



**MÉTODO GENERALIZADO DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS
BASEADO NA TEORIA DE ONDAS VIAJANTES PARA LINHAS
DE TRANSMISSÃO NÃO-HOMOGÊNEAS**

EDUARDO JORGE SILVA LEITE JUNIOR

**TESE DE DOUTORADO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Elétrica

**MÉTODO GENERALIZADO DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS
BASEADO NA TEORIA DE ONDAS VIAJANTES PARA LINHAS
DE TRANSMISSÃO NÃO-HOMOGÊNEAS**

Eduardo Jorge Silva Leite Junior

TEXTO DE TESE DE DOUTORADO ACADÊMICO SUBMETIDO AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

APROVADA POR:

Prof. Felipe Vigolvinho Lopes, D.Sc. (ENE/UnB)
(Orientador)

Prof. Flávio Bezerra Costa, D.Sc. (UFRN)
(Co-Orientador)

Prof. Francisco Damasceno Freitas, D.Sc. (ENE/UnB)
(Examinador Interno)

Prof. Clever Sebastião Pereira Filho, D.Sc. (UFMG)
(Examinador Externo)

Prof. José Carlos de Melo Vieira Júnior, D.Sc. (USP/EESC)
(Examinador Externo)

Brasília/DF, Novembro de 2020.

FICHA CATALOGRÁFICA

LEITE JUNIOR, EDUARDO JORGE SILVA

Método Generalizado de Localização de Faltas Baseado na Teoria de Ondas Viajantes para Linhas de Transmissão Não-Homogêneas. [Distrito Federal] 2020.

xv, 104p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Doutor, Tese de Doutorado, 2020).

Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Elétrica.

Departamento de Engenharia Elétrica

- | | |
|--------------------------|--------------------------|
| 1. Linhas Híbridas | 2. Linhas Não-Homogêneas |
| 3. Localização de Faltas | 4. Sistemas de Potência |
| I. ENE/FT/UnB | II. Título (série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

LEITE JR., E. J. S. (2020). Método Generalizado de Localização de Faltas Baseado na Teoria de Ondas Viajantes para Linhas de Transmissão Não-Homogêneas. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGEE.TD-167/2020, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 104p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Eduardo Jorge Silva Leite Junior

TÍTULO: Método Generalizado de Localização de Faltas Baseado na Teoria de Ondas Viajantes para Linhas de Transmissão Não-Homogêneas.

GRAU: Doutor ANO: 2020

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

Eduardo Jorge Silva Leite Junior

Universidade de Brasília (UnB)

Campus Darcy Ribeiro

Faculdade de Tecnologia - FT

Departamento de Eng. Elétrica (ENE)

Brasília - DF CEP 70919-970

E-mail: eduardoleitejr@gmail.com

*Aos meus pais, Eduardo e Patrícia, e aos meus tios,
Fernando e Luciana, DEDICO.*

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e familiares. Em especial a Fernando e Luciana pelo apoio, paciência, carinho e confiança. Sei que não mediram esforços para a realização desse sonho. Sem a presença deles a caminhada seria mais longa e mais difícil.

Ao meu orientador, Professor Dr. Felipe Vigolvinho Lopes, pela confiança em mim depositada, pela amizade, pela orientação, pelo apoio, paciência e pela oportunidade de aprendizado.

Ao meu co-orientador, Professor Dr. Flávio Bezerra Costa, por não medir esforços para ajudar, pela orientação durante este trabalho e pela sua amizade.

Aos amigos e colegas do Laboratório de Proteção de Sistemas Elétricos (LAPSE), pelo companheirismo durante esse período de Doutorado, pela amizade e apoio.

À CAPES pelo apoio financeiro da bolsa de Doutorado.

Aos colegas, professores e funcionários da UnB que, direta ou indiretamente, contribuíram para realização deste trabalho.

Obrigado.

RESUMO

Um algoritmo generalizado de dois terminais baseado na teoria de ondas viajantes para linhas não-homogêneas de múltiplas seções é proposto nesse documento de tese de doutorado. O algoritmo é capaz de identificar a seção da linha com falta e, na sequência calcular de forma precisa a distância da falta. Para desenvolver essa solução, uma formulação matemática generalizada é primeiramente proposta para identificar o trecho com falta, requerendo ajustes simples. Para tanto, necessita-se da detecção das primeiras frentes de onda incidentes nos dois terminais da linha monitorada, tal como realizado por métodos tradicionais. Por fim, uma vez detectado o trecho da linha com falta, uma formulação fechada baseada em ondas viajantes é proposta para estimar a distância de falta em relação a um dado terminal de referência. Uma vez que são utilizados como entrada parâmetros da linha monitorada, propõe-se também uma versão do algoritmo capaz de acomodar possíveis imprecisões nos parâmetros da linha a fim de torná-lo mais conservador. Um algoritmo baseado na transformada *wavelet* é utilizado na solução desenvolvida, garantindo a correta identificação das frentes de onda de interesse em casos de transitórios atenuados combinados com ruídos do sistema elétrico. A avaliação do método proposto foi realizada por meio de simulações digitais de faltas através do *Alternative Transients Program* (ATP), nas quais foi considerada uma linha não-homogênea, composta por trechos aéreos, subterrâneos e submarinos, usando parâmetros provenientes de sistemas elétricos reais. Os resultados obtidos comprovam a eficiência do método proposto em identificar corretamente o trecho com falta e localizar com precisão os pontos de faltas mesmo em situações de transitórios atenuados, na presença de ruídos eletromagnéticos no sistema e imprecisões nos parâmetros elétricos da linha.

Palavras-chave: Linhas híbridas, linhas não-homogêneas, localização de faltas, sistemas de potência, ondas viajantes, transitórios eletromagnéticos.

ABSTRACT

A generalized two-terminal traveling wave-based fault location algorithm for non homogeneous lines with multiple sections is proposed in this PhD thesis document. The algorithm is able to identify the faulted section and, then, to accurately calculate the fault distance. In order to develop such a solution, a generalized mathematical formulation is firstly proposed to identify the faulted section, requiring simple settings. To do so, only the detection of the first incident wavefronts at both line terminals is needed, as traditional methods do. Finally, once the faulted section is identified, a closed-form traveling wave-based fault location formulation is proposed to estimate the fault distance from a given reference terminal. It is also proposed a version of the algorithm capable of accommodating possible inaccuracies in the parameters of the line in order to make it more conservative in real applications. A wavelet-based sensitive transient detection algorithm is used in the developed solution, guaranteeing the proper identification of the wavefronts of interest in cases of attenuated transients combined to power system noise. The evaluation of the proposed method was carried out by means of digital fault simulations in the Alternative Transients Program (ATP), through which a non-homogeneous line composed by overhead, underground and submarine sections was modeled, using parameters taken from real electrical systems. The results show the efficiency of the proposed method, attesting it is able to correctly identify the line faulted section and to precisely pinpoint the fault either in cases of attenuated transients and in the presence of noise and inaccuracies in the line electrical parameters.

Keywords: Fault location, hybrid lines, non-homogeneous transmission systems, power systems, traveling waves, electromagnetic transients.

SUMÁRIO

Sumário	i
Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas	vii
Glossário	viii
Capítulo 1 – Introdução	1
1.1 Justificativa e Relevância do Tema	1
1.2 Objetivos	4
1.3 Contribuições da Tese	4
1.4 Organização do Texto	7
Capítulo 2 – Fundamentação Teórica	9
2.1 Notação Adotada	9
2.2 Propagação de Transitórios em Linhas de Transmissão	10
2.2.1 Modelo de Linha a Parâmetros Distribuídos	10
2.2.2 Propagação de Ondas Viajantes	12
2.3 Faltas em Linhas de Transmissão	14
2.4 Extração de Transitórios	15
2.4.1 Filtro <i>Differentiator-Smoother</i> (DS)	16
2.4.2 Filtro Passa-Faixa (BPF)	18
2.4.3 Transformada de Park (TDQ)	19
2.4.4 Transformada <i>Wavelet</i> Discreta (TWD) e Transformada <i>Wavelet</i> Discreta Redundante (TWDR)	21
2.4.5 Transformada <i>Wavelet</i> Estacionária com Efeito de Borda em Tempo Real (RT-BSWT)	24
2.4.6 Identificação de OVs	26
2.5 Localização de Faltas em Linhas de Transmissão	29
2.6 Síntese do Capítulo	31
Capítulo 3 – Revisão Bibliográfica	32
3.1 Localização de Faltas em Linhas Homogêneas	32
3.1.1 Método Clássico de Um terminal (Gale <i>et al.</i> , 1993)	32
3.1.2 Método Um Terminal sem Parâmetros (Altay <i>et al.</i> , 2014)	33
3.1.3 Método Um Terminal para Faltas com Terra (Liu <i>et al.</i> , 2012)	35

3.1.4	Método Clássico de Dois Terminais (Gale <i>et al.</i> , 1993)	36
3.1.5	Método de Dois Terminais com Ondas Refletidas (Gilany <i>et al.</i> , 2007)	37
3.1.6	Método de Dois Terminais Utilizando a Latência do Canal de Comunicação (Lopes <i>et al.</i> , 2015)	38
3.1.7	Método de Dois Terminais para Faltas com Terra (Lopes, 2016)	40
3.1.8	Método de Dois Terminais para Faltas com Ondas Refletidas (Lopes <i>et al.</i> , 2018)	41
3.2	Localização de Faltas em Linhas Não-Homogêneas (LTHs)	41
3.2.1	Métodos de Localização Baseados em Dados de Dois Terminais para LTHs com Dois Trechos	42
3.2.2	Método de Localização para LTH de Dois Terminais com n Trechos (Kasztenny <i>et al.</i> , 2018)	44
3.2.3	Método de Localização em HVDC Não-Homogênea de Dois Terminais com n Trechos (Nanayakkara <i>et al.</i> , 2012)	46
3.3	Síntese do Capítulo	48
Capítulo 4 – Método Generalizado de Localização de Faltas em LTHs		50
4.1	Limitações do Método Clássico de Localização de Faltas de Dois Terminais Baseado em OV quando Aplicado em LTHs	50
4.2	Método de Localização de Faltas Generalizado Aplicado em LTHs com Múltiplos Trechos	52
4.2.1	Identificação da Seção com Falta	52
4.2.2	Compensação dos Erros $\Delta\varepsilon_{L,n}$ e $\Delta\varepsilon_{R,n}$ Durante a Localização de Faltas em LTHs	55
4.2.3	Formulação Generalizada para Localização de Faltas em uma LTH com Múltiplos Trechos	58
4.2.4	Considerando Incertezas nos Parâmetros da LTH	59
4.3	Síntese do Capítulo	61
Capítulo 5 – Análise do Desempenho do Método Proposto para Localização de Faltas em LTH de Múltiplos Trechos		63
5.1	Sistema Teste Modelado	63
5.1.1	Trechos de Linha Aérea	65
5.1.2	Trechos de Cabos Subterrâneos	66
5.1.3	Trechos de Cabos Submarinos	67
5.2	Avaliação de Resultados	67
5.2.1	Cenários de Faltas Simulados	68
5.2.2	Análise Pontual	69
5.2.3	Análise da Influência das Incertezas nos Parâmetros Elétricos	72
5.2.4	Análise das Estimativas de Falta Utilizando Parâmetros Precisos	75
5.2.5	Síntese dos Resultados Obtidos	80
Capítulo 6 – Considerações Finais		81
Referências Bibliográficas		84

LISTA DE FIGURAS

1.1	Diagrama ilustrativo para análise do algoritmo proposto quanto a presença de incertezas nos parâmetros elétricos da LTH: a) metodologia tradicional com elevado número de equipamentos, b) dispositivos que se tornam desnecessários em caso de aplicação de metodologia específica para localização de faltas em LTHs, e c) quantidade de equipamentos de monitoramento equivalente à utilizada em linhas homogêneas quando há a aplicação de algoritmo dedicado para LTH.	3
2.1	Representação da notação adotada.	9
2.2	Modelo de LT a parâmetros distribuídos (Fonte: (Lopes, 2014b)).	10
2.3	Ondas progressivas e regressivas (Fonte: (Lopes, 2014b)).	12
2.4	Diagrama de Bewley para uma falta no ponto F de uma LT de comprimento ℓ (Fonte: (Lopes, 2014b) com adaptações).	13
2.5	Registro oscilográfico real de uma falta monofásica em uma LT de 230 kV: (a) variações nas formas de onda de tensão; (b) variações nas formas de onda da corrente (Fonte: (Lopes, 2014b) com adaptações).	15
2.6	Filtro DS: (a) Janela de coeficientes; (b) Resposta do filtro a um degrau (Fonte: Lopes <i>et al.</i> (2018)).	17
2.7	Exemplo de aplicação do filtro DS em um sinal de corrente de falta simulado (Fonte: Lopes <i>et al.</i> (2018)).	17
2.8	Saída do filtro DS em casos de transitórios atenuados (Fonte: Lopes <i>et al.</i> (2018)).	18
2.9	Resposta em frequência típica do filtro BPF.	18
2.10	Exemplo de aplicação do algoritmo proposto por Lopes <i>et al.</i> (2013).	22
2.11	Cascata de filtros da TWD.	23

2.12	Desempenho da: (a) TWD e (b) TWDR.	24
2.13	Aplicação da transformada <i>wavelet</i> estacionária com efeito de borda em tempo real (RT-BSWT): a) sinal de corrente na fase com falta; e b) análise do limiar de detecção e dos coeficientes <i>wavelet</i>	26
3.1	Sistema ilustrativo para aplicação do método de localização de falta com dados e um terminal proposto por Gale <i>et al.</i> (1993).	33
3.2	Sistema ilustrativo para aplicação do método de localização de faltas de um terminal proposto por Altay <i>et al.</i> (2014).	35
3.3	Sistema ilustrativo para aplicação do método de localização de falta de um terminal proposto por Liu <i>et al.</i> (2012).	36
3.4	Sistema ilustrativo para aplicação do método de localização de falta de dois terminais proposto por Gale <i>et al.</i> (1993).	37
3.5	Sistema ilustrativo para aplicação do método de localização de falta de dois terminais proposto por Gilany <i>et al.</i> (2007).	38
3.6	Sistema ilustrativo para aplicação do método de localização de falta de dois terminais proposto por Lopes <i>et al.</i> (2015).	39
3.7	Sistema ilustrativo utilizado.	40
3.8	Sistema ilustrativo para aplicação do método de localização de falta de dois terminais proposto por Lopes <i>et al.</i> (2018).	41
3.9	Diagrama ilustrativo para procedimento de localização de faltas em uma LTH de dois trechos.	42
3.10	Sistema ilustrativo para aplicação do método de localização de falta para LTHs proposto por Kasztenny <i>et al.</i> (2018).	45
3.11	Diagrama ilustrativo para procedimento de localização de faltas em uma LTH de três trechos proposto por Nanayakkara <i>et al.</i> (2012).	47
4.1	Diagrama de Bewley para faltas em linhas homogêneas com uma única seção.	51
4.2	Diagrama de Bewley para falta na n -ésima seção.	53

4.3	Desvio de velocidade de propagação na transição para um meio de menor velocidade.	55
4.4	Desvio de velocidade de propagação na transição para um meio de maior velocidade.	57
4.5	Diagrama ilustrativo para análise do algoritmo proposto quanto a presença de incertezas nos parâmetros elétricos da LTH.	60
4.6	Diagrama de blocos da metodologia para aplicação do algoritmo proposto.	62
5.1	Trechos de linha aérea, linha subterrânea e linha submarina distribuídos ao longo da LTH simulada.	63
5.2	Esboço da torre de linha de transmissão aérea (sem escala).	65
5.3	Configuração vertical e horizontal dos cabos subterrâneos e seção transversal dos cabos (sem escala).	66
5.4	Configuração vertical e horizontal dos cabos submarinos e seção transversal do cabo submarino (sem escala).	67
5.5	Análise pontual da detecção dos transitórios para falta sólida na seção $n = 5$ com ângulo de incidência de 90° e $\text{SNR} = 60$ dB.	69
5.6	Análise pontual da detecção dos transitórios para falta na seção $n = 5$ com resistência de falta de 150Ω , ângulo de incidência de 15° e $\text{SNR} = 60$ dB: a) sinais de corrente na fase com falta nas barras da LTH monitorada; b) ampliação dos sinais de correntes para o período de tempo circunvizinho ao instante de incidência da falta; e c) coeficientes <i>wavelet</i> e limiares de detecção.	71
5.7	Análise pontual comparativa da influência da presença de ruídos eletromagnéticos considerando: (a) e (c) $\text{SNR} = 60$ dB; e (b) e (d) $\text{SNR} = 100$ dB.	72
5.8	Resultados para detecção da seção com falta considerando a influência de incertezas nos parâmetros da linha para: (a) cenário 1; (b) cenário 2; e (c) cenário 3.	73
5.9	Campo de busca para faltas classificadas na zona de certeza para $\xi = 2\%$ no: (a) cenário 1; (b) cenário 2; e (c) cenário 3.	74

5.10 Gráfico de dispersão comparativo entre os erros obtidos quando utilizado o método proposto para LTHs e quando utilizado método clássico de localização de faltas baseado em OVs de dois terminais utilizando as aproximações de $v_p = v_{Area}$ e $v_p = v_{avg}$	76
5.11 Cenário 1: erros na localização de faltas para casos na seção $n = 5$ (seção de maior velocidade).	77
5.12 Erros na localização de faltas para casos: (a) na seção $n = 4$ (cenário 2); e (b) na seção $n = 6$ (cenário 3).	78
5.13 Cenário 4: erros na localização de faltas para casos próximos aos terminais L e R da LTH.	79

LISTA DE TABELAS

3.1	Resumo da revisão bibliográfica referente à localização de faltas em LT.	49
5.1	Parâmetros de Cada Seção da LTH.	64
5.2	Dados do Circuito Equivalente de Thévenin.	64
5.3	Parâmetros Físicos e Elétricos do Trecho de 400kV subterrâneo.	66
5.4	Dados Físicos do Cabo 400kV Submarino Modelado.	68
5.5	Tabela de valores de teste esperados para ΔT_n conforme definido em (4.9).	70

GLOSSÁRIO

ACSR	<i>Aluminum Conductors Steel Reinforced</i>
ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
CA	Corrente Alternada
CAA	Cabos de Alumínio com Alma de Aço
CC	Corrente Constante
DS	<i>Differentiator-Smoother</i>
HPF	<i>High-Pass Filter</i>
HVDC	<i>High-Voltage Direct Current</i>
LPF	<i>Low-Pass Filter</i>
LPFF	<i>Low Pressure Fluid Filled</i>
LT	Linha de Transmissão
LTH	Linha de Transmissão Híbrida
OV	Onda Viajante
RT-BSWT	<i>Real-Time Boundary Stationary Wavelet Transform</i>
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
TC	Transformador de Corrente
TDQ	Transformada de Park
TWD	Transformada Wavelet Discreta
TWDR	Transformada Wavelet Discreta Redundante
XLPE	Cabos Isolados com Polietileno Reticulado

1.1 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TEMA

Atualmente, o uso de cabos isolados para transmissão de energia elétrica está se tornando cada vez mais atraente para as concessionárias. Seu impacto ambiental reduzido está de acordo com as preocupações públicas sobre a compatibilidade de novas linhas aéreas em áreas habitadas (Bawart *et al.*, 2016; Ametani *et al.*, 2010). Além disso, nos centros urbanos, há áreas nas quais o uso de linhas aéreas é restrito devido a vários fatores, como impacto visual, custo de implementação, exposição a campo elétrico, limitação de passagem e limitações físicas (Livani; Evrenosoglu, 2014). Concomitantemente, os avanços na tecnologia de cabos isolados com polietileno reticulado (XLPE) combinados com o crescimento de fontes de energia renováveis e geração de energia *offshore* motivaram as empresas transmissoras de energia a usar redes subterrâneas e subaquáticas de alta tensão (Vargas *et al.*, 1999; Yang *et al.*, 2017; Gregory, 2000). Dessa forma, o uso de trechos de linhas aéreas, subterrâneas e subaquáticas, quando combinadas, resulta em uma linha de transmissão (LT) não convencional, chamada neste trabalho de linha de transmissão não-homogênea, muitas vezes citada como linha de transmissão híbrida (LTH). Portanto, uma LTH pode possuir trechos de linha aérea, de cabos isolados, ou mesmo conter seções de mesma natureza, porém com diferentes características elétricas. Como exemplo, destaca-se uma LTH totalmente aérea composta por trechos que podem apresentar variações significativas em seus parâmetros elétricos em decorrência de mudança de topologia de torres, variações longitudinais nas características do solo ao longo da linha, entre outros.

Embora trechos de cabos isolados em LTHs sejam menos propensos a impactos climáticos do que os trechos aéreos, outros problemas podem surgir, como falhas no isolamento dos cabos por razões externas como, por exemplo, perfuração em região inadequada do solo (Zipp *et al.*, 1997). Esse tipo de problema resulta em faltas permanentes no sistema, que normalmente exigem longos períodos para serem localizadas e reparadas, implicando frequentemente

no bloqueio das técnicas de religamento da LT. Por outro lado, as linhas aéreas estão sujeitas a faltas permanentes e temporárias, sendo possível a tentativa de auto restauração do sistema por meio de manobras de religamento automático (Schweitzer *et al.*, 2013). Tomando como base essa característica particular das linhas com cabos isolados, após a ocorrência de falta em uma LTH e, conseqüentemente, desligamento da linha isolando o defeito, o procedimento de localização de falta é crucial para acelerar a restauração do sistema e fornecer, em alguns casos, a possibilidade de um esquema de religamento automático, bloqueando a energização da linha apenas em casos de faltas identificadas nos trechos de cabos isolados da LTH. Nesse contexto, embora os métodos de localização de faltas baseados em componentes fundamentais sejam os mais utilizados pelas concessionárias por razões que envolvem a praticidade e o custo de implementação, a maioria dessas abordagens não é adequada para procedimentos de localização de faltas em LTHs, especialmente as que partem da premissa de homogeneidade da LT monitorada e da utilização de parâmetros de sequência zero (Saha *et al.*, 2010; Jensen, 2014).

Em um sistema de potência em operação, a localização de faltas em LTHs tem sido tipicamente realizada por meio de localizadores de distúrbio instalados nos pontos de junção entre trechos de linha aérea e trechos de linha com cabos isolados subterrâneos ou subaquáticos. Na Figura 1.1(a) ilustra-se a utilização de quatro conjuntos de instrumentos de medição para procedimentos relacionados à localização de falta em uma LTH de três trechos sendo dois aéreos e um subterrâneo. No entanto, tal esquema é considerado oneroso, uma vez que necessita de um número maior de dispositivos (Nanayakkara *et al.*, 2012). Com o objetivo de superar a necessidade de múltiplos localizadores de faltas em LTHs, pode-se optar por soluções que excluem a necessidade de dispositivos nas junções da LTH entre trechos de diferentes parâmetros elétricos conforme ilustrado na Figura 1.1(b). Neste contexto, alguns métodos de localização de falta têm sido reportados na literatura com tal objetivo, como os apresentados por: Nanayakkara *et al.* (2012), Gong *et al.* (2012), Jensen (2014), Zhang *et al.* (2016), Hamidi & Livani (2017), SEL-T400L Instruction Manual (2017), dentre os quais aqueles baseados em ondas viajantes (OVs) têm atraído o interesse da indústria. Estes algoritmos, além de necessitarem de um menor número de equipamentos instalados em campo, conforme ilustrado na Figura 1.1(c), pode apresentar desempenho mais robusto em relação a possíveis limitações de precisão encontradas em técnicas baseadas em componentes fundamentais (Lopes *et al.*, 2015).

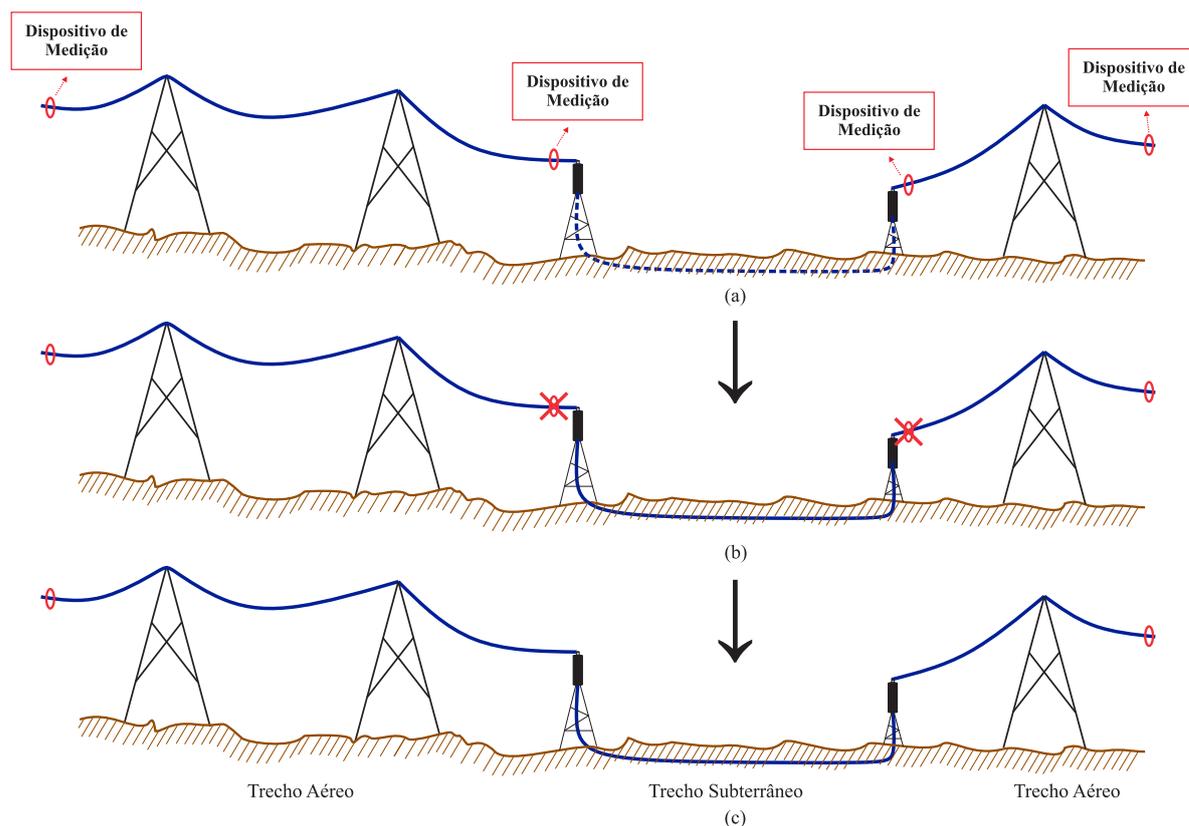


Figura 1.1. Diagrama ilustrativo para análise do algoritmo proposto quanto a presença de incertezas nos parâmetros elétricos da LTH: a) metodologia tradicional com elevado número de equipamentos, b) dispositivos que se tornam desnecessários em caso de aplicação de metodologia específica para localização de faltas em LTHs, e c) quantidade de equipamentos de monitoramento equivalente à utilizada em linhas homogêneas quando há aplicação de algoritmo dedicado para LTH.

Foi realizada uma busca a partir de uma vasta pesquisa bibliográfica e nenhuma solução foi anteriormente apresentada de forma generalizada para localização de faltas em LTHs de múltiplos trechos baseada em dados de dois terminais de modo a não requerer: pré estimativa do local da falta, aplicação em cascata de equações de localização, análise gráfica das características elétricas dos trechos e nem a detecção de ondas refletidas. Neste cenário, verificou-se a importância de desenvolver um algoritmo confiável e generalista capaz de estimar de forma precisa a localização da falta em uma LTH com qualquer número de trechos. Cabe ressaltar ainda que tal tipo de solução requer cuidados no processo de detecção das OV, especialmente devido ao fato de que os transitórios podem apresentar elevado nível de atenuação em LTHs. Portanto, para tornar a metodologia apresentada neste trabalho viável em casos de LTHs com múltiplos trechos, propõe-se a utilização do método de detecção de transitórios baseado nos coeficientes *wavelet* proposto por Costa (2014). Ainda, com o compromisso de propor uma solução simples e eficaz, toda formulação foi desenvolvida de tal forma que sua aplicação seja

generalista e viável para aplicações em sistemas reais a partir da análise de oscilografias com taxa de amostragem na ordem de MHz, e viável para aplicações nas quais os parâmetros da linha não são conhecidos com precisão. Nesse cenário, consideram-se margens de incertezas que podem ser ajustadas no algoritmo proposto, conforme será descrito nos próximos capítulos.

1.2 OBJETIVOS

O principal objetivo desta tese de doutorado é propor um método de localização de faltas baseado na teoria de ondas viajantes para aplicações em linhas não-homogêneas de múltiplos trechos. Portanto, os objetivos específicos são:

- Implementação em ATP de sistema com linha não-homogênea que seja capaz de representar as particularidades desta em termos de transitórios eletromagnéticos;
- Desenvolvimento de solução para identificar o trecho com falta para uma linha não-homogênea de múltiplos trechos com parâmetros elétricos distintos;
- Desenvolvimento de um equacionamento generalizado para localização de falta em linhas não-homogêneas de múltiplos trechos, compensando deficiências de técnicas tradicionais que partem da premissa de homogeneidade da LT monitorada;
- Desenvolvimento de um equacionamento generalizado para localização de falta em linhas não-homogêneas de múltiplos trechos, considerando a existência ou não de erros nos parâmetros elétricos da linha;
- Implementação computacional da solução proposta e validação por meio de testes de faltas em sistema modelado.

1.3 CONTRIBUIÇÕES DA TESE

Dentre as contribuições obtidas durante o processo de desenvolvimento desta tese de doutorado, destacam-se:

- O desenvolvimento de uma técnica generalizada para detecção do trecho com falta de uma linha não-homogênea de múltiplas seções;
- O desenvolvimento de uma técnica para determinação de zonas de certeza e incerteza para detecção do trecho com falta na presença de desvios nos parâmetros da linha;
- O desenvolvimento de uma nova formulação generalizada para a localização de faltas em linhas não-homogêneas de múltiplos trechos baseada na teoria de OV's a partir de dados de dois terminais contemplando a presença ou não de incertezas nos parâmetros da linha.

Em relação à divulgação dos resultados obtidos, enumeram-se a seguir, em ordem cronológica, as principais publicações em periódicos e anais de eventos sobre tópicos diretamente relacionados ou correlatos ao tema dessa tese:

- Artigos publicados em periódicos:
 1. **LEITE JR., E. J. S.**; LOPES, F. V.; COSTA, F. B.; NEVES, W. L. A.. Closed-Form Solution for Traveling Wave-Based Fault Location on Non-Homogeneous Lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 34, no. 3, pp. 1138-1150, Jun. 2019.
 2. LOPES, F. V.; LIMA, P.; RIBEIRO, J. P. G.; HONORATO, T. R.; SILVA, K. M.; **LEITE JR., E. J. S.**; NEVES, W. L. A.; ROCHA, G.. Practical Methodology for Two-Terminal Traveling Wave-Based Fault Location Eliminating the Need for Line Parameters and Time Synchronization. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 34, no. 6, pp. 2123-2134, Jan. 2019.
 3. LOPES, F. V.; **LEITE JR., E. J. S.**. Traveling Wave-Based Solutions for Transmission Line Two-Terminal Data Time Synchronization. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 33, no. 6, pp. 3240-3241, Dec. 2018.
 4. LOPES, F. V.; RIBEIRO, C. M. S.; RIBEIRO, J. P. G.; **LEITE JR., E. J. S.**. Performance Evaluation of the Travelling Wave-Based Differential Protection when Applied on Hybrid Transmission Lines. *The Journal of Engineering*, vol. 2018, no. 15, pp. 1114-1119, Jul. 2018.
- Artigos publicados em anais de conferências internacionais:

1. LOPES, F. V.; **LEITE JR., E. J. S.**; COSTA, F. B.. Dealing with Uncertainties in Non-Homogeneous Transmission Line Electrical Parameters During Traveling Wave-Based Fault Location Procedures. *The 15th International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2020)*, Liverpool, United Kingdom, Mar. 2020.
2. LOPES, F. V.; **LEITE JR., E. J. S.**; COSTA, F. B.; NEVES, W. L. A.. Traveling Wave-Based Hybrid Line Faulted Section Detection: A Practical Approach. *2019 International Conference on Power Systems Transients (IPST)*, Perpignan, France, Jun. 2019.
3. LOPES, F. V.; **LEITE JR., E. J. S.**; RIBEIRO, J. P. G.; LOPES, L. G. A.; PIARDI, A. B.; OTTO, R. B.; NEVES, W. L. A.. Using the Differentiator-Smoother Filter to Analyze Traveling Waves on Transmission Lines: Fundamentals, Settings and Implementation. *2019 International Conference on Power Systems Transients (IPST)*, Perpignan, France, Jun. 2019.
4. **LEITE JR., E. J. S.**; LOPES, F. V.; RIBEIRO, J. P. G.. Traveling Wave-Based Fault Location on Two Segment Hybrid Lines. *2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, Portland, OR, USA, Aug. 2018.
5. LOPES, F. V.; RIBEIRO, C. M. S.; RIBEIRO, J. P. G.; **LEITE JR., E. J. S.**.. Performance Evaluation of the Travelling Wave-Based Differential Protection when Applied on Hybrid Transmission Lines. *The 14th International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2018)*, Belfast, Northern Ireland, Mar. 2018.
6. PASSOS, E. A. R.; LOPES, F. V.; RIBEIRO, J. P. G.; **LEITE JR., E. J. S.**.. ATP/MODELS Differentiator-Smoother Filter Model Validated Using Actual Time-Domain Relay. *2018 Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS)*, Brasília, Brazil, Nov. 2018.
7. **LEITE JR., E. J. S.**; LOPES, F. V.. Traveling wave-based fault location formulation for hybrid lines with two sections. *2017 Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS)*, Brasília, Brazil, Out. 2017.

- Artigos publicados em anais de conferências nacionais:

1. LOPES, F. V.; RIBEIRO, J. P. G.; **LEITE JR., E. J. S.**; LOPES, L. G. A.; PIARDI, A. B.; OTTO, R. B.. Desafios e Tendências no Processo de Localização de Faltas em Linhas de Transmissão Equipadas com Relés Microprocessados com Funções no Domínio do Tempo. *Décimo Oitavo Encontro Regional Ibero-Americano do Cigre (XVIII ERIAC)*, Foz do Iguaçu, Brasil, Mai. 2019.
2. LOPES, F. V.; NEVES, W. L. A.; **LEITE JR., E. J. S.**; RIBEIRO, J. P. G.. Aplicação do Filtro Differentiator-Smoother Durante a Análise de Ondas Viajantes em Linhas de Transmissão. *Congresso Brasileiro de Automática (CBA 2018)*, João Pessoa, Brasil, Set. 2018.
3. LOPES, F. V.; NEVES, W. L. A.; **LEITE JR., E. J. S.**; RIBEIRO, J. P. G.. Algoritmo Híbrido para Localização de Faltas em Linhas de Transmissão Usando Ondas Viajantes de Forma Independente de Ajustes. *XIV Seminário Técnico de Proteção e Controle (XIV STPC)*, Foz do Iguaçu, Brasil, Nov. 2018.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este texto de tese de doutorado está organizado de acordo com a seguinte estrutura:

- No Capítulo 2, apresenta-se a fundamentação teórica do tema a ser desenvolvido, abordando alguns dos principais conceitos sobre faltas em LTs, métodos de localização de faltas baseados em OV's e métodos de detecção de transitórios.
- No Capítulo 3, faz-se uma revisão bibliográfica de publicações relevantes no âmbito de localização de faltas em LTs homogêneas e não-homogêneas.
- No Capítulo 4, descreve-se o método proposto para localização de faltas, destacando-se inicialmente a limitação do método clássico para LTs não-homogêneas e, posteriormente, a nova formulação proposta para contornar as fontes de erros verificadas.
- No Capítulo 5, realiza-se a avaliação da técnica proposta, destacando-se os resultados coletados da comparação entre seu desempenho com o desempenho obtido quando utilizadas aproximações no método clássico de localização de faltas para LTs homogêneas.

-
- Por fim, as conclusões dessa tese e propostas para continuação da pesquisa são apresentadas no Capítulo 6.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, apresenta-se uma fundamentação teórica de tópicos considerados importantes para o entendimento dos estudos e análises desenvolvidas ao longo da presente tese de doutorado. Mais especificamente, abordam-se conceitos relacionados a faltas em LTs, propagação de OV's e localização de faltas baseadas em OV's em linhas homogêneas e não-homogêneas. Com o objetivo de apresentar os fundamentos teóricos sob um mesmo ponto de vista, apresenta-se inicialmente a notação que será adotada ao longo deste capítulo.

2.1 NOTAÇÃO ADOTADA

Para facilitar a compreensão dos princípios, fundamentos, e algoritmos apresentados, todos serão explicados sob uma mesma notação, conforme representado na Figura 2.1. O sistema é formado por uma LT homogênea, com comprimento ℓ , que interliga os terminais L (local) e R (remoto), sendo: t_{L1} e t_{L0} os instantes da chegada das primeiras OV's dos modos aéreo e terra na barra L, respectivamente, t_{R1} e t_{R0} os instantes da chegada das primeiras OV's dos modos aéreo e terra na barra R, respectivamente, v_{p1} e v_{p0} as velocidades de propagação das ondas dos modos aéreo e terra, respectivamente, e d a distância real da falta sempre tomando como referência o terminal L.

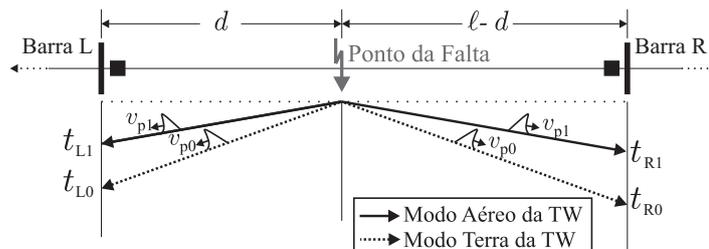


Figura 2.1. Representação da notação adotada.

2.2 PROPAGAÇÃO DE TRANSITÓRIOS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Para um melhor entendimento dos conceitos abordados nesta tese no que se refere à solução desenvolvida para localização de faltas em LTs não-homogêneas, apresentam-se nesta seção fundamentos básicos sobre modelos de LTs a parâmetros distribuídos, bem como sobre a propagação de OV's em LTs.

2.2.1 Modelo de Linha a Parâmetros Distribuídos

Na fundamentação teórica do modelo de LTs a parâmetros distribuídos, considera-se o efeito do tempo de propagação de ondas eletromagnéticas ao longo do sistema. Assim, para calcular as tensões e correntes nos terminais monitorados, deve-se conhecer, além dos sinais elétricos em pelo menos uma das extremidades da linha, a distância do ponto para o qual estão sendo calculadas as referidas grandezas elétricas (Saha *et al.*, 2010).

Apresenta-se na Figura 2.2 o circuito equivalente de uma LT longa de comprimento ℓ , composto por vários elementos incrementais de uma LT monofásica de comprimento Δx , onde r , l , c e g representam, respectivamente, a resistência série, a indutância série, a capacitância em derivação e a condutância em derivação por unidade de comprimento. Considera-se também que o solo é ideal, ou seja, que este possui resistividade nula (Araújo; Neves, 2005). Na figura, destaca-se o ponto X de medição a ser analisado, o qual se encontra localizado a uma distância x do terminal L, onde é verificada uma tensão $v(x, t)$ e uma corrente $i(x, t)$.

Para um único elemento incremental da LT, a tensão $v(x, t)$ e a corrente $i(x, t)$ podem ser

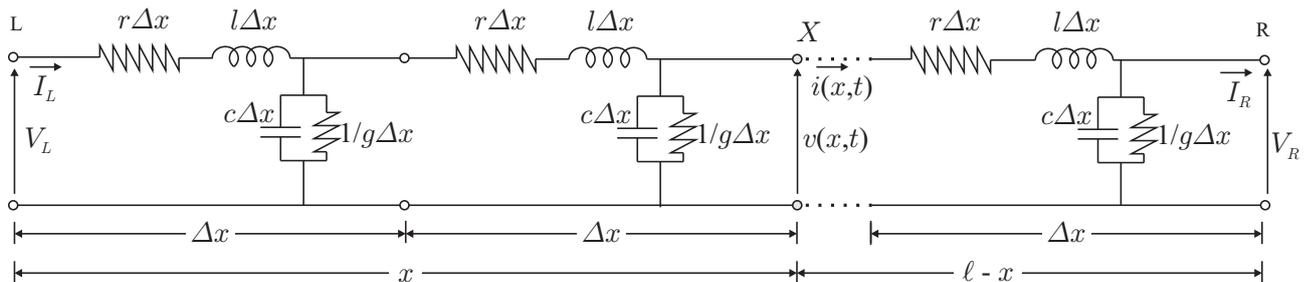


Figura 2.2. Modelo de LT a parâmetros distribuídos (Fonte: (Lopes, 2014b)).

relacionadas aos parâmetros da LT por meio das expressões a seguir (Naidu, 1985):

$$-\frac{\partial v(x, t)}{\partial x} = r \cdot i(x, t) + l \cdot \frac{\partial i(x, t)}{\partial t}, \quad (2.1a)$$

$$-\frac{\partial i(x, t)}{\partial x} = g \cdot v(x, t) + c \cdot \frac{\partial v(x, t)}{\partial t}. \quad (2.1b)$$

A solução das equações (2.1) resulta em um conjunto de expressões equivalentes, popularmente conhecidas como equações telegráficas, que representam as variações de $v(x, t)$ e $i(x, t)$ no espaço e no tempo:

$$\frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial x^2} = rg \cdot v(x, t) + (rc + lg) \cdot \frac{\partial v(x, t)}{\partial t} + lc \cdot \frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial t^2}, \quad (2.2a)$$

$$\frac{\partial^2 i(x, t)}{\partial x^2} = rg \cdot i(x, t) + (rc + lg) \cdot \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} + lc \cdot \frac{\partial^2 i(x, t)}{\partial t^2}. \quad (2.2b)$$

Para análise das componentes de alta frequência, sendo ω a frequência angular nominal do sistema, pode-se considerar que $\omega l \gg r$ e que $\omega c \gg g$, ou seja, o efeito das perdas é desprezível em relação ao efeito das reatâncias, de modo que pode-se aproximar o sistema por uma LT em que $r = g = 0$ (Glover *et al.*, 2012). Sendo assim, (2.2) é simplificada, obtendo-se as expressões:

$$\frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial x^2} = lc \cdot \frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial t^2}, \quad (2.3a)$$

$$\frac{\partial^2 i(x, t)}{\partial x^2} = lc \cdot \frac{\partial^2 i(x, t)}{\partial t^2}, \quad (2.3b)$$

as quais são conhecidas como equações de onda das tensões e correntes em uma LT sem perdas (Saha *et al.*, 2010).

A solução geral do sistema de equações representado pelas expressões (2.3) pode ser representada de forma simplificada por:

$$v(x, t) = f_1 \left(t - \frac{x}{v_p} \right) + f_2 \left(t + \frac{x}{v_p} \right), \quad (2.4a)$$

$$i(x, t) = \frac{1}{Z_s} \left[f_1 \left(t - \frac{x}{v_p} \right) - f_2 \left(t + \frac{x}{v_p} \right) \right], \quad (2.4b)$$

onde $Z_s = \sqrt{\frac{l}{c}}$ é a impedância de surto (impedância característica para o caso de $r = g = 0$) e $v_p = \sqrt{\frac{1}{lc}}$ é a velocidade de propagação das ondas para uma LT sem perdas.

Tanto para linhas aéreas quanto para linhas com cabos isolados pode-se obter a solução $v_p = \sqrt{\frac{1}{lc}}$. Para casos de linhas polifásicas, tal constatação se faz pela análise de cada modo de

propagação da linha, considerando-se que esta é perfeitamente transposta (Wedepohl; Wilcox, 1973; Clarke, 1948).

Conforme mencionado anteriormente, as tensões e correntes no ponto X dependem da distância x do terminal L. Portanto, por meio deste modelo de LT, é possível avaliar as tensões e correntes do sistema monitorado sem desprezar os efeitos dos parâmetros distribuídos da linha, cuja representação é imprescindível para o estudo de faltas baseado em transitórios de alta frequência em LTs. Por isso, os fundamentos apresentados nesta subseção têm sido utilizados, até os dias atuais, como base para a elaboração de diversos métodos de localização de faltas, sendo essenciais para a compreensão do método proposto nesta tese de doutorado.

2.2.2 Propagação de Ondas Viajantes

Diante do exposto na subseção anterior, as expressões (2.4) representam a superposição de duas ondas, sendo as funções f_1 e f_2 interpretadas como ondas eletromagnéticas que viajam em sentidos opostos ao longo da LT (Lopes, 2014b). Considerando então que f_1 se propaga no sentido do terminal L para o R (aqui considerado sentido positivo de x) e f_2 no sentido do terminal R para o L (sentido negativo de x), f_1 e f_2 são denominadas, respectivamente, de ondas progressivas e ondas regressivas, cuja polaridade e sentido de propagação em um circuito primário são ilustradas na Figura 2.3.

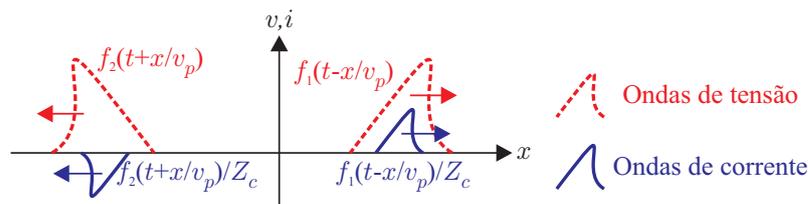


Figura 2.3. Ondas progressivas e regressivas (Fonte: (Lopes, 2014b)).

Uma vez que ocorre uma falta no sistema, há mudanças nos níveis de tensão e corrente no ponto de ocorrência do distúrbio. Estas mudanças se propagam na forma de ondas eletromagnéticas ao longo dos condutores, o que explica o fato de não serem percebidas instantaneamente nos terminais da LT (Lopes, 2014b). As características destas ondas estão relacionadas diretamente aos coeficientes de emissão a partir do ponto de geração dos transitórios, bem como

de transmissão e reflexão em descontinuidades do sistema (pontos de variação de impedância característica ao longo da rede elétrica). Bewley (1931) apresentou um estudo detalhado sobre os coeficientes de propagação de OV e propôs uma análise gráfica capaz de auxiliar na visualização dos efeitos dessa propagação ao longo da LT. A representação gráfica é bem conhecida como Diagrama de Bewley, também muitas vezes chamada de Diagrama de Treliças, o qual é ilustrado na Figura 2.4.

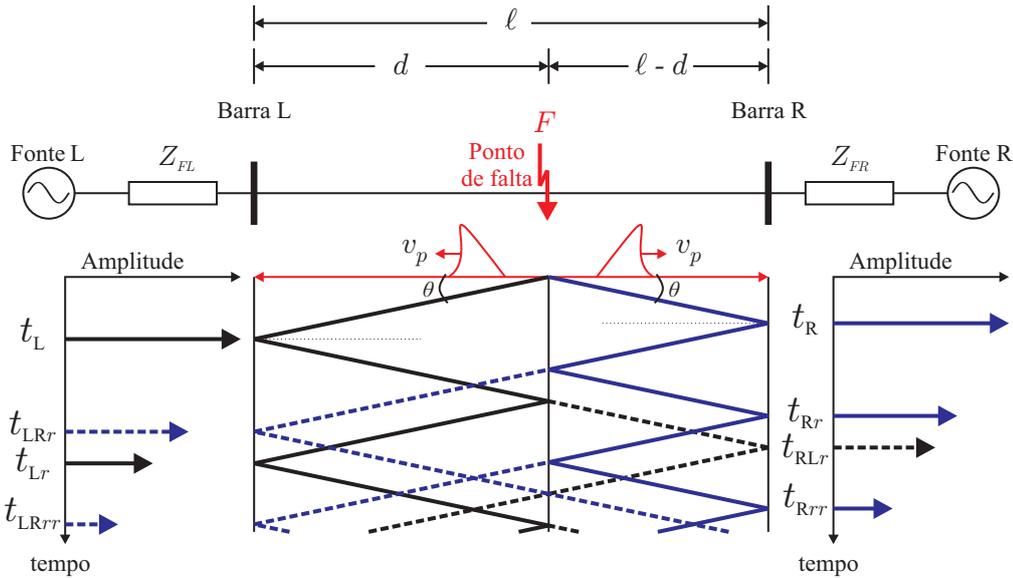


Figura 2.4. Diagrama de Bewley para uma falta no ponto F de uma LT de comprimento ℓ (Fonte: (Lopes, 2014b) com adaptações).

Na Figura 2.4 ilustra-se a ocorrência de uma falta no ponto F de uma linha homogênea de comprimento ℓ . Observa-se que, imediatamente após a ocorrência de uma falta, OV progressivas e regressivas são lançadas em direção aos terminais da LT onde sofrem reflexões e/ou refrações de acordo com as características dos sistemas conectados a montante da barra L e a jusante da barra R. O diagrama de Bewley é capaz de ilustrar esse comportamento das ondas e a inclinação das retas das treliças podem ser relacionadas com a velocidade de propagação da OV conforme:

$$\operatorname{tg}(\theta) = \frac{1}{v_p}, \quad (2.5)$$

onde θ é o ângulo de inclinação da reta de propagação da OV no diagrama de Bewley conforme ilustrado na Figura 2.4. Esta inclinação está diretamente relacionada aos parâmetros elétricos da LT analisada. De fato, uma vez que os parâmetros são modificados, esperam-se velocidades de propagação diferentes, o que ocorre, por exemplo, em sistemas não-homogêneos em que

velocidades de propagação distintas podem ser verificadas em diferentes seções da LT.

Na literatura, muitos são os métodos que partem da análise do diagrama de Bewley para o desenvolvimento de algoritmos de localização de faltas baseados em OV's tanto para LTs homogêneas como para LTs não-homogêneas. O método proposto nessa tese de doutorado também faz uso dessa ferramenta para o desenvolvimento de seus fundamentos, sendo a compreensão do diagrama de Bewley importante para o entendimento global da solução.

2.3 FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Dentre os possíveis distúrbios que podem ocorrer em um sistema elétrico de potência, as faltas são um dos tipos que merecem atenção, visto que ocasionam falha de isolamento e, conseqüentemente, desligamentos não-programados que podem resultar em situações de *blackout*. Dependendo do número de fases envolvidas no distúrbio, as faltas são geralmente denominadas como monofásicas, bifásicas, bifásicas para a terra ou trifásicas, sendo as faltas monofásicas o tipo mais comum, representando aproximadamente 93% da quantidade de faltas em uma LT aérea de 500 kV, por exemplo (Schweitzer *et al.*, 2016a).

Além dos transitórios gerados no sistema elétrico de potência devido à ocorrência e isolamento de faltas, durante o distúrbio, as amplitudes e ângulos de fase das correntes e tensões do sistema estabilizam em condições diferentes das nominais, atingindo valores que dependem das características do curto-circuito. Na Figura 2.5, apresenta-se o resultado de um registro oscilográfico, no qual são destacadas as variações nas formas de onda da tensão e da corrente de uma fase devido à ocorrência de uma falta monofásica.

As mudanças no comportamento das grandezas elétricas do sistema durante curtos-circuitos possuem informações intrínsecas relacionadas às características do distúrbio, tal como o conteúdo transitório presente nas oscilografias, assim como destacado na Figura 2.5. Por exemplo, a partir de análise detalhada dos transitórios induzidos por uma falta é possível estimar o local do defeito, seja essa análise aplicada no domínio do tempo ou via observação de frequências características (Faybisovich *et al.*, 2010). Portanto, a análise das variações nas tensões e correntes de um sistema elétrico durante e/ou após curtos-circuitos é a base dos métodos de localização de faltas, os quais são classificados em diferentes grupos de acordo com os procedimentos reali-

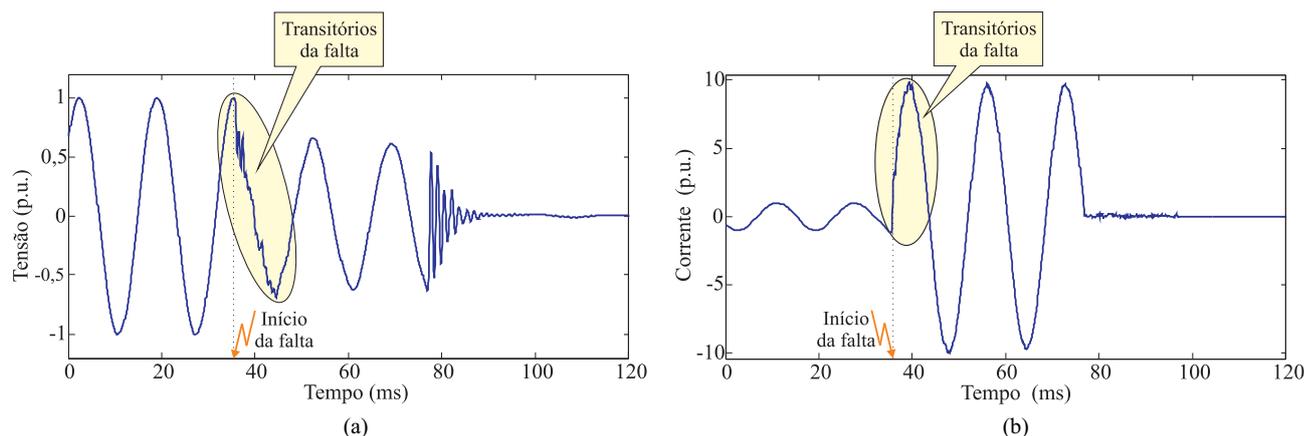


Figura 2.5. Registro oscilográfico real de uma falta monofásica em uma LT de 230 kV: (a) variações nas formas de onda de tensão; (b) variações nas formas de onda da corrente (Fonte: (Lopes, 2014b) com adaptações).

zados durante a avaliação das formas de onda monitoradas. Neste trabalho, consideram-se por exemplo metodologias baseadas na análise de transitórios de falta.

2.4 EXTRAÇÃO DE TRANSITÓRIOS

Os transitórios de alta frequência ocasionados por uma falta ou por qualquer outra manobra que ocasione mudança abrupta do sistema estão sobrepostos aos sinais de corrente e tensão na frequência fundamental do sistema monitorado. Por sua vez, para a correta aplicação de métodos que fazem o uso da análise desses transitórios, faz-se necessária a extração das componentes de interesse e posteriormente a sua análise. Diversas são as técnicas de filtragem de sinais aplicadas na extração das informações de OV, dentre as quais se destacam: o filtro *Differentiator-Smoother* (DS) (Schweitzer *et al.*, 2013), filtro passa-faixa (Schweitzer; Hou, 1993), a Transformada de Park (TDQ) (Lopes *et al.*, 2013), a Transformada *Wavelet* Discreta (TWD) (Saha *et al.*, 2010), a Transformada *Wavelet* Discreta Redundante (TWDR) (Percival; Walden, 2000) e a Transformada *Wavelet* Estacionária com Efeito de Borda em Tempo Real, do inglês, *Real-Time Boundary Stationary Wavelet Transform* (RT-BSWT) (Costa, 2014), as quais serão apresentadas de forma resumida a seguir.

2.4.1 Filtro *Differentiator-Smoother* (DS)

A extração das OV's de tensão e/ou corrente utilizadas na implementação dos algoritmos de localização de faltas baseados em OV's pode ser realizada por meio do uso do Filtro DS. Trata-se de um filtro composto por duas etapas encadeadas: uma primeira de suavização seguida de uma etapa de diferenciação.

A etapa de suavização (do inglês, *Smoother*) é equivalente a um filtro passa-baixa, através do qual os efeitos de distorção dos sinais de corrente e tensão são ligeiramente reduzidos, tornando a borda de subida dos sinais transitórios mais suave (Schweitzer *et al.*, 2013). Em contrapartida, na etapa subsequente de diferenciação (do inglês, *Differentiator*), as mudanças com características próximas a um degrau são transformadas em um pulso com formato triangular. Ao final do processo, são obtidas formas de onda que representam as OV's de tensão e corrente a serem empregadas nos algoritmos de localização que se baseiam na análise de OV's induzidas pela falta. Deve-se ressaltar que este processo de filtragem é realizado no domínio do tempo e em tempo real, utilizando-se uma janela de dados contendo os coeficientes do filtro DS com duração T_{DS} , conforme ilustrado na Figura 2.6 (a). Nota-se que metade dos coeficientes do filtro DS possuem ganho igual a $-G$, enquanto na outra metade o ganho aplicado é igual a G .

Constata-se que a resposta do filtro DS, no domínio do tempo, para uma entrada em forma de degrau é uma função triangular, com duração também igual a T_{DS} , sendo o valor de T_{DS} ajustável. É preferível que o valor de T_{DS} resulte em saídas do filtro DS que viabilizem a análise de OV's incidentes e refletidas, mesmo em situações de faltas próximas às barras monitoradas. Sendo assim, espera-se que o valor de T_{DS} não seja muito elevado. Ademais, o instante de tempo relacionado ao pico da saída triangular é tomado como o instante de chegada da OV no terminal monitorado. Conforme indicado na Figura 2.6 (b), este instante de tempo se encontra atrasado em $0,5 \cdot T_{DS}$ segundos do momento exato de incidência das OV's no terminal e é inerente ao processamento de dados associado à extração dessas ondas via filtro DS.

O ganho G do filtro é ajustado de tal forma que a amplitude da função triangular corresponda à amplitude da entrada em degrau decorrente do transitório gerado pela incidência de OV's no terminal de medição. Dessa forma, ao efetuar a convolução dos coeficientes do filtro DS

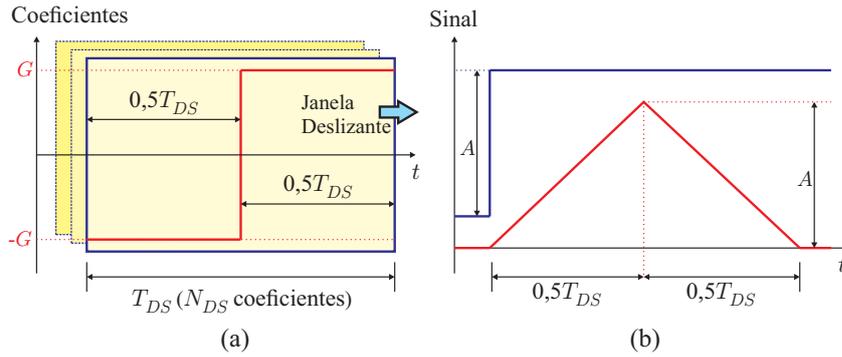


Figura 2.6. Filtro DS: (a) Janela de coeficientes; (b) Resposta do filtro a um degrau (Fonte: Lopes *et al.* (2018)).

dispostos na janela de dados apresentada na Figura 2.6 (a) com a entrada em forma de degrau de amplitude A , obtém-se idealmente uma forma triangular também com amplitude A . Para tanto, o ganho do filtro é ajustado como sendo, $G = \frac{2}{N_{DS}}$, sendo N_{DS} o número de coeficientes utilizados na implementação do filtro DS empregado.

As OVs contidas nos sinais de tensão e corrente do sistema se caracterizam como mudanças bruscas nestes sinais, as quais se aproximam de degraus quando observados em uma escala de tempo da ordem de microssegundos, conforme demonstrado na Figura 2.7. Em determinados pontos como, por exemplo, no transitório de amplitude A_3 , o formato da onda de saída perde a característica triangular. De fato, para uma entrada em rampa, o que se espera no caso de transitórios atenuados em linhas não-homogêneas, a saída do filtro DS se aproxima de uma parábola, com largura um pouco maior que T_{DS} , conforme evidenciado na Figura 2.8.

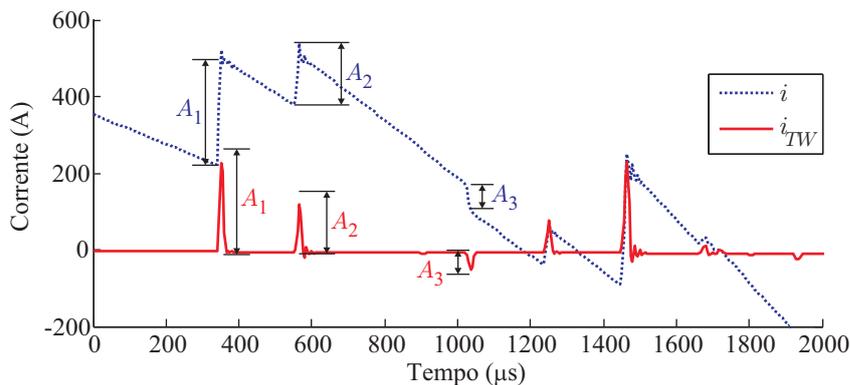


Figura 2.7. Exemplo de aplicação do filtro DS em um sinal de corrente de falta simulado (Fonte: Lopes *et al.* (2018)).

O filtro DS apresenta como características principais a conservação da informação da amplitude do transitório. Apesar de facilitar algumas análises no âmbito da proteção de LTs usando

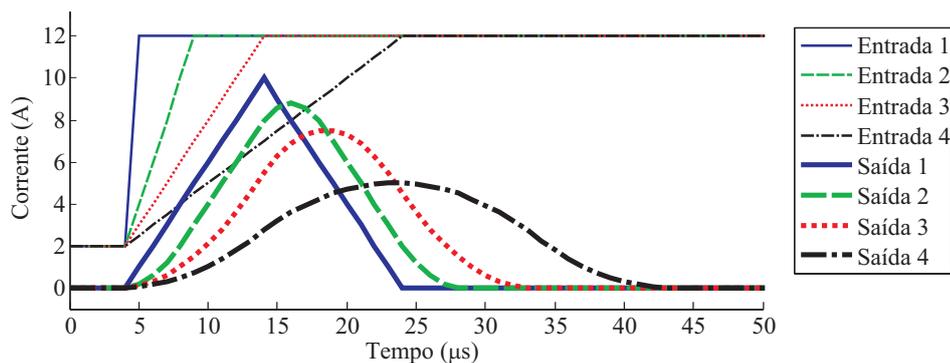


Figura 2.8. Saída do filtro DS em casos de transitórios atenuados (Fonte: Lopes *et al.* (2018)).

OVs, tal característica pode ser considerada um fator limitador para aplicações em sistemas com transitórios atenuados ou na presença de ruídos, podendo este transitório não ser detectado a depender do ajuste no processo de identificação de OV's descrito na Seção 2.4.6.

2.4.2 Filtro Passa-Faixa (BPF)

Alguns dispositivos reais como o RPV311 (2019) utilizam filtros passa-faixa, também conhecidos como *Band-Pass Filter* (BPF), para extrair as informações referentes às OV's empregadas na funcionalidade de localização de faltas, conforme ilustrado na Figura 2.9.

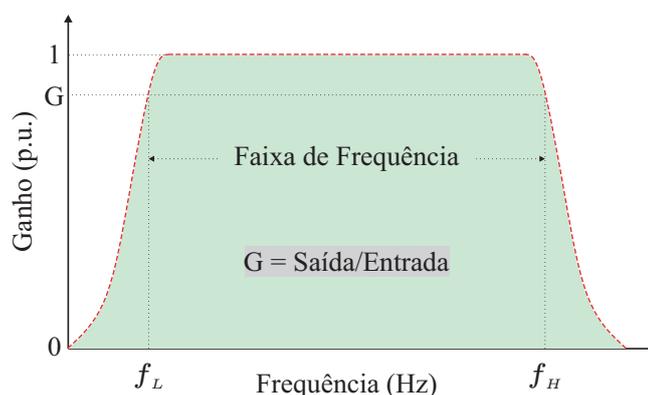


Figura 2.9. Resposta em frequência típica do filtro BPF.

Em alguns dispositivos de localização de faltas, a resposta em banda dos BPF é obtida a partir da aplicação em cascata de duas etapas de filtragem: uma primeira referente ao filtro *Anti-Aliasing*, e outra referente a um filtro passa-altas, ambos analógicos. Os transitórios eletromagnéticos originados por faltas possuem componentes de alta frequência. Assim, para

evitar a ocorrência do efeito de sobreposição de espectro, do inglês *aliasing*, durante o processo de amostragem dos sinais, utiliza-se um filtro analógico passa-baixas para eliminar essas componentes de alta frequência que não podem ser representadas considerando a taxa de amostragem empregada (Silva, 2009; Oppenheim; Schaffer, 1998). O filtro *Anti-Aliasing* (também conhecido como *Low-Pass Filter* (LPF)) tem frequência de corte normalmente ajustada com valor ligeiramente inferior à metade da frequência de amostragem dos sinais de entrada do filtro. Após o processo de filtragem no LPF, segue-se para a aplicação de um filtro passa-alta, também conhecido como *High-Pass Filter* (HPF), cuja frequência de corte depende da faixa de frequência típica dos transitórios eletromagnéticos desejados para extração das informações a serem analisadas.

Apresenta-se, na Figura 2.9, a resposta em frequência típica de um filtro passa-faixa, a partir da qual enfatiza-se a banda de passagem do filtro, ou seja, é a faixa de frequência que se encontra dentro do intervalo $f_L \leq f \leq f_H$. Normalmente, em aplicações desse tipo, os sinais são filtrados ainda no domínio analógico, sendo digitalizadas apenas as componentes de alta frequência de interesse para o processo de localização de faltas.

2.4.3 Transformada de Park (TDQ)

Proposta por Park (1929), a Transformada de Park (TDQ) é largamente utilizada no campo da engenharia elétrica, especialmente nas aplicações relacionadas às máquinas síncronas de polos salientes, visto que indutâncias variantes no tempo são vistas como constantes quando a referência rotaciona na velocidade síncrona da máquina (Lopes *et al.*, 2013). Neste contexto, são produzidas duas referências distintas: a de eixo direto (eixo d) e a de eixo em quadratura (eixo q).

Quando aplicada à detecção de transitórios, conforme proposto por Lopes *et al.* (2013), a TDQ é sintonizada de tal forma que suas referências rotacionem na mesma frequência angular ω dos sinais de corrente e/ou tensão do sistema monitorado. Por consequência, a componente de eixo direto apresenta valores constantes quando em regime permanente de operação e, quando da ocorrência de algum distúrbio, variações significativas são observadas nessa grandeza possibilitando a identificação precisa de transitórios decorrentes da propagação de OV, as quais

incidem no terminal de medição da linha monitorada (Lopes *et al.*, 2013).

As componentes de eixo direto e de eixo em quadratura, representadas respectivamente por A_d e A_q , são apresentadas a seguir:

$$\begin{bmatrix} A_d(k) \\ A_q(k) \end{bmatrix} = \mathbf{P}_{dq} \cdot \begin{bmatrix} A_a(k) \\ A_b(k) \\ A_c(k) \end{bmatrix} \quad (2.6a)$$

ou

$$\mathbf{A}_{dq} = \mathbf{P}_{dq} \cdot \mathbf{A}_{abc} \quad (2.6b)$$

sendo

$$\mathbf{P}_{dq} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\phi) & \cos(\phi - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\phi + \frac{2\pi}{3}) \\ -\text{sen}(\phi) & -\text{sen}(\phi - \frac{2\pi}{3}) & -\text{sen}(\phi + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (2.6c)$$

onde k é a k -ésima amostra do sinal, \mathbf{A}_{abc} é o vetor com os sinais monitorados de tensão V ou corrente I , \mathbf{A}_{dq} é o vetor com as componentes de eixo direto e em quadratura (V_d e V_q para tensão ou I_d e I_q para corrente), $\phi = k \cdot \omega \Delta t + \theta$, ω é a frequência angular do sistema, Δt é o período de amostragem do conversor analógico-digital, θ é o ângulo de A_d , θ_v é o ângulo de A_a (sinal monitorado da fase A) e $\Delta\theta = \theta - \theta_v$ é o ângulo entre A_d e A_a .

O algoritmo de extração de OV's utilizando a TDQ proposto por Lopes *et al.* (2013) é uma técnica aplicável à extração das primeiras OV's incidentes nos terminais da linha monitorada e composta por: processamento da componente de eixo direto, calibração do algoritmo auto-adaptativo, e detecção dos instantes de chegada das OV's. A seguir apresenta-se somente a etapa de processamento da componente de eixo direto, sendo os procedimentos posteriores a essa etapa apresentados na próxima seção, visto que são etapas relacionadas ao procedimento de identificação das OV's de interesse.

O processamento da componente de eixo direto é obtido a partir da utilização de uma grandeza incremental c_{dif} e sua respectiva energia ξ_{dif} com o intuito de aumentar a sensibilidade da técnica frente a atenuações em A_d e a robustez perante ruídos, respectivamente. Conforme reportado por Lopes *et al.* (2013), c_{dif} e ξ_{dif} podem ser obtidos a partir de:

$$c_{dif}(k) = A_d(k) - A_d(k-1) , \quad (2.7a)$$

$$\xi_{dif}(k) = \sum_{n=k-\Delta k_{EN}+1}^k [c_{dif}(n)]^2 , \quad (2.7b)$$

onde $A_d(k)$ é a k -ésima amostra da componente de eixo direto, $c_{dif}(k)$ é a k -ésima amostra da grandeza incremental, $\xi_{dif}(k)$ é a energia referente à k -ésima janela de dados de c_{dif} e Δk_{EN} é o número de amostras referente a meio ciclo da componente fundamental.

Apresenta-se na Figura 2.10, um exemplo de aplicação do algoritmo proposto por Lopes *et al.* (2013), ilustrando-se o desempenho do mesmo no processo de extração das primeiras ondas incidentes no terminal monitorado da LT quando da ocorrência de uma falta monofásica do tipo AT. Da figura apresentada, é possível observar que a utilização de uma grandeza incremental da componente de eixo direto do sinal de referência (corrente para o caso apresentado), torna o algoritmo mais sensível quando comparado com o comportamento de I_d . Como consequência, a energia de c_{dif} cresce mais rapidamente do que aquela referente à I_d , garantindo uma detecção mais rápida e precisa das primeiras ondas incidentes no terminal monitorado da linha. Ajustando o algoritmo para que $\Delta\theta = 0^\circ$, a componente de eixo direto do sinal de referência apresenta valores próximos de zero quando em regime permanente. Por outro lado, se $\Delta\theta$ possuísse um valor diferente de zero, A_d em regime permanente apresentaria um valor constante, o que levaria a um indesejado efeito de borda na primeira grandeza incremental c_{dif} (Lopes *et al.*, 2013). Outro aspecto importante que pode ser observado na figura apresentada, diz respeito às oscilações que c_{dif} apresenta quando da presença de desbalanços de fase e de ruídos elétricos nos sinais de corrente, o que imporá desafios no processo de detecção das primeiras OV's incidentes no terminal (Lopes *et al.*, 2013). Assim sendo, ficam evidentes os benefícios da utilização de ξ_{dif} para a detecção dessas ondas, em virtude de sua suavidade característica com variação rápida tão logo a falta se estabelece no circuito. No entanto, em termos de implementação computacional, o algoritmo requer o uso de janelas de dados com diferentes comprimentos, cujos ajustes variam a depender do objetivo da aplicação em sistemas elétricos de potência.

2.4.4 Transformada *Wavelet* Discreta (TWD) e Transformada *Wavelet* Discreta Redundante (TWDR)

Sabe-se que os transitórios eletromagnéticos originados a partir de um determinado ponto de falta em LTs introduzem componentes de frequência diversas nos sinais de corrente e tensão monitorados. De um modo geral, as componentes de baixa frequência possuem duração elevada enquanto que as de alta frequência, curta duração (Costa *et al.*, 2010). Neste contexto, sugere-

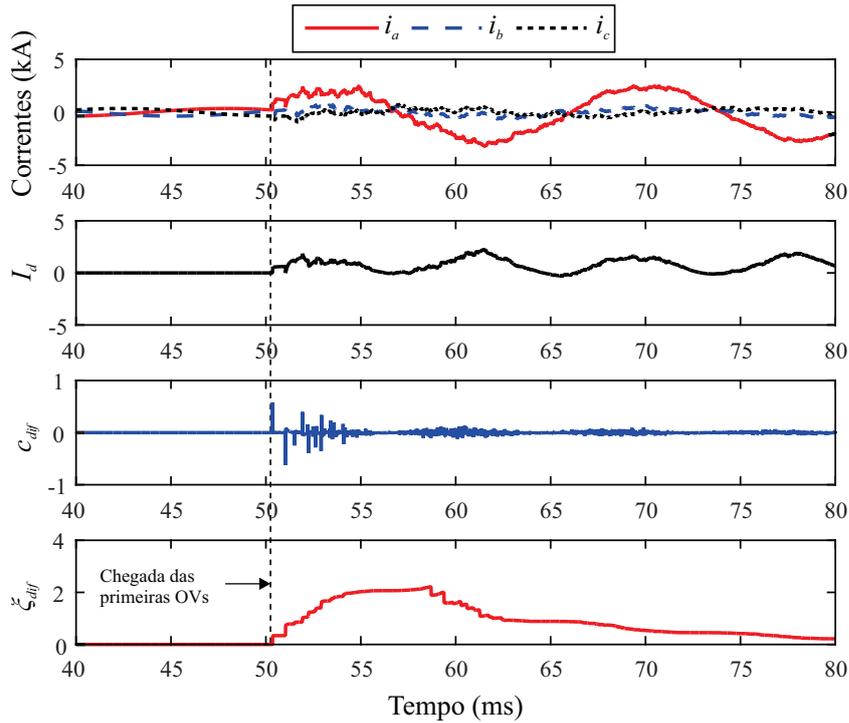


Figura 2.10. Exemplo de aplicação do algoritmo proposto por Lopes *et al.* (2013).

se a análise de determinado sinal sob efeito de transitórios eletromagnéticos num plano de múltiplas escalas, no qual a largura da janela de tempo e a banda de frequência sejam variantes com o valor central da sua banda de frequência (Costa *et al.*, 2008; Costa *et al.*, 2010; Costa *et al.*, 2011).

É exatamente na análise multi-resolução que a TWD supera a Transformada Discreta de Fourier, visto que permite a análise de um determinado sinal em diferentes níveis de resolução no tempo e na frequência, mostrando-se apropriada tanto para análises de componentes de baixa quanto de elevadas frequências (Costa *et al.*, 2010). Conforme apresentado na Figura 2.11, a formulação da TWD se baseia na teoria de cascata de filtros, uma vez que utiliza tanto filtros passa-baixas $h(k)$ quanto filtros passa-altas $g(k)$ para dividir a banda de frequência do sinal de entrada $s(k)$ em componentes com frequências baixas e elevadas (Costa *et al.*, 2008). Essa operação pode ser aplicada recursivamente (alimentando a saída do filtro passa-baixas aos próximos pares $h(k)$ e $g(k)$) de forma a decompor o sinal de entrada em coeficientes de aproximação $c_j(k)$ e em coeficientes de detalhe $d_j(k)$, em que o subscrito j se refere ao nível de escala de resolução da TWD (Costa *et al.*, 2008). Adicionalmente, conforme demonstrado na Figura 2.11, as saídas dos filtros $g(k)$ e $h(k)$ são subamostradas por um fator de 2. Por fim,

os coeficientes dos pares de filtros utilizados variam conforme a *Wavelet*-mãe utilizada, sendo a *Daubechies* 4 (db4) uma das mais apropriadas para a aplicação na análise de transitórios eletromagnéticos nos sistemas elétricos de potência, (Costa *et al.*, 2008; Costa *et al.*, 2010; Costa *et al.*, 2011).

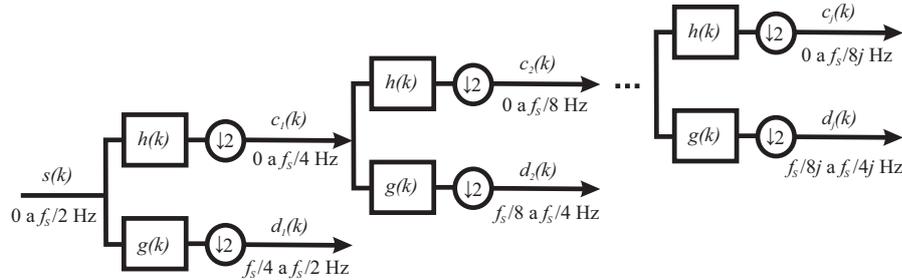


Figura 2.11. Cascata de filtros da TWD.

Conforme destacado por Costa *et al.* (2010), o processo de subamostragem associado à TWD pode comprometer o seu desempenho quando da aplicação de métodos de localização de faltas baseados em OV's. Dessa forma, a sua variante TWDR é utilizada para suprimir a queda de desempenho observada na TWD. As melhorias alcançadas na TWDR decorrem da ausência da etapa de subamostragem, o que torna a transformada invariante aos deslocamentos circulares nas amostras do sinal avaliado (Costa *et al.*, 2010; Percival; Walden, 2000), e que viabiliza sua aplicação a qualquer número de amostras do sinal de entrada, diferentemente da TWD que requer que este seja um múltiplo de 2 (Costa *et al.*, 2010).

Apresenta-se na Figura 2.12 uma exemplificação do desempenho das TWD e TWDR. A partir de uma análise detalhada da saída do filtro, percebe-se que os coeficientes de aproximação apresentam atraso de algumas amostras com relação ao sinal de entrada da transformada, característica esta referente aos coeficientes do filtro definido pela *wavelet*-mãe utilizada. Além disso, constata-se que os coeficientes de detalhe apresentam variações consideráveis assim que as OV's incidem no sinal de corrente do terminal monitorado, apresentando valores próximos de zero para instantes de tempo anteriores à chegada das ondas incidentes. Por fim, analisando o número das amostras dos coeficientes obtidos (eixo horizontal), evidencia-se o efeito da subamostragem por 2 na TWD.

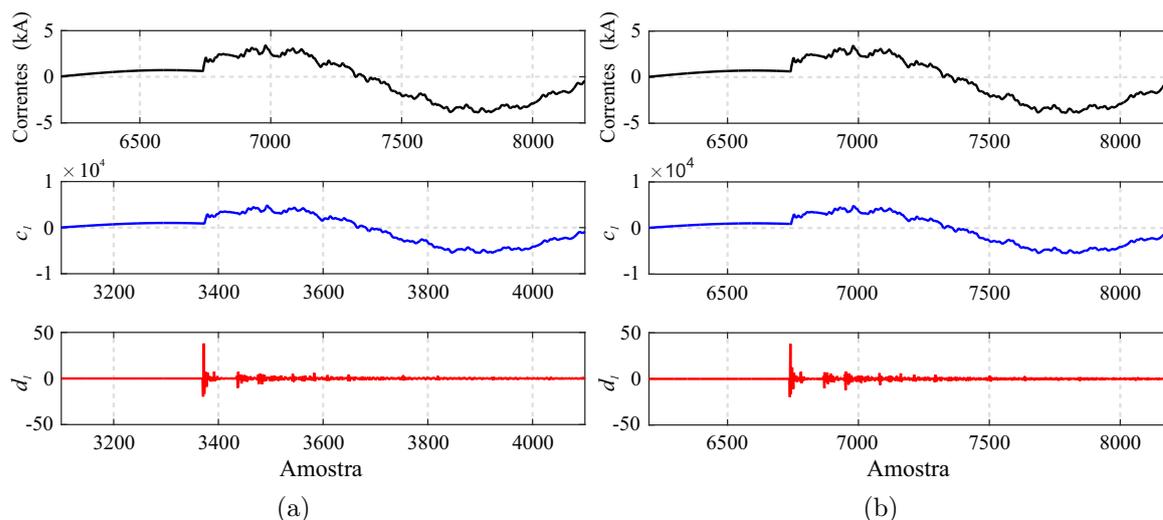


Figura 2.12. Desempenho da: (a) TWD e (b) TWDR.

2.4.5 Transformada *Wavelet* Estacionária com Efeito de Borda em Tempo Real (RT-BSWT)

A atenuação e a dispersão de transitórios induzidos por faltas são efeitos amplamente relatados como um problema para todas as tecnologias de localização de falhas baseadas em OV, mesmo quando aplicadas a linhas homogêneas (Saha *et al.*, 2010). Esses efeitos podem atrasar o procedimento de detecção do transitório ou mesmo inviabilizá-lo, resultando em erros adicionais na estimativa final da distância da falta durante procedimentos de localização de faltas. Em linhas com cabos isolados, espera-se que a atenuação e a dispersão das OV sejam mais proeminentes, e por isso, técnicas modernas de detecção de transitórios capazes de detectar OV mesmo quando muito atenuados devem ser aplicadas para reduzir erros no processo de localização de faltas.

Em (Costa, 2014), propõe-se um método para detectar transitórios devido a faltas e alguns distúrbios de qualidade de energia em sistemas em corrente alternada (CA). Essa técnica se baseia nos coeficientes *wavelet* de primeira escala da Transformada *Wavelet* Estacionária com Efeito de Borda em Tempo Real, do inglês, *Real-Time Boundary Stationary Wavelet Transform* (RT-BSWT). Apesar de não ter sido proposta originalmente para detecção de OV, Silva *et al.* (2019) realizaram melhorias no método visando detectar os instantes de incidência de OV nos terminais de uma LT em corrente contínua (CC). Portanto, como o método proposto nesse trabalho faz o uso apenas da detecção da primeira frente de OV em cada terminal da

LTH, e necessita de uma alta precisão no método de detecção para aplicação em casos de transitórios atenuados, um método baseado em (Costa, 2014) e (Silva *et al.*, 2019) é usado com esta finalidade.

Em sinais CA, Costa (2014) demonstrou que o tamanho da janela usada para calcular os coeficientes RT-BSWT deve ser igual ao número de amostras em um ciclo ($\Delta k = f_s/f$) para evitar distorções de borda durante o período de regime permanente, onde f_s é a frequência de amostragem e f a frequência fundamental do sistema. Assim, quando esse tamanho de janela é utilizado, distorções de borda relevantes são verificadas do instante de início da falta. Desse modo, mesmo transitórios induzidos por falta que não podem ser detectados através da transformada *wavelet* convencional, podem ser detectados adequadamente através do RT-BSWT como demonstrado por Costa (2014). Por outro lado, o uso de janelas demasiadamente grandes não é apropriado para a análise de OV, tendo em vista que seria necessário um recurso de memória grande para armazenar as amostras do sinal em uma frequência de amostragem alta (por exemplo, as últimas 20000 amostras do sinal precisam ser armazenadas por $f_s = 1$ MHz e $f = 50$ Hz). No entanto, verificou-se neste trabalho que, com uma alta frequência de amostragem, as distorções de borda durante o estado estacionário são insignificantes mesmo considerando o menor tamanho de janela possível de $\Delta k = N_w$, como verificado em sistemas CC (Silva *et al.*, 2019), em que N_w é o tamanho do filtro de *wavelet*.

Baseado nos trabalhos de Costa (2014) e Silva *et al.* (2019), um método de detecção de transitórios é proposto para ser aplicado durante o procedimento de localização de falta em LTHs, usando a *wavelet* mãe Daubechies com quatro coeficientes (db (4)), os quais são dados por $h_\psi/\sqrt{2} = \{-0,0915, -0,1585, 0,5915, -0,3415\}$. Portanto, os primeiros coeficientes do RT-BSWT associados ao tempo de amostragem atual da k -ésima amostra são dados por (Costa, 2014; Silva *et al.*, 2019):

$$\tilde{w}(k) = -0,0915x(k-2) - 0,1585x(k-1) + 0,5915x(k) - 0,3415x(k-\Delta k+1), \quad (2.8)$$

em que $\tilde{w}(k)$ é o k -ésimo coeficiente obtido.

Este documento usa (2.8) para filtrar os sinais e detectar os tempos de chegada da primeira OV em ambos os terminais da LTH. Uma frente de onda é detectada quando \tilde{w} é superior a um

limite estabelecido estatisticamente como 5σ , conforme sugerido por (Costa, 2014; Silva *et al.*, 2019), em que σ é o desvio padrão do ruído do sinal monitorado, que é igual ao desvio padrão dos coeficientes *wavelet* antes da falta. Ao definir este limiar, o procedimento de detecção de transitórios torna-se adaptável aos níveis de ruído do sistema, garantindo uma detecção confiável e precisa dos transitórios mesmo quando as OV's induzidas por faltas e lançadas na LTH monitorada apresentam atenuação relevante. Na Figura 2.13(a), ilustra-se um sinal simulado de corrente com a presença de ruído eletromagnético durante um registro de falta para exemplificar a estimativa dos coeficientes e do limiar auto adaptativo. Observa-se que a estimativa dos coeficientes \tilde{w} , conforme ilustrado na Figura 2.13(b), possui baixa amplitude durante todo o registro que antecede a falta. O limiar 5σ calculado permanece superior às amplitudes dos coeficientes até que transitórios sejam lançados no sinal provenientes da incidência da falta. Após o início da falta, os valores dos coeficientes superam o valor do limiar autoadaptativo calculado, resultando na identificação da chegada da primeira frente de onda. Deve ser salientado que apesar da técnica RT-BSWT ter sido adotada nesse trabalho, a formulação proposta para localização de faltas é desenvolvida de forma independente, de modo que o algoritmo proposto poderia ser embarcado em equipamentos existentes, desde que a detecção precisa das primeiras OV's seja garantida.

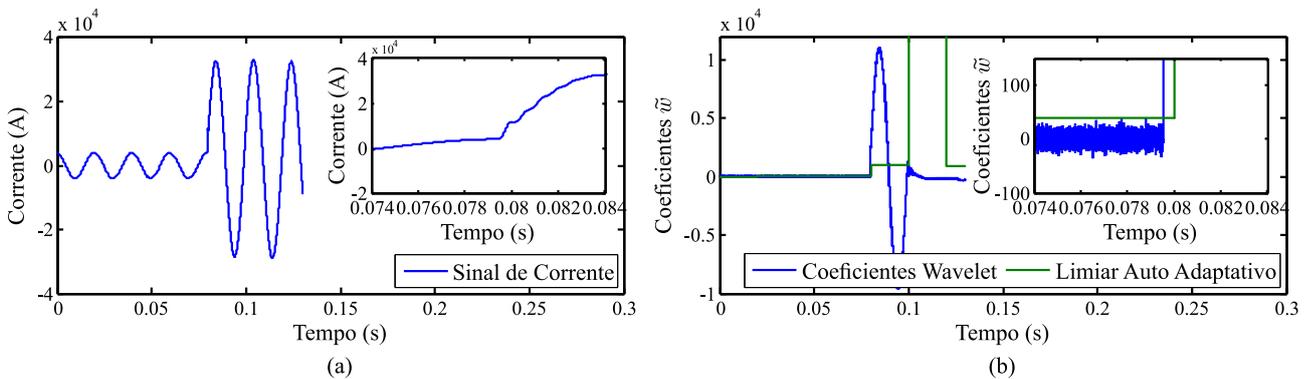


Figura 2.13. Aplicação da transformada *wavelet* estacionária com efeito de borda em tempo real (RT-BSWT): a) sinal de corrente na fase com falta; e b) análise do limiar de detecção e dos coeficientes *wavelet*.

2.4.6 Identificação de OV's

Após a etapa de extração das OV's, é necessário identificar corretamente as ondas de interesse para os mais diversos algoritmos de localização de falta existentes. Sabe-se que os sinais elétricos

medidos estão sujeitos à presença de ruídos, o que pode dificultar a correta identificação dessas ondas. Percebe-se então que, em regime permanente, quando da presença de ruído nos sinais de entrada, as saídas dos filtros de extração de OV's podem apresentar variações que impõem desafios no processo de identificação das OV's originadas no ponto de falta. Assim sendo, deve haver um procedimento de limiarização tal que possibilite determinar corretamente os instantes de chegada dessas ondas, o qual é denominado processo de identificação das OV's de interesse, se destacando como uma etapa crucial para algoritmos de localização de faltas por OV's.

Inúmeras são as metodologias para identificação dessas OV's, a exemplo de: *hard thresholding* (Santoso *et al.*, 1997), limiares adaptativos baseados em estimadores de ruído (SEL-T400L INSTRUCTION MANUAL, 2017), limiares adaptativos baseados em desvio padrão (Costa, 2014; Silva *et al.*, 2019) e limiares adaptativos baseados no cálculo de energias (Lopes *et al.*, 2013; Lopes *et al.*, 2014). Adicionalmente, outro importante mecanismo para identificação de OV's refletidas é o conceito associado às janelas de buscas, as quais devem ser centradas em torno de um região previamente definida a partir de pré-localizações obtidas por meio de funções baseadas na análise de componentes fundamentais, delimitando a região de busca, o que tende a reduzir os desafios relacionados à busca das OV's refletidas (Lopes *et al.*, 2018). Tal metodologia é de suma importância para os algoritmos de localização de faltas por um terminal baseados na teoria de OV's.

Parte significativa dos localizadores de falta existentes utilizam mecanismos de detecção de OV's baseados na metodologia do *Hard Thresholding*, na qual as amostras do sinal utilizado para detectar a chegada da ondas são descartadas quando suas magnitudes são menores que um limiar fixo pré-determinado (Santoso *et al.*, 1997). Dependendo dos ajustes empregados, técnicas como essa podem ser muito sensíveis ao ruído presente nos sinais medidos, podendo comprometer a confiabilidade do processo de detecção de transitórios, principalmente quando considerados localizadores de falta baseados em OV's. Por outro lado, se mal ajustado, o processo de limiarização pode também provocar um atraso no instante de detecção das primeiras OV's incidentes no terminal da LT monitorada, o que afeta diretamente a precisão de métodos de localização de faltas via OV's (Saha *et al.*, 2010). Por fim, embora alguns dispositivos utilizem o presente mecanismo de filtragem, é importante destacar o desafio associado ao ajuste dos limiares mais apropriados para a correta identificação dos distúrbios de interesse.

Alguns registradores de perturbação, relés de proteção e localizadores de falta mais modernos têm utilizado limiares adaptativos para identificar corretamente o instante de chegada das primeiras ondas incidentes no terminal da linha monitorada, a exemplo do relé SEL-T400L (SEL-T400L INSTRUCTION MANUAL, 2017). Com o intuito de aumentar a confiabilidade e a precisão do método de detecção de distúrbios, estimadores de ruídos têm sido introduzidos. O método consiste em basicamente comparar a soma dos módulos das ondas viajantes das três fases do sistema de aquisição do dispositivo com a saída de um estimador de ruído responsável por monitorar os níveis de ruído e, por consequência, estabelecer um limiar adaptativo para a presente comparação, aumentando a confiabilidade e precisão do método (SEL-T400L INSTRUCTION MANUAL, 2017).

Outro mecanismo que tem se mostrado confiável para identificação das primeiras OV's incidentes é o reportado por Lopes *et al.* (2013). Sabe-se que variações rápidas na energia de transitórios ξ_{dif} , conforme apresentado em (2.7), ocorrem tão logo os transitórios eletromagnéticos que se propagam sob a forma de OV's alcançam o terminal monitorado da LT. Assim sendo, com o intuito de distinguir variações em ξ_{dif} ocorridas em regime permanente daquelas referentes aos curto-circuitos, um limiar adaptativo baseado no cálculo de energias foi proposto (Lopes *et al.*, 2013; Lopes *et al.*, 2014). Esse limiar adaptativo é denominado Fator de Sensibilidade de Energia (FSE) e é dado pela razão entre os valores máximo e mínimo globais de ξ_{dif} obtidos em uma janela de dados móvel aplicada ao ciclo anterior à presente amostra (Lopes *et al.*, 2014). A detecção do distúrbio, ou seja, das primeiras OV's que incidem no terminal da LT é realizada a partir de outra janela móvel Δk_{det} , cujo comprimento é menor do que a janela de ajuste do FSE, carregada com as amostras de ξ_{dif} . Em seguida, a razão $\Delta\xi$ entre a primeira e a última amostras de Δk_{det} é comparada com FSE considerando ainda uma margem de segurança η_{SM} , responsável por tornar o algoritmo mais ou menos sensível às variações na energia calculada (Lopes *et al.*, 2014). Dessa forma, para uma dada k -ésima amostra, a identificação do distúrbio ocorre se:

$$\Delta\xi(k) > FSE(k) \cdot \eta_{SM} , \quad (2.9)$$

sendo:

$$\Delta\xi(k) = \frac{\xi_{dif}(k)}{\xi_{dif}(k - \Delta k_{det} + 1)} , \quad (2.10)$$

caso contrário, assume-se que o sistema se encontra em regime permanente.

Adicionalmente, conforme mencionado anteriormente, limiares adaptativos baseados no desvio padrão dos coeficientes *wavelet* antes da falta podem ser também definidos. Este último será o método de limiarização utilizado neste trabalho com o objetivo de minimizar os efeitos do ruído no sistema e tornar o método de detecção preciso e eficiente para casos de transitórios atenuados.

2.5 LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

A localização de faltas é um processo destinado para estimar com maior precisão possível o local onde ocorreu uma falta no sistema monitorado. Este processo é realizado por um localizador de falta que tem como base algoritmos capazes de estimar a distância da falta. Este localizador tem sido comumente incorporado em relés de proteção microprocessados, mas também pode ser encontrado em registradores digitais de falta, dispositivos dedicados para localização de falta e em programas para análise pós-falta de registros oscilográficos (Saha *et al.*, 2010).

Sabe-se que as faltas em sistemas de transmissão e distribuição de energia podem ser classificadas como sendo temporárias ou permanentes. Em casos de faltas temporárias, que são as dominantes em linhas aéreas, o sistema é rapidamente restabelecido, e a continuidade do serviço é garantida sem muitos prejuízos. No entanto, em casos de faltas permanentes, que são as mais comuns em linhas que utilizam cabos isolados, os equipamentos de proteção isolam parte do trecho com defeito, fazendo com que parte do sistema tenha seu fornecimento cessado ou fazendo com que outras linhas operem em sobrecarga naquele período de tempo. Neste momento torna-se importante o conhecimento do local exato do defeito a fim de que a equipe de manutenção consiga realizar o reparo no menor tempo possível e assim evitar problemas ainda maiores. De fato, o desconhecimento do local do defeito requer a inspeção completa da linha com defeito, fazendo com que o sistema opere em condições adversas (como por exemplo próximo a limites de estabilidade), podendo até resultar em *blackouts* nos piores cenários (Saha *et al.*, 2010).

Os procedimentos de localização de faltas mais primitivos são realizados por inspeção visual com patrulhas terrestres ou equipadas com diferentes meios de transporte ou visualização, a

exemplo de helicópteros e drones. Tais métodos são considerados demorados e dispendiosos (Stringfield *et al.*, 1957), sendo indicados apenas para a busca final em campo de um defeito já identificado. A utilização de indicadores de falta em subestações, em postes ou em torres ao longo da linha, em conjunto ou não com algum canal de comunicação entre esses localizadores, é também um sistema possível para auxiliar procedimentos de campo para localização do defeito em uma LT (Tang *et al.*, 2000). Outras técnicas ainda podem ser encontradas na literatura como, por exemplo, técnicas baseadas na radiação emitida no momento da abertura do arco elétrico, as quais ainda são consideradas não convencionais (Saha *et al.*, 2010).

Dentre os procedimentos de estimação do local da falta considerados convencionais, destacam-se os baseados em algoritmos que processam informações contidas nos valores instantâneos de tensão e corrente medidas nos terminais do sistema monitorado. Esses algoritmos convencionais podem ainda ser classificados como (Saha *et al.*, 2010):

- Técnicas baseadas na análise dos fasores fundamentais de corrente e tensão;
- Técnicas baseadas na análise de OV's;
- Técnicas baseadas no espectro de alta frequência de corrente e tensão;
- Técnicas baseadas em inteligência artificial.

Vários dispositivos localizadores de falta fazem o uso de grandezas fundamentais obtidas em um ou mais terminais de uma LT. Considera-se que esses métodos são os mais simples de serem implementados e possuem o menor custo agregado por não necessitarem de grandes taxas de amostragem e por utilizarem grandezas muitas vezes já utilizadas nas funções de proteção disponíveis em dispositivos típicos. No entanto, nos últimos anos, observa-se o crescente interesse por métodos ainda mais precisos que sejam influenciados o mínimo possível pelas características da falta e de operação do sistema no momento do distúrbio. Observa-se também que dispositivos capazes de amostrar os sinais na faixa de MHz já estão em operação nos sistemas de transmissão de energia elétrica, viabilizando assim o uso de técnicas baseadas em OV's. Essas técnicas são reconhecidamente precisas e podem ser facilmente incorporadas nesses dispositivos de proteção e/ou registradores de dados em altas frequências, sendo o uso de altas taxas de amostragem não mais um fator limitante para os fabricantes (Saha *et al.*, 2010; SEL-T400L INSTRUCTION MANUAL, 2017).

As técnicas baseadas na análise de OV's provenientes de uma falta tomam como base a detecção dos instantes de incidência das frentes de ondas nos terminais da LT, sejam essas ondas progressivas, regressivas e/ou ondas refletidas no ponto da falta ou nos terminais (Stringfield *et al.*, 1957). O diagrama de Bewley ilustrado na Figura 2.4 pode ser utilizado para melhor compreender o princípio de localização de faltas a partir da análise das OV's geradas no ponto com falta. Os métodos tradicionais de localização de faltas baseados em OV's fazem o uso da análise do diagrama de Bewley, sendo possível, a partir da decomposição das treliças do diagrama, extrair informação do local da falta com precisão (Gale *et al.*, 1993). Assim, o procedimento crucial para aplicação dos métodos baseados na teoria de OV's é a detecção dos transitórios de falta no domínio do tempo. Neste contexto, sabe-se que quão mais confiável for o valor estimado do instante de incidência das OV's de interesse nos terminais da linha, mais confiável e precisa será a estimativa do local da falta (Lopes, 2014b). No contexto desse trabalho, sabe-se que a detecção das primeiras ondas incidentes é amplamente reconhecida como procedimento de simples realização, o que favorece o caráter prático da solução proposta nessa tese.

2.6 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados os principais conceitos que norteiam os procedimentos de localização de faltas baseados na teoria de OV's. Inicialmente, explicou-se o modelo de LT considerado para que seja viável o entendimento do princípio de transitórios eletromagnéticos que se propagam na forma de OV's em LTs, ressaltando a relação entre velocidade de propagação e os parâmetros físicos e elétricos da linha. Dando continuidade, descreveu-se as faltas em linhas, a teoria de propagação das ondas induzidas na ocorrência de uma falta e como analisá-las utilizando o diagrama de Bewley. Em seguida, foram apresentados métodos capazes de extrair informações desses transitórios do sinal monitorado e como identificar esses transitórios nos instantes de chegada de OV's, dando destaque para a sensibilidade do método utilizado neste trabalho. Por fim, falou-se do conceito geral do processo de localização de faltas em LTs.

Frente ao conteúdo teórico apresentado neste capítulo, segue-se para o próximo capítulo no qual será apresentada uma revisão bibliográfica sobre métodos de localização de faltas em LTs homogêneas e em LTs não-homogêneas com dois ou mais trechos, aqui chamadas de LTHs.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Pretende-se nesta revisão bibliográfica apresentar um conteúdo teórico sobre o processo de localização de faltas baseada em OV's em LTs, viabilizando uma análise crítica sobre as metodologias existentes. Dessa forma, são apresentados os principais conceitos e formulações de métodos disponíveis na literatura, permitindo a compreensão de soluções já existentes para LTs homogêneas e não-homogêneas.

3.1 LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS HOMOGÊNEAS

Nesta seção serão apresentadas as descrições dos métodos de localização de faltas baseados em OV's aplicados em LTs homogêneas. Serão apresentados métodos de um e dois terminais, que utilizam dados sincronizados ou não. O objetivo é apresentar de forma sucinta os fundamentos dos métodos e destacar suas particularidades principalmente do ponto de vista dos princípios da metodologia proposta.

3.1.1 Método Clássico de Um terminal (Gale *et al.*, 1993)

Um dos métodos propostos por Gale *et al.* (1993) baseados na teoria de OV's utiliza dados de apenas um terminal, sendo ele o mais simples em termos de infraestrutura requerida e muitas vezes tratado na literatura como método localização clássico de um terminal baseado em OV's. Por tratar de um método de apenas um terminal, não se faz necessária a sincronização de dados e sua formulação requer apenas a detecção dos instantes t_{L1} e t_{L2} , referentes à chegada da primeira onda incidente e da OV refletida na falta, respectivamente, em apenas um terminal da LT, conforme ilustrado Figura 3.1. A estimativa do local da falta \tilde{d} deriva portanto do

equacionamento:

$$\tilde{d} = \frac{(t_{L2} - t_{L1}) \cdot v_p}{2}, \quad (3.1)$$

onde \tilde{d} é a distância estimada da falta na Barra L , e v_p é a velocidade de propagação das OVs.

Os instantes t_{L1} e t_{L2} são detectados individualmente a partir da análise das polaridades das ondas incidentes no terminal monitorado, tendo como objetivo garantir que a medição da onda refletida não seja proveniente de uma outra onda proveniente do terminal remoto ou mesmo de LTs adjacentes a montante. Assim, esse procedimento é imprescindível para garantir estimativas confiáveis do ponto de falta. Uma vez que Gale *et al.* (1993) não informam a velocidade de propagação a ser considerada, sabe-se que muitas vezes a velocidade de propagação das OVs em uma LT é aproximada para v_p igual a 98% da velocidade da luz v_c , conforme sugerido em (Zimath *et al.*, 2010). Mesmo sabendo que esta aproximação é bastante utilizada em dispositivos localizadores reais, é possível encontrar na literatura trabalhos que analisam os efeitos para os procedimentos de localização de faltas desse tipo de aproximação, de forma que, para uma aplicação adequada, deve-se saber de forma precisa a velocidade de propagação da linha analisada (Lopes, 2014b).

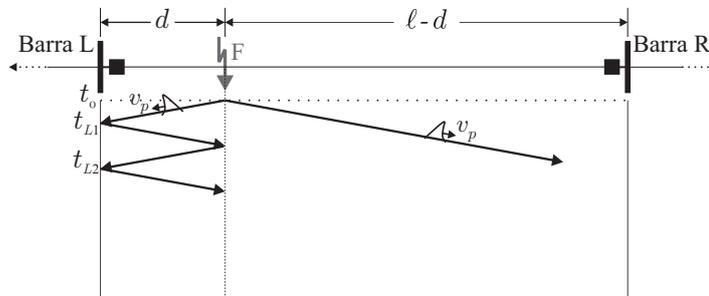


Figura 3.1. Sistema ilustrativo para aplicação do método de localização de falta com dados e um terminal proposto por Gale *et al.* (1993).

3.1.2 Método Um Terminal sem Parâmetros (Altay *et al.*, 2014)

Altay *et al.* (2014) propõem um método que utiliza dados de apenas um terminal e não necessita do conhecimento da velocidade de propagação, fator este que contribui para diminuição das fontes de erros. No entanto, para correta aplicação do método, faz-se necessário o conhecimento de instantes de detecção no terminal local de frentes de ondas refletidas no terminal oposto que incidem no terminal monitorado. Os autores ainda dividem o algoritmo

em quatro partes, sendo inicialmente dividido em faltas na primeira e na segunda metade da linha, e depois subdividido para faltas próximas aos terminais da LT conforme ilustrado na Figura 3.2.

A condição apresentada em (3.2) é utilizada para distinguir as faltas daquelas muito próximas aos terminais:

$$t_{L2} - t_{L1} \cong t_{L3} - t_{L2} . \quad (3.2)$$

Uma vez que (3.2) é satisfeita, a falta está próxima a um dos terminais, a estimativa para a falta na primeira metade da linha é dada por:

$$\tilde{d} = \frac{(t_{L2} - t_{L1}) \cdot \ell}{(t_{L2} - 2 \cdot t_{L1} + t_{ref})} , \quad (3.3)$$

onde t_{ref} é o tempo de chegada no terminal monitorado da primeira onda refletida no terminal oposto, podendo coincidir com t_{L2} ou t_{L3} , a depender do ponto de falta.

Se a condição (3.2) não for satisfeita, para faltas na primeira metade da linha, tem-se que:

$$\tilde{d} = \frac{(t_{L2} - t_{L1}) \cdot \ell}{(t_{L2} - 2 \cdot t_{L1} + t_{L3})} . \quad (3.4)$$

Para faltas na segunda metade da linha e próxima ao terminal remoto, caso a condição apresentada em (3.2) seja satisfeita, tem-se que a estimativa do local da falta é dada por:

$$\tilde{d} = \frac{(t_{ref} - t_{L1}) \cdot \ell}{(t_{L2} - 2 \cdot t_{L1} + t_{ref})} , \quad (3.5)$$

caso contrário, para faltas na segunda metade da LT em que (3.2) não é satisfeita, tem-se:

$$\tilde{d} = \frac{(t_{L3} - t_{L1}) \cdot \ell}{(t_{L2} - 2 \cdot t_{L1} + t_{L3})} . \quad (3.6)$$

Observa-se que este método é livre de parâmetros e de sincronização de dados uma vez que utiliza medições obtidas apenas em um terminal. No entanto, o algoritmo faz o uso da detecção do tempo de chegada da segunda e terceira frentes de onda referentes às ondas refletidas no terminal oposto ou da falta. Tal aplicação ainda é tratada como fator limitante uma vez que pode haver atenuação dessas ondas e dificuldade em identificar corretamente o instante de chegada da onda refletida em sistemas mais complexos ou mesmo em situações de falta franca sem conexão para o terra (Greenwood, 1991). Ressalta-se que essa metodologia foi aprimorada nos anos seguintes de sua proposição, visando facilitar o processo de detecção das OV's refletidas

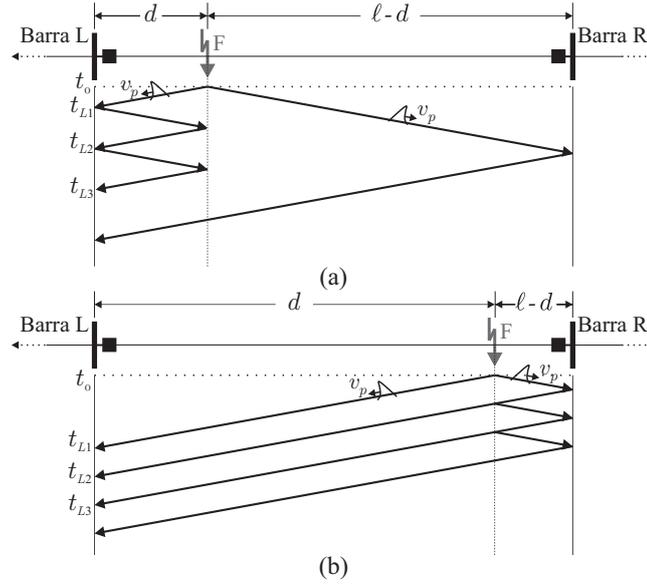


Figura 3.2. Sistema ilustrativo para aplicação do método de localização de faltas de um terminal proposto por Altay *et al.* (2014).

e refratadas de interesse (Schweitzer *et al.*, 2016b). Para tanto, considerou-se um método misto, em que pré-estimativas baseadas em métodos fasoriais foram utilizadas para viabilizar a criação de uma janela de busca centrada nos transitórios a serem identificados. Com isso, segundo os autores, tornou-se possível uma melhor robustez do método, o qual chegou a ser testado com casos reais.

3.1.3 Método Um Terminal para Faltas com Terra (Liu *et al.*, 2012)

O método proposto em (Liu *et al.*, 2012) é baseado na teoria de OV's e utiliza dados de apenas um terminal, não requerendo sincronização de dados. Sua formulação é bastante simples e requer apenas a detecção dos instantes t_{L0} e t_{L1} referentes à chegada das primeiras OV's dos modos terra e aéreo, respectivamente, na Barra L induzidas pelo distúrbio no terminal da LT monitorado, conforme ilustrado na Figura 3.3. Sabe-se que apenas faltas com terra induzem OV's de modo terra e, dessa forma, o método só pode ser utilizado para essa classe de faltas. Uma vez detectados os instantes de chegada das ondas, tem-se a estimativa da distância da falta usando:

$$\tilde{d} = \frac{v_{p1} \cdot v_{p0}}{v_{p1} - v_{p0}} \cdot (t_{L0} - t_{L1}) , \quad (3.7)$$

onde \tilde{d} é a distância de falta estimada a partir da Barra L em km, v_{p0} e v_{p1} são as velocidades de propagação das ondas dos modos terra e aéreo, respectivamente, e t_{L0} e t_{L1} são os instantes referentes à chegada na Barra L das primeiras OV's dos modos terra e aéreo, respectivamente.

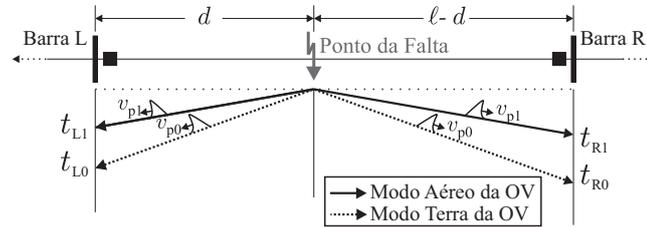


Figura 3.3. Sistema ilustrativo para aplicação do método de localização de falta de um terminal proposto por Liu *et al.* (2012).

Cabe ressaltar que, apesar de fácil aplicação, em sistemas reais, é comum a existência de incertezas especialmente nos parâmetros de sequência zero, aplicados no cálculo dos dados de modo terra. Assim, para sistemas de maiores dimensões, estimar apropriadamente a velocidade de propagação de modo terra pode se tornar uma dificuldade do método.

3.1.4 Método Clássico de Dois Terminais (Gale *et al.*, 1993)

O método proposto em (Gale *et al.*, 1993) é baseado na teoria de OV's e utiliza dados sincronizados de dois terminais. Sua formulação é bastante simples e requer apenas a detecção dos instantes t_{L1} e t_{R1} referentes à chegada das primeiras ondas induzidas pelo distúrbio nos terminais local e remoto da LT, respectivamente, conforme demonstrado na Figura 3.4. Assim, a distância de falta é estimada por:

$$\tilde{d} = \frac{\ell - (t_{R1} - t_{L1}) \cdot v_p}{2}, \quad (3.8)$$

onde \tilde{d} é a distância de falta estimada no sentido da Barra L para a Barra R em km, ℓ é o comprimento da LT, e v_p é a velocidade de propagação das OV's. Neste método, os instantes t_{L1} e t_{R1} são relacionados no cálculo da localização da falta, de forma que a sincronização de dados é imprescindível para garantir estimativas confiáveis.

O método apresentado por Gale *et al.* (1993) é comumente chamado de método clássico de dois terminais por ter sido historicamente o mais empregado em sistemas reais, bem como devido à sua simplicidade e aplicabilidade quando se tem conhecimento dos dados sincronizados

de ambos os terminais da LT. Adicionalmente, é um algoritmo que não requer a detecção de OV's ondas refletidas, procedimento este de reconhecida dificuldade devido a diversos fatores como a atenuação dos transitórios, características da falta, linhas adjacentes, influência das terminações, entre outros (Saha *et al.*, 2010). Muitas soluções encontradas na literatura utilizam de seu princípio, no entanto, como todos os métodos apresentados nesta seção, trata-se de um método aplicável apenas em LT's homogêneas e, portanto, o mesmo apresenta erros se aplicado para o cálculo de estimativas do ponto de falta em LTHs.

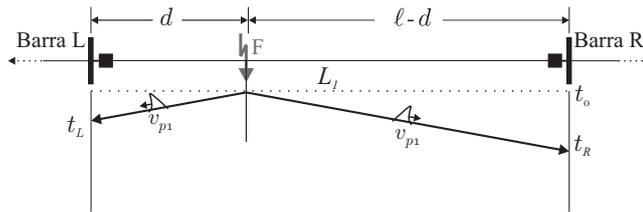


Figura 3.4. Sistema ilustrativo para aplicação do método de localização de falta de dois terminais proposto por Gale *et al.* (1993).

3.1.5 Método de Dois Terminais com Ondas Refletidas (Gilany *et al.*, 2007)

O método proposto em (Gilany *et al.*, 2007) é baseado na teoria de OV's e utiliza dados sincronizados de dois terminais. Sua formulação requer inicialmente a detecção dos instantes t_{L1} e t_{R1} referentes à chegada das primeiras OV's nos terminais local e remoto, respectivamente, conforme demonstrado na Figura 2.1. Adicionalmente, a formulação também necessita de uma terceira medição t_{L2} no terminal monitorado, sendo a forma de processamento dessa detecção dependente da região na LT onde ocorre a falta. De forma geral, a localização da falta é calculada por:

$$\tilde{d} = \ell \cdot \frac{(1/2)}{1 + (t_{d2}/t_{d1})}, \quad (3.9)$$

onde \tilde{d} é a distância de falta estimada em km relativa a falta que ocorreu a uma distância real d . As variáveis t_{d2} e t_{d1} são diferenças de tempo calculadas de acordo com a região da linha onde ocorreu o distúrbio. Para faltas incidentes na primeira metade da linha ($\tilde{d} < \ell/2$), tem-se que a medição t_{L2} é referente à onda refletida no ponto de falta. Logo, as variáveis t_{d2} e t_{d1} são obtidas conforme:

$$t_{d1} = t_{L2} - t_{L1}, \quad (3.10)$$

$$t_{d2} = t_{L1} - t_{R1}. \quad (3.11)$$

Para faltas na segunda metade da LT monitorada ($\tilde{d} > \ell/2$), tem-se que a medição obtida no terminal L para t_{L2} é referente à onda refletida no terminal remoto. Logo, as variáveis t_{d2} e t_{d1} são obtidas conforme:

$$t_{d1} = t_{L2} - t_{L1}, \quad (3.12)$$

$$t_{d2} = t_{R1} - t_{L1}. \quad (3.13)$$

Neste método, os instantes t_{L1} e t_{R1} são detectados individualmente, porém são correlacionados durante o cálculo do local da falta, fazendo necessária a sincronização de dados para garantir estimativas confiáveis. Observa-se no entanto que esse método não necessita do conhecimento da velocidade de propagação da linha v_p , tornando-o mais robusto em casos de aplicações nas quais os parâmetros da linha não são conhecidos com precisão.

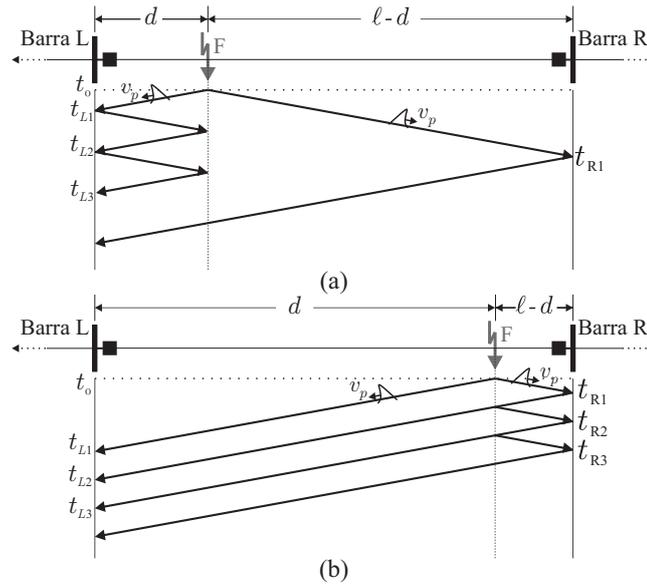


Figura 3.5. Sistema ilustrativo para aplicação do método de localização de falta de dois terminais proposto por Gilany *et al.* (2007).

3.1.6 Método de Dois Terminais Utilizando a Latência do Canal de Comunicação (Lopes *et al.*, 2015)

O método proposto por Lopes *et al.* (2015) é baseado na teoria de OV's e tem como principal contribuição a não necessidade de sincronismo de dados entre os dois terminais monitorados,

mantendo a necessidade de detecção apenas das primeiras OV's incidentes. Sua formulação é bastante simples e tem como base os princípios do método clássico de dois terminais apresentado em (Gale *et al.*, 1993). A aplicação desse método requer o conhecimento da latência do canal de comunicação e da velocidade de propagação da linha v_p . Uma das vantagens desse método é não necessitar da detecção das OV's refletidas, tarefa esta reportada na literatura como um limitador devido a possíveis atenuações e a eventuais dificuldades de identificar a OV em sistemas mais complexos (Saha *et al.*, 2010). Dessa forma, a partir da medição dos instantes t_{L1} e t_{R1} referentes à chegada das primeiras OV's induzidas pelo distúrbio nos terminais local e remoto da LT, respectivamente (ver Figura 2.1), a distância de falta pode ser estimada por:

$$\tilde{d} = \frac{\ell - (\tau_L - \delta_{RL}) \cdot v_p}{2}, \quad (3.14)$$

onde \tilde{d} é a distância de falta estimada em km, τ_L é o módulo da diferença entre os tempos de chegada das primeiras OV's em cada terminal ($\tau_L = |t_{L1} - t_{R1}|$), sendo esta diferença calculada em tempo real, δ_{RL} é a latência do canal de comunicação saindo da Barra R para a Barra L, ℓ é o comprimento da LT, e v_p é a velocidade de propagação das OV's.

Neste método, os instantes t_{L1} e t_{R1} são detectados individualmente. No entanto, a sincronização de dados não é necessária, tendo em vista que se considera a determinação do período entre a incidência das OV's ao invés do cálculo da diferença entre as estampas de tempo individuais. Com isso, ao compensar a latência do canal de comunicação, viabiliza-se o cálculo correto da localização da falta, desde que a medição do período τ_L seja realizada em tempo real.

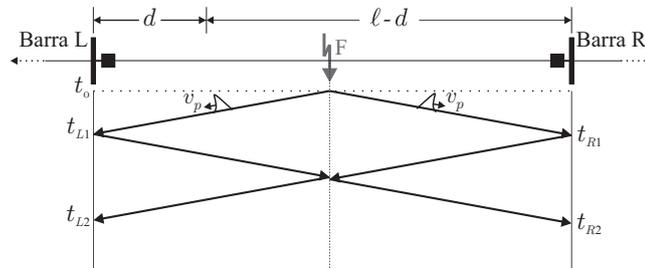


Figura 3.6. Sistema ilustrativo para aplicação do método de localização de falta de dois terminais proposto por Lopes *et al.* (2015).

3.1.7 Método de Dois Terminais para Faltas com Terra (Lopes, 2016)

O método proposto por Lopes (2016) tem como principal contribuição a não necessidade de sincronismo de dados e sua independência dos parâmetros da linha. Sua formulação é simples e requer apenas a detecção dos instantes t_{L0} , t_{L1} , t_{R0} e t_{R1} referentes à chegada das primeiras OV's dos modos terra e aéreo nas barras L e R, respectivamente, induzidas pelo distúrbio. Por utilizar medições do modo terra, esse método só pode ser empregado para faltas com conexão para o terra, mas não necessitando de informações sobre as velocidades de propagação dos modos aéreo e terra, que muitas vezes apresentam imprecisões.

Uma das vantagens desse método é que o mesmo não necessita da detecção das OV's refletidas. Dessa forma, a partir da medição dos instantes referentes à chegada das primeiras OV's de modo terra e modo aéreo nos terminais local e remoto (ver Figura 3.7), tem-se que a localização estimada da falta pode ser calculada por:

$$\tilde{d} = \frac{t_{L0} - t_{L1}}{(t_{L0} - t_{L1}) + (t_{R0} - t_{R1})}, \quad (3.15)$$

onde \tilde{d} é a distância de falta estimada em p.u..

Neste método, os instantes t_{L0} , t_{R0} , t_{L1} e t_{R1} são detectados individualmente em cada terminal, não sendo correlacionadas estampas de tempo de pontos distintos do sistema. Com isso, elimina-se a necessidade de uma referência de tempo em comum, de modo que a sincronização de dados deixa de ser mandatória.

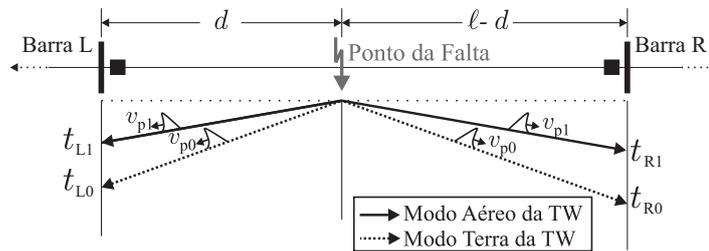


Figura 3.7. Sistema ilustrativo utilizado.

Apesar do método não depender de ajustes, para tanto, considera-se que as velocidades de propagação de modo terra são iguais nos trechos a montante e a jusante do ponto da falta. No entanto, uma vez que as variações da velocidade de propagação se mostram mais proeminentes para o modo terra, tal premissa pode não ser verdadeira para LTs mais longas, o que incorre

em erros adicionais no método descrito.

3.1.8 Método de Dois Terminais para Faltas com Ondas Refletidas (Lopes *et al.*, 2018)

Em (Lopes *et al.*, 2018) os autores apresentam um método inovador no qual não é necessário o conhecimento dos parâmetros da linha nem de sincronização de dados, embora seja um método que utiliza dados do dois terminais da LT monitorada. Este método depende do conhecimento das diferenças de tempo da primeira onda incidente e da primeira reflexão vinda do ponto de falta em cada terminal da LT. Matematicamente, a distância de falta é obtida utilizando:

$$\tilde{d} = \frac{t_{L2} - t_{L1}}{(t_{L2} - t_{L1}) + (t_{R2} - t_{R1})}, \quad (3.16)$$

onde \tilde{d} é a localização estimada da falta que ocorreu numa distância real d em p.u., t_{L1} , t_{L2} , t_{R1} e t_{R2} , são os instantes de tempo de chegada da primeira OV incidente e da primeira OV refletida no ponto de falta nos terminais L e R, respectivamente. O diagrama de Bewley ilustrativo para aplicação do método proposto por Lopes *et al.* (2018) é apresentado na Figura 3.8.

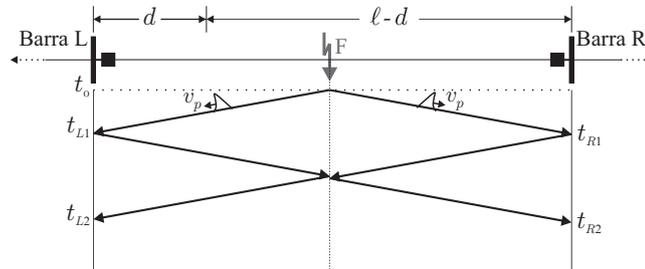


Figura 3.8. Sistema ilustrativo para aplicação do método de localização de falta de dois terminais proposto por Lopes *et al.* (2018).

3.2 LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS NÃO-HOMOGÊNEAS (LTHs)

Nesta seção serão descritos métodos de localização de faltas baseados em OVs aplicados em linhas não-homogêneas, aqui denominadas LTHs. Serão apresentados os métodos encontrados na literatura para dois ou mais terminais e aplicados em LTHs que operam em corrente alternada (CA) e corrente contínua (CC), de dois ou mais trechos. O objetivo é apresentar de forma clara

e concisa os fundamentos dos métodos e destacar suas particularidades principalmente do ponto de vista dos princípios de cada metodologia.

3.2.1 Métodos de Localização Baseados em Dados de Dois Terminais para LTHs com Dois Trechos

Na literatura aberta, tem-se conhecimento de vários trabalhos que apresentam os fundamentos para LTHs de dois trechos com características elétricas distintas entre si, como é o caso dos propostos por Jensen (2014), Pires *et al.* (2016), Hassan *et al.* (2016), Leite Jr. & Lopes (2017), Leite Jr. *et al.* (2018), Altay *et al.* (2016), entre outros. Embora em alguns desses trabalhos a aplicação tenha pequenas modificações de uma referência para outra, eles possuem em comum um mesmo fundamento para cálculo do local da falta.

Para entendimento da metodologia, ilustra-se na Figura 3.9 uma LTH de dois trechos com comprimentos L_1 e L_2 e com velocidades de propagação $v_{p,1}$ e $v_{p,2}$, sendo no exemplo $v_{p,1} > v_{p,2}$. Na Figura 3.9 (a) tem-se um caso de falta no primeiro trecho da linha. Observa-se que, devido à mudança de meio, o tempo de detecção da onda no terminal remoto t_{R1}^* esperado para o caso de linha homogênea com velocidade de propagação $v_{p,1}$ uniforme encontra-se deslocado no tempo de um desvio $\Delta\varepsilon_{R1 \rightarrow 2}$, de modo que $t_{R1} = t_{R1}^* + \Delta\varepsilon_{R1 \rightarrow 2}$, onde t_{R1} é o instante de fato detectado.

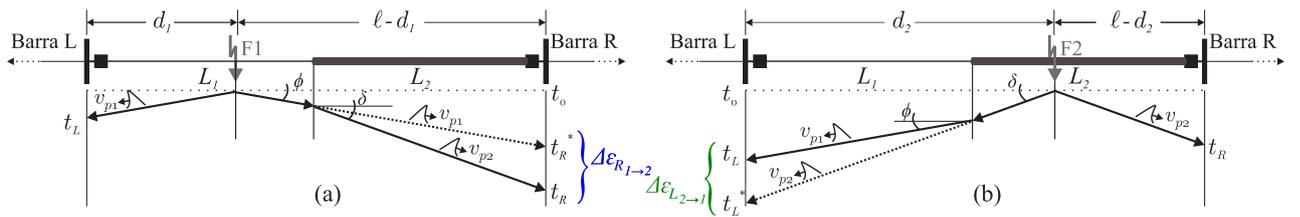


Figura 3.9. Diagrama ilustrativo para procedimento de localização de faltas em uma LTH de dois trechos.

Aplicando o equacionamento apresentado na Seção 3.1.4, tem-se que a localização estimada da falta é dada por:

$$\tilde{d} = \frac{\ell - (t_{R1}^* - t_{L1}) \cdot v_{p,1}}{2} . \quad (3.17)$$

Deve-se notar que o tempo de chegada teórico t_{R1}^* para LT homogênea não é conhecido. De fato, esse instante apresenta um erro $\Delta\varepsilon_{R1 \rightarrow 2}$ com relação ao instante em que realmente ocorre

a incidência da primeira OV. Por análise de triângulos, porém, é possível determinar o valor desse erro a partir do diagrama de Bewley apresentado na Figura 3.9 (a). Sendo assim, tem-se que:

$$t_{R1} - t_{R1}^* = \frac{L_2}{v_{p,2}} - \frac{L_2}{v_{p,1}}. \quad (3.18)$$

Portanto, o erro decorrente da não-homogeneidade da LT pode ser calculado como:

$$\Delta\varepsilon_{R1 \rightarrow 2} = \frac{L_2 \cdot (v_{p,1} - v_{p,2})}{v_{p,1} \cdot v_{p,2}}, \quad (3.19)$$

de modo que para uma linha homogênea esse erro é nulo.

Substituindo $t_{R1} = t_{R1}^* + \Delta\varepsilon_{R1 \rightarrow 2}$ em (3.17), tem-se em (3.20) a estimativa do local da falta considerando que esta tenha ocorrido no primeiro trecho da LTH.

$$\tilde{d} = \frac{L_2 + \alpha \cdot L_1 - \alpha \cdot \Delta T \cdot v_{p,1}}{2 \cdot \alpha}, \quad (3.20)$$

onde $\alpha = v_{p,2}/v_{p,1}$ e $\Delta T = t_{R,1} - t_{L,1}$.

Para falta no segundo trecho da LTH, conforme ilustrado na Figura 3.9 (b), tem-se que o fator de desvio é observado no terminal local. Sendo assim, o valor do tempo teórico esperado $t_{L1}^* = t_{L1} + \Delta\varepsilon_{L2 \rightarrow 1}$ pode ser calculado de forma similar ao desenvolvimento apresentado em (3.19), onde $\Delta\varepsilon_{L2 \rightarrow 1}$ é dado por:

$$\Delta\varepsilon_{L2 \rightarrow 1} = \frac{L_1 \cdot (v_{p,1} - v_{p,2})}{v_{p,1} \cdot v_{p,2}}. \quad (3.21)$$

A aplicação do método de localização tradicional apresentada em (3.8) para essa segunda condição resulta em:

$$\tilde{d} = \frac{\ell - (t_{R1} - t_{L1}^*) \cdot v_{p,1}}{2} = \frac{\ell - (t_{R1} - t_{L1} - \Delta\varepsilon_{L2 \rightarrow 1}) \cdot v_{p,1}}{2}. \quad (3.22)$$

Substituindo (3.21) em (3.22), obtém-se a estimativa do local da falta para casos de ocorrência no primeiro trecho da linha apresentada em (3.23).

$$\tilde{d} = \frac{L_2 + (2 - \alpha) - \alpha \cdot \Delta T \cdot v_{p,1}}{2}. \quad (3.23)$$

Nota-se que nessa metodologia, faz-se necessário o conhecimento do trecho com falta para a escolha da estimativa correta. Alguns autores propõem a determinação dos trechos pela análise

das estimativas de localização aplicando (3.20) e (3.23). No entanto, neste trabalho, optou-se por desenvolver uma metodologia, a qual será descrita posteriormente.

O fundamento da metodologia apresentada neste trabalho se baseia na análise dos valores de $\Delta T = t_R - t_L$ medidos. Dessa forma, sabe-se o valor medido de ΔT terá valor aproximadamente igual à diferença entre os tempos $\tau_2 - \tau_1$, sendo τ_1 e τ_2 os tempos de trânsito da onda para percorrer os trechos 1 e 2, respectivamente. Tomando como referência esta informação, tem-se que, para faltas no primeiro trecho, a condição:

$$\Delta T \geq \tau_2 - \tau_1 \quad (3.24)$$

deve ser satisfeita, caso contrário:

$$\Delta T < \tau_2 - \tau_1, \quad (3.25)$$

indicando a ocorrência de uma falta no segundo trecho da LTH.

A formulação apresentada para este método é capaz de localizar de forma exata o ponto de falta em LTHs de até dois trechos. Entretanto, para aplicações mais complexas como no caso de LTHs com múltiplos trechos, esta metodologia apresenta fatores limitantes que inviabilizam sua aplicação.

3.2.2 Método de Localização para LTH de Dois Terminais com n Trechos (Kasztenny *et al.*, 2018)

Na subseção anterior foram apresentados os fundamentos básicos para localização de falta em LTH de dois terminais com dois trechos. No entanto, sabe-se que na prática é possível encontrar algumas LTHs com mais de dois trechos, inviabilizando a aplicação abordada anteriormente. Dessa forma alguns autores propõem aplicações mais generalistas capazes de estimar o local da falta com precisão como, por exemplo, os métodos propostos por Kasztenny *et al.* (2018) e Nanayakkara *et al.* (2012).

O método proposto por Kasztenny *et al.* (2018) descreve uma metodologia para cálculo do local da falta em LTH considerando três passos básicos. Essa metodologia faz o uso de uma análise gráfica apresentada na Figura 3.10, onde são construídas duas retas: uma referente à característica não-homogênea da LTH e outra representando uma aproximação da LTH como

sendo uma linha homogênea equivalente. Primeiramente, considera-se a LTH como sendo uma linha homogênea com tempo de propagação $\tau_{med} = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3$. Uma vez que a linha é considerada homogênea, utiliza-se então o equacionamento tradicional de localização de faltas de dois terminais, conforme apresentado em (3.8). Assim, obtém-se uma estimativa prévia do local da falta \tilde{d}^* :

$$\tilde{d}^* = \frac{\ell - (t_{R1} - t_{L1}) \cdot v_{pmed}}{2}, \quad (3.26)$$

onde $\ell = L_1 + L_2 + L_3$, e:

$$v_{pmed} = \frac{\ell}{\tau_{med}}. \quad (3.27)$$

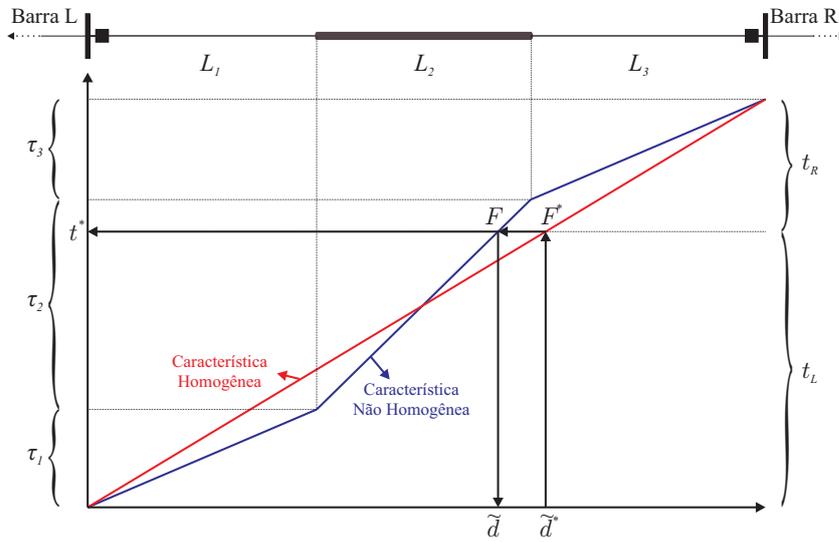


Figura 3.10. Sistema ilustrativo para aplicação do método de localização de falta para LTHs proposto por Kasztenny *et al.* (2018).

A estimativa \tilde{d}^* não é precisa, uma vez que a linha foi aproximada por uma linha homogênea equivalente. Porém, sabe-se que a diferença de tempo $t_{R1} - t_{L1}$ também é válida para a localização real \tilde{d} , conforme pode ser visualizado na Figura 3.10. Portanto, para fazer a projeção F do ponto F^* referente à localização prévia estimada \tilde{d}^* , calcula-se um tempo de referência t^* conforme:

$$t^* = \tilde{d}^* \cdot \frac{\tau_{med}}{\ell}. \quad (3.28)$$

Uma vez calculado esse tempo de referência, consideram-se as diferentes velocidades de propagação da onda em cada trecho para o cálculo da estimativa do local da falta conforme pode ser visualizado graficamente na Figura 3.10. Observa-se que trata-se de um algoritmo que faz o uso de uma representação gráfica similar ao diagrama de Bewley para o procedimento

de localização de falta e que requer uma estimativa prévia. Sua metodologia gráfica pode ser expandida para qualquer número de trechos da LTH aumentando apenas a complexidade da construção da reta de característica não-homogênea da linha. No entanto, os autores não apresentam uma fórmula fechada que se adapte automaticamente às condições de propagação das OV's em LTHs de múltiplos trechos, fazendo-se crucial a análise gráfica das características de propagação.

3.2.3 Método de Localização em HVDC Não-Homogênea de Dois Terminais com n Trechos (Nanayakkara *et al.*, 2012)

O trabalho apresentado por Nanayakkara *et al.* (2012) apresenta uma análise para linhas de alta tensão em corrente contínua, do inglês, *high-voltage direct current* (HVDC), cujos princípios podem ser adaptados para linhas CA. Utilizando uma LTH de três trechos, conforme ilustrada na Figura 3.11, os autores apresentam a metodologia proposta para localização considerando cada trecho sendo analisado individualmente. Primeiramente, calculam-se distâncias de faltas parciais em cada trecho da LT, resultando nas estimativas: \tilde{d}_{F1} referente à distância da falta no ponto $F1$ até o início do trecho 1; \tilde{d}_{F2} referente à distância da falta no ponto $F2$ até o início do trecho 2, e \tilde{d}_{F3} referente à distância da falta no ponto $F3$ até o início do trecho 3. Sendo assim, considerando a ocorrência de uma falta no trecho 1 (ver Figura 3.11 (a)), pode-se calcular o instante de chegada da primeira frente de OV's no terminal L t_L e o instante de chegada da primeira frente de OV's no terminal R t_R da LTH conforme:

$$t_L = \frac{\tilde{d}_{F1}}{v_{p,1}} , \quad (3.29)$$

$$t_R = \frac{L_1 - \tilde{d}_{F1}}{v_{p,1}} + \frac{L_2}{v_{p,2}} + \frac{L_3}{v_{p,3}} , \quad (3.30)$$

onde $v_{p,1}$, $v_{p,2}$ e $v_{p,3}$ são as velocidades de propagação das ondas nos trechos 1, 2 e 3, respectivamente.

Por fim, a diferença de tempo ΔT_{F1} entre os instantes de chegada dessas OV's em cada terminal é obtida usando:

$$\Delta T_{F1} = t_L - t_R = \frac{2 \cdot \tilde{d}_{F1}}{v_{p,1}} - \frac{L_1}{v_{p,1}} - \frac{L_2}{v_{p,2}} - \frac{L_3}{v_{p,3}} . \quad (3.31)$$

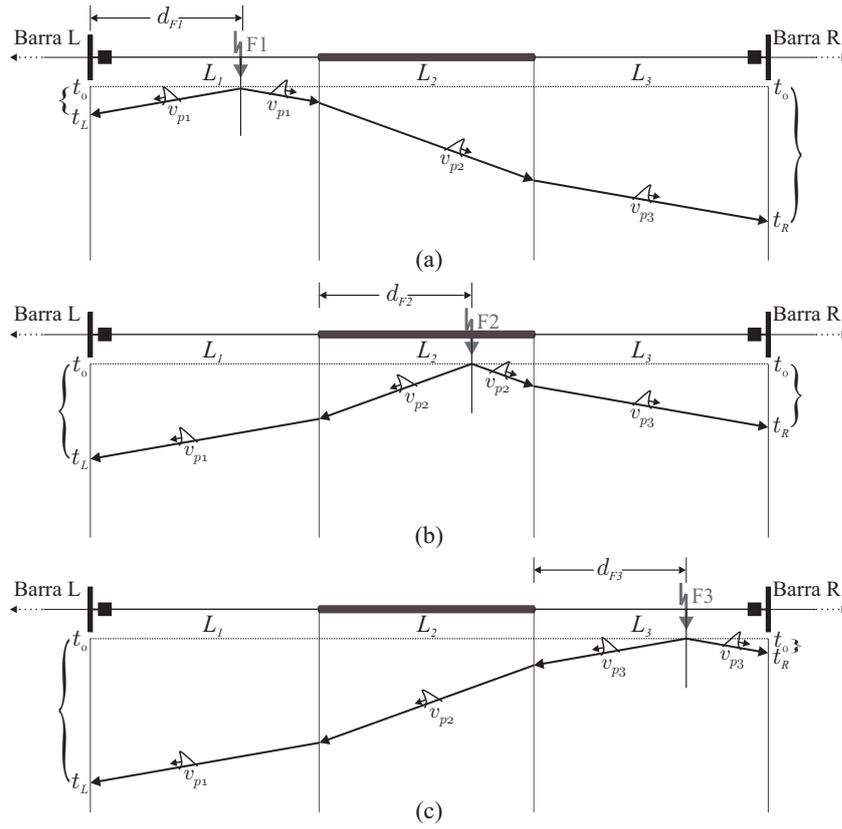


Figura 3.11. Diagrama ilustrativo para procedimento de localização de faltas em uma LTH de três trechos proposto por Nanayakkara *et al.* (2012).

Nesse cenário, estando a falta no trecho 1, pode-se então obter o valor do local do defeito \tilde{d}_{F1} conforme:

$$\tilde{d}_{F1} = \left(\Delta T_{F1} + \frac{L_1}{v_{p,1}} + \frac{L_2}{v_{p,2}} + \frac{L_3}{v_{p,3}} \right) \cdot \frac{v_{p,1}}{2}. \quad (3.32)$$

De forma similar, pode-se obter a estimativa do local de falta considerando os outros dois pontos de falta $F2$ e $F3$ referentes ao início de cada trecho com falta. No entanto, dada uma ocorrência de falta em uma LTH, não se sabe previamente qual o trecho com falta. Dessa forma, os autores apresentam uma metodologia para escolha do trecho tomando como referência o comprimento de cada seção da LTH. Sendo assim, tem-se que, se a condição $0 \leq \tilde{d}_{F1} \leq L_1$ for satisfeita, então a falta ocorreu no trecho 1 da LTH. Da mesma forma, se $0 \leq \tilde{d}_{F2} \leq L_2$, então a falta ocorreu no trecho 2, e se $0 \leq \tilde{d}_{F3} \leq L_3$ tem-se que a falta ocorreu no trecho 3. Os autores ainda demonstram para um caso pontual que a identificação do trecho com falta será satisfeita em apenas uma dessas condições apresentadas.

Embora o método possa ser expandido para uma LTH com múltiplos trechos, os autores não apresentam uma metodologia generalizada. Ainda, destaca-se que o processo de identificação do

trecho com defeito consiste majoritariamente em um processo de tentativa e erro, ocasionando um excesso de cálculos prévios das estimativas do local da falta, para que só depois seja tomada a decisão do trecho com defeito. Tal procedimento e a ausência de uma fórmula fechada tornam o algoritmo menos atrativo do ponto de vista de aplicações práticas em sistemas mais complexos.

3.3 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo, uma vasta gama de métodos de localização de faltas baseados em OV's aplicados em linhas homogêneas e não-homogêneas foi apresentada de forma resumida, destacando-se suas principais características e limitações. Observa-se que, embora existam na literatura aberta métodos capazes de localizar faltas em LTHs de múltiplos trechos, a aplicação desses métodos não é apresentada de forma generalizada e não apresenta fácil aplicação em termos de adaptabilidade aos métodos já implementados em dispositivos reais.

Assim, no próximo capítulo, será apresentada uma proposta de formulação generalizada para localização de faltas em LTHs de múltiplas seções, não utilizando a detecção de OV refletidas, capaz de identificar previamente o trecho com falta e, adicionalmente, capaz de se adequar quando na presença de incertezas nos parâmetros da linha, indicando zonas de certeza e incerteza na identificação do trechos e disponibilizando como saída campos de busca para localização do defeito em campo. Conforme ilustrado na Tabela 3.1, o método proposto nesta tese e publicado em (Leite Jr. *et al.*, 2019) contorna algumas dificuldades encontradas dos métodos avaliados na literatura.

Tabela 3.1. Resumo da revisão bibliográfica referente à localização de faltas em LT.

Referência	NTM	Requer parâm. da LT	Características gerais							
			LTH	OVR	OVZ	FG	MT	IP	CB	IPT
Gale <i>et al.</i> (1993)	1	✓	–	✓	–	–	–	–	–	–
Altay <i>et al.</i> (2014)	1	–	–	✓	–	–	–	–	–	–
Liu <i>et al.</i> (2012)	1	–	–	–	✓	–	–	–	–	–
Gale <i>et al.</i> (1993)	2	✓	–	–	–	–	–	–	–	–
Gilany <i>et al.</i> (2007)	2	–	–	✓	–	–	–	–	–	–
Lopes <i>et al.</i> (2015)	2	✓	–	–	–	–	–	–	–	–
Lopes (2016)	2	–	–	–	✓	–	–	–	–	–
Lopes <i>et al.</i> (2018)	2	–	–	✓	–	–	–	–	–	–
Jensen (2014)	2	✓	✓	–	–	–	–	–	–	–
Kasztenny <i>et al.</i> (2018)	2	✓	✓	–	–	–	✓	–	–	–
Nanayakkara <i>et al.</i> (2012)	2	✓	✓	–	–	–	✓	–	–	–
Leite Jr. <i>et al.</i> (2019)	2	✓	✓	–	–	✓	✓	✓	✓	✓

Legenda:

NTM = Número de trechos monitorados;

OVR = Necessidade de detecção de OV refletida;

FG = Apresentação de formulação generalista;

IP = Contempla incertezas nos parâmetros da LT;

IPT = Identificação prévia do trecho com falta;

LTH = Aplicação em LT híbrida;

OVZ = Utilização de OV de modo zero;

MT = Aplicação em LT de múltiplos trechos;

CB = Disponibiliza a função de campo de busca;

MÉTODO GENERALIZADO DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LTHS

Neste capítulo, apresenta-se uma solução generalizada de localização de faltas baseada em OV's para aplicações em LTHs com qualquer número de seções. Propõe-se um algoritmo capaz de estimar com precisão a localização da falta em LTHs levando em consideração as diferentes velocidades de propagação de cada seção independentemente do número de trechos com parâmetros elétricos distintos. O algoritmo pode ser aplicado em linhas não-homogêneas híbridas composta por linhas aéreas, subterrâneas, submarinas, ou por qualquer outra linha que possua trechos com características elétricas diferentes entre si. Inicialmente, apresenta-se a aplicação de métodos tradicionais de localização de faltas quando aplicados em LTHs e as fontes de erro resultantes desta aplicação. Em seguida é apresentada a solução proposta para identificação do trecho com falta e, por fim, a solução generalizada desenvolvida neste trabalho para localização de faltas em LTHs incluindo análise para os casos nos quais os parâmetros elétricos da linha são conhecidos com imprecisões.

4.1 LIMITAÇÕES DO MÉTODO CLÁSSICO DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS DE DOIS TERMINAIS BASEADO EM OV QUANDO APLICADO EM LTHS

Com o objetivo de melhor explicar os conceitos básicos da solução proposta, primeiramente apresentam-se as limitações da aplicação do método clássico de localização de falta de dois terminais baseado em OV's quando aplicado em LTHs. Esse método é baseado na análise de dados sincronizados de dois terminais e foi originalmente desenvolvido para linhas homogêneas de uma única seção (Saha *et al.*, 2010). A aplicação desse método é ilustrada na Figura 4.1, onde a velocidade de propagação da OV v_p é considerada constante ao longo de toda a linha. Portanto, a distância de falta estimada utilizando o método clássico de dois terminais \tilde{d} referente

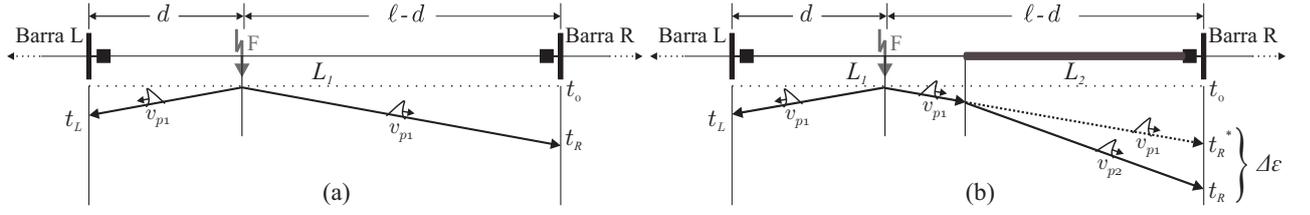


Figura 4.1. Diagrama de Bewley para faltas em linhas homogêneas com uma única seção.

a uma falta com distância real d é dada por (Saha *et al.*, 2010):

$$\tilde{d} = \frac{\ell - (t_R - t_L) \cdot v_p}{2} = \frac{\ell - \Delta T \cdot v_p}{2}, \quad (4.1)$$

onde ℓ é o comprimento total da linha, t_L e t_R são os tempos de incidência das primeiras frentes de onda nas barras L e R, respectivamente, e $\Delta T = t_R - t_L$.

No entanto, LTHs são compostas por duas ou mais seções com diferentes parâmetros elétricos, o que resulta em erros adicionais na localização de falta quando (4.1) é aplicada considerando uma única velocidade de propagação v_p uniforme ao longo de toda a linha. Para facilitar o entendimento do surgimento dessa fonte de erro, na Figura 4.1(b), ilustra-se uma LTH composta por dois trechos com comprimentos L_1 e L_2 , e velocidades de propagação v_{p1} e v_{p2} . Devido ao desvio no diagrama de Bewley imposto por um trecho com parâmetros diferentes em relação ao trecho de ocorrência da falta, tem-se que o instante detectado na barra R não mais será t_R^* conforme esperado para o caso de LT homogênea, mas sim um tempo t_R o qual possui um desvio no tempo $\Delta\epsilon$.

Por questão de ilustração, d representa a localização real em que ocorreu a falta tomando como referência a barra L e levando em consideração que a falta ocorreu na primeira seção da linha. Aplicando o equacionamento clássico de localização de faltas em LTs baseados em OVs, conforme apresentado em (4.1), pode-se estimar a distância da falta \tilde{d} , tal como ilustrado na Figura 4.1(b). Desenvolvendo a equação (4.1) e considerando a ocorrência de uma falta no primeiro trecho da LTH, tem-se que:

$$\tilde{d} = \frac{L - (t_R^* - t_L) \cdot v_{p1}}{2} = \frac{L - (t_R - \Delta\epsilon - t_L) \cdot v_{p1}}{2}. \quad (4.2)$$

Reorganizando (4.2), pode-se obter duas parcelas no equacionamento, de modo que:

$$\tilde{d} = \underbrace{\frac{L - \Delta T \cdot v_{p1}}{2}}_{\text{Conforme (4.1)}} + \underbrace{\Delta \varepsilon \cdot \frac{v_{p1}}{2}}_{\text{Erro}} . \quad (4.3)$$

De acordo com (4.3), erros na estimativa da localização da falta serão encontrados caso as diferenças entre as velocidades de propagação v_{p1} e v_{p2} não sejam levadas em consideração. Portanto, busca-se nessa tese de doutorado apresentar um método de compensação do erro $\Delta \varepsilon$ com o objetivo de aumentar a precisão da estimativa do local da falta. Vale ressaltar que, embora no exemplo apresentado esse valor de desvio no tempo $\Delta \varepsilon$ tenha aparecido somente na medição obtida a partir da barra R, em casos mais complexos onde a LTH tenha 3 ou mais trechos, esse valor de desvio será encontrado em ambos os terminais da linha monitorada. A proposta apresentada neste trabalho contempla uma solução generalizada para essa aplicação.

4.2 MÉTODO DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS GENERALIZADO APLICADO EM LTHS COM MÚLTIPLOS TRECHOS

O método de localização de faltas generalizado proposto nesse trabalho é desenvolvido para compensar as diferenças entre as velocidades de propagação ao longo da LTH independentemente da quantidade de seções dessa linha. O método proposto considera uma LTH com N_t seções com características elétricas diferentes, e independe da ordem em que cada seção está disposta no circuito, tornando possível sua aplicação em casos nos quais a falta se encontra em um trecho com velocidade de propagação maior, menor ou intermediária. Desta forma, inicialmente propõe-se uma formulação para prévia identificação do trecho com falta e em seguida apresenta-se o método proposto para o cálculo da localização de falta com a compensação dos desvios encontrados devido à passagem da OV por trechos de diferentes características elétricas.

4.2.1 Identificação da Seção com Falta

Em procedimentos de campo de localização de falta em LTHs, a seção da linha com defeito não é conhecida, sendo ΔT a única variável calculada após os procedimentos de detecção das frentes de onda (Jensen, 2014). Em alguns algoritmos de localização de faltas existentes para esse tipo de LT, calcula-se uma pré-estimativa da distância da falta para dar suporte para o

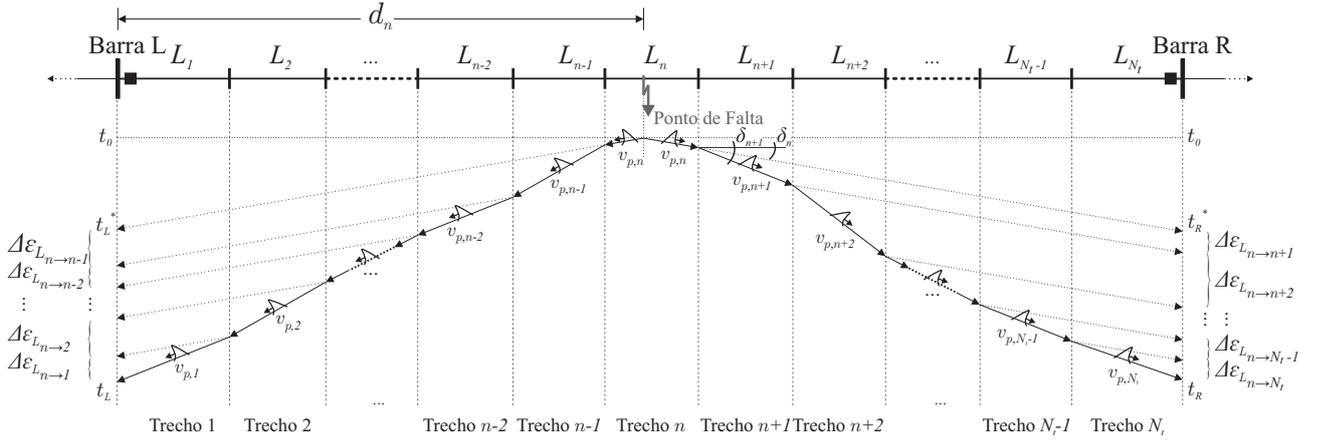


Figura 4.2. Diagrama de Bewley para falta na n -ésima seção.

cálculo final da distância do defeito considerando a existência de mais de um trecho de linha com diferentes características elétricas (SEL-T400L INSTRUCTION MANUAL, 2017). Em outros métodos, como no reportado por Jensen (2014), para a análise de faltas em uma LTH de dois trechos, a estimação do local do defeito é aplicada duas vezes, considerando cada um dos trechos L como sendo o trecho com falta, e então, um procedimento adicional de validação do resultado para escolha da estimativa correta é aplicado. Esse procedimento considera condições de fronteira baseados nos comprimentos de cada um dos trechos e no comprimento total da LTH. Porém, para casos de LTH com múltiplas seções, este método não é viável tendo em vista que pode-se obter múltiplas estimativas diferentes do local da falta e todas válidas de acordo com o critério baseado em fronteiras por comprimento dos dois tipos de trecho.

Neste documento de tese de doutorado, um procedimento alternativo para a detecção do trecho com falta é proposto, o qual requer apenas a análise do valor calculado ΔT . Considerando o sistema demonstrado na Figura 4.2, na qual apresenta-se uma LTH com tempo de propagação total τ_{LTH} , sendo t_L e t_R os instantes de detecção da chegada das frentes de OV's nos terminais local e remoto da linha, respectivamente, e t_0 o instante de incidência da falta (instante de referência), a partir da análise do diagrama de Bewley, pode-se observar que:

$$(t_R - t_0) = \tau_{LTH} - (t_L - t_0) . \quad (4.4)$$

Portanto, considerando que uma falta ocorreu no trecho n da linha monitorada, o valor esperado para a diferença de tempo ΔT pode ser calculado conforme:

$$\Delta T = (t_R - t_L) = (t_R - t_0) - (t_L - t_0) . \quad (4.5)$$

Substituindo (4.4) em (4.5), tem-se:

$$\Delta T = \tau_{LTH} - 2 \cdot (t_L - t_0) . \quad (4.6)$$

Deve-se notar que, independentemente de qual seja o valor do tempo de propagação da n -ésima seção com falta, $t_L - t_0$ será sempre maior ou igual à soma dos tempos de propagação de onda dos primeiros $n - 1$ trechos da linha a montante do trecho com falta. Então, para uma falta no início do n -ésimo trecho (isto é, no ponto de junção entre os trechos $n - 1$ e n da LTH apresentada na Figura 4.2), a seguinte condição é válida:

$$t_L - t_0 = \sum_{m=1}^{n-1} \left(\frac{L_m}{v_{p,m}} \right) . \quad (4.7)$$

Sendo L_m e $v_{p,m}$ o comprimento e a velocidade do trecho m . A diferença de tempo ΔT assume valores pre-determinados em casos de faltas no início de cada trecho ao longo da LTH, resultando em valores $\Delta T = \Delta T_1, \Delta T_2, \dots, \Delta T_{(n-1)}, \Delta T_{(n)}, \Delta T_{(n+1)}, \dots, \Delta T_{N_t-1}, \Delta T_{N_t}$ para faltas no início das seções $n = 1, 2, \dots, N_t - 1, N_t$, respectivamente. Logo, o valor esperado de ΔT para uma falta no terminal a montante do trecho n é aqui representado por ΔT_n , o qual pode ser inferido pela substituição de (4.7) em (4.6), resultando no seguinte equacionamento:

$$\Delta T_n = \tau_{LTH} - 2 \cdot \left[\sum_{m=1}^{n-1} \left(\frac{L_m}{v_{p,m}} \right) \right] . \quad (4.8)$$

Portanto, sendo $\Delta T = t_R - t_L$ a única variável passível de medição durante a análise da falta, espera-se que a seguinte condição seja satisfeita para um curto-circuito no n -ésimo trecho da linha:

$$\Delta T_n \geq \Delta T \geq \Delta T_{n+1} . \quad (4.9)$$

De (4.9), conclui-se que a análise do valor medido ΔT é suficiente para a correta identificação do trecho com falta. Portanto, na solução proposta, simulações variando $n = 1, 2, \dots, N_t$ são realizadas até que a condição apresentada em (4.9) seja satisfeita. Neste momento, tem-se o resultado da prévia identificação do trecho com falta, possibilitando assim o cálculo com precisão da distância de falta aplicando o algoritmo proposto na próxima seção de compensação dos erros ilustrados na Figura 4.1.

4.2.2 Compensação dos Erros $\Delta\varepsilon_{L,n}$ e $\Delta\varepsilon_{R,n}$ Durante a Localização de Faltas em LTHs

Para facilitar a descrição do cálculo dos erros $\Delta\varepsilon_{L,n}$ e $\Delta\varepsilon_{R,n}$, a falta ilustrada na Figura 4.2 é novamente utilizada. Os instantes de tempo teóricos t_L^* e t_R^* de chegada das OV's nos terminais L e R de uma LTH, respectivamente, são calculados conforme:

$$t_L^* = t_L - \Delta\varepsilon_{L,n} , \quad (4.10)$$

$$t_R^* = t_R - \Delta\varepsilon_{R,n} , \quad (4.11)$$

sendo $\Delta\varepsilon_{L,n}$ e $\Delta\varepsilon_{R,n}$ os desvios totais observados em cada terminal após todas as transições das OV's entre meios de diferentes características elétricas. Desta forma, pode-se representar essas grandezas como as somas:

$$\Delta\varepsilon_{L,n} = \Delta\varepsilon_{L_{n \rightarrow n-1}} + \Delta\varepsilon_{L_{n \rightarrow n-2}} + \dots + \Delta\varepsilon_{L_{n \rightarrow 1}} , \quad (4.12)$$

$$\Delta\varepsilon_{R,n} = \Delta\varepsilon_{L_{n \rightarrow n+1}} + \Delta\varepsilon_{L_{n \rightarrow n+2}} + \dots + \Delta\varepsilon_{L_{n \rightarrow N_t}} , \quad (4.13)$$

onde $\Delta\varepsilon_{L_{n \rightarrow m}}$ e $\Delta\varepsilon_{R_{n \rightarrow m}}$ são os desvios encontrados pelas OV's nos terminais L e R, respectivamente, causados pela diferença de velocidade do trecho com falta n e os trechos a montante ou a jusante m .

Para o melhor entendimento do cálculo de cada $\Delta\varepsilon_{R_{n \rightarrow m}}$, ilustra-se na Figura 4.3 um caso de uma transição da OV originada em um trecho com velocidade de propagação $v_{p,n}$ para um trecho com velocidade de propagação $v_{p,m}$.

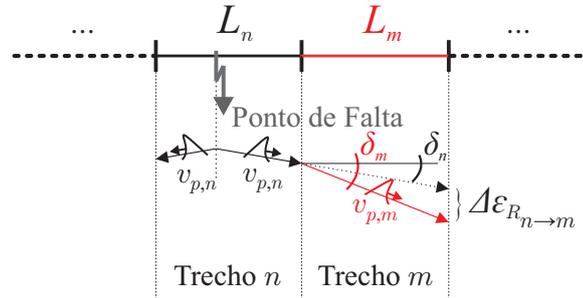


Figura 4.3. Desvio de velocidade de propagação na transição para um meio de menor velocidade.

Desta forma, sendo δ_n e δ_m as inclinações do diagrama de treliças que têm relação com a velocidade de propagação da onda no diagrama de Bewley apresentado na Figura 4.3, a partir

de uma análise trigonométrica, tem-se que:

$$\operatorname{tg}(\delta_n) = \frac{1}{v_{p,n}}, \quad (4.14)$$

$$\operatorname{tg}(\delta_m) = \frac{1}{v_{p,m}}. \quad (4.15)$$

Para o trecho m , tem-se que o desvio esperado $\Delta\varepsilon_{R_{n \rightarrow m}}$ é calculado a partir da diferença de tempo de propagação da onda entre o tempo necessário para percorrer o comprimento L_m considerando a velocidade de propagação real do trecho em análise $v_{p,m}$ e a velocidade de propagação no trecho de origem da onda $v_{p,n}$. Desta forma, matematicamente, tem-se que:

$$\Delta\varepsilon_{R_{n \rightarrow m}} = L_m \cdot [\tan(\delta_m) - \tan(\delta_n)] = \frac{L_m}{v_{p,m}} - \frac{L_m}{v_{p,n}}. \quad (4.16)$$

A partir do desenvolvimento de (4.16), tem-se que:

$$\Delta\varepsilon_{R_{n \rightarrow m}} = \frac{L_m \cdot (v_{p,n} - v_{p,m})}{v_{p,n} \cdot v_{p,m}}. \quad (4.17)$$

De forma similar à análise trigonométrica apresentada para o desvio pontual $\Delta\varepsilon_{R_{n \rightarrow m}}$, pode-se obter o desvio total $\Delta\varepsilon_{R,n}$ conforme:

$$\Delta\varepsilon_{R,n} = L_{n+1} \cdot \left(\frac{v_{p,n} - v_{p,n+1}}{v_{p,n} \cdot v_{p,n+1}} \right) + L_{n+2} \cdot \left(\frac{v_{p,n} - v_{p,n+2}}{v_{p,n} \cdot v_{p,n+2}} \right) + \dots + L_{N_t} \cdot \left(\frac{v_{p,n} - v_{p,N_t}}{v_{p,n} \cdot v_{p,N_t}} \right), \quad (4.18)$$

relação matemática esta que pode ser escrita de forma generalizada, resultando em:

$$\Delta\varepsilon_{R,n} = \sum_{m=n+1}^{N_t} L_m \cdot \left(\frac{v_{p,n} - v_{p,m}}{v_{p,n} \cdot v_{p,m}} \right). \quad (4.19)$$

O cálculo para o desvio total observado no terminal L da LTH monitorada, $\Delta\varepsilon_L$, é obtido de forma similar. Sendo assim, tem-se que:

$$\Delta\varepsilon_{L,n} = L_{n-1} \cdot \left(\frac{v_{p,n} - v_{p,n-1}}{v_{p,n} \cdot v_{p,n-1}} \right) + L_{n-2} \cdot \left(\frac{v_{p,n} - v_{p,n-2}}{v_{p,n} \cdot v_{p,n-2}} \right) + \dots + L_1 \cdot \left(\frac{v_{p,n} - v_{p,1}}{v_{p,n} \cdot v_{p,1}} \right), \quad (4.20)$$

expressão esta que também pode ser generalizada para:

$$\Delta\varepsilon_{L,n} = \sum_{m=1}^{n-1} L_m \cdot \left(\frac{v_{p,n} - v_{p,m}}{v_{p,n} \cdot v_{p,m}} \right). \quad (4.21)$$

Observa-se na Figura 4.3 que considerou-se inicialmente uma transição de um trecho com velocidade superior para um trecho com velocidade inferior, ou seja, $v_{p,n} > v_{p,m}$. No entanto,

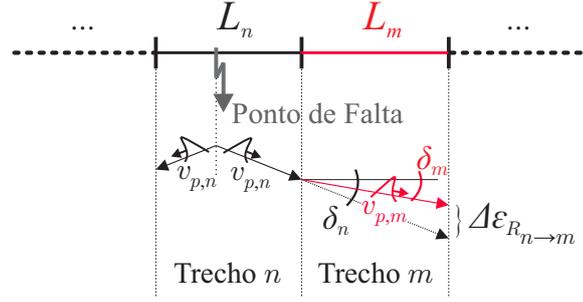


Figura 4.4. Desvio de velocidade de propagação na transição para um meio de maior velocidade.

faz-se necessária uma análise da formulação apresentada aplicada para casos nos quais o trecho com falta onde se originou a OV possui velocidade inferior em relação aos trechos adjacentes. Nesse caso, tem-se que $v_{p,n} < v_{p,m}$ conforme ilustrado na Figura 4.4.

Neste caso, tem-se que o desvio esperado $\Delta\epsilon_{R_n \rightarrow m}$ é calculado a partir da diferença entre o tempo necessário para percorrer o comprimento L_m considerando a velocidade de propagação de origem da onda $v_{p,n}$ e a velocidade de propagação real do trecho em análise $v_{p,m}$. Desta forma, matematicamente, tem-se que:

$$\Delta\epsilon_{R_n \rightarrow m} = L_m \cdot [\tan(\delta_n) - \tan(\delta_m)] = \frac{L_m}{v_{p,n}} - \frac{L_m}{v_{p,m}}. \quad (4.22)$$

A partir do desenvolvimento de (4.22), tem-se que:

$$\Delta\epsilon_{R_n \rightarrow m} = \frac{L_m \cdot (v_{p,m} - v_{p,n})}{v_{p,n} \cdot v_{p,m}} = (-1) \cdot \frac{L_m \cdot (v_{p,n} - v_{p,m})}{v_{p,n} \cdot v_{p,m}}. \quad (4.23)$$

Inspecionando (4.17) e (4.23), observa-se que a única diferença entre as expressões se refere à presença de um fator multiplicador (-1) , o qual surge naturalmente na expressão quando consideradas as diferentes velocidades de propagação nos trechos. Este fenômeno acontece devido ao fato de que, uma vez que $v_{p,m}$ é maior que $v_{p,n}$, o tempo para a OV percorrer este trecho de maior velocidade é menor que o tempo que a OV levaria caso a velocidade $v_{p,n}$ fosse considerada. Uma análise adicional ainda se faz necessária quando se tem casos em que a OV percorre trechos onde a velocidade de propagação é igual à velocidade do trecho de origem. Nesta última condição espera-se que o desvio seja nulo e essa constatação pode ser observada a partir da análise de (4.17) quando $v_{p,m} = v_{p,n}$:

$$\Delta\epsilon_{R_n \rightarrow m} = \frac{L_m \cdot (v_{p,n} - v_{p,m})}{v_{p,n} \cdot v_{p,m}} = \frac{L_m \cdot (v_{p,n} - v_{p,n})}{v_{p,n} \cdot v_{p,m}} = 0. \quad (4.24)$$

Portanto, diante do exposto, observa-se que não são necessárias adequações para a formulação apresentada, sendo esta generalizada para qualquer combinação possível de velocidades de propagação de OV's quando estas trafegam entre trechos de LTHs com diferentes características elétricas.

4.2.3 Formulação Generalizada para Localização de Faltas em uma LTH com Múltiplos Trechos

Uma vez calculados os termos de erros que foram apresentados na Seção 4.1, pode-se então calcular a distância de uma falta no trecho n de uma LTH. Nesse caso, ao considerar os desvios nos instantes de detecção da chegada das OV's nos terminais L e R (tal como realizado em (4.2) considerando erros em apenas um dos terminais da LT), é possível demonstrar que:

$$\tilde{d}_n = \frac{L - \Delta T \cdot v_{p,n}}{2} + (\Delta\varepsilon_{R,n} - \Delta\varepsilon_{L,n}) \cdot \frac{v_{p,n}}{2}. \quad (4.25)$$

Substituindo (4.19) e (4.21) em (4.25), obtém-se a seguinte equação generalizada:

$$\tilde{d}_n = \frac{L - \Delta T \cdot v_{p,n}}{2} + \left[\sum_{m=n+1}^{N_t} L_m \cdot \left(\frac{v_{p,n} - v_{p,m}}{v_{p,m} \cdot v_{p,n}} \right) - \sum_{m=1}^{n-1} L_m \cdot \left(\frac{v_{p,n} - v_{p,m}}{v_{p,m} \cdot v_{p,n}} \right) \right] \cdot \frac{v_{p,n}}{2}, \quad (4.26)$$

a qual pode ser ainda reduzida para a forma:

$$\tilde{d}_n = \underbrace{\frac{L - \Delta T \cdot v_{p,n}}{2}}_{\tilde{d}_{class,n}} + \underbrace{\sum_{m=1}^{N_t} (-1)^{\lceil \frac{n-m}{N_t} \rceil} \cdot \frac{L_m}{2} \cdot \left(\frac{v_{p,n}}{v_{p,m}} - 1 \right)}_{\Delta d}, \quad (4.27)$$

onde $\tilde{d}_{class,n}$ é a localização da falta assumindo a LTH como sendo uma linha homogênea com os parâmetros elétricos da seção com falta n , Δd é o fator de compensação utilizado para corrigir erros devido à não-homogeneidade da LTH, e $\lceil * \rceil$ é uma função que retorna valores inteiros imediatamente superiores ou iguais a $*$.

O fator de compensação Δd proposto é capaz de corrigir estimações incorretas do local de falta quando o método clássico de localização de faltas de dois terminais baseado em OV's $\tilde{d}_{class,n}$ já está implementado. Isso significa que, após a detecção do trecho com falta, se um localizador de falta de dois terminais baseado em OV's tradicional é aplicado para determinar a distância da falta considerando que a linha seja homogênea, o cálculo de Δd pode ser usado para eliminar erros decorrentes da característica não-homogênea da LTH, sendo portanto adequado

para LTHs já equipadas com dispositivos tradicionais baseados em OV's que possuem a função clássica de localização de faltas baseada em OV's por dois terminais.

4.2.4 Considerando Incertezas nos Parâmetros da LTH

Uma vez que a aplicação do equacionamento generalizado apresentado em (4.27) só é possível a partir do conhecimento da velocidade de propagação das OV's na LTH e nos seus trechos sem erro, uma análise adicional é apresentada nessa tese com o objetivo de avaliar a influência das incertezas nas grandezas elétricas, bem como, disponibilizar uma alternativa para aplicação do equacionamento quando essas grandezas não são conhecidas de forma precisa.

Inicialmente, o processo de identificação do trecho com falta é adaptado para acomodar possíveis incertezas nos parâmetros elétricos da linha. Neste contexto, o equacionamento apresentado em (4.8) é reescrito conforme:

$$\Delta T_{n,\xi} = \tau_{LTH} - 2 \cdot \left[\sum_{m=1}^{n-1} \left(\frac{L_m}{v_{p,m} \cdot \xi_m} \right) \right], \quad (4.28)$$

onde ξ_m é o fator de incerteza esperado nos parâmetros da m -ésima seção da LTH. Em casos de valores maiores que os definidos inicialmente, ξ_m possui valor maior que a unidade, em caso contrário, para valores menores que os definidos inicialmente, é atribuído para ξ_m valor menor que a unidade. Adicionalmente, as incertezas nos parâmetros podem ser distribuídas aleatoriamente, de tal forma que o cálculo de $\Delta T_{n,\xi}$ resultará em valores máximos e mínimos. Portanto, a equação de tomada de decisão para a determinação do trecho com falta apresentada em (4.9), é rerepresentada conforme:

$$\underbrace{\min [\Delta \mathbf{T}_{n,\xi(1\dots N_\xi)}]}_{\Delta T_{n,\xi,min}} \geq \Delta T \geq \underbrace{\max [\Delta \mathbf{T}_{n+1,\xi(1\dots N_\xi)}]}_{\Delta T_{n+1,\xi,max}}, \quad (4.29)$$

onde $\Delta \mathbf{T}_{n,\xi(1\dots N_\xi)}$ é o vetor que acomoda as múltiplas estimativas de $\Delta T_{n,\xi}$ obtidas considerando as diferentes combinações dos valores dos fatores de incerteza dos parâmetros. A combinação dos valores de $\Delta T_{n,\xi,min}$, $\Delta T_{n,\xi,max}$, $\Delta T_{n+1,\xi,min}$ e $\Delta T_{n+1,\xi,max}$ resultará em zonas de incerteza e de certeza para determinação do trecho com falta, conforme ilustrado na Figura 4.5. Para faltas classificadas na zona de incerteza de determinação do trecho com falta, não há certeza quanto à posição da falta, podendo esta estar localizada na seção n ou na seção adjacente. Por outro lado, se a indicação do trecho com falta estiver dentro de uma zona de certeza, a

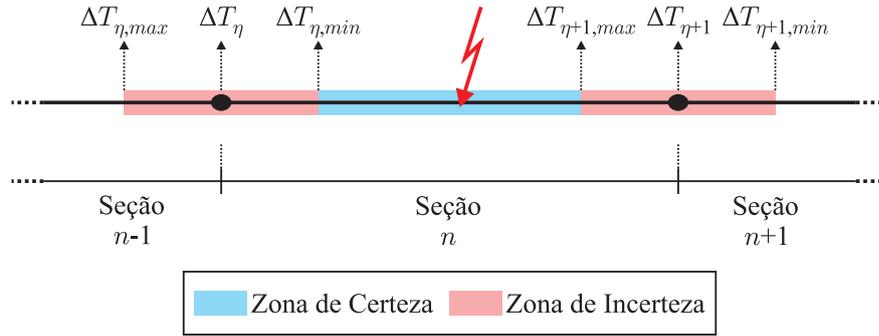


Figura 4.5. Diagrama ilustrativo para análise do algoritmo proposto quanto a presença de incertezas nos parâmetros elétricos da LTH.

indicação do trecho n determinado pelo algoritmo pode ser utilizada com precisão para o cálculo da localização final do distúrbio.

Uma vez definido o local de falta, tem-se que o equacionamento generalizado apresentado em (4.27) deve ser adaptado para acomodar regiões de busca considerando os fatores de incerteza ξ_n e ξ_m esperados, onde ξ_n é o fator de incerteza esperado nos parâmetros da n -ésima seção da LTH. Neste contexto, tem-se que a formulação generalizada incluindo as incertezas nas velocidades de propagação nos trechos pode ser reescrita por:

$$\tilde{d}_{n,\xi} = \frac{L - \Delta T \cdot v_{p,n} \cdot \xi_n}{2} + \sum_{m=1}^{N_t} (-1)^{\lceil \frac{n-m}{N_t} \rceil} \cdot \frac{L_m}{2} \cdot \left(\frac{v_{p,n} \cdot \xi_n}{v_{p,m} \cdot \xi_m} - 1 \right). \quad (4.30)$$

Utilizando o fator de compensação Δd definido em (4.27), tem-se que a equação generalizada pode ser subdividida em:

$$\tilde{d}_{n,\xi} = \tilde{d}_n + \Delta\xi = \tilde{d}_{class,n} + \Delta d + \Delta\xi, \quad (4.31)$$

onde

$$\Delta\xi = \frac{\Delta T \cdot v_{p,n} \cdot (1 - \xi_n)}{2} + \sum_{m=1}^{N_t} (-1)^{\lceil \frac{n-m}{N_t} \rceil} \cdot \frac{L_m}{2} \cdot \left[\frac{v_{p,n}}{v_{p,m}} \cdot \left(\frac{\xi_n}{\xi_m} - 1 \right) \right]. \quad (4.32)$$

Observa-se então que serão calculadas as estimativas de localização para a falta $\tilde{d}_{n,\xi,min}$ e $\tilde{d}_{n,\xi,max}$, considerando os valores mínimos e máximos das diferentes combinações entre ξ_n e ξ_m . Estas estimativas definem o que é chamado de campo de busca no qual há probabilidade de estar situado o local da falta. Deste modo, em casos de aplicações nas quais os parâmetros são conhecidos com incerteza, as estimativas do local de falta serão externalizadas na forma de campos de busca ao invés de uma localização estimada pontual.

Por fim, quando os parâmetros são conhecidos com precisão, tem-se que $\xi_n = \xi_m \approx 1$, resultando em valores aproximadamente nulos para o equacionamento do termo de desvio em (4.32). Uma vez que $\Delta\xi \approx 0$, o equacionamento apresentado em (4.31) se resume ao equacionamento generalizando definido em (4.27), enquanto que esta expressão se aplicada em linhas homogêneas recai sobre a formulação clássica de dois terminais. Assim, pode-se dizer que o algoritmo proposto no presente trabalho consiste em uma generalização do método clássico de dois terminais, incluindo possíveis variações nas características elétricas de cada trecho, bem como a existência ou não de incertezas nesses parâmetros. No Capítulo 5 será apresentada uma análise da influência dos fatores de incerteza ξ_n e ξ_m na determinação do trecho com falta, bem como no cálculo da distância de falta. Conforme esperado, quão maiores os desvios esperados, menores serão as zonas de certeza para definição do trecho com falta, e maiores serão os campos de busca para a localização de falta real.

4.3 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo, apresentaram-se as dificuldades encontradas na aplicação em LTHs do método tradicional de localização de faltas baseado em OV's desenvolvido para linhas homogêneas, destacando-se os termos de desvios encontrados. Foi também apresentada uma solução capaz de identificar inicialmente o trecho com falta a partir da análise da diferença de tempo entre os instantes de chegada das primeiras frentes de onda em ambos os terminais da LTH. Como resultado final da solução proposta, foram apresentadas metodologias generalizadas de identificação do trecho com falta e de localização de faltas em LTHs de múltiplos trechos de forma pontual ou na forma de campos de busca em casos nos quais os parâmetros da linha são conhecidos com imprecisões. A solução foi desenvolvida para ser aplicada tanto em uma LTH de múltiplos trechos quanto em linhas com características elétricas distintas de cada um desses trechos, sendo este aplicado de forma direta. Mostrou-se também que o algoritmo pode ser facilmente adaptado em dispositivos reais que já utilizam em sua estrutura o algoritmo tradicional de localização de faltas por dois terminais baseado em OV's. Na Figura 4.6 apresenta-se o diagrama de blocos representativo das etapas de aplicação do algoritmo proposto.

No capítulo seguinte pretende-se apresentar resultados obtidos de forma massiva para casos de faltas em uma LTH modelada considerando diferentes características elétricas para cada

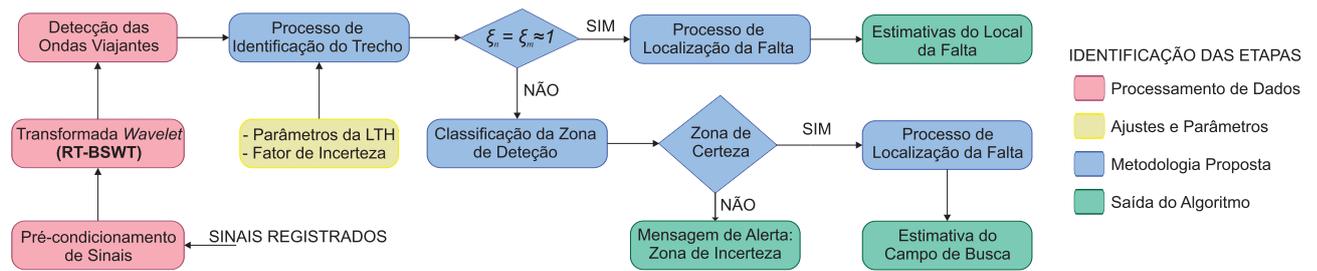


Figura 4.6. Diagrama de blocos da metodologia para aplicação do algoritmo proposto.

trecho, considerando a existência ou não de incertezas nos parâmetros da linha, e considerando diferentes condições de transição da onda a fim de validar a eficácia e correto funcionamento da solução proposta.

ANÁLISE DO DESEMPENHO DO MÉTODO PROPOSTO PARA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LTH DE MÚLTIPLOS TRECHOS

Apresentam-se neste capítulo os resultados obtidos durante a avaliação do método proposto para localização de faltas em LTHs com múltiplos trechos. Para tanto, realizaram-se simulações variando-se as localizações de faltas ao longo de uma LTH modelada considerando os parâmetros de cada trecho conforme dados obtidos de LTs reais. Para tanto, utilizou-se o programa *Alternative Transients Program* (ATP), através do qual foram gerados registros oscilográficos que viabilizaram a realização das análises dos locais reais de falta e os estimados com a utilização do método proposto.

5.1 SISTEMA TESTE MODELADO

Com o objetivo de simular condições adversas em uma LTH com trechos de diferentes parâmetros elétricos, optou-se por modelar no ATP uma LTH de 380 kV/50 Hz com 70,4 km de comprimento sendo dividido em nove trechos ($N_t = 9$) considerando trechos de linha aérea, linha de cabos subterrâneos e linha submarina, conforme ilustrado na Figura 5.1.

Para melhor representação dos efeitos de atenuação encontrados na propagação de OV's nesses tipos de linhas, todos os trechos foram modelados considerando o modelo de linha JMarti dependente na frequência, o qual é ajustado com base nas características físicas do sistema em

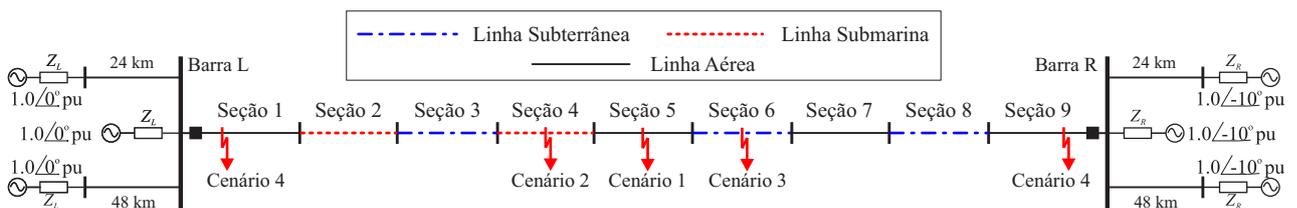


Figura 5.1. Trechos de linha aérea, linha subterrânea e linha submarina distribuídos ao longo da LTH simulada.

termos de comportamento dos parâmetros na frequência (Marti, 1982). Adicionalmente foi considerada a existência de linhas adjacentes conforme ilustrado na Figura 5.1. Com isso, é possível representar também diferentes coeficientes de refração e reflexão nos terminais de medição, tal como acontece em sistemas reais.

Na Tabela 5.1 são apresentados os parâmetros de cada trecho e o parâmetro total da LTH modelada, sendo τ o tempo de propagação, L o comprimento e v_p a velocidade de propagação. Os sistemas conectados a jusante e a montante da LTH monitorada são representados como circuitos equivalentes de Thévenin e seus parâmetros são apresentados na Tabela 5.2. Ressalta-se que os valores de tempo de propagação foram obtidos por meio de ensaios de energização na LTH modelada conforme proposto por SEL-T400L Instruction Manual (2017), uma vez que esses tempos variam na frequência nos modelos de LT considerados. Assim, conhecendo os comprimentos das LTs em questão e os tempos de propagação estimados, foi possível obter um parâmetro de ajuste para as velocidades de propagação, minimizando as incertezas nos ajustes, tal como tradicionalmente é realizado na prática.

Tabela 5.1. Parâmetros de Cada Seção da LTH.

Seção	τ (s)	L (km)	v_p (km/s)
Linha Aérea	4,0600e-05	12	2,9557e+05
Linha Subterrânea	2,5900e-05	5	1,9305e+05
Linha Submarina	1,9900e-05	3,7	1,8593e+05
LTH Equivalente	2,8000e-04	70,4	2,5143e+05

Tabela 5.2. Dados do Circuito Equivalente de Thévenin.

Componente	Variável	Valor
Impedância	$R_1 + jX_1$ (Ω)	0,4333 + j 0,0091
Z_L	$R_0 + jX_0$ (Ω)	1,9518 + j 6,089
Impedância	$R_1 + jX_1$ (Ω)	0,4333 + j 0,0091
Z_R	$R_0 + jX_0$ (Ω)	1,9518 + j 6,089

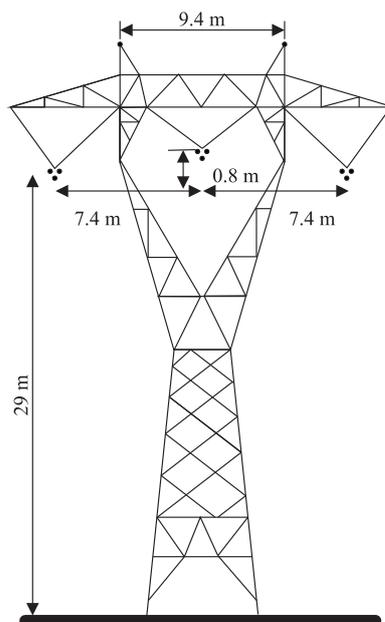


Figura 5.2. Esboço da torre de linha de transmissão aérea (sem escala).

5.1.1 Trechos de Linha Aérea

As características geométricas e físicas dos trechos de LT aérea considerados no sistema teste foram obtidos em (Colla *et al.*, 2017). Trata-se de um circuito trifásico 380 kV/50 Hz onde cada fase é composta por um grupo de três condutores igualmente espaçados entre si em um feixe triangular com 40 cm de espaço, conforme ilustrado na Figura 5.2. No modelo, usam-se três cabos condutores de 31,5 mm de diâmetro de alumínio nú reforçado com aço, do inglês, *Aluminum Conductors Steel Reinforced* (ACSR), que são também conhecidos como cabos de alumínio com alma de aço (CAA). Para os dois cabos guarda do sistema, foram considerados cabos de aço blindados de 11,5 mm de diâmetro. A altura total da torre modelada é de 36 m com o máximo de 15 m de catenária no vão entre duas torres. Conforme sugerido por Marti (1982), os trechos de linha aérea no sistema teste foram simulados no ATP por meio do modelo dependente na frequência de JMarti como perfeitamente transposta. A resistividade elétrica do solo considerada para trechos de linha aérea foi de 500 $\Omega \cdot m$.

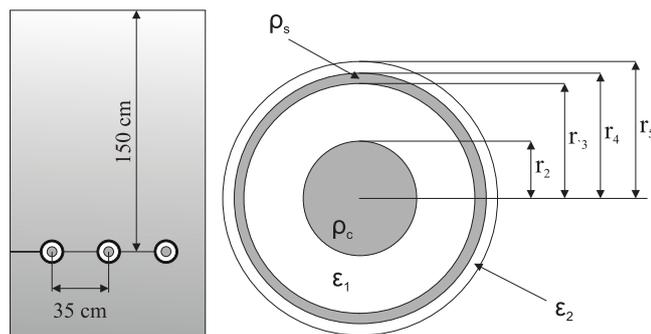


Figura 5.3. Configuração vertical e horizontal dos cabos subterrâneos e seção transversal dos cabos (sem escala).

Tabela 5.3. Parâmetros Físicos e Elétricos do Trecho de 400kV subterrâneo.

Raio interno do núcleo r_1 (mm)	0,0
Raio externo do núcleo r_2 (mm)	32,5
Raio interno da blindagem r_3 (mm)	64,2
Raio externo da blindagem r_4 (mm)	65,5
Raio da isolamento externa r_5 (mm)	71,3
Permissividade relativa do isolador interno ϵ_{r1}	2,4
Permissividade relativa do isolador externo ϵ_{r2}	2,0
Permeabilidade relativa μ_r	1,0
Resistividade do núcleo ρ_c ($\Omega \cdot m$)	$1,724 \cdot 10^{-8}$
Resistividade da blindagem ρ_s ($\Omega \cdot m$)	$2,84 \cdot 10^{-8}$
Resistividade do solo ($\Omega \cdot m$)	50,0

5.1.2 Trechos de Cabos Subterrâneos

As características construtivas dos trechos de linha subterrânea modelados no sistema teste foram também obtidos do trabalho apresentado por Colla *et al.* (2017). Trata-se de um circuito trifásico de 400 kV composto por cabos de cobre unipolares isolados com polietileno reticulado, do inglês, *Cross-Linked Polyethylene* (XLPE), com seção transversal de 2500 mm^2 conforme ilustrado na Figura 5.3.

Os cabos são não transpostos e estão dispostos na configuração horizontal espaçados entre si de 35 cm numa profundidade de 1,5 m, sendo também modelados por meio do modelo de JMarti. Os dados físicos e elétricos utilizados na modelagem são apresentados na Tabela 5.3.

5.1.3 Trechos de Cabos Submarinos

A Figura 5.4 ilustra a seção transversal e a configuração do circuito trifásico de cabos submarinos, os quais poderiam também representar trechos sublacustres do sistema teste. Trata-se de cabos de cobre de 400 kV isolados com XLPE com seção transversal de 1000 mm^2 preenchidos com fluido de baixa pressão, do inglês *Low Pressure Fluid Filled* (LPFF) (blindagem de chumbo e armadura de alumínio) conforme reportado em (Ohno, 2012).

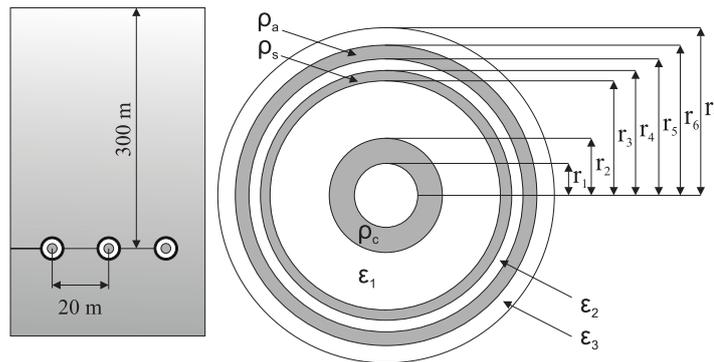


Figura 5.4. Configuração vertical e horizontal dos cabos submarinos e seção transversal do cabo submarino (sem escala).

As informações físicas e elétricas do tipo de cabo submarino utilizado neste sistema teste são apresentadas na Tabela 5.4. A resistividade elétrica da água do mar foi considerada como $0,5 \Omega \cdot \text{m}$ (cerca de 0,001 vezes a resistividade do solo) (Vargas *et al.*, 1999), sendo o cabo modelado por meio do modelo de JMarti conforme explicado anteriormente.

5.2 AVALIAÇÃO DE RESULTADOS

Com o objetivo de analisar a performance do algoritmo de localização de faltas baseado em OV para LTHs de múltiplos trechos, faltas monofásicas do tipo AG foram simuladas considerando diferentes resistências de falta e ângulos de incidência de falta. Desta forma, casos de falta onde se espera a indução de transitórios pouco e muito atenuados foram contemplados.

Com o intuito de tornar as simulações mais realísticas, os transformadores de corrente (TCs) localizados nos terminais monitorados da LTH foram modelados conforme reportado em (IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE, 2004), e diferentes níveis de ruído elétrico no sinal foram adicionados em forma da razão SNR, do inglês *signal-to-noise ratio*. Um passo

Tabela 5.4. Dados Físicos do Cabo 400kV Submarino Modelado.

Raio interno do núcleo r_1 (mm)	8,65
Raio externo do núcleo r_2 (mm)	20,65
Raio interno da blindagem r_3 (mm)	46,20
Raio externo da blindagem r_4 (mm)	49,40
Raio interno da armadura r_5 (mm)	53,90
Raio externo da armadura r_6 (mm)	61,90
Raio da isolação externa r_7 (mm)	66,30
Permissividade relativa do isolador do núcleo ϵ_{r1}	2,56
Permissividade relativa do isolador da blindagem ϵ_{r2}	2,4
Permissividade relativa do isolador da armadura ϵ_{r3}	2,4
Permeabilidade relativa μ_r	1,0
Resistividade do núcleo ρ_c ($\Omega \cdot m$)	$1,724 \cdot 10^{-8}$
Resistividade da blindagem ρ_s ($\Omega \cdot m$)	$2,20 \cdot 10^{-7}$
Resistividade da armadura ρ_a ($\Omega \cdot m$)	$2,84 \cdot 10^{-8}$
Resistividade da água do mar ($\Omega \cdot m$)	0,01

de integração de 1 μs foi considerado. Tal passo resulta em erros desprezíveis de integração numérica durante o cálculo dos sinais avaliados. Assim, as amostras obtidas das simulações foram tomadas de forma direta, sem subamostragem, como sendo os sinais digitalizados a serem avaliados no algoritmo proposto, simulando portanto uma frequência de amostragem igual a 1 MHz. Para tornar as simulações mais realísticas, os sinais obtidos nos enrolamentos secundários dos TCs foram ainda filtrados por meio de um filtro do tipo *anti-aliasing* de segunda ordem com frequência de corte em 400 kHz modelado computacionalmente. Além disso, com o objetivo de promover um método de detecção de OV's sensível e assumindo que deve-se realizar apenas a detecção do instante inicial dos primeiros transitórios, o método de extração de OV's apresentado na Seção 2.4.5 é utilizado nos testes, viabilizando o correto funcionamento do procedimento de localização de faltas mesmo em casos de transitórios atenuados.

5.2.1 Cenários de Faltas Simulados

Com o objetivo de analisar a performance do algoritmo proposto nesta tese, foram simulados casos de curto circuito fase-terra AG variando a resistência de falta de 0 Ω até 150 Ω , com passos de 50 Ω , com ângulo de incidência de falta iguais a 60°, 75° e 90°, tomando como referência a forma de onda de tensão da fase com falta. Quatro diferentes cenários de faltas foram levados em consideração: Cenário 1) faltas na seção $n = 5$ da LTH, referente a um trecho de linha aéreo,

o qual apresenta a maior velocidade de propagação entre os demais trechos; Cenário 2) faltas na seção $n = 4$ da LTH, referente a um trecho de linha submarina, o qual apresenta a menor velocidade de propagação entre os demais trechos; Cenário 3) faltas no trecho $n = 6$ da LTH, referente a um trecho de linha subterrânea, o qual apresenta uma velocidade de propagação intermediária entre os trechos aéreo e submarino; e Cenário 4) faltas próximas aos terminais monitorados da LTH (trechos $n = 1$ e $n = 9$). Nos cenários 1, 2 e 3, faltas ao longo do trecho avaliado foram simuladas variando a distância de 0 % até 100 % do comprimento total do trecho com passos de 10 %. No cenário 4, as distâncias de faltas foram variadas de 10 % até 50 % do comprimento total dos trechos avaliados com passo de 10 %, considerando sempre a metade do trecho mais próxima da barra monitorada.

5.2.2 Análise Pontual

Inicialmente, apresenta-se uma análise pontual detalhada com o objetivo de destacar e ilustrar o procedimento de detecção de transitórios e a influência de transitórios atenuados em procedimentos de localização de faltas baseados em OV. De fato, pode-se observar o efeito de atenuação dos transitórios principalmente em casos de falta com ângulo de incidência próximos

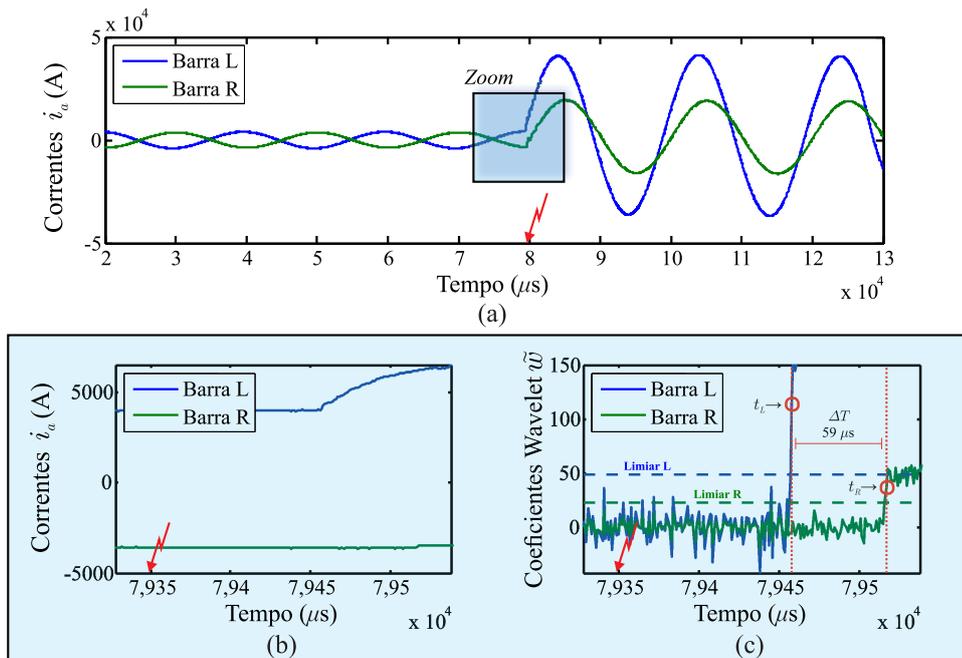


Figura 5.5. Análise pontual da detecção dos transitórios para falta sólida na seção $n = 5$ com ângulo de incidência de 90° e $SNR = 60$ dB.

a 0° combinados com alta resistência de falta e a presença de ruídos eletromagnéticos. Neste contexto, optou-se por avaliar três casos de faltas selecionados do cenário 1, ou seja, na seção 5 da LTH, em 0,1 pu de distância do terminal local da seção. Considerando um caso de falta franca e ângulo de incidência de 90° , ilustra-se na Figura 5.5 os sinais de corrente medidos em cada um dos terminais da linha monitorada com SNR de 60 dB. A partir da análise da área ampliada da figura, observa-se que os coeficientes possuem uma variação nos instantes antes da aplicação da falta em decorrência do ruído, no entanto estas variações não ultrapassam o limiar auto-adaptativo. Após a incidência da falta, os coeficientes ultrapassam o limiar de detecção e os instantes de incidência das OV's no terminal local e remoto da linha são obtidos para o cálculo de ΔT . Conforme ilustrado na Figura 5.5(c), o valor medido para ΔT foi de $59 \mu s$, o qual, quando aplicado em (4.9), retorna a correta indicação de uma falta no trecho 5 da LTH. Os valores esperados de ΔT_n e ΔT_{n+1} foram apresentados na Tabela 5.5 considerando o sistema em análise ilustrado na Figura 5.1. Pode-se verificar que o valor medido $\Delta T = 59 \mu s$ se encontra no intervalo de tempos esperados do início do trecho $n = 5$ até o início do trecho $n = 6$. Uma vez determinado o trecho com falta, $n = 5$, tem-se que a partir da aplicação em (4.27) obtém-se a indicação da falta igual a 25,62 km a partir do terminal local da LTH, resultando em um erro de 26,5 m.

Tabela 5.5. Tabela de valores de teste esperados para ΔT_n conforme definido em (4.9).

Seção n	$\Delta T_n \geq$	ΔT	$\geq \Delta T_{n+1}$
$n = 1$	$280 \mu s$	$59 \mu s$	$198,7 \mu s$
$n = 2$	$198,7 \mu s$	$59 \mu s$	$158,9 \mu s$
$n = 3$	$158,9 \mu s$	$59 \mu s$	$107,1 \mu s$
$n = 4$	$107,1 \mu s$	$59 \mu s$	$67,3 \mu s$
$n = 5$	$67,3 \mu s$	$59 \mu s$	$-13,9 \mu s$
$n = 6$	$-13,9 \mu s$	$59 \mu s$	$-65,7 \mu s$
$n = 7$	$-65,7 \mu s$	$59 \mu s$	$-146,9 \mu s$
$n = 8$	$-146,9 \mu s$	$59 \mu s$	$-198,7 \mu s$
$n = 9$	$-198,7 \mu s$	$59 \mu s$	$280 \mu s$

Na segunda análise pontual, ilustra-se na Figura 5.6 sinais registrados de uma falta simulada com ângulo de incidência de 15° e resistência de falta de 150Ω . Nota-se que após a incidência da falta, a amplitude da corrente varia menos que no caso de falta franca e os transitórios são atenuados conforme ilustrado na Figura 5.6(b). Na Figura 5.6(c) observa-se que os coeficientes *wavelet* ultrapassaram o limiar, indicando corretamente a detecção das ondas incidentes em

cada terminal e resultando em $\Delta T = 60 \mu\text{s}$. Aplicando o procedimento de identificação do trecho com falta definido em (4.9) e o equacionamento para localização de faltas generalizado em LTHs definido por (4.27), obtém-se novamente a correta identificação do trecho com falta e uma localização estimada de 25,48 km do terminal local da linha, resultando em um erro de 121,3 m, o que ainda é considerado muito satisfatório em aplicações tradicionais de algoritmos localizadores de falta baseados em OV.

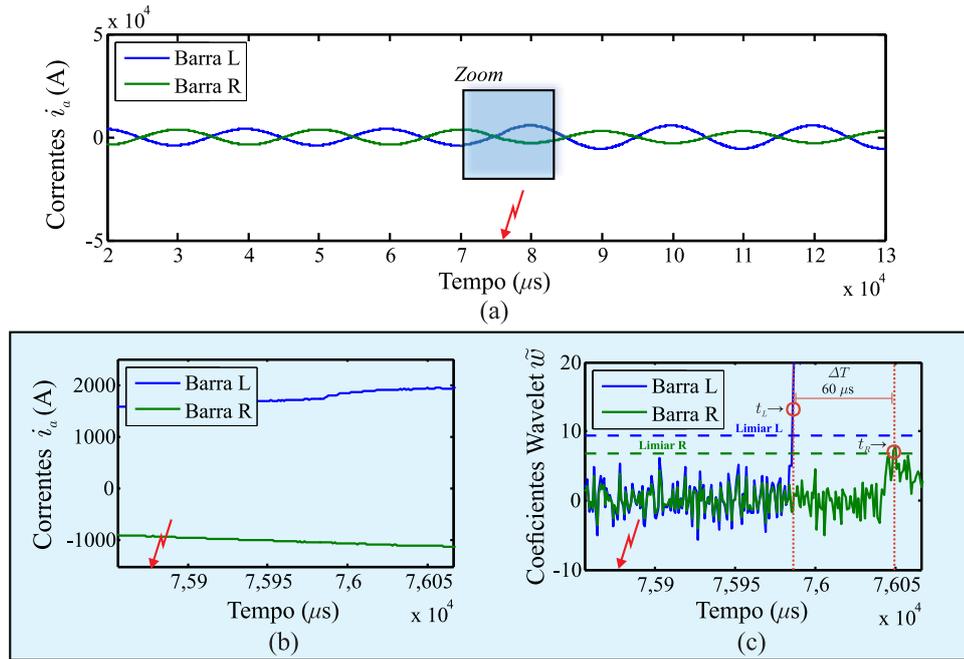


Figura 5.6. Análise pontual da detecção dos transitórios para falta na seção $n = 5$ com resistência de falta de 150Ω , ângulo de incidência de 15° e $\text{SNR} = 60 \text{ dB}$: a) sinais de corrente na fase com falta nas barras da LTH monitorada; b) ampliação dos sinais de correntes para o período de tempo circunvizinho ao instante de incidência da falta; e c) coeficientes *wavelet* e limiares de detecção.

Por fim, apresenta-se uma última análise comparativa para avaliação da performance do algoritmo de detecção sob condições de diferentes níveis de ruído. Ilustra-se na Figura 5.7 sinais obtidos de uma falta franca com ângulo de incidência de 60° . Os gráficos 5.7(a) e (c) ilustram em escala de 1 para 1/10, respectivamente, um caso de razão sinal-ruído de 60 dB, enquanto que os gráficos 5.7(b) e (d) possuem uma razão sinal-ruído de 100 dB. Observa-se que quando as amplitudes dos ruídos é elevada, o limiar auto-adaptativo sobe preservando a segurança da detecção, enquanto que para ruídos de baixa amplitude, o limiar também é reduzido e não apresenta atrasos na detecção como comumente pode ser encontrado em aplicações de detecção com limiar fixo.

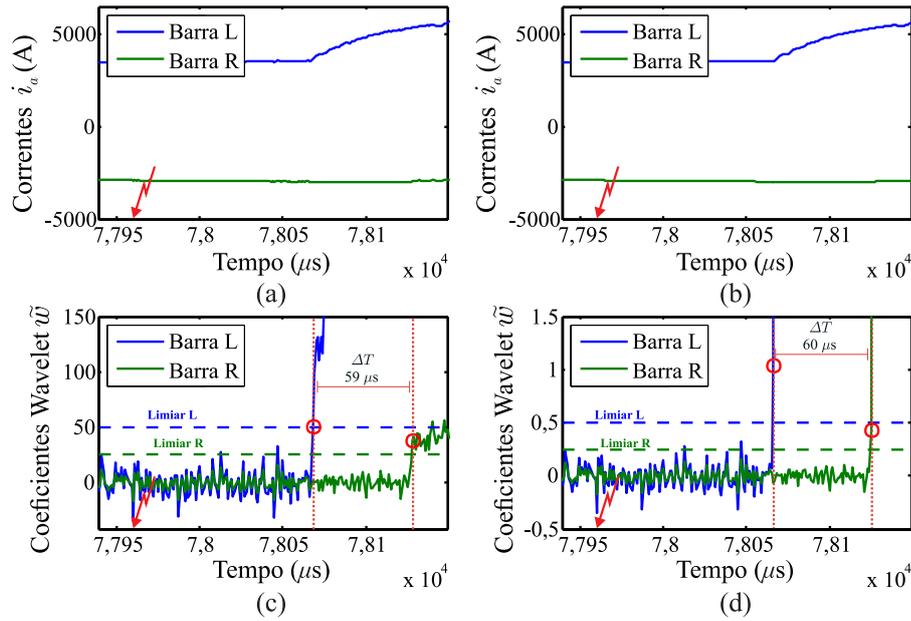


Figura 5.7. Análise pontual comparativa da influência da presença de ruídos eletromagnéticos considerando: (a) e (c) SNR = 60 dB; e (b) e (d) SNR = 100 dB.

5.2.3 Análise da Influência das Incertezas nos Parâmetros Elétricos

Uma vez que a solução proposta utiliza como parâmetro de entrada as velocidades de propagação de cada trecho da linha, faz-se necessária uma análise da precisão do algoritmo em aplicações nas quais a velocidade de propagação e os demais parâmetros da linha apresentam imprecisão. Dessa forma, para acomodar essas possíveis incertezas o algoritmo proposto foi adaptado e apresentado em (4.30) admitindo um fator de incerteza nos parâmetros elétricos da linha.

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos a partir de 243 simulações de curto circuito franco com ângulo de incidência de 60° considerando os cenários 1, 2 e 3 descritos anteriormente na presença de ruídos eletromagnéticos de 100 dB. De tal forma que faltas de 0,1 pu até 0,9 pu, com passos de 0,1 pu, em trechos de cabos aéreos, subterrâneos e submarinos foram consideradas tomando como bases imprecisões nos dados de 3%, -3% e de 3% em cada trecho da linha, respectivamente. Com o objetivo de verificar a acomodação dessas imprecisões no algoritmo proposto, assumiram-se fatores de incerteza $\xi_n = \xi_m = \xi$, os quais foram variados de 2% até 8% para obtenção dos resultados em forma de zonas de certeza e incerteza.

Na Figura 5.8 são ilustradas as zonas de certeza e incerteza criadas pelo algoritmo para

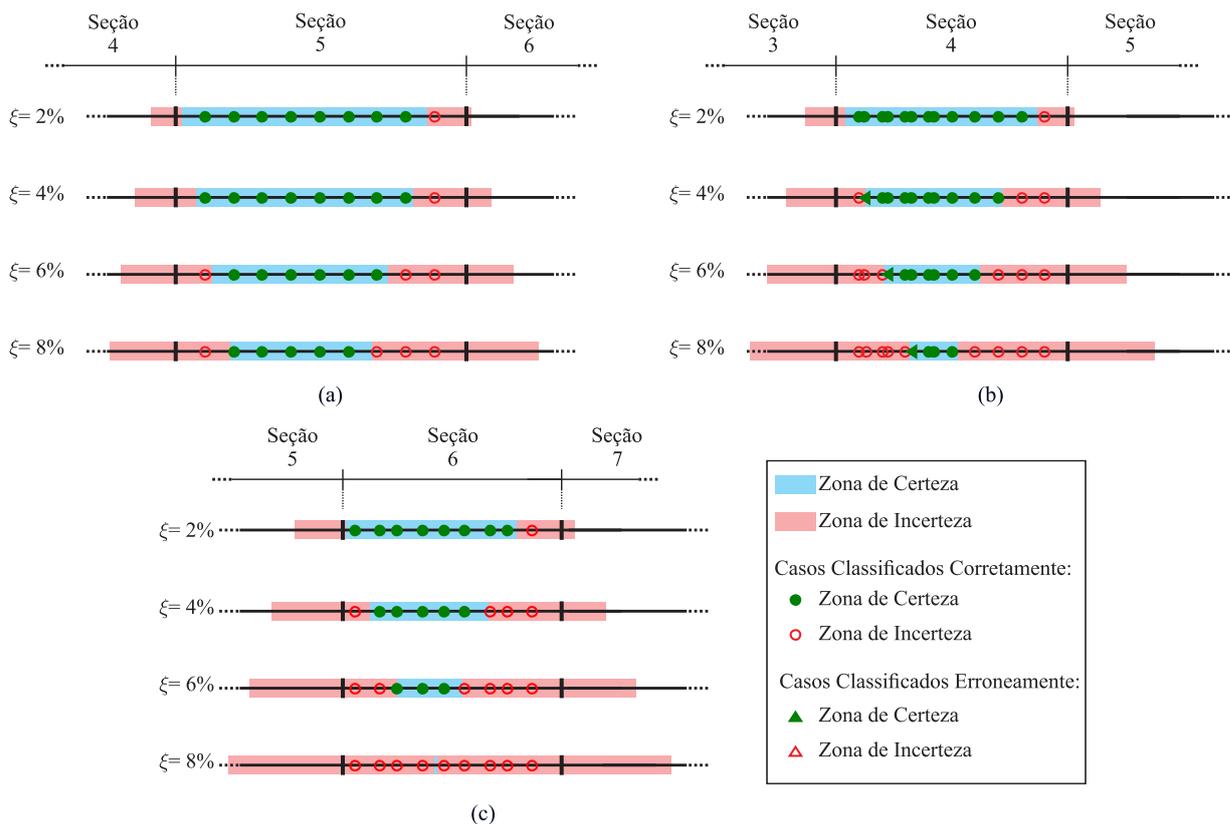


Figura 5.8. Resultados para detecção da seção com falta considerando a influência de incertezas nos parâmetros da linha para: (a) cenário 1; (b) cenário 2; e (c) cenário 3.

cada um dos valores de ξ simulados. Observa-se que as margens de certeza são reduzidas quando aumentado o valor do ξ considerado. A combinação de elevado valor de ξ e trechos curtos de linha pode resultar na não identificação do trecho com falta e, como consequência, a determinação do local de falta equivocada (ou até mesmo inviabilizando o processo). De fato, como ilustrado na Figura 5.8(b), tem-se que, para casos próximos às margens de certeza e incerteza, o algoritmo identificou erroneamente casos na zona de certeza que deveriam ser classificados como na zona de incerteza. De forma geral, dos 243 casos simulados, apenas em 2,47% a classificação foi errônea e, ainda assim, em casos muito próximos da margem da zona de incerteza, indicando uma influência pouco relevante na eficácia do algoritmo.

Adicionalmente, o algoritmo retorna como estimativa para localização da falta um campo de busca para os casos simulados de falta considerando o valor do fator de incerteza simulado. Na Figura 5.9 são ilustrados os campos de busca para as simulações realizadas nos três cenários considerando um valor de $\xi = 2\%$. Observa-se que todos os casos classificados como na zona de certeza estão dentro da margem do campo de busca que variam de 1 km até 1,5 km. Tal

informação é de grande importância para equipe de manutenção da linha localizar o defeito em campo e realizar o reparo o mais rápido possível. De fato, a estimativa de um campo de busca reduzido auxilia equipes na localização de busca principalmente nos casos de aplicação em LTHs que possuem trechos de cabos subterrâneos ou submarinos, nos quais faltas não são facilmente identificadas.

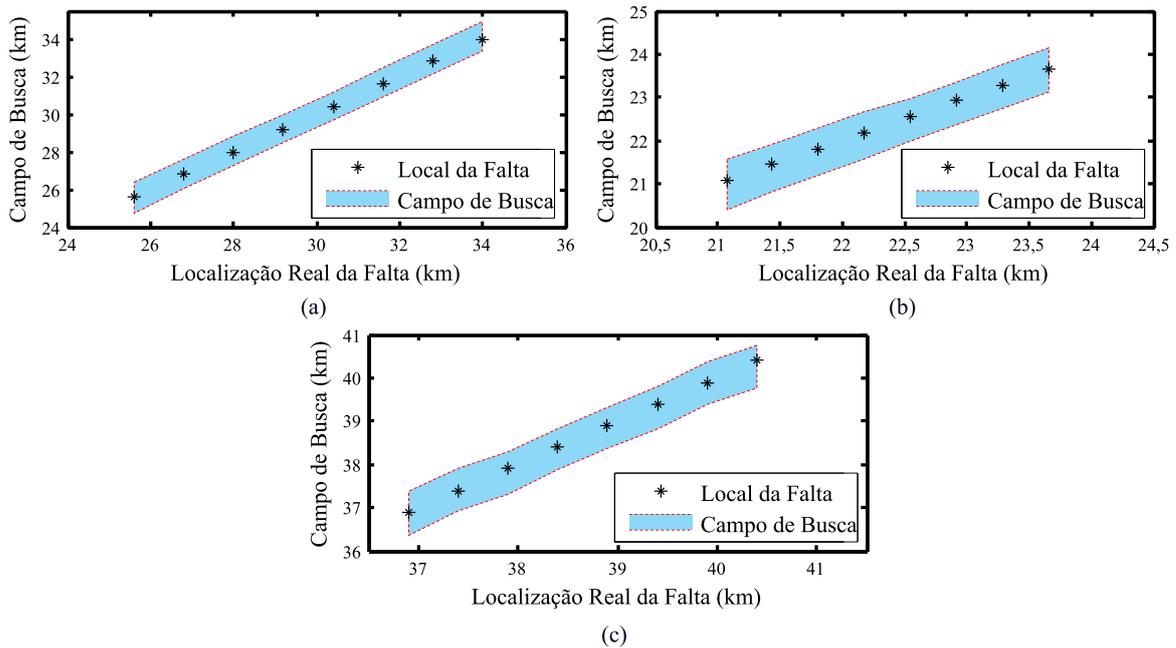


Figura 5.9. Campo de busca para faltas classificadas na zona de certeza para $\xi = 2\%$ no: (a) cenário 1; (b) cenário 2; e (c) cenário 3.

Em resumo, verifica-se que a presença de incertezas elevadas nos parâmetros da linha pode comprometer a utilidade do algoritmo, criando zonas de certeza muito curtas e zonas de busca pelo defeito muito abrangentes. Ressalta-se portanto a importância de estimar corretamente os parâmetros da linha, como proposto em (Schweitzer *et al.*, 2013), com o objetivo de reduzir as fontes de erros e viabilizar a utilização de valores mínimos para o fator de incerteza ξ . Desse modo, a partir da formulação generalizada, torna-se possível identificar faltas em qualquer trecho, acomodando incertezas a partir de campos de busca com extensões curtas que, de fato, sejam favoráveis para a inspeção da LT em campo.

5.2.4 Análise das Estimativas de Falta Utilizando Parâmetros Precisos

Tomando como base os quatro cenários de simulação descritos nesse capítulo, tem-se como objetivo principal nessa seção a análise em massa da precisão do algoritmo para estimativa do local de falta a partir da utilização dos parâmetros precisos da LTH simulada. Para cada caso simulado, os resultados da estimação de falta obtidos a partir do método proposto foram avaliados e chamados de \tilde{d}_{LTH} . Neste contexto de localização de faltas em LTH, outra abordagem reportada como possível na literatura consiste na estimativa de falta a partir do método clássico de localização de faltas baseados em OV's com adaptações para aplicação em LTHs, sendo necessário definir valores aproximados para a velocidade de propagação da LTH como sendo uma linha totalmente homogênea. Portanto, para avaliar essa metodologia, comparando-a com a formulação proposta, bem como demonstrando os erros que podem surgir ao utilizar aproximações, a equação clássica de localização de faltas baseada em OV's (4.1) foi aplicada considerando uma velocidade constante igual à maior velocidade de propagação dentre os trechos da LTH modelada, nesse caso, $v_p = v_{Area}$, bem como pela média das velocidades encontradas na LTH, ou seja, $v_p = v_{avg}$, onde v_{avg} é a velocidade média calculada a partir do comprimento total e do tempo total de propagação da LTH simulada. Os resultados da localização da falta obtidos utilizando v_{Area} e v_{avg} em (4.1) são chamados de \tilde{d}_{Area} e \tilde{d}_{avg} , respectivamente. Finalmente, o erro absoluto no processo de localização de faltas para essas estimativas analisadas são representados por ε_{LTH} , ε_{Area} e ε_{avg} se referindo às localizações estimadas \tilde{d}_{LTH} , \tilde{d}_{Area} e \tilde{d}_{avg} , respectivamente. Em cada caso, esses erros foram calculados usando:

$$\varepsilon = |\tilde{d}_n - d_n|, \quad (5.1)$$

onde \tilde{d}_n é a distância de falta estimada (\tilde{d}_{LTH} , \tilde{d}_{Area} ou \tilde{d}_{avg}), e d_n é a distância real da falta simulada na n -ésima seção da LTH, tal como ilustrado na Figura 5.1.

Com o objetivo de comparar os erros ε_{LTH} , ε_{Area} e ε_{avg} e identificar os casos em que o algoritmo proposto teve um melhor desempenho frente às demais aplicações avaliadas, os resultados obtidos foram primeiramente apresentados em um gráfico de dispersão conforme ilustrado na Figura 5.10, onde o eixo horizontal representa os valores de ε_{Area} e ε_{avg} , e o eixo vertical representa os valores de ε_{LTH} . Portanto, duas regiões são definidas para ilustrar os casos em que a estimativa \tilde{d}_{LTH} foi mais precisa ou menos precisa que as estimativas \tilde{d}_{Area} e \tilde{d}_{avg} , ou seja,

casos nos quais $\varepsilon_{LTH} < \varepsilon_{Area}$ e ε_{avg} , ou $\varepsilon_{LTH} > \varepsilon_{Area}$ e ε_{avg} , respectivamente. Dessa forma, a linha na diagonal representa casos em que a metodologia proposta teve resultados similares aos demais e delimita as duas regiões sendo a região acima da diagonal aquela na qual a metodologia proposta teve menor precisão (região em branco) e a região abaixo da diagonal aquela na qual a metodologia proposta teve maior precisão (região hachurada).

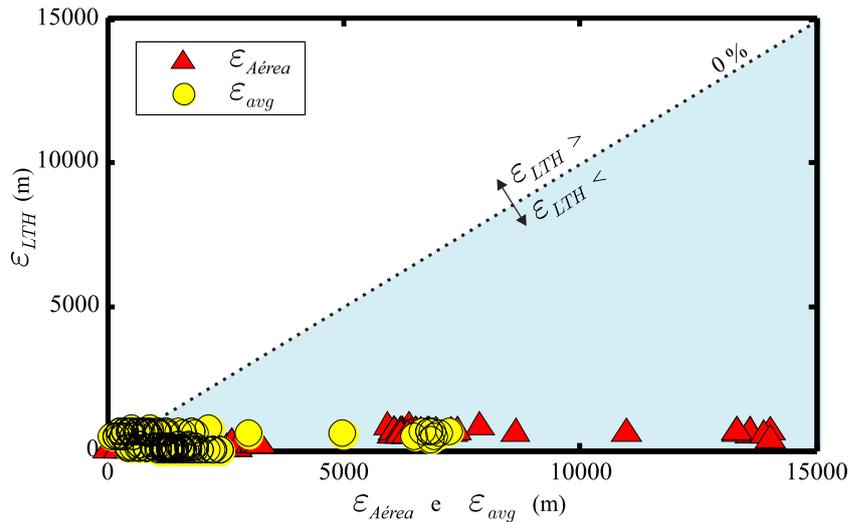


Figura 5.10. Gráfico de dispersão comparativo entre os erros obtidos quando utilizado o método proposto para LTHs e quando utilizado método clássico de localização de faltas baseado em OV de dois terminais utilizando as aproximações de $v_p = v_{Area}$ e $v_p = v_{avg}$.

Dos resultados observados na Figura 5.10 pode-se concluir que aproximar uma LTH por uma linha homogênea não é recomendado para os procedimentos clássicos de localização de faltas. Erros próximos a 14 km foram obtidos quando a LTH foi considerada como sendo totalmente composta por trechos de linha aérea e erros próximos a 7,2 km foram obtidos quando a LTH foi considerada como homogênea com uma velocidade média total. Embora o uso da velocidade média v_{avg} tenha reduzido os valores dos erros máximos encontrados, observa-se que ε_{avg} chegou a valores superiores a quatro vãos típicos de linha resultando em valores bem acima dos esperados para procedimentos de localização de faltas baseados em OV. A respeito dos valores obtidos por ε_{LTH} , os resultados estão todos próximos ao eixo horizontal do gráfico de dispersão, conforme ilustrado na Figura 5.10, indicando que os erros foram na ordem de dezenas de metros, sendo mais preciso do que as outras duas abordagens analisadas.

Uma vez concluído que aproximar a LTH como sendo totalmente composta por trechos de linha aérea é um procedimento inadequado, para as próximas análises apresentadas, somente

os erros ε_{LTH} e ε_{avg} serão avaliados comparativamente. Para promover uma ideia global da performance dessas duas metodologias de localização de faltas em LTHs, os valores obtidos para ε_{LTH} e ε_{avg} serão apresentados por meio da ferramenta de análise estatística chamada de boxplot. Este tipo de gráfico permite a representação da distribuição de um conjunto de dados em formato visual por meio de cinco índices: o valor máximo, representado pela cauda superior; o quartil superior, representado pelo limite superior da caixa; a mediana, representada pela linha intermediária da caixa; o quartil inferior, representado pelo limite inferior da caixa; e o valor mínimo, representado pela cauda inferior. O quartil superior, a mediana e o quartil inferior representam, respectivamente, o erro máximo verificado em 75%, 50% e 25% dos casos analisados.

Na Figura 5.11 são apresentados os valores dos erros absolutos ε_{LTH} e ε_{avg} para os casos simulados no cenário 1 de faltas. Inicialmente é possível identificar as ordens de grandezas dos erros obtidos, com ε_{avg} apresentando erros máximos da ordem dos milhares de metros, enquanto que ε_{LTH} apresenta erros máximos de poucas centenas de metros. De fato, observou-se um valor máximo para ε_{avg} igual a 2,3 km, o que não é um valor de erro prático esperado para aplicações de localização de faltas baseadas em OV's, para as quais esperam-se erros da ordem de poucas centenas de metros. Observando o valor mínimo de ε_{avg} para este grupo de análise, verifica-se um erro de 434 m, e a mediana da distribuição de estimativas com valor de 1,4 km. Assim, conclui-se que a aplicação do método tradicional de localização de faltas baseado em OV's mesmo utilizando uma aproximação pela velocidade média não é atrativo em termos de precisão na estimativa do local da falta.

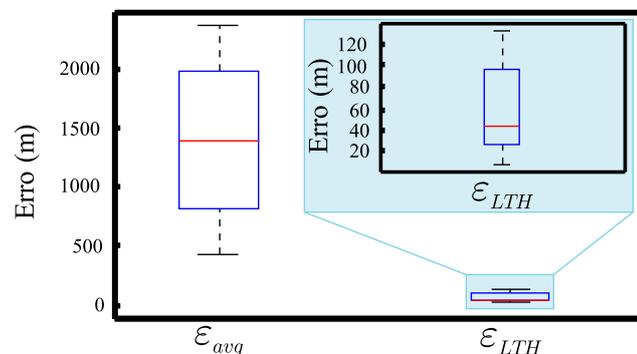


Figura 5.11. Cenário 1: erros na localização de faltas para casos na seção $n = 5$ (seção de maior velocidade).

Ao se aplicar o método de localização proposto para LTHs, observa-se uma significativa

redução no valor máximo para os erros obtidos de ε_{LTH} , chegando a 134 m na pior estimativa. Observa-se também que o valor mínimo de ε_{LTH} é menor que 9 m, indicando uma tendência para estimativa exata do local da falta a qual depende não só das precisões dos parâmetros da linha mas também da correta atuação dos métodos de detecção de transitórios. Ainda na Figura 5.11, tem-se que a mediana e a média da distribuição apresentaram valores iguais a 44,39 m e 58,84 m, respectivamente. Esses são coerentes com os observados em procedimentos tradicionais de localização de faltas baseados em OV's a partir de técnicas já consolidadas para linhas homogêneas, sendo esses menores que os comprimentos de vãos de linhas típicos encontrados em campo.

Observa-se nas Figuras 5.12(a) e 5.12(b), nas quais são apresentados os erros obtidos nos cenários 2 e 3, respectivamente, que os resultados apresentam comportamento similar aos obtidos para o cenário 1 já avaliado. Para os valores de ε_{avg} avaliados nestes dois cenários, foram encontrados valores máximo e mínimo na ordem de 2,38 km e 434,29 m, respectivamente, com mediana em 1,72 km. Por outro lado, ao aplicar o método dedicado para LTHs, observou-se que os valores máximos de ε_{LTH} não passaram de 260,61 m e os erros mínimos chegaram a atingir cerca de 11,07 m, evidenciando a precisão do método proposto nas situações avaliadas.

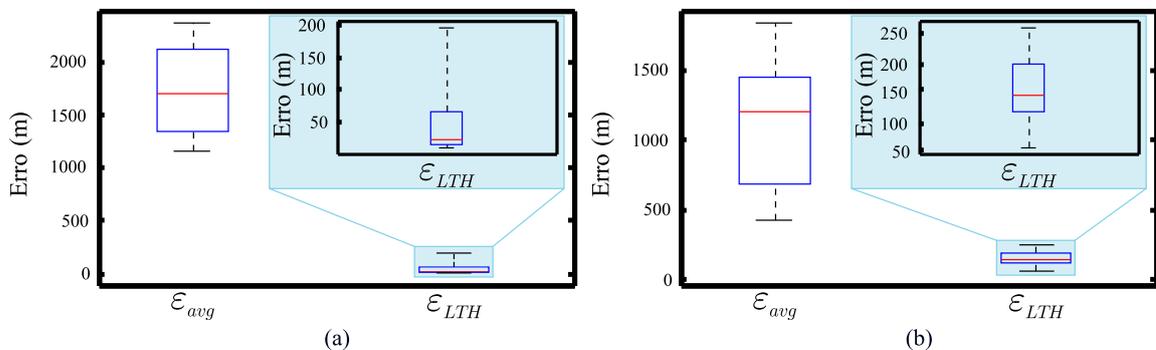


Figura 5.12. Erros na localização de faltas para casos: (a) na seção $n = 4$ (cenário 2); e (b) na seção $n = 6$ (cenário 3).

No cenário 4 de faltas, observaram-se elevados valores para os erros ε_{avg} , na ordem de 7,25 km, conforme ilustrado na Figura 5.13. No entanto, estes pontos são classificados como *outliers* uma vez que se apresentam de forma discrepante na distribuição de valores. Estes pontos podem ser justificados por erros na detecção das primeiras frentes de onda em um dos terminais devido à proximidade da falta e da presença de ruídos no sistema, o que distorce sobremaneira as medições relacionadas às primeiras frentes de onda lançadas pela falta. Excluindo-se os valores

discrepantes e observando os quartis do boxplot, conclui-se que para esse conjunto de testes os valores de ε_{avg} foram os menores até então observados. Para este último cenário foram observados valores máximos de ε_{avg} na ordem de 1,85 km enquanto que os valores mínimos chegaram a aproximadamente 68,77 m, excluindo-se os *outliers*. Com essa redução, a mediana da distribuição apresentada para ε_{avg} obteve valor na ordem de 737,33 m, valor este agora condizente com o esperado para aplicações de localização de faltas em OV's. A redução no erro ε_{avg} observada neste cenário pode ser justificada pelo fato de que os trechos a jusante e a montante dos pontos de falta simulados terem velocidades de propagação média próxima a v_{avg} utilizada no cálculo de ε_{avg} , sendo assim, a LTH apresenta características próximas às de uma linha homogênea quando as faltas ocorrem próximas aos terminais monitorados. No entanto, essa aproximação, conforme demonstrado anteriormente, não é generalista, de modo que apresenta erros relevantes para faltas em outros trechos da LTH. Por outro lado, para o cenário 4, o método proposto neste trabalho apresentou erros ε_{LTH} máximos e mínimos na ordem de 800 m e 410 m, respectivamente, e mediana abaixo dos 653 m. Do exposto, nota-se que a precisão da aplicação do método proposto na LTH simulada é mais afetada em casos de faltas próximas as barras da linha, tal como esperado para qualquer método baseado em OV's. Mesmo assim, considera-se que a precisão das estimativas obtidas é bastante satisfatória, apresentando o erro médio abaixo de três vãos típicos de linha.

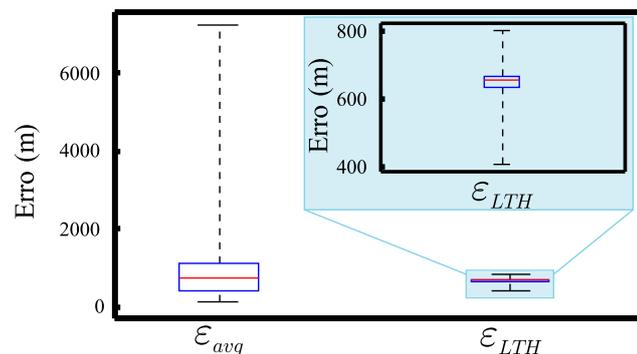


Figura 5.13. Cenário 4: erros na localização de faltas para casos próximos aos terminais L e R da LTH.

5.2.5 Síntese dos Resultados Obtidos

Inicialmente foram apresentados resultados de análises pontuais para exemplificação do processo de detecção dos transitórios, identificação do trecho com falta e estimativa do local de falta conforme ilustrado nas Figuras 5.5 até 5.7. Adicionalmente foram realizadas análises de simulações considerando a existência de imprecisões nos parâmetros da linha afim de identificar as influências no desempenho do algoritmos. Estes resultados foram ilustrados na Figura 5.8. Por fim, foram apresentadas análises em massa de forma comparativa para aproximações comumente reportadas na literatura e, na Figura 5.10, ficou evidenciado que aproximar uma LTH como sendo uma linha totalmente aérea é inviável em termos de aplicação de método de localização clássico baseado em OV's para linhas homogêneas. Tendo em vista essa conclusão preliminar, nas Figuras 5.11 até 5.13 foram ilustrados os gráficos do tipo boxplot para os cenários 1 a 4 avaliados. A aplicação do método clássico de localização de faltas baseados em OV's para linhas homogêneas resultou em erros máximos na ordem de 2,4 km, mesmo considerando uma velocidade média da linha. Em situações práticas, esses níveis de erros podem resultar em atrasos adicionais no procedimento de restauração do sistema com defeito, especialmente se consideradas as particularidades de LTHs em trechos não aéreos. No entanto, o máximo valor de erro observado quando aplicada a solução proposta neste trabalho foi da ordem de 800 m no pior caso e o valor mínimo próximo a 9 m, com uma média de erro de 61 m. Dos resultados foi possível constatar que a estimativa obtida para os locais de falta simulados é viável para aplicação em procedimentos de localização de faltas em LTHs, resultando em erros menores que dois vão de torres típicos em LTs aéreas, por exemplo, de forma independente do número de trechos do sistema. Adicionalmente, verificou-se que para todos os casos simulados, o processo de identificação do trecho com falta apresentou como saída os valores conforme esperados, podendo ser também empregado em soluções de manutenção e análise de perturbações em LTHs.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta tese de doutorado, foi apresentado um novo método generalizado de localização de faltas em LTHs com múltiplos trechos a partir de dados de dois terminais baseado na teoria de OV. O algoritmo é capaz de identificar o trecho com falta e, posteriormente, calcular de forma precisa com base no método tradicional de localização de faltas para LTs a distância da falta. Embora existam métodos capazes de localizar falta em linhas não-homogêneas com múltiplos trechos, do conhecimento do autor, nenhum deles possui uma solução generalizada conforme proposto neste trabalho. Desta forma, casos de aplicação destes métodos não contemplariam a localização de faltas em LTHs com um número elevado de trechos com diferentes características elétricas, resultariam em soluções que exigiriam um maior esforço computacional ou que seriam mais susceptíveis a erros em casos de aplicações em linhas reais. Ademais, de uma ampla busca na literatura, não foram identificados trabalhos que proponham metodologias de acomodação de incertezas nos parâmetros da LTH, solução essa contemplada no algoritmo proposto.

Para desenvolver a solução apresentada, propõe-se inicialmente uma formulação matemática generalizada de simples ajuste para identificação do trecho com falta, a qual é capaz de, a partir das informações de detecção das primeiras frentes de onda em cada terminal monitorado, identificar o trecho com falta. Propõe-se também uma nova formulação compacta e generalizada para localização de faltas baseada na teoria de OV em LTHs de múltiplos trechos, sendo esta desenvolvida de tal forma para viabilizar sua aplicação em dispositivos reais localizadores de faltas baseados em OV. De fato, uma vez que se parte do princípio do método tradicional já embarcado em alguns dispositivos localizadores de falta, demonstrou-se a possibilidade de cálculo de um fator de erro, o qual pode ser corrigido quando da aplicação do método em sistemas reais. Assim, o procedimento consistiria em uma simples adição de um termo de correção de erro na localização já estimada por dispositivos em campo. Uma vez que o algoritmo necessita de informações dos parâmetros da linha, a formulação proposta inicialmente foi ainda

ampliada com o objetivo de acomodar possíveis imprecisões nestes parâmetros. Nesta última versão do equacionamento, a detecção do trecho com falta é apresentada em forma de zonas de certeza e incerteza a depender do fator de imprecisão considerado e as estimativas dos locais de falta são apresentados em forma de campo de busca.

Adicionalmente ao exposto até então, propõe-se também nesse trabalho o uso de uma técnica sensível de detecção de transitórios uma vez que, em linhas não-homogêneas, espera-se que estes sejam atenuados. Ruídos também são esperados nesses sistemas, e portanto também foram avaliados no sentido de analisar o desempenho do método de detecção de OV's em situações mais adversas. Portanto, a técnica utilizada neste trabalho possui como uma de suas características principais o cálculo de um limiar adaptativo e uma alta sensibilidade na detecção dos primeiros transitórios, os quais são de interesse para a aplicação proposta. Neste contexto, vale ressaltar que a metodologia apresentada não faz o uso de detecções de transitórios oriundos de reflexões, seja nos pontos de falta ou em qualquer outro ponto do sistema, tornando-a mais robusta. De fato, a utilização de transitórios refletidos é conhecida como fator limitante até mesmo nos procedimentos de localização de faltas em linhas homogêneas, sendo considerado ainda um desafio para aplicações em LTHs.

A avaliação do método proposto foi realizada por meio de simulações digitais de faltas via ATP, nas quais foi considerada uma LTH modelada com parâmetros provenientes de sistemas elétricos reais. Os resultados obtidos comprovam a eficiência do método proposto em identificar corretamente o trecho com falta e localizar com precisão os pontos de faltas mesmo em situações de transitórios atenuados e na presença de ruídos eletromagnéticos no sistema. A consideração de imprecisões nos parâmetros da linha viabilizou uma análise mais conservadora e, dos casos simulados, todos os pontos de falta simulados se localizaram dentro da zona de busca obtida via utilização do algoritmo proposto. Os erros observados são de poucas dezenas de metros nos piores casos, valores estes atrativos para viabilizar a rápida restauração da linha com defeito em caso de faltas permanentes. No entanto, muito embora as análises apresentadas contemplem uma diversa gama de situações de falta, são enumeradas algumas considerações finais acompanhadas de propostas para investigações futuras:

1. O procedimento de identificação do trecho com falta pode ser crucial para lógicas de religamento e sua precisão deve ser melhor avaliada em casos de faltas próximas às junções

dos trechos e em situações nas quais os parâmetros físicos e elétricos não são conhecidos com precisão. Desse modo, se mostra interessante o desenvolvimento adicional de estratégias para casos nos quais a falta é identificada em uma zona de incerteza;

2. O método de localização de faltas proposto em sua versão de identificação pontual do defeito pode também ser afetado por imprecisões nos parâmetros da linha. Assim torna-se importante considerar o efeito dessas imprecisões no processo de localização de faltas a partir do uso do fator de incerteza proposto. Nesse contexto, sugerem-se estudos sobre os níveis de incerteza típicos em parâmetros de LTHs, de modo a viabilizar um melhor ajuste dos fatores de incerteza;
3. Transitórios atenuados combinados com a presença de ruídos podem culminar em erros na detecção das primeiras OV's, mesmo quando utilizados métodos sensíveis de detecção. Portanto, o desenvolvimento de estratégias de filtragem ainda mais robustas, e que permitam inclusive processar informações de frentes de onda refletidas ao longo do sistema e da falta se mostra um tópico de grande interesse para pesquisas futuras;
4. O método proposto neste trabalho foi analisado de forma comparativa com métodos aplicados em linhas homogêneas comumente utilizados em situações práticas por operadores. No entanto, a consolidação do método pode ser apresentada a partir de resultados comparativos com técnicas dedicadas para linhas não-homogêneas presentes na literatura, incluindo soluções disponíveis em dispositivos reais;
5. O uso de LTHs em linhas em sistemas ramificados é também um desafio passível de investigação em trabalhos futuros. Nesse caso, sugere-se abordar tal problema em estudos futuros, contemplando agora a generalização dos métodos em casos de LTs com três ou mais terminais;
6. Um último ponto sugerido consiste em avaliar os benefícios da solução proposta para o caso de linhas aéreas que apresentam não-homogeneidades longitudinais. Para tanto, sugerem-se estudos de medição de parâmetros ao longo de linhas reais, para fins de desenvolvimento de estratégias de otimização dos processos de localização de faltas baseado em OV's atualmente empregados em sistemas reais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Altay, O.; Gursoy, E.; Font, A.; Kalenderli, O. Travelling wave fault location on hybrid power lines. In: *2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–4. Citado na página 42.
- 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*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–4. Citado 5 vezes nas páginas i, iv, 33, 35, and 49.
- Ametani, A.; Ohno, T.; Nagaoka, N. *Cable System Transients: Theory, Modeling and Simulation*. Singapore: Ed. Wiley, 2010. (IEEE Press). ISBN 978-1-118-70212-3. Citado na página 1.
- Araújo, A. E. A.; Neves, W. L. A. *Cálculo de Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Energia*. Belo Horizonte, MG - Brasil: Editora UFMG, 2005. Citado na página 10.
- Bawart, M.; Marzinotto, M.; Mazzanti, G. Diagnosis and location of faults in submarine power cables. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, v. 32, n. 4, p. 24–37, July 2016. ISSN 0883-7554. Citado na página 1.
- 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 na página 13.
- Clarke, E. *Circuit Analysis of A-C Power Systems - Vol I*. 3. ed. New York, USA: John Wiley & Sons, 1948. Citado na página 12.
- Colla, L.; Gatta, F. M.; Geri, A.; Lauria, S. Lightning overvoltages in hv-ehv mixed overhead-cable lines. In: *2017 International Conference on Power Systems Transients (IPST'07)*. [S.l.: s.n.], 2017. Citado 2 vezes nas páginas 65 and 66.
- Costa, F.; Sobrinho, A.; Ansaldi, M.; Almeida, M. The effects of the mother wavelet for transmission line fault detection and classification. In: *Proceedings of the 2011 3rd International Youth Conference on Energetics (IYCE)*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1 –6. Citado 2 vezes nas páginas 22 and 23.
- Costa, F. B. Boundary wavelet coefficients for real-time detection of transients induced by faults and power-quality disturbances. *IEEE Trans. on Power Delivery*, v. 29, n. 6, p. 2674–2687, Dec 2014. ISSN 0885-8977. Citado 6 vezes nas páginas 3, 15, 24, 25, 26, and 27.
- Costa, F. B.; Souza, B. A.; Brito, N. S. D. A wavelet-based algorithm to analyze oscillographic data with single and multiple disturbances. In: *2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting: Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 1–8. ISSN 1932-5517. Citado 2 vezes nas páginas 22 and 23.

- Costa, F. B.; Souza, B. A.; Brito, N. S. D.; Silva, K. M. Transformada Wavelet Discreta Aplicada ao Diagnóstico de Distúrbios. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, Belém, Pará, Brasil, maio 2010. Citado 3 vezes nas páginas 21, 22, and 23.
- Faybisovich, V.; Feiginov, M.; Khoroshev, M. I. Investigation of frequency domain traveling wave fault location methods. In: *2010 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–9. Citado na página 14.
- Gale, P.; Crossley, P.; Xu Bingyin; Ge Yaozhong; Cory, B.; Barker, J. Fault location based on travelling waves. In: *Fifth International Conference on Developments in Power System Protection*. [S.l.: s.n.], 1993. p. 54–59. Citado 10 vezes nas páginas i, ii, iv, 31, 32, 33, 36, 37, 39, and 49.
- GE GENERAL ELECTRIC. *RPV311 - Distributed Multifunction Fault Recorder*. [S.l.], 2019. Disponível em: <<https://www.gegridsolutions.com/app/ViewFiles.aspx?prod=RPV311&type=3>>. Citado na página 18.
- Gilany, M.; IBRAHIM, D.; ELDIN, E. Traveling-wave-based fault-location scheme for multiend-aged underground cable system. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 22, n. 1, p. 82–89, 2007. ISSN 0885-8977. Citado 5 vezes nas páginas ii, iv, 37, 38, and 49.
- Glover, J. D.; Sarma, M. S.; Overbye, T. J. *Power System Analysis and Design*. 5. ed. USA: CL - Engineering, 2012. Citado na página 11.
- Gong, Y.; Mynam, M.; Guzman, A.; Benmouyal, G.; Shulim, B. Automated fault location system for nonhomogeneous transmission networks. In: *2012 65th Annual Conference for Protective Relay Engineers*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 374–381. Citado na página 2.
- Greenwood, A. *Electrical Transients in Power Systems*. New York, NY - USA: Wiley-Interscience, 1991. Citado na página 34.
- Gregory, B. Cable technology and applications in the 21st century. *IEEE Power Engineering Review*, v. 20, n. 9, p. 6–7, Sept 2000. ISSN 0272-1724. Citado na página 1.
- Hamidi, R. J.; Livani, H. Traveling-wave-based fault-location algorithm for hybrid multiterminal circuits. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 32, n. 1, p. 135–144, Feb 2017. ISSN 0885-8977. Citado na página 2.
- Hassan, H. A. A.; Grainger, B. M.; McDermott, T. E.; Reed, G. F. Fault location identification of a hybrid hvdc-vsc system containing cable and overhead line segments using transient data. In: *2016 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T D)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–5. ISSN 2160-8563. Citado na página 42.
- IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE. *EMTP Reference Models for Transmission Line Relay Testing*. [S.l.], 2004. Disponível em: <<http://www.pes-psrc.org>>. Citado na página 67.
- Jensen, C. F. *Online Location of Faults on AC Cables in Underground Transmission Systems*. 1. ed. [S.l.]: Springer International Publishing, 2014. (Springer Theses). ISBN 978-3-319-05397-4, 978-3-319-05398-1. Citado 5 vezes nas páginas 2, 42, 49, 52, and 53.

Kasztenny, B.; Guzmán, A.; Mynam, M. V.; Joshi, T. Locating faults before the breaker opens ? adaptive autoreclosing based on the location of the fault. In: *2018 71st Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–15. ISSN 2474-9753. Citado 5 vezes nas páginas ii, iv, 44, 45, and 49.

Leite Jr., E. J. S.; Lopes, F. V. Traveling wave-based fault location formulation for hybrid lines with two sections. In: *2017 Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–4. Citado na página 42.

Leite Jr., E. J. S.; Lopes, F. V.; Costa, F. B.; Neves, W. L. A. Closed-form solution for traveling wave-based fault location on non-homogeneous lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 34, n. 3, p. 1138–1150, June 2019. ISSN 0885-8977. Citado 2 vezes nas páginas 48 and 49.

Leite Jr., E. J. S.; Lopes, F. V.; Ribeiro, J. P. G. Traveling wave-based fault location on two-segment hybrid lines. In: *2018 IEEE Power Energy Society General Meeting (PESGM)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–5. ISSN 1944-9933. Citado na página 42.

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. *Przegld Elektrotechniczny*, v. 88, n. 12, p. 254–258, abr. 2012. Citado 5 vezes nas páginas i, iv, 35, 36, and 49.

Livani, H.; Evrenosoglu, C. Y. A machine learning and wavelet-based fault location method for hybrid transmission lines. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 5, n. 1, p. 51–59, Jan 2014. ISSN 1949-3053. Citado na página 1.

Lopes, F. V. *Localização de Faltas em Tempo Real Baseada na Teoria de Ondas Viajantes Usando Dados Não Sincronizados de Dois Terminais*. 191 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, Brasil, mai. 2014b. Citado 7 vezes nas páginas iii, 10, 12, 13, 15, 31, and 33.

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, Oct 2016. ISSN 0885-8977. Citado 3 vezes nas páginas ii, 40, and 49.

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 5 vezes nas páginas ii, iv, 27, 41, and 49.

Lopes, F. V.; Fernandes, D.; Neves, W. L. A. A traveling-wave detection method based on park's transformation for fault locators. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 28, n. 3, p. 1626–1634, July 2013. ISSN 0885-8977. Citado 8 vezes nas páginas iii, 15, 19, 20, 21, 22, 27, and 28.

Lopes, F. V.; Neves, W.; Leite Jr, E.; Ribeiro, J. P. Aplicação do Filtro Differentiator-Smoother Durante a Análise de Ondas Viajantes em Linhas de Transmissão. *Congresso Brasileiro de Automática*, João Pessoa, Paraíba, Brasil, Setembro 2018. Citado 3 vezes nas páginas iii, 17, and 18.

Lopes, F. V.; Neves, W. L. A.; Fernandes, D. A tdq-based fault detector for digital power system relaying. In: *2014 IEEE PES General Meeting | Conference Exposition*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–5. ISSN 1932-5517. Citado 2 vezes nas páginas 27 and 28.

- 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 6 vezes nas páginas ii, iv, 2, 38, 39, and 49.
- 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, Jan 1982. ISSN 0018-9510. Citado 2 vezes nas páginas 64 and 65.
- Naidu, S. R. *Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência*. [S.l.]: Grafset, 1985. Citado na página 11.
- Nanayakkara, O. M. K. K.; Rajapakse, A. D.; Wachal, R. Location of dc line faults in conventional hvdc systems with segments of cables and overhead lines using terminal measurements. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 27, n. 1, p. 279–288, Jan 2012. ISSN 0885-8977. Citado 7 vezes nas páginas ii, iv, 2, 44, 46, 47, and 49.
- Ohno, T. *Dynamic Study on the 400 kV 60 km Kyndbyværket - Asnæsværket Line*. Tese (Doutorado) — Department of Energy Technology, Aalborg University, 2012. Citado na página 67.
- Oppenheim, A. V.; Schaffer, R. W. *Discrete-Time Signal Processing*. 2. ed. New Jersey, USA: Prentice-Hall, 1998. Citado na página 19.
- Park, R. H. Two-reaction theory of synchronous machines generalized method of analysis-part i. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, v. 48, n. 3, p. 716–727, July 1929. ISSN 0096-3860. Citado na página 19.
- Percival, D. B.; Walden, A. T. *Wavelet Methods for Time Series Analysis*. New York, USA: Cambridge University Press, 2000. Citado 2 vezes nas páginas 15 and 23.
- Pires, A. O.; Matos, R. R.; Cruz, I. H.; Murakami, M.; Pimental, C. Desenvolvimento de metodologia para a identificação de faltas por ondas viajantes em linhas mistas. *XIII Seminário Técnico de Proteção e Controle*, Brasília, Brasil, 2016. Citado na página 42.
- Saha, M. M.; Izykowski, J.; Rosolowski, E. *Fault Location on Power Networks*. London: Ed. Springer, 2010. (Power Systems). ISBN 978-1-84882-885-8. Citado 12 vezes nas páginas 2, 10, 11, 15, 24, 27, 29, 30, 37, 39, 50, and 51.
- Santoso, S.; Powers, E. J.; Grady, W. M. Power quality disturbance data compression using wavelet transform methods. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 12, n. 3, p. 1250–1257, July 1997. ISSN 0885-8977. Citado na página 27.
- Schweitzer, E.; B., K.; Guzman, A.; Mynam, M.; Fischer, N.; Skendzic, V. Defining and Measuring the Performance of Line Protective Relays. *43rd Annual Western Protective Relay Conference*, oct. 2016. Citado na página 14.
- Schweitzer, E.; Guzmán, A.; Mynam, M.; Skendzic, V.; Kasztenny, B.; Gallacher, C.; Marx, S. Accurate single-end fault location and line-length estimation using traveling waves. In: *13th International Conference on Developments in Power System Protection*. [S.l.: s.n.], 2016. Citado na página 35.

- Schweitzer, E.; Hou, D. Filtering for protective relays. In: *47th Annual Georgia Tech Protective Relaying Conference*. [S.l.: s.n.], 1993. Citado na página 15.
- Schweitzer, E. O.; Guzman, A.; Mynam, M. V.; Skendzic, V.; Kasztenny, B.; Marx, S. Locating faults by the traveling waves they launch. In: *40th Annual Western Protective Relay Conference*. [S.l.: s.n.], 2013. Citado 4 vezes nas páginas 2, 15, 16, and 74.
- SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES. *Ultra-High-Speed Transmission Line Relay, Traveling Wave Fault Locator, High Resolution Event Recorder*. [S.l.], 2017. Disponível em: <<https://selinc.com/promotional/SEL-T400L/>>. Citado 6 vezes nas páginas 2, 27, 28, 30, 53, and 64.
- Silva, D. M.; Costa, F. B.; Miranda, V.; Leite, H. Wavelet-based analysis and detection of traveling waves due to dc faults in lcc hvdc systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 104, n. 1, p. 291–300, Jan. 2019. Citado 4 vezes nas páginas 24, 25, 26, and 27.
- Silva, K. M. e. *Estimação de Fasores Baseada na Transformada Wavelet para Uso na Proteção de Distância de Linhas de Transmissão*. 203 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, Brasil, abr. 2009. Citado na página 19.
- 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 2 vezes nas páginas 30 and 31.
- Tang, Y.; Wang, H. F.; Aggarwal, R. K.; Johns, A. T. Fault indicators in transmission and distribution systems. In: *DRPT2000. International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies. Proceedings (Cat. No.00EX382)*. [S.l.: s.n.], 2000. p. 238–243. Citado na página 30.
- Vargas, J.; Guzman, A.; Robles, J. Underground/submarine cable protection using a negative-sequence directional comparison scheme. In: *26th Annual Western Protective Relay Conference*. [S.l.: s.n.], 1999. Citado 2 vezes nas páginas 1 and 67.
- Wedepohl, L. M.; Wilcox, D. J. Transient analysis of underground power-transmission systems. system-model and wave-propagation characteristics. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, v. 120, n. 2, p. 253–260, February 1973. ISSN 0020-3270. Citado na página 12.
- Yang, Y.; Hepburn, D. M.; Zhou, C.; Zhou, W.; Bao, Y. On-line monitoring of relative dielectric losses in cross-bonded cables using sheath currents. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, v. 24, n. 5, p. 2677–2685, Oct 2017. ISSN 1070-9878. Citado na página 1.
- Zhang, S.; Gao, H.; Song, Y. A new fault-location algorithm for extra-high-voltage mixed lines based on phase characteristics of the hyperbolic tangent function. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 31, n. 3, p. 1203–1212, June 2016. ISSN 0885-8977. Citado na página 2.
- Zimath, S. L.; Ramos, M. A. F.; Filho, J. E. S. Comparison of impedance and travelling wave fault location using real faults. In: *2010 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–5. Citado na página 33.

Zipp, J.; Conroy, M.; Behrendt, K.; Gallen, T.; Hasenwinkle, I.; Hedding, R.; Horwath, J.; Jacobson, C.; Kerrigan, P.; Moskos, G.; Pastore, C.; Rebbapragada, V.; Shroff, D.; Sufana, C.; Taylor, A.; Varneckas, V.; Wiedman, T. Protective relaying considerations for transmission lines with high voltage ac cables. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 12, n. 1, p. 83–96, Jan 1997. ISSN 0885-8977. Citado na página 1.