valor da primeira onda incidente será igual ou maior em módulo ao valor da onda lançada pela falta. Dessa forma, é possível utilizar como limiar de detecção o módulo do valor da onda lançada pela falta, pois este terá um valor menor ou igual ao módulo da onda obtida por meio das medições nos TCs das linhas monitoradas. A atenuação da onda devido ao tráfego na linha será considerado por meio de um fator de atenuação denominado  $FA$ , que representa o porcentual da onda atenuada devido ao tráfego na linha. Este fator também deverá acomodar eventuais erros de medição e deverá ser multiplicado pelos limiares calculados nesta seção e na Seção 4.5.1, que apresenta os cálculos dos limiares para fins de classificação de faltas.

A Tabela 3.6, a Tabela 3.7 e a Tabela 3.8 apresentam as ondas de corrente de modo aéreo lançadas para cada tipo clássico de falta em sistemas trifásicos, considerando a Transformada de Clarke referenciada nas fases A, B e C, respectivamente. Sabendo que para cada tipo de falta é utilizada a onda de modo aéreo conforme Tabela 5.2, pode-se construir a Tabela 5.3, que mostra a onda de modo aéreo de interesse lançada para cada tipo de falta.

Conforme apresentado no Capítulo 4, as faltas trifásicas serão classificadas como um dos três tipos de falta bifásica que não envolve a terra. Conforme Tabela 5.2, para faltas bifásicas sempre é utilizado o modo aéreo  $\beta$ . Dessa forma, inclui-se na Tabela 5.3 as ondas lançadas de

modo aéreo  $\beta$  para faltas trifásicas utilizando a Transformada de Clarke referenciada nas três fases.

**Tabela 5.3.** Onda de modo aéreo de interesse lançada para cada tipo de falta.

Tipo de Falta	Transformada Modal	Modo	Onda Lançada
AT	$M_{CA}$	$\alpha$	$-\frac{2}{Z_0 + 2Z_\alpha + 6R_f} e_{aF}$
BT	$M_{CB}$	$\alpha$	$-\frac{2}{Z_0 + 2Z_\alpha + 6R_f} e_{bF}$
CT	$M_{CC}$	$\alpha$	$-\frac{2}{Z_0 + 2Z_\alpha + 6R_f} e_{cF}$
ABT	$M_{CC}$	$\beta$	$-\frac{\sqrt{3}}{3(Z_\alpha + 2R_f)} (e_{aF} - e_{bF})$
BCT	$M_{CA}$	$\beta$	$-\frac{\sqrt{3}}{3(Z_\alpha + 2R_f)} (e_{bF} - e_{cF})$
CAT	$M_{CB}$	$\beta$	$-\frac{\sqrt{3}}{3(Z_\alpha + 2R_f)} (e_{cF} - e_{aF})$
AB	$M_{CC}$	$\beta$	$-\frac{\sqrt{3}}{3(Z_\alpha + R_f)} (e_{aF} - e_{bF})$
BC	$M_{CA}$	$\beta$	$-\frac{\sqrt{3}}{3(Z_\alpha + R_f)} (e_{bF} - e_{cF})$
CA	$M_{CB}$	$\beta$	$-\frac{\sqrt{3}}{3(Z_\alpha + R_f)} (e_{cF} - e_{aF})$
ABC	$M_{CA}$	$\beta$	$-\frac{\sqrt{3}}{3(Z_\alpha + 2R_f)} (e_{bF} - e_{cF})$
ABC	$M_{CB}$	$\beta$	$-\frac{\sqrt{3}}{3(Z_\alpha + 2R_f)} (e_{cF} - e_{aF})$
ABC	$M_{CC}$	$\beta$	$-\frac{\sqrt{3}}{3(Z_\alpha + 2R_f)} (e_{aF} - e_{bF})$

Fonte: Autoria própria.

Os valores das impedâncias de surto de modo terra e de modo aéreo da linha com falta são conhecidos. Dessa forma, para obter um limiar a ser utilizado deve-se fazer uma estimativa para o valor da resistência de falta e para as tensões pré-falta no ponto de falta. Sabendo que as tensões em sistemas de corrente alternada trifásicos são senoidais e estão defasadas de  $120^\circ$  entre si, pode-se substituir as tensões pré-falta apresentadas na Tabela 5.3, conforme valores apresentados na Tabela 5.4, onde  $E_{MAX}$  representa o valor de pico da tensão fase-terra do sistema e  $\theta_{lim}$  representa o ângulo de incidência da falta utilizado para cálculo do limiar. O ângulo de incidência de falta ( $\theta_{lim}$ ) é relativo a diferentes tensões a depender do tipo de falta,

conforme Tabela 5.5.

**Tabela 5.4.** Valores considerados para as tensões pré-falta.

Tipo de Falta	Transformada Modal	Modo	Tensão pré-falta	
			Original	Considerado
AT	$M_{CA}$	$\alpha$	$e_{aF}$	$E_{MAX} \text{ sen } \theta_{lim}$
BT	$M_{CB}$	$\alpha$	$e_{bF}$	$E_{MAX} \text{ sen } \theta_{lim}$
CT	$M_{CC}$	$\alpha$	$e_{cF}$	$E_{MAX} \text{ sen } \theta_{lim}$
ABT	$M_{CC}$	$\beta$	$e_{aF} - e_{bF}$	$\sqrt{3}E_{MAX} \text{ sen } \theta_{lim}$
BCT	$M_{CA}$	$\beta$	$e_{bF} - e_{cF}$	$\sqrt{3}E_{MAX} \text{ sen } \theta_{lim}$
CAT	$M_{CB}$	$\beta$	$e_{cF} - e_{aF}$	$\sqrt{3}E_{MAX} \text{ sen } \theta_{lim}$
AB	$M_{CC}$	$\beta$	$e_{aF} - e_{bF}$	$\sqrt{3}E_{MAX} \text{ sen } \theta_{lim}$
BC	$M_{CA}$	$\beta$	$e_{bF} - e_{cF}$	$\sqrt{3}E_{MAX} \text{ sen } \theta_{lim}$
CA	$M_{CB}$	$\beta$	$e_{cF} - e_{aF}$	$\sqrt{3}E_{MAX} \text{ sen } \theta_{lim}$
ABC	$M_{CA}$	$\beta$	$e_{bF} - e_{cF}$	$\sqrt{3}E_{MAX} \text{ sen } \theta_{lim}$
ABC	$M_{CB}$	$\beta$	$e_{cF} - e_{aF}$	$\sqrt{3}E_{MAX} \text{ sen } \theta_{lim}$
ABC	$M_{CC}$	$\beta$	$e_{aF} - e_{bF}$	$\sqrt{3}E_{MAX} \text{ sen } \theta_{lim}$

**Fonte:** Autoria própria.

**Tabela 5.5.** Tensão utilizada como referência para o ângulo de incidência para cada tipo de falta.

Tipo de Falta	Tensão utilizada para calcular o ângulo de incidência
AT	Entre a fase A e a terra
BT	Entre a fase B e a terra
CT	Entre a fase C e a terra
ABT	Entre a fase A e a fase B
BCT	Entre a fase B e a fase C
CAT	Entre a fase C e a fase A
AB	Entre a fase A e a fase B
BC	Entre a fase B e a fase C
CA	Entre a fase C e a fase A
ABC	Quaisquer uma das tensões entre fases

**Fonte:** Autoria própria.

Substituindo as tensões pré-falta consideradas na Tabela 5.4 nas equações das ondas lançadas apresentadas na Tabela 5.3, obtém-se a Tabela 5.6, que indica o limiar a ser utilizado para cada tipo de falta.

Observa-se na Tabela 5.6 que os limiares para os três tipos de faltas monofásicas são iguais,

**Tabela 5.6.** Limiar a ser considerado para cada tipo de falta - modo aéreo.

Tipo de Falta	Limiar Utilizado
AT	$\left  -\frac{2}{Z_0 + 2Z_\alpha + 6R_f} E_{MAX} \text{sen } \theta_{lim} \right $
BT	
CT	
ABT	$\left  -\frac{1}{Z_\alpha + 2R_f} E_{MAX} \text{sen } \theta_{lim} \right $
BCT	
CAT	
ABC	$\left  -\frac{1}{Z_\alpha + R_f} E_{MAX} \text{sen } \theta_{lim} \right $
AB	
BC	
CA	

**Fonte:** Autoria própria.

os limiares para os três tipos de faltas bifásicas que envolvem a terra e faltas trifásicas são iguais e os limiares para os três tipos de faltas bifásicas que não envolvem a terra são iguais. Como as faltas trifásicas são classificadas como um dos três tipos de faltas bifásicas que não envolvem a terra, então o limiar para faltas bifásicas que não envolvem a terra deve estar ajustado de forma que as faltas trifásicas também seja acomodadas. Como pela Tabela 5.6 o limiar para faltas trifásicas é inferior ao limiar para faltas bifásicas que não envolvem a terra, opta-se por utilizar o limiar para faltas trifásicas para os casos em que a falta for classificada como falta bifásica sem envolver a terra, o que evita o problema de falta de sensibilidade para faltas trifásicas. Dessa forma, os limiares para faltas bifásicas que envolvem ou não a terra e faltas trifásicas passam a serem iguais. As simplificações aqui apresentadas são resumidas na Tabela 5.7, que apresenta os limiares a serem utilizados para cada classificação obtida para a falta.

**Tabela 5.7.** Limiar para cada classificação obtida para a falta - modo aéreo.

Classificação Obtida para a Falta	Limiar
Monofásica	$\left  -\frac{2}{Z_0 + 2Z_\alpha + 6R_f} E_{MAX} \text{sen } \theta_{lim} \right $
Bifásica com ou sem terra	$\left  -\frac{1}{Z_\alpha + 2R_f} E_{MAX} \text{sen } \theta_{lim} \right $

**Fonte:** Autoria própria.

Dos parâmetros utilizados na Tabela 5.7, sabe-se que os valores de  $Z_0$ ,  $Z_\alpha$  e  $E_{MAX}$  são conhecidos. Assim, os valores de  $R_f$  e  $\theta_{lim}$  devem ser ajustados para a sensibilidade desejada,

tornando o algoritmo sensível a faltas e evitando a detecção errônea de ruídos como ondas. Pelas características dos valores apresentados na Tabela 5.7, não é recomendado utilizar um valor de  $\theta_{lim}$  próximo de  $0^\circ$  para o ajuste, pois isto faria como que qualquer ruído fosse detectado como onda, o que não é desejável.

Como o algoritmo de localização de faltas só detectará a linha com falta após a detecção da primeira frente de onda, utiliza-se como limiar o menor valor dentre os calculados para as duas linhas paralelas.

### 5.8.2 Limiar para detecção da segunda frente de onda de corrente de modo aéreo

O limiar de detecção da segunda frente de onda de corrente de modo aéreo é calculado de maneira a detectá-la mesmo que ela esteja muito atenuada, porém evitando a detecção de ruídos como ondas, o que poderia levar a grande erro na estimativa da localização da falta. Este limiar é calculado considerando a média do valor absoluto da saída do Filtro Direcional da componente modal escolhida para detecção da segunda frente de onda de corrente na linha de transmissão com falta no intervalo de tempo apresentado em (5.17), onde  $t_1$  representa o tempo de detecção da primeira onda,  $l_{maior}$  o comprimento da maior linha,  $v_{min}$  representa a menor velocidade de propagação de onda de corrente de modo aéreo dentre as velocidades de propagação das linhas monitoradas e  $f_a$  a frequência de amostragem. Este tempo final foi escolhido de modo a ser o maior tempo possível para detecção da segunda frente de onda de interesse, considerando uma margem de segurança, e que o valor da variação da catenária da linha ao longo do dia é de 0,3% do comprimento da linha de transmissão para mais ou para menos (GUZMÁN *et al.*, 2018). Este limiar deverá ser aplicado ao módulo do sinal de saída do Filtro Direcional da linha com falta no intervalo de tempo descrito em (5.17).

$$t_1 + \frac{NDS}{2f_a} < t < t_1 + \frac{2 \cdot (l_{maior} + E_{cat})}{v_{min}} \rightarrow E_{cat} = 0,3\% \cdot l_{maior} \quad (5.17)$$

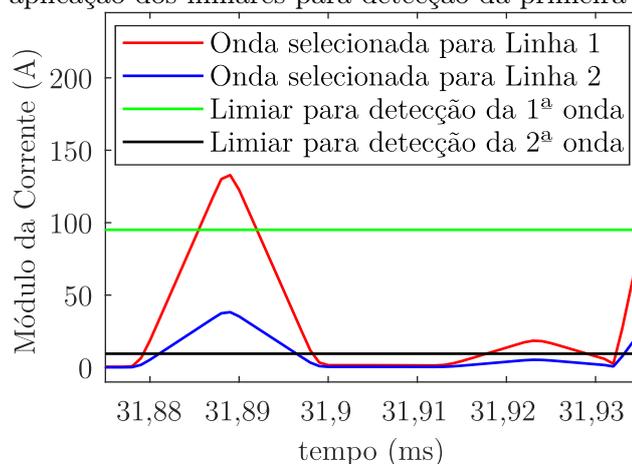
### 5.8.3 Exemplo de Aplicação

De modo a apresentar uma representação visual da utilização dos limiares de detecção da primeira e segunda frentes de onda, é mostrado nesta seção um exemplo de aplicação. Para

realizar esta simulação foi utilizado o sistema de potência, o sistema de aquisição de sinais e os limiares apresentados no Capítulo 6, sendo que o limiar para detecção da primeira frente de onda é calibrado para detectar, na pior situação, faltas com ângulo de incidência de  $25^\circ$ , resistência de falta de  $100 \Omega$  e ocorrendo em distâncias em que a primeira onda percorra a maior distância possível. Foi simulada falta na Linha 2 entre a fase A e a terra na distância de 215 km, com ângulo de incidência de  $90^\circ$  e resistência de falta de  $100 \Omega$ , de modo a verificar a efetividade para o limiar de detecção da primeira frente de onda na pior situação em que ele foi calibrado para detectar.

O resultado da simulação junto com os limiares calculados estão apresentados na Figura 5.8, em que a onda de corrente de modo aéreo selecionada foi a  $\alpha$  obtida por meio da Transformada de Clake referenciada na fase A, sendo apresentado o módulo da saída do Filtro Direcional. Verifica-se na Figura 5.8 que o limiar para detecção da primeira frente de onda calculado foi suficiente para detectá-la nesta situação, que é a pior situação em que ele foi calibrado para funcionar. Também visualiza-se na Figura 5.8 que o limiar para a detecção da segunda frente de onda, calculado conforme o procedimento apresentado na Seção 5.8.2, foi capaz de prover uma detecção segura da segunda frente de onda, mesmo na situação em que esta segunda frente de onda é mais atenuada devido à resistência de falta elevada do caso simulado.

**Figura 5.8.** Exemplo de aplicação dos limiares para detecção da primeira e segunda frentes de onda.



**Fonte:** Autoria própria.

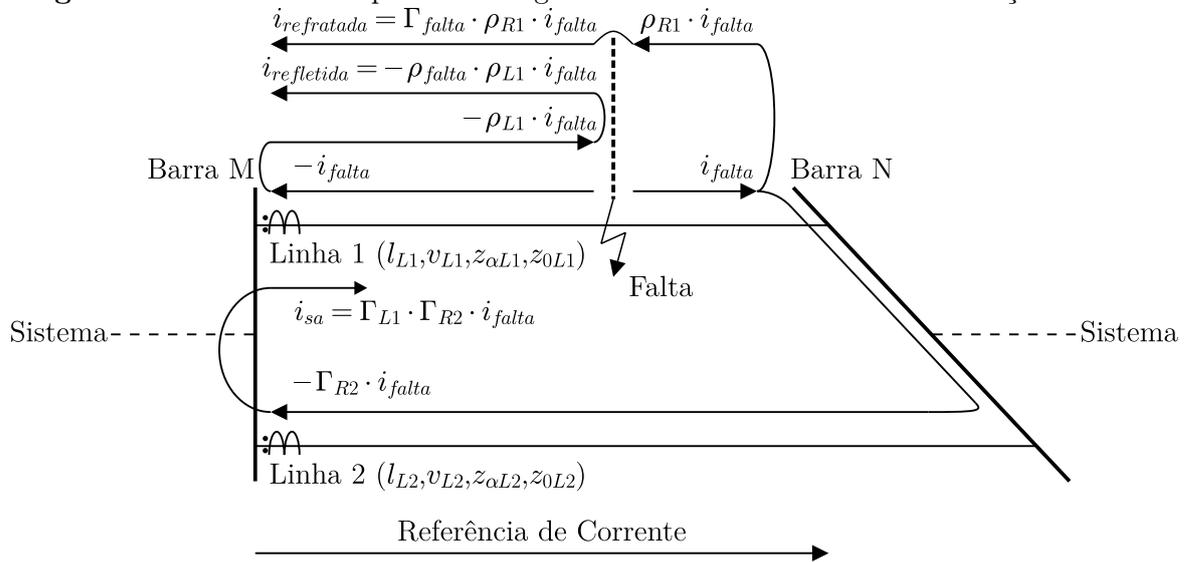
## 5.9 CLASSIFICAÇÃO DA SEGUNDA FRENTE DE ONDA E ESTIMATIVA DO LOCAL DA FALTA

A Figura 5.9 ilustra a primeira frente de onda vinda da direção da falta, a qual é indicada por  $-i_{falta}$  e três possibilidades para a segunda frente de onda vinda da direção da falta, quais sejam:

- Onda refletida no terminal local e depois refletida no ponto de falta ( $i_{refletida}$ );
- Onda refletida no terminal remoto e refratada no ponto de falta ( $i_{refratada}$ );
- Onda refratada no terminal remoto que retorna pela linha sã ( $i_{sa}$ ).

Estas possibilidades para a segunda frente de onda variam conforme a combinação dos seguintes fatores: posição da falta, comprimento da linha com falta, comprimento da linha sã e se os coeficientes de reflexão e refração ilustrados na Figura 5.9 são nulos ou não.

**Figura 5.9.** Incidência da primeira e segunda frentes de onda vindas da direção da falta.



**Fonte:** Autoria própria.

Conforme demonstrado na Seção 5.4, os coeficientes de reflexão no ponto de falta e refração no ponto de falta relativo à onda que segue para a outra porção da linha são positivos. Conforme explicado na Seção 5.8.1, os coeficientes de reflexão nos terminais da linha são positivos. Conforme pode-se observar por meio de (3.36) e (3.37), os coeficientes de refração nos terminais da linha sempre são positivos. Na Figura 5.9, a inversão de polaridade da onda quando ela

refrata nos terminais se deve à sua passagem para a outra linha, que tem TC ligado em polaridade relativa inversa em relação à linha de que a onda proveio. Utilizando estas premissas, é possível identificar se a segunda frente de onda se trata da onda refletida no terminal local e depois refletida no ponto de falta ou se ela proveio do terminal remoto. Caso seja identificado que a onda proveio da terminal remoto, pode-se utilizar a metodologia descrita na Seção 5.5 para identificar se a onda proveio da linha com falta ou da linha sã. O detalhamento deste procedimento, bem como da obtenção das fórmulas para estimar a falta em cada situação são mostradas na Seção 5.9.1 e na Seção 5.9.2.

Para fins de melhor apresentação das formulações para estimativa do local da falta, as seguintes variáveis são definidas na Tabela 5.8.

**Tabela 5.8.** Parâmetros utilizados na estimativa do local da falta.

<b>Símbolo</b>	<b>Parâmetro</b>
$d_{est}$	Estimativa do local da falta
$t_0$	Instante de tempo de ocorrência da falta
$t_1$	Instante de tempo de chegada da primeira frente de onda de corrente
$t_2$	Instante de tempo de chegada da segunda frente de onda de corrente
$t_{orig}$	Instante de tempo de chegada da onda de corrente originalmente gerada pela falta
$l_{falta}$	Comprimento da linha com falta
$l_{sa}$	Comprimento da linha sã
$v_{falta}$	Velocidade de propagação da onda de corrente de modo aéreo na linha com falta
$v_{sa}$	Velocidade de propagação da onda de corrente de modo aéreo na linha sã

**Fonte:** Autoria própria.

### 5.9.1 Caso em que a segunda frente de onda é a refletida no terminal local e depois refletida no ponto de falta

Pela Figura 5.9, percebe-se que se a segunda frente de onda tiver a mesma polaridade da primeira frente de onda, significa que ela se trata da onda refletida no terminal local e depois refletida no ponto de falta.

Nesta situação, pode-se deduzir (5.18) e (5.19).

$$t_1 - t_0 = \frac{d_{est}}{v_{falta}} \quad (5.18)$$

$$t_2 - t_0 = \frac{3d_{est}}{v_{falta}} \quad (5.19)$$

Como o valor de  $t_0$  não é conhecido, subtrai-se (5.19) de (5.18) para eliminá-lo das equações. Manipulando o resultado de forma a isolar  $d_{est}$ , obtém-se (5.20), que é a fórmula utilizada para estimar a localização da falta caso a segunda frente de onda seja classificada como a onda refletida no terminal local e depois refletida no ponto de falta.

$$d_{est} = \frac{(t_2 - t_1)v_{falta}}{2} \quad (5.20)$$

### 5.9.2 Caso em que a segunda frente de onda provém do terminal remoto

Pela Figura 5.9, percebe-se que se a segunda frente de onda tiver polaridade distinta da primeira frente de onda, significa que ela proveio do terminal remoto. Para distinguir se esta frente de onda provém da linha com falta ou da linha sã, deve-se aplicar a metodologia descrita na Seção 5.5 ao sinal original. Caso ela provenha da linha com falta, então se trata da onda refletida no terminal remoto e refratada no ponto de falta, sendo a fórmula adotada para estimar o local da falta deduzida na Seção 5.9.2.1. Caso a onda provenha da linha sã, então se trata da onda refratada no terminal remoto que retorna pela linha sã, sendo a fórmula adotada para estimar o local da falta deduzida na Seção 5.9.2.2.

Existe a possibilidade desta segunda frente de onda estar sobreposta com onda proveniente de linha adjacente. Embora o procedimento descrito na Seção 5.6 elimine o efeito das ondas provenientes de linhas adjacentes, a informação de qual das duas linhas a onda detectada proveio é perdida. Por este motivo, a metodologia descrita na Seção 5.5 é aplicada ao sinal original que pode perder a informação de qual linha a onda proveio, a depender da localização da falta em relação ao comprimento das linhas adjacentes conectadas ao terminal monitorado e das amplitudes e polaridades relativas da onda proveniente da direção da falta e da onda proveniente de linha adjacente. Dessa forma, para contornar esta situação, que embora não seja frequente pode ocorrer, é construído um vetor com as estimativas das localizações da falta, sendo a ordem dos seus elementos apresentadas do valor mais provável para o menos provável. Neste caso, o primeiro elemento do vetor será a localização estimada conforme procedimento informado no parágrafo anterior e o segundo elemento será a localização estimada considerando que a onda proveio da outra linha.

### 5.9.2.1 Formulação para o caso em que a segunda frente de onda é a refletida no terminal remoto e refratada no ponto de falta

Quando é identificada a situação em que a segunda frente de onda é a refletida no terminal remoto e refratada no ponto de falta, pode-se deduzir (5.21).

$$t_2 - t_0 = \frac{2l_{falta} - d_{est}}{v_{falta}} \quad (5.21)$$

Sabe-se que (5.18) continua válida para este caso. Como o valor de  $t_0$  não é conhecido, subtrai-se (5.21) de (5.18) para eliminá-lo das equações. Manipulando o resultado de forma a isolar  $d_{est}$ , obtém-se (5.22), que é a fórmula utilizada caso a segunda frente de onda seja classificada como a onda refletida no terminal remoto e refratada no ponto de falta.

$$d_{est} = l_{falta} - \frac{(t_2 - t_1)v_{falta}}{2} \quad (5.22)$$

### 5.9.2.2 Formulação para o caso em que a segunda frente de onda é a refratada no terminal remoto que retorna pela linha sã

Quando é identificada a situação em que a segunda frente de onda é a refratada no terminal remoto que retorna pela linha sã, pode-se deduzir (5.23).

$$t_2 - t_0 = \frac{l_{falta} - d_{est}}{v_{falta}} + \frac{l_{sa}}{v_{sa}} \quad (5.23)$$

Sabe-se que (5.18) continua válida para este caso. Como o valor de  $t_0$  não é conhecido, subtrai-se (5.23) de (5.18) para eliminá-lo das equações. Manipulando o resultado de forma a isolar  $d_{est}$ , obtém-se (5.24), que é a fórmula utilizada caso a segunda frente de onda seja classificada como a onda refratada no terminal remoto que retorna pela linha sã.

$$d_{est} = \frac{v_{falta}}{2} \left[ \frac{l_{falta}}{v_{falta}} + \frac{l_{sa}}{v_{sa}} - (t_2 - t_1) \right] \quad (5.24)$$

## 5.10 CASOS ESPECIAIS

Algumas situações especiais podem ocorrer, sendo elas explicadas e tratadas na Seção 5.10.1, na Seção 5.10.2 e na Seção 5.10.3.

### 5.10.1 Onda originalmente gerada pela falta não é a primeira frente de onda detectada

Existe a possibilidade da onda originalmente gerada pela falta ( $-i_{falta}$ ) não ser a primeira onda detectada. Isto pode ocorrer se a onda que retorna pela linha sã chegar antes da onda originalmente gerada pela falta.

As ondas medidas no terminal local constituem-se da sobreposição da onda incidente com a onda refletida, sendo que conforme explicado na Seção 5.8.1, este coeficiente de reflexão assumirá valores entre 0 e 1. Como as impedâncias de surto das linhas têm valores próximos entre si (GLOVER *et al.*, 2017), os coeficientes de reflexão assumirão valores próximos entre si. A onda refratada no terminal remoto será igual ou menor do que a onda incidente, pois conforme pode-se observar por meio de (3.36) e (3.37), o coeficiente de refração no terminal remoto assumirá valores entre 0 e 1. Dessa forma, para identificar se a onda originalmente gerada pela falta não é a primeira onda detectada, basta verificar se existe onda de maior amplitude detectada no intervalo de tempo descrito em (5.17), sendo esta frente de onda a originalmente gerada pela falta. A interpretação física deste fenômeno é que parte da onda perde energia ao refratar no terminal remoto, o que não ocorre com a onda que provém diretamente da falta.

Caso seja constatado que a onda originalmente gerada pela falta não é a primeira frente de onda, a estimativa da distância da falta deve ser calculada conforme a expressão (5.25), sendo ela uma adaptação da expressão (5.24) com os tempos a serem considerados invertidos e o tempo  $t_2$  substituído por  $t_{orig}$ , que representa o instante de tempo de chegada da onda originalmente gerada pela falta. A identificação da linha com falta pode ser feita aplicando-se o procedimento descrito na Seção 5.5 na frente de onda que provém diretamente da falta, pois esta conterá a informação da linha com falta.

$$d_{est} = \frac{v_{falta}}{2} \left[ \frac{l_{falta}}{v_{falta}} + \frac{l_{sa}}{v_{sa}} - (t_1 - t_{orig}) \right] \quad (5.25)$$

### 5.10.2 Chegada simultânea da primeira e segunda frentes de onda

Pode ocorrer da primeira e da segunda frentes de onda chegarem ao mesmo instante no terminal monitorado, sendo que neste caso a segunda frente de onda provém do terminal remoto. Como as duas frentes de onda apresentam polaridades opostas, conforme mostrado na Seção

5.9.2, pode ocorrer desta sobreposição resultar em ondas de mesma polaridade nas duas linhas de transmissão paralelas. Nesta situação é certo que a localização da falta deverá ser conforme (5.26), sendo a distância da falta em que este fenômeno ocorre denominada de  $d_{sim}$ .

$$d_{sim} = \frac{v_{falta}}{2} \left( \frac{l_{falta}}{v_{falta}} + \frac{l_{sa}}{v_{sa}} \right) \quad (5.26)$$

Conforme apresentado na Seção 5.10.1, a onda proveniente do terminal remoto apresenta amplitude menor do que a onda originalmente proveniente da falta. Por este motivo, para obter a informação da linha com falta, basta aplicar o procedimento descrito na Seção 5.5.

Se a falta ocorrer na distância  $d_{sim}$ , também pode ocorrer da sobreposição das duas frentes de onda resultarem em ondas de polaridades distintas nas duas linhas. Neste caso, não há como detectar esta chegada simultânea da primeira e segunda frentes de onda. Assim, para contornar esta situação, que embora não seja frequente pode ocorrer, nos casos em que é detectado que a onda provém do terminal remoto, insere-se a localização prevista em (5.26) como o último elemento do vetor com as estimativas das localizações da falta. Nos casos em que é detectado que a onda provém da reflexão no ponto de falta, também insere-se a localização prevista em (5.26) como o último elemento do vetor com as estimativas das localizações de falta. Isto deve ser feito neste último caso, pois a chegada simultânea da primeira e segunda frentes de onda pode confundir o Filtro Direcional apresentado na Seção 5.6, fazendo com que alguma onda proveniente de linhas adjacentes seja detectada.

### 5.10.3 Ocorrência de falta em distância crítica

Existem locais na linha de transmissão em que, ocorrendo uma falta, a segunda frente de onda proveniente da falta é a sobreposição de duas ondas, podendo haver uma maior dificuldade na sua detecção. Por este motivo, nomeia-se estes locais de distâncias críticas, sendo previstas três possibilidades de sobreposição de ondas, conforme mostrado a seguir:

- a) A onda refletida no terminal local e depois refletida no ponto de falta ( $i_{refletida}$ ) está sobreposta com a onda refletida no terminal remoto e refratada no ponto de falta ( $i_{refratada}$ );
- b) A onda refletida no terminal local e depois refletida no ponto de falta ( $i_{refletida}$ ) está sobreposta com a onda refratada no terminal remoto que retorna pela linha sã ( $i_{sa}$ ).

- c) A onda refletida no terminal remoto e refratada no ponto de falta ( $i_{refratada}$ ) está sobreposta com a onda refratada no terminal remoto que retorna pela linha sã ( $i_{sa}$ ).

Estas situações só serão problemáticas se a sobreposição das duas frentes de onda resultarem em ondas de mesma polaridade nas duas linhas paralelas, o que faria com que ela não fosse detectada como frente de onda proveniente da direção da falta. Estas situações só ocorrerão nas distâncias críticas  $d_{cr}$  e  $d_{cs}$ , que estão relacionadas com a sobreposição de  $i_{refletida}$  com  $i_{refratada}$  e de  $i_{refletida}$  com  $i_{sa}$ , respectivamente, sendo elas apresentadas em (5.27) e (5.28). A sobreposição de  $i_{refratada}$  com  $i_{sa}$  não será problemática, pois as duas ondas apresentam mesma polaridade, se tratando de uma situação favorável para sua detecção. Nesta situação, a estimativa do local da falta será a mesma utilizando (5.22) ou (5.24).

$$d_{cr} = \frac{l_{falta}}{2} \quad (5.27)$$

$$d_{cs} = \frac{v_{falta}}{4} \left( \frac{l_{falta}}{v_{falta}} + \frac{l_{sa}}{v_{sa}} \right) \quad (5.28)$$

O algoritmo de detecção da falta nas distâncias críticas é apresentado abaixo. Para elaboração deste algoritmo foi considerado que a onda refletida no terminal local e depois refletida no ponto de falta ( $i_{refletida}$ ) sempre estará presente.

- a) Identifica-se a linha com falta;
- b) Calcula-se  $d_{cr}$  e  $d_{cs}$ ;
- c) Atribuí-se a  $d_c$  o menor valor dentre  $d_{cr}$  e  $d_{cs}$ ;
- d) Verifica-se a existência de frente de onda vinda da direção da falta no seguinte intervalo de tempo:  $t_1 + \frac{NDS}{2f_a} < t < t_1 + \frac{2(d_c + E_{cat})}{v_{falta}}$ , onde  $NDS$  é o número de amostras do Filtro DS. Caso exista, então a falta não ocorreu na distância crítica. Caso não exista, segue-se para o próximo passo;
- e) Verifica-se no sinal original a existência de onda detectada no seguinte intervalo de tempo:  $t_1 + \frac{2(d_c - E_{cat})}{v_{falta}} < t < t_1 + \frac{2(d_c + E_{cat})}{v_{falta}}$ . Caso não exista, então a falta não ocorreu na distância crítica. Caso exista, então a falta ocorreu na distância crítica e a estimativa do local da falta é  $d_c$ .

## 5.11 APLICAÇÃO DO ALGORITMO DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS

Conforme apresentado na Seção 5.9.2 e na Seção 5.10.2 é necessário construir um vetor com as estimativas das localizações de falta nos casos em que é verificado que a segunda frente de onda provém de reflexão no ponto de falta ou do terminal remoto. Caso seja verificado que a onda proveio da reflexão na falta, utiliza-se o vetor apresentado em 5.29. Caso seja verificado que a onda proveio do terminal remoto e retornou pela linha com falta, utiliza-se o vetor apresentado em (5.30). Para o caso em que é verificado que a onda proveio do terminal remoto e retornou pela linha sã, utiliza-se o vetor apresentado em (5.31).

$$\mathbf{d}_{est}^{refl} = \begin{bmatrix} \frac{(t_2 - t_1)v_{falta}}{2} \\ \frac{v_{falta}}{2} \left( \frac{l_{falta}}{v_{falta}} + \frac{l_{sa}}{v_{sa}} \right) \end{bmatrix} \quad (5.29)$$

$$\mathbf{d}_{est}^{fal} = \begin{bmatrix} l_{falta} - \frac{(t_2 - t_1)v_{falta}}{2} \\ \frac{v_{falta}}{2} \left[ \frac{l_{sa}}{v_{sa}} + \frac{l_{falta}}{v_{falta}} - (t_2 - t_1) \right] \\ \frac{v_{falta}}{2} \left( \frac{l_{falta}}{v_{falta}} + \frac{l_{sa}}{v_{sa}} \right) \end{bmatrix} \quad (5.30)$$

$$\mathbf{d}_{est}^{sa} = \begin{bmatrix} \frac{v_{falta}}{2} \left[ \frac{l_{sa}}{v_{sa}} + \frac{l_{falta}}{v_{falta}} - (t_2 - t_1) \right] \\ l_{falta} - \frac{(t_2 - t_1)v_{falta}}{2} \\ \frac{v_{falta}}{2} \left( \frac{l_{falta}}{v_{falta}} + \frac{l_{sa}}{v_{sa}} \right) \end{bmatrix} \quad (5.31)$$

Com base nas informações apresentadas neste capítulo é possível aplicar o algoritmo de localização de faltas. O algoritmo consiste na aplicação das seguintes instruções na sequência mostrada a seguir. Neste algoritmo considera-se que a classificação de faltas já foi realizada utilizando o método proposto no Capítulo 4.

- a) A partir da classificação da falta, calcula-se o limiar para detecção da primeira frente de onda de corrente de modo aéreo, conforme procedimento descrito na Seção 5.8.1, e seleciona-se o modo aéreo a ser utilizado para localização da falta conforme Tabela 5.2;
- b) Obtêm-se os sinais digitalizados de corrente nas três fases das duas linhas paralelas na taxa de amostragem mínima de 1 MHz;

- c) Aplica-se o Filtro DS, apresentado na Seção 5.3, nos sinais de corrente de modo aéreo a serem utilizados para a localização da falta, obtendo os sinais de onda de corrente de modo aéreo correspondentes;
- d) Utilizando o limiar para detecção da primeira frente de onda e o modo aéreo selecionado, detecta-se a primeira onda de corrente de modo aéreo nas duas linhas paralelas conforme procedimento descrito na Seção 5.3, sendo o tempo de chegada da primeira onda ( $t_1$ ) considerado como o tempo associado à chegada da onda de corrente de modo aéreo de maior amplitude e a linha identificada com falta é a linha associada a esta onda, conforme explicado na Seção 5.5. Caso as polaridades das ondas nas linhas paralelas, no tempo de chegada da primeira onda, sejam iguais, então a estimativa da localização da falta é  $d_{est} = \frac{v_{falta}}{2} \left( \frac{l_{sa}}{v_{sa}} + \frac{l_{falta}}{v_{falta}} \right)$ , conforme explicado na Seção 5.10.2. Caso estas polaridades sejam distintas, segue-se para o próximo passo;
- f) Aplica-se o Filtro Direcional nas ondas de corrente de modo aéreo selecionado, conforme procedimento descrito na Seção 5.6;
- g) Calcula-se o limiar para detecção da segunda frente de onda de corrente de modo aéreo, conforme procedimento apresentado na Seção 5.8.2;
- h) Calcula-se  $d_{cr}$  e  $d_{cs}$ , conforme (5.27) e (5.28), respectivamente;
- i) Atribui-se a  $d_c$  o menor valor dentre  $d_{cr}$  e  $d_{cs}$ , conforme descrito na Seção 5.10.3;
- j) Calcula-se  $E_{cat}$ , conforme (5.17);
- k) Conforme descrito na Seção 5.10.3 e utilizando o limiar para detecção da segunda frente de onda e o sinal de saída do Filtro Direcional, verifica-se a existência de onda nas duas linhas paralelas no intervalo de tempo  $t_1 + \frac{NDS}{2f_a} < t < t_1 + \frac{2(d_c + E_{cat})}{v_{falta}}$ , conforme procedimento descrito na Seção 5.3. Caso não exista, utiliza-se o limiar para detecção da segunda frente de onda e o sinal das ondas de corrente de modo aéreo selecionado original para verificar a existência de onda nas duas linhas paralelas no intervalo de tempo  $t_1 + \frac{2(d_c - E_{cat})}{v_{falta}} < t < t_1 + \frac{2(d_c + E_{cat})}{v_{falta}}$ , conforme procedimento descrito na Seção 5.3. Caso exista, a falta ocorreu na distância crítica e a estimativa do local da falta é  $d_c$ . Caso a falta não tenha ocorrido na distância crítica, segue-se para o próximo passo;

- l) Verifica-se se a maior onda de corrente de modo aéreo detectada no intervalo de tempo descrito em (5.17) é maior do que a maior onda no tempo de chegada na primeira onda, considerando o sinal das ondas de corrente de modo aéreo selecionado originais. Caso afirmativo, então a distância estimada da falta é  $d_{est} = \frac{v_{falta}}{2} \left[ \frac{l_{sa}}{v_{sa}} + \frac{l_{falta}}{v_{falta}} - (t_1 - t_{orig}) \right]$ , onde  $t_{orig}$  é o tempo de chegada desta maior onda. A informação da linha com falta deve ser obtida a partir da maior onda de corrente detectada, conforme descrito na Seção 5.10.1. Caso contrário, segue-se para o próximo passo;
- m) Utilizando o limiar para detecção da segunda frente de onda e o sinal de saída do Filtro Direcional para a linha com falta, detecta-se a primeira onda de corrente de modo aéreo no intervalo de tempo descrito em (5.17), conforme o procedimento descrito na Seção 5.8.2. O tempo de chegada da segunda onda é chamado de  $t_2$ ;
- n) Verifica-se se, na linha com falta, a polaridade da segunda frente de onda, considerando a saída do Filtro Direcional, é igual à polaridade da primeira frente de onda, considerando o sinal das ondas de corrente de modo aéreo selecionado original. Caso afirmativo, então a distância estimada da falta será o vetor  $\mathbf{d}_{est}^{refl}$ , conforme 5.29. Caso negativo, segue-se para o próximo passo;
- o) Verifica-se se, na linha com falta, a polaridade da segunda frente de onda, considerando a saída do Filtro Direcional, é diferente da polaridade da primeira frente de onda, considerando o sinal das ondas de corrente de modo aéreo selecionado original. Caso afirmativo e a onda provenha da linha com falta, então o vetor de estimativa do local da falta será  $\mathbf{d}_{est}^{fal}$ , conforme (5.30). Caso afirmativo e a onda provenha da linha sã, o vetor de estimativa do local da falta será  $\mathbf{d}_{est}^{sa}$ , conforme (5.31). Para verificar a linha de que a onda proveio, aplica-se o procedimento descrito na Seção 5.5 no sinal das ondas de corrente de modo aéreo selecionado original.

# RESULTADOS E ANÁLISES DAS SIMULAÇÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados e análises de simulações realizadas para validar o método de classificação de faltas proposto no Capítulo 4 e o método de localização de faltas proposto no Capítulo 5. As simulações de transitórios eletromagnéticos foram realizadas utilizando o *software Alternative Transients Program* (ATP) e as simulações dos algoritmos propostos foram realizadas utilizando o *software* MATLAB®. O método de localização de faltas em linhas paralelas baseado na teoria de ondas viajantes usando dados de um terminal proposto no Capítulo 5 é comparado com o proposto por Guangbin, detalhado na Seção 6.1, que também localiza faltas em linhas paralelas utilizando a teoria de ondas viajantes usando dados de um terminal. A modelagem da aquisição dos sinais digitais das correntes utilizadas nas simulações é apresentada.

## 6.1 MÉTODO DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS PARALELAS BASEADA NA TEORIA DE ONDAS VIAJANTES USANDO DADOS DE UM TERMINAL PROPOSTO POR GUANGBIN

Nesta seção será descrita uma adaptação do método proposto por Guangbin em Guangbin *et al.* (2013), o qual será testado nas simulações. As adaptações realizadas são as seguintes:

- a) É utilizado o Filtro DS para detecção das ondas viajantes ao invés de transformada *wavelet*;
- b) São utilizadas as ondas de corrente do modo aéreo selecionado conforme apresentado na Seção 5.11. Isto é feito, pois em Guangbin *et al.* (2013) é informado que é utilizada a onda de corrente de fase, mas não é esclarecida qual fase é utilizada;
- c) O limiar é calculado conforme apresentado na Seção 5.11, pois não é esclarecido em Guangbin *et al.* (2013) como ele é obtido;

- d) Considera-se que as velocidades de propagação nas linhas paralelas são diferentes entre si, sendo adaptada a expressão que estima o local da falta de maneira a refletir esta diferença.

Os autores do algoritmo apresentado em Guangbin *et al.* (2013) recomendam a instalação do localizador de faltas no terminal com o maior número de linhas conectadas. Este algoritmo é apresentado a seguir, onde considera-se que a classificação de faltas já foi realizada utilizando o método proposto no Capítulo 4.

- a) Repetem-se os passos a) a c) descritos na Seção 5.11
- b) Utilizando o limiar para detecção da primeira frente de onda e o modo aéreo selecionado, detecta-se a primeira onda de corrente de modo aéreo nas duas linhas paralelas conforme procedimento descrito na Seção 5.3, sendo o tempo de chegada da primeira onda ( $t_1$ ) considerado como o tempo associado à chegada da onda de corrente de modo aéreo de maior amplitude e a linha identificada com falta é a linha associada a esta onda, conforme explicado na Seção 5.5;
- c) Detecta-se na linha sã a onda de maior amplitude e que tenha a mesma polaridade da primeira frente de onda na linha com falta. O intervalo de tempo para esta busca é o descrito em (5.17) e o tempo associado a esta onda é chamado de tempo de chegada da segunda onda ( $t_2$ );
- d) De posse dos tempos  $t_1$  e  $t_2$ , aplica-se a seguinte expressão para estimar o local da falta:
- $$d_{est} = \frac{v_{falta}}{2} \left[ \frac{l_{sa}}{v_{sa}} + \frac{l_{falta}}{v_{falta}} - (t_2 - t_1) \right].$$

## 6.2 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE SINAIS SIMULADO

O sistema de aquisição dos sinais de corrente é composto dos seguintes elementos ligados em cascata: TC, transformador auxiliar, filtro *anti-aliasing* e conversor analógico-digital (SAHA *et al.*, 2010).

A modelagem e os parâmetros do TC implementado no ATP correspondem ao tipo C800 2000/5 A, conforme proposto pelo *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) no documento IEEE (2005). A impedância do cabeamento que liga o TC ao relé é considerada como

sendo de  $0,75 \Omega$  por cabo, que é igual à impedância interna do TC, pois isto foi considerado como um critério de projeto da subestação. A impedância do relé é considerada  $0,02 \Omega$ , conforme catálogo de relé comercial que utiliza ondas viajantes (SEL, 2017).

O transformador auxiliar tem a função de transformar o sinal de corrente obtido por meio do TC em sinal de tensão proporcional e em nível adequado para ser lido em dispositivo eletrônico (PHADKE; THORP, 2009). Este elemento é composto de um conjunto de resistores organizado de forma a obter um sinal de tensão proporcional ao de corrente na entrada do relé (PHADKE; THORP, 2009). Em alguns arranjos, pode haver também um TC auxiliar instalado antes dos resistores, cuja função é reduzir ainda mais os níveis de corrente e isolar eletricamente o relé do secundário do TC instalado na linha de transmissão (PHADKE; THORP, 2009). A transformação das correntes em tensões é uma relação obtida diretamente por meio dos resistores, sendo que eventuais erros associados a esta medição estão relacionados a diferenças entre o valor da resistência utilizada para fazer a conversão entre corrente e tensão e o seu valor real, o que o torna de simples resolução. O principal erro associado à medição nos transformadores de corrente ocorre devido à sua saturação (JOHNS; SALMAN, 1995), sendo ela já computada na modelagem do TC instalado na linha de transmissão. Além disto, durante a saturação, o sinal de saída do TC instalado na linha de transmissão é nulo (PHADKE; THORP, 2009), o que torna difícil a saturação do TC auxiliar que está ligado em cascata. Devido a estes fatores, a influência deste transformador auxiliar na distorção nos sinais originais de corrente é desprezível e por isto ele não será modelado.

Conforme o teorema de amostragem de Nyquist, para evitar a sobreposição espectros, a máxima frequência a ser recebida pelo dispositivo eletrônico deverá ser de 50% da frequência de amostragem, sendo esta frequência chamada de frequência de Nyquist (OPPENHEIM *et al.*, 1999). Embora em aplicações reais o filtro *anti-aliasing* seja analógico, o seu equivalente foi implementado no domínio digital com o objetivo de simular a resposta transitória do filtro, que poderá influenciar no processo de localização de faltas. Para a sua implementação foi utilizado o filtro passa-baixa de *Butterworth* de 2ª ordem, com frequência de corte de 80% da frequência de Nyquist, de forma que nenhuma frequência indesejada recaia na sua faixa de transição (OPPENHEIM *et al.*, 1999). Como os dispositivos comerciais que utilizam ondas viajantes trabalham com a frequência de amostragem de 1 MHz (SEL, 2017), as simulações

foram realizadas utilizando um passo de cálculo de  $1 \mu\text{s}$ , que equivale a esta frequência de amostragem. Sendo assim, a frequência de corte utilizada foi de 400 kHz.

O conversor analógico-digital converte os sinais analógicos obtidos na saída do filtro *anti-aliasing* em sinais digitais que serão utilizados para os cálculos internos do dispositivo de localização de faltas (SAHA *et al.*, 2010). O erro de quantização nos sinais de um conversor analógico-digital pode ser dado conforme expressão (6.1), onde  $N$  é número de bits do conversor analógico-digital (PHADKE; THORP, 2009). Os conversores analógico-digitais dos dispositivos que realizam medições de ondas viajantes utilizam 18 bits (SEL, 2017), o que resulta em um erro de  $3,8147 \cdot 10^{-4}\%$ . Sendo assim, a sua influência no processo de localização de faltas é pequena e por isso ele não será modelado.

$$q_{\text{erro}\%} = 100 \cdot 2^{-N} \quad (6.1)$$

### 6.3 SISTEMA SIMULADO

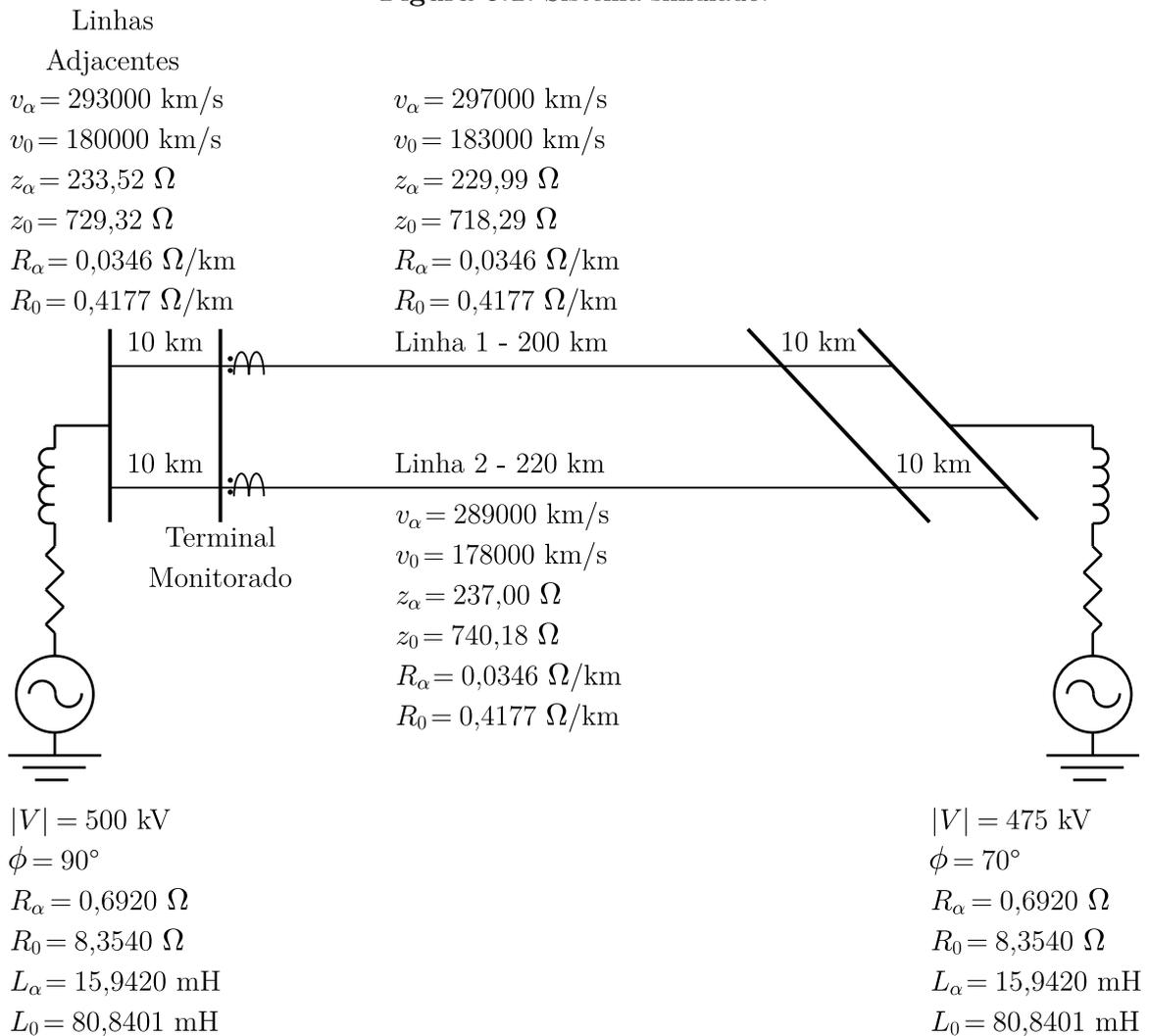
No sistema simulado, apresentado na Figura 6.1, as linhas de transmissão paralelas monitoradas e as conectadas nos terminais local e remoto (linhas adjacentes) apresentam os parâmetros e comprimentos da Tabela 6.1, que por uma questão didática também estão apresentados na figura, sendo  $|V|$  e  $\phi$  o módulo e o ângulo da tensão fasorial da fonte trifásica, respectivamente,  $R$  o valor de resistência,  $L$  o valor de indutância,  $v$  a velocidade de propagação,  $z$  a impedância de surto e os subíndices  $\alpha$  e  $0$  indicam que estas grandezas são de modo aéreo ou modo terra, respectivamente. Equipamentos conectados aos terminais monitorados que podem ser modelados como indutores e capacitores não serão avaliados, pois eles se comportam como circuitos abertos e curto-circuitos, respectivamente, conforme foi demonstrado na Seção 3.1.2.3.

Os parâmetros das linhas de transmissão trifásicas em 500 kV foram retirados de uma linha real do sistema elétrico brasileiro (LOPES *et al.*, 2018) e estão apresentados na Tabela 6.1 como os parâmetros das linhas adjacentes. De modo a possibilitar o teste do método apresentado no Capítulo 5, os parâmetros das linhas de transmissão de 500 kV monitoradas foram alterados de modo que elas apresentassem impedâncias de surto e velocidades de propagação diferentes entre si e do restante das linhas do sistema simulado, sendo eles apresentados na Tabela 6.1. Estes valores foram obtidos diminuindo as indutâncias em 3% para a Linha 1 e aumentando

as indutâncias em 3% para a Linha 2, sendo esta escolha feita de modo que as velocidades de propagação de modo aéreo e as impedâncias de surto de modo aéreo estivessem dentro da faixa de valores típicos para linhas de transmissão de 500 kV, sendo entre 96% e 100% da velocidade da luz para a velocidade de propagação de modo aéreo (LOPES, 2014) e entre 233  $\Omega$  e 294  $\Omega$  para a impedância de surto de modo aéreo (GLOVER *et al.*, 2017). Os ajustes dos parâmetros das fontes que alimentam os terminais local e remoto foram baseados nos valores apresentados em Lopes *et al.* (2018), conforme mostrado na Tabela 6.1. Os comprimentos de todas as linhas de transmissão também são apresentados na Tabela 6.1.

Para os testes realizados, o ângulo de incidência foi considerado conforme a Tabela 5.5, sendo que para faltas trifásicas foi considerada como referência para obtenção do ângulo de incidência a tensão entre a fase B e a fase C.

**Figura 6.1.** Sistema simulado.



**Fonte:** Autoria própria.

**Tabela 6.1.** Parâmetros para o sistema simulado.

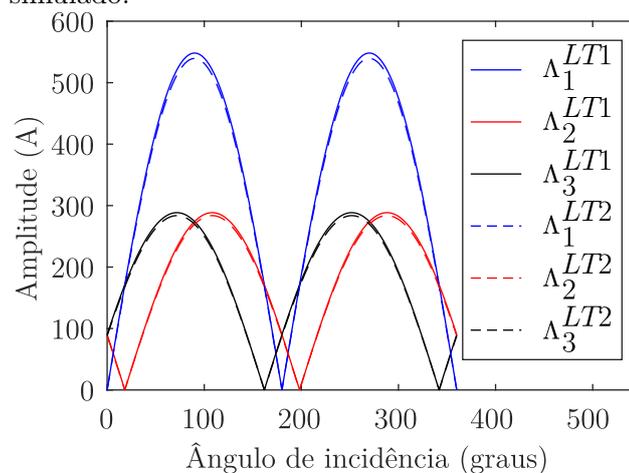
Parâmetro	Valor
Comprimento das linhas adjacentes	10 km
Comprimento da Linha 1	200 km
Comprimento da Linha 2	220 km
Resistência de modo aéreo de todas as linhas	0,0346 $\Omega$ /km
Resistência de modo terra de todas as linhas	0,4177 $\Omega$ /km
Velocidade de propagação de modo aéreo nas linhas adjacentes	293000 km/s
Velocidade de propagação de modo aéreo na Linha 1	297000 km/s
Velocidade de propagação de modo aéreo na Linha 2	289000 km/s
Velocidade de propagação de modo terra nas linhas adjacentes	180000 km/s
Velocidade de propagação de modo terra na Linha 1	183000 km/s
Velocidade de propagação de modo terra na Linha 2	178000 km/s
Impedância de surto de modo aéreo das linhas adjacentes	233,52 $\Omega$
Impedância de surto de modo aéreo da Linha 1	229,99 $\Omega$
Impedância de surto de modo aéreo da Linha 2	237,00 $\Omega$
Impedância de surto de modo terra das linhas adjacentes	729,32 $\Omega$
Impedância de surto de modo terra da Linha 1	718,29 $\Omega$
Impedância de surto de modo terra da Linha 2	740,18 $\Omega$
Tensão da fonte que alimenta o terminal local	500 kV
Tensão da fonte que alimenta o terminal remoto	475 kV
Ângulo da fonte de tensão do terminal local	90°
Ângulo da fonte de tensão do terminal remoto	70°
Resistência de modo aéreo das fontes que alimentam os dois terminais	0,6920 $\Omega$
Resistência de modo terra das fontes que alimentam os dois terminais	8,3540 $\Omega$
Indutância de modo aéreo das fontes que alimentam os dois terminais	15,9420 mH
Indutância de modo terra das fontes que alimentam os dois terminais	80,8401 mH

**Fonte:** Autoria própria.

## 6.4 ÂNGULO DE INCIDÊNCIA MÍNIMO

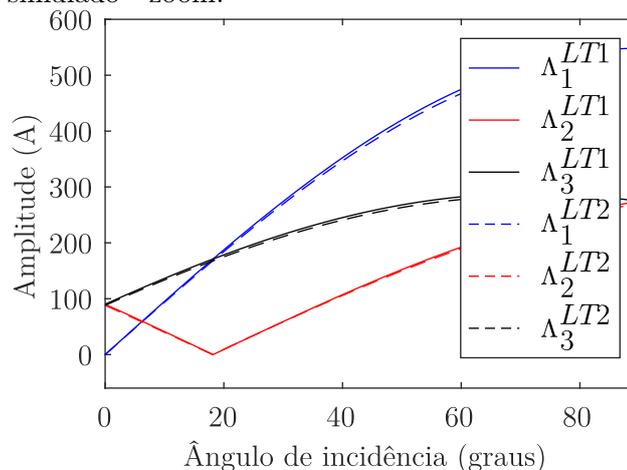
Conforme recomendado na Seção 4.5.1.2, calcula-se os possíveis valores para o limiar de modo aéreo para fins de diferenciação de faltas monofásicas de faltas bifásicas com terra a partir das formulações mostradas na Tabela 4.5 e dos parâmetros para o sistema simulado apresentados na Tabela 6.1. Os valores de  $\Lambda_1$ ,  $\Lambda_2$  e  $\Lambda_3$  calculados para as linhas monitoradas do sistema teste estão apresentados na Figura 6.2 e na na Figura 6.3, onde o sobrescrito  $LT1$  e  $LT2$  significam que os valores foram calculados para a Linha 1 para a Linha 2, respectivamente. Fazendo uma avaliação no primeiro quadrante, observa-se na Figura 6.3 que o menor valor deste limiar teria um valor muito próximo de zero para um ângulo de incidência próximo a  $18^\circ$ , o que faz com que faltas bifásicas com terra possam ser classificadas como faltas monofásicas, conforme pode ser verificado no fluxograma da Figura 4.3. Assim, considerando o primeiro quadrante e uma margem de segurança, somente garante-se que o método de classificação de faltas funcionará corretamente no sistema simulado para ângulos entre  $25^\circ$  e  $90^\circ$ . Como o método de localização de faltas utiliza a informação da classificação da falta, a mesma restrição se aplica.

**Figura 6.2.** Valores para o limiares para fins de diferenciação de faltas monofásicas de faltas bifásicas com terra para o sistema simulado.



**Fonte:** Autoria própria.

**Figura 6.3.** Valores para o limiaries para fins de diferenciação de faltas monofásicas de faltas bifásicas com terra para o sistema simulado - zoom.



**Fonte:** Autoria própria.

## 6.5 TESTES REALIZADOS

Objetivando avaliar a precisão puramente dos métodos de classificação e localização de faltas, é considerado que as velocidades de propagação de modo aéreo, os comprimentos e as impedâncias de surto de modo aéreo e de modo terra das linhas paralelas monitoradas são conhecidas. Pelo mesmo motivo não foi avaliada a influência das imprecisões desses parâmetros nos métodos de classificação e localização de faltas.

Foram realizados dois conjuntos de testes, sendo que o primeiro conjunto considera faltas sólidas ( $R_f = 0 \Omega$ ) e ângulo de incidência de falta de  $90^\circ$ . O segundo conjunto considera faltas com resistência de falta de  $100 \Omega$  e ângulo de incidência de  $25^\circ$ , sendo esta a situação mais adversa em que se espera que o método funcione, pois as amplitudes das ondas de corrente lançadas serão menores e o ângulo de incidência é o menor previsto para que o método funcione, conforme explicado na Seção 6.4. O valor de  $100 \Omega$  de resistência de falta para este segundo conjunto de testes foi escolhido, pois corresponde ao dobro da maior resistência de falta esperada em linhas de alta tensão (SANAYE-PASAND; JAFARIAN, 2011).

Em cada conjunto de testes são avaliados todos os tipos clássicos de faltas em sistemas trifásicos em várias localizações ao longo da Linha 1 e ao longo da Linha 2. Nos dois conjuntos de testes para o sistema da Figura 6.1, a localização da falta é variada entre 4 km e 196 km em passos de 1 km para a Linha 1 e entre 4 km e 216 km em passos de 1 km para a Linha 2. Importante ressaltar que pelo fato da largura do Filtro DS ser de  $20 \mu s$  SEL (2017) e

o método ser baseado na detecção das duas primeiras ondas sucessivas, ele não é capaz de identificar com precisão faltas em distâncias menores do que 3 km de ambos os terminais das linhas monitoradas.

## 6.6 AJUSTE DO MÉTODO DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS

De maneira a considerar as situações mais adversas previstas e mostradas na Seção 6.4 e na Seção 6.5, foram utilizados para ajuste do método de localização de faltas os parâmetros mostrados na Tabela 6.2, fazendo-o sensível a estas situações. O valor do fator de atenuação foi considerado 50%, de modo a tornar o método sensível a faltas que ocorram próximo ao terminal remoto, pois neste caso a onda inicial trafejará quase que o comprimento total da linha.

**Tabela 6.2.** Parâmetros utilizados para ajuste do método de localização de faltas.

Parâmetro	Descrição	Valor
$R_f$	Resistência de falta	100 $\Omega$
$\theta_{lim}$	Ângulo de incidência da falta	25°
$FA$	Fator de atenuação	50%

**Fonte:** Autoria própria.

## 6.7 RESULTADO DAS SIMULAÇÕES

Nesta seção serão apresentados os resultados de todas as simulações descritas na Seção 6.5, utilizando os ajustes apresentados na Seção 6.6, para o sistema apresentado na Seção 6.3.

### 6.7.1 Faltas sólidas na Linha 1 com ângulo de incidência de 90°

Nesta seção serão apresentados os resultados para o cenário de faltas sólidas na Linha 1, com ângulo de incidência de 90°.

### 6.7.1.1 Resultados para o método de classificação de faltas

Para este caso, todas os tipos de faltas foram classificadas corretamente, com exceção das faltas bifásicas com terra, que foram classificadas como as suas correspondentes faltas bifásicas sem terra, conforme previsto na Seção 4.5.1.3, e das faltas trifásicas, que foram classificadas como uma das faltas bifásicas sem terra, conforme previsto no Capítulo 4. Neste cenário, as faltas trifásicas foram classificadas como faltas bifásicas entre as fases B e C.

### 6.7.1.2 Resultados para o método proposto

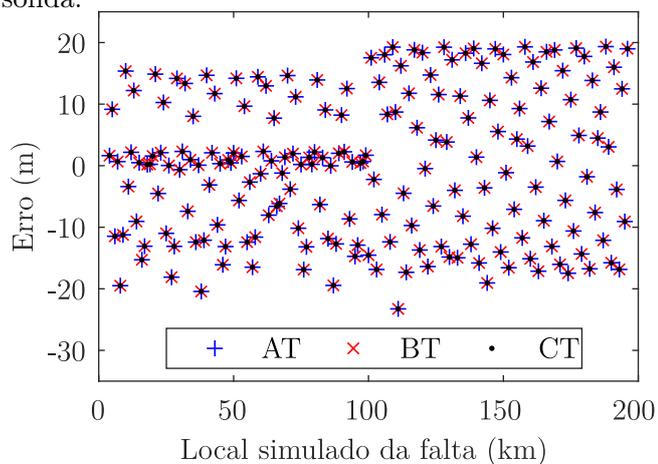
O método proposto identificou corretamente a linha com falta para todos os casos. A Figura 6.4, a Figura 6.5 e a Figura 6.6 apresentam o erro das estimativas das localizações da falta para todos tipos de faltas clássicos em sistemas trifásicos. Para obtenção destes gráficos, foi utilizado o primeiro valor do vetor de estimativas de localização de faltas, com exceção de faltas monofásicas simuladas nas localizações de 189 km e 190 km, onde foi utilizado o segundo valor.

Verifica-se um erro maior para faltas bifásicas com terra e sem terra e faltas trifásicas ocorridas nas distâncias de 106 km e 107 km. Isto se verifica, pois para faltas que ocorrem por volta destas distâncias, a onda refratada no terminal remoto que retorna pela linha sã chega quase no mesmo instante da onda refletida no terminal local e depois refletida no ponto de falta. Esta interferência distorce a forma de onda medida, fazendo com que a precisão do Filtro DS em detectar o tempo de chegada das ondas seja afetada. No entanto, este erro continua sendo muito pequeno, da ordem de um vão de torre (500 m) (GUZMÁN *et al.*, 2018).

### 6.7.1.3 Resultados para o método proposto por Guangbin

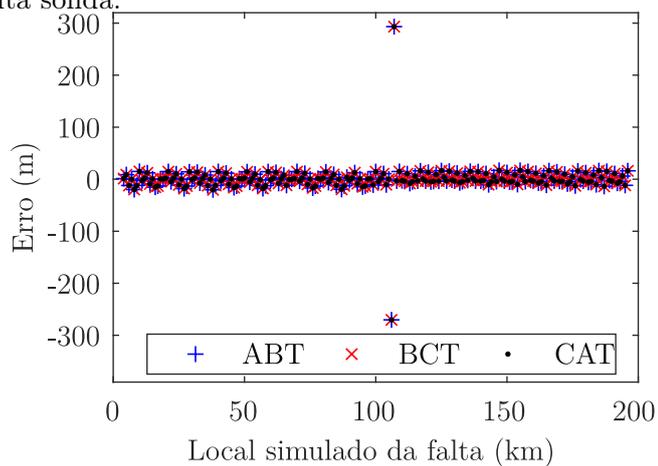
O método proposto por Guangbin identificou corretamente a linha com falta para todos os casos. A Figura 6.7, a Figura 6.8 e a Figura 6.9 apresentam o erro das estimativas das localizações da falta para todos tipos de faltas clássicos em sistemas trifásicos.

**Figura 6.4.** Resultados para o método proposto - faltas monofásicas na Linha 1 com ângulo de incidência de  $90^\circ$  e falta sólida.



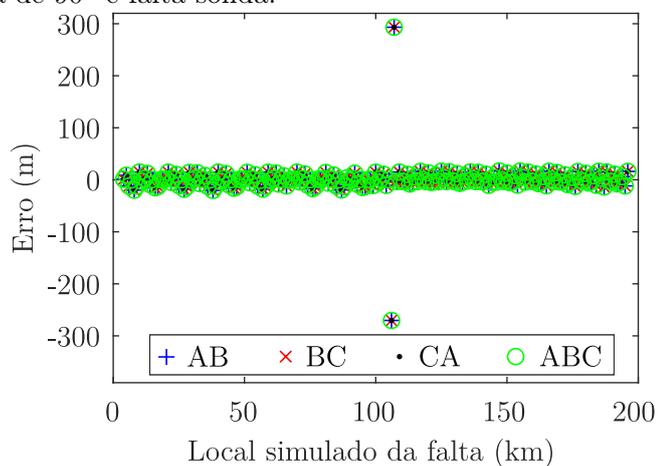
**Fonte:** Autoria própria.

**Figura 6.5.** Resultados para o método proposto - faltas bifásicas com terra na Linha 1 com ângulo de incidência de  $90^\circ$  e falta sólida.



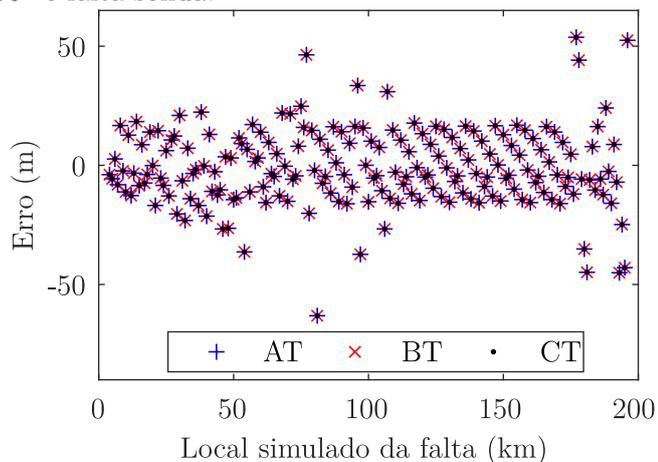
**Fonte:** Autoria própria.

**Figura 6.6.** Resultados para o método proposto - faltas bifásicas sem terra e trifásicas na Linha 1 com ângulo de incidência de  $90^\circ$  e falta sólida.



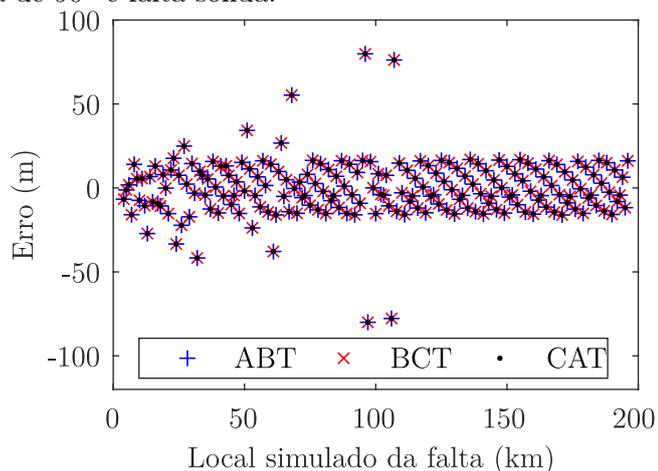
**Fonte:** Autoria própria.

**Figura 6.7.** Resultados para o método proposto por Guangbin - faltas monofásicas na Linha 1 com ângulo de incidência de  $90^\circ$  e falta sólida.



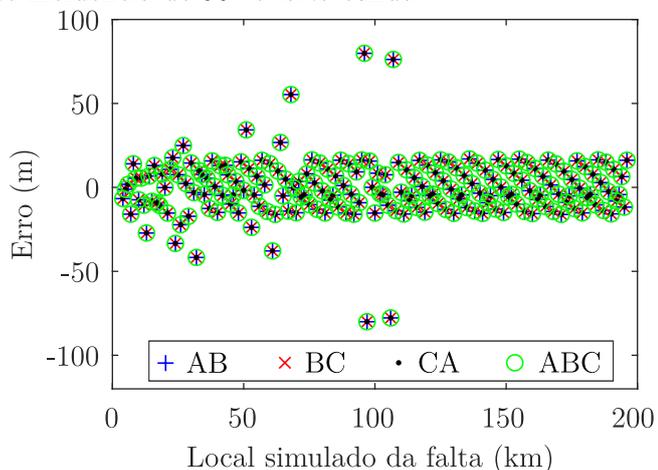
**Fonte:** Autoria própria.

**Figura 6.8.** Resultados para o método proposto por Guangbin - faltas bifásicas com terra na Linha 1 com ângulo de incidência de  $90^\circ$  e falta sólida.



**Fonte:** Autoria própria.

**Figura 6.9.** Resultados para o método proposto por Guangbin - faltas bifásicas sem terra e trifásicas na Linha 1 com ângulo de incidência de  $90^\circ$  e falta sólida.



**Fonte:** Autoria própria.

### 6.7.2 Faltas na Linha 1 com resistência de falta de $100 \Omega$ e ângulo de incidência de $25^\circ$

Nesta seção serão apresentados os resultados para o cenário de faltas na Linha 1, com resistência de falta de  $100 \Omega$  e ângulo de incidência de  $25^\circ$ .

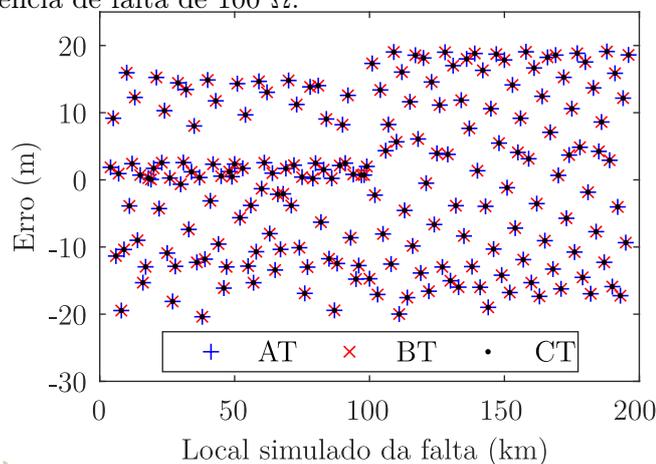
#### 6.7.2.1 Resultados para o método de classificação de faltas

Para este caso, todas os tipos de faltas foram classificadas corretamente, com exceção das faltas trifásicas, que foram classificadas como uma das faltas bifásicas sem terra, conforme previsto no Capítulo 4. Neste cenário, as faltas trifásicas foram classificadas como faltas bifásicas entre as fases C e A.

#### 6.7.2.2 Resultados para o método proposto

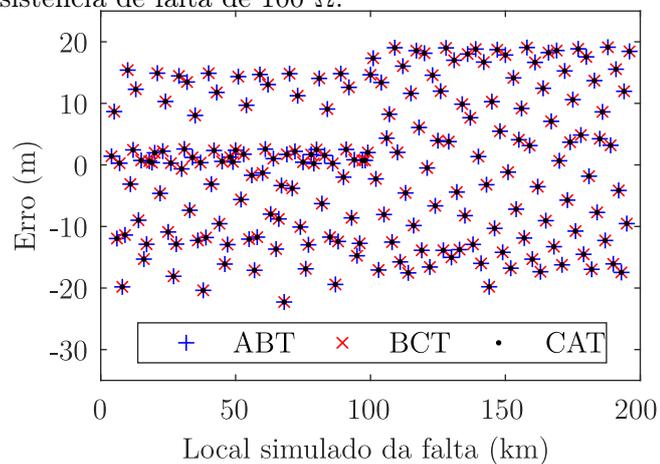
O método proposto identificou corretamente a linha com falta para todos os casos. A Figura 6.10, a Figura 6.11 e a Figura 6.12 apresentam o erro das estimativas das localizações da falta para todos tipos de faltas clássicos em sistemas trifásicos. Para obtenção destes gráficos, foi utilizado o primeiro valor do vetor de estimativas de localização de faltas, com exceção de faltas simuladas nas localizações de 189 km e 190 km e faltas bifásicas sem terra simuladas na localização de 191 km, onde foi utilizado o segundo valor.

**Figura 6.10.** Resultados para o método proposto - faltas monofásicas na Linha 1 com ângulo de incidência de  $25^\circ$  e resistência de falta de  $100 \Omega$ .



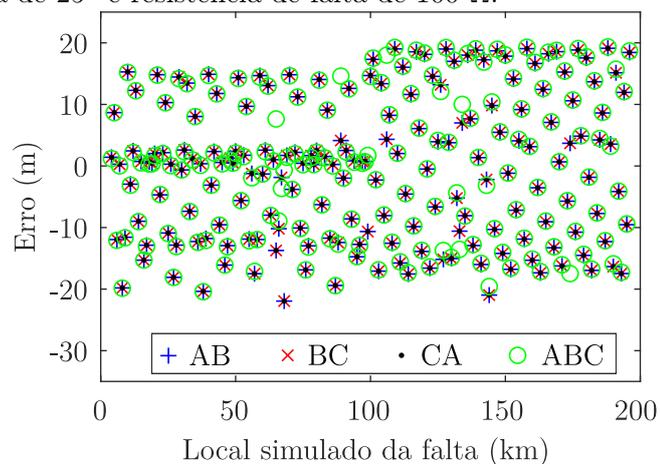
**Fonte:** Autoria própria.

**Figura 6.11.** Resultados para o método proposto - faltas bifásicas com terra na Linha 1 com ângulo de incidência de  $25^\circ$  e resistência de falta de  $100 \Omega$ .



**Fonte:** Autoria própria.

**Figura 6.12.** Resultados para o método proposto - faltas bifásicas sem terra e trifásicas na Linha 1 com ângulo de incidência de  $25^\circ$  e resistência de falta de  $100 \Omega$ .

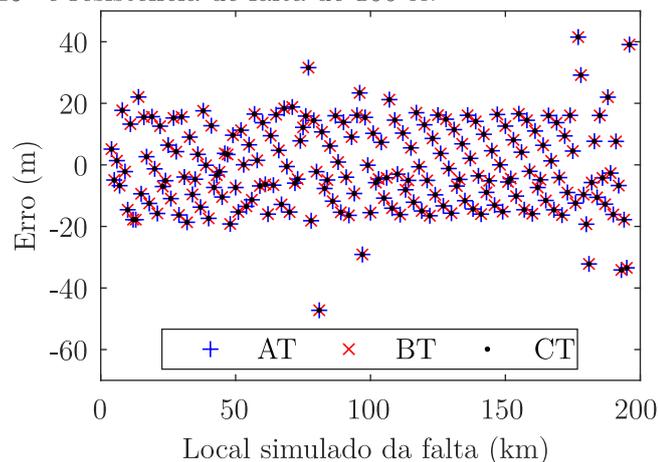


**Fonte:** Autoria própria.

### 6.7.2.3 Resultados para o método proposto por Guangbin

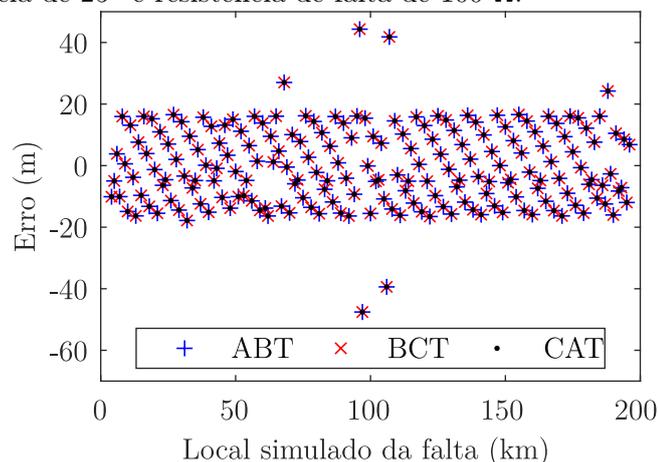
O método proposto por Guangbin identificou corretamente a linha com falta para todos os casos. A Figura 6.13, a Figura 6.14 e a Figura 6.15 apresentam o erro das estimativas das localizações da falta para todos tipos de faltas clássicos em sistemas trifásicos.

**Figura 6.13.** Resultados para o método proposto por Guangbin - faltas monofásicas na Linha 1 com ângulo de incidência de  $25^\circ$  e resistência de falta de  $100 \Omega$ .



**Fonte:** Autoria própria.

**Figura 6.14.** Resultados para o método proposto por Guangbin - faltas bifásicas com terra na Linha 1 com ângulo de incidência de  $25^\circ$  e resistência de falta de  $100 \Omega$ .

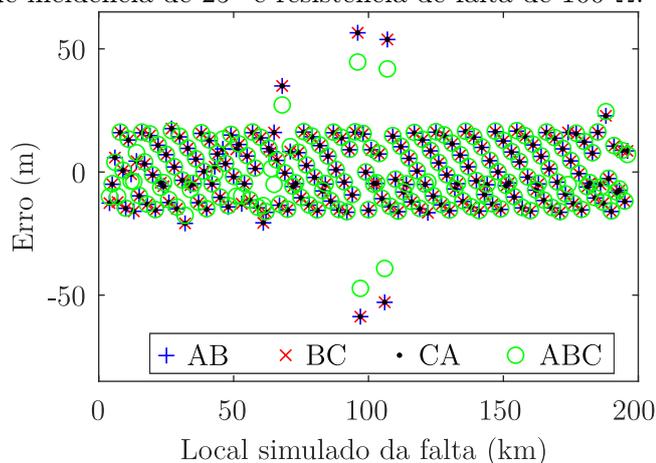


**Fonte:** Autoria própria.

### 6.7.3 Faltas sólidas na Linha 2 com ângulo de incidência de $90^\circ$

Nesta seção serão apresentados os resultados para o cenário de faltas sólidas na Linha 2, com ângulo de incidência de  $90^\circ$ .

**Figura 6.15.** Resultados para o método proposto por Guangbin - faltas bifásicas sem terra e trifásicas na Linha 1 com ângulo de incidência de  $25^\circ$  e resistência de falta de  $100 \Omega$ .



**Fonte:** Autoria própria.

### 6.7.3.1 Resultados para o método de classificação de faltas

Para este caso, todos os tipos de faltas foram classificadas corretamente, com exceção das faltas bifásicas com terra, que foram classificadas como as suas correspondentes faltas bifásicas sem terra, conforme previsto na Seção 4.5.1.3, e das faltas trifásicas, que foram classificadas como uma das faltas bifásicas sem terra, conforme previsto no Capítulo 4. Neste cenário, as faltas trifásicas foram classificadas como faltas bifásicas entre as fases B e C.

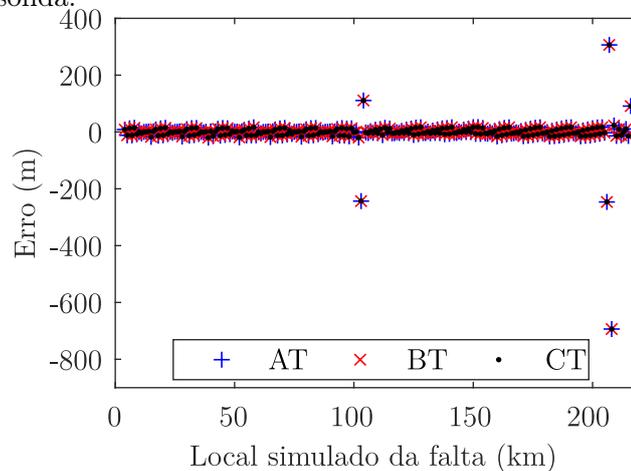
### 6.7.3.2 Resultados para o método proposto

O método proposto identificou corretamente a linha com falta para todos os casos. A Figura 6.16, a Figura 6.17 e a Figura 6.18 apresentam o erro das estimativas das localizações da falta para todos os tipos de faltas clássicos em sistemas trifásicos. Para obtenção destes gráficos, foi utilizado o primeiro valor do vetor de estimativas de localização de faltas.

Verifica-se um erro maior para faltas ocorridas nas distâncias de 103 km e 104 km e em distâncias próximas de 208 km. Para as distâncias de 103 e 104 km, a onda refratada no terminal remoto que retorna pela linha não chega quase no mesmo instante da onda refletida no terminal local e depois refletida no ponto de falta. Para distâncias próximas de 208 km, a onda originalmente gerada pela falta chega quase no mesmo instante da onda refratada no terminal remoto que retorna pela linha não. Estas interferências distorcem as formas de onda medidas, fazendo com que a precisão do Filtro DS em detectar o tempo de chegada das ondas

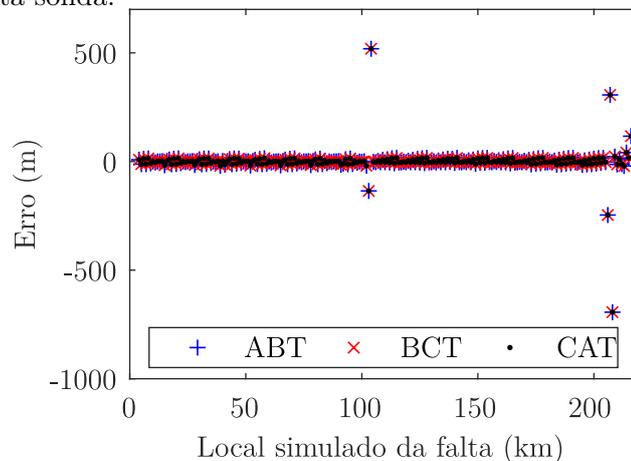
seja afetada. No entanto, este erro continua sendo muito pequeno, da ordem de um vão de torre (500 m) (GUZMÁN *et al.*, 2018).

**Figura 6.16.** Resultados para o método proposto - faltas monofásicas na Linha 2 com ângulo de incidência de  $90^\circ$  e falta sólida.



**Fonte:** Autoria própria.

**Figura 6.17.** Resultados para o método proposto - faltas bifásicas com terra na Linha 2 com ângulo de incidência de  $90^\circ$  e falta sólida.

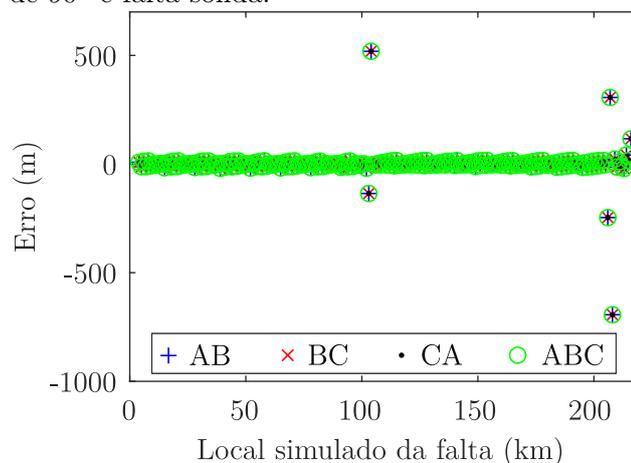


**Fonte:** Autoria própria.

### 6.7.3.3 Resultados para o método proposto por Guangbin

O método proposto por Guangbin identificou corretamente a linha com falta para faltas simuladas nas localizações entre 4 km e 208 km e identificou erroneamente a linha com falta para faltas simuladas nas localizações entre 209 km e 216 km. Isto ocorre, pois a partir deste ponto a onda proveniente da falta chega no terminal monitorado depois da onda que refrata no terminal remoto e retorna pela linha sã, fator que não foi considerado no método proposto por

**Figura 6.18.** Resultados para o método proposto - faltas bifásicas sem terra e trifásicas na Linha 2 com ângulo de incidência de  $90^\circ$  e falta sólida.



**Fonte:** Autoria própria.

Guangbin. A Figura 6.19, a Figura 6.20 e a Figura 6.21 apresentam o erro das estimativas das localizações da falta para todos tipos de faltas clássicos em sistemas trifásicos.

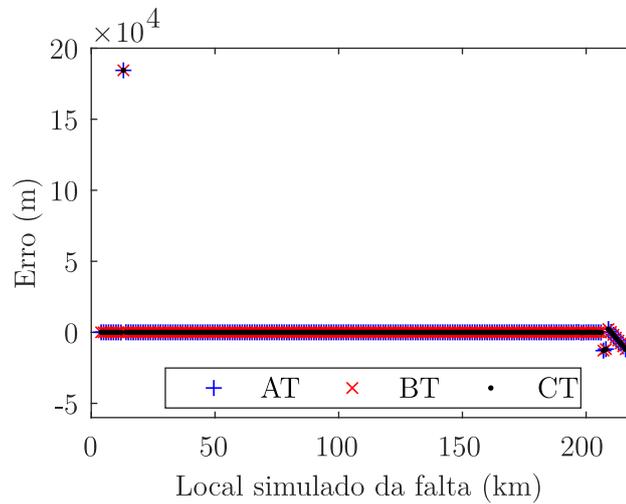
Para faltas simuladas nas localizações de 207 km e 208 km, foi verificado um erro de aproximadamente 13 km. Nestas localizações, a onda originalmente gerada pela falta chega quase no mesmo instante da onda refratada no terminal remoto que retorna pela linha sã. Esta proximidade entre as duas frentes de onda de interesse faz com que a precisão do Filtro DS em detectar estes dois tempos de chegada seja afetada, comprometendo o método proposto por Guangbin que, ao contrário do método proposto neste trabalho, não prevê esta situação.

Para faltas simuladas na localização de 13 km, foi verificado um erro de aproximadamente 184 km na estimativa de local de falta. Neste caso, a onda proveniente da linha adjacente conectada ao terminal local superou a amplitude da onda que retorna pela linha sã, sendo detectada em seu lugar. Isto confundiu o método de localização de faltas proposto por Guangbin, que considera que sempre a onda que provém da linha sã terá amplitude maior do que as outras, o que não se verificou neste caso.

#### 6.7.4 Faltas na Linha 2 com resistência de falta de $100 \Omega$ e ângulo de incidência de $25^\circ$

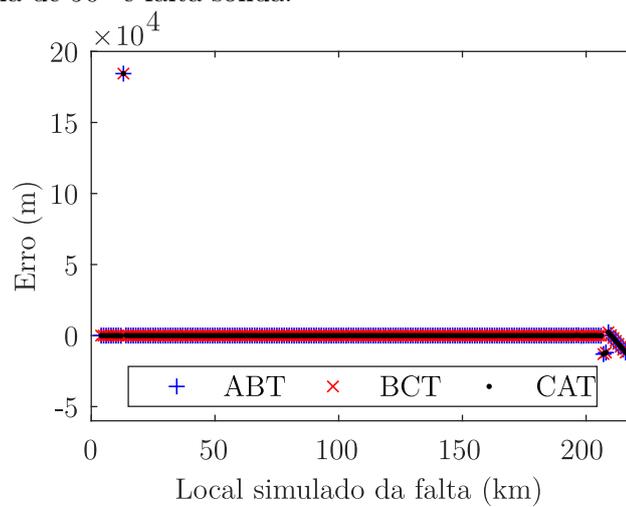
Nesta seção serão apresentados os resultados para o cenário de faltas na Linha 2, com resistência de falta de  $100 \Omega$  e ângulo de incidência de  $25^\circ$ .

**Figura 6.19.** Resultados para o método proposto por Guangbin - faltas monofásicas na Linha 2 com ângulo de incidência de  $90^\circ$  e falta sólida.



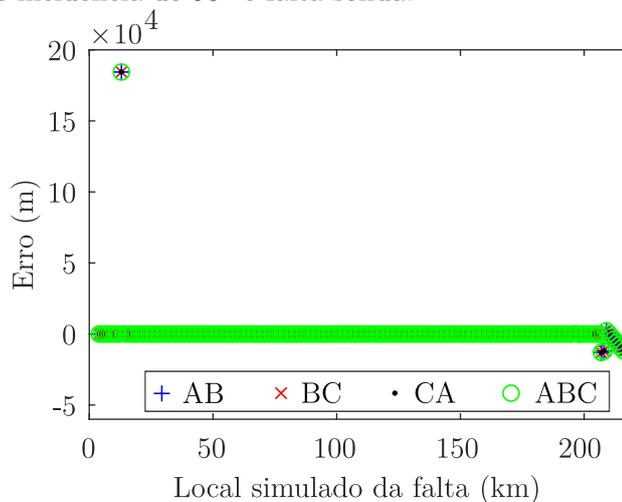
**Fonte:** Autoria própria.

**Figura 6.20.** Resultados para o método proposto por Guangbin - faltas bifásicas com terra na Linha 2 com ângulo de incidência de  $90^\circ$  e falta sólida.



**Fonte:** Autoria própria.

**Figura 6.21.** Resultados para o método proposto por Guangbin - faltas bifásicas sem terra e trifásicas na Linha 2 com ângulo de incidência de  $90^\circ$  e falta sólida.



**Fonte:** Autoria própria.

#### 6.7.4.1 Resultados para o método de classificação de faltas

Para este caso, todas os tipos de faltas foram classificadas corretamente, com exceção das faltas trifásicas, que foram classificadas como uma das faltas bifásicas sem terra, conforme previsto no Capítulo 4 e faltas bifásicas com terra para a simulação de falta na localização de 208 km, que foram classificadas como outro tipo de falta bifásica com terra. Neste cenário, as faltas trifásicas foram classificadas como faltas bifásicas entre as fases C e A .

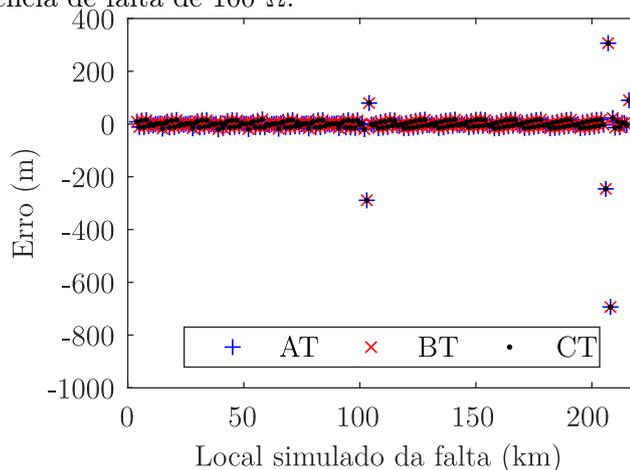
#### 6.7.4.2 Resultados para o método proposto

O método proposto identificou corretamente a linha com falta para todos os casos. A Figura 6.22, a Figura 6.23 e a Figura 6.24 apresentam o erro das estimativas das localizações da falta para todos tipos de faltas clássicos em sistemas trifásicos. Para obtenção destes gráficos, foi utilizado o primeiro valor do vetor de estimativas de localização de faltas, com exceção de faltas assimétricas simuladas na localização de 208 km, onde foi utilizado o segundo valor.

Verifica-se um erro maior para faltas ocorridas nas distâncias de 103 km e 104 km e em distâncias próximas de 208 km. Para as distâncias de 103 e 104 km, a onda refratada no terminal remoto que retorna pela linha sã chega quase no mesmo instante da onda refletida no terminal local e depois refletida no ponto de falta. Para distâncias próximas de 208 km, a onda originalmente gerada pela falta chega quase no mesmo instante da onda refratada no

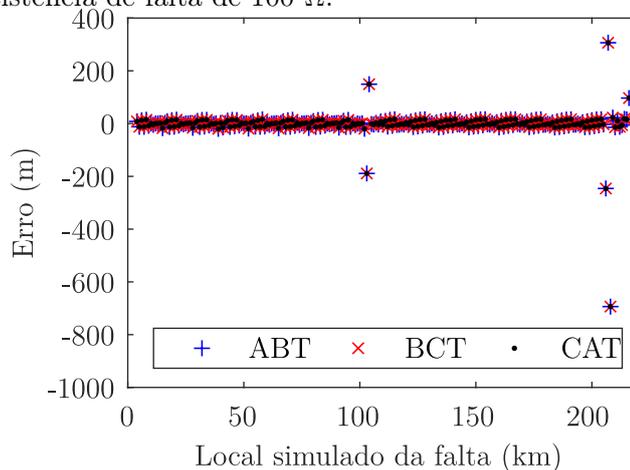
terminal remoto que retorna pela linha sã. Estas interferências distorcem as formas de onda medidas, fazendo com que a precisão do Filtro DS em detectar o tempo de chegada das ondas seja afetada. No entanto, este erro continua sendo muito pequeno, da ordem de um vão de torre (500 m) (GUZMÁN *et al.*, 2018).

**Figura 6.22.** Resultados para o método proposto - faltas monofásicas na Linha 2 com ângulo de incidência de  $25^\circ$  e resistência de falta de  $100 \Omega$ .



**Fonte:** Autoria própria.

**Figura 6.23.** Resultados para o método proposto - faltas bifásicas com terra na Linha 2 com ângulo de incidência de  $25^\circ$  e resistência de falta de  $100 \Omega$ .

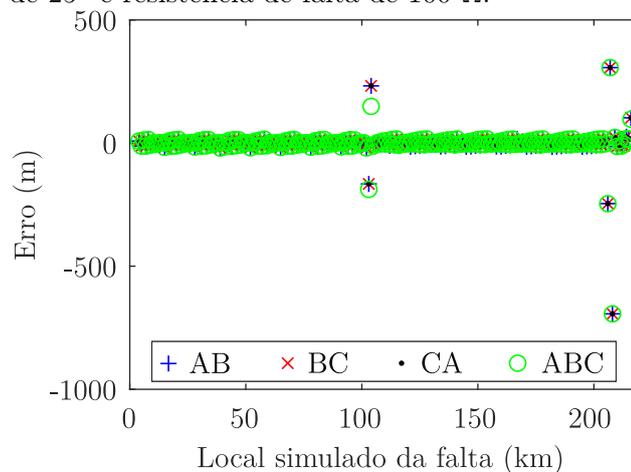


**Fonte:** Autoria própria.

### 6.7.4.3 Resultados para o método proposto por Guangbin

O método proposto por Guangbin identificou corretamente a linha com falta para faltas simuladas nas localizações entre 4 km e 208 km e identificou erroneamente a linha com falta

**Figura 6.24.** Resultados para o método proposto - faltas bifásicas sem terra e trifásicas na Linha 2 com ângulo de incidência de  $25^\circ$  e resistência de falta de  $100 \Omega$ .



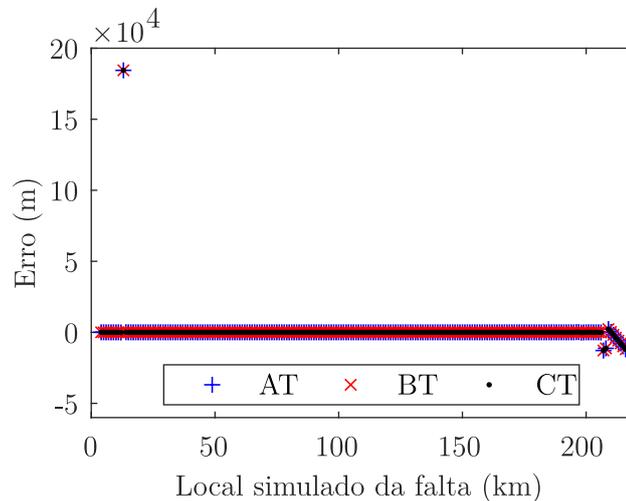
**Fonte:** Autoria própria.

para faltas simuladas nas localizações entre 209 km e 216 km. Isto ocorre, pois a partir deste ponto a onda proveniente da falta chega no terminal monitorado depois da onda que refrata no terminal remoto e retorna pela linha sã, fator que não foi considerado no método proposto por Guangbin. A Figura 6.25, a Figura 6.26 e a Figura 6.27 apresentam o erro das estimativas das localizações da falta para todos tipos de faltas clássicos em sistemas trifásicos.

Para faltas simuladas nas localizações de 207 km e 208 km, foi verificado um erro de aproximadamente 13 km. Nestas localizações, a onda originalmente gerada pela falta chega quase no mesmo instante da onda refratada no terminal remoto que retorna pela linha sã. Esta proximidade entre as duas frentes de onda de interesse faz com que a precisão do Filtro DS em detectar estes dois tempos de chegada seja afetada, comprometendo o método proposto por Guangbin que, ao contrário do método proposto neste trabalho, não prevê esta situação.

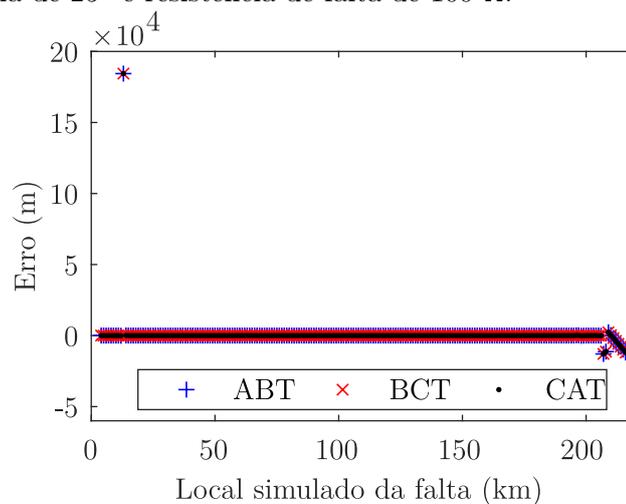
Para faltas simuladas na localização de 13 km, foi verificado um erro de aproximadamente 184 km na estimativa de local de falta. Neste caso, a onda proveniente da linha adjacente conectada ao terminal local superou a amplitude da onda que retorna pela linha sã, sendo detectada em seu lugar. Isto confundiu o método de localização de faltas proposto por Guangbin, que considera que sempre a onda que provêm da linha sã terá amplitude maior do que as outras, o que não se verificou neste caso.

**Figura 6.25.** Resultados para o método proposto por Guangbin - faltas monofásicas na Linha 2 com ângulo de incidência de  $25^\circ$  e resistência de falta de  $100 \Omega$ .



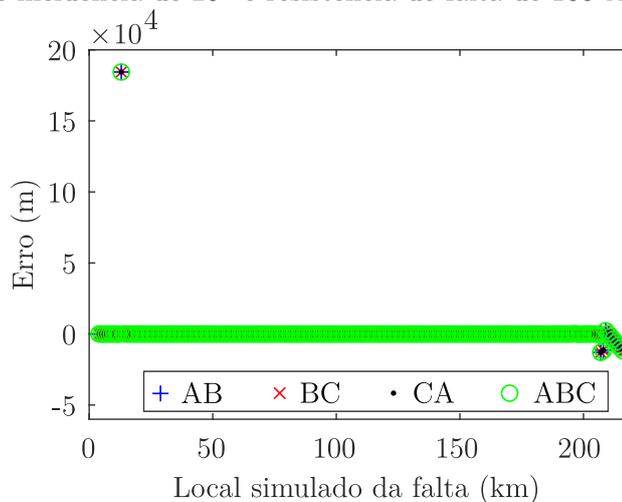
**Fonte:** Autoria própria.

**Figura 6.26.** Resultados para o método proposto por Guangbin - faltas bifásicas com terra na Linha 2 com ângulo de incidência de  $25^\circ$  e resistência de falta de  $100 \Omega$ .



**Fonte:** Autoria própria.

**Figura 6.27.** Resultados para o método proposto por Guangbin - faltas bifásicas sem terra e trifásicas na Linha 2 com ângulo de incidência de  $25^\circ$  e resistência de falta de  $100 \Omega$ .



**Fonte:** Autoria própria.

## 6.8 ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 6.8.1 Método de classificação de faltas

O método de classificação de faltas não funcionou como o previsto para faltas bifásicas com terra simuladas na localização de 208 km, com ângulo de incidência de  $25^\circ$  e resistência de falta de  $100 \Omega$ . Neste caso, as faltas bifásicas com terra foram classificadas como outro tipo de falta bifásica com terra. Isto ocorreu, pois é justamente na proximidade desta localização no sistema simulado que a onda proveniente da falta chega simultaneamente com a onda que refrata no terminal remoto e retorna pela linha sã. Isto faz com que a proporção entre as ondas de modo terra e aéreo seja perdida, sendo que esta proporção é utilizada para distinguir dentre os tipos de faltas bifásicas com terra, podendo confundir o método de classificação de faltas. Sendo assim, nesta situação especial, o método de classificação de falta pode confundir uma falta bifásica com terra com outra falta bifásica com terra. Utilizar esta classificação de falta errada não comprometeu o método de localização de faltas, nem teve influência significativa no erro em relação aos outros casos. No entanto, é importante ressaltar esta limitação do método de classificação de faltas, tendo em vista que ele pode ser utilizado para outras aplicações de localização de faltas e proteção.

Foi previsto que quando o ângulo de incidência de falta for próximo de  $90^\circ$ , faltas bifásicas com terra serão classificadas como as suas correspondentes faltas bifásicas sem terra. Tal fato

foi confirmado por meio das simulações realizadas. Da mesma forma foi previsto que faltas trifásicas seriam classificadas como alguma falta bifásica sem terra, sendo isto confirmado por meio das simulações realizadas.

### 6.8.2 Método proposto neste trabalho

O método proposto, na maior parte das situações, dá como resposta de estimativa do local de falta um vetor, em que os seus elementos representam, em ordem decrescente de probabilidade, as estimativas dos locais da falta. Sendo assim, o método proposto identificou corretamente a falta com o primeiro elemento do vetor de estimativas do local da falta em 99,53% dos casos e com o segundo elemento do vetor de estimativas do local da falta em 0,47% dos casos. Em nenhum caso foi utilizado o terceiro elemento do vetor. Neste aspecto o resultado foi satisfatório para os testes realizados.

Considerando os erros absolutos em relação à estimativa que mais se aproximou do local simulado da falta, o maior deles foi de 694 metros, sendo que 75% dos deles foram menores que 14 metros.

Pelo exposto, o método proposto neste trabalho apresentou um bom resultado em estimar a localização de faltas para os casos simulados.

### 6.8.3 Método proposto por Guangbin

O método proposto por Guangbin errou a identificação da linha com falta para faltas simuladas na Linha 2 em localizações maiores ou iguais a 208 km, apresentando erros nas estimativas de local da falta de até 13 km. Isto ocorre, pois a partir deste ponto a onda proveniente da falta chega no terminal monitorado depois da onda que refrata no terminal remoto e retorna pela linha sã, fator que não foi considerado no método proposto por Guangbin. Considerando o universo de casos simulados, isto representa 2,22%.

Para faltas simuladas na Linha 2 nas localizações de 207 km e 208 km, foi verificado um erro de aproximadamente 13 km. Nestas localizações a onda originalmente gerada pela falta chega quase no mesmo instante da onda refratada no terminal remoto que retorna pela linha

sã. Esta proximidade entre as duas frentes de onda de interesse faz com que a precisão do Filtro DS em detectar estes dois tempos de chegada seja afetada, comprometendo o método proposto por Guangbin que, ao contrário do método proposto neste trabalho, não prevê esta situação.

Para faltas simuladas na Linha 2 na localização de 13 km, foi verificado um erro de 184 km na estimativa de local de falta. Neste caso, a onda proveniente da linha adjacente conectada ao terminal local superou a amplitude da onda que retorna pela linha sã, sendo detectada em seu lugar. Isto confundiu o método de localização de faltas proposto por Guangbin, que considera que sempre a onda que provêm da linha sã terá amplitude maior do que as outras, o que nem sempre se verifica. Considerando o universo de casos simulados, isto representa 0,25%.

Embora tenham ocorrido estes erros absolutos grandes para o método proposto por Guangbin, 75% deles foram menores que 15,5 metros, sendo este um bom resultado para a maioria dos casos simulados.

#### 6.8.4 Comparativo entre os métodos de localização de faltas

Como o objetivo de comparar os dois métodos de localização de faltas testados, foi elaborado o *boxplot* com os resultados dos módulos dos erros das localizações de falta das 8120 simulações realizadas, o qual é apresentado na Figura 6.28, na Figura 6.29 e na Figura 6.30. Os *boxplots* apresentados mostram as medianas (traço horizontal no centro do retângulo), o quartil inferior (traço horizontal na borda inferior do retângulo), o quartil superior (traço horizontal na borda superior do retângulo), a cauda inferior (traço horizontal inferior representando o menor valor de todas as amostras) e a cauda superior (traço horizontal superior representando o maior valor de todas as amostras).

Observando a Figura 6.29 e a Figura 6.30 observa-se que a cauda superior do método proposto neste trabalho é bem inferior ao método proposto por Guangbin. Observando a Figura 6.28, observa-se que o quartil superior, a mediana e o quartil inferior do método proposto neste trabalho são levemente inferiores ao método proposto por Guangbin, ao passo que o cauda inferior apresentam valores muito próximos. Do ponto de vista prático, os dois métodos apresentaram desempenhos similares.

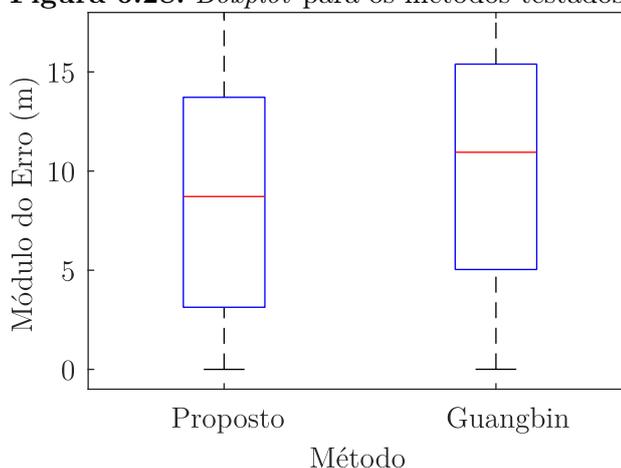
O método proposto por Guangbin apresenta um erro muito grande nas situações mostradas

na Seção 6.8.3, ao passo que o método proposto neste trabalho não apresenta esta fragilidade. Além disto, o método proposto neste trabalho não errou a identificação da linha com falta, ao passo que em algumas situações o método proposto por Guangbin errou esta identificação, conforme mostrado em 6.8.3. Embora o método proposto neste trabalho seja mais complexo que o método proposto por Guangbin, é preferível utilizá-lo, pois ele é menos susceptível a erros.

Os autores do método proposto por Guangbin indicam, em outro trabalho, que este método deve ser implementado no terminal que tenha o maior número de linhas conectadas (ZHANG *et al.*, 2018), pois isto facilita a detecção da onda que refrata no terminal remoto e retorna pela linha são. Este cuidado não necessita ser observado na implementação do método proposto, o que se apresenta como mais uma vantagem.

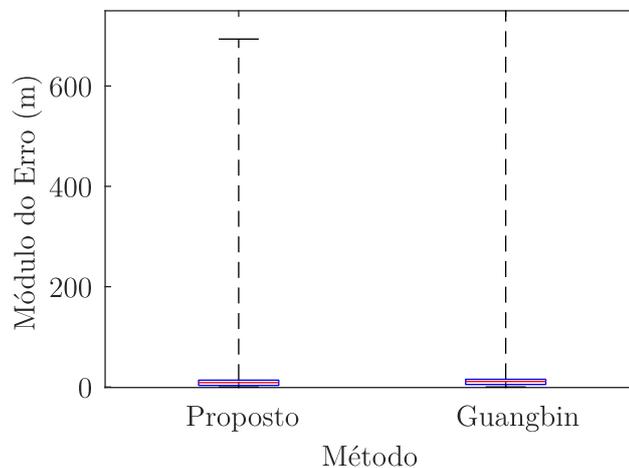
Além disso, o método proposto por Guangbin testado neste capítulo foi o apresentado em Guangbin *et al.* (2013), com a inclusão das melhorias propostas neste trabalho, conforme justificado e apresentado na Seção 6.1. Isto evidencia que as contribuições deste trabalho de pesquisa continuam relevantes, ainda que seja utilizado o método proposto por Guangbin.

**Figura 6.28.** *Boxplot* para os métodos testados.



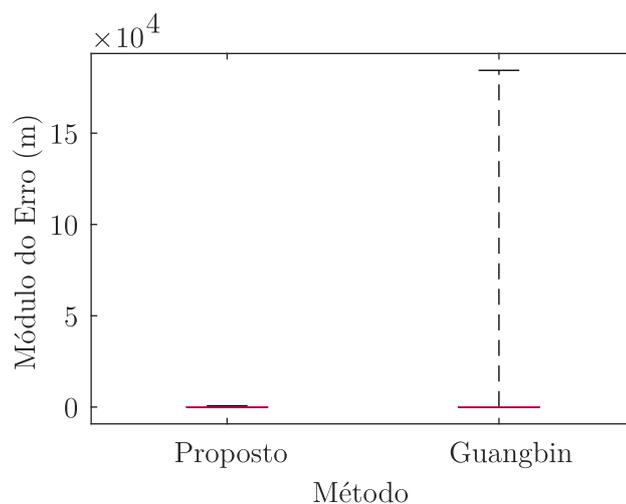
**Fonte:** Autoria própria.

**Figura 6.29.** *Boxplot* para os métodos testados - zoom na cauda superior do método proposto neste trabalho.



**Fonte:** Autoria própria.

**Figura 6.30.** *Boxplot* para os métodos testados - zoom na cauda superior do método proposto por Guangbin.



**Fonte:** Autoria própria.

# CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo serão mostradas as conclusões acerca dos diversos resultados deste trabalho de pesquisa, enfatizando as suas contribuições. Também serão sugeridas propostas de trabalhos futuros envolvendo o tema.

O modelo desenvolvido no Capítulo 3 prevê com precisão a origem e propagação de ondas viajantes devido a faltas em linhas de transmissão trifásicas, mesmo em condições de faltas assimétricas, sendo um avanço científico na área. Embora o objetivo inicial para o desenvolvimento deste modelo tenha sido o de subsidiar a elaboração do método de localização de faltas apresentado no Capítulo 5, ele tem grande potencial de utilização no desenvolvimento de outros métodos de localização de faltas e de aplicações de proteção de linhas de transmissão. O conteúdo apresentado no Capítulo 3 também é de grande valia para pesquisadores interessados em fazer uma revisão nesta área do conhecimento, pois o desenvolvimento do modelo é feito de forma detalhada, trazendo as referências das pesquisas feitas anteriormente, havendo uma compilação do conhecimento acerca da propagação de ondas viajantes em linhas de transmissão trifásicas. Este modelo pode ser adaptado para linhas de transmissão polifásicas com quantas fases se queiram. Sendo assim, sugere-se como trabalho futuro a adaptação deste modelo para linhas de transmissão bifásicas, pois ele pode ser aplicado imediatamente nos estudos de propagação de ondas nas linhas de corrente contínua comercialmente disponíveis.

Em muitos casos, linhas de transmissão aéreas paralelas compartilham a mesma estrutura (circuito duplo). Nestas situações, podem ocorrer faltas entre circuitos, sendo que esta situação não foi abordada no modelo desenvolvido no Capítulo 3, sendo interessante avaliar em trabalhos futuros. Ao modelar linhas paralelas que compartilham a mesma torre como um circuito hexafásico, de modo a considerar faltas entre circuitos, é possível a ocorrência de 120 tipos de faltas (HAIHONG; QINGSHAN, 2008). Sendo assim, não é uma tarefa fácil realizar este

estudo, porém ele poderia proporcionar oportunidades de desenvolvimento de novos algoritmos de proteção e localização de faltas para estas situações.

O método desenvolvido no Capítulo 4 e validado no Capítulo 6 é capaz de classificar as faltas somente com a informação das primeiras ondas viajantes de corrente detectadas no terminal monitorado, o que possibilita classificar a falta sob condições de eliminação rápida do defeito, sendo um avanço científico na área. Este método foi desenvolvido de forma a possibilitar a utilização do algoritmo de localização de faltas apresentado no Capítulo 5 sob condições de eliminação rápida do defeito, tendo em vista que ele necessita da classificação de faltas para funcionar adequadamente. No entanto, como outros algoritmos de localização de faltas e de proteção de linhas de transmissão necessitam da informação fornecida por algoritmos de classificação de faltas, o método desenvolvido tem grande potencial de uso nestas outras aplicações, pois ele classifica com precisão o tipo de falta, excetuando-se as faltas trifásicas que são classificadas como um dos três tipos de faltas bifásicas sem envolver a terra. Este método proposto falha em classificar faltas bifásicas com terra quando o ângulo de incidência de falta é próximo de  $90^\circ$ , pois nesta situação a onda de modo terra lançada é quase nula. No entanto, estas faltas bifásicas com terra são classificadas como as suas correspondentes faltas bifásicas sem terra, sendo preservada a informação das fases faltosas. Como trabalho futuro nesta linha, propõe-se investigar formas de melhorar o algoritmo de classificação de faltas proposto, tendo como melhorias sugeridas a inclusão da diferenciação de faltas trifásicas das faltas bifásicas sem envolver a terra e classificar corretamente as faltas bifásicas com terra quando o ângulo de incidência for próximo de  $90^\circ$ .

O método de localização de faltas desenvolvido no Capítulo 5 e validado no Capítulo 6 é capaz de localizar faltas, utilizando apenas dados de corrente de um terminal, de maneira precisa para a grande maioria dos cenários. Por ser baseado na teoria das ondas viajantes e utilizar apenas as duas primeiras frentes de onda de corrente que vêm da direção da falta, o método é capaz de localizar a falta com precisão e em condições de eliminação rápida do defeito. Sendo assim, o método proposto é um avanço científico nesta área, porém não foi implementado em dispositivos reais e testado em casos reais. Sugere-se como trabalho futuro a implementação e testes do método proposto em casos reais.

Para suprir as dificuldades que o método encontra em localizar a falta em alguns cenários

é apresentado um vetor com as possíveis localizações de falta, na ordem da mais provável para a menos provável. Nos cenários mais adversos, pode ocorrer da localização real da falta não corresponder ao primeiro valor do vetor que contém as estimativas da localização da falta, porém a localização real corresponderá a um dos valores contantes no vetor que contém as estimativas da localização da falta. Sendo assim, a solução para a dificuldade do algoritmo em localizar faltas em alguns cenários já foi apresentada neste trabalho.

Este método de localização de faltas não garante a obtenção da estimativa correta da localização da falta em caso de faltas entre circuitos, que podem ocorrer em linhas de transmissão aéreas paralelas que compartilham a mesma estrutura (circuito duplo). Sendo assim, sugere-se como trabalho futuro a melhoria do método proposto de modo que ele possa localizar faltas neste cenário.

As situações analisadas para o desenvolvimento do método de localização de faltas são de grande valia para pesquisadores interessados nesta área do conhecimento, pois as ideias desenvolvidas podem ser aproveitadas em desenvolvimentos futuros na área de localização de faltas e proteção de linhas de transmissão. As análises feitas mostram as situações que podem ocorrer quando a linha de transmissão em estudo possui outra linha de transmissão paralela.

Sugere-se como trabalho futuro na área de localização de faltas o desenvolvimento de algoritmo baseado na teoria de ondas viajantes utilizando dados de um terminal que seja menos dependente da topologia do sistema, podendo ser aplicado a linhas de transmissão que não possuam outras linhas em paralelo. Uma sugestão para a obtenção da direcionalidade das ondas de corrente para este caso seria adaptar o Filtro Direcional desenvolvido no Capítulo 5 para que seja aplicável no método de identificação de direcionalidade proposto em Batty *et al.* (1997), o qual se utiliza das ondas de corrente que chegam em uma subestação cujo barramento está conectado a três ou mais linhas de transmissão, estando disponíveis estas medições. Ainda assim, caso a linha não possua outras linhas em paralelo, teríamos duas possibilidades de localização de faltas: a primeira em que considera-se que a segunda frente de onda é a onda refletida no ponto de falta e a segunda em que considera-se que a segunda frente de onda é a onda refletida no terminal remoto e refratada no ponto de falta. Fazer esta distinção utilizando apenas a informação das ondas viajantes de corrente permanece um problema em aberto, sendo a solução indicada em Christopoulos *et al.* (1988), a qual necessita de uma investigação

---

aprofundada para obtenção de resultados satisfatórios para a grande maioria dos cenários. No entanto seria possível fazer esta distinção utilizando os métodos de localização de faltas de um terminal baseados em componentes fundamentais. Neste último caso, seria perdida a vantagem de localizar a falta com precisão sob condições de eliminação rápida do defeito.

Uma outra sugestão de trabalho futuro que pode ser considerada uma continuidade das investigações iniciadas neste trabalho é a investigação de métodos de extrair as informações de tensão pré-falta no ponto de falta e resistência de falta. Um método de extrair a tensão pré-falta no ponto de falta é proposto em Christopoulos *et al.* (1988), necessitando ser investigado para atestar a sua precisão e eventualmente propor melhorias. Com as informações da tensão pré-falta no ponto de falta e da primeira onda incidente, que poderia ser obtida caso estejam disponíveis as medições das correntes em todos equipamentos conectados ao barramento, é possível estimar a resistência de falta utilizando os equacionamentos do modelo desenvolvido no Capítulo 3. Estas informações podem ter grande valor para pesquisadores de diversas áreas da engenharia elétrica.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Contratos de Concessão do Serviço Público de Transmissão de Energia Elétrica*. Brasília, 2016. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/contratos-de-transmissao>>. Acesso em: 25 de abril de 2019. Citado 2 vezes nas páginas 1 and 5.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Resolução Normativa nº 729 de 28 de junho de 2016*. Brasília, 2016. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/atren2016729.pdf>>. Acesso em: 25 de abril de 2019. Citado na página 1.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Relatório de Análise: Desligamentos Forçados do Sistema de Transmissão - Edição 2018*. Brasília, 2018. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/documents/656808/0/Relat%C3%B3rio+de+An%C3%A1lise+de+Desligamentos+For%C3%A7ados+do+Sistema+de+Transmiss%C3%A3o+-+Edi%C3%A7%C3%A3o+2017/7a991934-f7b4-5835-07e1-4349bd513f96>>. Acesso em: 25 de abril de 2019. Citado na página 1.
- AIEE Committee Report. Bibliography and summary of fault location methods. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems*, v. 74, n. 3, p. 1423–1428, January 1955. ISSN 0097-2460. Citado 2 vezes nas páginas 2 and 10.
- ALTAY, O.; GURSOY, E.; KALENDERLI, O. Single end travelling wave fault location on transmission systems using wavelet analysis. In: 2014 ICHVE INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING AND APPLICATION. Poznan, Poland, 2014. p. 1–4. Citado 3 vezes nas páginas 18, 22, and 24.
- ANCELL, G. B.; PAHALAWATHTHA, N. C. Effects of frequency dependence and line parameters on single ended travelling wave based fault location schemes. *IEE Proceedings C - Generation, Transmission and Distribution*, v. 139, n. 4, p. 332–342, July 1992. ISSN 0143-7046. Citado 3 vezes nas páginas 12, 15, and 48.
- ANCELL, G. B.; PAHALAWATHTHA, N. C. Maximum likelihood estimation of fault location on transmission lines using travelling waves. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 9, n. 2, p. 680–689, April 1994. ISSN 0885-8977. Citado 8 vezes nas páginas 10, 11, 15, 19, 20, 23, 24, and 48.
- ANDERSON, P. M. *Analysis of Faulted Power Systems*. 1. ed. New York, USA: John Wiley & Sons, Inc., 1973. Citado na página 40.
- ARAÚJO, A. E.; NEVES, W. L. *Cálculo de Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Energia*. 1. ed. Belo Horizonte, MG: UFMG, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 25 and 39.
- BATTY, E. R.; THOMAS, D. W. P.; CHRISTOPOLOUS, C. A novel unit protection scheme based on superimposed currents. In: SIXTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON

- DEVELOPMENTS IN POWER SYSTEM PROTECTION (CONF. PUBL. NO. 434). Nottingham, UK, 1997. p. 83–86. ISSN 0537-9989. Citado 3 vezes nas páginas 19, 20, and 132.
- BEWLEY, L. V. Traveling waves on transmission systems. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, v. 50, n. 2, p. 532–550, June 1931. ISSN 0096-3860. Citado 3 vezes nas páginas 3, 12, and 147.
- BEWLEY, L. V. *Traveling Waves on Transmission Systems*. 2. ed. New York, USA: John Wiley & Sons, Inc., 1933. Citado na página 12.
- CARSON, J. R. Wave propagation in overhead wires with ground return. *The Bell System Technical Journal*, v. 5, n. 4, p. 539–554, October 1926. ISSN 0005-8580. Citado na página 36.
- CHEN, P.; XU, B.; LI, J. The optimized combination of fault location technology based on traveling wave principle. In: 2009 ASIA-PACIFIC POWER AND ENERGY ENGINEERING CONFERENCE. Wuhan, China, 2009. p. 1–5. ISSN 2157-4839. Citado 3 vezes nas páginas 19, 23, and 24.
- CHRISTOPOULOS, C.; THOMAS, D. W. P.; WRIGHT, A. Scheme, based on travelling-waves, for the protection of major transmission lines. *IEE Proceedings C - Generation, Transmission and Distribution*, v. 135, n. 1, p. 63–73, January 1988. ISSN 0143-7046. Citado 2 vezes nas páginas 132 and 133.
- CLARKE, E. *Circuit Analysis of A-C Power Systems*. 1. ed. New York, USA: John Wiley & Sons, Inc., 1943. Citado na página 38.
- DAVYDOVA, N.; HUG, G. Traveling wave based protection for medium voltage grids with distributed generation. In: 2017 IEEE MANCHESTER POWERTECH. Manchester, UK, 2017. p. 1–6. Citado na página 20.
- DAVYDOVA, N.; HUG, G. Travelling wave protection with disturbance classification for distribution grids with distributed generation. *The Journal of Engineering*, v. 2018, n. 15, p. 830–835, October 2018. ISSN 2051-3305. Citado na página 15.
- DOMMEL, H. W. Digital computer solution of electromagnetic transients in single-and multiphase networks. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-88, n. 4, p. 388–399, April 1969. ISSN 0018-9510. Citado 2 vezes nas páginas 58 and 147.
- DOMMEL, H. W.; MICHELS, J. M. High speed relaying using traveling wave transient analysis. In: IEEE PES WINTER MEETING. New York, USA, 1978. p. 1–7. Citado 2 vezes nas páginas 48 and 147.
- DONG, X.; KONG, W.; CUI, T. Fault classification and faulted-phase selection based on the initial current traveling wave. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 24, n. 2, p. 552–559, April 2009. ISSN 0885-8977. Citado 6 vezes nas páginas ii, 56, 57, 58, 59, and 60.
- ENG, N. E.; RAMAR, K. Single-ended traveling wave based fault location on two terminal transmission lines. In: TENCON 2009 - 2009 IEEE REGION 10 CONFERENCE. Singapore, 2009. p. 1–4. ISSN 2159-3442. Citado 3 vezes nas páginas 18, 22, and 24.

- GALE, P. F.; CROSSLEY, P. A.; BINGYIN, X.; YAOZHONG, G.; CORY, B. J.; BARKER, J. R. G. Fault location based on travelling waves. In: 1993 FIFTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON DEVELOPMENTS IN POWER SYSTEM PROTECTION. York, UK, 1993. p. 54–59. Citado 4 vezes nas páginas 6, 12, 13, and 14.
- GENERAL ELECTRIC. *RPV311 - Distributed Multifunction Fault Recorder*. Boston, MA, USA, 2019. Disponível em: <<https://www.gegridsolutions.com/app/ViewFiles.aspx?prod=RPV311&type=3>>. Acesso em: 25 de abril de 2019. Citado na página 6.
- GLOVER, J. D.; OVERBYE, T. J.; SARMA, M. S. *Power System Analysis & Design*. 6. ed. Boston, USA: Cengage Learning, 2017. Citado 5 vezes nas páginas 36, 74, 86, 96, and 106.
- GRAINGER, J. J.; STEVENSON JR., W. D. *Power System Analysis*. 1. ed. United States of America: McGraw-Hill, Inc., 1994. Citado 2 vezes nas páginas 36 and 74.
- GREENWOOD, A. *Electrical Transients in Power Systems*. 2. ed. [Hoboken, USA]: Wiley, 1991. Citado 3 vezes nas páginas 30, 32, and 33.
- GUANGBIN, Z.; HONGCHUN, S.; JILAI, Y. Traveling wave fault location for transmission lines based on arrival time difference of dominant fault induced current waves in closed loop circuit. *Proceeding of the CSEE*, v. 33, n. 28, p. 137–145, 2013. Citado 7 vezes nas páginas 6, 20, 23, 24, 102, 103, and 128.
- GURU, B. S.; HIZIROGLU, H. R. *Electromagnetic Field Theory Fundamentals*. 2. ed. New York, USA: Cambridge University Press, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 25 and 26.
- GUZMÁN, A.; KASZTENNY, B.; TONG, Y.; MYNAM, M. V. Accurate and economical traveling-wave fault locating without communications. In: 2018 71ST ANNUAL CONFERENCE FOR PROTECTIVE RELAY ENGINEERS (CPRE). College Station, TX, USA, 2018. p. 1–18. ISSN 2474-9753. Citado 12 vezes nas páginas 3, 11, 12, 13, 14, 20, 23, 24, 90, 111, 118, and 122.
- HAIHONG, B.; QINGSHAN, X. Study of fault location for parallel transmissions lines using one terminal current traveling waves. In: 2008 THIRD INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRIC UTILITY DEREGULATION AND RESTRUCTURING AND POWER TECHNOLOGIES. Nanjing, China, 2008. p. 2296–2301. Citado na página 130.
- HUANG, T.; DONG, X.; SHI, S.; WANG, B. Applicable range analysis of optimized single-terminal fault location algorithm. In: 2011 INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED POWER SYSTEM AUTOMATION AND PROTECTION. Beijing, China, 2011. p. 831–835. Citado 3 vezes nas páginas 18, 23, and 24.
- IEEE Power System Relaying Committee. IEEE Guide for Determining Fault Location on AC Transmission and Distribution Lines. *IEEE Std C37.114-2014 (Revision of IEEE Std C37.114-2004)*, p. 1–76, January 2015. Citado na página 10.
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. *EMTP Reference Models for Transmission Line Relay Testing*. New York, NY, USA, 2005. Disponível em: <<http://www.pes-psrc.org/kb/published/reports/EMTP%20Ref%20Model-Final.pdf>>. Acesso em: 25 de abril de 2019. Citado na página 103.
- IRWIN, J. D.; NELMS, R. M. *Basic Engineering Circuit Analysis*. 11. ed. Hoboken, USA: Wiley, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 26 and 32.

- JIAN, Q.; XIANGXUN, C.; JIANCHAO, Z. Travelling wave fault location of transmission line using wavelet transform. In: POWERCON '98. 1998 INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEM TECHNOLOGY. PROCEEDINGS (CAT. NO.98EX151). Beijing, China, 1998. p. 533–537 vol.1. Citado na página 11.
- JOHNS, A. T.; SALMAN, S. K. *Digital Protection for Power Systems*. 1. ed. London, UK: Peter Peregrinus Ltd, 1995. Citado 6 vezes nas páginas 4, 5, 11, 33, 42, and 104.
- KALE, V.; BHIDE, S.; BEDEKAR, P. Fault location estimation based on wavelet analysis of traveling waves. In: 2012 ASIA-PACIFIC POWER AND ENERGY ENGINEERING CONFERENCE. Shanghai, China, 2012. p. 1–5. ISSN 2157-4847. Citado 3 vezes nas páginas 17, 22, and 24.
- KARRENBAUER, H. *Ausbreitung von Wanderwellen bei verschiedenen Anordnungen von Freileitungen im Hinblick auf die Form der Einschwingspannung bei Abstandskurzschlüssen*. Tese (Dissertação de Doutorado), Munique, Alemanha, 1967. Citado 2 vezes nas páginas 57 and 58.
- KASZTENNY, B.; GUZMÁN, A.; FISCHER, N.; MYNAM, M. V.; TAYLOR, D. Practical setting considerations for protective relays that use incremental quantities and traveling waves. In: 2016 43RD ANNUAL WESTERN PROTECTIVE RELAY CONFERENCE. College Station, USA, 2016. Citado na página 39.
- KEZUNOVIC, M.; PERUNICIC, B. Synchronized sampling improves fault location. *IEEE Computer Applications in Power*, v. 8, n. 2, p. 30–33, April 1995. ISSN 0895-0156. Citado na página 3.
- KULKARNI, S.; SANTOSO, S.; SHORT, T. A. Incipient fault location algorithm for underground cables. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 5, n. 3, p. 1165–1174, May 2014. ISSN 1949-3053. Citado na página 2.
- 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: 2015 IEEE POWER ENERGY SOCIETY GENERAL MEETING. Denver, USA, 2015. p. 1–5. ISSN 1932-5517. Citado 5 vezes nas páginas 16, 17, 22, 24, and 49.
- LEI, A.; DONG, X.; SHI, S.; WANG, B. A novel current travelling wave based single-ended fault location method for locating single-phase-to-ground fault of transmission line. In: 2015 50TH INTERNATIONAL UNIVERSITIES POWER ENGINEERING CONFERENCE (UPEC). Stoke on Trent, UK, 2015. p. 1–6. Citado 4 vezes nas páginas 17, 22, 24, and 49.
- 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. *Przeegląd Elektrotechniczny*, v. 2012, n. 03a, p. 254–258, March 2012. ISSN 0033-2097. Citado 5 vezes nas páginas 15, 16, 17, 22, and 24.
- LOPES, F. V. *Localização de Faltas em Tempo Real Baseada na Teoria de Ondas Viajantes Usando Dados Não Sincronizados de Dois Terminais*. 163 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, Brasil, maio 2014. Citado 3 vezes nas páginas 3, 11, and 106.

- LOPES, F. V. Settings-free traveling-wave-based earth fault location using unsynchronized two-terminal data. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 31, n. 5, p. 2296–2298, October 2016. ISSN 0885-8977. Citado na página 6.
- 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*, v. 33, n. 2, p. 873–880, April 2018. ISSN 0885-8977. Citado 4 vezes nas páginas 6, 105, 106, and 148.
- LOPES, F. V.; SILVA, K. M.; COSTA, F. B.; NEVES, W. L. A.; FERNANDES, D. Real-time traveling-wave-based fault location using two-terminal unsynchronized data. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 30, n. 3, p. 1067–1076, June 2015. ISSN 0885-8977. Citado na página 6.
- MAGALHÃES, J. F. M. de; LOPES, F. V. Single-ended traveling wave-based fault location method for parallel lines. In: 2018 SIMPOSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELETRICOS (SBSE). Niterói, 2018. p. 1–6. Citado na página 8.
- MAGALHÃES, J. F. M. de; MONTEIRO, B. C. R.; LOPES, F. V. Using current traveling waves to implement directional elements in parallel lines. In: 2017 WORKSHOP ON COMMUNICATION NETWORKS AND POWER SYSTEMS (WCNPS). Brasília, 2017. Citado na página 8.
- MARTI, J. R. Accurate modelling of frequency-dependent transmission lines in electromagnetic transient simulations. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-101, n. 1, p. 147–157, January 1982. ISSN 0018-9510. Citado na página 28.
- OGATA, K. *Modern Control Engineering*. 4. ed. Upper Saddle River, USA: Prentice Hall, 2001. Citado 2 vezes nas páginas 27 and 34.
- OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W.; BUCK, J. R. *Discrete-Time Signal Processing*. 2. ed. Upper Saddle River, USA: Prentice Hall, 1999. Citado na página 104.
- PAN, J.; VU, K.; HU, Y. An efficient compensation algorithm for current transformer saturation effects. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 19, n. 4, p. 1623–1628, October 2004. ISSN 0885-8977. Citado na página 5.
- PENG, C.; HUSAIN, I.; HUANG, A. Q.; LEQUESNE, B.; BRIGGS, R. A fast mechanical switch for medium-voltage hybrid dc and ac circuit breakers. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 52, n. 4, p. 2911–2918, July 2016. ISSN 0093-9994. Citado na página 3.
- PENG, C.; SONG, X.; REZAEI, M. A.; HUANG, X.; WIDENER, C.; HUANG, A. Q.; STEURER, M. Development of medium voltage solid-state fault isolation devices for ultra-fast protection of distribution systems. In: IECON 2014 - 40TH ANNUAL CONFERENCE OF THE IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS SOCIETY. Dallas, TX, USA, 2014. p. 5169–5176. ISSN 1553-572X. Citado na página 3.
- PHADKE, A. G.; THORP, J. S. *Computer Relaying For Power Systems*. 2. ed. West Sussex, UK: Wiley, 2009. Citado 6 vezes nas páginas 5, 42, 48, 104, 105, and 147.
- SAHA, M. M.; IZYKOWSKI, J.; ROSOLOWSKI, E. *Fault Location on Power Networks*. 1. ed. London, UK: Springer, 2010. Citado 7 vezes nas páginas 2, 4, 5, 10, 29, 103, and 105.

- SANAYE-PASAND, M.; JAFARIAN, P. Adaptive protection of parallel transmission lines using combined cross-differential and impedance-based techniques. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 26, n. 3, p. 1829–1840, July 2011. ISSN 0885-8977. Citado na página 109.
- SCHWEITZER, E. O.; GUZMÁN, A.; MYNAM, M. V.; SKENDZIC, V.; KASZTENNY, B.; MARX, S. A new traveling wave fault locating algorithm for line current differential relays. In: 12TH IET INTERNATIONAL CONFERENCE ON DEVELOPMENTS IN POWER SYSTEM PROTECTION (DPSP 2014). Copenhagen, Denmark, 2014. p. 1–6. Citado 3 vezes nas páginas 11, 15, and 74.
- SCHWEITZER, E. O.; KASZTENNY, B.; MYNAM, M. V. Performance of time-domain line protection elements on real-world faults. In: 2016 69TH ANNUAL CONFERENCE FOR PROTECTIVE RELAY ENGINEERS (CPRE). College Station, TX, USA, 2016. p. 1–17. ISSN 2474-9753. Citado na página 4.
- SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES. *SEL-T400L - Ultra-High-Speed Transmission Line Relay Traveling-Wave Fault Locator High-Resolution Event Recorder - Instruction Manual*. Pullman, WA, USA, 2017. Disponível em: <<https://selinc.com/products/T400L/>>. Acesso em: 25 de abril de 2019. Citado 7 vezes nas páginas 6, 73, 74, 75, 104, 105, and 109.
- SCHWEITZER, I. E. O. A review of impedance-based fault locating experience. In: NORTHWEST ELECTRIC LIGHT & POWER ASSOCIATION CONFERENCE. [Vancouver, WA, USA], 1988. Citado na página 2.
- SCHWEITZER, I. E. O.; GUZMÁN, A.; MYNAM, M.; SKENDZIC, V.; KASZTENNY, B. Accurate single-end fault location and line-length estimation using traveling waves. In: 13TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON DEVELOPMENTS IN POWER SYSTEM PROTECTION. Edinburgh, United Kingdom, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 18, 23, and 24.
- SCHWEITZER, I. E. O.; GUZMÁN, A.; MYNAM, M. V.; SKENDZIC, V.; KASZTENNY, B.; MARX, S. Locating faults by the traveling waves they launch. In: 2014 67TH ANNUAL CONFERENCE FOR PROTECTIVE RELAY ENGINEERS. Spokane, USA, 2014. p. 95–110. Citado 10 vezes nas páginas 3, 6, 10, 14, 26, 27, 29, 38, 39, and 74.
- SHARAFI, A.; SANAYE-PASAND, M.; JAFARIAN, P. Ultra-high-speed protection of parallel transmission lines using current travelling waves. *IET Generation, Transmission Distribution*, v. 5, n. 6, p. 656–666, June 2011. ISSN 1751-8687. Citado 6 vezes nas páginas ii, 56, 57, 59, 61, and 74.
- SHI, S.; DONG, X.; ZHOU, S. Analysis of single-phase-to-ground fault generated initial traveling waves. In: 2005 IEEE/PES TRANSMISSION DISTRIBUTION CONFERENCE EXPOSITION: ASIA AND PACIFIC. Dalian, China: IEEE, 2005. p. 1–4. ISSN 2160-8636. Citado na página 42.
- SILVA, M.; OLESKOVICZ, M.; COURRY, D. V. A fault locator for transmission lines using traveling waves and wavelet transform theory. In: 2004 EIGHTH IEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON DEVELOPMENTS IN POWER SYSTEM PROTECTION. Amsterdam, Netherlands, 2004. p. 212–215 Vol.1. ISSN 0537-9989. Citado na página 5.

- SIMMONS, G. F. *Differential Equations With Applications and Historical Notes*. 2. ed. New York, USA: McGraw-Hill, Inc., 1991. Citado na página 27.
- 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*, v. 21, n. 3, p. 1714–1720, July 2006. ISSN 0885-8977. Citado 7 vezes nas páginas 17, 18, 22, 24, 39, 48, and 74.
- STRINGFIELD, T. W.; MARIHART, D. J.; STEVENS, R. F. Fault location methods for overhead lines. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems*, v. 76, n. 3, p. 518–529, April 1957. ISSN 0097-2460. Citado na página 12.
- THOMAS, D. W. P.; CHRISTOPOULOS, C.; TANG, Y.; GALE, P. Validation of a novel unit protection scheme based on superimposed fault currents. In: 2001 SEVENTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON DEVELOPMENTS IN POWER SYSTEM PROTECTION (IEE). Amsterdam, Netherlands, 2001. p. 185–188. ISSN 0537-9989. Citado na página 19.
- TZIOUVARAS, D. A.; MCLAREN, P.; ALEXANDER, G.; DAWSON, D.; ESZTERGALYOS, J.; FROMEN, C.; GLINKOWSKI, M.; HASENWINKLE, I.; KEZUNOVIC, M.; KOJOVIC, L.; KOTHEIMER, B.; KUFFEL, R.; NORDSTROM, J.; ZOCHOLL, S. Mathematical models for current, voltage, and coupling capacitor voltage transformers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 15, n. 1, p. 62–72, January 2000. ISSN 0885-8977. Citado 2 vezes nas páginas 4 and 5.
- WEDEPOHL, L. M. Application of matrix methods to the solution of travelling-wave phenomena in polyphase systems. *Electrical Engineers, Proceedings of the Institution of*, v. 110, n. 12, p. 2200–2212, December 1963. ISSN 0020-3270. Citado 2 vezes nas páginas 48 and 49.
- WU, L.; HE, Z.; QIAN, Q. A new single ended fault location technique using travelling wave natural frequencies. In: 2009 ASIA-PACIFIC POWER AND ENERGY ENGINEERING CONFERENCE. Wuhan, China, 2009. p. 1–5. ISSN 2157-4839. Citado na página 48.
- XIE, F.; HADDAD, A.; GRIFFITHS, H. Single-ended fault location method based on wavelet theory: Application to a double-circuit transmission line. In: 2013 48TH INTERNATIONAL UNIVERSITIES' POWER ENGINEERING CONFERENCE (UPEC). Dublin, Ireland, 2013. p. 1–6. Citado 3 vezes nas páginas 18, 22, and 24.
- XINZHOU, D.; SHENXING, S.; TAO, C.; QIANG, L. Optimizing solution of fault location using single terminal quantities. *Science in China Series E: Technological Sciences*, v. 51, n. 6, p. 761–772, May 2008. ISSN 1862-281X. Citado 3 vezes nas páginas 18, 23, and 24.
- XINZHOU, D.; ZHENG, C.; XUANZHOU, H.; KEHONG, W.; CHENGMU, L. Optimizing solution of fault location. In: IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY SUMMER MEETING,. Chicago, IL, USA, 2002. p. 1113–1117 vol.3. Citado 3 vezes nas páginas 18, 23, and 24.
- XU, F.; DONG, X. A novel single-ended traveling wave fault location method based on reflected wave-head of adjacent bus. In: 12TH IET INTERNATIONAL CONFERENCE ON DEVELOPMENTS IN POWER SYSTEM PROTECTION (DPSP 2014). Copenhagen, Denmark, 2014. p. 1–5. Citado 4 vezes nas páginas 15, 16, 22, and 24.

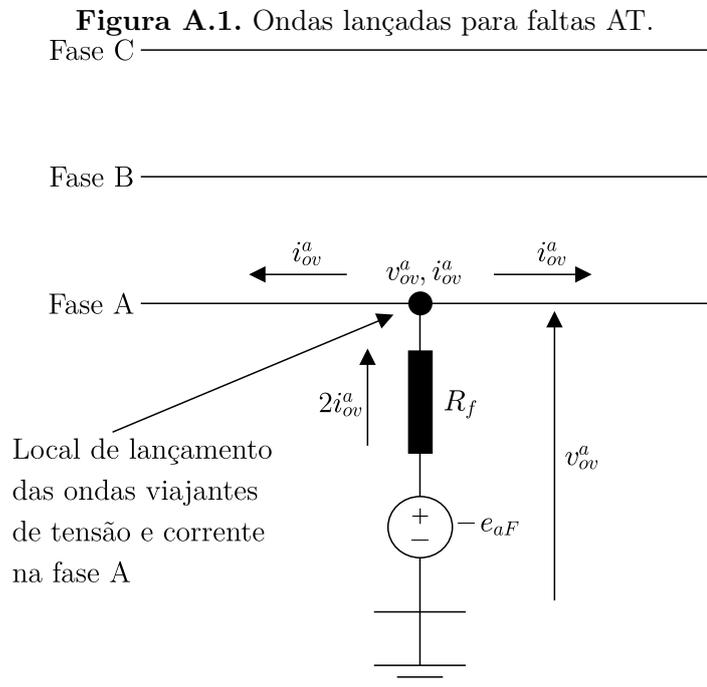
- ZANETTA JÚNIOR, L. C. *Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência*. 1. ed. São Paulo, SP: Editora da Universidade de São Paulo, 2003. Citado 8 vezes nas páginas 26, 27, 37, 38, 39, 40, 48, and 49.
- ZHANG, G.; SHU, H.; LOPES, F.; LIAO, Y. Single-ended travelling wave-based protection scheme for double-circuit transmission lines. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 97, p. 93–105, January 2018. ISSN 0142-0615. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061517304817>>. Citado 2 vezes nas páginas 20 and 128.
- 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: 2008 THIRD INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRIC UTILITY DEREGULATION AND RESTRUCTURING AND POWER TECHNOLOGIES. Nanjing, China, 2008. p. 1723–1726. Citado 3 vezes nas páginas 18, 23, and 24.
- ZHENG, X. Y.; LI, X. M.; DING, J. Y.; ZHANG, Y. Y. Design and implementation of one-terminal fault location system based on impedance-traveling wave assembled algorithm. In: 2009 INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUSTAINABLE POWER GENERATION AND SUPPLY. Nanjing, China, 2009. p. 1–5. ISSN 2156-9681. Citado 3 vezes nas páginas 18, 23, and 24.
- ZIMATH, S. L.; RAMOS, M. A. F.; FILHO, J. E. S. Comparison of impedance and travelling wave fault location using real faults. In: IEEE PES T D 2010. New Orleans, LA, USA, 2010. p. 1–5. ISSN 2160-8555. Citado 2 vezes nas páginas 5 and 6.

## APÊNDICE A

# CONDIÇÕES DE CONTORNO PARA CÁLCULO DAS ONDAS DE CORRENTE LANÇADAS PARA FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO TRIFÁSICAS

### A.1 FALTA AT

A falta monofásica na fase A pode ser modelada conforme a Figura A.1. Desse circuito, verifica-se que  $i_{ov}^b = i_{ov}^c = 0$ . Aplicando a LKT e a LKC, obtém-se (A.1).



**Fonte:** Autoria própria.

$$v_{ov}^a = -e_{aF} - 2R_f i_{ov}^a \quad (A.1)$$

## A.2 FALTA BT

De maneira análoga à falta AT (Seção A.1), obtém-se (A.2) e (A.3).

$$v_{ov}^b = -e_{bF} - 2R_f i_{ov}^b \quad (\text{A.2})$$

$$i_{ov}^a = i_{ov}^c = 0 \quad (\text{A.3})$$

## A.3 FALTA CT

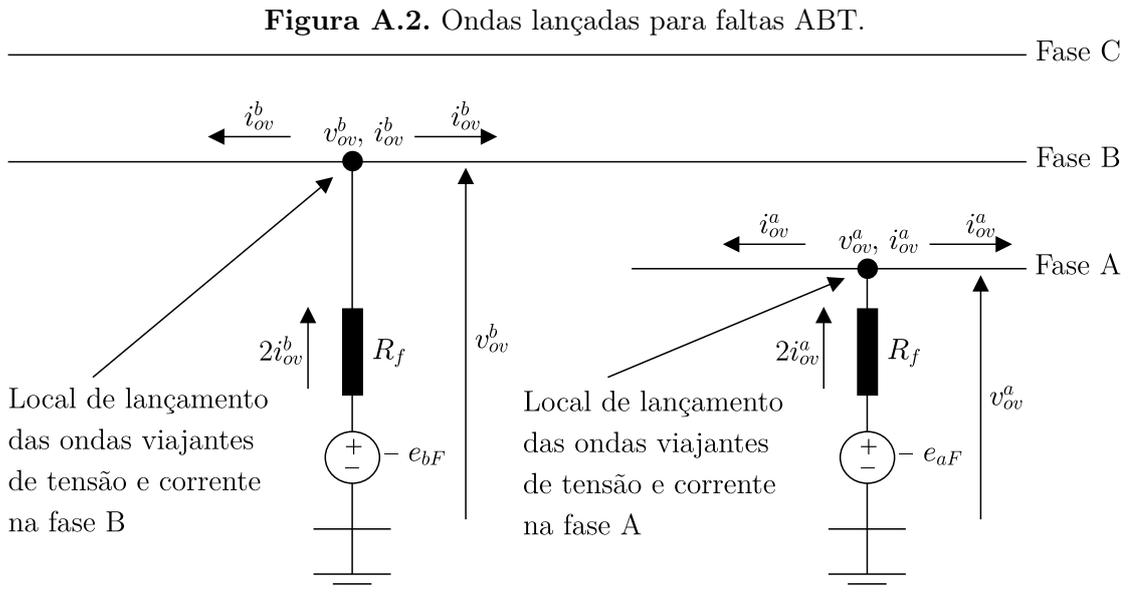
De maneira análoga à falta AT (Seção A.1), obtém-se (A.4) e (A.5).

$$v_{ov}^c = -e_{cF} - 2R_f i_{ov}^c \quad (\text{A.4})$$

$$i_{ov}^a = i_{ov}^b = 0 \quad (\text{A.5})$$

## A.4 FALTA ABT

A falta entre a fase A, a fase B e a terra pode ser modelada conforme a Figura A.2. Desse circuito, verifica-se que  $i_{ov}^c = 0$ . Aplicando a LKT e a LKC, obtém-se (A.6) e (A.7).



**Fonte:** Autoria própria.

$$v_{ov}^a = -e_{aF} - 2R_f i_{ov}^a \quad (\text{A.6})$$

$$v_{ov}^b = -e_{bF} - 2R_f i_{ov}^b \quad (\text{A.7})$$

## A.5 FALTA BCT

De maneira análoga à falta ABT (Seção A.4), obtém-se (A.8), (A.9) e (A.10).

$$v_{ov}^b = -e_{bF} - 2R_f i_{ov}^b \quad (\text{A.8})$$

$$v_{ov}^c = -e_{cF} - 2R_f i_{ov}^c \quad (\text{A.9})$$

$$i_{ov}^a = 0 \quad (\text{A.10})$$

## A.6 FALTA CAT

De maneira análoga à falta CAT (Seção A.4), obtém-se (A.11), (A.12) e (A.13).

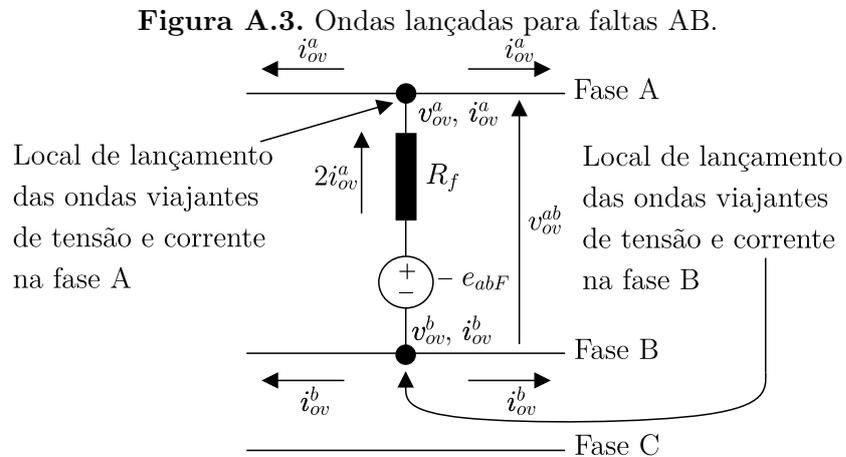
$$v_{ov}^a = -e_{aF} - 2R_f i_{ov}^a \quad (\text{A.11})$$

$$v_{ov}^c = -e_{cF} - 2R_f i_{ov}^c \quad (\text{A.12})$$

$$i_{ov}^b = 0 \quad (\text{A.13})$$

## A.7 FALTA AB

A falta entre a fase A e a fase B pode ser modelada conforme a Figura A.3. Desse circuito, verifica-se que  $i_{ov}^c = 0$  e  $i_{ov}^b = -i_{ov}^a$ . Aplicando a LKT e a LKC, obtém-se (A.14).



**Fonte:** Autoria própria.

$$v_{ov}^{ab} = -e_{abF} - 2R_f i_{ov}^a \quad (\text{A.14})$$

## A.8 FALTA BC

De maneira análoga à falta AB (Seção A.7), obtém-se (A.15), (A.16) e (A.17).

$$v_{ov}^{bc} = -e_{bcF} - 2R_f i_{ov}^b \quad (\text{A.15})$$

$$i_{ov}^c = -i_{ov}^b \quad (\text{A.16})$$

$$i_{ov}^a = 0 \quad (\text{A.17})$$

## A.9 FALTA CA

De maneira análoga à falta AB (Seção A.7), obtém-se (A.18), (A.19) e (A.20).

$$v_{ov}^{ca} = -e_{caF} - 2R_f i_{ov}^c \quad (\text{A.18})$$

$$i_{ov}^a = -i_{ov}^c \quad (\text{A.19})$$

$$i_{ov}^b = 0 \quad (\text{A.20})$$

## A.10 FALTA ABC

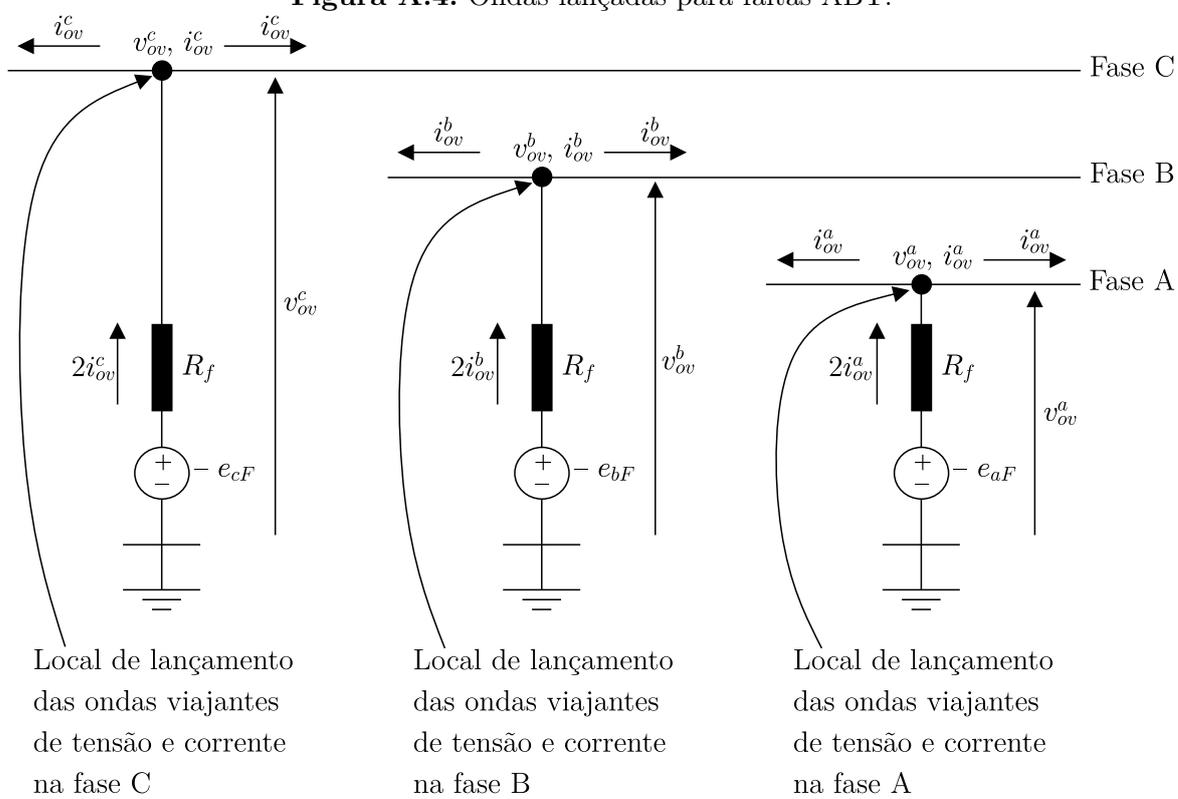
A falta trifásica pode ser modelada conforme a Figura A.4. Aplicando a LKT e a LKC, obtém-se (A.21), (A.22) e (A.23).

$$v_{ov}^a = -e_{aF} - 2R_f i_{ov}^a \quad (\text{A.21})$$

$$v_{ov}^b = -e_{bF} - 2R_f i_{ov}^b \quad (\text{A.22})$$

$$v_{ov}^c = -e_{cF} - 2R_f i_{ov}^c \quad (\text{A.23})$$

**Figura A.4.** Ondas lançadas para faltas ABT.



**Fonte:** Autoria própria.

## APÊNDICE B

# APLICAÇÃO DE MODELO ANALÍTICO DE PREVISÃO DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS VIAJANTES DE CORRENTE EM SISTEMAS TRIFÁSICOS

Foi aplicado método analítico que se utiliza dos princípios apresentados na Seção 3.2 para prever a propagação de ondas viajantes de corrente em um sistema trifásico, sendo este resultado comparado com simulação em ATP para fins de demonstração de sua validade. Para facilitar a aplicação do método analítico foi utilizado o diagrama proposto por Bewley em Bewley (1931), chamado de Diagrama de Treliça de Bewley.

Na Seção 3.2 observa-se que quando ocorrem faltas assimétricas, podem ser lançadas ondas no ponto de falta dos três modos:  $\alpha$ ,  $\beta$  e 0. Quando cada uma destas ondas são refletidas nos terminais da linha e retornam para o ponto de falta, elas são refletidas e refratadas como ondas modais dos três tipos:  $\alpha$ ,  $\beta$  e 0. Em outras palavras, faltas assimétricas causam um acoplamento entre os vários modos de propagação (DOMMEL; MICHELS, 1978; PHADKE; THORP, 2009). Este acoplamento entre os modos de propagação só se dá no ponto de falta, porém no caso de faltas que envolvam a terra, devido a diferença de velocidade de propagação entre os modos aéreos e terra, há uma alteração substancial no Diagrama de Treliça de Bewley clássico, que é o geralmente apresentado na literatura.

Vale destacar que o método numérico para a solução das equações da linha de transmissão utilizado no ATP é o proposto por Dommel (1969), o qual, segundo o próprio autor, não necessita do conhecimento dos coeficientes de reflexão e refração para realizar seus cálculos, sendo que as relações entre as ondas incidentes, refletidas e refratadas surgem naturalmente do método numérico.

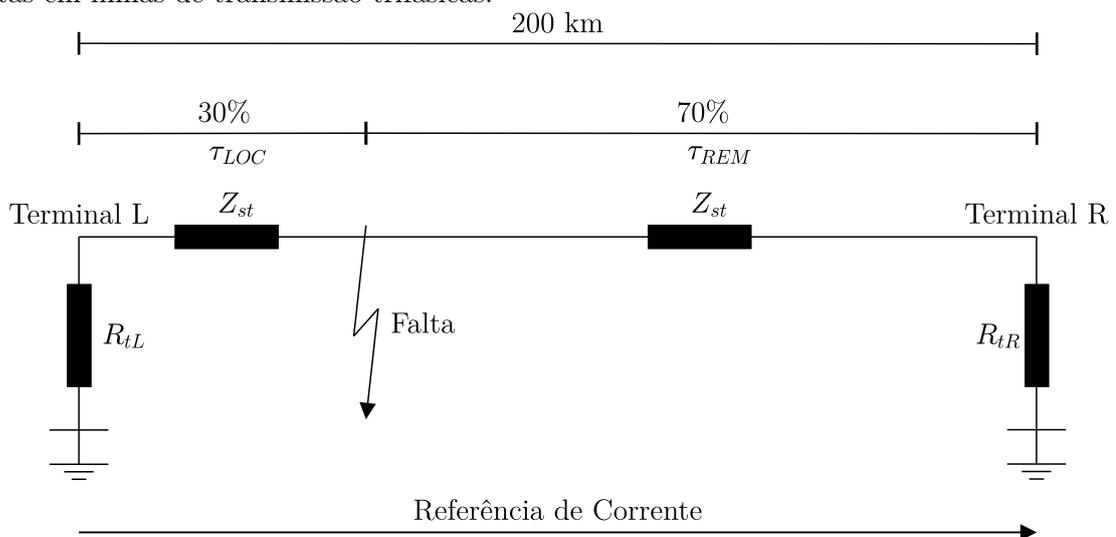
O tipo de falta escolhido para apresentar este exemplo numérico foi entre a fase B e a terra, sendo utilizada a Transformada de Clarke referenciada na fase A, pois neste caso todos os tipos de onda modais se apresentam, havendo acoplamento entre elas no ponto de falta.

O caso para estudo é apresentado na Seção B.1. Na Seção B.2 será descrito o método analítico utilizado para prever quantitativamente a origem e propagação de ondas em linhas de transmissão trifásicas devido à faltas clássicas. Na Seção B.3 será feita a previsão analítica das ondas que devem ser observadas nos terminais da linha de transmissão trifásica ao longo do tempo quando ocorre uma falta entre a fase B e a terra, sendo a seguir comparada com a simulação em ATP.

## B.1 CASO ESTUDADO

Considere a linha trifásica em 500 kV sem perdas da Figura B.1. Os parâmetros desta linha foram retirados de uma linha real do sistema elétrico brasileiro (LOPES *et al.*, 2018), porém suas perdas foram desconsideradas. Os valores dos parâmetros da linha de transmissão trifásica em estudo estão apresentados na Tabela B.1. Os tempos de trânsito apresentados na Tabela B.1 levam em consideração que o comprimento total da linha é de aproximadamente 200 km e que uma falta ocorre em 30% da linha, contados a partir do terminal L. Os parâmetros das terminações da linha, que são puramente resistivas, também são apresentados na Tabela B.1. A tensão pré-falta entre a fase B e a terra é de 408 kV e a resistência de falta é de 50  $\Omega$ .

**Figura B.1.** Sistema utilizado para aplicação do modelo de previsão de propagação de ondas geradas por faltas em linhas de transmissão trifásicas.



**Fonte:** Autoria própria.

**Tabela B.1.** Parâmetros para o sistema utilizado para aplicação do modelo de previsão de propagação de ondas geradas por faltas em linhas de transmissão trifásicas.

Parâmetro	Valor para modos aéreos	Valor para modo terra
$Z_{st}$	234 $\Omega$	729 $\Omega$
$R_{tL}$	78 $\Omega$	243 $\Omega$
$R_{tR}$	78 $\Omega$	243 $\Omega$
$\tau_{LOC}$	210 $\mu s$	330 $\mu s$
$\tau_{REM}$	490 $\mu s$	770 $\mu s$

**Fonte:** Autoria própria.

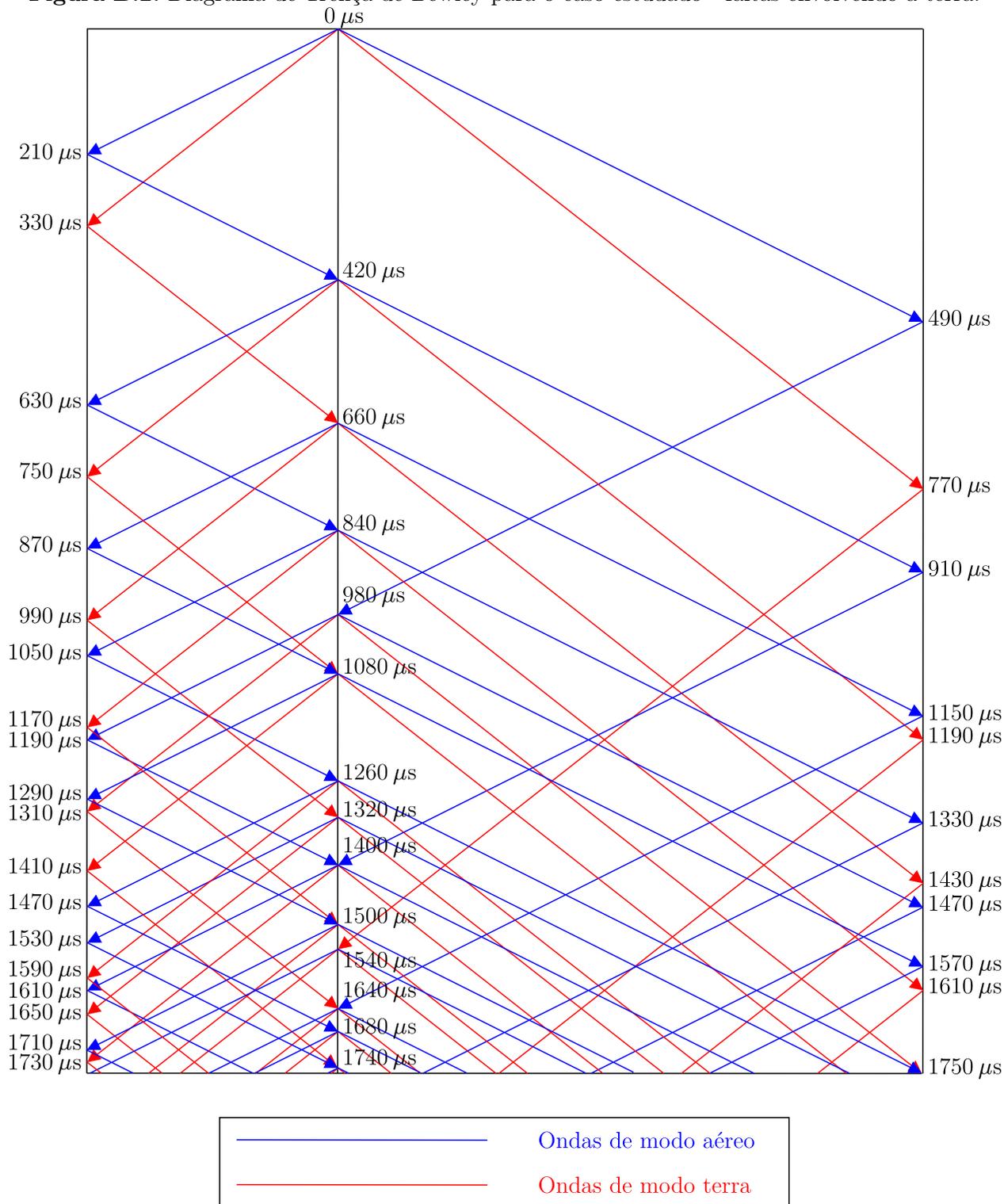
## B.2 DESCRIÇÃO DO MÉTODO ANALÍTICO

Com base nos tempos de trânsito apresentados na Tabela B.1 e nos princípios da propagação de ondas viajantes devido à faltas em sistemas trifásicos é construído o Diagrama de Treliça de Bewley da Figura B.2. Na Figura B.2 são representadas as ondas de modo aéreo ( $\alpha$  e  $\beta$ ) na cor azul, tendo em vista que elas apresentam velocidades de propagação iguais e a onda de modo terra (0) na cor vermelha. O acoplamento entre os modos aéreo e terra nas reflexões e refrações no ponto de falta também é mostrado na Figura B.2.

Para obtenção das grandezas modais medidas em cada terminal foram realizados cálculos por meio de planilha no *software* Microsoft Excel<sup>®</sup>, utilizando como base as expressões para ondas modais lançadas apresentadas na Seção 3.2.4, as matrizes de coeficientes de reflexão e refração no ponto de falta obtidas na Seção 3.2.5.2 e a expressão para reflexão de corrente em terminação simples para linha de transmissão monofásica apresentada em (3.25). Pelo fato das terminações da linha de transmissão serem balanceadas, não há acoplamento modal, podendo ser utilizada a expressão de coeficiente de reflexão para linha de transmissão monofásica para cada modo em separado. Assim, utilizando os dados da Tabela B.1 e (3.25), tem-se que o coeficiente de reflexão para corrente vale 0,5, tanto para ondas de modo aéreo quanto para ondas de modo terra, nos dois terminais.

## B.3 APLICAÇÃO DO MÉTODO ANALÍTICO

Com os parâmetros apresentados na Seção B.1 aplicados nas expressões da Tabela 3.6, referente a falta entre a fase B e a terra, e nas expressões apresentadas em (3.76) e em (3.86),

**Figura B.2.** Diagrama de Treliça de Bewley para o caso estudado - faltas envolvendo a terra.

Fonte: Autoria própria.

obtem-se as ondas modais de corrente lançadas e as matrizes de coeficientes de reflexão e refração para corrente, respectivamente, conforme (B.1), (B.2) e (B.3).

$$i_{ovBT}^{MCA} = \begin{bmatrix} 275,55 \\ -472,06 \\ 272,55 \end{bmatrix} \text{ A} \quad (\text{B.1})$$

$$\rho_{iBT}^{MCA} = \begin{bmatrix} 0,08 & -0,14 & -0,49 \\ -0,14 & 0,23 & 0,84 \\ -0,08 & 0,14 & 0,49 \end{bmatrix} \quad (\text{B.2})$$

$$\Gamma_{iBT}^{MCA} = \begin{bmatrix} 0,92 & 0,14 & 0,49 \\ 0,14 & 0,77 & -0,84 \\ 0,08 & -0,14 & 0,51 \end{bmatrix} \quad (\text{B.3})$$

Aplicando os procedimentos descritos na Seção B.2 e utilizando (B.1), (B.2) e (B.3), obtêm-se as formas de onda, cujas variações no tempo são mostradas nas Tabelas B.2, B.3, B.4 e B.5, sendo também representadas nas Figuras B.4 e B.5.

#### B.4 SIMULAÇÃO EM ATP

A simulação da falta entre a fase B e a terra no ATP foi realizada utilizando a interface ATP-Draw, conforme pode ser visualizado na Figura B.3. Foram inseridos os valores dos parâmetros apresentados na Seção B.1 como dados de entrada, sendo utilizado um passo de integração de 1  $\mu\text{s}$ . As formas de onda das correntes medidas nos terminais local e remoto, em valores modais utilizando a Transformada de Clarke referenciada na fase A, estão mostradas na Figura B.4 e na Figura B.5, respectivamente.

#### B.5 COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODO ANALÍTICO E SIMULAÇÃO EM ATP

Observando as Figuras B.4 e B.5, chega-se a conclusão que o método analítico prevê com exatidão as formas de onda de corrente extraídas da simulação da falta entre a fase B e a terra no ATP.

**Tabela B.2.** Onda de corrente no terminal L - falta BT.

Tempo ( $\mu s$ )	Medida (A)			Incidente (A)			Refletida (A)		
	$\alpha$	$\beta$	0	$\alpha$	$\beta$	0	$\alpha$	$\beta$	0
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
210	-408,82	708,09	0,00	-272,55	472,06	0,00	-136,27	236,03	0,00
330	-408,82	708,09	408,82	0,00	0,00	272,55	0,00	0,00	136,27
630	-472,72	818,78	408,82	-42,60	73,79	0,00	-21,30	36,89	0,00
750	-472,72	818,78	472,72	0,00	0,00	42,60	0,00	0,00	21,30
870	-572,26	991,19	472,72	-66,36	114,94	0,00	-33,18	57,47	0,00
990	-572,26	991,19	572,26	0,00	0,00	66,36	0,00	0,00	33,18
1050	-582,25	1008,49	572,26	-6,66	11,53	0,00	-3,33	5,77	0,00
1170	-582,25	1008,49	582,25	0,00	0,00	6,66	0,00	0,00	3,33
1190	-441,75	765,13	582,25	93,67	-162,24	0,00	46,84	-81,12	0,00
1290	-472,87	819,03	582,25	-20,75	35,93	0,00	-10,37	17,97	0,00
1310	-472,87	819,03	646,16	0,00	0,00	42,60	0,00	0,00	21,30
1410	-472,87	819,03	677,27	0,00	0,00	20,75	0,00	0,00	10,37
1470	-474,43	821,73	677,27	-1,04	1,80	0,00	-0,52	0,90	0,00
1530	-498,66	863,71	677,27	-16,16	27,99	0,00	-8,08	13,99	0,00
1590	-498,66	863,71	678,84	0,00	0,00	1,04	0,00	0,00	0,52
1610	-524,99	909,31	678,84	-17,55	30,40	0,00	-8,78	15,20	0,00
1650	-524,99	909,31	703,07	0,00	0,00	16,16	0,00	0,00	8,08
1710	-532,29	921,95	703,07	-4,86	8,43	0,00	-2,43	4,21	0,00
1730	-532,29	921,95	659,15	0,00	0,00	-29,28	0,00	0,00	-14,64

**Fonte:** Autoria própria.**Tabela B.3.** Onda de corrente no ponto de falta, sentido terminal L para terminal R - falta BT.

Tempo ( $\mu s$ )	Incidente (A)			Refletida (A)			Refratada (A)		
	$\alpha$	$\beta$	0	$\alpha$	$\beta$	0	$\alpha$	$\beta$	0
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
420	-136,27	236,03	0,00	-42,60	73,79	42,60	-93,67	162,24	-42,60
660	0,00	0,00	136,27	-66,36	114,94	66,36	66,36	-114,94	69,91
840	-21,30	36,89	0,00	-6,66	11,53	6,66	-14,64	25,36	-6,66
1080	-33,18	57,47	21,30	-20,75	35,93	20,75	-12,43	21,54	0,55
1260	-3,33	5,77	0,00	-1,04	1,80	1,04	-2,29	3,96	-1,04
1320	0,00	0,00	33,18	-16,16	27,99	16,16	16,16	-27,99	17,02
1400	46,84	-81,12	0,00	14,64	-25,36	-14,64	32,19	-55,76	14,64
1500	-10,37	17,97	3,33	-4,86	8,43	4,86	-5,51	9,54	-1,53

**Fonte:** Autoria própria.

**Tabela B.4.** Onda de corrente no ponto de falta, sentido terminal R para terminal L - falta BT.

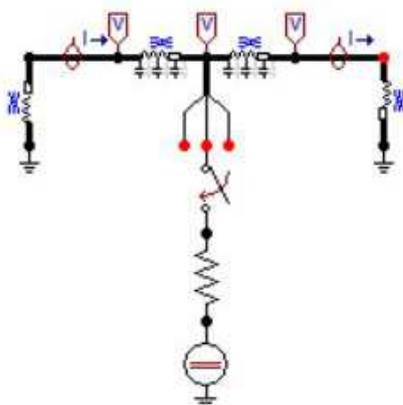
Tempo ( $\mu\text{s}$ )	Incidente (A)			Refletida (A)			Refratada (A)		
	$\alpha$	$\beta$	0	$\alpha$	$\beta$	0	$\alpha$	$\beta$	0
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
980	136,27	-236,03	0,00	42,60	-73,79	-42,60	93,67	-162,24	42,60
1400	-46,84	81,12	0,00	-14,64	25,36	14,64	-32,19	55,76	-14,64

Fonte: Autoria própria.

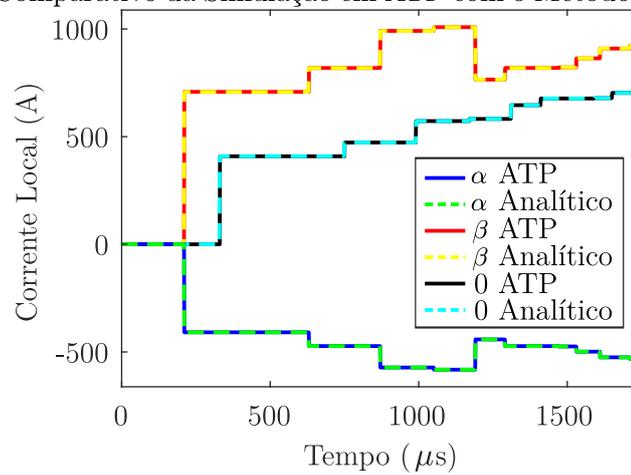
**Tabela B.5.** Onda de corrente no terminal R - falta BT.

Tempo ( $\mu\text{s}$ )	Medida (A)			Incidente (A)			Refletida (A)		
	$\alpha$	$\beta$	0	$\alpha$	$\beta$	0	$\alpha$	$\beta$	0
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
490	408,82	-708,09	0,00	272,55	-472,06	0,00	136,27	-236,03	0,00
770	408,82	-708,09	-408,82	0,00	0,00	-272,55	0,00	0,00	-136,27
910	268,31	-464,73	-408,82	-93,67	162,24	0,00	-46,84	81,12	0,00
1150	367,85	-637,14	-408,82	66,36	-114,94	0,00	33,18	-57,47	0,00
1190	367,85	-637,14	-472,72	0,00	0,00	-42,60	0,00	0,00	-21,30
1330	345,89	-599,10	-472,72	-14,64	25,36	0,00	-7,32	12,68	0,00
1430	345,89	-599,10	-367,85	0,00	0,00	69,91	0,00	0,00	34,96
1470	409,79	-709,78	-367,85	42,60	-73,79	0,00	21,30	-36,89	0,00
1570	391,14	-677,48	-367,85	-12,43	21,54	0,00	-6,22	10,77	0,00
1610	391,14	-677,48	-377,84	0,00	0,00	-6,66	0,00	0,00	-3,33
1750	387,71	-671,53	-441,75	-2,29	3,96	-42,60	-1,14	1,98	-21,30

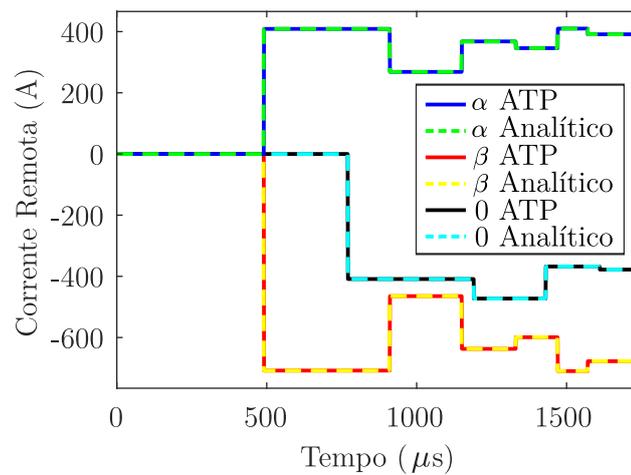
Fonte: Autoria própria.

**Figura B.3.** Falta BT - Simulação ATP.

Fonte: Autoria própria.

**Figura B.4.** Falta BT - Comparativo da Simulação em ATP com o Método Analítico - Corrente Local.

**Fonte:** Autoria própria.

**Figura B.5.** Falta BT - Comparativo da Simulação em ATP com o Método Analítico - Corrente Remota.

**Fonte:** Autoria própria.