

**METODOLOGIA ADAPTATIVA BASEADA NA TEORIA DE  
ONDAS VIAJANTES PARA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM  
LINHAS DE TRANSMISSÃO**

**GUSTAVO ABREU DA CUNHA**

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

**FACULDADE DE TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

Universidade de Brasília  
Faculdade de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Elétrica

**METODOLOGIA ADAPTATIVA BASEADA NA TEORIA DE  
ONDAS VIAJANTES PARA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM  
LINHAS DE TRANSMISSÃO.**

**GUSTAVO ABREU DA CUNHA**

Dissertação de Mestrado Submetida ao Departamento de Engenharia Elétrica da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

**APROVADA POR:**

---

Prof. Felipe Vigolvinho Lopes, DSc. (ENE-UnB)  
(Orientador)

---

Prof. Kleber Melo e Silva, DSc. (ENE-UnB)  
(Examinador Interno)

---

Prof. Flávio Bezerra Costa, DSc. (UFRN)  
(Examinador Externo)

Brasília/DF, Novembro de 2020.

## FICHA CATALOGRÁFICA

CUNHA, GUSTAVO ABREU

Metodologia Adaptativa Baseada na Teoria de Ondas Viajantes para Localização de Faltas em Linhas de Transmissão. [Distrito Federal] 2020.

xiii, 86p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Mestre em Engenharia Elétrica, 2020).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Elétrica

1. Localização de Faltas

2. Linha de Transmissão

3. ATP

4. Ondas viajantes

I. ENE/FT/UnB

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

CUNHA, G. A. (2020). Metodologia Adaptativa Baseada na Teoria de Ondas Viajantes para Localização de Faltas em Linhas de Transmissão, Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGENE.DM-752/20 OU PPGENE.TD-752/20, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 89p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Gustavo Abreu da Cunha

TÍTULO: Metodologia Adaptativa Baseada na Teoria de Ondas Viajantes para Localização de Faltas em Linhas de Transmissão.

GRAU: Mestre ANO: 2020

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

---

Gustavo Abreu da Cunha

Departamento de Eng. Elétrica (ENE) - FT

Universidade de Brasília (UnB)

Campus Darcy Ribeiro

CEP 70919-970 - Brasília - DF - Brasil

## **AGRADECIMENTOS**

Antes de tudo, agradeço a Deus pela oportunidade me dada para realizar este trabalho e todos os estudos realizados até aqui, uma vez que poucos possuem esta mesma oportunidade.

Gostaria de agradecer a Tania, que com tanta paciência de mãe, sempre me motivou a conquistar este objetivo. Agradeço também os meus irmãos Marcos Henrique, Gabriel e Maria Helena pelos esforços e feitos para este trabalho, além do entendimento de minhas ausências em determinados momentos familiares.

Agradeço meu orientador, professor Felipe Vigolvino Lopes, que se manteve presente ao longo de todo o trabalho, me confortando, me direcionando e me ensinando, dia após dia, tanto a ciência, dentro do aspecto em que vivemos neste trabalho, quanto a amizade criada a partir de nossas conversas.

Aos meus amigos do LAPSE, em especial Professor Kleber, Tiago, Letícia, Serpa, João, Tenório, Pedro, Eduardo Leite, Edu, Marayanne e Jônatas, cuja amizade somente me incentivou a alcançar resultados que jamais imaginaria chegar sozinho. Agradeço também aos momentos de descontração que vivemos e que atenuaram a tensão, me dando energias para continuar.

Aos meus amigos do curso de Engenharia Elétrica, em especial ao Nicolas, por toda a ajuda para este trabalho. Também aos meus amigos de infância e de escola Ricardo Diniz, Bernardo, Gustavo M., Anderson, Hugo, Ricardo Paranhos e Luis.

À CAPES, pelo apoio financeiro prestado durante a elaboração dessa dissertação.

## RESUMO

Com o crescimento da quantidade de linhas de transmissão (LTs) no Brasil e no mundo, estudos sobre localização de faltas seguem expandindo, de forma a garantir serviços de fornecimento da energia elétrica com qualidade. Assim, métodos que identificam o local de ocorrência de faltas com precisão têm sido frequentemente reportados na literatura com o objetivo de melhorar o processo de restabelecimento de LTs após desligamentos não programados. Dentre as metodologias mais utilizadas, destacam-se os métodos de localização de faltas baseados na teoria de ondas viajantes (OVs), que serão referenciados neste trabalho por meio da sigla LFOV. Nesse contexto, sabe-se que os métodos LFOV existentes podem apresentar dificuldades de aplicação, tais como: 1) dependência da sincronização de dados quando da utilização de medições de dois ou mais terminais. Isso torna o processo de LFOV problemático quando da perda da referência comum de tempo; 2) Necessidade de análise de grandezas de modo terra, limitando a aplicação apenas em casos de faltas que apresentem conexão para o terra; 3) Dependência de ajustes, tal como o tempo de propagação da LT monitorada, que podem apresentar incertezas em virtude de variações climáticas e operativas no sistema monitorado; 4) Dependência de pré-estimativas do ponto de defeito, as quais podem eventualmente não se encontrar disponíveis. Portanto, neste trabalho, apresenta-se um método adaptativo de LFOV baseado em dados de dois terminais, que supera as limitações supracitadas. O método é capaz de estimar o local do defeito de forma independente de sincronização de dados, auto-adaptando-se aos parâmetros da LT por meio da análise apenas de modos aéreos, sem requerer o cálculo de pré-estimativas do local do defeito. Assim, a partir da avaliação do método proposto, comprova-se um desempenho promissor, com erros médios da ordem de um ou dois vãos típicos de torre, e com facilidades práticas inéditas até então no mercado.

**Palavras-chave:** Localização de Faltas, Ondas Viajantes, Transitórios Eletromagnéticos, Linhas de Transmissão, ATP.

## ABSTRACT

The increasing of power transmission networks in Brazil and worldwide has led fault location studies to expand, in order to guarantee high quality electrical power supply services. Hence, methods capable of accurately identifying the transmission line fault position have been often reported in the literature with the aim to improve line restoration procedures after non-programmed outages. Among the most used methodologies, traveling wave-based techniques stand out, being referred to throughout this manuscript as LFOV. In this context, one knows that existing LFOV methods may present application difficulties, namely: 1) data synchronization requirements when measurements taken from two or more terminals are taken into account. It leads the LFOV-based fault location process to be problematic when the common time reference is lost; 2) Need for the analysis of ground mode quantities, which limits the algorithm application only to grounded faults; 3) Dependence on line parameter settings, such as the line propagation time, which can present uncertainties due to variations on weather and operational conditions; 4) Need for fault distance pre-estimations, which may be eventually unavailable. Therefore, in this work, an adaptive LFOV method based on two-terminal data is presented, which overcomes the above-mentioned limitations. The method is able to estimate the fault distance without requiring data time alignment, and self-adjusting to the line parameters from the analysis of only aerial mode quantities, without the need for fault distance pre-estimations. From the method evaluation, a promising performance is verified, presenting average errors of the order of one to two typical tower spans, with practical application facilities which are unpublished in the market so far.

**Keywords:**

Fault Location, Traveling Waves, Electromagnetic Transients, Transmission Line, ATP.

# SUMÁRIO

<b>Sumário</b>	i
<b>Lista de Figuras</b>	iv
<b>Lista de Tabelas</b>	vi
<b>Lista de Símbolos</b>	vii
<b>Glossário</b>	xi
<b>Capítulo 1 – Introdução</b>	1
1.1 Contextualização do Tema . . . . .	1
1.2 Motivação . . . . .	3
1.3 Objetivos do Trabalho . . . . .	7
1.4 Contribuições da Dissertação . . . . .	8
1.5 Organização do Texto . . . . .	9
<b>Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica</b>	10
2.1 Método de Um Terminal Clássico - (M1TC) . . . . .	10
2.2 Método de Um Terminal aplicável para Faltas com Terra (M1T0) . . . . .	12
2.3 Método de Um Terminal com Três Detecções (M1T3D) . . . . .	13
2.4 Método de Dois Terminais Clássico (M2TC) . . . . .	14
2.5 Método de Dois Terminais Necessitando da Onda Viajante Refletida (M2TRG) .	14
2.6 Método de Dois Terminais para Faltas com Terra (M2T0) . . . . .	16
2.7 Método de Dois Terminais Utilizando Apenas modos Aéreos sem Necessidade de Sincronismo (M2TS) . . . . .	17
2.8 Método para Identificação da Onda Viajante Refletida . . . . .	18
2.9 Efeito da Frequência de Amostragem para Precisão de Localização de Faltas . .	19
2.10 Síntese do Capítulo . . . . .	20
<b>Capítulo 3 – Fundamentação Teórica</b>	22

3.1	Revisão Teórica Sobre Ondas Viajantes . . . . .	22
3.2	Impedância Característica e Velocidade de Propagação . . . . .	25
3.3	Estudo das Terminações para Ondas Viajantes . . . . .	26
3.4	Propagação das Ondas Viajantes e Diagrama de Bewley . . . . .	28
3.5	Análise de Transitórios Eletromagnéticos . . . . .	30
3.5.1	Filtro <i>Differentiator-Smoother</i> . . . . .	30
3.6	Transformação de Clarke . . . . .	31
3.7	Síntese do Capítulo . . . . .	32
<b>Capítulo 4 – Método Proposto</b>		<b>34</b>
4.1	Pré-Processamento dos Sinais . . . . .	35
4.2	Método para Identificação da Onda Viajante Refletida . . . . .	35
4.2.1	Passo 1 do SETWFL - Janelamento e Seleção de Picos . . . . .	36
4.2.2	Passo 2 do SETWFL - Cálculo do Instante da Onda Refratada para Cada Hipótese . . . . .	37
4.2.3	Passo 3 do SETWFL - Aplicação da Metodologia RTT para Definição dos Primeiros Pesos Ponderados . . . . .	38
4.2.4	Passo 4 do SETWFL - Aplicação da Metodologia ETW para Definição do Último Peso Ponderado Juntamente com Uma <i>Flag</i> utilizada . . . . .	39
4.2.5	Passo 5 do SETWFL - Identificação da Onda Refletida e Localização da Falta . . . . .	42
4.3	Estimativa do Comprimento da LT e do Tempo de Trânsito a partir de Conceitos Empregados no Método M2TS . . . . .	42
4.4	Descrição do Método Proposto . . . . .	44
4.4.1	Método Proposto - Passo 1 - Cálculo dos Possíveis Valores de Tempo de Propagação . . . . .	45
4.4.2	Método Proposto - Passo 2 - Definição de Valores Válidos dos Tempos de Propagação . . . . .	47
4.4.3	Método Proposto - Passo 3 - Avaliando os Valores Válidos do Tempo de Propagação . . . . .	47
4.4.4	Método Proposto - Passo 4 - Identificando o Valor Ótimo do Tempo de Propagação por Pesos Ponderados . . . . .	48
4.4.5	Método Proposto - Passo 5 - Cálculo do Local da Falta . . . . .	49
4.5	Síntese do Capítulo . . . . .	49
<b>Capítulo 5 – Avaliação do Método Proposto e Resultados Obtidos</b>		<b>50</b>
5.1	Sistema Teste . . . . .	50
5.2	Exemplo de Aplicação . . . . .	51
5.2.1	Exemplo de Aplicação - Passo 1: Cálculo dos Possíveis Valores dos Tempos de Propagação . . . . .	53



---

5.2.2	Exemplo de Aplicação - Passo 2: Definição de Valores Válidos do Tempo de Propagação . . . . .	54
5.2.3	Exemplo de Aplicação - Passo 3: Avaliando os Valores Válidos do Tempo de Propagação . . . . .	55
5.2.4	Exemplo de Aplicação - Passo 4: Identificando o Valor Ótimo do Tempo de Propagação por Pesos Ponderados . . . . .	55
5.2.5	Exemplo de Aplicação - Passo 5: Cálculo do Local da Falta . . . . .	57
5.3	Resultados Obtidos . . . . .	58
<b>Capítulo 6 – Conclusões e Propostas de Trabalhos Futuros</b>		<b>65</b>
<b>Referências Bibliográficas</b>		<b>68</b>

## LISTA DE FIGURAS

2.1	Diagrama de Bewley Identificando a Primeira OV Incidente e sua Respectiva OV Refletida no Ponto de Falta . . . . .	11
2.2	Diagrama de Bewley Identificando os Primeiros Instantes das OVs Aérea e Terra nos Dois Terminais da LT . . . . .	12
2.3	Diagrama de Bewley Identificando os Primeiros Instantes das OVs de Modo Aéreo nos Dois Terminais. . . . .	15
2.4	Diagrama de Bewley Identificando os Instantes das Primeiras OVs e suas respectivas OVs Refletidas para os Dois Terminais da LT. . . . .	18
3.1	Circuito Equivalente de Segmento de Linha de Transmissão. . . . .	23
3.2	Diagrama de OVs em terminação . . . . .	27
3.3	Diagrama de Bewley. . . . .	29
3.4	Filtro <i>Differentiator-Smoother</i> . . . . .	31
4.1	Janelas de Observação . . . . .	37
4.2	1º Padrão para Diagrama de <i>Bewley</i> . . . . .	40
4.3	2º Padrão para Diagrama de <i>Bewley</i> . . . . .	40
4.4	3º Padrão para Diagrama de <i>Bewley</i> . . . . .	41
4.5	4º Padrão para Diagrama de <i>Bewley</i> . . . . .	41
4.6	Diagrama de Blocos. . . . .	46
5.1	Sistema Teste. . . . .	51
5.2	Subestação <i>i</i> . . . . .	52

---

5.3	Subestação $j$ . . . . .	52
5.4	Torres. . . . .	53
5.5	Sinais de Corrente de Modo $\alpha$ dos Terminais Analisados e Hipóteses de cada Terminal. . . . .	54
5.6	Resultados de todas as simulações. . . . .	60
5.7	Resultados de todas as simulações em ângulo oposto. . . . .	60
5.8	Erros Absolutos em km. . . . .	63
5.9	Erro em vãos de torre. . . . .	63

## LISTA DE TABELAS

2.1	Métodos de Localização de Faltas . . . . .	21
5.1	Hipóteses dos Terminais Local e Remoto . . . . .	55
5.2	Possíveis Valores para o Algoritmo . . . . .	56
5.3	Pesos de Cada Hipótese e <i>GFR</i> . . . . .	57

## LISTA DE SÍMBOLOS

$c$	Velocidade da luz.
$C$	Capacitância linha de transmissão por km.
$cmp$	Comparador entre a velocidade calculada e a velocidade da luz.
$d_{pu}$	Distância até a falta calculada em pu.
$d_{km}$	Distância até a falta calculada em km.
$DT$	Vetor para Passo 3 da função SETWFL que contém diferenças de tempo das ondas viajantes.
$ET$	Vetor para Passo 4 da função SETWFL que contém valores dos padrões da função.
$FW$	Peso final.
$FW_L$	Peso final para o terminal local.
$FW_R$	Peso final para o terminal remoto.
$G$	Condutância linha de transmissão por km.
$G$	Ganho do processo de filtragem do filtro <i>Differentiator-Smoother</i> .
$GFR$	Peso global resultante.
$hip$	Hipóteses do método SETWFL.
$i_I$	Corrente incidente no terminal.
$i_R$	Corrente refletida no terminal.
$i_T$	Corrente incidente na terminação analisada.
$i_\alpha$	Corrente de modo $\alpha$ .
$i_\beta$	Corrente de modo $\beta$ .

$i_0$	Corrente de modo terra.
$i(x, t)$	Onda viajante de corrente em função do espaço e do tempo.
$L$	Comprimento da linha de transmissão analisada.
$L^*$	Indutância linha de transmissão por km.
<b>M</b>	Matriz generalizada da transformada de Clarke.
$M_{CA}$	Matriz da transformada de Clarke referenciada à fase A.
$M_{CB}$	Matriz da transformada de Clarke referenciada à fase B.
$M_{CC}$	Matriz da transformada de Clarke referenciada à fase C.
$ObsWin1$	Janela de observação 1.
$ObsWin2$	Janela de observação 2.
$Q1$	Primeiro peso referente à hipótese da onda viajante refletida.
$Q2$	Segundo peso referente à hipótese da onda viajante refletida.
$Q3$	Terceiro peso referente à hipótese da onda viajante refletida.
$R$	Resistência linha de transmissão por km.
$s$	Operador <i>Heaviside</i> da transformação de Laplace.
$\tau$	Tempo de Propagação da onda viajante.
$\tau_{luz}$	Tempo de Propagação de supondo a velocidade de propagação da onda viajante igual a velocidade da luz.
$\tau_{poss}$	Valores possíveis do tempo de propagação da onda viajante.
$\tau_{valid}$	Valores válidos do tempo de propagação da onda viajante.
$\tau_{optimal}$	Valore ótimo do tempo de propagação da onda viajante.
$T_{DS}$	Janelamento dos coeficientes do filtro <i>Differentiator-Smoother</i> .
$T_{DS}$	Número de coeficientes do filtro <i>Differentiator-Smoother</i> .
$t$	Tempo.
$t_{L0}$	Tempo de incidência da primeira onda viajante no terminal local de modo terra.

---

$t_{L1}$	Tempo de incidência da primeira onda viajante no terminal local de modo aéreo.
$t_{L2}$	Tempo de incidência onda viajante refletida a partir da falta no terminal local de modo aéreo.
$t_{L3}$	Tempo de incidência onda viajante refratada a partir da falta no terminal local de modo aéreo.
$t_{R0}$	Tempo de incidência da primeira onda viajante no terminal remoto de modo terra.
$t_{R1}$	Tempo de incidência da primeira onda viajante no terminal remoto de modo aéreo.
$t_{d1}$	Valor da variável se falta antes da metade da linha de transmissão.
$t_{d2}$	Valor da variável se falta depois da metade da linha de transmissão.
$v_{poss}$	Valores possíveis da velocidade de propagação da onda viajante.
$v_a$	Velocidade onda viajante calculada a partir dos parâmetros da linha de transmissão.
$v_p$	Velocidade de propagação da onda viajante na LT analisada.
$v_{p1}$	Velocidade de propagação da onda viajante de modo alfa na LT analisada.
$v_{p0}$	Velocidade de propagação da onda viajante de modo terra na LT analisada.
$v(x, t)$	Onda viajante de tensão em função do espaço e do tempo.
$v_I$	Tensão incidente no terminal.
$v_R$	Tensão refletida no terminal.
$v_T$	Tensão incidente na terminação analisada.
$v_\alpha$	Tensão de modo $\alpha$ .
$v_\beta$	Tensão de modo $\beta$ .
$v_0$	Tensão de modo terra.
$WGF$	Flag do Passo 5 com valores lógicos 1 e 0.
$Y$	Admitância por km da linha de transmissão.
$Z$	Impedância por km da linha de transmissão.
$Z_C$	Impedância característica.

---

$Z_S$	Impedância de surto.
$Z_{S1}$	Impedância de surto 1 da linha de transmissão adjacente.
$Z_{S2}$	Impedância de surto 2 da linha de transmissão adjacente.
$Z_T$	Impedância da terminação.
$\omega$	Frequência angular.
$\Gamma_v$	Coefficiente de reflexão da tensão.
$\Gamma_i$	Coefficiente de reflexão da corrente.
$\Gamma_i > 0$	Coefficiente de reflexão da corrente no ponto do defeito.
$\Delta t_{LR}$	Diferença de tempo entre a onda viajante refletida e primeira incidente no terminal local.
$\Delta t_{RR}$	Diferença de tempo entre a onda viajante refletida e primeira incidente no terminal remoto.
$\Delta x$	Tamanho diferencial de uma LT.
$\alpha$	Modo aéreo da transformada de Clarke.
$\beta$	Modo aéreo da transformada de Clarke.
$\theta$	Fase do coeficiente do plano- $\alpha$ .
$\gamma$	Constante de propagação de uma linha de transmissão.



## GLOSSÁRIO

ANEEL	Agência Reguladora de Energia Elétrica.
ATP	<i>Alternative Transients Program.</i>
BPA	<i>Bonneville Power Administration.</i>
DS	Filtro <i>Differentiator-Smoother.</i>
EMTP	<i>Electromagnetic Transients Program.</i>
<i>ETW</i>	<i>Expected Traveling Wave.</i>
LFOV	Localização de Falhas por Ondas Viajantes.
LKT	Lei de Kirchhoff de Tensão.
LKC	Lei de Kirchhoff de Corrente.
LT	Linha de Transmissão.
LTs	Linhas de Transmissão.
OV	Onda Viajante.
OVs	Ondas Viajantes.
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico.
M1TC	Método Clássico de Um Terminal.
M1T0	Método de um Terminal Aplicável para Falta com Terra.
M1T3D	Método de Um Terminal com Três Detecções.
M2TC	Método Clássico de Dois Terminais.
M2TRG	Método de Dois Terminais Necessitando da Onda Viajante Refletida.
M2T0	Método de Dois Terminais para Falhas com Terra.

---

M2TS	Método de Dois Terminais Utilizando Apenas Modos Aéreos Sem Necessidade de Sincronismo.
RDP	Registradores Digitais de Pertubação.
<i>Refl(hip)</i>	Diferença de tempo entre a hipótese e a 1ª OV.
<i>Refr(hip)</i>	Tempo da OV Refratada referente a 1ª OV.
<i>RTT</i>	<i>Repeating Travel Time.</i>
RTC	Relação de Transformação do Transformador de Corrente.
RTP	Relação de Transformação do Transformador de Potencial.
RW-BSWT	Transformada de <i>Wavelet</i> estacionária com efeito de borda em tempo real.
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SIN	Sistema Interligado Nacional.
SETWFL	Método para Identificação da Onda Viajante Refletida.
TACS	<i>Transient Analysis of Control Systems.</i>
TC	Transformador de Corrente.
TPC	Transformador de Potencial Capacitivo.
TDQ	Transformada de PARK.
<i>TL</i>	<i>Transmission Line.</i>
<i>TW</i>	<i>Traveling Wave.</i>
<i>TWFL</i>	<i>Traveling Wave Fault Location.</i>
TWD	Transformada de <i>Wavelet</i> Discreta.
TWDR	Transformada de <i>Wavelet</i> Discreta Redundante.
<i>TWDRs</i>	<i>Traveling Waves Digital Recorders.</i>
UnB	Universidade de Brasília.
<i>WGH(hip)</i>	<i>Weighting Factor.</i>

### 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

A engenharia elétrica consiste na área de conhecimento que se volta para o desenvolvimento e aprimoramento de processos relacionados às etapas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Os que possuem a oportunidade de atuar nesta área acabam por se deparar com problemas desafiadores em projetos cujos objetivos tipicamente têm relação com fornecimento de energia elétrica, considerando a transmissão de blocos de energia cada vez maiores para a sociedade, de maneira segura, limpa e econômica (GLOVER *et al.*, 2011).

Em um contexto histórico, os estudos sobre a expansão da energia elétrica surgiram a partir do ano de 1878, com Thomas A. Edison, quando formulou o conceito de uma estação de energia no centro da cidade de Nova Iorque (*Peral Street Station*) com uma iluminação distribuída para 59 usuários, servindo uma determinada área concentrada. Dessa maneira, a primeira subestação de energia elétrica de corrente contínua no mundo foi criada a partir destes estudos. Desde então, cientistas e pesquisadores da área como Frank Sprague, William Stanley e Nicola Tesla foram de grande importância para o alcance da tecnologia atual empregada nas subestações (GLOVER *et al.*, 2011).

A energia elétrica é considerada um bem necessário e de suma importância para a sociedade atual. Analisando fatos reais e atuais como o caso do Amapá em Novembro de 2020, percebe-se que parte do Estado ficou sem energia por dias, como relatado em ONS (2020), criando uma crise social, financeira e política nestas regiões. Casos como esses fazem com que análises do consumo, manutenção e restabelecimento da energia elétrica sejam necessárias a fim de evitar situações semelhantes. Contudo, o sistema ainda está em expansão pela grande demanda energética da sociedade, implicando que estudos de futuras instalações de novas LTs sejam efetuados, trazendo previsões de como o sistema se comportará no curto, médio e longo prazo.

De acordo com EPE (2018), que produziu o Plano Decenal de Expansão de Energia 2029, o aumento da demanda brasileira foi previsto para, anualmente, 2,3% desde o ano de 2019 até 2020, fazendo a complexidade do Sistema Interligado Nacional (SIN) aumentar ainda mais. Uma vez que o SIN está se expandindo, entende-se que número de LTs do sistema elétrico brasileiro também aumentará. Isso implica que o consumo e dependência da sociedade no sistema aumentou significativamente nos últimos anos concomitantemente ao crescimento tecnológico vinculado a todos os processos da engenharia elétrica (ANEEL, 2008). Seguindo a grande demanda, para não haver falta de energia elétrica, a cobrança sobre as concessionárias de LTs se tornou bastante incisiva, com incentivos econômicos relacionados à continuidade do serviço (ANEEL, 2016). Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), agência reguladora do Brasil, caso a LT saia de operação, sendo a saída de maneira programada ou de forma intempestiva, descontos serão aplicados na receita da concessionária de transmissão. Dentro deste contexto, empresas que detêm o controle de LTs intensificam esforços a fim de evitar descontos extras em sua receita.

De acordo com ANEEL (2018) e Costa *et al.* (2017), até 2018, 198 contratos foram distribuídos para 123 concessionárias, tendo em vista 132000 km de extensão utilizado em LTs com tensões que variavam de 138 kV a 800 kV. No período de 1º de Julho de 2016 até 30 Junho de 2017, 3768 desligamentos forçados ocorreram no SIN, sendo 75,60% em LTs de energia elétrica (ANEEL, 2018). Estes desligamentos forçados estão atrelados principalmente às descargas atmosféricas, falhas humanas além de queimadas e vegetações, sendo, em muitos dos casos, considerados indeterminados por não se conseguir identificar o motivo de sua ocorrência.

Em caso de faltas permanentes, i.e., faltas que implicaram no desligamento da LT por meio do sistema de proteção, mas que permaneceram conectadas à rede elétrica de forma a não permitir o religamento, uma equipe de manutenção deve ser enviada para análise e inspeção do defeito, reparando-o o mais brevemente possível. A fim de colocar a LT em operação novamente, a equipe deve ser informada com precisão do local onde ocorreu a falta para que a manutenção garanta o completo reparo da LT, sem que hajam dúvidas quanto ao defeito que ocasionou a perturbação, o que poderia seguir prejudicando a continuidade do serviço do sistema (SAHA *et al.*, 2010). Neste trabalho, considerando curto circuitos como sinônimos de faltas, entende-se que estudos devem ser efetuados de maneira a minimizar os impactos sobre a sociedade na

quantidade de tempo de indisponibilidade operativa de LTs em decorrência de faltas. Assim, quando elas ocorrerem, a proteção deve atuar de forma a proteger os equipamentos e os usuários, enquanto que a localização da falta deve ser realizada de forma precisa, confiável e rápida para despacho das equipes de manutenção que irão reparar o defeito para posterior restabelecimento da operação do sistema.

Como consequência do contexto supracitado, metodologias que identificam o local da falta têm sido estudadas e testadas a fim de se obter resultados de localização precisos. Para implementação de funções que identificam o local do defeito, alguns equipamentos como registradores digitais de perturbação (RDP), dispositivos localizadores de faltas dedicados e programas de análise de registros pós falta podem ser utilizados (SAHA *et al.*, 2010). Em anos recentes, tornou-se comum a inclusão de funções de localização de faltas em dispositivos microprocessados de proteção, nos quais sinais de corrente e de tensão são analisados a partir de medições obtidas dos enrolamentos secundários de transformadores para instrumentos, as quais são discretizadas de acordo com a capacidade dos conversores analógico-digital utilizados. Caso uma falta ocorra, espera-se que o sistema de proteção atue, emitindo comandos de abertura dos disjuntores da LT e, em seguida, disparando funções de localização de faltas para identificação do ponto de defeito.

## 1.2 MOTIVAÇÃO

Com o intuito de acelerar a reconexão do sistema após a ocorrência de um curto circuito, funções de localização de faltas têm sido cada vez mais estudadas de maneira a identificar o ponto do defeito de forma precisa, confiável e rápida (SAHA *et al.*, 2010). Os métodos de localização de falta podem ser divididos conforme descrito a seguir.

- Métodos baseados em componentes fundamentais (também denominados fasoriais);
- Métodos baseados em componentes de altas frequências;
- Métodos baseados em inteligência artificial;
- Métodos baseados em ondas viajantes;

Em relação aos métodos citados, sabe-se que esses ainda podem ser divididos como técnicas que necessitam de análise de apenas um terminal (*Single Ended*), dois terminais (*Double-Ended*)

ou mais (*Multi-Ended*), além de também poderem ser classificados de acordo com a necessidade de análise de sinais de corrente, tensão ou ambos (SAHA *et al.*, 2010).

Os métodos baseados nas componentes fundamentais são de fácil implementação e seu custo não é considerado alto, uma vez que não dependem de altas taxas de amostragem (SAHA *et al.*, 2010). Apesar disso, a precisão de seus resultados requer o conhecimento de parâmetros da LT precisos, o que nem sempre é possível na prática, visto que podem variar com o tempo e com a frequência. Vale a pena ressaltar que estas funções são baseadas em algoritmos de estimação fasorial, que não possuem bom comportamento durante o período de transitórios da falta, uma vez que os fasores não são bem definidos nestes instantes. Além disso, para o caso de localizadores de falta analisando oscilografias de apenas um terminal, a resistência de falta e a não homogeneidade do sistema podem atrapalhar o resultado da função baseada em componentes fundamentais (SCHWEITZER-I, 1988). É importante ressaltar que a maioria dos métodos de localização de faltas exige que as faltas fiquem presentes no sistema por aproximadamente 2 ciclos da frequência fundamental, permitindo a convergência dos fasores e atenuação de componentes espúrias que podem surgir nos sinais monitorados. Porém, para sistemas de alta tensão, isso pode comprometer o seu funcionamento, uma vez que existe uma tendência pela busca de esquemas de proteção ultra-rápidos, que podem culminar na eliminação de faltas em tempos menores do que 2 ciclos. Os métodos fasoriais também estão suscetíveis a mais erros quando esquemas de compensação série são utilizados nas LTs monitoradas, podendo implicar em um valor de impedância calculada diferente do valor real (GUZMÁN *et al.*, 2018a).

Analisando-se os métodos baseados em componentes de altas frequências, estes tendem a ser computacionalmente mais complexos, além de terem um custo maior para implementação, visto que requerem altas taxas de amostragem. De acordo com LOPES (2014), até alguns anos atrás, a sua implementação era limitada em LTs reais, contexto esse que tem mudado gradativamente ao longo do tempo

Os métodos de localização de faltas que utilizam a teoria de inteligência artificial possuem bom desempenho, mas exigem uma retroalimentação computacional constante, podendo esta ser *on-line* ou *off-line*, mas sempre dependendo de análise de informações constantemente. Apesar de, a longo prazo, poderem trazer resultados significativos e seguros, sua implementação ainda é limitada quando se trata de análises em campo, especialmente por questões de complexidade

e da necessidade de treinamento das redes de inteligência artificial (LOPES, 2014).

As funções de LFOV têm ganhado bastante destaque dia após dia, uma vez que a tecnologia tem avançado, possibilitando o uso de altas taxas de amostragem de forma confiável e economicamente viável. Com isso, sinais de alta frequência podem ser visualizados e utilizados para fins de localização faltas, proteção e outras análises elétricas, como por exemplo, análises preventivas de faltas e redução de tempo de abertura de disjuntores (MARINHO, 2019). O estudo de OV's é datado do ano de 1930 pelo trabalho proposto por Bewley (1963), tendo embasado matematicamente boa parte da formulação das OV's no que se refere a ondas incidentes nas LTs. A partir desta teoria, muitos estudos foram propostos de forma a complementá-la, criando-se esforços adicionais teóricos para esquemas de proteção e localização de LTs. No entanto, a sua aplicabilidade era limitada pela falta de capacidade dos equipamentos capazes de identificar as OV's, já que os sinais analisados consistem em transitórios de alta frequência que demandam conversores A/D de alta capacidade e taxa de discretização. Com o avanço tecnológico, sua aplicabilidade cresceu e seus resultados foram comparados com os métodos de localização mais utilizados nos relés comerciais, a saber, os de componentes fundamentais (fatoriais). Quando comparados, percebe-se que a localização baseada em OV's apresenta precisão superior (SCHWEITZER *et al.*, 2014).

Em relação aos fatores críticos de métodos de LFOV, destacam-se: 1) A necessidade de amostrar os sinais analógicos com taxas da ordem de megahertz, fazendo-se necessária a utilização de equipamentos mais caros; 2) A instalação de equipamento de sincronização de dados para algumas das metodologias que utilizam dois terminais; 3) A identificação da OV refletida no ponto de falta para métodos requerem sua avaliação para localizar a falta; 4) A utilização de filtragem do sinal para identificar qual o tempo exato em que a OV incidiu o terminal monitorado; 5) Situações nas quais OV's não são lançadas, tal como quando a falta ocorre no momento em que o sinal de tensão está passando em (ou próximo de) 0 V, fazendo com que os métodos LFOV não funcionem para faltas com ângulo de incidência perto destes valores (LOPES *et al.*, 2020).

Um outro aspecto importante se refere aos esquemas de medição. Nas LTs de alta tensão, os sinais de tensão são medidos a partir de dispositivos denominados Transformadores de Potencial Capacitivos (TPC), e os sinais de corrente medidos por Transformadores de Corrente (TC). De

acordo com R. REIS *et al.* (2019), os TPCs não possuem uma boa resposta em frequência, fazendo com que os sinais secundários percam informações sobre os transitórios da falta. Isso implica que a maioria dos métodos de localização que utilizam da teoria de OV's tendem a usar apenas os sinais de corrente, uma vez que os secundários dos TCs possuem uma boa resposta em frequência (TZIOUVARAS *et al.*, 2001). Assim sendo, métodos que utilizam apenas as primeiras OV's de tensão para localizar faltas não tendem a ter problemas relevantes. Porém, quando se requer a identificação da OV refletida no ponto de falta ou de outra OV de interesse, normalmente utilizam-se os sinais de corrente no secundário do TC.

Alguns dos métodos de localização de faltas exigem a utilização de parâmetros da LT quando, em sua formulação necessitam da velocidade de propagação ( $v_p$ ) (GALE *et al.*, 1993; LIU *et al.*, 2012). Sabe-se que para calcular  $v_p$ , necessita-se dos valores de indutância e capacitância da LT analisada, tornando estes valores de difícil acesso e confiabilidade para casos reais (GREENWOOD, 1991). Outros métodos, tentando não serem influenciados pela problemática dos parâmetros, acabam por depender de sincronismo de dados, uma vez que são métodos de dois terminais e as estampas de tempo devem estar na mesma referência (GILANY; ELDIN, 2007). Porém, muitas vezes o aparato para sincronizar os dados pode estar danificado ou apresentar mal funcionamento. Algumas formulações de sincronismo de dados já foram reportadas na literatura a fim de contornar esta problemática, como em LOPES & LEITE (2018), LOPES *et al.* (2020). No entanto, estes sincronismos acabam por dependerem das OV's refletidas a partir da falta, ficando suscetíveis a outros erros em termos de detecção das frentes de onda de interesse. Outros métodos, com o intuito de não dependerem nem de parâmetros, nem de sincronização, consideram o requisito de terem uma pré-estimativa inicial do local da falta. Para tanto, tipicamente, utiliza-se uma função fasorial ou baseada em OV para obtenção desta pré-estimativa (LOPES *et al.*, 2018), ou do uso do modo terra (LOPES, 2016), que se refere à uma transformação linear para desacoplar os sinais trifásicos. Percebe-se que todos os métodos acabam possuindo uma dificuldade intrínseca à sua aplicação, podendo resultar em limitações práticas.

Alguns métodos, por dependerem da velocidade de propagação da OV e conseqüentemente do valor do tempo de propagação na LT analisada ( $\tau$ ), utilizam de metodologias externas para obterem aproximações destes valores. O valor da velocidade de propagação pode ser



calculado de forma referenciada à velocidade da luz, considerando-se um fator multiplicador  $K$  determinado a partir do material ao redor do cabo (em LTs aéreas a cabos nus, apenas o ar) (GENERAL ELECTRIC, 2018). O cálculo deste  $K$  pode trazer aproximações e incertezas, implicando em erros na localização de falta calculada. Outros fabricantes recomendam o cálculo de  $\tau$  a partir da energização da LT (SEL-T400L INSTRUCTION MANUAL, 2019). Apesar de ser uma solução utilizada em campo, percebe-se que este requisito depende da ação do ser humano, sendo esta uma variável externa para as funções utilizadas. Além disso, o valor de  $\tau$  pode variar com o tempo, com as condições de carga e com a temperatura, podendo trazer incertezas para a localização do defeito (ZHANGA HONGCHUN SHUA, 2018).

Ressalta-se que quanto menos uma função depender de parâmetros externos, menores são os erros humanos esperados. De acordo com Lopes *et al.* (2020a), um estudo de erros humanos na aplicação das funções de proteção e de localização de faltas em LTs foi publicado de forma a demonstrar operações indevidas no sistema elétrico. De acordo com o estudo, 59% de todas as operações indevidas de proteção no SIN foram causados por erros humanos. Isso implica que, quão menor for a dependência de uma função em relação a ajustes previamente calculados, mais precisos e confiáveis serão os resultados. Desse modo, visa-se neste trabalho a elaboração de esquema de localização de faltas que não dependa de parâmetros da LT, de sincronismo de dados e até mesmo de pré-estimativas do local da falta, aprimorando os processos existentes que se baseiam na análise de OV. De fato, funções que concentrem todas essas características são escassas na literatura, fato este motivador do presente trabalho.

### 1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo deste trabalho é apresentar um novo método adaptativo de LFOV para LTs aéreas utilizando dados de dois terminais, analisando-se apenas sinais de corrente. Espera-se obter uma técnica que calcule adaptativamente o valor ótimo de  $\tau$  por meio apenas de análises das oscilografias de falta. Ademais, espera-se também que o algoritmo seja capaz de identificar as OV refletidas nos dois terminais monitorados, conferindo, conseqüentemente, confiabilidade ao processo de localização de faltas. Desta maneira, destacam-se como objetivos específicos:

- Analisar os métodos já propostos na literatura de forma a identificar as suas possíveis

limitações e, assim, definir melhorias para o novo método adaptativo proposto.

- Desenvolver uma função adaptativa de localização de faltas utilizando a teoria de OV's para linhas aéreas, tomando proveito de funcionalidades já disponíveis em relés comerciais.
- Demonstrar que a metodologia proposta é viável, sendo independente de ajustes, pré-estimativas, análises do modo 0, sincronização de dados ou outras variáveis externas, tendo a localização da falta calculada a partir apenas da análise das oscilografias.

## 1.4 CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO

Dentre as contribuições desta dissertação, destaca-se a criação de uma metodologia adaptativa para calcular um valor ótimo do tempo de propagação de uma LT. Para tanto, após a ocorrência de um curto-circuito, as oscilografias dos terminais são analisadas de forma a identificar as OV's refletidas a partir da falta. Com os instantes das OV's refletidas, localiza-se o ponto do defeito sem a dependência de sincronização de informações dos terminais e sem a necessidade de parâmetros da LT analisada. Além disso, não se faz necessária a obtenção de uma pré estimativa da falta, implicando em uma contribuição para a comunidade científica.

Durante os procedimentos desta pesquisa, alguns trabalhos foram desenvolvidos, estando diretamente relacionados com a elaboração do trabalho final aqui apresentado. Estes trabalhos estão listados a seguir:

1. CUNHA, G.; LOPES, F.; HONORATO, T. Extending the Application of One-terminal Fault Location Method Available in Actual Time Domain Relay. Em: VIII Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, (2020).
2. CUNHA, G.A., LOPES, F.V., HONORATO, T. Influence of Traveling Wave Detection Sensitivity on Transient Pattern Recognition-based Single-ended Fault Location Approach. In: Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS), 1-5. doi:10.1109/WCNPS.2019.8896342.
3. LOPES, F. V.; HONORATO, T.; CUNHA, G.; RIBEIRO, N. Transmission Line Records Synchronization Based on Traveling Waves Analysis. In: IEEE Transactions on Power Delivery, p. 1-1, 2020

4. LOPES, F.; RIBEIRO, N.; CUNHA, G.; HONORATO, T.; MELO, K. Electrical Noise Simulation: A Practical Approach for Atp/Atpdraw Studies. In: Workshop on Comm. Networks and Power Sys. 2020.
5. RIBEIRO, L.; RIBEIRO, E.; CUNHA, G.; LOPES, F. Modelagem de Linhas de Transmissão em Programas EMTP: Um Estudo sobre a Propagação de Ondas Viajantes. Em: VIII Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, (2020).
6. RIBEIRO, L.; CUNHA, G.; RIBEIRO, E.; BRITTO, A.; LOPES, F. Analysis of Traveling Waves Propagation Characteristics Considering Different Transmission Line EMTP Models. In: Workshop on Comm. Networks and Power Systems [S.l.: s.n.], 2020

## 1.5 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

A seguinte estrutura apresentada é a seguida para a organização deste trabalho:

- No capítulo 2, uma revisão bibliográfica é apresentada a partir de publicações relacionadas ao tema localizações de faltas utilizando dados de um e dois terminais da LT, com base na análise de OV's
- No capítulo 3, apresenta-se uma fundamentação teórica sobre OV's, abordando as maiores dificuldades e problemáticas vinculados a este tema;
- No capítulo 4, descreve-se os algoritmos utilizados para formulação principal e o passo a passo do algoritmo proposto;
- No capítulo 5, apresentam-se exemplos de aplicação do método proposto e os resultados obtidos para as simulações realizadas;
- No capítulo 6, as conclusões são mostradas, juntamente dos trabalhos futuros que envolvem este tema.

## CAPÍTULO 2

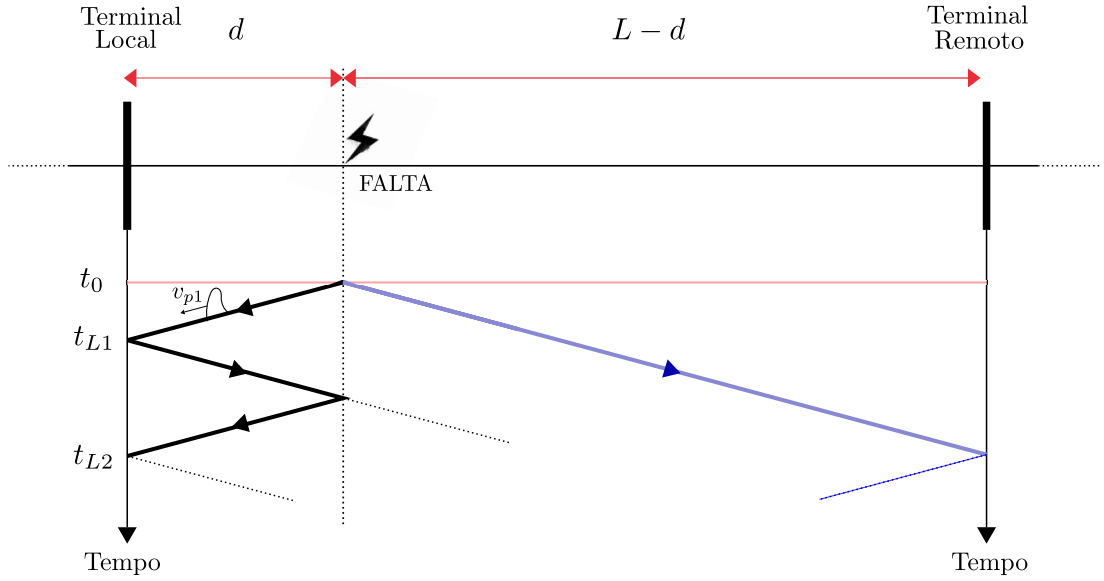
# REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta revisão bibliográfica contempla algumas das mais importantes publicações disponíveis na literatura sobre o tema de localização de faltas em LTs baseadas na teoria de OV's. Assim, os principais conceitos e formulações serão apresentados, analisando os princípios de funcionamento e limitações de cada método. É importante ressaltar que os métodos aqui analisados se referem a linhas homogêneas, em que as velocidades de propagação das OV's tendem a ser constantes e aproximadamente iguais para as ondas que se propagam na direção dos terminais da linha.

### 2.1 MÉTODO DE UM TERMINAL CLÁSSICO - (M1TC)

O método clássico de um terminal (M1TC) de LFOV pode ser aplicado supondo-se que a OV refletida a partir da falta foi corretamente identificada. Além disso, sua formulação depende diretamente do valor da velocidade de propagação da OV aérea ( $v_{p1}$ ) ou alternativamente  $\tau$ , ficando suscetível a erros em casos de aproximações nestas variáveis. Segundo GALE *et al.* (1993), sugere-se o uso de sinais de corrente nesse tipo de aplicação em virtude da necessidade de utilização OV's refletidas no ponto de falta. De fato, TCs possuem melhor resposta em frequência e, portanto, permitem uma análise mais confiável das OV's de interesse. Ademais, por se tratar de um método de apenas um terminal, a sincronização de oscilografias locais e remotas não é necessária.

Utilizando a Figura 2.1 como referência, a estimativa calculada para a localização da falta é dada pela Equação (2.1), onde os valores  $t_{L1}$  e  $t_{L2}$  são a primeira OV incidente no terminal analisado e a OV refletida a partir do ponto de falta, respectivamente. Os valores de  $\tilde{d}_{km}$  e  $L$  se referem ao valor estimado da localização da falta pela formulação e o comprimento da LT analisada, respectivamente. Vale ressaltar que o modo aéreo é definido a partir de uma



**Figura 2.1.** Diagrama de Bewley Identificando a Primeira OV Incidente e sua Respectiva OV Refletida no Ponto de Falta

transformação modal para desacoplar o sistema que será melhor explicada no próximo capítulo.

$$\tilde{d}_{km} = \frac{(t_{L2} - t_{L1}) \cdot v_{p1}}{2}. \quad (2.1)$$

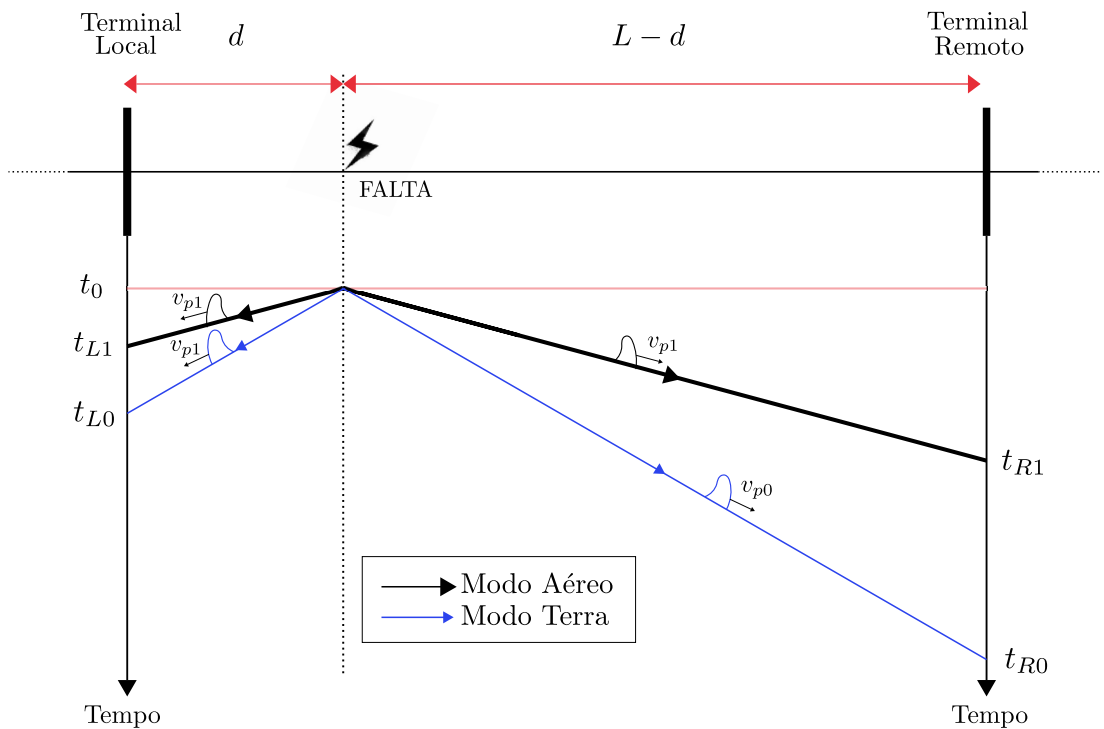
Na formulação, observa-se a necessidade de detecção da primeira OV incidente ( $t_{L1}$ ), que normalmente é de fácil aquisição, e também da onda refletida a partir da falta ( $t_{L2}$ ). Esta segunda onda pode estar sobreposta ou misturada com outras OVs advindas de LTs adjacentes ou do terminal remoto, dificultando sua identificação, sendo esta problemática considerada uma das maiores limitações deste método. Caso as OVs de interesse sejam detectadas de maneira confiável, a localização resultante tende a ter boa precisão. Deve-se notar ainda que erros decorrentes do comprimento dos cabos de conexão dos secundários dos TCs são anulados pelo fato de pertencerem ao mesmo medidor (relé) (GUZMÁN *et al.*, 2018a). Além disso, a formulação necessita de  $v_{p1}$ , e este valor depende dos parâmetros da LT analisada, podendo estes parâmetros variar com o tempo e a frequência. De acordo com GALE *et al.* (1993), este valor muitas vezes é aproximado a  $v_{p1} = 0,98 \cdot c$ , onde  $c$  representa a velocidade da luz, dada por 299.792,458 km/s (ZIMATH *et al.*, 2010). De acordo com LOPES (2014), ressalta-se que erros na velocidade de propagação implicam em erros expressivos na localização de faltas que utilizam a função clássica de um terminal. Apesar de alguns equipamentos reais utilizarem desta aproximação, aconselha-se identificar um valor mais coerente, evitando erros adicionais. Seguindo esta ideia,  $v_{p1}$  também pode ser calculada a partir do comprimento da LT (ou seja,

$L$ ) e do valor  $\tau$  obtido de manobras de energização da linha (SEL-T400L INSTRUCTION MANUAL, 2019), considerando-se o valor de  $v_{p1}$  contante. Porém, os valores de  $L$  e de  $\tau$  podem possuir baixa precisão, gerando erros na localização final.

## 2.2 MÉTODO DE UM TERMINAL APLICÁVEL PARA FALTAS COM TERRA (MIT0)

De acordo com os autores em Liu *et al.* (2012), utilizando-se sinais de corrente de apenas um terminal e avaliando-se componentes de modo aéreo e terra, é possível eliminar a necessidade de sincronização de dados bem como da detecção de ondas refletidas na falta, sendo essa função denominada neste trabalho como MIT0. Sua formulação é de fácil implementação, porém, de acordo com a Equação (2.2), seu resultado é dependente das velocidades de propagação dos modos aéreo alfa ( $v_{p1}$ ) e terra ( $v_{p0}$ ), sendo esses modos os resultantes após realizar uma transformação modal para desacoplar as fases do sistema trifásico. Além de depender das velocidades de propagação dos dois diferentes modos, este método também depende dos primeiros instantes de chegada das OV's de modo terra ( $t_{L0}$ ) e modo alfa ( $t_{L1}$ ).

$$\tilde{d}_{km} = \frac{v_{p1} \cdot v_{p0}}{v_{p1} - v_{p0}} \cdot (t_{L0} - t_{L1}) \cdot L. \quad (2.2)$$



**Figura 2.2.** Diagrama de Bewley Identificando os Primeiros Instantes das OV's Aérea e Terra nos Dois Terminais da LT

Uma vez que esta formulação depende do modo zero, sua aplicação fica restrita a análises de faltas que envolvam a terra, sendo uma limitação para faltas bifásicas e trifásicas. Ademais, esta formulação pode ser prejudicada na análise de LTs extensas, uma vez que o modo terra sofre muito com a dispersão e atenuação das OV's nestes casos, podendo dificultar até a identificação da primeira OV incidente. Outra limitação é conseguir identificar os valores corretos de  $v_{p1}$  e  $v_{p0}$  que variam com o tempo e dependem dos parâmetros da LT. A Figura 2.2 demonstra os dois modos, após realização da transformada modal, percebendo-se que o modo aéreo possui uma velocidade maior do que o modo terra a partir da análise do ângulo formado pela direção de propagação da OV e a horizontal.

### 2.3 MÉTODO DE UM TERMINAL COM TRÊS DETECÇÕES (M1T3D)

De acordo com Schweitzer-III *et al.* (2016), inicialmente os autores utilizaram uma pré-estimativa fasorial para identificação, via janelamento, para identificar qual é a OV refletida a partir da falta e, em seguida, aplicaram o método clássico de localização de um terminal baseado em OV's. Também neste trabalho, os autores apresentaram uma formulação para estimar o comprimento da LT analisada utilizando a OV refratada, i.e., a OV que após a ocorrência de uma falta, incide o terminal remoto, refletindo nele, refratando na falta e incidindo no terminal local. O equacionamento da estimação do comprimento da LT é dado por (2.3), onde  $t_{L3}$  é a onda refratada.

$$\tilde{L} = \frac{v_{p1}}{2} \cdot [(t_{L2} - t_{L1}) + (t_{L3} - t_{L1})]. \quad (2.3)$$

Utilizando a formulação clássica e dividindo-a por (2.3), chega-se a uma nova formulação de localização de faltas que utiliza a OV incidente, refletida e refratada dada por (2.4).

$$\tilde{d}_{km} = \frac{(t_{L2} - t_{L1})}{(t_{L2} - t_{L1}) + (t_{L3} - t_{L1})} \cdot L. \quad (2.4)$$

Esta nova formulação, apesar de interessante por não depender de velocidade de propagação e ser de apenas um terminal, não dependendo também de sincronismo, acaba tendo sua complexidade aumentada pelo fato de ter que identificar três OV's de interesse. São elas: 1) A primeira OV incidente, de fácil aquisição; 2) A onda refletida a partir do ponto de falta, que já é considerada uma tarefa complicada; e 3) A OV refratada, que nem sempre está presente,

uma vez sua transmissão através do distúrbio depende do tipo de falta. Portanto, percebe-se uma limitação do método ao ter que depender de outras OV's de interesse.

## 2.4 MÉTODO DE DOIS TERMINAIS CLÁSSICO (M2TC)

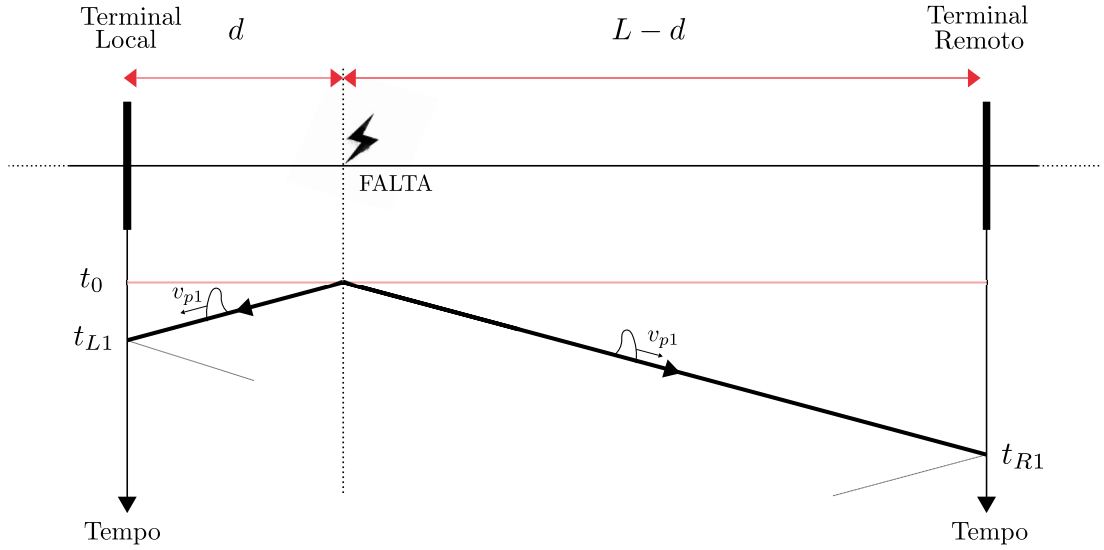
O método clássico de dois terminais, aqui chamado de M2TC, de acordo com GALE *et al.* (1993), necessita do valor de  $\tau$  e dos instantes em que as primeiras OV's incidem os terminais local e remoto, como demonstrado na Figura 2.3. Além disso, este método de dois terminais necessita que os dados dos terminais local e remoto estejam sincronizados para sua correta aplicação, uma vez que pode existir desvio entre as referências de tempo adotadas nas oscilografias avaliados para identificação das OV's. Para resolver este problema, cabos de fibra óptica ou GPS são utilizados a fim de sincronizar os registros e obter uma localização da falta mais precisa. Porém, a variabilidade da latência do canal pode interferir fazendo com que o resultado do sincronismo apresente ainda desvios. Ainda, o mau funcionamento do canal de comunicação atrelado a possíveis problemas das instalações do sistema de comunicação podem resultar em desalinhamentos temporais de amostras locais e remotas, e conseqüentemente, incoerências na localização final da falta. Desse modo, boa parte das aplicações conta com o uso de GPS. Apesar da fácil implementação da função clássica de dois terminais, sua precisão está totalmente atrelada ao valor utilizado de  $\tau$  ou  $v_{p1}$ , bem como da sincronização de dados. Em (2.5), apresenta-se a fórmula para cálculo do local de falta como função de  $\tau$ :

$$\tilde{d}_{km} = \frac{1 - (t_{R1} - t_{L1})}{2 \cdot \tau} \cdot L. \quad (2.5)$$

## 2.5 MÉTODO DE DOIS TERMINAIS NECESSITANDO DA ONDA VIAJANTE REFLETIDA (M2TRG)

Em Gilany & Eldin (2007), apresenta-se um novo método de dois terminais de LFOV, aqui denominado M2TRG. Este método é baseado na identificação das primeiras OV's incidentes nos dois terminais analisados, além de uma terceira OV, referenciada a um dos terminais a depender de onde foi a falta. Isso implica que a formulação será distinta caso a falta tenha





**Figura 2.3.** Diagrama de Bewley Identificando os Primeiros Instantes das OV de Modo Aéreo nos Dois Terminais.

ocorrido antes ou depois da metade da LT. Esta terceira onda é a OV refletida a partir da falta que incide no terminal adotado como referência. Além disso, para sua correta aplicação, esta formulação necessita que os terminais estejam sincronizados, sendo esta, uma limitação.

Este método não necessita do valor da velocidade de propagação, conseqüentemente também não requer o valor de  $\tau$ , tornando-se um método totalmente independente de parâmetros e de grande utilidade. Apesar disso, a função depende da correta identificação da OV refletida além de ter que possuir uma boa sincronização de informações entre os terminais. No trabalho proposto em Gilany & Eldin (2007), não foram avaliadas linhas adjacentes, as quais podem dificultar a identificação da metade da LT em que a falta ocorreu em decorrência de reflexões adicionais em barras adjacentes. Sendo assim, esse método usa esquemas para estimar pré-estimativas que são utilizadas para aplicação da formulação final, sendo essa uma característica também classificada como uma limitação.

Sendo o método dividido em duas partes, calculam-se os valores de duas variáveis auxiliares denominadas  $t_{d1}$  e  $t_{d2}$ . Em (2.6) e (2.7) são identificados os valores das variáveis para uma falta antes da metade da LT analisada, tendo como referência o terminal local.

$$t_{d1} = 3 \cdot t_{L1} - t_{L1} = 2 \cdot t_{L1}. \quad (2.6)$$

$$t_{d2} = t_{R1} - t_{L1}. \quad (2.7)$$

Já em (2.8) e (2.9) as mesmas variáveis são identificadas, agora para uma falta depois da metade

da LT.

$$t_{d1} = (t_{L1} + 2 \cdot t_{R1}) - t_{L1}. \quad (2.8)$$

$$t_{d2} = t_{L1} - t_{R1}. \quad (2.9)$$

As localizações de faltas são dadas, em km, por (2.10) e (2.11) para faltas antes e depois da metade da LT, respectivamente.

$$\tilde{d}_{km} = \left( \frac{1/2}{1 + t_{d2}/t_{d1}} \right) \cdot L. \quad (2.10)$$

$$\tilde{d}_{km} = \left( 1 - \frac{1/2}{1 + t_{d2}/t_{d1}} \right) \cdot L, \quad (2.11)$$

sendo, conforme mencionado anteriormente, independentes de parâmetros da LT monitorada.

## 2.6 MÉTODO DE DOIS TERMINAIS PARA FALTAS COM TERRA (M2T0)

Este método de LFOV, denominado aqui como M2T0, não depende de sincronismo de informações entre os terminais analisados e também não depende de parâmetros, uma vez que sua formulação não necessita do valor de  $\tau$  ou de  $v_{p1}$ . Proposto por LOPES (2016), sua formulação pode ser visualizada em (2.12), onde  $t_{L0}$  e  $t_{R0}$  representam as primeiras ondas incidentes de modo zero em cada terminal, e  $t_{L1}$  e  $t_{R1}$  representam as primeiras OV's incidentes de modo aéreo, obtidas após a aplicação da transformação modal.

$$\tilde{d}_{km} = \frac{(t_{L0} - t_{L1})}{(t_{L0} - t_{L1}) + (t_{R0} - t_{R1})} \cdot L. \quad (2.12)$$

Ressalta-se que as OV's de modos distintos possuem velocidades de propagação diferentes. Além disso, assim como em M1T0 (método de um terminal baseado em componentes de modo aéreo e terra), este método LFOV é aplicável somente para faltas que envolvam a terra, não sendo adequado para faltas bifásicas e trifásicas. Apesar de ser um método que utiliza dois terminais, não é necessária a sincronização para correta localização, já que depende apenas das diferenças de tempos das OV's incidentes em cada terminal separadamente. Além disso, é um método de fácil implementação, tendo que detectar apenas os instantes das primeiras OV's que incidem os dois terminais analisados. Porém, sabe-se que as OV's de modo zero sofrem muito com dispersão e atenuação, fazendo com que sua identificação possa ser prejudicada. A Figura 2.2, já comentada para o método de um terminal com terra, ilustra as duas velocidades

de propagação distintas para cada modo e os instantes empregados no processo de localização de faltas. Percebe-se que, para a este método, as velocidades de propagação são consideradas constantes e iguais para cada modo em ambas as direções de propagação na LT analisada.

## 2.7 MÉTODO DE DOIS TERMINAIS UTILIZANDO APENAS MODOS AÉREOS SEM NECESSIDADE DE SINCRONISMO (M2TS)

Em (LOPES *et al.*, 2018) é reportada uma forma a identificar a OV refletida a partir da falta nos dois terminais analisados. Com isso, neste método, não há necessidade de utilizar os parâmetros da LT, uma vez que sua formulação não depende de  $\tau$  ou de  $v_{p1}$ . Ainda, o método não requer dados sincronizados, pois realiza análises independentes em cada terminal da LT.

Este algoritmo utiliza as primeiras OVs incidentes em cada terminal, juntamente com suas respectivas OVs refletidas no ponto de falta, tal como ilustrado na Figura 2.4. A localização da falta é dada por (2.13), demonstrando que esta formulação é independente de sincronismo e de parâmetros.

$$\tilde{d}_{km} = \frac{(t_{L2} - t_{L1})}{(t_{L2} - t_{L1}) + (t_{R2} - t_{R1})} \cdot L, \quad (2.13)$$

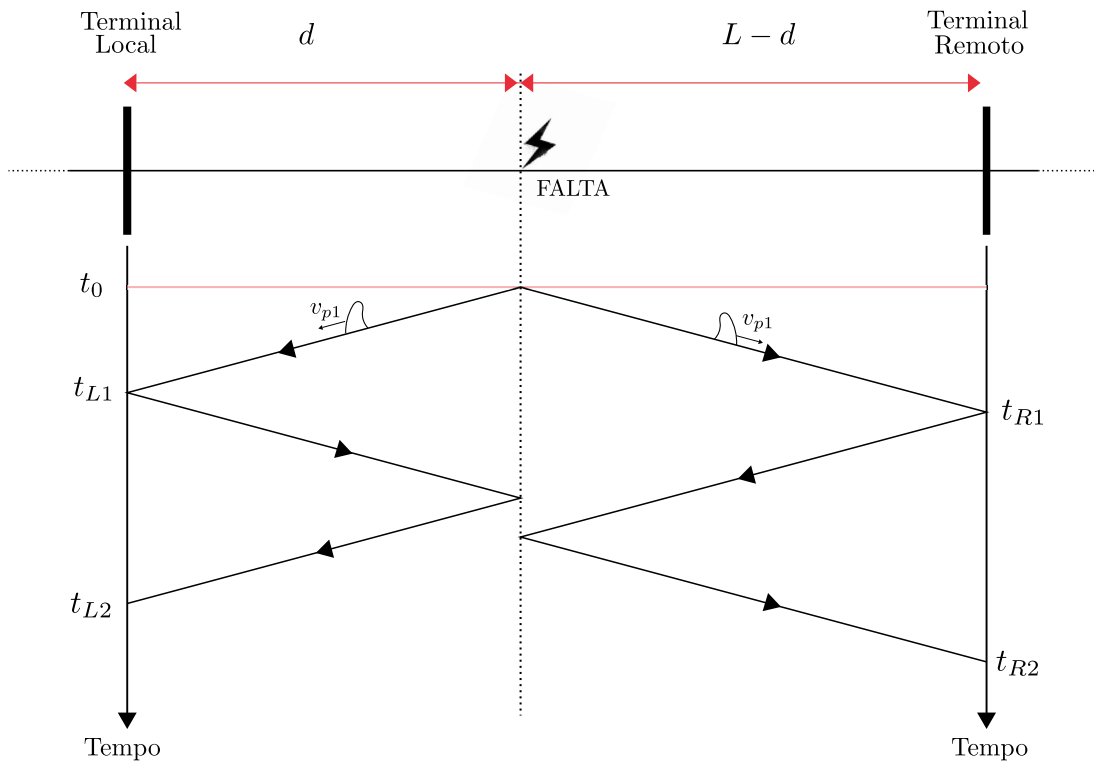
podendo este equacionamento ser reescrito como o mostrado a seguir:

$$\tilde{d}_{km} = \frac{\Delta t_{LR}}{\Delta t_{LR} + \Delta t_{RR}} \cdot L, \quad (2.14)$$

onde  $\Delta t_{LR}$  representa a diferença entre os instantes da OV refletida no ponto de falta e da primeira OV incidente no terminal local, e  $\Delta t_{RR}$  a mesma definição para o terminal remoto. Nota-se que é necessário identificar apropriadamente a OV refletida no ponto de falta, procedimento este considerado por muitos de difícil realização e, conseqüentemente, como uma limitação da técnica.

A formulação pode ser aplicada a qualquer modo, mas em (LOPES *et al.*, 2018), propõe-se o uso apenas do modo aéreo. Com isso o método se torna generalista, podendo ser aplicado a qualquer tipo de falta. Além disso, para identificar as OVs refletidas, este algoritmo utiliza de uma pré-estimativa inicial, a fim de criar um janelamento que facilite a identificação das OVs refletidas no ponto de falta que incidem nos dois terminais. De acordo com os autores, utilizou-se uma pré-estimativa entendendo que o canal de comunicação estaria conectado, mesmo que não funcionando de forma adequada. Porém, sabe-se que muitas vezes este canal não estará

disponível, fragilizando a solução. Para resolver este problema, a função pode utilizar pré-estimativas fasoriais ou até mesmo do tipo LFOV, condições estas também consideradas como limitações.



**Figura 2.4.** Diagrama de Bewley Identificando os Instantes das Primeiras OVs e suas respectivas OVs Refletidas para os Dois Terminais da LT.

## 2.8 MÉTODO PARA IDENTIFICAÇÃO DA ONDA VIAJANTE REFLETIDA

Para vários métodos já relatados neste trabalho, a identificação da OV refletida a partir da falta é um ponto chave para correta localização do distúrbio, sendo esta identificação considerada por muitos de difícil aplicação.

Em Guzmán *et al.* (2018a), Schweitzer-III *et al.* (2019a), SEL-T400L Instruction Manual (2019), os autores propuseram uma nova formulação baseada na análise da corrente de apenas um terminal para identificar, entre todas as OVs medidas, qual é a refletida a partir do ponto do defeito. Para tanto, a polaridade da primeira OV incidente no terminal analisado é identificada e hipóteses da OV refletida são criadas dentro de uma janela de observação pré definida. Para cada hipótese, pesos são calculados de acordo com dois métodos: O *Repeating Travel Time* (RTT) e o *Expected Traveling Wave* (ETW). A hipótese com maior peso representa a resposta

estimada da função para o tempo de incidência da OV refletida a partir do ponto de falta que incide no terminal monitorado. Os autores, uma vez que identificaram a OV refletida, utilizam do método de localização clássico de um terminal, aqui denominado M1TC, fazendo uso do ajuste  $\tau$  cujo cálculo é recomendado a ser realizado por meio da energização da LT monitorada (SCHWEITZER-III *et al.*, 2019a). Vale a pena ressaltar que esta função está implementada em relé comercial e já possui resultados promissores com sua utilização em sistemas reais.

## 2.9 EFEITO DA FREQUÊNCIA DE AMOSTRAGEM PARA PRECISÃO DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS

Sabe-se que os sinais das oscilografias são analógicos e, para poderem ser interpretados por uma inteligência computacional, devem ser discretizados de forma a obter um valor bem definido do sinal para um valor bem definido de tempo. Esta amostragem tem crescido cada vez mais com o avanço da tecnologia, tornando-se um aliado à precisão de funções de localização de faltas e de proteção que utilizam da teoria de OVs. Porém, percebe-se que a taxa de amostragem está totalmente relacionada com a capacidade dos conversores analógico-digital utilizados, sendo estes dispositivos uma implicação de um custo a mais para essas funções que necessitam de altas taxas de amostragem.

Nestes casos, quanto maior a digitalização do sinal, ou seja, quanto mais pontos forem analisados do sinal analisado, mais precisa será a localização obtida. Isso implica que uma vez que se possui uma taxa de amostragem limitada e finita, erros atrelados à localização da falta poderão ser significativos mesmo quando as OVs de interesse são corretamente identificadas, já que o instante não será o exato instante quando da análise do sinal analógico. Portanto, a frequência de amostragem do sinal deve ser considerada alta o suficiente para que afete pouco na precisão de localização de faltas que utilizam OVs. Quando uma análise requer uma precisão maior, deve-se inserir nos equacionamentos termos que levam em consideração este erro relativo à amostragem do sinal.

Para este trabalho, o efeito da frequência de amostragem para precisão de localização de faltas não foi considerado por questões de simplicidade. Além disso, percebeu-se que os resultados obtidos estão dentro dos padrões de localização de faltas aceitos pela comunidade científica

quando da utilização da teoria de OV's.

## 2.10 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados, de forma resumida, os métodos mais conhecidos de localização de faltas que utilizam a teoria de OV's. Percebe-se que, para implementação de qualquer um dos métodos apresentados, sempre é necessário pelo menos um dos seguintes aspectos:

- $\tau$  ou  $v_{p1}$  como parâmetros de ajuste das formulações;
- Sincronização de dados;
- OV refletida a partir da falta;
- Pré-estimativas do ponto de defeito;
- Identificação de modo aéreo com ou sem identificação de modo terra (modo 0).

Percebe-se que, nesta revisão bibliográfica, os métodos indicam sempre ter uma dificuldade associada a sua implementação prática. A Tabela 2.1 identifica todos os métodos relatados neste capítulo e apresenta, de forma resumida, as limitações de cada função LFOV analisada. Avaliando-se a tabela, consegue-se perceber que todos os métodos dependem de alguma das características supra-listadas. Assim, com o intuito de aprimorar os processos existentes, neste trabalho, apresenta-se um método adaptativo que não depende sincronização de dados dos terminais, de pré-estimativa, de parâmetros da LT (velocidades de propagação ou tempo de trânsito). Percebe-se que o método proposto depende da correta identificação das OV's refletidas, porém a própria metodologia as identifica sem depender de aplicações externas. No próximo capítulo, apresentar-se-á uma fundamentação teórica, através da qual será possível compreender o método proposto.

**Tabela 2.1.** Métodos de Localização de Faltas

	$\tau$ ou $v_{p1}$	Sincronização	OV Refletida	Pré Estimativa	Detecção de Modo 0
M1TC	✓	✗	✓	✗	✗
M1T0	✓	✗	✗	✗	✓
M1T3D	✗	✗	✓	✓	✗
M2TC	✓	✓	✗	✗	✗
M2TRG	✗	✓	✓	✓	✗
M2T0	✗	✗	✗	✗	✓
M2TS	✗	✗	✓	✓	✗
Proposto	✗	✗	✓	✗	✗
Legenda:	M1TC:	Um Terminal Clássico;			
	M1T0:	Um Terminal Aplicável para Faltas com Terra;			
	M1T3D:	Um Terminal com Três Detecções;			
	M2TC:	Dois Terminais Clássico;			
	M2TRG:	Dois Terminais Necessitando da OV refletida;			
	M2T0:	Dois Terminais Para Faltas com Terra;			
	M2TS:	Dois Terminais sem Necessidade de Sincronismo.			

## CAPÍTULO 3

# FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Apresenta-se, neste capítulo, a fundamentação teórica sobre o tema de OV's a fim de contemplar todos os aspectos importantes a respeito das implementações que serão aqui comentadas. Além disso, a notação utilizada e os diagramas apresentados são de suma importância para compreensão dos métodos abordados.

### 3.1 REVISÃO TEÓRICA SOBRE ONDAS VIAJANTES

Quando a tensão varia de forma brusca e instantânea, modificando a condição de operação do sistema, transientes são induzidos na LT sobrepondo o sinal existente. Estes transientes são denominados OV's de tensão, que são acompanhados por OV's de corrente. Estas ondas se propagam pela LT com uma velocidade muito próxima à velocidade da luz em LT's aéreas a cabos nus, indo em direção aos dois terminais monitorados (PHADKE; THORP, 2009). Assim, essas frentes de onda podem ser visualizadas e interpretadas a partir de estudos das oscilografias adquiridas em cada terminal da LT.

Para o completo entendimento do fenômenos de indução de OV's em uma LT, analisa-se um equivalente de um segmento de LT com comprimento  $\Delta x$ , sendo ele ilustrado na Figura 3.1. Nesta representação, a corrente é dada em função do espaço e do tempo, podendo ser calculada pelas leis de Kirchhoff de tensão (LKT) e de corrente (LKC) como mostrado em (3.1) e (3.2), levando-se em consideração que  $R$ ,  $G$  e  $C$  representam a resistência, condutância e capacitância da LT por km,  $t$ , o tempo analisado e  $\ell$  representa a indutância da LT por km, uma vez que  $L$  representa o comprimento da LT neste trabalho.



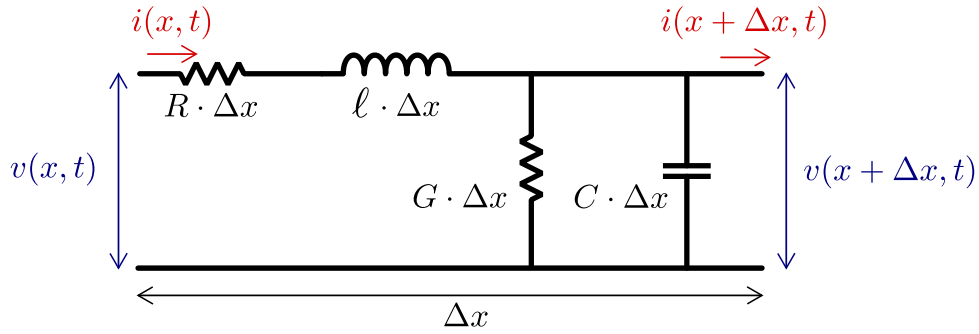


Figura 3.1. Circuito Equivalente de Segmento de Linha de Transmissão.

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

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

Com o intuito de definir os valores  $i(x, t)$ ,  $v(x, t)$ ,  $i(x + \Delta x, t)$  e  $v(x + \Delta x, t)$  em função do espaço  $x$  e  $x + \Delta x$ , dividem-se as duas equações por  $\Delta x$ , tendendo este a zero. Procedendo dessa forma, obtêm-se derivadas em relação ao espaço de corrente e de tensão como mostrado em (3.3) e (3.4).

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

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

Ressalta-se o sinal negativo presente nos equacionamentos, demonstrando que a amplitude da OV decresce à medida que se desloca pela LT analisada, tendo seu valor alterado no espaço e no tempo, identificando uma atenuação presente na própria formulação das OVs induzidas.

Para identificar a solução destes equacionamentos, aplica-se a transformada de Laplace utilizando o operador *Heaviside*, definido como  $s = \partial/\partial t$ , modificando a análise temporal para análise na frequência. Os resultados obtidos podem ser visualizados em (3.5) e (3.6). Sabendo-se que a impedância é definida como  $Z = R + s \cdot \ell$  e a admitância como  $Y = G + s \cdot C$ , substitui-se no equacionamento como mostrado em (3.7) e (3.8).

$$\frac{\partial v(x, s)}{\partial x} = -(R + s \cdot \ell) \cdot i(x, s). \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial i(x, s)}{\partial x} = -(G + s \cdot C) \cdot v(x, s). \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial v(x, s)}{\partial x} = -Z \cdot i(x, s). \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial i(x, s)}{\partial x} = -Y \cdot v(x, s). \quad (3.8)$$

Com intuito de se obter equacionamentos individuais para a corrente e para a tensão, deriva-se cada equacionamento em função do espaço como demonstrado em (3.9) e (3.10).

$$\frac{\partial^2 v(x, s)}{\partial x^2} = -Z \cdot \frac{\partial i(x, s)}{\partial x}. \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial^2 i(x, s)}{\partial x^2} = -Y \cdot \frac{\partial v(x, s)}{\partial x}. \quad (3.10)$$

A fim de obter expressões em função de apenas tensões ou correntes, os equacionamentos apresentados em (3.7), (3.8), (3.9) e (3.10) são combinados, obtendo-se:

$$\frac{\partial^2 v(x, s)}{\partial x^2} = -Z \cdot Y \cdot v(x, s). \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial^2 i(x, s)}{\partial x^2} = -Y \cdot Z \cdot i(x, s). \quad (3.12)$$

É importante ressaltar a definição da constante de propagação ( $\gamma$ ) de uma LT, definida como sendo  $\gamma = \sqrt{Z \cdot Y}$ . Desta maneira, reescrevem-se os equacionamentos de acordo com (3.13) e (3.14).

$$\frac{\partial^2 v(x, s)}{\partial x^2} - \gamma^2 \cdot v(x, s) = 0. \quad (3.13)$$

$$\frac{\partial^2 i(x, s)}{\partial x^2} - \gamma^2 \cdot i(x, s) = 0. \quad (3.14)$$

Do exposto, percebe-se que as soluções se encontram no domínio de Laplace e, para resolvê-las, condições de contorno são necessárias. Deve-se então analisar, mesmo que inicialmente, a solução genérica destas equações diferenciais parciais de segunda ordem. Em (3.15) e (3.16) são definidas as soluções genéricas da tensão e da corrente, respectivamente, assumindo uma onda medida em uma descontinuidade. Desse modo, considera-se a soma de duas partes: A primeira sendo a onda incidente ( $v_I$  e  $i_I$ ) e a segunda sendo a onda refletida ( $v_R$  e  $i_R$ ), sendo estas ondas também denominadas como ondas progressivas e regressivas (JÚNIOR, 2003).

$$v(x, t) = v_I \cdot e^{-\gamma x} + v_R \cdot e^{\gamma x}, \quad (3.15)$$

$$i(x, t) = i_I \cdot e^{-\gamma x} + i_R \cdot e^{\gamma x}. \quad (3.16)$$

Desta maneira, conseguiu-se definir o valor da amplitude das OV's induzidas em uma LT após a ocorrência de uma falta. Além disso, a partir dos termos exponenciais, é possível

entender matematicamente os fenômenos de atenuação durante a propagação das OV's, visto que resultam em um decaimento das amplitudes das frentes de onda lançadas no sistema. Por fim, a partir do exposto, é possível analisar aspectos importantes, como as impedâncias que relacionam as OV's analisadas de tensão e corrente, bem como as velocidades de propagação dessas frentes de onda.

### 3.2 IMPEDÂNCIA CARACTERÍSTICA E VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO

A partir das leis de Ohm, a impedância característica ( $Z_C$ ) de uma LT é definida como sendo a razão entre as OV's de tensão e de corrente. Isso indica que o valor de  $Z_C$  depende dos parâmetros da LT como será aqui demonstrado. Assim, conhecendo-se  $Z_C$ , consegue-se analisar o comportamento de uma OV quando esta encontra uma descontinuidade. Em (3.17) e (3.18) formula-se o equacionamento da impedância característica em função de  $v_I$ ,  $i_I$ ,  $v_R$  e  $i_R$ , tendo como base tanto os valores incidentes quanto os refletidos. Percebe-se que a mesma formulação de  $Z_C$  é alcançada quando atribuídos valores das OV's de corrente e tensão refletidas ou incidentes.

$$Z_C = \frac{v_I}{i_I} = \sqrt{\frac{Z}{Y}} = \sqrt{\frac{R + j\omega\ell}{G + j\omega C}}, \quad (3.17)$$

$$Z_C = -\frac{v_R}{i_R} = \sqrt{\frac{Z}{Y}} = \sqrt{\frac{R + j\omega\ell}{G + j\omega C}}. \quad (3.18)$$

Considerando uma linha sem perdas e aplicando o conceito de impedância característica, chega-se à definição de impedância de surto ( $Z_s$ ), onde a parte real da impedância série e da admitância em derivação são nulas, como mostrado em (3.19) (ARAÚJO; NEVES, 2005).

$$Z_s = \sqrt{\frac{j\omega\ell}{j\omega C}} = \sqrt{\frac{\ell}{C}}. \quad (3.19)$$

A impedância de surto é uma grandeza representada por um valor real e é normalmente considerada como um valor característico da LT analisada, visto que não depende de seu comprimento. Levando-se em consideração que nas altas frequências as perdas de uma LT são desprezíveis em relação aos valores assumidos por suas reatâncias e susceptâncias, a aproximação de uma linha real para uma LT sem perdas pode ser feita de modo a identificar algumas propriedades dos transitórios eletromagnéticos induzidos no sistema. Nesse caso, alguns dos

parâmetros característicos de LTs para estudos de OV's se tornam função apenas das indutâncias e capacitâncias distribuídas. Por exemplo, de acordo com Greenwood (1991), a velocidade de propagação de uma OV em uma LT depende de seus parâmetros, e pode ser aproximada por:

$$v_{OV} = \sqrt{\frac{1}{\ell \cdot C}}, \quad (3.20)$$

onde  $v_{OV}$  implica na velocidade de propagação da OV na LT em questão. Tipicamente, em LTs aéreas, essa velocidade se aproxima em muito da velocidade da luz ( $c$ ), sendo seu valor muitas vezes aproximado por  $0.98 \cdot c$  (DI TOMASSO *et al.*, 2019).

Uma vez definida a impedância característica, impedância de surto e velocidade de propagação, pode-se identificar a relação das OV's de corrente e de tensão em uma LT de acordo com a Equação (3.21):

$$i(x, t) = \frac{1}{Z_C} \cdot (v_I \cdot e^{-\gamma x} - v_R \cdot e^{\gamma x}). \quad (3.21)$$

Nota-se que o valor da corrente elétrica no espaço e tempo é calculado baseada no o valor da tensão incidente, da tensão refletida e também do valor de  $Z_C$ . Isso implica que, ao encontrar uma terminação, o valor da corrente será modificado, variando a amplitude da onda refletida e eventualmente sua polaridade. Desta maneira, analisar o que acontece com uma OV ao incidir em uma terminação se torna importante principalmente para os métodos que utilizam desta teoria para localizar faltas (GUZMÁN *et al.*, 2018b; SCHWEITZER *et al.*, 2014; CUNHA, 2019).

### 3.3 ESTUDO DAS TERMINAÇÕES PARA ONDAS VIAJANTES

Ao interagir com uma terminação, a OV incidente pode refletir ou refratar a depender da impedância da terminação ( $Z_T$ ). Após a ocorrência de uma falta e, conseqüentemente, indução de transitórios na LT em questão, incidirão OV's na terminação com impedância equivalente  $Z_T$ , como demonstrado na Figura 3.2. Em (3.22), define-se a relação da primeira lei de Ohm para o estudo de transitórios eletromagnéticos, sendo  $v_I$  e  $v_R$  as ondas de tensão incidentes e refletidas, respectivamente, e  $i_I$  e  $i_R$  as ondas de corrente.

$$Z_T = \frac{v_T}{i_T} = \frac{v_I + v_R}{i_I + i_R}. \quad (3.22)$$

A partir das formulações analisadas, consegue-se relacionar os valores de  $v_I$  e  $v_R$  dependendo apenas dos valores de  $Z_C$  e  $Z_T$ . O mesmo se consegue com os valores de  $i_I$  e  $i_R$ , como demonstrado em (3.23) e (3.24).

$$v_R = \frac{Z_T - Z_C}{Z_T + Z_C} \cdot v_I = \Gamma_v \cdot v_I. \quad (3.23)$$

$$i_R = \frac{Z_C - Z_T}{Z_C + Z_T} \cdot i_I = \Gamma_i \cdot i_I. \quad (3.24)$$

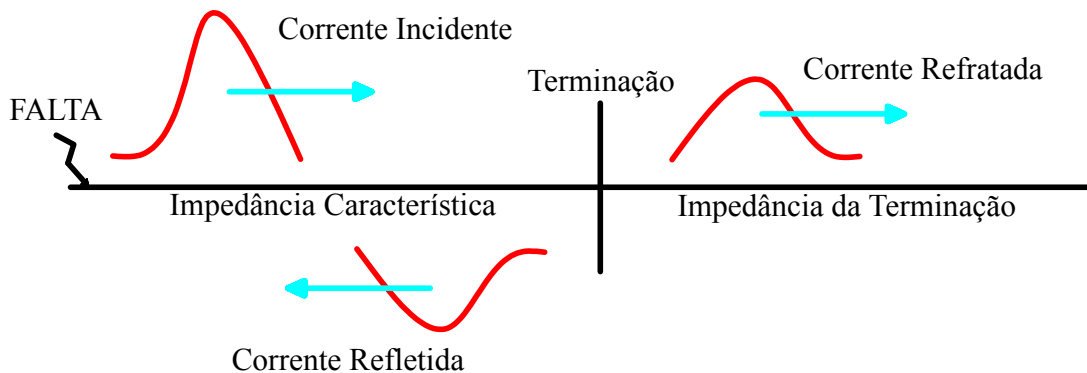
Os valores de  $\Gamma_v$  e  $\Gamma_i$  indicam os coeficientes de reflexão da tensão e de reflexão da corrente, respectivamente, e dependem de  $Z_C$  e  $Z_T$ , como demonstrado a seguir:

$$\Gamma_v = \frac{Z_T - Z_C}{Z_T + Z_C}, \quad (3.25)$$

$$\Gamma_i = \frac{Z_C - Z_T}{Z_C + Z_T}. \quad (3.26)$$

Estes coeficientes são de suma importância para compreensão do comportamento da OV ao incidir em uma terminação, podendo sua polaridade ser invertida bem como sua amplitude aumentada ou diminuída. Uma análise parecida pode-se ser feita para o coeficiente de refração no ponto de falta, como é demonstrado em Marinho (2019). Para melhor compreensão, caso  $Z_C$  da linha seja igual à impedância  $Z_T$ , nenhuma onda será refletida, fazendo com que toda a energia seja transmitida. Ao considerar  $Z_T = 0$ , a onda refletida possuirá a mesma energia que a onda incidente, não transmitindo nenhuma OV adiante (GUZMÁN *et al.*, 2018b; SCHWEITZER *et al.*, 2014; MARINHO, 2019).

De acordo com Guzmán *et al.* (2018b),  $Z_T$  tende a ser um valor menor que  $Z_C$  da LT ( $Z_T \ll Z_C$ ) pela quantidade de vãos de linha normalmente conectados em subestações. Assim,



**Figura 3.2.** Diagrama de OVs em terminação (CUNHA, 2019).

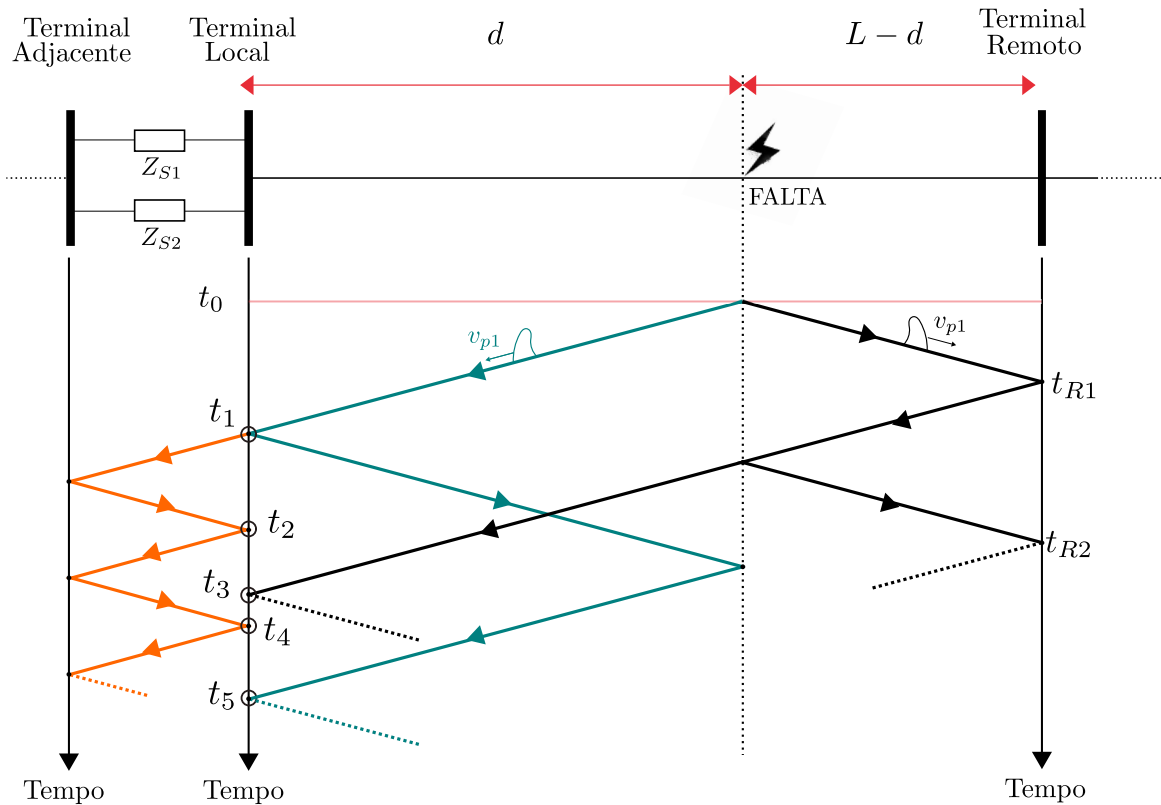
normalmente, considera-se que o coeficiente de reflexão para OV's de corrente é tipicamente positivo nos terminais de LT's aéreas de alta tensão ( $\Gamma_i > 0$ ). Isso implica que a polaridade da primeira OV incidente no terminal analisado e a polaridade da onda refletida no terminal monitorado tendem a ser a mesma. Este fato é de grande importância para definição de algumas estratégias de identificação de ondas de interesse para localizar faltas com confiança utilizando a teoria de OV's. Da mesma forma, na descontinuidade formada no ponto de falta também apresenta valores menores do que os de impedância característica da LT monitorada, resultando também em coeficientes de reflexão positivos ( $\Gamma_{i,F} > 0$ ). De fato, a descontinuidade é dada pelo paralelo da resistência de falta  $R_F$  e da impedância característica da LT  $Z_C$  a jusante da falta, resultando em  $Z_T = \frac{R_F \cdot Z_C}{R_F + Z_C}$ . Assim para  $\Gamma_{i,F} > 0$ , basta que  $Z_T < Z_C$ , o que é verdade desde que  $Z_C > 0 \Omega$ . Portanto, as OV's de corrente refletidas no ponto de falta apresentam mesma polaridade das frentes de onda que incidem na descontinuidade, sendo essa também uma condição importante para os métodos estudados e desenvolvidos nesse trabalho.

### 3.4 PROPAGAÇÃO DAS ONDAS VIAJANTES E DIAGRAMA DE BEWLEY

Para completa compreensão do fenômeno da indução de OV's em uma LT após a ocorrência de uma falta, Bewley (1963) propôs um diagrama de treliças, também conhecido como diagrama de Bewley, que analisa de forma visual as OV's induzidas. Este diagrama relaciona a velocidade de propagação das OV's (tangente do ângulo formado com o eixo horizontal) com o instante de chegada das OV's, e com o espaço percorrido por elas.

O tempo de propagação de uma OV ( $\tau$ ) se refere ao tempo em que um OV demora para propagar de um terminal até o outro, sendo o espaço percorrido a própria extensão da LT analisada ( $\tau = L/v_{OV}$ ). Como já definido anteriormente, a velocidade de propagação de uma OV em uma LT é dependente dos parâmetros desta, sendo definida como  $v_{OV} = \sqrt{\frac{1}{LC}}$ .

A Figura 3.3 ilustra uma LT aérea principal onde uma falta ocorreu próxima do terminal remoto, Sendo  $Z_{S1}$  e  $Z_{S2}$  as impedâncias de surto de duas linhas adjacentes que estão conectadas em paralelo a jusante da LT analisada. Neste sistema, o terminal local possui duas LT's adjacentes com comprimentos menores que a LT principal, fazendo com que existam reflexões visíveis dentro do valor temporal de um  $\tau$ . Percebe-se que, ao incidir uma falta sobre esta LT,



**Figura 3.3.** Diagrama de Bewley.

OVs induzidas se propagam a partir do ponto de falta até os dois terminais com velocidades relativamente próximas, muitas vezes tomadas como iguais. Ao incidir em uma terminação, parte da OV pode refletir e parte pode refratar como explicado na Seção 3.3. É importante lembrar que, como já comentado anteriormente, o ponto de falta também considerado uma terminação, podendo a OV refletir ou refratar a depender das condições do curto circuito.

Para métodos de localização de faltas se faz necessário, usualmente, identificar qual OV é a refletida ou a refratada a partir do ponto de falta. Percebe-se que entre o instante  $t_1$ , relacionado à incidência da primeira OV incidente no terminal local, e o instante  $t_5$ , que representa o instante de incidência da OV refletida no ponto de falta, existem várias outras ondas presentes que dependem de alguns fatores como tipo de falta e local do ponto do defeito. Essas ondas podem ser visualizadas nas oscilografias e ocorrem por refrações e/ou reflexões nas LTs adjacentes além de poderem ser provenientes do terminal remoto a partir de uma refração no ponto da falta, conforme representado pelo instante  $t_3$ . Portanto, identificar a OV de interesse se torna uma questão relevante para alguns métodos LFOV. Tal problemática pode ser constatada da análise do diagrama de Bewley apresentado.

## 3.5 ANÁLISE DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS

Qualquer manobra abrupta ou falta ocorrida no sistema induz transitórios eletromagnéticos de alta frequência da LT analisada. Com o objetivo de compreender as informações contidas nas oscilografias com presença destes transitórios, diversas metodologias foram reportadas na literatura a fim de identificar as OV's ali presentes (SAHA *et al.*, 2010).

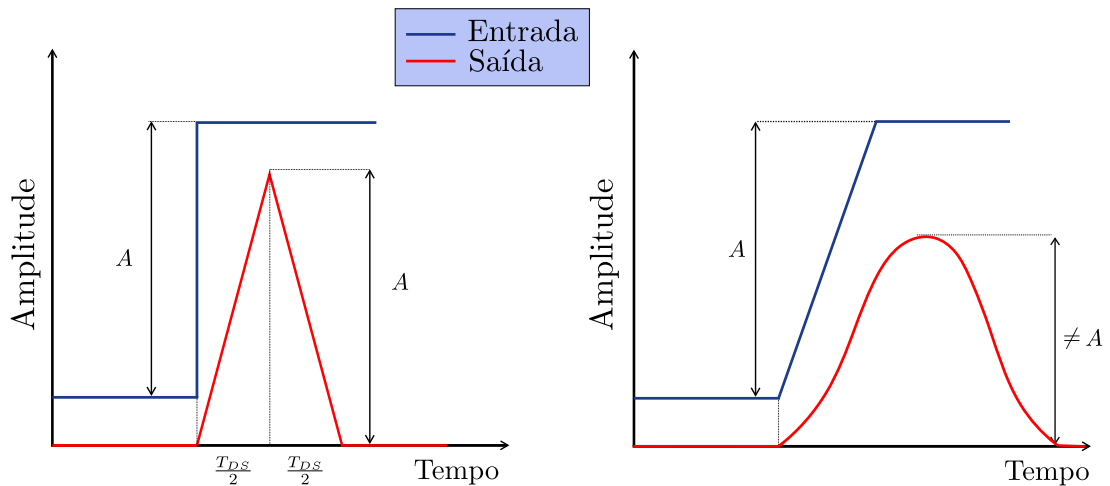
Entre as metodologias existentes para identificação de OV's, algumas das mais conhecidas são: o Filtro *Differentiator-Smoother* (SCHWEITZER *et al.*, 2014), a transformada de Park (TDQ) (LOPES *et al.*, 2013), a Transformada Wavelet Discreta (TWD) (SAHA *et al.*, 2010), a Transformada Wavelet Discreta Redundante (TWDR) (SAHA *et al.*, 2010), e a Transformada Wavelet Estacionária com Efeito de Borda em Tempo Real (RW-BSWT) (COSTA, 2014).

O filtro *Differentiator-Smoother* (DS) possui a qualidade de ter ganho unitário, transformando as variações em forma de degrau tipicamente impostas por OV's em saídas com forma triangular e com mesma amplitude. Além disso, este filtro é capaz de identificar a estampa de tempo das OV's de forma coerente e ainda pode-se utilizar interpolações para garantir um resultado ainda mais preciso.

### 3.5.1 Filtro *Differentiator-Smoother*

Este filtro é dividido em duas partes sendo a primeira conhecida como suavização, que é equivalente a um filtro passa-baixa, fazendo com que as distorções dos sinais fiquem suavizadas. A segunda parte consiste na diferenciação, fazendo com que as características dos sinais referentes a um degrau sejam transformadas em um pulso triangular (SCHWEITZER *et al.*, 2014). Ressalta-se que o processo de filtragem é realizado em tempo real e é utilizado um janelamento contendo  $N_{DS}$  coeficientes com duração  $T_{DS}$ , os quais são dados por  $-G$  e  $G$ , a cada metade da janela de coeficientes, onde  $G = \frac{2}{N_{DS}-1}$ , e um zero central, totalizando 21 amostras (RIBEIRO *et al.*, 2019). Na Figura 3.4, ilustra-se um caso em que  $N_{DS} = 21$  coeficientes são considerados, resultando em um tempo  $T_{DS} = 21 \mu s$ , uma vez que foi utilizado o valor de  $1 \mu s$  como passo de representação dos sinais. Do exposto, comprova-se que este filtro responde a entradas em degrau com saídas do tipo triangular. Já em casos de atenuação dos transitórios,





**Figura 3.4.** Filtro *Differentiator-Smoother*

em que rampas são verificadas ao invés de degrau, a resposta do filtro tem forma parabólica, a qual também é favorável para a análise de OV's Guzmán *et al.* (2018a).

Apesar de possuir benefícios, existem limitações quanto à utilização deste filtro para faltas muito próximas do terminal analisado, havendo uma sobreposição na saída do filtro, dificultando a visualização das ondas de interesse. Apesar disso, para todas as implementações neste trabalho, utilizou-se o filtro DS.

### 3.6 TRANSFORMAÇÃO DE CLARKE

Sabe-se que o sistema trifásico real é acoplado, implicando que todas as fases interferem entre si. No caso de estudo de curtos-circuitos, ao avaliar valores instantâneos dos sinais, o uso de transformações modais é considerado comum. Desse modo, torna-se possível desacoplar o sistema, representando-o no domínio modal a partir de dos aéreos e terra. Dentre as mais utilizadas, destacam-se as transformações de Clarke (CLARKE, 1943; DUESTERHOEFL *et al.*, 1951) e de Karrenbauer (KARRENBAUER, 1967). Para este trabalho, a transformada de Clarke é aplicada em todas as aplicações.

A transformada de Clarke tem o objetivo de diagonalizar a matriz resultante, gerando os modos aéreos Alfa ( $\alpha$ ), Beta ( $\beta$ ) e modo terra, denominado Zero (0) (CLARKE, 1943; GUZMÁN *et al.*, 2018a; JÚNIOR, 2003). Essa transformada pode ser referenciada às fases A,

B ou C (SCHWEITZER *et al.*, 2014; MARINHO, 2019), como mostrado nas seguintes matrizes:

$$M_{CA} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.27)$$

$$M_{CB} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} -1 & 2 & -1 \\ -\sqrt{3} & 0 & \sqrt{3} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.28)$$

$$M_{CC} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} -1 & -1 & 2 \\ \sqrt{3} & -\sqrt{3} & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.29)$$

onde  $M_{CA}$ ,  $M_{CB}$  e  $M_{CC}$  representam as matrizes da transformada de Clarke referenciadas às fases A, B e C respectivamente.

Multiplicando-se as correntes e tensões de fase pela matriz transformação escolhida, aqui generalizada por  $\mathbf{M}$ , chegam-se aos valores modais dos sinais de interesse, conforme descrito a seguir.

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} = [\mathbf{M}] \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}. \quad (3.30)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = [\mathbf{M}] \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}. \quad (3.31)$$

Estes valores modais são desacoplados, não interferindo um modo em outro. É importante ressaltar que a componente de modo zero (0) somente existe para faltas que envolvem a terra, sendo a velocidade de propagação deste modo ( $v_{p0}$ ) menor do que a velocidade de propagação dos modos aéreos, aqui denominado  $v_{p1}$ . Deve-se perceber que essas considerações são importantes do ponto de vista de implementação dos métodos descritos no capítulo anterior, representando etapas importantes para a aplicação de técnicas de LFOV em sistemas reais.

### 3.7 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo apresentou-se a fundamentação teórica necessária para o entendimento do método proposto neste trabalho. Inicialmente, fez-se uma revisão teórica sobre os principais aspectos das OV's induzidas em uma LT após a ocorrência de um falta. Em seguida, um estudo básico de terminações foi feito, identificando que a terminação em que uma OV incide (seja nos

terminais da LT ou na falta) pode afetar diretamente na sua amplitude. Para melhor compreensão do estudo de OV's, o diagrama de Bewley foi explicado a fim de identificar as principais OV's utilizadas pelos algoritmos de localização de faltas. Por fim, conceitos sobre o processo de filtragem utilizado neste trabalho bem como da transformação de Clarke consideradas nas implementações desse trabalho foram apresentados.

## CAPÍTULO 4

# MÉTODO PROPOSTO

O método proposto neste trabalho unifica dois métodos de localização de faltas presentes na literatura e adiciona passos que aprimoram o processo como um todo, fazendo com que o método fique livre do uso de ajustes baseados em parâmetros da LT, tal como velocidade de propagação ou tempo de trânsito, mantendo-se isento da necessidade de sincronização de dados e pré-estimativas do local da falta. É importante ressaltar que o método necessita do comprimento da LT como requisito importante da implementação aqui proposta. Para completa compreensão do método proposto, faz-se necessário compreender alguns conceitos adicionais, os quais se relacionam com os seguintes processos:

1. O pré-processamento dos sinais transitórios avaliados se faz crucial para garantir um bom funcionamento de funções LFOV. No algoritmo proposto, os processos tradicionalmente empregados em dispositivos microprocessados reais com funções LFOV são adotados, e portanto, brevemente explicados nesse capítulo.
2. O método de identificação da OV refletida reportado (SCHWEITZER-III *et al.*, 2019a) tem se mostrado promissor em aplicações reais. Essa técnica é aplicada em conjunto com o método clássico de um terminal M1TC, conforme também reportado em (SCHWEITZER-III *et al.*, 2019a) e comentado na seção 2.8. Esse conjunto de técnicas será empregado em etapas intermediárias do algoritmo proposto e, portanto, os principais conceitos serão apresentados de forma detalhada. Por questões de simplificação, todo o processo incluindo a detecção de OVs refletidas na falta e aplicação do método M1TC será denominado simplesmente por SETWFL, proveniente do termo em inglês *Single-Ended Traveling Wave-based Fault Location*.
3. O método M2TS proposto em (LOPES *et al.*, 2018) e comentado na seção 2.7 apresenta conceitos de cálculo de estimativas do comprimento da LT a partir da identificação de

OVs incidentes e refletidas no ponto de falta. Apesar da formulação final de localização de faltas não ser exatamente o conceito de interesse para desenvolvimento do método proposto, o passo intermediário da estimativa do comprimento da linha  $L$  será útil para a criação de condições na solução desenvolvida, que permitirá a otimização do cálculo do local da falta.

#### 4.1 PRÉ-PROCESSAMENTO DOS SINAIS

Após a correta aquisição dos dados analógicos, inicia-se a etapa de pré-processamento dos sinais, a qual tem como finalidade preparar as formas de onda para a aplicação desenvolvida. Nessa etapa, realiza-se o desacoplamento dos sinais de corrente utilizando a Transformação de Clarke, com posterior filtragem dos sinais modais por meio do filtro DS. Ao final, procede-se com a interpolação parabólica dos picos detectados, quando só então são aplicados os métodos de localização de faltas abordados nesse trabalho. Esta sequência de passos para análise das OVs será utilizada em todas as implementações apresentadas neste trabalho. É importante ressaltar que para identificação das OVs, utilizou-se neste trabalho um limiar de 5% do valor máximo verificado nos sinais filtrados, assumindo que as aplicações de interesse são realizadas no modo *off-line*, partindo-se da análise de oscilografias de falta previamente disponíveis. Dentre os testes realizados, este valor de limiar permitiu a identificação de OVs de interesse para aplicação do método proposto, não prejudicando a análise mesmo com a inserção de ruídos da ordem de 30 dB, conforme será demonstrado posteriormente.

#### 4.2 MÉTODO PARA IDENTIFICAÇÃO DA ONDA VIAJANTE REFLETIDA

O método SETWFL reportado em Guzmán *et al.* (2018a), Schweitzer-III *et al.* (2019a) identifica a OV refletida a partir da falta utilizando o valor de  $\tau$  como entrada da função. Para tanto, analisam-se sinais de corrente de apenas um terminal da LT, e no final do processo com a localização de faltas é realizada por meio do método MITC. A técnica SETWFL é baseada em pesos ponderados para hipóteses criadas de acordo com a polaridade de reflexões em relação à polaridade da OV incidente no terminal analisado. Ainda, vale a pena ressaltar que, como comentado pelos autores, caso exista uma pré estimativa inicial do ponto de falta,

seja proveniente de técnicas fasoriais um terminal, fasoriais de dois terminais ou por OV dois terminais, a formulação dos pesos ponderados finais é ajustada, influenciando conseqüentemente na estimativa calculada do ponto de falta. Porém, para a explicação do método SETWFL neste trabalho, opta-se pode considerar que não existem pré-estimativas iniciais do local da falta, visto que vislumbra-se uma solução independente dessas informações.

A Figura 3.3 será utilizada como base para entendimento deste método uma vez que ilustra de forma simples a problemática de definição de qual é a OV refletida da partir da falta (instante  $t_5$ ). A explicação da técnica será dividida em 5 passos baseados em (GUZMÁN *et al.*, 2018a; SCHWEITZER-III *et al.*, 2019a; CUNHA *et al.*, 2020), que obtiveram resultados práticos analisando LTs da *Bonneville Power Administration* (BPA) e em cenários simulados. Como já mencionado, a SETWFL possui como entrada o valor de  $\tau$ , que pode ser calculado a partir dos parâmetros da LT, estimado utilizando procedimento via energização ou a partir de aproximações consideradas tipicamente pouco robustas. Dessa forma, um cálculo confiável do parâmetro  $\tau$  é de suma importância para que o método SETWFL identifique a hipótese correta em relação à OV refletida no ponto de falta e que o resultado final da localização seja confiável.

#### 4.2.1 Passo 1 do SETWFL - Janelamento e Seleção de Picos

De acordo com Schweitzer-III *et al.* (2019a), o primeiro passo é definir quais são as hipóteses (*hip*) para a onda refletida a partir da falta. Para isso, devem-se criar duas janelas de observação. A primeira janela com tamanho  $ObsWin1 = 2,4 \cdot \tau$  delimita o período na oscilografia a serem considerados picos válidos para cálculo dos pesos ponderados tomando como referência o instante do primeiro pico da saída do filtro DS. A segunda janela de observação, com tamanho  $ObsWin2 = 2 \cdot \tau + 10 \mu s$ , tem o intuito de definir quais, entre as OVs válidas, podem ser as hipóteses da reflexão a partir da falta. Percebe-se que os intervalos de cada janela é diferente, sempre valendo a relação  $ObsWin2 < ObsWin1$ . Para que uma OV seja considerada uma hipótese, ela necessita seguir dois critérios: 1) Estar dentro da  $ObsWin2$ ; 2) Possuir mesma polaridade da primeira OV incidente no terminal analisado. Para completo entendimento, a Figura 4.1 ilustra as duas janelas de observações de uma falta monofásica simulada em software de transitórios eletromagnéticos. Percebe-se que a primeira OV possui polaridade positiva implicando que, como na janela  $ObsWin2$  estão contidos apenas três picos com polaridade positiva,

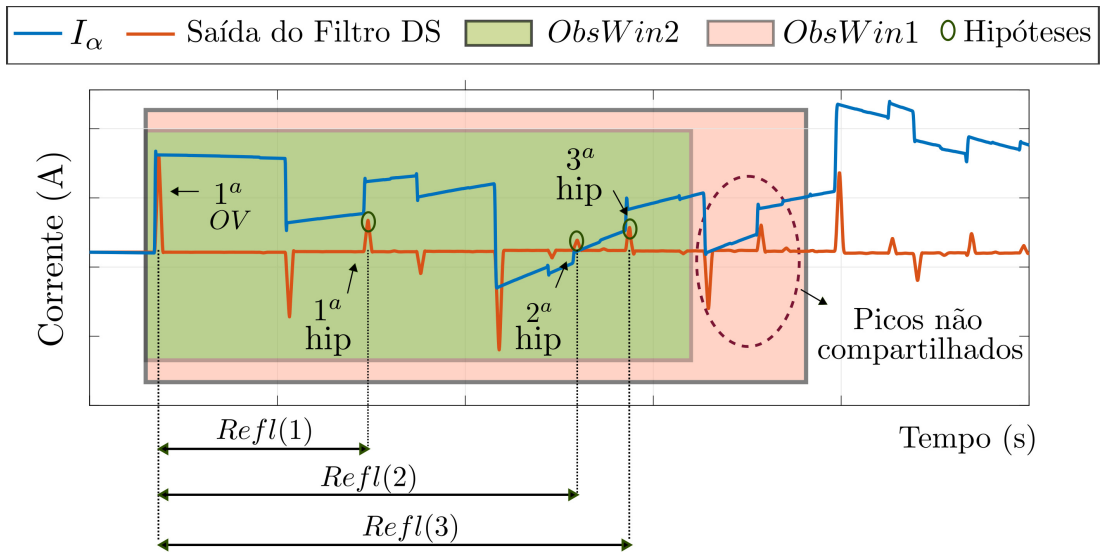


Figura 4.1. Janelas de Observação

então somente três hipóteses são criadas neste exemplo. Deve-se notar que existem picos não compartilhados entre as duas janelas criadas, mas que são considerados picos válidos. Apesar destes picos não serem tomados como hipóteses, eles interferem nos pesos calculados para cada uma das hipóteses definidas.

Deve-se entender que os picos fora das duas janelas de observações não são contabilizados para nenhuma informação de identificação de pesos para o método SETWFL, sendo esses picos desprezados. Assim, como etapa final desse primeiro passo do algoritmo, a diferença de tempo entre a hipótese e o primeiro pico é calculada, sendo definida como  $Refl(hip)$ , onde para o exemplo apresentado,  $hip = 1, 2$  ou  $3$ .

#### 4.2.2 Passo 2 do SETWFL - Cálculo do Instante da Onda Refratada para Cada Hipótese

Após definição das hipóteses da OV refletida a partir da falta, o método SETWFL calcula os valores correspondentes da OV refratada ( $t_3$  referente a Figura 3.3) para cada hipótese. De acordo com os autores em (SCHWEITZER-III *et al.*, 2019a), o instante de incidência da OV refratada é dado por (4.1), expressão esta que pode ser obtida por inspeção do diagrama de Bewley. Dessa maneira, assume-se que se a hipótese analisada for a correta reflexão a partir da falta, o instante da OV refratada nas oscilografias é dado pelo mostrado abaixo.

$$Refr(hip) = 2 \cdot \tau - Refl(hip) \quad (4.1)$$

Percebe-se que tanto os valores das janelas de observação quanto o valor calculado de  $Refr(hip)$  dependem diretamente do valor de  $\tau$ , o que será eliminado no algoritmo proposto tornando o processo mais robusto.

### 4.2.3 Passo 3 do SETWFL - Aplicação da Metodologia RTT para Definição dos Primeiros Pesos Ponderados

Este passo, denominado *Repeating Travel Time (RTT)*, tem o objetivo de identificar por meio de pesos ponderados as OV's provenientes da parte interna da LT, descartando OV's provenientes de reflexões em terminais externos de LT's adjacentes. Desse modo, evita-se confusão dos métodos de localização de faltas que necessitam da identificação da OV refletida na falta em relação a outras OV's refletidas em outros pontos do sistema.

A partir das estampas de tempo dos picos válidos, cria-se um vetor denominado  $DT$  que representa a diferença de tempo entre todos estes picos validados, considerando uma combinação dois a dois de subtração entre os instantes de cada pico. Para melhor compreensão, suponha que os picos válidos sejam apenas 5, definidos como  $Picos_{válidos} = [150\ 320\ 340\ 400\ 420]$ . Desta maneira,  $DT$  será dado pela subtração dois a dois de todos os valores, sendo definido como:  $DT = sort[270\ 100\ 80\ 20\ 250\ 80\ 60\ 190\ 20\ 170]$ , onde  $sort$  somente coloca estes valores em ordem crescente. É importante ressaltar que dentre os valores de  $DT$  muitos podem ser próximos entre si em virtude de múltiplas reflexões de uma mesma onda em um mesmo ponto do sistema.

Lembre-se que  $DT$  pode ter valores próximos entre si. O primeiro peso  $Q1(hip)$  é dado pela quantidade de vezes em que o valor  $Refl(hip)$  equivale aos valores de  $DT$ . O segundo peso  $Q2(hip)$  é dado pela quantidade de vezes que o valor  $Refr(hip)$  equivale aos valores de  $DT$ . Nota-se que, para cada hipótese, um valor de  $Refl$  e de  $Refr$  são calculados e são comparados com os valores do vetor  $DT$ . De acordo com os autores, uma tolerância de igualdade dos valores de  $DT$  aos dos tempos analisados deve ser utilizada, a fim de levar em consideração dispersões do sinal. Esta tolerância pode variar, sendo em geral, utilizada como  $10\ \mu s$ , a qual é também adotada nesse trabalho.



#### 4.2.4 Passo 4 do SETWFL - Aplicação da Metodologia ETW para Definição do Último Peso Ponderado Juntamente com Uma *Flag* utilizada

Neste passo, denominado *Expected Traveling Wave* (ETW), o objetivo é montar um diagrama de *Bewley* para cada hipótese e comparar os tempos calculados em cada diagrama com o tempos da oscilografia recebida do terminal analisado. Dessa forma, dão-se pesos para hipóteses que tiverem seus instantes de incidência equivalentes aos verificados no diagrama construído, levando-se em consideração também uma tolerância pré definida. Isso implica que se a hipótese for a correta, mais instantes equivalentes existirão ao comparar os padrões estabelecidos que serão definidos a seguir.

Conforme reportado em (SCHWEITZER-III *et al.*, 2019a), para cada hipótese, 4 padrões são definidos para montar o diagrama de *Bewley*. Estes padrões são demonstrados nas Figuras de 4.2 até 4.5. Percebe-se que o primeiro padrão (ver Figura 4.2) se refere a sucessivas reflexões no ponto de falta até que o tempo da *ObsWin1* finalize. O segundo padrão (ver Figura 4.3) é dado pelas OV's provenientes do terminal remoto que são refratadas no ponto de falta, sendo a OV refratada a primeira frente de onda esperada para esse padrão específico. Já a reflexão no ponto de falta que refrata e reflete de volta para o terminal local compõe o terceiro padrão (ver Figura 4.4), gerando sucessivos valores dentro da *ObsWin1*. Por último, o padrão 4 (ver Figura 4.5) consiste em uma reflexão no ponto de falta da OV advinda do terminal remoto.

Para cada hipótese, montam-se os quatro padrões e todos os valores adquiridos são armazenados em um vetor chamado  $ET(hip)$ . Cada hipótese possui seu próprio valor de  $ET$ , diferentemente com o que acontece com os valores de  $DT$  que consiste em apenas um vetor geral. Um terceiro peso  $Q3(hip)$  é calculado sendo dado pela quantidade de vezes que os valores calculados de  $ET$  a partir do diagrama de *Bewley* da hipótese analisada coincidem com os valores da oscilografia local. Por fim, uma *flag* denominada *Weighting Factor* ( $WGF(hip)$ ) é setada para 1 se a onda *Refr* da hipótese analisada existir na oscilografia real do terminal analisado, caso contrário, é mantida com valor lógico baixo  $WGF(hip) = 0$ . Percebe-se que esta OV nem sempre irá existir uma vez que, a depender do tipo de falta, OV's não serão refratadas no ponto de falta (MARINHO, 2019).

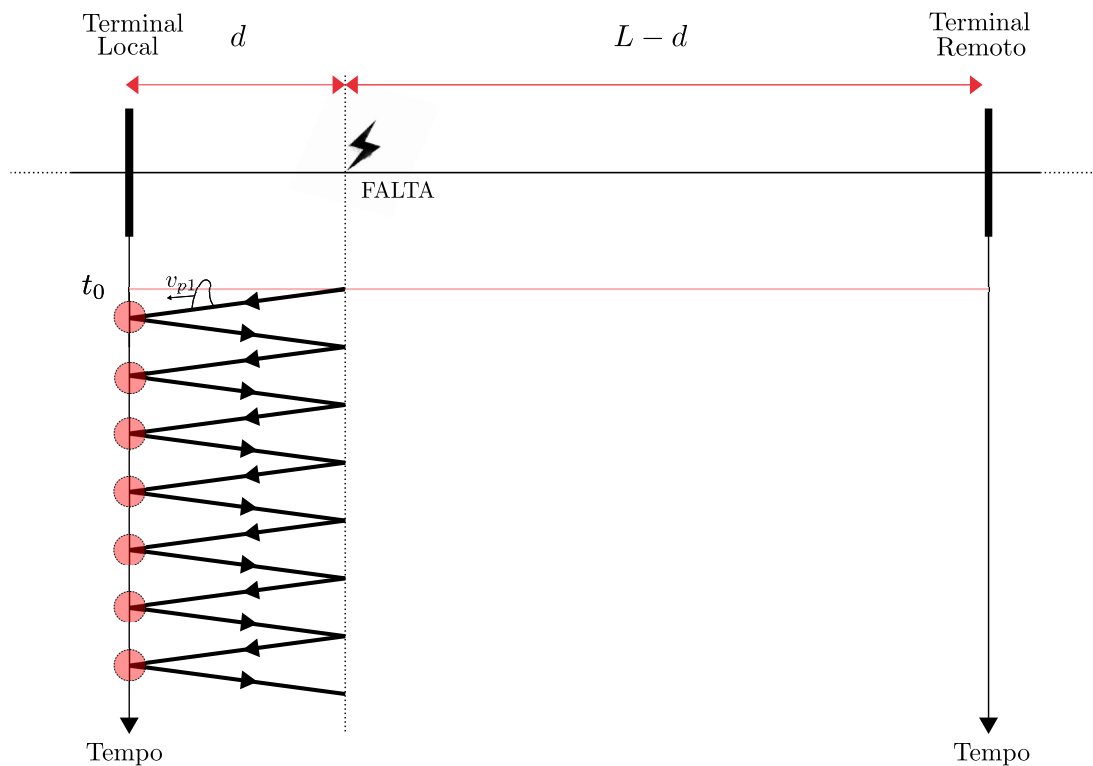


Figura 4.2. 1º Padrão para Diagrama de *Bewley*.

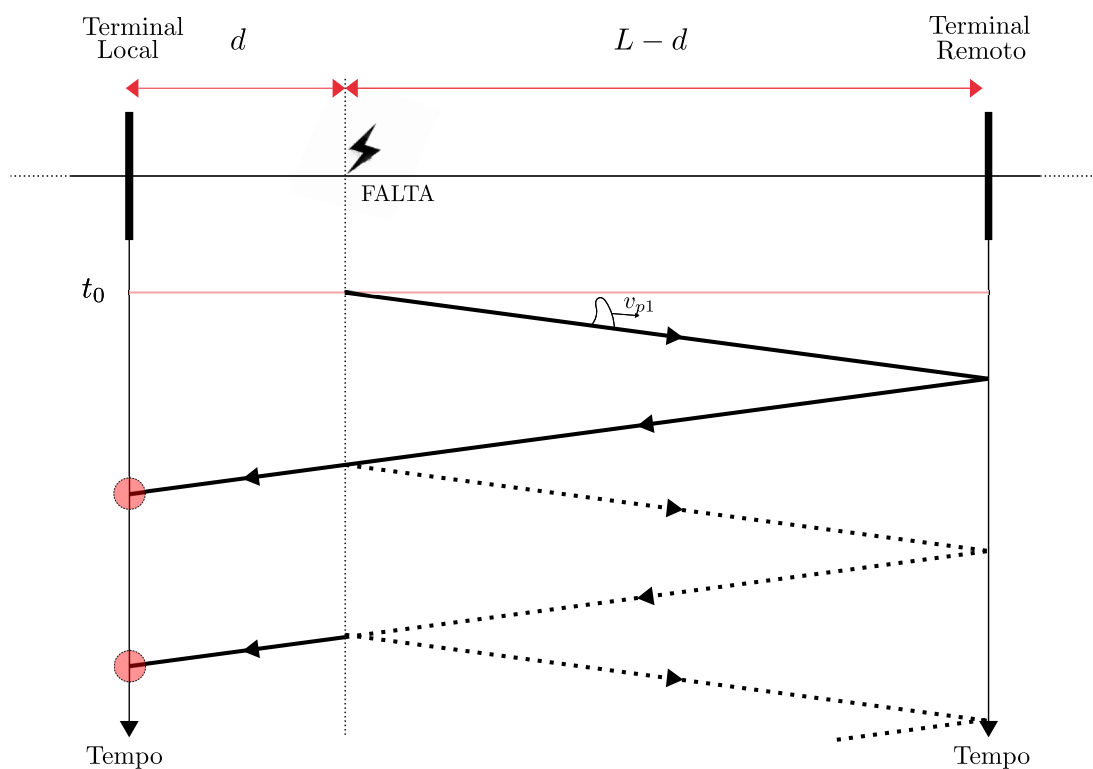


Figura 4.3. 2º Padrão para Diagrama de *Bewley*.

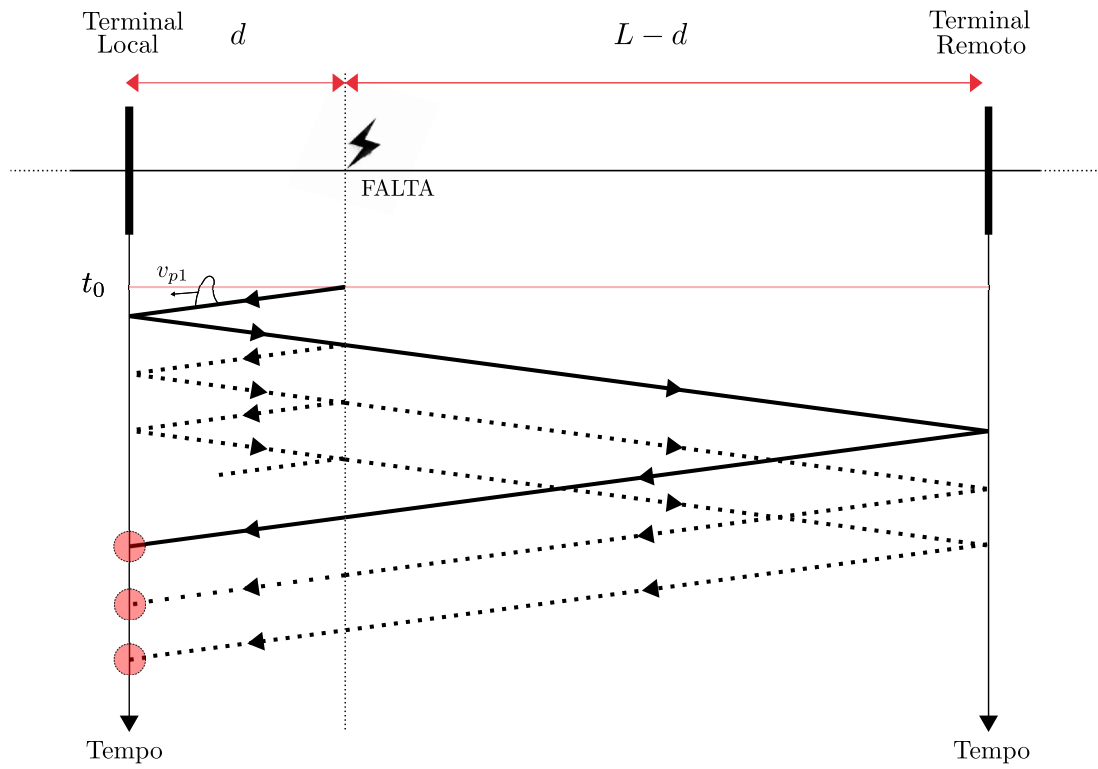


Figura 4.4. 3º Padrão para Diagrama de Bewley.

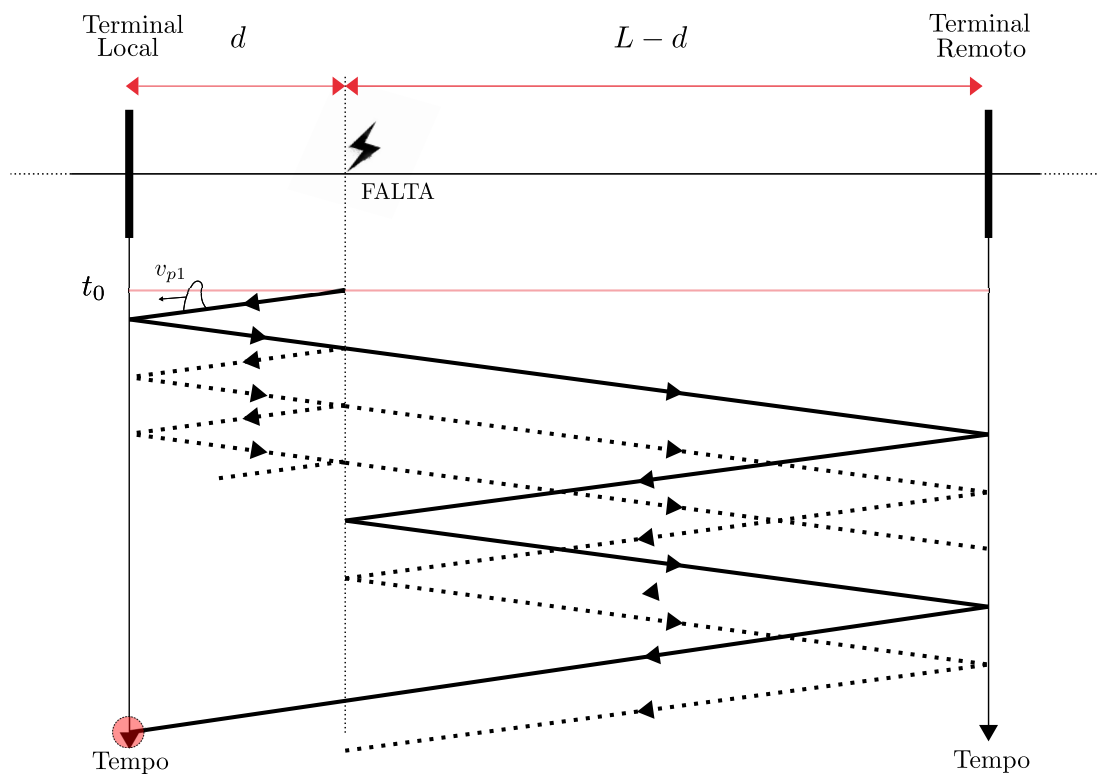


Figura 4.5. 4º Padrão para Diagrama de Bewley.

#### 4.2.5 Passo 5 do SETWFL - Identificação da Onda Refletida e Localização da Falta

Uma vez que os valores de  $Q1(hip)$ ,  $Q2(hip)$ ,  $Q3(hip)$  e  $WGF(hip)$  foram calculados, o peso final  $FW(hip)$  é dado por:

$$FW(hip) = Q1(hip) + Q2(hip) + WGF(hip) \cdot Q3(hip). \quad (4.2)$$

A hipótese com o maior peso será a resposta da função para a OV refletida a partir da falta. Tendo a diferença de tempo dentre a OV refletida e a primeira OV incidente, aplica-se a formulação do método MITC para obtenção da localização da falta, compondo a metodologia SETWFL, conforme explicado anteriormente.

Deve-se destacar que, durante o processo descrito até então, o valor de  $\tau$  é requisitado em toda sua formulação, sendo ainda necessário no passo final de estimativa do local do defeito. Evidencia-se portanto que erros no ajuste  $\tau$  ou na velocidade de propagação  $v_{p1}$  usada para estimar o  $\tau$  serão críticos para a metodologia SETWFL. De fato, erros e incertezas nesses parâmetros são esperados em aplicações práticas, seja por aproximações inerentes ou até mesmo por erro humano ou de cálculo de parâmetros.

Ainda em relação às incertezas nos ajustes de  $\tau$ , considera-se importante destacar os impactos de imprecisões desse ajuste na metodologia SETWFL: 1) Os pesos podem ser modificados, alterando e prejudicando o desempenho da função no processo de identificação de uma hipótese de reflexão a partir do ponto de falta; 2) Mesmo que a OV refletida na falta seja corretamente identificada, a estimativa final do local do defeito pode ser influenciada uma vez que é utilizado o MITC, apresentando erros adicionais. Desse modo, no algoritmo proposto, buscar-se-ão meios de viabilizar o cálculo adaptativo do ajuste  $\tau$ , aprimorando o processo de identificação de OVs e do cálculo do local da falta.

### 4.3 ESTIMATIVA DO COMPRIMENTO DA LT E DO TEMPO DE TRÂNSITO A PARTIR DE CONCEITOS EMPREGADOS NO MÉTODO M2TS

Conforme exposto anteriormente, em (LOPES *et al.*, 2018), apresenta-se o método M2TS que elimina a necessidade de ajustes e sincronização de dados durante o processo de LFOV. Para tanto, os autores calculam uma estimativa do comprimento da linha  $L$ , normalizando

posteriormente a distância de falta calculada a partir do terminal de referência.

Segundo (LOPES *et al.*, 2018), a comprimento  $L$  pode ser estimado somando-se as estimativas das distâncias de falta calculadas a partir dos terminais local e remoto. De acordo com (4.3) e (4.4), essas estimativas podem ser obtidas usando como ajuste  $v_{p1}$ , de modo que:

$$d_{km} = \frac{\Delta t_{LR} \cdot v_{p1}}{2}, \quad (4.3)$$

$$L - d_{km} = \frac{\Delta t_{RR} \cdot v_{p1}}{2}, \quad (4.4)$$

relembrando que  $\Delta t_{LR}$  e  $\Delta t_{RR}$  representam os períodos entre os instantes de incidência das primeiras OVs e das refletidas no ponto de falta que são medidas nos terminais local e remoto, respectivamente.

Portanto, somando as expressões supracitadas, assumindo ajustes exatos de  $v_{p1}$  e assumindo detecções precisas das OVs de interesse,  $L$  pode ser expressa matematicamente por:

$$L = \frac{(\Delta t_{LR} + \Delta t_{RR})}{2} \cdot v_{p1}. \quad (4.5)$$

Conforme mencionado anteriormente, a metodologia SETWFL tomada como base para o método proposto se baseia no valor de  $\tau$  ao invés de ajustes de  $v_{p1}$ , visto que o tempo de trânsito pode ser estimado em manobras de energização de linhas sem ser influenciado diretamente por incertezas em parâmetros catalogados de  $L$ . Desse modo, neste trabalho, o conceito de comprimento de LT estimado apresentado em (4.5) conforme proposto em (LOPES *et al.*, 2018) é adaptado para estimar  $\tau$  ao invés de  $L$ . Para tanto, considera-se que  $v_{p1} = \frac{L}{\tau}$  e assume-se  $\tau$  como sendo função de  $\Delta t_{LR}$  e  $\Delta t_{RR}$ , de modo que, a partir de (4.5), obtém-se:

$$L = \frac{(\Delta t_{LR} + \Delta t_{RR})}{2} \cdot \frac{L}{\tau(\Delta t_{LR}, \Delta t_{RR})}$$

$$\tau(\Delta t_{LR}, \Delta t_{RR}) = \frac{(\Delta t_{LR} + \Delta t_{RR})}{2}. \quad (4.6)$$

Diante do exposto, nota-se que incertezas no ajuste  $\tau$  podem ser eliminadas, tornando-o adaptativo às condições do sistema no momento da perturbação. No entanto, esse processo recai sobre a necessidade de identificar corretamente OVs refletidas no ponto de falta para viabilizar o cálculo de  $\Delta t_{LR}$  e  $\Delta t_{RR}$ . De fato, em (LOPES *et al.*, 2018), a formulação apresentada pelos autores foi elaborada de forma a depender de uma pré-estimativa inicial da falta para correta

identificação das OV's refletidas. Em resumo, utilizam-se pré-estimativas para criar janelas de busca no tempo, dentro das quais espera-se identificar as OV's refletidas de interesse. Porém, isso implica em uma grande dependência do método de cálculo da pré-estimativa, o qual pode ser por vezes inviável ou estar indisponível. Assim, desvios nas janelas de busca podem culminar na identificação incorreta de OV's refletidas, prejudicando o resultado da localização da falta final.

Desse modo, no método proposto, toma-se vantagem da técnica SETWFL apresentada anteriormente, bem como da fórmula adaptada (4.6) para criar condições de análise de hipóteses que tornam o processo de localização de faltas mais robusto para aplicações em LTs aéreas do ponto de vista de incertezas em  $\tau$ , eliminando a necessidade de pré-estimativas, e mantendo uma operação independente de sincronização de dados. Ademais, evita-se a disponibilização de mais de uma hipótese válida da localização de faltas, tal como realizado em (SCHWEITZER-III *et al.*, 2019a), permitindo um processo de localização de faltas mais objetivo e confiável se comparado às técnicas de dois terminais existentes na literatura e no mercado.

#### 4.4 DESCRIÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO

Nesta seção apresenta-se o método proposto, que tem como objetivo localizar faltas em LTs utilizando a teoria de OV's com informações de dois terminais sem depender de parâmetros, do valor da velocidade de propagação ou tempo de trânsito da LT, sem requerer sincronismo de dados entre os terminais, sendo independente de pré-estimativas ou de análises do modo terra. A principal ideia do algoritmo proposto é determinar um valor ótimo para  $\tau$  somente analisando as oscilografias dos dois terminais, identificando as OV's refletidas de cada terminal e, por fim, localizando a falta.

Conforme explicado anteriormente, o método M2TS é formulado de modo a ser independente de ajustes, sendo função apenas dos períodos  $\Delta t_{LR}$  e  $\Delta t_{RR}$ , conforme apresentado em (2.13). No denominador de (2.14), identifica-se o termo  $\Delta t_{LR} + \Delta t_{RR}$ , o qual é proporcional ao  $\tau$  estimado segundo (4.6). Desse modo, considerando que  $\Delta t_{LR} + \Delta t_{RR} = 2\tau_{(\Delta t_{LR}, \Delta t_{RR})}$ , pode-se reescrever (2.13) como:

$$\tilde{d}_{km} = \frac{\Delta t_{LR}}{2 \cdot \tau_{(\Delta t_{LR}, \Delta t_{RR})}} \cdot L. \quad (4.7)$$

A formulação em 4.7 é a mesma formulação de MITC. Porém, percebe-se que o valor de  $\tau$  agora é adaptativo, pois se auto-ajusta a partir do processo de identificação de OV's incidentes e refletidas na falta. Deve-se notar no entanto que em virtude do processo de identificação de OV's refletidas descrito anteriormente, é possível que mais de uma hipótese seja considerada válida ao final do processo, o que resultaria em múltiplos valores de  $\tau$  e, conseqüentemente, múltiplas estimações do local da falta. Entretanto, é importante entender que entre todos os valores calculados para  $\tau$ , apenas alguns serão coerentes. Dessa forma, o algoritmo proposto é dividido em cinco passos, que permitem a identificação do valor ótimo a ser considerado no processo de LFOV. Na Figura 4.6, apresenta-se um diagrama de blocos que descreve, passo a passo, todos os pontos importantes para aplicação da metodologia. Ainda, antes de descrever o algoritmo, as duas janelas de observação devem ser aplicadas conforme metodologia SETWFL, o que pode ser realizado considerando o valor de tempo de trânsito  $\tau_{luz}$ , onde  $\tau_{luz} = L/c$ . Este procedimento é realizado para fazer com que os valores das janelas de observação não dependam de um valor previamente calculado de  $\tau$ , sem comprometer os resultados finais.

#### 4.4.1 Método Proposto - Passo 1 - Cálculo dos Possíveis Valores de Tempo de Propagação

Após a ocorrência de uma falta e o correto processamento dos sinais obtidos, definem-se as hipóteses dos sinais de corrente nos terminais local e remoto de acordo com o mencionado em 2.8. Essas hipóteses devem estar dentro da janela *ObsWin2* e ter a mesma polaridade da primeira OV incidente no terminal analisado. Em seguida, com todos os valores das estampas de tempo das OV's válidas, i.e., picos da saída do filtro DS que estão dentro da *ObsWin1*, calculam-se todos os possíveis valores para o tempo de propagação ( $\tau_{poss}$ ) da OV de interesse na LT analisada, utilizando o equacionamento 4.6. É importante ressaltar que para cada valor de  $\tau_{poss}$  calculado, os valores das hipóteses local e remoto são também armazenados, os quais serão processados posteriormente.

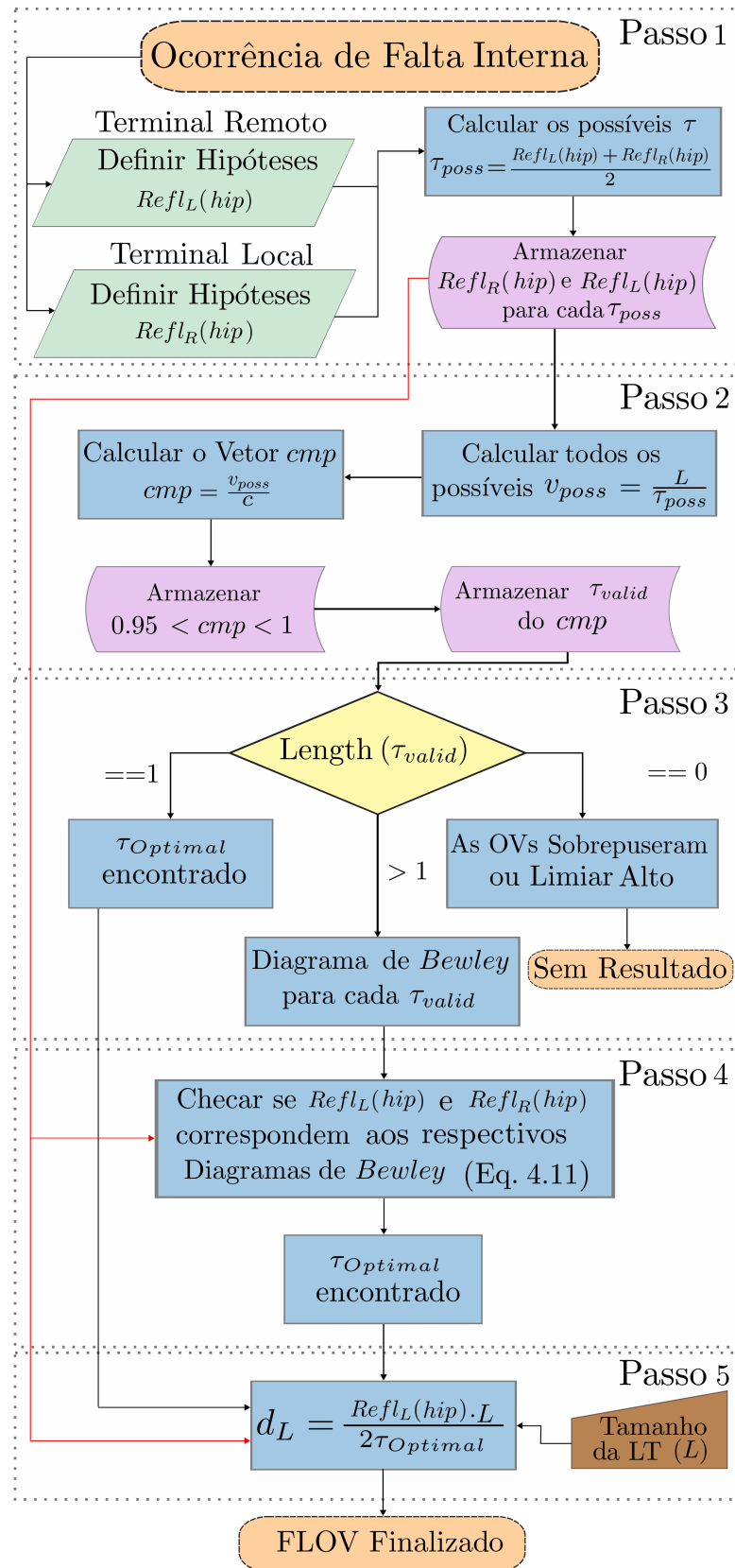


Figura 4.6. Diagrama de Blocos.



#### 4.4.2 Método Proposto - Passo 2 - Definição de Valores Válidos dos Tempos de Propagação

Uma vez que todos os possíveis valores de  $\tau$  da LT analisada foram estimados utilizando os valores dos picos válidos, um vetor denominado  $v_{poss}$  é calculado usando:

$$v_{poss} = \frac{L}{\tau_{poss}}. \quad (4.8)$$

Este vetor representa as possíveis velocidades de propagação das OV's de modo aéreo na LT analisada de acordo com os diferentes valores obtidos de  $\tau$ , assumindo-se um único comprimento da LT. Por simplicidade, divide-se o vetor  $v_{poss}$  por  $c$ , criando um novo vetor denominado comparador ( $cmp$ ). Este  $cmp$  consiste na porcentagem de cada  $v_{poss}$  em relação à velocidade da luz. De acordo com Phadke & Thorp (2009), as velocidades das OV's em uma LT se aproximam bastante da velocidade da luz, sendo seu valor dependente dos parâmetros da LT faltosa. Utilizando o valor de  $0,95 \cdot c$  como o mínimo valor da velocidade de propagação dos modos aéreos para LT's aéreas a partir da transformação de Clarke, valores de  $v_{poss}$  menores que  $0,95 \cdot c$  e maiores do que  $c$  são descartados, pois representam situações fora do contexto real esperado. Ou seja, apenas os valores que estão dentro da margem  $0,95 < cmp < 1$  serão utilizados, o que reduz sobremaneira o número de hipóteses a serem avaliadas. Desta maneira, um novo vetor é criado, denominado  $\tau_{valid}$ , contemplando todos os possíveis valores de  $\tau$  tomados como realísticos e coerentes seguindo a margem imposta.

#### 4.4.3 Método Proposto - Passo 3 - Avaliando os Valores Válidos do Tempo de Propagação

Uma vez que os valores de  $\tau_{valid}$  foram calculados, é necessário analisar a quantidade de termos que este vetor possui. Se o tamanho do vetor  $\tau_{valid}$  for nulo, isso implica que ou a OV refletida a partir do ponto de falta sofreu interferência destrutiva em um ou mesmo nos dois terminais, ou o limiar utilizado para identificação das OV's foi muito elevado, não existindo possibilidade para identificação da OV refletida, e portanto, sem resultar em nenhuma localização do ponto de falta (na Figura 4.6, bloco "Sem Resultado"). Por outro lado, se o tamanho do vetor  $\tau_{valid}$  for 1, isso significa que existe apenas um possível valor para o  $\tau$  que

segue a condição de coerência imposta. Com isso, o valor ótimo do tempo de propagação de uma OV ( $\tau_{optimal}$ ) da LT analisada é encontrado e o algoritmo continua no 5º passo. Porém, se o valor do tamanho de  $\tau_{valid}$  for maior do que 1, isso implica que mais de um valor possível de  $\tau$  se mostra coerente em termos de realismo, e assim, o algoritmo continua para o 4º passo com o intuito de identificar  $\tau_{optimal}$  dentre os valores de  $\tau_{valid}$ .

#### 4.4.4 Método Proposto - Passo 4 - Identificando o Valor Ótimo do Tempo de Propagação por Pesos Ponderados

A rotina da função de um terminal SETWFL, mencionada na seção 2.8 e proposta por (SCHWEITZER-III *et al.*, 2019a; GUZMÁN *et al.*, 2018a), possui o valor de  $\tau$  como entrada, o que interfere nos pesos alocados para as hipóteses da OV refletida. De fato, utilizando diferentes valores de  $\tau$ , diferentes valores de peso serão dados como resultados.

Se  $\tau_{valid}$  possui mais de um valor, o algoritmo precisa identificar qual dentre eles é o  $\tau_{optimal}$ . Uma vez que, para cada valor calculado de  $\tau_{valid}$ , as hipóteses dos terminais local e remoto foram armazenadas, então, para a rotina de SETWFL, apenas o peso da hipótese correspondente ao cálculo daquele  $\tau_{valid}$  específico é analisado. Este é um importante aspecto do método, uma vez que despreza as outras hipóteses que a função identifica, se preocupando apenas com o peso da hipótese que gerou o específico valor de  $\tau$  dado como entrada para aquela rotina.

O peso final para a hipótese que gerou o  $\tau_{valid}$  calculado no terminal local ( $FW_L$ ) e peso final para a hipótese que gerou o  $\tau_{valid}$  calculado no terminal remoto ( $FW_R$ ) são requisitados. Veja que apenas se preocupou com os valores das hipóteses que geraram aquele  $\tau_{valid}$  analisado. Assim, o peso global resultante  $GFR$  é definido por (4.9), que corresponde à soma de cada  $FW$  de cada terminal. Dessa maneira, o maior valor de  $GFR$  é adotado como resultado, implicando uma definição de quanto equivale o valor de  $\tau_{optimal}$  para a falta ocorrida no sistema analisado. Além disso, os instantes das OVs refletidas nos terminais local e remoto também foram definidos, levando-se em consideração apenas os valores realísticos da velocidade de propagação da OV, ou seja, *cmps* que seguiram a condição imposta.

$$GFR = FR_L + FW_R. \quad (4.9)$$

#### 4.4.5 Método Proposto - Passo 5 - Cálculo do Local da Falta

Visto que as OV's refletidas a partir do ponto de falta dos terminais local e remoto foram encontradas e o  $\tau_{optimal}$  foi calculado, a localização da falta utilizando a teoria de OV's para dois terminais é realizada, sendo o comprimento da LT o único ajuste de entrada. Para tanto, aplica-se (4.7) usando  $\tau_{optimal}$ , o qual é obtido sem necessidade de pré-estimativas, sincronização de dados, ajustes de parâmetros elétricos da LT ou mesmo de análises do modo terra.

### 4.5 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo, apresentou-se o passo a passo do método proposto, descrevendo etapas e conceitos aplicados. Este método consiste em uma maneira prática para cálculo do valor de tempo ótimo de propagação da OV na LT analisada, identificando das OV's refletidas a partir do ponto de falta dos terminais local e remoto e, por consequência, localizando a falta de forma precisa e confiável, sem requerer pré-estimativas, sincronização de dados, ajustes de parâmetros elétricos da LT ou mesmo análise de OV's de modo terra.

Para a elaboração do método proposto, conceitos e soluções de dois métodos existentes são empregados, tomando-se proveito de tecnologias já consolidadas na literatura. A partir de um deles, desenvolve-se uma formulação para cálculo adaptativo de  $\tau$ , enquanto a segunda metodologia é aplicada para fins de identificação das hipóteses de reflexões de ondas provenientes do ponto de falta. Dessa maneira, passos são adicionados ao algoritmo proposto de forma a obter um peso final global para o valor do tempo ótimo de propagação da OV da LT analisada, permitindo a localização do defeito com as facilidades supracitadas.

## CAPÍTULO 5

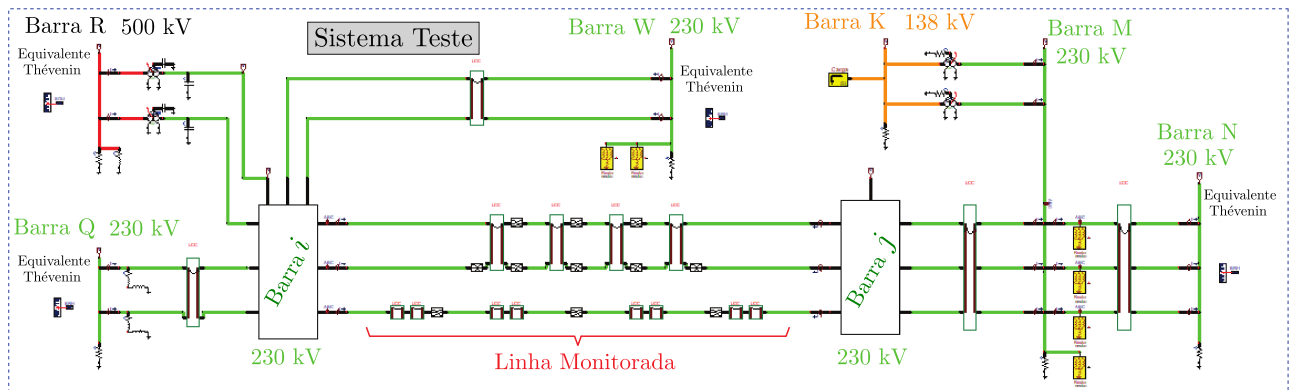
# AVALIAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO E RESULTADOS OBTIDOS

Para completa compreensão do método proposto, um exemplo de sua aplicação será apresentado. Para tanto, utilizam-se apenas os registros de corrente elétrica de cada um dos terminais de um dado sistema monitorado, considerando a correta digitalização dos sinais com filtragens específicas. Um sistema teste é apresentado e em seguida, o exemplo de aplicação é validado. Por fim, os resultados obtidos da avaliação do método proposto serão exibidos, juntamente com o debate sobre o desempenho verificado a partir da análise dos erros observados em cada caso.

### 5.1 SISTEMA TESTE

Para testar o algoritmo adaptativo proposto, um sistema modelado no ATP/ATPDraw é ilustrado na Figura 5.1, o qual foi utilizado para gerar diferentes tipos de parâmetros de falta. Este sistema representa parte da região norte do Sistema de Energia Elétrica do Brasil, tendo alto nível de detalhamento em sua modelagem, implicando em maior confiabilidade nos resultados simulados. O sistema possui várias LTs conectadas, transformadores, bem como subestações detalhadas, nas quais capacitâncias espúrias dos barramentos são também contempladas. Esse sistema representa uma rede elétrica real em operação no Brasil, e por questões de confidencialidade, mais detalhes sobre os equipamentos conectados são omitidos. Porém, as informações mais relevantes da LT faltosa estão disponibilizadas, podendo o sistema ser modelado a partir de um equivalente *Thévenin*, podendo ser reproduzido sem maiores problematizações.

Os sinais de tensão e de corrente no sistema avaliado são tomados a partir de TPCs e TCs modelados conforme reportado em (R. REIS *et al.*, 2019) e (IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE AND OTHERS, 2004), respectivamente. Neste sistema de 230 kV/60 Hz, assume-se que as barras monitoradas são as barras  $i$  e  $j$ , cujos barramentos foram



**Figura 5.1.** Sistema Teste.  
(LOPES *et al.*, 2020)

modelados em detalhe. Com isso, as reflexões nas terminações são representadas de forma mais realística, tornando as medições e análises também mais próximas da realidade. Conforme ilustrado nas Figuras 5.2 e 5.3, vários vãos se encontram conectados nas subestações  $i$  e  $j$ , verificando-se portanto terminações que tendem a refletir as OV's de corrente sem inversão de polaridade, conforme explicado nos capítulos iniciais desse trabalho.

A linha  $ij$  possui comprimento de 344,16 km e os parâmetros para sua modelagem no ATP estão identificados na Figura 5.4. Modelos de blocos que representam parâmetros da LT dependentes da frequência do tipo JMarti foram utilizados, sendo a linha principal simulada com seções de blocos de transposição que alternam as posições das fases dos condutores, tal como realizado em campo.

Em todas as simulações realizadas, um passo de integração de  $1 \mu\text{s}$  foi utilizado, sendo suficiente para a realização dos testes de interesse emulando taxas da ordem de 1 MHz. Apesar de se reconhecer que passos de integração menores seriam recomendados para a representação dessa taxa de amostragem, de análises preliminares, não foram percebidas variações relevantes quando da redução do passo de integração, sendo  $1 \mu\text{s}$  adotado por questões de viabilidade computacional e tempo de simulação.

## 5.2 EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Para demonstrar a funcionalidade do algoritmo adaptativo, um caso de falta interna foi aplicado no sistema teste. As oscilografias dos terminais  $i$  e  $j$  foram adquiridas pela leitura de

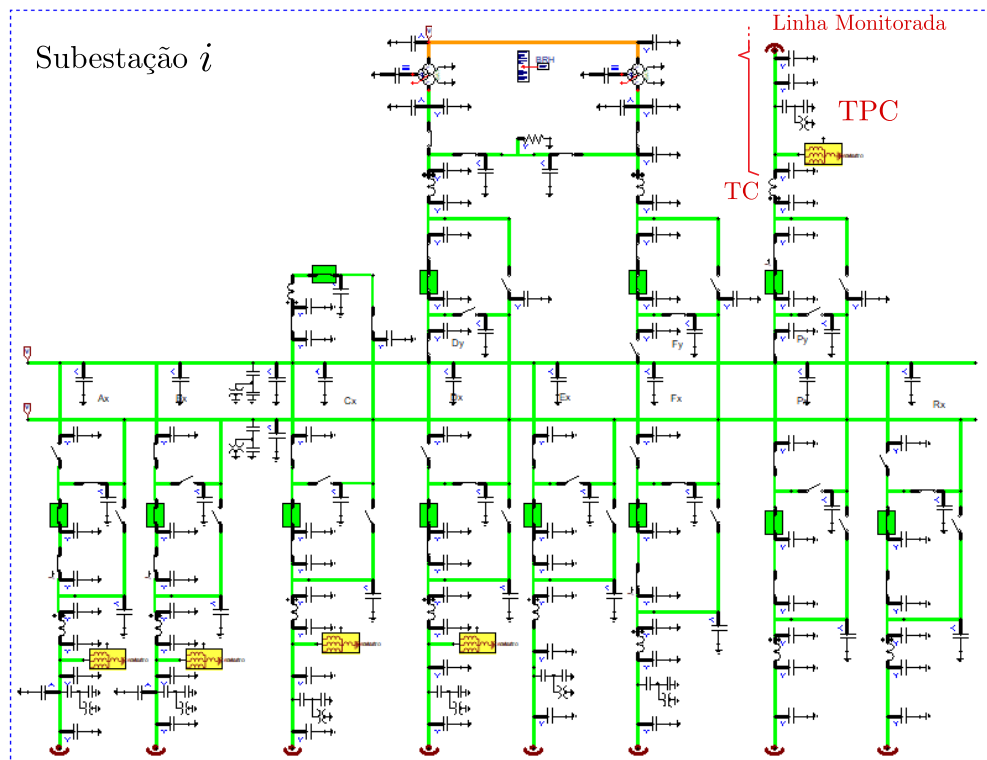


Figura 5.2. Subestação  $i$ .  
(LOPES *et al.*, 2020)

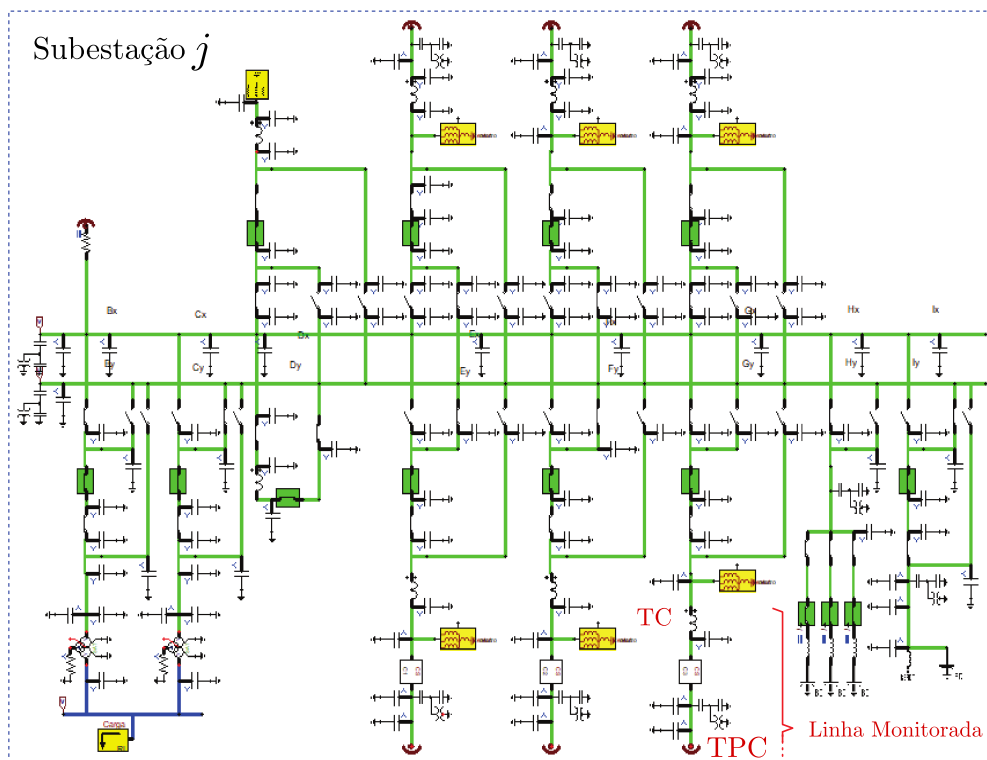
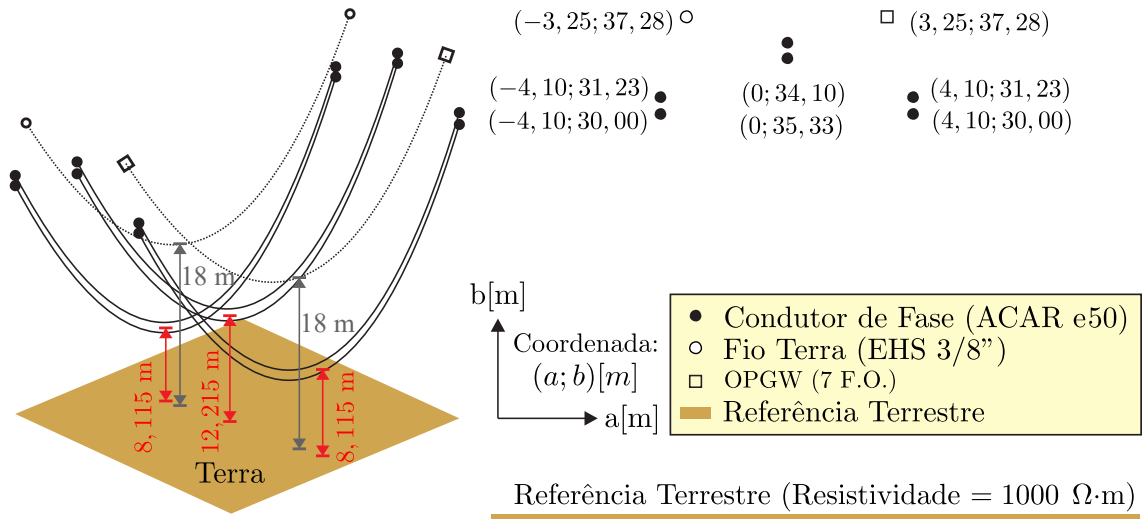


Figura 5.3. Subestação  $j$ .  
(LOPES *et al.*, 2020)



**Figura 5.4.** Torres.  
(LOPES *et al.*, 2020)

arquivos produzidos pelo *software* ATP, via arquivo denominado PL4.

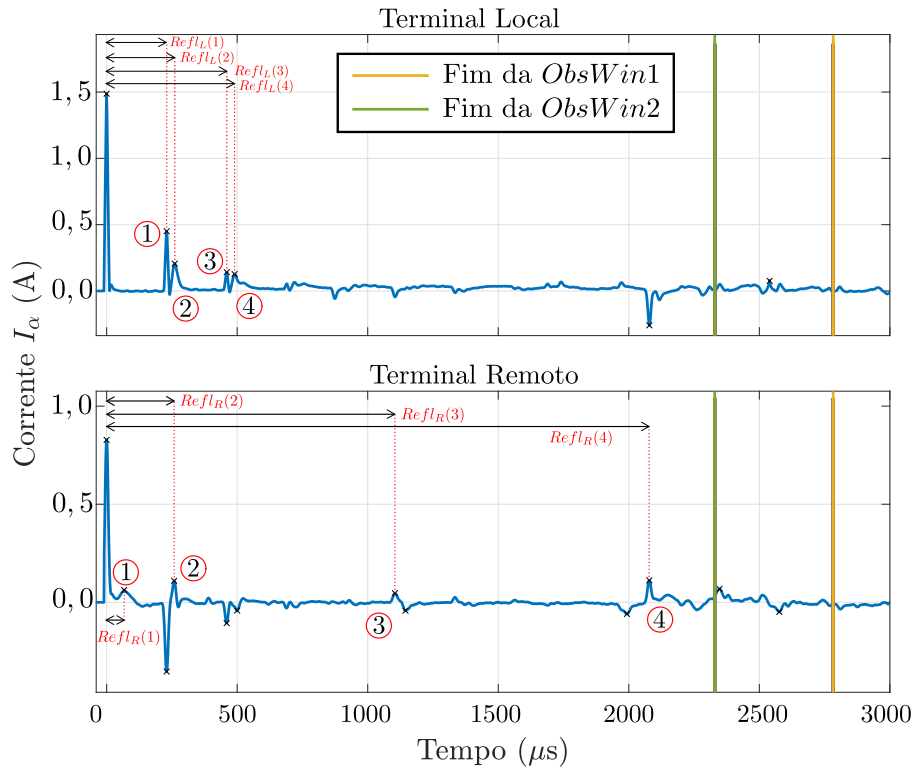
O caso analisado consiste em uma falta AG (monofásica), com  $R_f = 0 \Omega$ ,  $\theta = 90^\circ$ , tendo a falta uma distância de  $d = 34,416$  km, ou seja, 10% do comprimento da LT a partir do terminal local e 90% em relação ao terminal remoto. É importante ressaltar que o ângulo de incidência é referenciado à tensão da fase A no ponto de falta. A fim de demonstrar que o método também funciona quando os terminais não estão sincronizados, um erro de  $2 \mu s$  foi inserido no terminal remoto. Uma vez que o comprimento da LT analisada é de  $L = 344,16$  km e que  $\tau_{luz} = 344,16/c$ ,  $\tau_{luz} = 1147,99419 \mu s$  é obtido. Com este valor, as janelas de observação 1 e 2 podem ser calculadas como demonstrado em 5.1 e 5.2.

$$ObsWin1 = 2,4 \cdot 1147,99419 = 2755,18606 \mu s \quad (5.1)$$

$$ObsWin1 = 2 \cdot 1147,99419 + 10 = 2305,98838 \mu s \quad (5.2)$$

### 5.2.1 Exemplo de Aplicação - Passo 1: Cálculo dos Possíveis Valores dos Tempos de Propagação

As hipóteses são definidas de acordo com a polaridade da primeira OV incidente em cada terminal e devem estar inseridas dentro da  $ObsWin2$ . Os valores de  $Ref_L(hip)$  e de  $Ref_R(hip)$  são calculados baseados na primeira OV de cada terminal e são ilustrados na Figura 5.5 e mostrados na Tabela 5.1, tendo o terminal local e o remoto, quatro hipóteses cada. Percebe-se,



**Figura 5.5.** Sinais de Corrente de Modo  $\alpha$  dos Terminais Analisados e Hipóteses de cada Terminal.

pela análise da figura, que existiu uma detecção de um pico no terminal local entre as duas janelas de observação. Porém, esta OV não será considerada como hipótese, uma vez que não se encontra dentro da limitação da *ObsWin2*. A Figura 5.5 ilustra os sinais de corrente do modo  $\alpha$  após aplicação da transformação de Clarke para os dois terminais analisados e filtragem a partir do filtro DS. Além disso, ela ilustra as duas janelas de observação que são idênticas para os dois terminais, uma vez que estão referenciados ao valor de  $\tau_{luz}$ .

Utilizando todas as hipóteses, o algoritmo calcula todos os possíveis valores de  $\tau$  de acordo com a Equação (4.6) e, para cada valor, armazenam-se  $Ref_L(hip)$  e de  $Ref_R(hip)$ , gerando 16 (dezesseis) possíveis combinações que geram diferentes valores de  $\tau$  ( $\tau_{poss}$ ). Estes valores podem ser verificados na Tabela 5.2.

### 5.2.2 Exemplo de Aplicação - Passo 2: Definição de Valores Válidos do Tempo de Propagação

Tendo todos os valores de  $\tau_{poss}$  encontrados, o algoritmo calcula o vetor  $v_{poss}$  e o *cmp*. Após este cálculo, a comparação é feita de modo a identificar quais são os tempos de propagação que



**Tabela 5.1.** Hipóteses dos Terminais Local e Remoto

Hipóteses	$Refl_L(hyp)$ ( $\mu s$ )	$Refl_R(hyp)$ ( $\mu s$ )
1	230,09	67,20
2	260,89	258,59
3	460,19	1104,2
4	490,1	2078,5

são válidos. A Tabela 5.2 mostra todos os valores desde os tempos de cada OV que resultaram no valor de cada  $\tau_{poss}$  calculado, até os valores das possíveis velocidades de propagação, e dos  $cmp$  obtidos. Em vermelho estão apenas os valores que seguem a condição imposta de  $(0,95 < cmp < 1)$ . Desta maneira, o vetor  $\tau_{valid} = [1154, 3\ 1169, 7]$  é criado, sendo definido a partir dos únicos valores coerentes do tempo de propagação que respeitam a condição imposta. Percebe-se que nesta comparação, valores maiores que 1 e menores que 0,95 foram encontrados para  $cmp$ , mas foram descartados.

### 5.2.3 Exemplo de Aplicação - Passo 3: Avaliando os Valores Válidos do Tempo de Propagação

Uma vez que o vetor  $\tau_{valid}$  foi criado, analisa-se quantos elementos ele possui. Para este exemplo,  $\tau_{valid}$  possui 2 elementos, fazendo-se necessário analisar o diagrama de Bewley. Para tanto, neste trabalho, utiliza-se a metodologia SETWFL para identificar qual dentre estes possíveis valores é o valor ótimo de  $\tau$ . Logo, o Passo 4 não deve ser ignorado, sendo ele fundamental para a definição do valor de  $\tau_{optimal}$ , a partir do qual serão identificadas as OVs refletidas na falta.

### 5.2.4 Exemplo de Aplicação - Passo 4: Identificando o Valor Ótimo do Tempo de Propagação por Pesos Ponderados

Uma vez que dois valores foram identificados como coerentes dentro das condições assumidas, ou seja,  $\tau_{valid} = [1154, 3\ 1169, 7]\ \mu s$ , a rotina da técnica SETWFL é aplicada considerando

**Tabela 5.2.** Possíveis Valores para o Algoritmo

$RefL_L$	$RefL_R$	$\tau_{poss}$	$v_{poss}$	$cmp$
( $\mu s$ )	( $\mu s$ )	( $\mu s$ )	(km/s)	-
230,09	67,20	148,65	2315237,134	7,722799798
230,09	258,59	244,35	1408471,455	4,698155065
230,09	1104,2	667,15	515865,9972	1,720743746
<b>230,09</b>	<b>2078,5</b>	<b>1154,3</b>	<b>298154,7258</b>	<b>0,994537113</b>
260,89	67,20	164,05	2097896,983	6,997831088
260,89	258,59	259,75	1324966,314	4,419611896
260,89	1104,2	682,55	504226,7966	1,681919552
<b>260,89</b>	<b>2078,5</b>	<b>1169,7</b>	<b>294229,2896</b>	<b>0,981443268</b>
460,19	67,20	263,7	1305119,454	4,353409898
460,19	258,59	359,4	957595,9933	3,194196411
460,19	1104,2	782,2	439989,7724	1,467647903
460,19	2078,5	1269,35	271130,8938	0,904395313
490,1	67,20	278,65	1235097,793	4,119842778
490,1	258,59	374,35	919353,5461	3,066633338
490,1	1104,2	797,15	431738,0669	1,440123176
490,1	2078,5	1284,3	267974,7722	0,893867624

cada um dos valores de  $\tau_{valid}$  obtidos nos terminais local e remoto, individualmente. É importante lembrar que apenas as hipóteses que geraram valores de  $\tau_{valid}$  serão analisadas.

Os pesos finais  $FW_L$  e  $FW_R$  foram calculados e são apresentados na Tabela 5.3, juntamente com os valores de cada hipótese analisada e o valor final  $GFR$ . Deve-se ressaltar que as hipóteses tomadas como coerentes do terminal remoto foram geradas a partir do mesmo pico detectado, gerando assim dois valores de  $\tau$  possíveis para uma mesma hipótese (2078,5  $\mu s$ ). Nota-se que utilizando a mesma hipótese, o peso relativo para ela foi modificado quando utilizado valores de  $\tau$  distintos. Isso evidencia o que já foi mencionando anteriormente, e corrobora que a função SETWFL é diretamente influenciada por este parâmetro.

Uma vez que o maior valor de  $GFR$  na Tabela 5.3 é 16, a resposta da função para a OV refletida a partir da falta tomando como referência o terminal local é 230,09  $\mu s$ . Já em relação ao terminal remoto, identifica-se o instante 2078,5  $\mu s$ . Além disso, o valor ótimo do tempo de propagação da OV nesta LT para este registro foi de  $\tau_{optimal} = 1154,3 \mu s$ , o qual foi calculado

**Tabela 5.3.** Pesos de Cada Hipótese e *GFR*

$\tau_{valid}$ ( $\mu s$ )	$Refl_L$ ( $\mu s$ )	$FW_L$	$Refl_R$ ( $\mu s$ )	$FW_R$	$GFR$
1154,3	230,09	7	2078,5	9	$7 + 9 = 16$
1169,7	260,89	5	2078,5	3	$5 + 3 = 8$

sem necessidade de pré-estimativas e ajustes relacionados aos parâmetros elétricos da LT. Por questões de comparação, faz-se importante comparar o valor de  $\tau$  encontrado com o valor real de  $\tau$  da LT analisada. Porém, uma vez que foi utilizado no sistema aqui explicado blocos do tipo LCC, com LTs JMartí, aplicou-se a energização de forma a comparar o valor obtido pelo método proposto com o realizado a partir da energização. A saber, o valor calculado de  $\tau$  a partir da energização é de 1155.13888801562  $\mu s$ , ressaltando-se que foi utilizada a interpolação parabólica no caso da energização. Demonstra-se, com este resultado, que o valor está muito próximo, sendo ele considerado condizente com o esperado. Com estes resultados, o passo 5 pode ser então realizado para fins de cálculo do ponto do defeito.

### 5.2.5 Exemplo de Aplicação - Passo 5: Cálculo do Local da Falta

Uma vez que todos os valores das OV's refletidas na falta que incidem no terminal local e no terminal remoto foram identificadas, e conhecendo-se o  $\tau_{optmal}$ , a formulação (4.7) é aplicada, resultando em localizações para o terminal local e remoto como demonstrando a seguir:

$$d_{km} = \frac{230,09 \mu s}{2 \cdot 1154,3 \mu s} \cdot 344,16 \leftrightarrow d_{km} = 34,3027012 \text{ km}. \quad (5.3)$$

$$L - d_{km} = 344,16 - \frac{2078,5 \mu s}{2 \cdot 1154,3 \mu s} \cdot 344,16. \leftrightarrow d_{km} = 34,3027012 \text{ km}. \quad (5.4)$$

Ressalta-se que os resultados obtidos são complementares, conforme esperado, de modo que não existe prioridade quanto ao terminal a ser adotado como referência durante as análises. Para este exemplo, um valor ótimo do tempo de propagação foi calculado e, conseqüentemente, os tempos de incidência das OV's refletidas no terminal analisado foram identificados. O erro absoluto ( $\epsilon$ ) é calculado como  $\epsilon = |34,3027012 - 34,416| = 0,113299 \text{ km}$ , demonstrando um erro menor do que um vão típico entre duas torres consecutivas para sistemas deste porte, o que corresponde a um valor próximo de 450 m no sistema modelado. Isso condiz com o esperado

para tecnologias de LFOV, atestando que a função desenvolvida possui uma boa aplicação, tendo como única entrada, o comprimento da LT e as oscilografias dos terminais, implicando em facilidades não verificadas em outras técnicas existentes.

### 5.3 RESULTADOS OBTIDOS

A fim de verificar os resultados obtidos pela função proposta neste trabalho, uma análise de sensibilidade paramétrica foi realizada no ATP/ATPDraw. Nesta análise, os ângulos de incidência, o tipo de falta, a resistência de falta para a terra e a localização do ponto do defeito foram variados com o objetivo de contemplar vários casos distintos de falta. Nestes diferentes cenários, as atenuações e dispersões são modificadas pois a energia das OV's incidentes variam, produzindo diferentes características dos transitórios (MARINHO, 2019). Uma vez que blocos LCC foram utilizados no ATP/ATPDraw, a localização da falta foi alterada de forma a não interferir nos blocos de transposição inseridos. Para tanto, foi criado um código em *Python* que modifica o valor do tamanho da LT de cada bloco em cada trecho da transposição, uma vez que, neste bloco, o ATP não autoriza aplicar variáveis na versão utilizada durante a execução deste trabalho. Em resumo, o código em *Python* tem o intuito apenas de alterar as localizações das faltas simuladas na LT, utilizando parâmetros variantes na frequência (LT do tipo J. Martí) e mantendo constantes os valores da resistividade do solo.

Uma vez que a solução proposta depende da existência de uma energia mínima das OV's incidentes no terminal analisado, casos com  $\theta = 0^\circ$  e  $\theta = 180^\circ$ , ou próximos a estes não foram simulados, já que OV's não são lançadas nas fases com falta. Ressalta-se que esta análise é para ângulos referenciados à tensão da fase A no ponto de falta, logo, para as faltas aqui simuladas, a condição de induzir OV's é definida a partir da análise supracitada.

É importante ressaltar que experiências de campo têm demonstrado que os dispositivos baseados em OV's disponíveis comercialmente são capazes de detectar transitórios de alta energia em ambientes ruidosos em redes de transmissão (SCHWEITZER-III *et al.*, 2019b; LOPES *et al.*, 2019; GUZMÁN *et al.*, 2018a; ZIMATH *et al.*, 2010). Apesar disso, a análise de LFOV com a presença de ruído se torna muito importante para estudos de OV's, uma vez que filtros de detecção das ondas podem ter suas saídas distorcidas. Com o intuito de criar cenários

mais realísticos, um ruído de 30 dB foi inserido no sistema simulado, por meio de elementos disponíveis na biblioteca *Transient Analysis of Control Systems* (TACS) do ATP/ATPDraw. Neste contexto, simulou-se o sistema analisado sem aplicação de nenhuma falta para adquirir o sinal total em regime permanente e, por conseguinte, aplicou-se o ruído de forma a sobrepor o sinal original. A aplicação do ruído se dá a partir de uma semente de números aleatórios e, em seguida, o ruído branco gaussiano é criado fora do ATP em um ambiente programável. Para acrescentar o ruído gerado ao sinal original do ATP, utiliza-se o componente interno do ATP denominado *Empirical Source - Type 1* que importa sinais externos. Com o ruído importado, blocos TACS são utilizados de forma a somar o sinal original com o ruído gerado externamente, permitindo a inserção de ruído diretamente nas simulações do ATP/ATPDraw (LOPES *et al.*, 2020b).

Faltas do tipo AG (monofásicas), BC (bifásicas), BCG (Bifásicas-Terra) e ABC (trifásicas) foram aplicadas para contemplar os quatro tipos de faltas existentes no sistema trifásico analisado. Uma vez que a falta monofásica é consideravelmente mais comum na maioria dos sistemas elétricos, esta foi simulada utilizando  $\theta = 50^\circ$ ,  $\theta = 90^\circ$  e  $\theta = 120^\circ$  com  $R_F$  variando entre os valores de  $R_F \approx 0 \Omega$ ,  $R_F = 30 \Omega$  e  $R_F = 100 \Omega$ , resultando em 9 diferentes tipos de falta AG. Para faltas bifásicas,  $\theta = 50^\circ$  e  $\theta = 90^\circ$  foram utilizados com valores de  $R_F \approx 0 \Omega$  e  $R_F = 30 \Omega$ , resultando em 4 tipos de falta BC. Nas faltas trifásicas,  $\theta = 50^\circ$  e  $\theta = 90^\circ$  foram utilizados, criando-se 6 diferentes tipos de faltas ABC, já que os valores de resistência de falta foram variados entre  $R_F \approx 0 \Omega$ ,  $R_F = 15 \Omega$  e  $R_F = 30 \Omega$ . Já para faltas bifásicas-terra, apenas 2 tipos de faltas foram simulados utilizando  $\theta = 90^\circ$  para  $R_F \approx 0 \Omega$  e  $R_F = 30 \Omega$ , sendo que a resistência entre as fases neste tipo de curto foi considerada  $\approx 0 \Omega$ . Todos estes casos geram um total de 21 diferentes tipos de faltas simuladas. Vale a pena ressaltar que para faltas monofásicas e faltas trifásicas, o modo aéreo  $\alpha$  foi utilizado, sendo o modo  $\beta$  empregado na análise de faltas bifásicas e bifásicas terra Guzmán *et al.* (2018a). Procedendo dessa forma, considera-se os sinais excitados em cada tipo de curto, facilitando as análises e minimizando os efeitos do fenômeno de *mixing mode*, conforme descrito por Marinho (2019).

Para cada tipo de falta simulado, a distância do ponto do defeito foi variada tendo como referência o terminal local de 1% até 99% da LT, com passos de 1%, criando-se  $21 \cdot 99 = 2079$  casos distintos de simulações. As Figuras 5.6 e 5.7 ilustram os resultados obtidos para todos

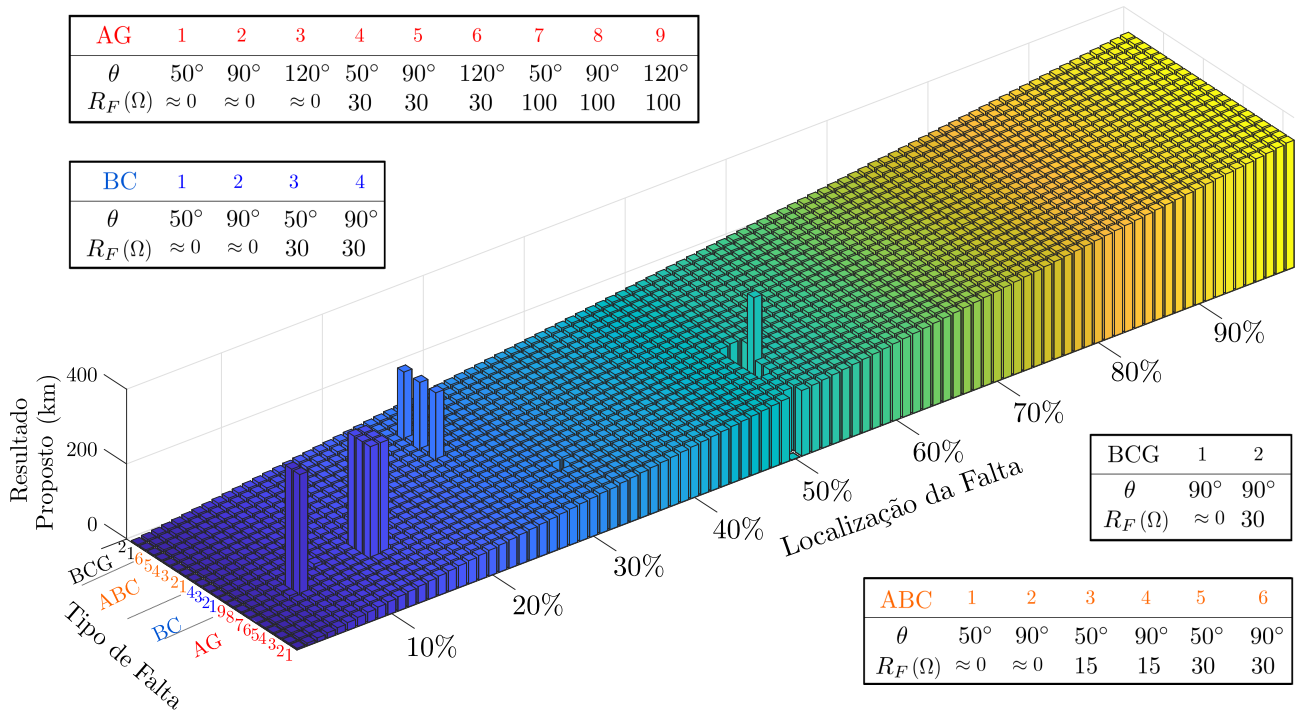


Figura 5.6. Resultados de todas as simulações.

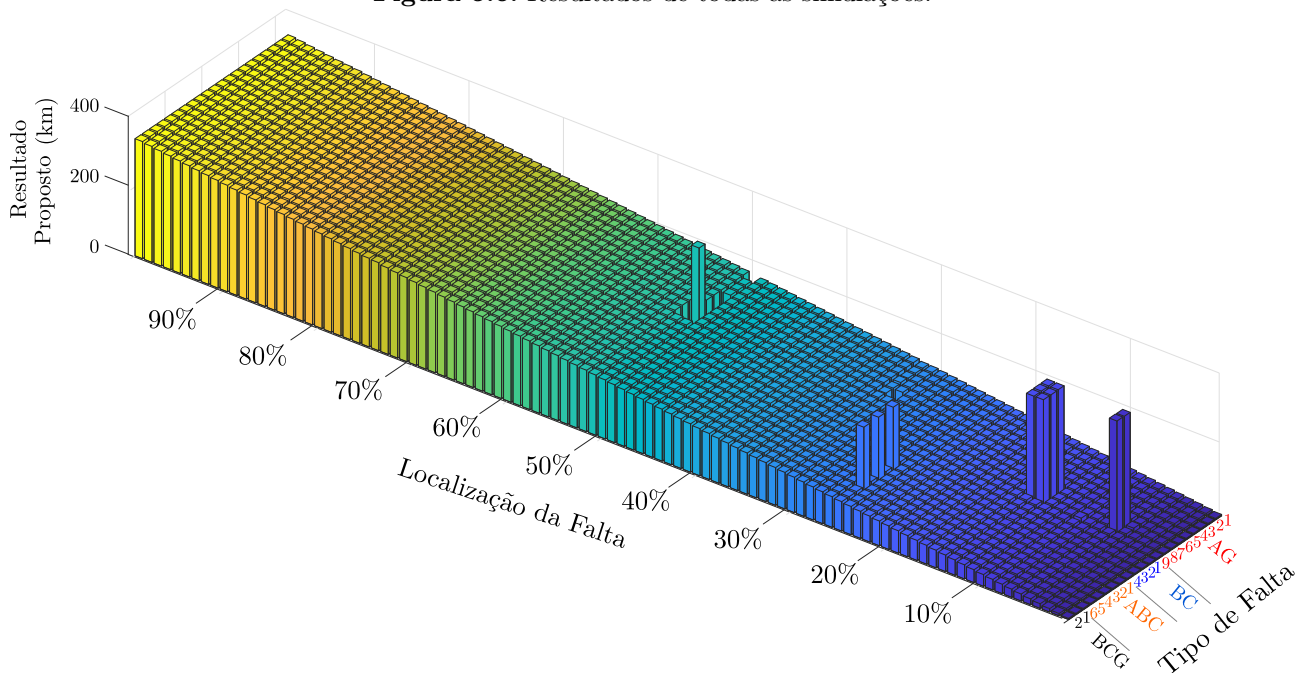


Figura 5.7. Resultados de todas as simulações em ângulo oposto.

os tipos de faltas simulados em dois diferentes ângulos para melhor visualização.

O eixo denominado Tipo de Falta representa um tipo de falta diferente para cada linha analisada. Estas diferenças podem ser visualizadas pela coloração (Vermelho - AG; Azul - BC; Laranja - ABC; Preto - BCG.) e numeração atribuídas às linhas, estando em acordo com as tabelas ilustradas na mesma figura. O eixo Localização da Falta sugere a porcentagem da LT

em que foi simulado o tipo de falta analisado, variando de 1% até 99% do comprimento da LT, baseando-se no terminal local. Por fim, o eixo Resultado Proposto representa a localização estimada pela metodologia proposta neste trabalho. Percebe-se que a rampa cresce de forma uniforme, demonstrando que os resultados estão de acordo com os locais reais simuladas. A coloração da rampa tem o intuito de apenas diferenciar os casos, não trazendo informações extras. Em outras palavras, à medida que aumenta-se a porcentagem de simulação do local da falta, a localização encontrada pela função também aumenta proporcionalmente, indicando que o processo foi condizente desde o início, demonstrando uma correta localização para maioria dos casos.

Observa-se ainda nas Figuras 5.6 e 5.7 que alguns erros de localizações são identificados, demonstrando algumas limitações da função proposta. Essas limitações estão relacionadas à correta identificação da OV ou por utilizar um limiar considerado alto quando da identificação dos picos de interesse nas saídas do filtro DS. Por exemplo, para o caso monofásico, tendo  $R_F = 100 \Omega$  (em 13% e 14% da LT - casos AG7, AG8 e AG9), a OV refletida a partir da falta foi sobreposta por outras ondas quando analisada do terminal local. Uma vez que a solução proposta depende da correta identificação das OVs refletidas nos dois terminais, quando ocorre uma sobreposição, o resultado não será confiável. Porém, durante o procedimento de identificação do  $\tau_{optimal}$ , outro valor foi identificado dentro da margem de análise atribuída ( $0,95 < cmp < 1$ ), resultando em uma resposta não coerente da localização do ponto do defeito para estes casos.

Ressalta-se que faltas exatamente no centro da LT, ou seja, em 50%, em casos AG a OV refletida é sobreposta com a OV refratada. Analisando-se os casos AG2, AG3 e AG4, percebeu-se que uma outra OV acompanha a OV refletida a partir da falta com um leve atraso. Esta OV que acompanhou a hipótese correta, também foi classificada como uma hipótese trazendo um valor realístico de  $\tau$ , e obteve o maior peso final  $GFR$ . Desta maneira, para estes três casos, a localização foi dada bem próxima do centro da LT, com erro um pouco mais discrepante do que os verificados nas outras análises. Analisando-se as oscilografias, percebe-se que a correta OV refletida a partir do ponto de falta foi realmente sobreposta com a refratada, como esperado, mas, para o sistema analisado, esta OV que acompanhou a reflexão resultou do fenômeno de *mixing mode* quando da refração das ondas modais no ponto de falta. Isso fez gerar uma OV

de modo aéreo que foi detectada e portanto usada para fins de localização da falta mesmo com características de bastante atenuação. Nota-se que para os casos AG1, AG4, AG6, AG7, AG8 e AG9, nenhum resultado de localização foi dado já que nenhuma hipótese gerou valores de  $\tau$  que correspondessem à velocidade de propagação dentro da margem atribuída.

Nos casos trifásicos, percebe-se que erros ocorreram para ângulos de incidência de  $50^\circ$  nos casos de faltas em 25% do terminal local, ou seja, em  $0,25 \cdot 344,16 = 86,04$  km. Porém, o valor encontrado pela função proposta como resultado da localização foi de 258,07 km. Ressalta-se que as hipóteses corretas da OV refletida a partir da falta foram identificadas nos dois terminais, contudo, o resultado final da LFOV proposta não foi coerente com o esperado. Percebe-se que o resultado foi o complementar do tamanho da LT uma vez que somando-se os valores  $86,04 + 258,07 = 344,11$  km, que corresponde a um valor muito próximo ao do comprimento da LT. Isso ocorreu pelo fato da função implementada dar pesos associados às OVs refradas, cuja análise resulta em estimativas do local de falta complementares. Assim, nesse caso, apesar das hipóteses corretas terem sido identificadas, em decorrência das análises do diagrama de Bewley e dos pesos alocados para as hipóteses relacionadas às OVs refratadas, obtiveram-se erroneamente localizações equivocadas. A explicação disso está associada ao fato de OVs importantes que vinculariam mais coincidências aos valores calculados terem sido sobrepostas, diminuindo o peso final da hipótese correta.

Apesar dos erros relatados, percebe-se que a grande maioria das respostas estão de acordo com a localização simulada, tendo algumas poucas inconsistências conforme supracitado. Mesmo com estes poucos erros, consegue-se verificar o grande número de resultados coerentes que a função proposta neste trabalho obteve, mesmo eliminando a necessidade de ajustes, sincronização de dados, pré-estimativas e análises do modo terra. Uma vez que as Figuras 5.6 e 5.7 não ilustram os erros específicos adquiridos em cada localização, as Figuras 5.8 e 5.9 são apresentadas de forma a ilustrar estes erros. A primeira analisa o erro absoluto, em km, de todos os casos analisados, na qual o eixo das abcissas contempla os casos implementados e o eixo das ordenadas o erro absoluto, o qual é calculado usando:

$$\epsilon = |\text{Localização da Falta} - \text{Resultado Método Proposto}|. \quad (5.5)$$

Para melhor visualização, apenas erros menores que 4 km estão sendo mostrados na figura apresentada. Cada boxplot contempla 99 casos distintos que foram simulados como mostrado



nas figuras anteriores. Nota-se que a grande maioria dos casos estão dentro da margem de 1 km de erro absoluto, demonstrando uma eficiência condizente com o esperado quando da utilização métodos LFOV. Percebe-se também que grande parte dos casos estão dentro da margem de erros menores que 500 m, o que evidencia ainda mais a precisão do método. A fim de se analisar os erros em quantidade de vãos de torre, informação esta de interesse por parte de equipes de manutenção de LTs, a Figura, 5.9 ilustra os erros em quantidade de vãos para cada caso analisado, levando-se em consideração que para o sistema avaliado, o vão de torre é de aproximadamente 450 m. Desta maneira, percebe-se que a grande maioria dos casos estão dentro da margem de 2 vãos de torres. Nesse contexto, 96,06% do total de casos contemplados neste trabalho obtiveram resultados de erros menores do que 2 vãos de torre, demonstrando um desempenho promissor da funcionalidade desenvolvida.

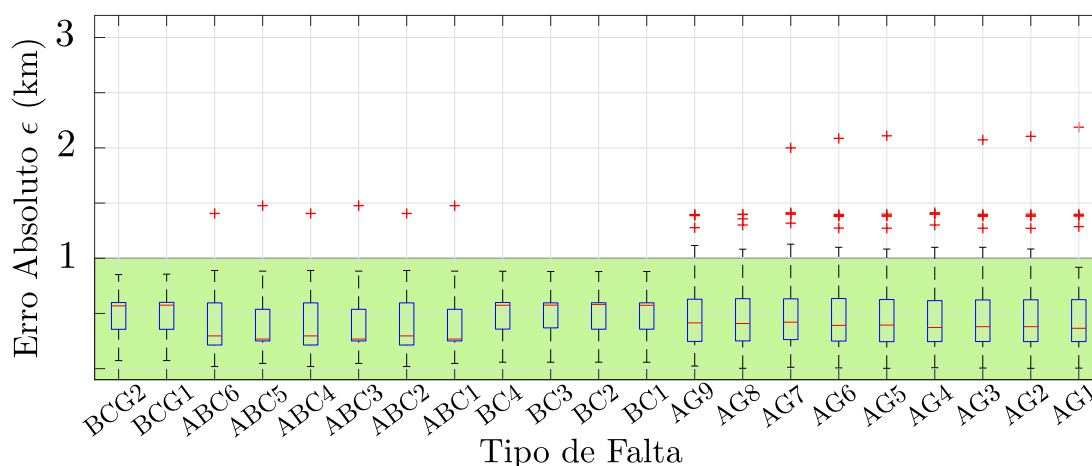


Figura 5.8. Erros Absolutos em km.

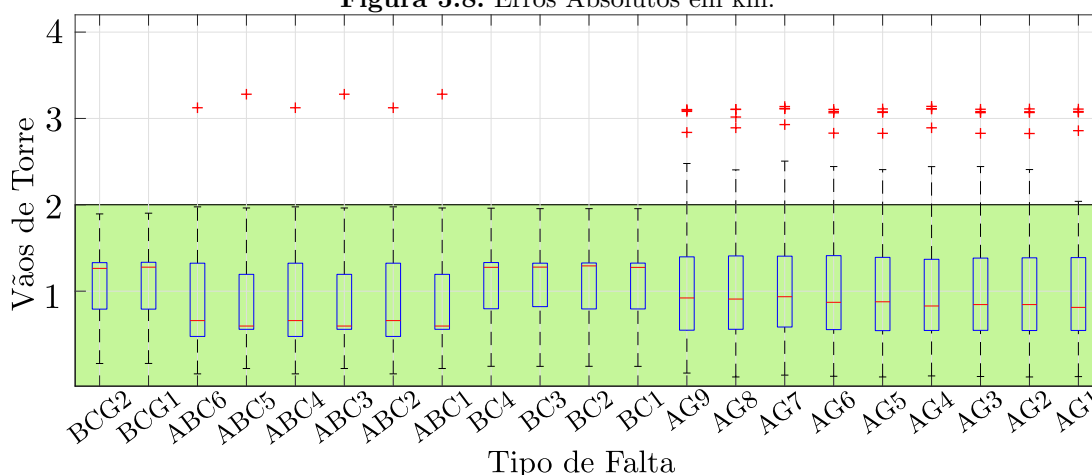


Figura 5.9. Erro em vãos de torre.

Estes resultados demonstram que a função resultou em um desempenho bastante atrativo

para a indústria, visto que mantém índices de precisão equivalentes com as melhores tecnologias disponíveis no mercado, porém incluindo facilidades práticas que resultam em uma análise do caso de falta de forma mais simples, rápida e robusta. Além disso, a função mantém potencialidades de métodos anteriores, tais como independência de ajustes e da sincronização de dados. A eliminação da necessidade de pré-estimativas também surge como característica promissora, especialmente se considerada a possibilidade de erros relevantes nesses cálculos prévios, ou mesmo da indisponibilidade de solução para este fim. Desse modo, considera-se que a solução desenvolvida tem potencial para aplicações reais, podendo ser embarcada em dispositivos já disponíveis no mercado.

## CAPÍTULO 6

# CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho, apresentou-se uma nova metodologia para localização de faltas baseada na teoria de ondas viajantes, a qual permite a realização de cálculo adaptativo dos ajustes necessários, a saber, tempo de propagação da linha monitorada, sem requerer o uso de pré-estimativas do ponto de falta e sendo independente da sincronização de dados e de análises pouco confiáveis de ondas de modo terra. O desenvolvimento da solução teve como principal motivação o intuito de eliminar erros decorrentes de incertezas nos parâmetros da LT monitorada, porém mantendo características promissoras de métodos anteriores.

Inicialmente, apresentou-se uma fundamentação teórica sobre o fenômeno de ondas viajantes em linhas de transmissão, acompanhada de revisão bibliográfica sobre métodos de localização de faltas, apresentando formulações e conceitos que permitiram compreender a problemática abordada nessa dissertação. Dentre os métodos avaliados, identificaram-se soluções com bom potencial que foram posteriormente utilizadas como base da metodologia desenvolvida. Em resumo, considerou-se inicialmente uma solução disponível no mercado para fins de identificação de ondas refletidas no ponto de falta, e na sequência, uma adaptação de método reportado na literatura que permitiu obter formulações para cálculo do tempo de trânsito da LT em questão apenas analisando as oscilografias dos dois terminais. Com isso, por meio das formulações aqui tratadas, desenvolveu-se a funcionalidade proposta com característica adaptativa, de modo a não ser influenciada por incertezas nos parâmetros da LT, sem depender de ajustes na forma de parâmetros elétricos característicos da linha monitorada.

Para avaliação do método proposto, modelou-se um sistema de 230 kV/60 Hz no ambiente ATP/ATPDraw, considerando parâmetros e detalhamentos topológicos reais que permitiram a realização de simulações bastante realísticas. Para identificação das ondas viajantes, considerou-se um filtro que já é aplicado em dispositivos reais com funcionalidades baseadas na análise de

transitórios trafegantes. No total, 2079 simulações de faltas foram testadas, considerando diferentes valores de local da falta, resistência de falta, ângulo de incidência (assumindo referência senoidal) e tipo de falta. Para cada caso, as estimativas calculadas foram comparadas com o local real simulado da perturbação, permitindo o cálculo do erro absoluto.

Dos resultados obtidos, nos piores cenários em que ainda assim houve convergência apropriada da função proposta, foram verificados erros menores que 3,5 km. Por outro lado, nos cenários menos adversos, erros absolutos de apenas 2,9 m foram calculados. É importante destacar que de um modo geral, o desempenho foi bastante satisfatório, verificando-se que o método proposto apresentou em 96,06% dos casos avaliados erros abaixo de dois vãos típicos da linha avaliada, ou seja, menores que 900 m. Tal desempenho associado às facilidades práticas da metodologia apresentada demonstram que a técnica é promissora, pois apresenta desempenho compatível com os apresentados por funcionalidades de mesma natureza disponíveis no comércio.

Diante dos aspectos avaliados, é possível vislumbrar melhorias futuras que podem ser abordadas em pesquisas posteriores. Desse modo, como continuação do presente trabalho, sugere-se:

- Desenvolver técnica similar, porém usando dados de apenas um terminal;
- Desenvolver técnica similar, porém usando número reduzido de detecções de ondas refletidas;
- Realizar testes da funcionalidade desenvolvida considerando resultados obtidos de dispositivos reais;
- Embarcar a solução proposta em controlador industrial adequado para fins de implementação da metodologia em campo;
- Realizar análises comparativas do método proposto com outras técnicas disponíveis na literatura e comércio;
- Avaliar o desempenho da função proposta para LTs heterogêneas, com modificações no padrões analisados;
- Avaliar a técnicas considerando outros cenários de falta e também operativos do sistema monitorado, adotando diferentes topologias, inclusive em sistemas CA e CC; e

- Incluir na análise da localização de faltas erros relativos ao efeito da amostragem do sinal, modificando a formulação utilizada, gerando uma= janelamento de localizações.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Atlas de Energia Elétrica do Brasil*. Brasília, 2008. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas3ed.pdf>>. Citado na página 2.
- AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Relatório de Análise: Desligamentos Forçados do Sistema de Transmissão*. Brasília, 2016. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/documents/656808/0/Relat%C3%B3rio+de+An%C3%A1lise+de+Desligamentos+For%C3%A7ados+do+Sistema+de+Transmiss%C3%A3o+-+Edi%C3%A7%C3%A3o+2017/7a991934-f7b4-5835-07e1-4349bd513f96>>. Citado na página 2.
- AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Relatório de Análise: Desligamentos Forçados do Sistema de Transmissão*. Brasília, 2018. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/documents/656808/0/Relat%C3%B3rio+de+An%C3%A1lise+de+Desligamentos+For%C3%A7ados+do+Sistema+de+Transmiss%C3%A3o+-+Edi%C3%A7%C3%A3o+2017/7a991934-f7b4-5835-07e1-4349bd513f96>>. Citado na página 2.
- ARAÚJO, A. D.; NEVES, W. *Cálculo de transitórios eletromagnéticos em sistemas de energia*. da ufmg. [S.l.: s.n.], 2005. Citado na página 25.
- BEWLEY, L. V. *Traveling waves on transmission systems*. Dover Publications, Mineola, NY, 1963. Citado 2 vezes nas páginas 5 and 28.
- CLARKE, E. *Circuit Analysis of A-C Power Systems*. New york, usa. [S.l.]: John Wiley and Sons, 1943. Citado na página 31.
- COSTA, F. B. Boundary wavelet coefficients for real-time detection of transients induced by faults and power-quality disturbances. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 29, n. 6, p. 2674–2687, 2014. Citado na página 30.
- COSTA, T. R. V. d.; PINHEIRO, T. M. M.; SILVA, J. M. M. d.; VIEIRA I. S., .; BARNABÁ, A. B.; CASTRO, S. D. d. Aplicação da regulação responsiva na fiscalização dos serviços de eletricidade no brasil. 2017. Citado na página 2.
- CUNHA, G.; LOPES, F.; HONORATO, T. Extending the application of one-terminal fault location method available in actual time domain relay. *VIII Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, 2020. Citado na página 36.
- CUNHA, G. A. D. *Estudo e Implementação de Método Baseado em Ondas Viajantes para Localização de Faltas em Linhas de Transmissão Usando Registros Oscilográficos de Um Terminal*. Dissertação (Graduação em Engenharia Elétrica) — UnB: Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 26 and 27.
- DI TOMASSO, A.; INVERNIZZI, G.; VIELMINI, G. Accurate single-end and double-end fault location by traveling waves: a review with some real applications. In: *2019 AEIT International Annual Conference (AEIT)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–6. Citado na página 26.

DUESTERHOEFL, W. C.; SCHULZ, M. W.; CLARKE, E. Determination of instantaneous currents and voltages by means of alpha, beta, and zero components. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, v. 70, n. 2, p. 1248–1255, 1951. Citado na página 31.

EPE. *Plano Decenal de Expansão de Energia*. 2018. Citado na página 2.

GALE, P. F.; CROSSLEY, P. A.; XU BINGYIN; GE YAOZHONG; CORY, B. J.; BARKER, J. R. G. Fault location based on travelling waves. In: *1993 Fifth International Conference on Developments in Power System Protection*. [S.l.: s.n.], 1993. p. 54–59. Citado 4 vezes nas páginas 6, 10, 11, and 14.

GENERAL ELECTRIC. *Reason RPV311 - Technical Manual*: GE Grid Solutions. [S.l.], 2018. Citado na página 7.

GILANY, D. k. I. M.; ELDIN, E. S. T. Traveling-wave-based fault-location scheme for multiend-aged underground cable system. v. 22, n. 1, p. 82–89, January 2007. Citado 3 vezes nas páginas 6, 14, and 15.

GLOVER, J. D.; SARMA, M. S.; OVERBYE, T. J. *Power System Analysis and Design*; 5. ed. [S.l.]: CENGAGE Learning, 2011. Citado na página 1.

GREENWOOD, A. *Electrical Transients in Power Systems*. New York, USA: 2nd Edition, John Wiley and Sons, 1991. Citado 2 vezes nas páginas 6 and 26.

GUZMÁN, A.; KASZTENNY, B.; TONG, Y.; MYNAM, V. Accurate and economical traveling-wave fault locating without communications. In: *71st Annual Conf. for Protective Relay Engineers*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–18. Citado 9 vezes nas páginas 4, 11, 18, 31, 35, 36, 48, 58, and 59.

GUZMÁN, A.; SMELICH, G.; SHEFFIELD, Z.; TAYLOR, D. Testing traveling-wave line protection and fault locators. In: *proceedings of the 14th International Conference on Developments in Power System Protection, Belfast, UK*. [S.l.: s.n.], 2018. Citado 2 vezes nas páginas 26 and 27.

IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE AND OTHERS. Emtp reference models for transmission line relay testing. *Sl: sn*, 2004. Citado na página 50.

JÚNIOR, L. C. Z. *Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência*. 1. ed. São Paulo, SP: Editora da Universidade de São Paulo, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 24 and 31.

KARRENBAUER, H. *Ausbreitung von Wanderwellen bei verschiedenen Anordnungen von Freileitungen im Hinblick auf die Form der Einschwingspannung bei Abstandskurzschlüssen*. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Munique, Alemanha, 1967. Citado na página 31.

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. *Przeglad Elektrotechniczny*, v. 88, 01 2012. Citado 2 vezes nas páginas 6 and 12.

LOPES, F. Settings-free traveling-wave-based earth fault location using unsynchronized two-terminal data. In: *2016 IEEE Power Energy Society General Meeting (PESGM)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–1. Citado 2 vezes nas páginas 6 and 16.

- LOPES, F.; HONORATO, T.; REIS, R.; FERNANDES, R. Prevention of human errors in transmission line protection and fault location functions by eliminating the need for settings. *Cigre Session 48, Paris*, 2020. Citado na página 7.
- LOPES, F.; RIBEIRO, N.; CUNHA, G.; HONORATO, T.; MELO, K. Electrical noise simulation: A practical approach for atp/atpdraw studies. In: *Workshop on Comm. Networks and Power Sys.* [S.l.: s.n.], 2020. Citado na página 59.
- LOPES, F. V. *Localização de Falhas em Tempo Real Baseada na Teoria de Ondas Viajantes Usando Dados Não Sincronizados de Dois Terminais*. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, Brasil, mai. 2014. Citado 3 vezes nas páginas 4, 5, and 11.
- 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, 2018. Citado 5 vezes nas páginas 6, 17, 34, 42, and 43.
- 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, 2013. Citado na página 30.
- LOPES, F. V.; HONORATO, T.; CUNHA, G.; RIBEIRO, N. Transmission line records synchronization based on traveling waves analysis. *IEEE Transactions on Power Delivery*, p. 1–1, 2020. Citado 5 vezes nas páginas 5, 6, 51, 52, and 53.
- LOPES, F. V.; LEITE, E. J. S. Traveling wave-based solutions for transmission line two-terminal data time synchronization. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 33, n. 6, p. 3240–3241, Dec 2018. Citado na página 6.
- LOPES, F. V.; LIMA, P.; RIBEIRO, J. P. G.; HONORATO, T. R.; SILVA, K. M.; LEITE, 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*, v. 34, n. 6, p. 2123–2134, Dec 2019. ISSN 1937-4208. Citado na página 58.
- MARINHO, F. *Localização de Falhas em Linhas Paralelas Baseada na Teoria de Ondas Viajantes Utilizando Dados de Um Terminal*. Dissertação (Dissertação de Mestrado em Engenharia Eletrica) — UnB: Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2019. Citado 6 vezes nas páginas 5, 27, 32, 39, 58, and 59.
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. [S.l.], 2020. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/Paginas/Noticias/Ocorr%C3%Aancia%20no%20Estado%20do%20Amap%C3%A1%20%E2%80%93%2003.11.2020.aspx>>. Citado na página 1.
- PHADKE, A. G.; THORP, J. S. *Computer Relaying for Power Systems*. Chichester, England: John Wiley and Sons Ltd, 2009. (Power Systems). ISBN 978-0-470-05713-1. Citado 2 vezes nas páginas 22 and 47.
- R. REIS; NEVES, W.; LOPES, F.; FERNANDES, D. Coupling capacitor voltage transformers models and impacts on electric power systems: A review. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 34, n. 5, p. 1874–1884, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 6 and 50.



- RIBEIRO, E. P. A.; LOPES, F. V.; HONORATO, T. R. Modelagem do filtro differentiator-smoother: Validação via análise de transitórios e resposta em frequência de dispositivos microprocessados reais. *XIII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica*, 2019. Citado na página 30.
- SAHA, M. M.; IZYKOWSKI; JOZEF ROSOŁOWSKI, E. J. *Fault Location on Power Networks*. London, UK: Springer: [s.n.], 2010. Citado 4 vezes nas páginas 2, 3, 4, and 30.
- SCHWEITZER, E. O.; GUZMÁN, A.; MYNAM, M. V.; SKENDZIC, V.; KASZTENNY, B.; MARX, S. Locating faults by the traveling waves they launch. In: *2014 67th Annual Conference for Protective Relay Engineers*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 95–110. Citado 5 vezes nas páginas 5, 26, 27, 30, and 32.
- SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES. *Ultra-High-Speed Transmission Line Relay Traveling-Wave Fault Locator High-Resolution Event Recorder*. [S.l.], 2019. Disponível em: <<https://selinc.com/products/T400L/>>. Citado 3 vezes nas páginas 7, 12, and 18.
- SCHWEITZER-I. A review of impedance-based fault locating experience. *NORTHWEST ELECTRIC LIGHT & POWER ASSOCIATION CONFERENCE.*, Vancouver, WA, USA, Abr 1988. Citado na página 4.
- SCHWEITZER-III; GUZMÁN; SKENDZIC, V. 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 13.
- SCHWEITZER-III; O, E.; GUZMAN-CASILLAS, A.; KASZTENNY, B. Z.; TONG, Y.; MYNAM, M. V. *Traveling wave based single end fault location*. [S.l.]: Patent Application Publication, 2019. US Patent 10,295,585. Citado 9 vezes nas páginas 18, 19, 34, 35, 36, 37, 39, 44, and 48.
- SCHWEITZER-III, E. O.; SKENDZIC, V.; GUZMÁN, A.; MYNAM, M. V.; ETERNOD, J. L.; GONG, Y. Mystery solved: Five surprises discovered with megahertz sampling and traveling-wave data analysis. p. 1–14, 2019. Citado na página 58.
- TZIOUVARAS, D.; ROBERTS, J.; BENMOUYAL, G. New multi-ended fault location design for two- or three-terminal lines. In: *70th IEE International Conf. on Develop. in Power System Protection*. [S.l.: s.n.], 2001. p. 395–398. ISSN 0537-9989. Citado na página 6.
- ZHANGA HONGCHUN SHUA, F. L. Y. L. G. Single-ended travelling wave-based protection scheme for double-circuit transmission lines. *Electrical Power and Energy Systems*, p. 93–105, 2018. Citado na página 7.
- 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 Trans. and Dist. Conf. and Exposition*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–5. Citado 2 vezes nas páginas 11 and 58.