



**LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO  
EM HVDC BASEADA EM ONDAS VIAJANTES**

**HANNI NAOMIRA GOMES VENZI GONÇALVES  
PEDRO CAMPOS FERNANDES**

**TRABALHO DE GRADUAÇÃO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

Universidade de Brasília  
Faculdade de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Elétrica

**LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO  
EM HVDC BASEADA EM ONDAS VIAJANTES**

**HANNI NAOMIRA GOMES VENZI GONÇALVES  
PEDRO CAMPOS FERNANDES**

Trabalho final de graduação submetido ao Departamento de Engenharia Elétrica da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

**APROVADA POR:**

---

Prof. Kleber Melo e Silva, D.Sc. (ENE-UnB)  
(Orientador)

---

Prof. Felipe Vigolvino Lopes, D.Sc. (ENE-UnB)  
(Examinador Interno)

---

Ana Bárbara Fernandes Neves, M.Sc. (ENE-UnB)  
(Examinadora Externa)

Brasília/DF, 02 de julho de 2018.

## FICHA CATALOGRÁFICA

GONÇALVES, HANNI NAOMIRA GOMES VENZI; FERNANDES, PEDRO CAMPOS  
LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO EM HVDC BASEADA EM  
ONDAS VIAJANTES Localização de Faltas em Linhas de Transmissão em HVDC Baseada  
em Ondas Viajantes. [Distrito Federal] 2018.

xiii, 78p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Engenheiro Eletricista, Engenharia Elétrica, 2018).

Trabalho de Graduação – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Elétrica

1. HVDC

3. Localização de Faltas

5. Transitórios Eletromagnéticos

I. ENE/FT/UnB

2. Ondas Viajantes

4. Linhas de Transmissão

6. Sistemas de Potência

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

GONÇALVES, H. N. G. V.; FERNANDES, P. C. (2018). Localização de Faltas em Linhas de Transmissão em HVDC Baseada em Ondas Viajantes, Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica, Publicação 2018, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 78p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTORES: Hanni Naomira Gomes Venzi Gonçalves, Pedro Campos Fernandes.

TÍTULO: Localização de Faltas em Linhas de Transmissão em HVDC Baseada em Ondas Viajantes.

GRAU: Engenheiro Eletricista. ANO: 2018.

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste trabalho de graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. Os autores reservam outros direitos de publicação e nenhuma parte desse trabalho de graduação pode ser reproduzida sem autorização por escrito dos autores.

---

Hanni Naomira Gomes Venzi Gonçalves

Departamento de Eng. Elétrica

Universidade de Brasília

Campus Darcy Ribeiro

---

Pedro Campos Fernandes

Departamento de Eng. Elétrica

Universidade de Brasília

Campus Darcy Ribeiro

# AGRADECIMENTOS

**HANNI NAOMIRA GOMES VENZI GONÇALVES**

Agradeço aos meus pais e irmãos, pelo amor e zelo incondicionais, por apoiarem as minhas decisões e por acreditarem em mim em momentos em que eu não fui capaz de acreditar.

Ao Pedro, meu companheiro neste trabalho e colega de graduação, por toda a paciência, determinação e ajuda mútua para concluirmos este trabalho.

Ao professor Kleber, pela disposição sincera em compartilhar seu conhecimento e em nos orientar durante todas as etapas que deste processo.

A todas as amizades que cultivei dentro e fora da UnB, que contribuíram para que esse período de graduação fosse vivido com mais leveza.

A todos com quem convivi no LAPSE, por proporcionarem um ambiente de aprendizado e camaradagem. Em especial, agradeço às amigas Larissa, Maria, Letícia, Suellen e Ina por todo o carinho e encorajamento recebidos.

E a todas as pessoas que de alguma maneira trouxeram positividade e luz aos meus dias e que serviram de motivação para que eu seguisse adiante.

# AGRADECIMENTOS

**PEDRO CAMPOS FERNANDES**

Primeiramente, gostaria de agradecer o apoio incondicional dos meus pais, João Lúcio e Gislaine, e da minha irmã, Giulia, comemorando as pequenas vitórias e, principalmente, dando suporte às dificuldades e frustrações de um curso tão exigente. Vocês são o principal motivo de eu ter atingido a linha de chegada.

À minha parceira de trabalho, Hanni, agradeço por sempre estar disposta a trabalhar duro (obrigado pelos longos sábados no LAPSE e reuniões via vídeo) e a suportar as minhas chatices como dupla.

Agradeço também ao meu orientador, professor Kleber, que esteve presente e participativo ao longo do trabalho, nos encorajando a continuar trabalhando duro nos momentos mais desmotivantes.

À minha primeira orientadora, professora Mylène, responsável por me apresentar o mundo da pesquisa acadêmica.

Aos meus colegas da TAESA que sempre foram flexíveis e entusiasmados junto às demandas desse trabalho de conclusão de curso.

Por fim, mas não menos importante, aos meus amigos dos tempos de Engenharia de Computação, Eduardo, Jorge, Matheus, Paulo e Vitor e de Engenharia Elétrica, André, Arthur, Henrique Orefice, Gabriel Bayomi, Gabriel Castellano, Gustavo Cid, João, Leonardo, Letícia, Luiz, Stefano e Renata, meus mais sinceros agradecimentos, vocês são a prova de que quem quer ir longe vai junto, e não sozinho.

## RESUMO

Com o advento dos tiristores e o avanço da eletrônica, a transmissão de energia elétrica em corrente contínua (*High Voltage Direct Current* - HVDC) tem crescido, pois mostra-se mais vantajosa frente aos custos para instalação de linhas muito longas, além de necessitar menos compensação reativa. Dentro desse novo quadro de operação de sistemas elétricos, a capacidade de detectar defeitos de forma veloz e precisa é uma tarefa importante, de modo a evitar danos a equipamentos, agilizar as ações das equipes de manutenção e garantir maior disponibilidade no fornecimento de energia elétrica. Para tanto, técnicas de localização de faltas utilizando ondas viajantes (OVs) vêm ganhando destaque, dada a eficácia e simplicidade de aplicação dos métodos. O presente trabalho, portanto, visa avaliar o desempenho de técnicas de localização de faltas baseadas em OVs para um modelo computacional de um sistema de transmissão em HVDC simulado na ferramenta *Alternative Transients Program* (ATP). O algoritmo implementado baseia-se nos conceitos de transformação modal para desacoplamento do sistema HVDC, aliado à filtragem *Differentiator-Smoother* (DS) para aquisição das componentes de alta frequência e posterior detecção dos instantes de incidência das OVs nos terminais monitorados. Os resultados obtidos para os cenários de faltas polo-terra e polo-polo mostraram boa precisão frente às variações na posição da falta e em sua resistência, comprovando o bom desempenho do algoritmo baseados em OVs aplicado. Considerando a existência de imprecisões nos parâmetros de linha, a queda de desempenho esperada dos métodos, em geral, foi comprovada dada a dependência entre estimação e velocidade de propagação.

**Palavras-chave:** HVDC, ondas viajantes, localização de faltas, linhas de transmissão, transitórios eletromagnéticos, sistemas de potência.

## ABSTRACT

With the development of thyristors and the progress of electronics, the so called High Voltage Direct Current (HVDC) transmission became feasible and has grown in recent decades, due to the low costs associated with long transmission lines installation, in addition to requiring less reactive compensation. Regarding this new power systems operation framework, the capability of locating faults in a fast and accurate way is an important task, because it accelerates the maintenance group actions, protects the HVDC link equipment and guarantees faster electrical energy reestablishment. Therefore, fault location techniques based on traveling waves (TW) gained prominence, due to their simplicity and effectiveness. This work, thus, evaluates TW fault location methods performance for a HVDC system modeled and simulated on the software Alternative Transients Program (ATP). The proposed algorithm relies on modal transformation for power system decoupling together with Differentiator-Smoother (DS) filtering, followed by the detection of TW reflection instants. The results obtained on the proposed pole-to-ground and pole-pole scenarios showed good fault location accuracy in face of variations in fault position and resistance, proving the good performance of TW based algorithms for HVDC systems. Taking into account line parameters inconsistencies, the worsening on most of the methods performance was proved, given the dependence between estimation and propagation velocity.

**Keywords:** HVDC, traveling waves, fault location, transmission lines, electromagnetic transients, power systems.

# SUMÁRIO

<b>Sumário</b>	i
<b>Lista de Figuras</b>	iv
<b>Lista de Tabelas</b>	viii
<b>Lista de Símbolos</b>	x
<b>Glossário</b>	xiv
<b>Capítulo 1 – Introdução</b>	1
1.1 Contextualização . . . . .	1
1.2 Motivação . . . . .	4
1.3 Objetivos . . . . .	6
1.4 Estrutura do Trabalho . . . . .	6
<b>Capítulo 2 – Transmissão em HVDC</b>	8
2.1 Estações conversoras . . . . .	9
2.1.1 Ponte Retificadora de Seis Pulsos . . . . .	10
2.1.1.1 Operação em Modo Retificador . . . . .	10
2.1.1.2 Operação em Modo Inversor . . . . .	14
2.1.1.3 Ângulo de Sobreposição e Ângulo de Extinção . . . . .	15
2.1.2 Ponte Retificadora de Doze Pulsos . . . . .	16
2.2 Transformadores Conversores . . . . .	17
2.3 Filtros CA e CC . . . . .	18
2.4 Reatores de Alisamento . . . . .	19
2.5 Conexões em Sistemas HVDC . . . . .	19
2.5.1 Conexão Monopolar . . . . .	19
2.5.2 Conexão Bipolar . . . . .	19
2.5.3 Conexão Homopolar . . . . .	21

<b>Capítulo 3 – Fundamentação Teórica de OV's</b>	<b>22</b>
3.1 Propagação de ondas viajantes em linhas monofásicas . . . . .	22
3.2 Impedância característica e velocidade de propagação . . . . .	24
3.3 Comportamento de Ondas Viajantes em um Ponto de Descontinuidade . . . . .	26
3.4 Propagação de OV's em Linhas com Ramificações . . . . .	30
3.5 Diagramas de Reflexões Sucessivas de Ondas . . . . .	31
<b>Capítulo 4 – Revisão Bibliográfica</b>	<b>33</b>
4.1 Localização de Falhas Baseada em Ondas Viajantes . . . . .	33
<b>Capítulo 5 – Descrição do Algoritmo</b>	<b>36</b>
5.1 Visão Geral do Algoritmo Implementado . . . . .	36
5.2 Transformação Modal . . . . .	37
5.3 Filtro DS . . . . .	39
5.4 Detecção dos Máximos das OV's . . . . .	42
5.5 Interpolação e definição do instante de chegada das OV's nos terminais . . . . .	42
5.6 Métodos de Localização de Falhas baseados em OV's . . . . .	43
5.6.1 Método a Dois Terminais Clássico . . . . .	44
5.6.2 Método a Um Terminal . . . . .	45
5.6.3 Método de Um Terminal Baseado em Múltiplos Modos . . . . .	46
5.6.4 Método de Dois Terminais Baseado em Múltiplos Modos . . . . .	47
<b>Capítulo 6 – Apresentação e Análise dos Resultados</b>	<b>49</b>
6.1 Descrição do Modelo . . . . .	49
6.1.1 Linha de Transmissão CC . . . . .	50
6.1.2 Sistema CA . . . . .	52
6.2 Simulações Realizadas . . . . .	53
6.3 Resultados das Simulações . . . . .	54
6.3.1 Falhas Polo-Terra . . . . .	55
6.3.1.1 Variação do Local de Falta . . . . .	55
6.3.1.2 Influência de Imprecisões nos Parâmetros de Linha . . . . .	57
6.3.1.3 Variação da Resistência de Falta . . . . .	61
6.3.2 Falhas Polo-Polo . . . . .	66
6.3.2.1 Variação do Local de Falta . . . . .	66
6.3.2.2 Influência de Imprecisões nos Parâmetros de Linha . . . . .	68
6.3.2.3 Variação da Resistência de Falta . . . . .	69

---

<b>Capítulo 7 – Conclusões e Propostas Futuras</b>	<b>74</b>
<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>76</b>

## LISTA DE FIGURAS

1.1	Curvas de custo total em função do comprimento da linha de transmissão para sistemas em CC e CA - Modificado de (RAMOS <i>et al.</i> , 2015) . . . . .	3
2.1	Esquema básico de um bipolo HVDC. . . . .	8
2.2	Ponte retificadora de seis pulsos ou circuito de <i>Graetz</i> . . . . .	10
2.3	Formas de onda de tensão para uma ponte de seis pulsos, considerando os ângulos de disparo $\alpha = 0^\circ$ , $\alpha = 30^\circ$ , $\alpha = 90^\circ$ , $\alpha = 120^\circ$ e $\alpha = 180^\circ$ . . . . .	13
2.4	Ponte retificadora de doze pulsos e perfil de tensão de saída na carga $R_l$ . . . . .	17
2.5	Elo HVDC em conexão monopolar. . . . .	20
2.6	Elo HVDC em conexão bipolar. . . . .	20
2.7	Elo HVDC em conexão homopolar. . . . .	21
3.1	Modelo de linha monofásica com dois condutores a parâmetros distribuídos. . . . .	22
3.2	Ondas viajantes incidentes de tensão e corrente antes de atingir o ponto de descontinuidade em $x = L$ entre os meios 1 e 2. . . . .	27
3.3	Ondas viajantes incidente, refletida e transmitida de tensão geradas pelo ponto de descontinuidade em $x = L$ entre os meios 1 e 2. . . . .	28
3.4	Onda viajante de corrente passando por uma ramificação. . . . .	30
3.5	Diagrama de reflexões sucessivas de uma OV de tensão propagando-se em uma LT. . . . .	31

5.1	(a) Processo de convolução do sinal de entrada com a janela de dados do filtro DS; (b) Janela de dados do filtro DS; (c) Saída do filtro DS para uma entrada em degrau; (d) Saída do filtro DS para uma entrada em rampa. . . . .	40
5.2	(a) Exemplo de sinal de corrente coletado a partir de uma falta polo-terra; (b) Saída do filtro DS externando as OV's; (c) Imperfeições na saída do filtro DS que o algoritmo de detecção de máximos visa eliminar. . . . .	41
5.3	(a) Amostras selecionadas para a interpolação e pico do sinal anterior a esse processo; (b) Pico obtido após o processo de interpolação. . . . .	43
5.4	Diagrama de reflexões para um distúrbio interno à linha, considerando a propagação de OV's somente do modo aéreo. . . . .	44
5.5	Diagrama de reflexões para um distúrbio interno à linha, considerando a propagação de OV's nos modos aéreo e terra. . . . .	48
6.1	Dados da linha DC do Madeira utilizados na etapa de planejamento (LUZ <i>et al.</i> , 2014). . . . .	50
6.2	Sistema HVDC bipolar do Rio Madeira modelado em ATP/ATPDraw. . . . .	51
6.3	Sinais de corrente nos terminais retificador e inversor dos polos positivo e negativo, respectivamente, quando da aplicação de uma falta polo-terra. . . . .	53
6.4	Sinais de corrente nos terminais retificador e inversor dos polos positivo e negativo, respectivamente, quando da aplicação de uma falta polo-polo. . . . .	53
6.5	Polígonos de frequência acumulada para avaliação do desempenho dos métodos frente uma falta polo-terra, variando-se o local do defeito. . . . .	56
6.6	Polígonos de frequência acumulada para avaliação do desempenho dos métodos frente uma falta polo-terra, considerando imprecisões nos parâmetros da linha. . . . .	57
6.7	Erro na estimativa do local da falta polo-terra em função de sua posição real para os métodos de (a) um terminal - retificador; (b) um terminal - inversor; (c) um terminal em múltiplos modos - retificador; (d) um terminal em múltiplos modos - inversor; (e) dois terminais; (e) dois terminais em múltiplos modos. . . . .	59

- 6.8 Erro na estimativa do local da falta polo-terra, considerando imprecisões nos parâmetros da linha, em função de sua posição real para os métodos de (a) um terminal - retificador; (b) um terminal - inversor; (c) um terminal em múltiplos modos - retificador; (d) um terminal em múltiplos modos - inversor; (e) dois terminais; (e) dois terminais em múltiplos modos. . . . . 60
- 6.9 Erro na estimativa do local da falta polo-terra em função da resistência de falta, considerando um defeito fixado em 25%, para os métodos de (a) um terminal - retificador; (b) um terminal - inversor; (c) um terminal em múltiplos modos - retificador; (d) um terminal em múltiplos modos - inversor; (e) dois terminais; (e) dois terminais em múltiplos modos. . . . . 63
- 6.10 Erro na estimativa do local da falta polo-terra em função da resistência de falta, considerando um defeito fixado em 50%, para os métodos de (a) um terminal - retificador; (b) um terminal - inversor; (c) um terminal em múltiplos modos - retificador; (d) um terminal em múltiplos modos - inversor; (e) dois terminais; (e) dois terminais em múltiplos modos. . . . . 64
- 6.11 Erro na estimativa do local da falta polo-terra em função da resistência de falta, considerando um defeito fixado em 75%, para os métodos de (a) um terminal - retificador; (b) um terminal - inversor; (c) um terminal em múltiplos modos - retificador; (d) um terminal em múltiplos modos - inversor; (e) dois terminais; (e) dois terminais em múltiplos modos. . . . . 65
- 6.12 Erro na estimativa do local da falta polo-polo em função de sua posição real para os métodos de (a) um terminal - retificador; (b) um terminal - inversor; (c) dois terminais. . . . . 67
- 6.13 Polígonos de frequência acumulada para avaliação do desempenho dos métodos frente uma falta polo-polo, variando-se o local do defeito, para (a)  $X=100$  e (b)  $X=150$ . . . . . 68
- 6.14 Erro na estimativa do local da falta polo-polo em função da resistência de falta, considerando um defeito fixado em 25%, para os métodos de (a) um terminal - retificador; (b) um terminal - inversor; (c) dois terminais. . . . . 71

- 
- 6.15 Erro na estimativa do local da falta polo-polo em função da resistência de falta, considerando um defeito fixado em 50%, para os métodos de (a) um terminal - retificador; (b) um terminal - inversor; (c) dois terminais. . . . . 72
- 6.16 Erro na estimativa do local da falta polo-polo em função da resistência de falta, considerando um defeito fixado em 75%, para os métodos de (a) um terminal - retificador; (b) um terminal - inversor; (c) dois terminais. . . . . 73

## LISTA DE TABELAS

5.1	Sequência de etapas do algoritmo. . . . .	37
6.1	Parâmetros da linha de transmissão. . . . .	52
6.2	Parâmetros dos circuitos equivalentes das redes CA do retificador e do inversor. . . . .	52
6.3	Métodos de localização de faltas avaliados para cada cenário de falta. . . . .	54
6.4	Valores médios, máximos e mínimos do erro de estimação de cada método para um cenário de falta polo-terra, variando-se o local da falta. . . . .	57
6.5	Valores médios, máximos e mínimos do erro de estimação de cada método para um cenário de falta polo-terra, considerando imprecisões nos parâmetros da linha. . . . .	57
6.6	Valores do erro de estimação de uma falta polo-terra localizada a 25% da linha para cada método, considerando a variação da resistência de falta. . . . .	62
6.7	Valores do erro de estimação de uma falta polo-terra localizada a 50% da linha para cada método, considerando a variação da resistência de falta. . . . .	62
6.8	Valores do erro de estimação de uma falta polo-terra localizada a 75% da linha para cada método, considerando a variação da resistência de falta. . . . .	62
6.9	Valores médios, máximos e mínimos do erro de estimação de cada método para um cenário de falta polo-polo, variando-se o local do defeito, para $X=100$ e $X=150$ . . . . .	68
6.10	Valores médios, máximos e mínimos do erro de estimação de cada método para um cenário de falta polo-polo, considerando imprecisões nos parâmetros da linha e $X=150$ . . . . .	68
6.11	Valores do erro de estimação de uma falta polo-polo localizada a 25% da linha para cada método, considerando a variação da resistência de falta e as situações de $X=100$ e $X=150$ . . . . .	70

---

6.12	Valores do erro de estimação de uma falta polo-polo localizada a 50% da linha para cada método, considerando a variação da resistência de falta e as situações de $X=100$ e $X=150$ . . . . .	70
6.13	Valores do erro de estimação de uma falta polo-polo localizada a 75% da linha para cada método, considerando a variação da resistência de falta e as situações de $X=100$ e $X=150$ . . . . .	70

## LISTA DE SÍMBOLOS

$c$	Velocidade da luz.
$C'$	Capacitância em derivação por unidade de comprimento.
$f$	Frequência
$G$	Parâmetro do filtro DS.
$G'$	Condutância em derivação por unidade de comprimento.
$h$	Altura do condutor ao solo.
$i$	Sinal de corrente instantânea.
$i_0$	Corrente modal de modo terra.
$i_1$	Corrente modal de modo aéreo.
$i_d$	Somatório das correntes incidente e refletida.
$i_i$	Corrente incidente.
$i_{NEG}$	Corrente no polo negativo.
$i_{POS}$	Corrente no polo positivo.
$i_r$	Corrente refletida.
$i_t$	Corrente transmitida.
$I$	Sinal de corrente no domínio de Laplace.
$I+$	OV de corrente progressiva.
$I-$	OV de corrente regressiva.
$L$	Comprimento da linha

---

$L'$	Indutância série por unidade de comprimento.
$m$	Local da falta.
$m_{1class}$	Local da falta segundo método de um terminal clássico.
$m'_{1class}$	Local da falta segundo adaptação do método de um terminal.
$m_{1modos}$	Local da falta segundo método de um terminal baseado em múltiplos modos.
$m_{2class}$	Local da falta segundo método de dois terminais clássico.
$m_{2modos(pu)}$	Local da falta em p.u segundo método de dois terminais baseado em múltiplos modos.
$m_{est}$	Local de falta estimado pelo algoritmo.
$m_{real}$	Local de falta real.
$N_{DS}$	Número de coeficientes do filtro DS.
$p$	Número de pulsos de saída do conversor.
$r$	Raio do condutor.
$R'$	Resistência série por unidade de comprimento.
$t_{falta}$	Instante em que a falta ocorreu.
$t_{L1}$	Instante de chegada da primeira OV no terminal local.
$t_{L2}$	Instante de chegada ao terminal local da OV refletida no ponto de falta.
$t'_{L2}$	Instante de chegada ao terminal local da OV refratada no ponto de falta.
$t_{R1}$	Instante de chegada da primeira OV no terminal remoto.
$t_{R2}$	Instante de chegada ao terminal remoto da OV refletida no ponto de falta.
$t'_{R2}$	Instante de chegada ao terminal remoto da OV refratada no ponto de falta.
$T$	Matriz de transformação modal de Karrenbauer.
$T_{DS}$	Duração da janela do filtro DS.
$v$	Sinal de tensão instantânea.
$v_0$	Tensão modal de modo terra.

---

$v_1$	Tensão modal de modo aéreo.
$v_d$	Somatório das tensões incidente e refletida.
$v_i$	Tensão incidente.
$v_{NEG}$	Tensão no polo negativo.
$v_p$	Velocidade de propagação.
$v_{POS}$	Tensão no polo positivo.
$v_r$	Tensão refletida.
$v_t$	Tensão transmitida.
$V$	Sinal de tensão no domínio de Laplace.
$V_0$	Tensão de saída da ponte de seis pulsos.
$V_a$	Tensão na fase A.
$V_{ab}$	Tensão de linha AB
$V_{ac}$	Tensão de linha AC.
$V_b$	Tensão na fase B.
$V_{ba}$	Tensão de linha BA
$V_{bc}$	Tensão de linha BC.
$V_c$	Tensão na fase C.
$V_{ca}$	Tensão de linha CA.
$V_{cb}$	Tensão de linha CB.
$V_{DC,C}$	Tensão média na saída da ponte de seis pulsos para ângulo de disparo não-nulo.
$V_{DC,doze}$	Tensão média na saída da ponte de doze pulsos para ângulo de disparo nulo.
$V_{DC,NC}$	Tensão média na saída da ponte de seis pulsos para ângulo de disparo nulo.
$V_m$	Amplitude da tensão de fase.
$V+$	OV de tensão progressiva.
$V-$	OV de tensão regressiva.

---

$Y'$	Admitância por unidade de comprimento
$Z'$	Impedância por unidade de comprimento
$Z_1$	Impedância do meio 1.
$Z_2$	Impedância do meio 2.
$Z_c$	Impedância característica da linha de transmissão
$Z_s$	Impedância de surto da linha de transmissão.
$\alpha$	Ângulo de disparo.
$\alpha_{ov}$	Constante de perdas.
$\beta_{ov}$	Constante de fase.
$\gamma$	Ângulo de extinção.
$\gamma_{ov}$	Constante de propagação.
$\Gamma_{r,i}$	Coefficiente de reflexão para sinais de corrente.
$\Gamma_{r,v}$	Coefficiente de reflexão para sinais de tensão.
$\Gamma_{t,i}$	Coefficiente de transmissão para sinais de corrente.
$\Gamma_{t,v}$	Coefficiente de transmissão para sinais de tensão.
$\Delta t$	Passo de amostragem.
$\Delta x$	Comprimento incremental da linha de transmissão.
$\epsilon_0$	Permissividade do vácuo.
$\epsilon\%$	Erro da localização de faltas.
$\lambda$	Comprimento de onda.
$\mu$	Ângulo de sobreposição.
$\mu_0$	Permeabilidade magnética no vácuo.
$\tau$	Tempo de trânsito.
$\omega$	Velocidade angular.

## GLOSSÁRIO

ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
DS	<i>Differentiator-Smoother</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
HVDC	<i>High Voltage Direct Current</i>
LCC	<i>Line-Commutated Converters</i>
LT	Linha de Transmissão
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
OV	Onda Viajante
PB	Pagamento Base
PSCAD	<i>Power System Computer Aided Design</i>
PV	Parcela Variável
PVI	Parcela Variável de Indisponibilidade
SIN	Sistema Interligado Nacional
UnB	Universidade de Brasília
VSC	<i>Voltage-Source Converters</i>

### 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A energia elétrica é um bem fundamental para a manutenção dos processos que regem o desenvolvimento econômico global como um todo, podendo ser derivada de diferentes fontes de energia. Em muitos casos, os locais onde ocorre a geração dessa energia não se encontram próximos aos grandes centros de consumo, daí a necessidade de um sistema de transmissão que realize essa integração. No Brasil, o Sistema Interligado Nacional (SIN), responsável pela produção e transmissão de energia elétrica no país, possui uma malha de transmissão de grande porte que permite a transferência de energia entre os subsistemas que o compõe.

Atualmente, a forma de transmissão de energia mais difundida é a que utiliza Corrente Alternada (CA), contudo, vale frisar que as primeiras teorias, experimentos e aplicações desenvolvidas e relacionadas à eletricidade foram originalmente concebidas para a Corrente Contínua (CC). Pode-se citar, como um marco, a criação, em 1882, da primeira estação central de energia elétrica do mundo em Pearl Street, Nova Iorque, por Thomas A. Edison. Essa instalação era capaz de suprir corrente contínua a 110 V por um raio de 1,6 km, sendo alimentada por geradores em CC movidos por turbinas a vapor, e foi resultado de um crescimento vertiginoso na demanda por energia elétrica em consequência do avanço tecnológico da época (KIMBARK, 1971).

O aumento das aplicações em CC e sua supremacia, no entanto, esbarraram no surgimento da teoria de circuitos polifásicos, bem como na invenção dos transformadores e dos motores de indução encabeçados por Nikola Tesla. Estas descobertas tornaram a transmissão, geração e distribuição de energia elétrica em CA mais vantajosa por dois motivos principais (KIMBARK, 1971):

- Os transformadores permitiram que a conversão de tensões de um nível para outro para

transmissão a longas distâncias fosse realizada com facilidade, extinguindo a necessidade de diversas estações transmissoras CC para atender áreas distantes;

- Os motores de indução, quando comparados às máquinas CC utilizadas no período em questão, eram capazes de operar em altas velocidades a custos e tamanhos menores, portanto possuindo uma boa articulação com a eficiência das turbinas a vapor que também trabalhavam com velocidades mais altas. Além disso, demandavam menos manutenção por não possuírem escovas para comutação, ao contrário das máquinas CC.

Por esses e outros fatores, a corrente alternada passou a dominar amplamente as aplicações em sistemas de potência, enquanto a corrente contínua caiu em desuso. Foi somente em meados de 1954 que este cenário começou a mudar, com a instalação do primeiro elo de transmissão de corrente contínua em alta tensão (*High Voltage Direct Current* - HVDC) comercial do mundo na ilha de Gotland, na Suécia, no qual foram empregados válvulas de arco de mercúrio.

Em 1972, o projeto Eel River, em New Brunswick, no Canadá, foi o primeiro a incorporar válvulas de tiristores como escopo inicial e consistia em um elo *back-to-back* capaz de operar a 80 kV e suprir 320 MW. Já em 1984, a transmissão em CC assumiu novas proporções com a construção do maior elo HVDC do mundo à época, entre as cidades de Foz do Iguaçu (PR) e Ibiúna (SP) no Brasil. Esse elo tornou-se necessário porque a integração da energia advinda do setor de 50 Hz da usina hidrelétrica de Itaipu ao SIN não poderia ser feita diretamente, haja visto que o último possui frequência de 60 Hz. Desde então, vários outros projetos de HVDC foram instalados ao redor do mundo, sobretudo quando tornaram-se mais claros os problemas relativos ao transporte em CA de grandes volumes de energia para longas distâncias.

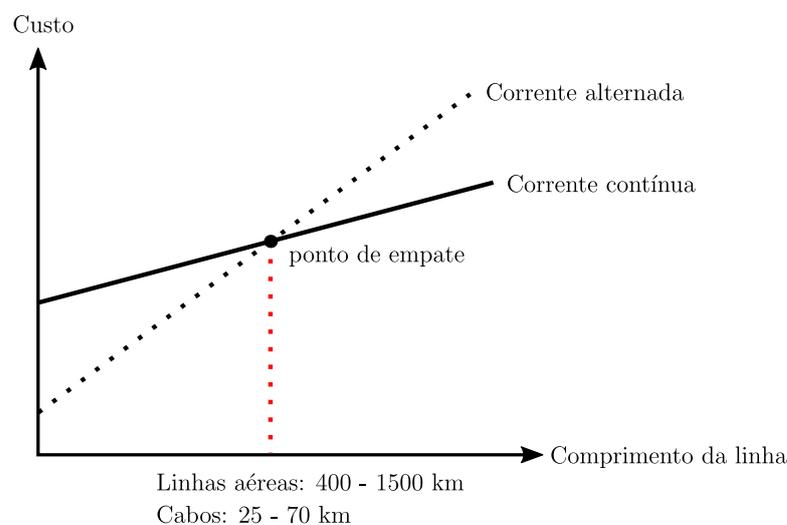
O primeiro deles é a grande variação dos perfis de tensão. Em virtude dos parâmetros de indutância e capacitância inerentes à sua modelagem, uma linha de transmissão (LT) em CA é capaz de produzir e consumir potência reativa, preponderando um dos dois processos a depender do cenário de carga. Para que não haja uma variação pronunciada no perfil de tensão como consequência, recorre-se ao uso de compensações reativas, sendo que a magnitude da compensação aumenta com o tamanho da linha (KIMBARK, 1971).

Em CC, por sua vez, os parâmetros tornam-se puramente resistivos, portanto não há potência reativa sendo consumida ou produzida na linha e a compensação reativa torna-se desne-

cessária. Considerando que a carga está sempre variando em sistemas reais, a transmissão em CC se mostra nesse caso uma facilitadora em termos operacionais.

Outra questão problemática surge com os limites de estabilidade: a capacidade de transferência de potência de linhas CA é função da distância de transmissão, sendo reduzida com o aumento do comprimento da linha em virtude do aumento da reatância, ao passo que linhas CC, por serem puramente resistivas, são afetadas principalmente por condições térmicas e de capacidade de transporte dos condutores. Assim, novamente elimina-se a necessidade de prover compensação reativa para longas distâncias.

Adicionalmente, podem-se citar outras vantagens da transmissão em HVDC tais como a interconexão assíncrona de sistemas que operam a diferentes frequências, a exemplo do elo de Itaipu citado anteriormente; a possibilidade de controle sobre a direção e magnitude do fluxo de potência no elo CC e perdas de transmissão reduzidas (KAMAKSHIAH; KAMARAJU, 2011).



**Figura 1.1.** Curvas de custo total em função do comprimento da linha de transmissão para sistemas em CC e CA - Modificado de (RAMOS *et al.*, 2015) .

No que diz respeito ao aspecto econômico, as estações conversoras presentes na transmissão em HVDC utilizam equipamentos sofisticados e de resposta rápida, sendo o custo de sua implementação superior ao de subestações convencionais em CA (KAMAKSHIAH; KAMARAJU, 2011). Por outro lado, o custo associado a linhas e torres é menor para sistemas em CC. Enquanto em um sistema trifásico em CA são requeridos três condutores, em um circuito bipolar HVDC são necessários apenas dois. Em consequência à redução de peso que isso implica, as

torres em CC tendem a ser menores em tamanho e, assim, mais baratas.

Para avaliar a relação custo-benefício para os dois casos, levantam-se as curvas, conforme mostra a Figura 1.1, que relacionam o comprimento da linha de transmissão e o custo associado ao empreendimento. Nota-se a existência de um ponto de cruzamento entre as curvas, chamado ponto de empate (*break-even point*), o qual indica a distância a partir da qual um elo de transmissão em CC passa a ser economicamente mais interessante que o seu correspondente em CA. Vale salientar que o ponto de empate depende de fatores como o custo por unidade de comprimento do condutor e o custo da mão de obra associada à instalação, fazendo-se necessário um estudo individual de cada caso para selecionar o método mais adequado.

Kimbark (1971) cita que o ponto de empate varia entre 500 e 1500 km para linhas aéreas. Já Sood (2004) estabelece que ele encontra-se entre 400 e 700 km para linhas aéreas, e entre 40 e 50 km para linhas aquáticas/subterrâneas. Dragan & Khaled (2015) trazem que, para linhas aéreas, o ponto varia entre 600 e 800 km e, para linhas aquáticas/subterrâneas, varia entre 40 e 70 km.

## 1.2 MOTIVAÇÃO

Qualquer sistema de potência está sujeito a curto-circuitos e perturbações. Em particular, por terem tipicamente um comprimento superior a centenas de quilômetros e assim ficarem expostas a diferentes adversidades, linhas de transmissão em HVDC ficam propensas a faltas internas (falhas nas estações conversoras, por exemplo) e externas (descargas atmosféricas, quedas de árvores, vandalismo).

No Brasil, para avaliar o desempenho e a qualidade do serviço público de transmissão de energia são usados alguns índices como o tempo e a frequência de indisponibilidade das instalações de transmissão integrantes da Rede Básica do SIN. No âmbito da regulamentação do sistema elétrico, o não cumprimento desses índices de qualidade se traduz na apuração mensal, por parte do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), das chamadas Parcelas Variáveis (PV), montantes a serem descontados do Pagamento Base (PB) das concessionárias de transmissão <sup>1</sup>. A Parcela Variável por Indisponibilidade (PVI), mais especificamente, diz respeito à

---

<sup>1</sup><<http://ons.org.br/%2FProcedimentosDeRede%2FM%C3%B3dulo%2015%2FSubm%C3%B3dulo%2015.12%2FSubm%C3%B3dulo%2015.12%202017.09.pdf>>. Acesso em 02/06/2018.

parcela a ser deduzida em decorrência de desligamentos programados ou desligamentos decorrentes de eventos envolvendo o equipamento principal de responsabilidade da concessionária <sup>2</sup>. Dessa forma, vê-se que a duração e a frequência de interrupções no fornecimento de energia elétrica impacta diretamente a receita anual das concessionárias.

Para além do aspecto econômico, perturbações advindas de faltas no sistema introduzem o risco de danos aos equipamentos envolvidos e à integridade de pessoas e do meio ambiente. Com esse cenário em mente, torna-se clara a importância de metodologias que prontamente identifiquem e eliminem essas faltas e que permitam a recomposição do sistema com rapidez, reduzindo o tempo de indisponibilidade dos equipamentos. Ademais, é desejável também localizar o local do defeito com o maior grau de precisão possível, pois isso torna mais eficiente o deslocamento e a ação das equipes de manutenção e de operação do sistema, conseqüentemente contribuindo para uma rápida retomada do fornecimento de energia.

Com esse interesse, várias investigações e estudos têm sido realizados com o intuito de desenvolver algoritmos de localização precisos que deem subsídio para uma rápida atuação do sistema de proteção. Pode-se dividir em dois grupos as principais técnicas de localização de faltas em linhas de transmissão (CAVALCANTE, 2011):

- Técnicas baseadas em componentes da frequência fundamental do sinal;
- Técnicas baseadas em componentes de alta frequência ou ondas viajantes.

As técnicas baseadas em componentes de alta frequência ou ondas viajantes (OVs) utilizam informações provenientes dos transitórios gerados pela própria falta e são amplamente utilizadas na proteção principal para sistemas HVDC. Isso se deve ao fato de que linhas CC possuem uma estrutura mais simples e os conversores principalmente refletem em lugar de refratar ondas, tornando essa alternativa especialmente mais vantajosa (ZHANG *et al.*, 2012; LIU *et al.*, 2009a; LIU *et al.*, 2009b).

---

<sup>2</sup><<http://www.aneel.gov.br/documents/656877/14486448/bren2007270.pdf/1c867d2e-96b9-47e6-b14f-a61ed4ddc8c4?version=1.0>>. Acesso em 02/06/2018.

### 1.3 OBJETIVOS

Considerando, portanto, a relevância do problema relatado e o crescente interesse no setor elétrico por soluções que auxiliem na identificação e eliminação de defeitos de forma rápida e precisa, o objetivo geral deste trabalho é a avaliação de diversos métodos de localização de faltas baseados em OV's já explorados na literatura, para uma linha de transmissão em HVDC. Dessa forma, este trabalho propõe os seguintes objetivos específicos:

- Estudar a teoria das OV's;
- Compreender o funcionamento dos conversores responsáveis pelos processos de retificação e inversão, bem como conhecer os elementos principais que compõem um sistema de transmissão em HVDC e suas atribuições;
- Simular diferentes tipos de faltas internas a um bipolo HVDC na ferramenta *Alternative Transients Program* (ATP), variando o ponto do defeito;
- Ponderar o desempenho de métodos variados de localização de faltas que utilizam os tempos de incidência de sinais de corrente capturados em apenas um e dois terminais da linha;
- Verificar a influência da resistência de falta e de imprecisões nos parâmetros da linha na localização correta do ponto de defeito;
- Assimilar as particularidades quando da aplicação da teoria de OV's para localização de faltas em sistemas HVDC.

### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está organizado da seguinte maneira:

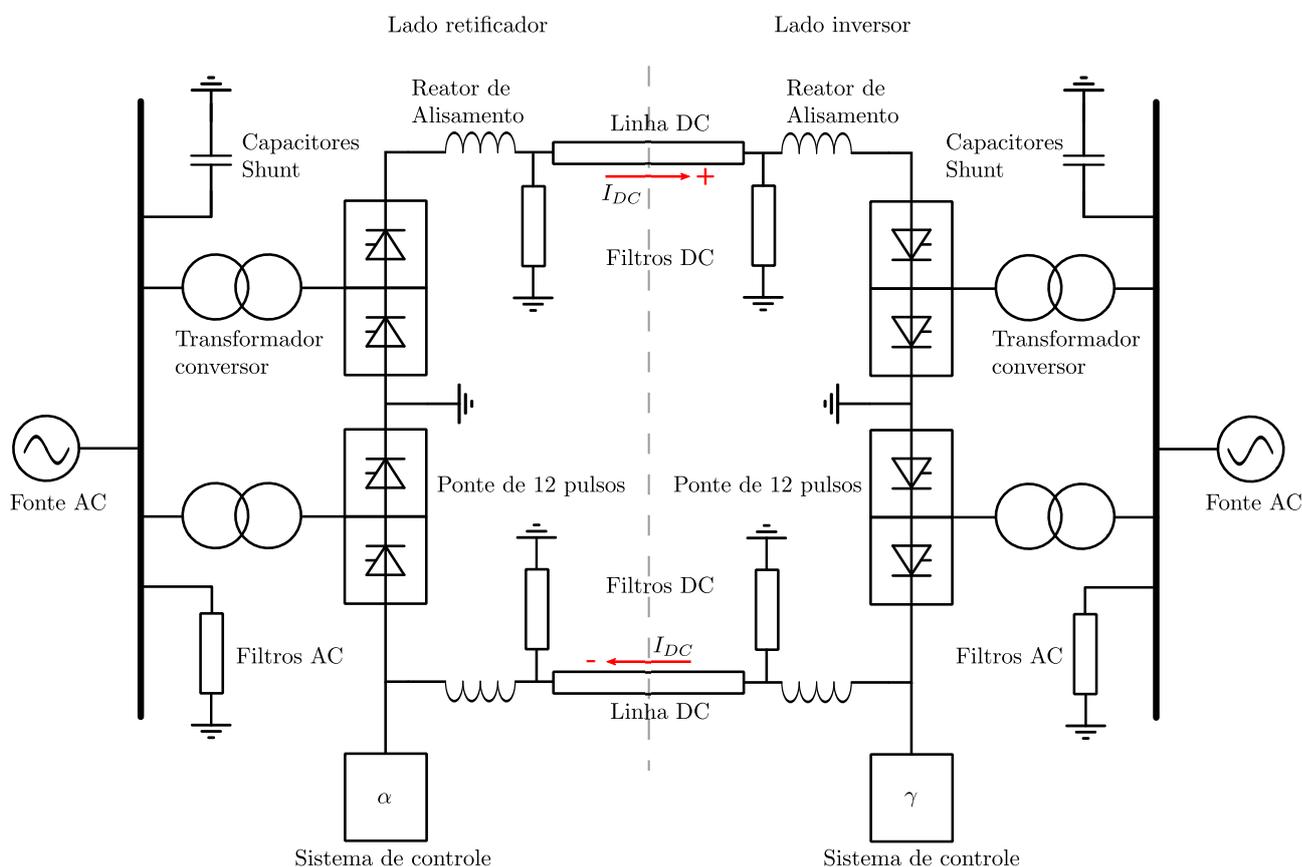
- O Capítulo 2 discute os princípios básicos da transmissão em HVDC, passando pela descrição do funcionamento dos conversores e demais equipamentos usualmente encontrados nos elos CC, além da apresentação das diferentes configurações possíveis para esses sistemas.
- O Capítulo 3 traz os conceitos básicos da teoria de OV's, mostrando o desenvolvimento das equações telegráficas e dos coeficientes de reflexão e refração que descrevem a sua

propagação pelas LTs, bem como a apresentação da ferramenta diagrama de reflexões sucessivas.

- O Capítulo 4 traz uma revisão bibliográfica dos diversos trabalhos da comunidade científica que abordam a teoria de localização de faltas em linhas de transmissão.
- O Capítulo 5 apresenta a descrição detalhada do algoritmo implementado para a localização de defeitos na linha HVDC, além da apresentação dos métodos de localização de faltas que serão explorados neste trabalho.
- O Capítulo 6 traz uma descrição sucinta do modelo a ser utilizado, seguida da exposição dos estudos que serão conduzidos. Posteriormente, são apresentados e analisados os resultados da aplicação do algoritmo implementado.
- O Capítulo 7 mostra as principais conclusões deste texto, enfatizando as dificuldades enfrentadas quando da aplicação do algoritmo. Por fim, apresenta-se algumas propostas de trabalhos futuros para a área.

## TRANSMISSÃO EM HVDC

Neste capítulo serão discutidos os principais aspectos a serem observados em sistemas de transmissão em HVDC, incluindo os fundamentos da conversão CA/CC. Adicionalmente, será feita uma descrição dos equipamentos básicos que constituem um sistema HVDC e suas funcionalidades, assim como os tipos de conexão existentes.



**Figura 2.1.** Esquema básico de um bipolo HVDC.

A Figura 2.1 mostra o esquema típico de um bipolo HVDC, do qual podemos destacar os seguintes equipamentos essenciais, os quais serão discutidos com mais detalhe a seguir:

- Conversores de seis ou doze pulsos;
- Transformadores conversores;

- Filtros CA e CC;
- Reatores de alisamento;

## 2.1 ESTAÇÕES CONVERSoras

O conversor é o equipamento responsável por transformar a corrente alternada em contínua e vice-versa. Ao processo de conversão CA/CC dá-se o nome de retificação, enquanto ao processo de conversão CC/CA dá-se o nome de inversão. Dada essa lógica, necessita-se de uma estação retificadora localizada em uma das extremidades da linha e de uma estação inversora na outra.

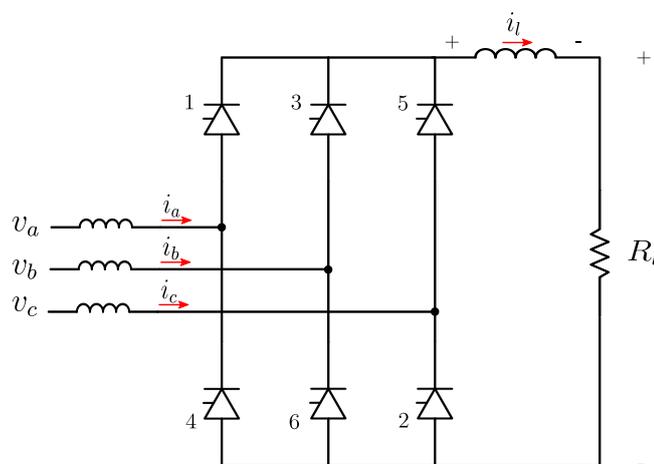
As estações conversoras adotam diferentes tecnologias, como os transistores bipolares de porta isolada, por exemplo, componentes característicos dos elos VSC (*Voltage-Source Converters*) e os tiristores, presentes nos elos LCC (*Line-Commutated Converters*). Neste trabalho, apenas a topologia LCC será abordada.

Os tiristores são dispositivos semicondutores de três terminais: um anodo, um catodo e um terminal de porta. Quando a diferença de potencial entre o anodo e o catodo for positiva e for aplicado um sinal de baixa amplitude à porta, diz-se que o tiristor está em estado de condução, isto é, uma corrente flui do anodo para o catodo. Uma vez comutado, o tiristor permanecerá ligado por tempo indefinido enquanto estiver polarizado positivamente e a corrente no anodo se mantiver acima de um patamar mínimo. Por outro lado, na condição do potencial do anodo se tornar menor que o do catodo, o tiristor passa para um estado de bloqueio e a condução cessa (SOOD, 2004). No caso dos conversores que serão vistos à frente em detalhe, o instante de tempo em que será aplicado um sinal ao terminal de porta está relacionado a um ângulo de disparo  $\alpha$ .

Apesar de existirem outras configurações de circuitos conversores, as pontes de seis pulsos, também conhecidos como circuitos de *Graetz*, juntamente às pontes de doze pulsos, são as que de fato são empregadas nas diversas aplicações de transmissão até os dias de hoje. A seguir apresenta-se o funcionamento e a análise desses equipamentos.

### 2.1.1 Ponte Retificadora de Seis Pulsos

A estrutura simplificada de uma ponte de seis pulsos, apresentada na Figura 2.2, é formada por três pares paralelos de tiristores conectados em série, em que cada um dos pares é alimentado por uma das fases de uma fonte de tensão trifásica em CA. Na parte superior da ponte, os anodos dos tiristores 1, 3 e 5 são conectados às fases  $a$ ,  $b$  e  $c$ , respectivamente. Da mesma forma na parte inferior da ponte, têm-se conectados às fases os catodos dos tiristores 4, 6 e 2. Por fim, uma carga CC é conectada em paralelo aos terminais da ponte.



**Figura 2.2.** Ponte retificadora de seis pulsos ou circuito de *Graetz*.

#### 2.1.1.1 Operação em Modo Retificador

Considere uma fonte de tensão trifásica equilibrada cujas tensões de fase são dadas por  $V_a$ ,  $V_b$  e  $V_c$ , conectada a uma ponte de seis pulsos com tiristores numerados de 1 a 6, conforme sequência vista anteriormente. Assume-se que a impedância da fonte é nula para eliminar quaisquer sobreposições nas conduções das válvulas, isto é, a comutação entre tiristores que se encontram no mesmo lado da ponte acontece instantaneamente (KAMAKSHIAH; KAMARAJU, 2011). Além disso, adota-se inicialmente o processo de comutação sem controle do terminal de porta, ou seja,  $\alpha = 0^\circ$ .

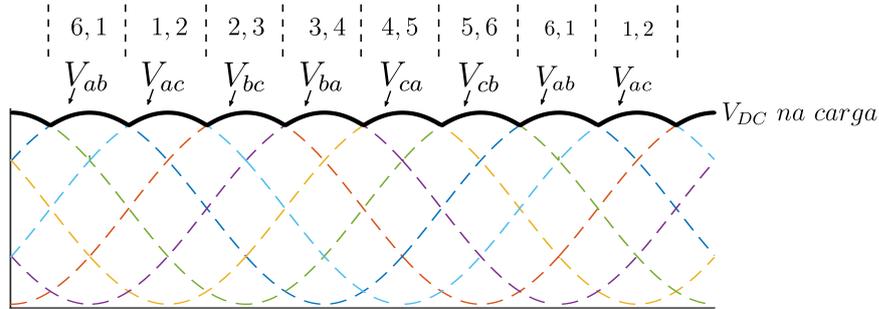
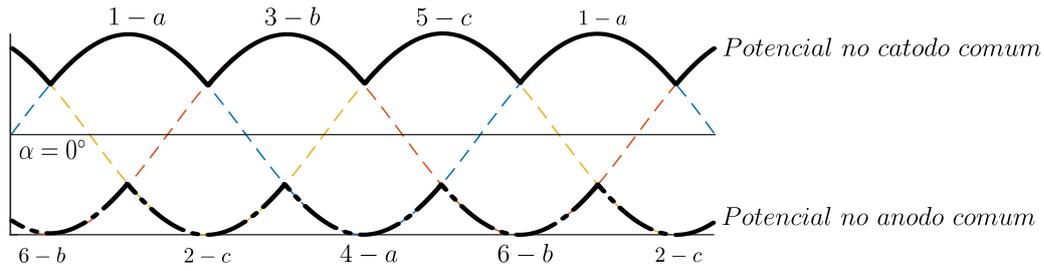
Sabe-se que um tiristor conduz corrente a partir do instante em que tensão vista no anodo for positiva em relação à tensão vista no catodo e cessa a condução quando a tensão vista no anodo for negativa em relação à tensão vista no catodo (SOOD, 2004). A partir deste entendimento,

o funcionamento dos tiristores na ponte de seis pulsos pode ser resumido da seguinte maneira:

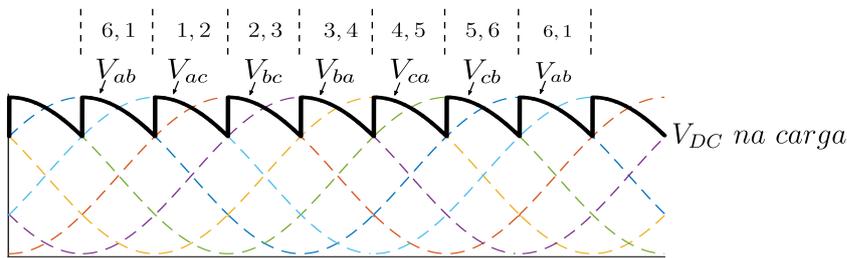
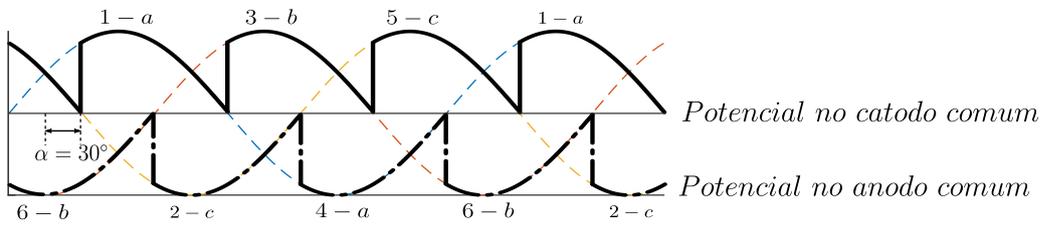
- Para os tiristores 1, 3 e 5 na parte superior da ponte, que apresentam a fonte conectada a seus anodos, conduzirá aquele cuja tensão no **anodo** for a mais **positiva**, isto é, aquele que estiver conectado à fase mais positiva naquele instante;
- Para os tiristores 4, 6 e 2 na parte inferior da ponte, que apresentam a fonte conectada a seus catodos, conduzirá aquele cuja tensão no **catodo** for a mais **negativa**, isto é, aquele que estiver conectado à fase mais negativa naquele instante.

Conforme é mostrado na Figura 2.3, quando  $V_a$  é a mais positiva entre as três tensões de fase, o tiristor 1 conduz. Simultaneamente, se a tensão  $V_b$  é a mais negativa, o tiristor 6 também conduz. Como a tensão vista na carga é dada pela diferença entre os potenciais no catodo comum e anodo comum da ponte, a forma de onda resultante acompanha a tensão de linha  $V_{ab}$ . A partir do ponto em que  $V_a$  é máxima, a tensão  $V_b$  deixa de ser a mais negativa em relação às tensões de fase, sendo substituída agora por  $V_c$ . Nesse momento, os tiristores conduzindo são 1 e 2 e a tensão na carga acompanha  $V_{ac}$ . O mesmo raciocínio pode ser aplicado para as demais combinações de tensão de fase e é apresentado ainda na Figura 2.3, em que são mostradas também a sequência de chaveamento dos tiristores e a forma da tensão retificada de saída.

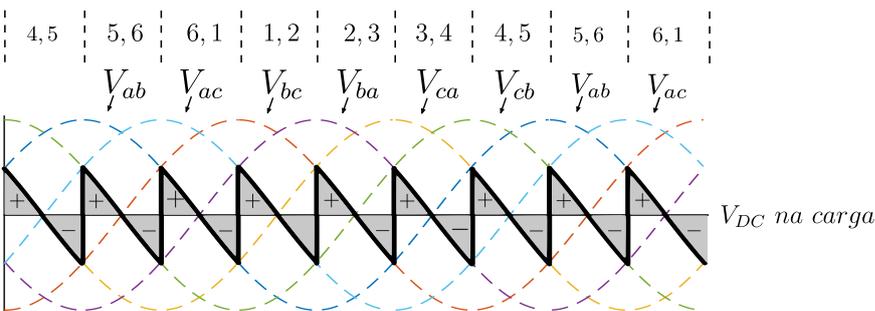
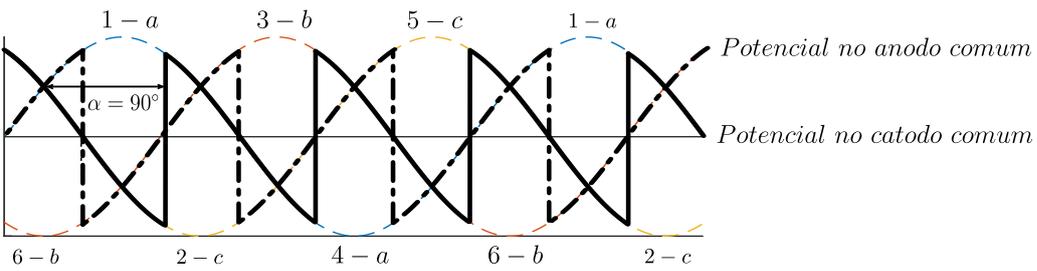
Pode-se concluir que a ponte retificadora de seis pulsos funciona a partir da condução de diferentes pares de tiristores a cada  $60^\circ$ , isto é, 6-1, 1-2, 2-3, 3-4, 4-5, 5-6, sendo que cada tiristor conduz durante  $120^\circ$ . Ademais, a tensão vista na carga acompanha a tensão de linha resultante da diferença das tensões dos tiristores que estão conduzindo corrente naquele momento, a saber,  $V_{ab}, V_{ac}, V_{bc}, V_{ba}, V_{ca}, V_{cb}$ .



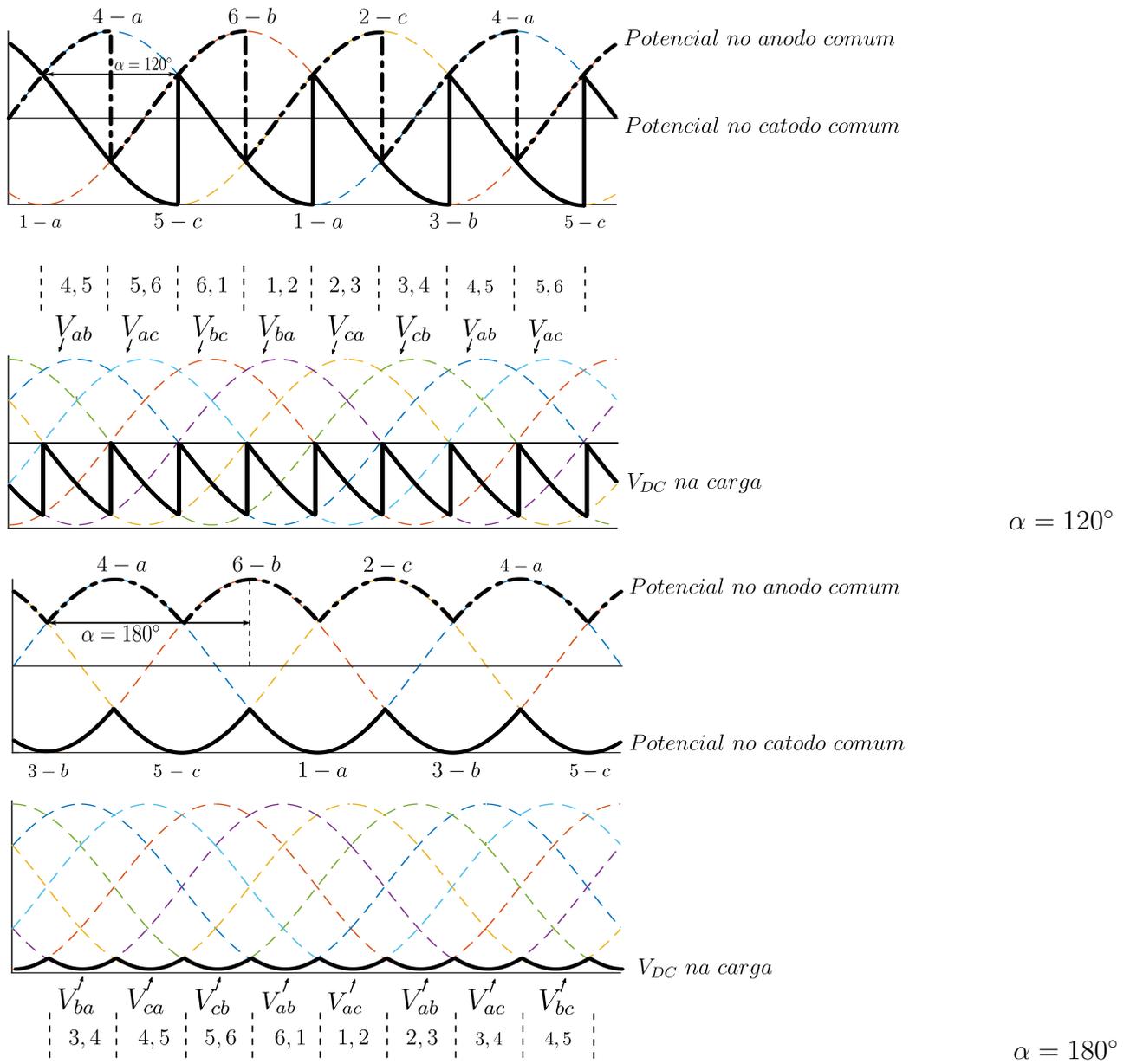
$\alpha = 0^\circ$



$\alpha = 30^\circ$



$\alpha = 90^\circ$



**Figura 2.3.** Formas de onda de tensão para uma ponte de seis pulsos, considerando os ângulos de disparo  $\alpha = 0^\circ$ ,  $\alpha = 30^\circ$ ,  $\alpha = 90^\circ$ ,  $\alpha = 120^\circ$  e  $\alpha = 180^\circ$ .

Nota-se, ainda da Figura 2.3, não só que a tensão de saída da ponte contém ondulações ou *ripples*, mas também que, para um ciclo da tensão de fase da fonte, existem seis pulsos dessa ondulação. O valor médio dessa tensão retificada na condição sem carga é dado pela integração da tensão de saída  $V_0(t) = \sqrt{3}V_m \cos(\omega t)$ , sendo  $V_m$  a amplitude da tensão de fase:

$$\begin{aligned}
 V_{DC,NC} &= \frac{1}{\frac{\pi}{3}} \int_{-\frac{\pi}{6}}^{+\frac{\pi}{6}} \sqrt{3}V_m \cos(\omega t) d(\omega t) \\
 &= \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m.
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

Admita agora a presença de um ângulo de disparo  $\alpha$  não nulo. A função deste ângulo é atrasar o instante de disparo de cada tiristor a partir de um valor pré-definido, realizando o chamado processo de comutação controlada.

A Figura 2.3 mostra o impacto da comutação controlada para diversos valores de  $\alpha$ . À medida que o ângulo de disparo é aumentado, a área abaixo da curva de tensão de saída da ponte diminui, de modo que sua tensão média também diminui. Nota-se que a tensão CC média é máxima quando  $\alpha = 0^\circ$  e decresce até atingir valor médio nulo em  $\alpha = 90^\circ$ . Aumentando ainda mais o ângulo de disparo, a tensão torna-se negativa até atingir valor médio mínimo, em  $\alpha = 180^\circ$ .

Este comportamento pode ser melhor observado calculando o valor médio de  $V_0(t)$  para ângulo de disparo não nulo:

$$\begin{aligned} V_{DC,C} &= \frac{1}{\frac{\pi}{3}} \int_{-\frac{\pi}{6}+\alpha}^{+\frac{\pi}{6}+\alpha} \sqrt{3}V_m \cos(\omega t) d(\omega t) \\ &= \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m \cos(\alpha). \end{aligned} \quad (2.2)$$

Conforme a equação (2.2) acima sinaliza, os valores médios de tensão na saída da ponte dependem do cosseno do ângulo de disparo, evidenciando a relação supracitada.

### 2.1.1.2 Operação em Modo Inversor

Para ângulos de disparo  $\alpha > 90^\circ$ , torna-se necessário conectar uma fonte CC com polaridade invertida no lugar da carga para que a operação da ponte retificadora de seis pulsos possa ser sustentada. Essa fonte irá provocar uma condução de corrente na direção oposta à força eletromotriz induzida no transformador conectado à ponte (KAMAKSHIAH; KAMARAJU, 2011). Nesta situação, a potência está sendo suprida do sistema CC para o sistema CA, ou seja, a ponte está operando como um inversor.

Neste modo, os tiristores 1, 3 e 5 irão conduzir quando as tensões presentes em seus catodos forem as mais negativas, ao passo que os tiristores 4, 6 e 2 irão conduzir quando as tensões em seus anodos forem as mais positivas com respeito aos outros tiristores do mesmo grupo. As formas de onda envolvidas no processo de comutação para os ângulos de disparo  $\alpha = 90^\circ$ ,

$\alpha = 120^\circ$  e  $\alpha = 180^\circ$  estão ilustradas na Figura 2.3.

### 2.1.1.3 Ângulo de Sobreposição e Ângulo de Extinção

Na operação ideal, descrita ao longo das subseções anteriores, assume-se que a comutação dos tiristores é um evento instantâneo, não havendo sobreposições nas conduções das válvulas. Em sistemas reais, no entanto, ainda que a reatância do sistema CA fosse desprezível, deve-se considerar a influência da reatância de dispersão dos transformadores conectados às pontes retificadoras.

Durante a comutação de um tiristor, certa quantidade de energia é armazenada e posteriormente transferida por essas reatâncias, fazendo com que uma tensão, denominada tensão de comutação, apareça em períodos em que não há comutação de tiristores. Em consequência disso, dois tiristores do mesmo grupo (1-3-5 ou 4-6-2) passam a conduzir corrente simultaneamente e, assim, cria-se um cenário de condução através de três tiristores (5-6-1, 6-1-2, 1-2-3, 2-3-4, 4-5-6) durante a comutação dos pares de tiristores (6-1, 1-2, 2-3, 3-4, 4-5, 5-6). Por esse motivo, uma nova variável  $\mu$ , denominada ângulo de sobreposição, entra em cena na análise do funcionamento das pontes retificadoras de seis pulsos.

A presença dessa reatância de comutação também faz com que seja necessário considerar algum ângulo de extinção,  $\gamma > \gamma_0$ <sup>1</sup>, que dê margem suficiente para que o tiristor conduzindo devido à tensão de comutação retorne à sua condição de bloqueio. Esta restrição impossibilita que, na prática, o processo de inversão total ( $\alpha = 180^\circ$ ) seja atingido, fazendo com que haja, portanto, um limite superior para o ângulo de disparo,  $\alpha = \pi - (\mu + \gamma_0)$  para garantir operação em modo inversor sem falha de comutação. Tipicamente, o valor de  $\gamma_0$  que garante boa operação está entre 15 e 20° (KAMAKSHIAH; KAMARAJU, 2011).

---

<sup>1</sup>Através da relação  $\alpha = \pi - (\mu + \gamma_0)$ , é possível chegar formulação de  $\gamma_0$ :

$$\gamma_0 = \pi - \alpha - \mu \quad (2.3)$$

### 2.1.2 Ponte Retificadora de Doze Pulsos

Na seção anterior, apresentou-se o funcionamento detalhado de uma ponte retificadora de seis pulsos. Este componente é o ponto central do entendimento para a transmissão em HVDC, uma vez que ele é responsável por fazer as conversões CA/CC, e vice-versa, apenas alterando o modo de operação de retificador para inversor, respectivamente.

Esta topologia, no entanto, apresenta alguns inconvenientes. O primeiro e mais grave a ser citado é a geração de componentes harmônicas de ordem  $6K \pm 1$  no lado CA e de ordem  $6K$  no lado CC, sendo K um número inteiro, cuja presença cria a necessidade de utilização de mais filtros. O segundo problema é a ondulação presente no sinal de saída de corrente contínua. Na topologia de seis pulsos, as ondulações ficam espaçadas  $60^\circ$  (RASHID, 2001; HART, 2011).

Buscando mitigar esses problemas, uma nova topologia foi desenvolvida: a ponte retificadora de doze pulsos. Essa configuração possui duas pontes retificadoras de seis pulsos ligadas em série, em que uma das pontes está conectada a um transformador conversor trifásico ligado em  $Y : Y$ , ao passo que a outra está conectada a um transformador ligado em  $Y : \Delta$ .

O uso dos transformadores em  $Y : Y$  e  $Y : \Delta$  cria tensões de mesma magnitude e defasadas de  $30^\circ$  na saída das pontes de seis pulsos. As pontes, por sua vez, encontram-se conectadas em série, de modo que a tensão média vista na carga será dada pela soma simples das tensões médias de saída das pontes (HART, 2011):

$$\begin{aligned}
 V_{DC,doze} &= V_Y + V_\Delta \\
 &= \frac{3\sqrt{3}}{\pi}V_m + \frac{3\sqrt{3}}{\pi}V_m \\
 &= 2 \frac{3\sqrt{3}}{\pi}V_m
 \end{aligned} \tag{2.4}$$

A relação supracitada é ilustrada na Figura 2.4. Percebe-se que a ondulação no sinal de saída em CC reduz de  $60^\circ$  para  $30^\circ$ , dados os 12 pulsos da onda de saída.

No que diz respeito à questão harmônica, pode-se mostrar que as componentes de ordem 5, 7, 17, 19, ou em geral quando a ordem é diferente de  $12K \pm 1$ , produzidas pelas duas pontes se cancelam (KAMAKSHIAH; KAMARAJU, 2011). Dessa forma, a componente harmônica de menor ordem presente no lado CA passa a ser a de ordem 11.

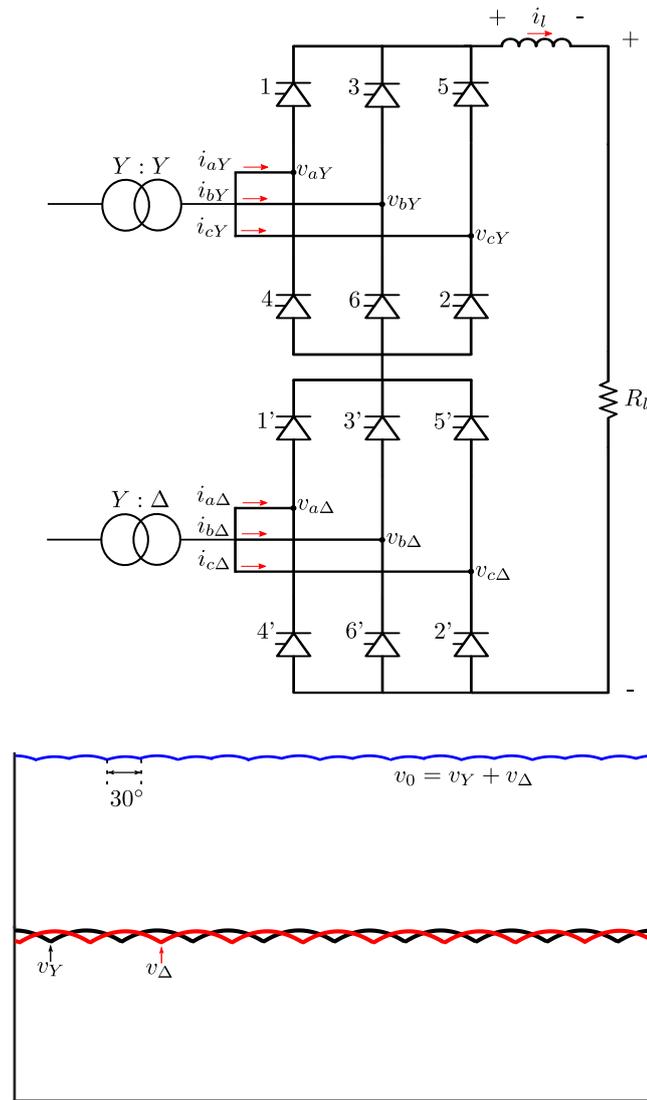


Figura 2.4. Ponte retificadora de doze pulsos e perfil de tensão de saída na carga  $R_l$ .

## 2.2 TRANSFORMADORES CONVERSORES

Aos transformadores de sistemas HVDC, os quais se encontram localizados no lado CA dos conversores, dá-se o nome de transformadores conversores, sendo suas incumbências as de ajustar a tensão CA da rede a uma tensão adequada para os conversores e de prover isolamento galvânica entre os dois sistemas (RAMOS *et al.*, 2015).

Estes equipamentos diferem em seu projeto quando comparados àqueles usados em sistemas CA principalmente porque deve-se levar em consideração, além de tensões CA, tensões CC sobrepostas com inversão de polaridade. Isso se traduz na necessidade de um sistema de isolamento que seja capaz de suportar estresses CA e CC de tensão combinados.

Além disso, deve-se ter em conta que a quantidade de harmônicos presentes em trans-

formadores conversores é bem superior que em transformadores CA convencionais, causando perdas adicionais por conta da formação de pontos quentes locais em seus enrolamentos (KAMAKSHIAH; KAMARAJU, 2011).

## 2.3 FILTROS CA E CC

Deseja-se que a energia elétrica entregue aos centros de consumo, seja ela transmitida em CA ou CC, tenha magnitude constante e não apresente desvio da forma de onda ideal, sendo esse desvio expresso em termos de componentes harmônicas.

São três as principais fontes de harmônicos em sistemas HVDC: os transformadores, a geração CA e os conversores. Dentre esses, o chaveamento repetitivo e em elevada velocidade dos tiristores presentes nos conversores deve ser destacado visto que opera tanto como fonte de harmônicos de corrente no lado CA quanto como fonte de harmônicos de tensão no lado CC.

Como visto anteriormente, a configuração do conversor determina o número de pulsos, isto é, a frequência das ondulações na forma de onda de saída comparada com a frequência fundamental da rede. Existe uma relação entre a ordem dos harmônicos característicos e o número de pulsos da configuração do conversor. Mais especificamente, um conversor com um número de pulsos  $p$  gera harmônicos de ordem  $Kp \pm 1$  no lado CA e de ordem  $Kp$  no lado CC, sendo  $K$  um número inteiro (KIM *et al.*, 2009). Assim, para um conversor de 12 pulsos, são gerados harmônicos de ordens 11, 13, 23, 25 e assim por diante no lado CA, enquanto no lado CC tem-se as ordens 12 e 24, por exemplo, sendo que as magnitudes diminuem à medida que a ordem aumenta.

Embora seja possível reduzir o conteúdo harmônico que afeta a rede CA com o aumento do número de pulsos, esse método demanda o uso de transformadores mais caros (KAMAKSHIAH; KAMARAJU, 2011). De um ponto de vista econômico, portanto, torna-se mais viável a alternativa do uso de filtros CA, os quais, além de limitar a distorção por harmônicos a um nível aceitável, também cumprem o papel de injetar potência reativa para compensar parte da que é absorvida pelos conversores (KIM *et al.*, 2009). Os filtros CC, por sua vez, são projetados com o único intuito de eliminar harmônicos de tensão no lado CC, não havendo necessidade de fornecer reativos.

## 2.4 REATORES DE ALISAMENTO

Outra parte essencial da transmissão em HVDC é o reator de alisamento. Usualmente, este equipamento é conectado em série com linha/cabo de transmissão CC ou, no caso da configuração *back-to-back*, colocado no circuito intermediário. Podem-se listar as seguintes finalidades (KIM *et al.*, 2009):

- Atenuar as ondulações na corrente CC;
- Reduzir os harmônicos no lado CC em conjunto com os filtros CC;
- Limitar a taxa de elevação da corrente quando da ocorrência de falhas no lado CC, posto que, quanto menor for mantida a corrente, maiores as chances de sucesso da próxima comutação.

## 2.5 CONEXÕES EM SISTEMAS HVDC

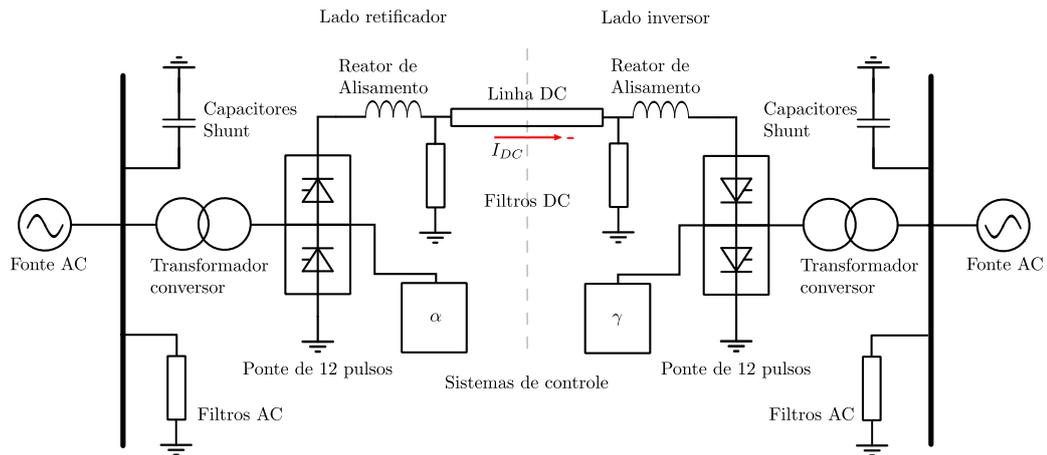
Nesta seção, apresentam-se os três tipos de conexão de sistemas HVDC: monopolar, bipolar e homopolar.

### 2.5.1 Conexão Monopolar

O elo monopolar presente na Figura 2.5 consiste em apenas um condutor, cuja tensão de operação pode ser positiva ou negativa, que liga os terminais retificador e inversor. Geralmente, acoplam-se eletrodos ao anodo e ao catodo comuns do conversor, os quais em seguida são conectados ao solo, fazendo o caminho de retorno da corrente a própria terra (RAMOS *et al.*, 2015). Contudo, pode ser preferível utilizar outros meios como retorno, como o mar no caso de instalações submarinas ou um retorno metálico se porventura o solo apresentar uma resistência muito elevada (KIM *et al.*, 2009).

### 2.5.2 Conexão Bipolar

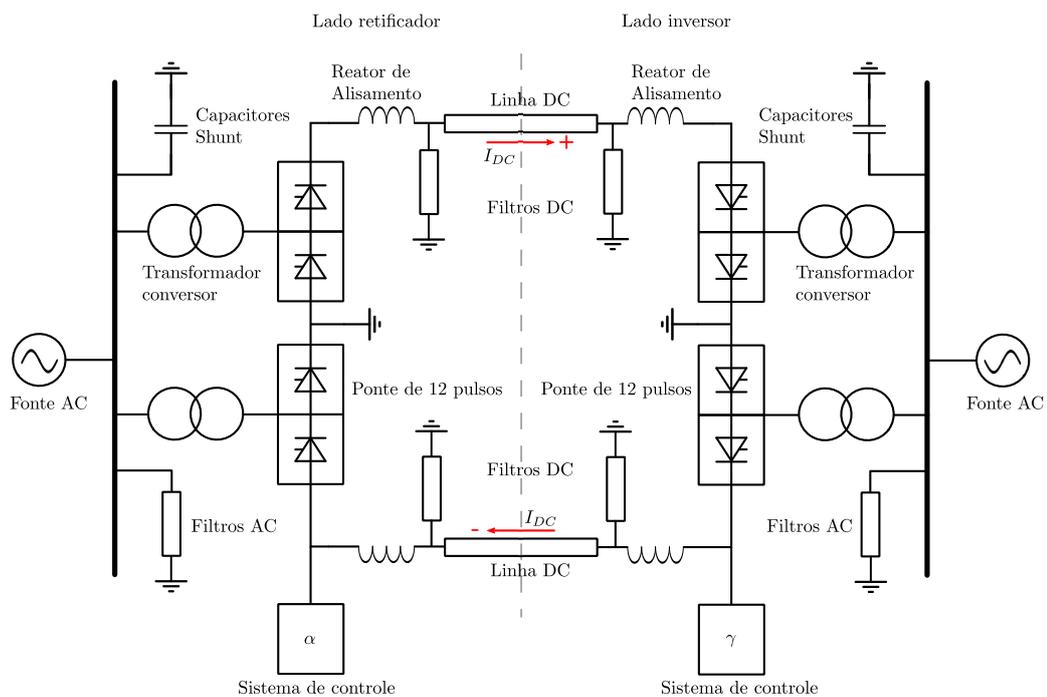
Um sistema bipolar, apresentado novamente na Figura 2.6 para conveniência do leitor, por sua vez, contém dois condutores, um de polaridade positiva e outro de polaridade negativa,



**Figura 2.5.** Elo HVDC em conexão monopolar.

cada um conectado a duas estações conversoras. Em cada terminal do sistema, os dois conversores estarão em série e ligados por um ponto em comum, o qual é mantido a um potencial intermediário. Em condição de regime permanente, e estando os pontos comuns de ambos os terminais conectados à terra por eletrodos, tem-se que as correntes nos dois polos terão a mesma magnitude e, portanto, não haverá corrente fluindo pela terra (KIM *et al.*, 2009).

Vale destacar que os polos podem operar separadamente de modo que, dada a indisponibilidade de um dos polos por qualquer motivo que seja, o outro polo pode transmitir parte da carga nominal usando o retorno pela terra, a depender das especificações de projeto.

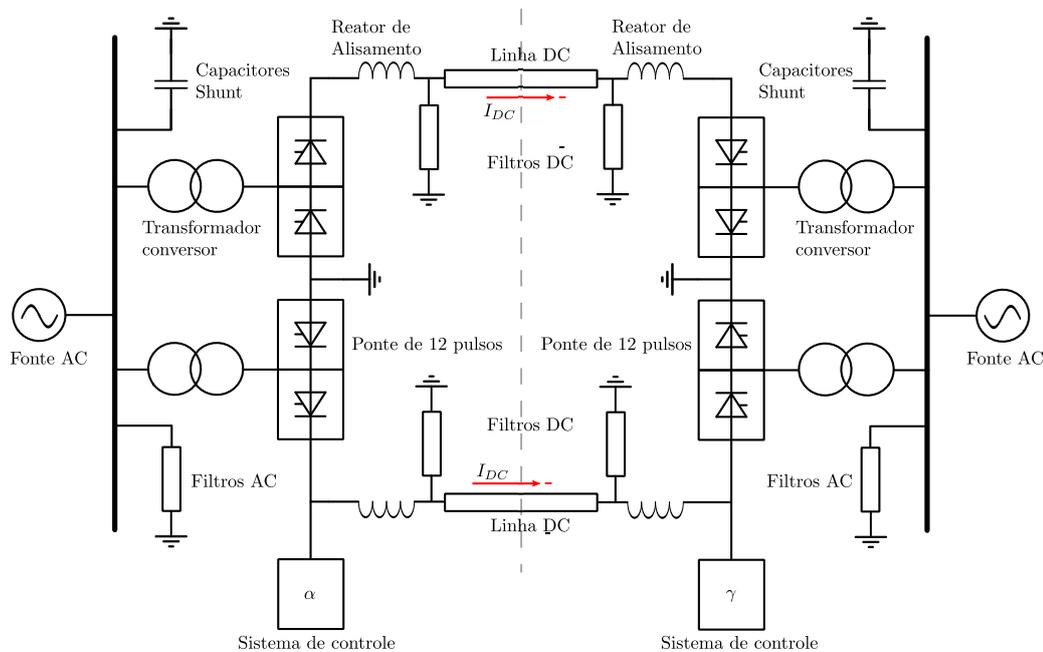


**Figura 2.6.** Elo HVDC em conexão bipolar.

### 2.5.3 Conexão Homopolar

Por fim, tem-se, na Figura 2.7, o sistema homopolar que compreende dois ou mais condutores, todos com a mesma polaridade, e sempre opera com retorno pela terra. Comumente opta-se por uma polaridade negativa para as linhas visto que essa alternativa oferece uma redução na interferência de rádio e nas perdas por efeito corona (KAMAKSHIAH; KAMARAJU, 2011).

Outro ponto positivo deste tipo de elo é que, dada a ocorrência de uma falta em um dos condutores, os conversores associados a ele podem ser conectados ao(s) condutor(es) remanescente(s). Havendo capacidade de sobrecarga, esse(s) condutor(es) pode(m) transmitir uma quantidade de energia superior à metade ou até mesmo igual à totalidade da carga nominal, às custas de maiores perdas nas linhas (KIMBARK, 1971).

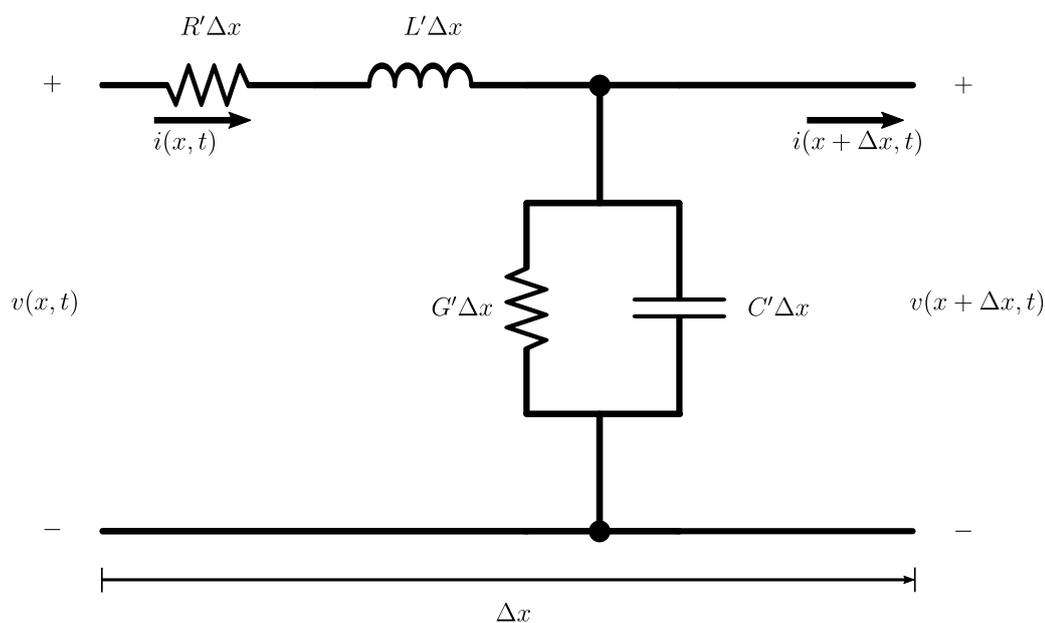


**Figura 2.7.** Elo HVDC em conexão homopolar.

## FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DE OVS

### 3.1 PROPAGAÇÃO DE ONDAS VIAJANTES EM LINHAS MONOFÁSICAS

Para obter o equacionamento que descreve a propagação das OV's em uma linha, considere o circuito equivalente da Figura 3.1, no qual está representado um elemento incremental de comprimento  $\Delta x$  de uma linha monofásica com dois condutores. Esse arranjo contempla a resistência série  $R'$ , a indutância série  $L'$ , a capacitância em derivação  $C'$  e a condutância em derivação  $G'$ , todas por unidade de comprimento da linha. É importante salientar que, por estar considerando a influência do comprimento dos condutores, o circuito avaliado está de acordo com o modelo a parâmetros distribuídos (NAIDU, 1983). Isso significa que variações nas formas de ondas em um terminal da LT não são percebidas instantaneamente no outro terminal, mas sim um determinado tempo depois.



**Figura 3.1.** Modelo de linha monofásica com dois condutores a parâmetros distribuídos.

Empregando as leis de Kirchhoff de tensão e corrente no circuito, tem-se:

$$v(x, t) - v(x + \Delta x, t) = R' \cdot \Delta x \cdot i(x, t) + L' \cdot \Delta x \cdot \frac{\partial i(x, t)}{\partial t}, \quad (3.1)$$

$$i(x, t) - i(x + \Delta x, t) = G' \cdot \Delta x \cdot v(x + \Delta x, t) + C' \cdot \Delta x \cdot \frac{\partial v(x + \Delta x, t)}{\partial t}. \quad (3.2)$$

Supondo distribuições iniciais de corrente e tensão nulas, convertem-se essas equações do domínio do tempo para o domínio de Laplace:

$$V(x, s) - V(x + \Delta x, s) = R' \cdot \Delta x \cdot I(x, s) + sL' \cdot \Delta x \cdot I(x, s), \quad (3.3)$$

$$I(x, s) - I(x + \Delta x, s) = G' \cdot \Delta x \cdot V(x + \Delta x, s) + sC' \cdot \Delta x \cdot V(x + \Delta x, s). \quad (3.4)$$

Assumindo que o comprimento incremental da linha  $\Delta x$  é próximo de zero, pode-se dividir (3.3) e (3.4) por  $\Delta x$  e tomar o limite para  $\Delta x$  tendendo a zero a fim de obter (3.5) e (3.6). Os sinais negativos indicam que as amplitudes das OV's diminuem à medida que  $x$  aumenta (SCHWEITZER *et al.*, 2014a).

$$\frac{\partial V(x, s)}{\partial x} = -(R' + sL') \cdot I(x, s), \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial I(x, s)}{\partial x} = -(G' + sC') \cdot V(x, s). \quad (3.6)$$

Adicionalmente, introduzem-se  $Z' = R' + sL'$  e  $Y' = G' + sC'$  para obter as equações (3.7) e (3.8).

$$\frac{\partial V(x, s)}{\partial x} = -Z' \cdot I(x, s), \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial I(x, s)}{\partial x} = -Y' \cdot V(x, s). \quad (3.8)$$

Nota-se que em (3.7) e (3.8) tensão e corrente estão acopladas. Com o intuito de chegar em expressões que contemplem, cada uma, uma dessas grandezas apenas, toma-se uma segunda derivada com relação a  $x$ , resultando em:

$$\frac{\partial^2 V(x, s)}{\partial x^2} = -Z' \cdot \frac{\partial I(x, s)}{\partial x}, \quad (3.9)$$

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

Em seguida, substituindo (3.7) e (3.8) em (3.9) e (3.10), tem-se:

$$\frac{\partial^2 V(x, s)}{\partial x^2} = Z' \cdot Y' \cdot V(x, s), \quad (3.11)$$

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

ou

$$\frac{\partial^2 V(x, s)}{\partial x^2} - \gamma_{ov}^2 \cdot V(x, s) = 0 , \quad (3.13)$$

$$\frac{\partial^2 I(x, s)}{\partial x^2} - \gamma_{ov}^2 \cdot I(x, s) = 0 , \quad (3.14)$$

onde  $\gamma_{ov} = \sqrt{Z' \cdot Y'} = \alpha_{ov} + j \cdot \beta_{ov}$  é chamada de constante de propagação da LT, enquanto  $\alpha_{ov}$  e  $\beta_{ov}$  são as constantes de atenuação e de fase, respectivamente (SADIKU, 2014).

A solução geral das equações diferenciais de segunda ordem homogêneas (3.13) e (3.14) pode ser obtida por inspeção (GLOVER *et al.*, 2012):

$$V(x, s) = V^+ \cdot e^{-\gamma_{ov} \cdot x} + V^- \cdot e^{\gamma_{ov} \cdot x} , \quad (3.15)$$

$$I(x, s) = I^+ \cdot e^{-\gamma_{ov} \cdot x} + I^- \cdot e^{\gamma_{ov} \cdot x} . \quad (3.16)$$

Analisando a expressão (3.15), tem-se que a tensão total em um determinado ponto da linha é dada pela superposição de duas componentes:  $V^+ \cdot e^{-\gamma_{ov} \cdot x}$  é uma onda que se propaga no sentido positivo de  $x$  (onda progressiva), ao passo que  $V^- \cdot e^{\gamma_{ov} \cdot x}$  se propaga no sentido negativo de  $x$  (onda regressiva). O mesmo raciocínio aplica-se às OV's de corrente.

### 3.2 IMPEDÂNCIA CARATERÍSTICA E VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO

Ao efetuar a razão, em qualquer ponto da linha, entre as ondas de tensão e corrente incidentes ou refletidas, chega-se à definição de impedância característica de uma linha:

$$Z_c = \frac{V^+}{I^+} = -\frac{V^-}{I^-} = \sqrt{\frac{Z'}{Y'}} = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}} . \quad (3.17)$$

Vale notar que, assim como a constante de propagação  $\gamma_{ov}$ , a impedância característica  $Z_c$  é uma propriedade da linha, posto que ela depende dos parâmetros da linha  $R'$ ,  $L'$ ,  $G'$  e  $C'$ , além da frequência de operação. Adicionalmente, a menos do caso em que as ondas de corrente e tensão estejam em fase, a impedância característica é uma grandeza complexa, portanto possui partes real e imaginária.

Até aqui, o entendimento foi construído para caso mais geral de uma linha com perdas. Considerando agora uma linha sem perdas, isto é, uma linha em que os condutores são perfeitos e

em que não há perdas no meio dielétrico que os separa (SADIKU, 2014), tem-se que  $R' = 0 = G'$ . Essa condição faz com que (3.17) se torne:

$$Z_c = \sqrt{\frac{L'}{C'}} = Z_s . \quad (3.18)$$

A impedância característica para uma linha sem perdas é, portanto, uma grandeza puramente resistiva, e passa a ser chamada impedância de surto  $Z_s$ . Uma vez que linhas de transmissão e distribuição em geral são projetadas para ter perdas baixas, pode-se usar a concepção da impedância de surto para análises e projetos iniciais com razoável precisão.

É pertinente observar que, fazendo  $\lim_{\omega \rightarrow \infty} Z_c$ , chega-se à mesma formulação de  $Z_s$  exposta em (3.18). Com isso, pode-se concluir que para um estudo de transitórios de alta frequência, como é o caso de propagação de OV's, é plausível aproximar a impedância característica da linha pela impedância de surto correspondente.

Ainda considerando que as perdas do sistema são desprezíveis quando comparadas ao efeito capacitivo e indutivo da LT, é possível definir a velocidade de propagação das OV's a partir dos parâmetros da linha. Primeiramente, sabe-se que  $v_p = f \cdot \lambda$  (GLOVER *et al.*, 2012), em que  $f$  é a frequência e  $\lambda$  é o comprimento de onda do sinal avaliado. Além disso, é dado que o comprimento de onda pode ser calculado por  $\lambda = \frac{2 \cdot \pi}{\beta_{ov}}$  (SADIKU, 2014), onde  $\beta_{ov}$  é a constante de fase do sinal. Em particular,  $\beta_{ov} = \omega \sqrt{L'C'}$  para linhas sem perdas, de modo que:

$$v_p = f \cdot \frac{2 \cdot \pi}{\beta_{ov}} = f \cdot \frac{2 \cdot \pi}{\omega \sqrt{L'C'}} = f \cdot \frac{2 \cdot \pi}{2 \cdot \pi \cdot f \sqrt{L'C'}} = \frac{1}{\sqrt{L'C'}} . \quad (3.19)$$

Sabe-se também que as indutâncias e capacitâncias distribuídas da LT, dadas por unidade de comprimento da linha e admitindo-se um condutor uniforme e sem perdas, podem ser determinadas pelas fórmulas (ZANETTA, 2003):

$$L' = \frac{\mu_0}{\pi} \ln \frac{2h}{r} \quad (3.20)$$

e

$$C' = \frac{\pi \epsilon_0}{\ln \frac{2h}{r}} , \quad (3.21)$$

onde  $r$  é o raio e  $h$  a altura ao solo do condutor e  $\mu_0$  e  $\epsilon_0$  são a permeabilidade magnética e a permissividade avaliadas no vácuo, respectivamente.

Substituindo (3.20) e (3.21) em (3.19), tem-se:

$$v_p = \frac{1}{\sqrt{\frac{\mu_0}{\pi} \ln \frac{2h}{r} \cdot \frac{\pi \epsilon_0}{\ln \frac{2h}{r}}}} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = c = 3 \times 10^8 \text{ m/s} . \quad (3.22)$$

Deste modo, mostra-se que OV's de corrente e tensão se propagariam a uma velocidade igual à da luz no vácuo, considerando o caso ideal de uma linha sem perdas. Na prática, as ondas se propagam ao longo de LT's aéreas reais com velocidade aproximadamente igual à da velocidade da luz (GLOVER *et al.*, 2012).

Observando a relação existente entre tensão e corrente em (3.17) e admitindo-se a constante de propagação  $\gamma_{ov}$  para o caso sem perdas, pode-se reescrever (3.15) e (3.16) como:

$$V(x, s) = V^+ \cdot e^{-\frac{sx}{v_p}} + V^- \cdot e^{\frac{sx}{v_p}} , \quad (3.23)$$

$$I(x, s) = \frac{1}{Z_c} [V^+ \cdot e^{-\frac{sx}{v_p}} + V^- \cdot e^{\frac{sx}{v_p}}] . \quad (3.24)$$

Por fim, faz-se a transformada inversa de Laplace de (3.23) e (3.24) para retorno ao domínio do tempo, resultando em (GLOVER *et al.*, 2012):

$$v(x, t) = v^+(t - \frac{x}{v_p}) + v^-(t + \frac{x}{v_p}) , \quad (3.25)$$

$$i(x, t) = \frac{1}{Z_c} [v^+(t - \frac{x}{v_p}) + v^-(t + \frac{x}{v_p})] , \quad (3.26)$$

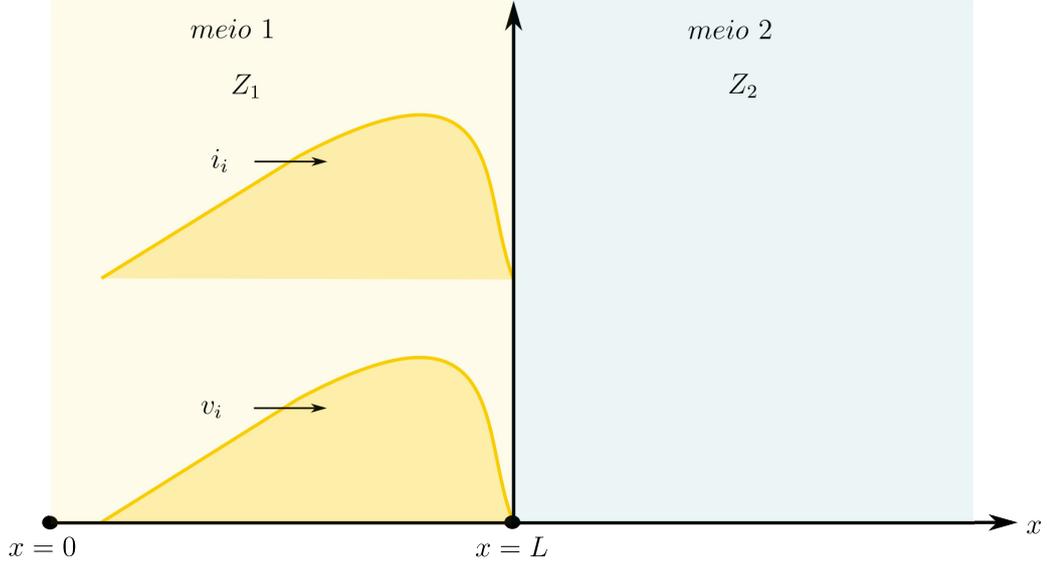
onde que as funções  $v^+(x, t)$  e  $v^-(x, t)$  podem ser determinadas pelas condições de contorno do sistema avaliado.

### 3.3 COMPORTAMENTO DE ONDAS VIAJANTES EM UM PONTO DE DESCONTINUIDADE

Define-se um ponto de descontinuidade como todo e qualquer ponto em que há alteração repentina dos parâmetros do circuito, como por exemplo as conexões entre uma linha e uma dada carga ou as conexões entre linhas de transmissão (NAIDU, 1983).

Quando uma OV passa por um ponto de descontinuidade, parte dela é refletida para o mesmo meio, enquanto a outra parte é transmitida para um novo meio. Assim, convencionou-se a onda indo em direção a uma descontinuidade como incidente e as duas ondas resultantes da transição de meios como ondas refletida e transmitida.

Tendo os conceitos supracitados em mente, considere uma OV incidente partindo de um meio 1 com impedância característica  $Z_1$ , tensão  $v_i$  e corrente  $i_i$ , em direção a um meio 2 com impedância característica  $Z_2$ . A junção desses meios é dada um ponto de descontinuidade localizado em  $x = L$ , conforme mostra a Figura 3.2.



**Figura 3.2.** Ondas viajantes incidentes de tensão e corrente antes de atingir o ponto de descontinuidade em  $x = L$  entre os meios 1 e 2.

Ao encontrar o ponto de descontinuidade, a OV incidente  $v_i$  divide-se em OVs refletida  $v_r$  e transmitida  $v_t$ , conforme a Figura 3.3 ilustra. Para o ponto de descontinuidade em  $x = L$ , e evidenciando que a reflexão é feita no sentido negativo de  $x$ , as ondas de tensão e corrente podem ser reescritas apenas como suas representações progressivas e regressivas (ZANETTA, 2003):

$$v_i = v_1^+, \quad (3.27)$$

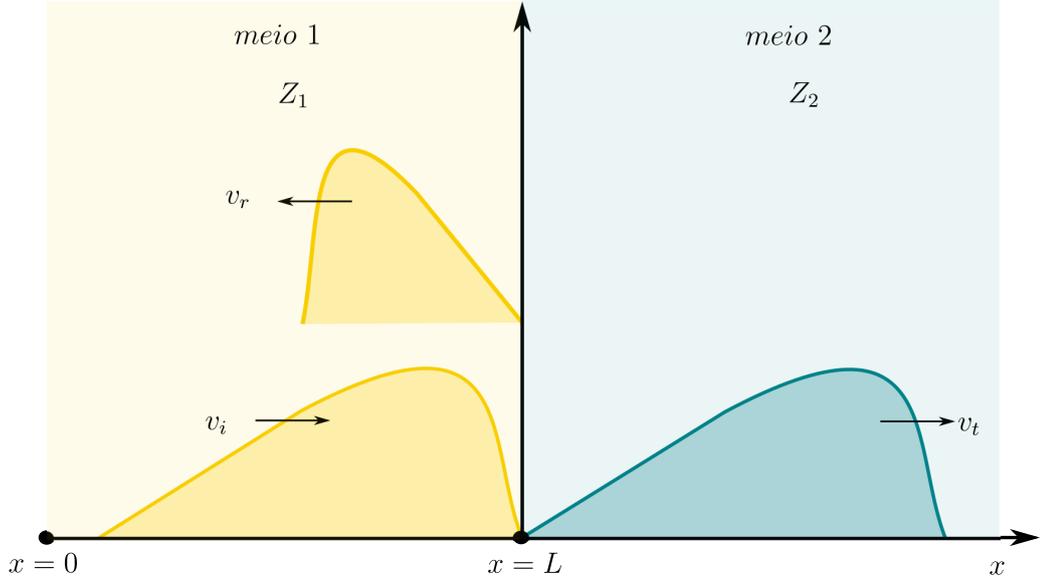
$$v_r = v_1^-, \quad (3.28)$$

$$v_t = v_2^+, \quad (3.29)$$

$$i_i = i_1^+ = \frac{v_1^+}{Z_1}, \quad (3.30)$$

$$i_r = i_1^- = \frac{-v_1^-}{Z_1}, \quad (3.31)$$

$$i_t = i_2^- = \frac{v_2^+}{Z_2}. \quad (3.32)$$



**Figura 3.3.** Ondas viajantes incidente, refletida e transmitida de tensão geradas pelo ponto de descontinuidade em  $x = L$  entre os meios 1 e 2.

Pelo princípio de superposição de ondas, em um ponto de encontro de uma ou mais ondas, a onda resultante neste ponto é dada pela soma de todas as ondas passando no mesmo instante de encontro. Sabendo disso, é possível descrever as ondas de tensão e corrente  $v_d$  e  $i_d$  no ponto de descontinuidade como a soma das ondas refletida e incidente (NAIDU, 1983):

$$v_d = v_i + v_r , \quad (3.33)$$

$$i_d = i_i + i_r . \quad (3.34)$$

No entanto, pelas leis de Kirchoff, no ponto de descontinuidade, as ondas de tensão e corrente nos meios 1 e 2 são idênticas. Portanto, as equações descritas acima podem ser reescritas, sem perda de generalidade, como (ZANETTA, 2003):

$$v_t = v_i + v_r , \quad (3.35)$$

$$i_t = i_i + i_r . \quad (3.36)$$

Lembrando que as Equações (3.35) e (3.36) podem ser reescritas a partir das definições de ondas incidente, refletida e transmitida presentes em (3.27) a (3.32), tem-se que:

$$v_2^+ = v_1^+ + v_1^- , \quad (3.37)$$

$$i_2^+ = i_1^+ + i_1^- . \quad (3.38)$$

Substituindo (3.30) a (3.32) em (3.38), pode-se obter:

$$\frac{v_1^+ + v_1^-}{Z_2} = \frac{v_1^+}{Z_1} - \frac{v_1^-}{Z_1}, \quad (3.39)$$

$$v_1^+ \left( \frac{1}{Z_2} - \frac{1}{Z_1} \right) = v_1^- \left( \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_1} \right), \quad (3.40)$$

$$\Gamma_{r,v} = \frac{v_1^-}{v_1^+} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}. \quad (3.41)$$

Por fim, substituindo (3.41) em (3.37), conclui-se que:

$$v_2^+ = v_1^+ + v_1^+ \Gamma_{r,v}, \quad (3.42)$$

$$v_2^+ = v_1^+ \left( 1 + \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right), \quad (3.43)$$

$$\Gamma_{t,v} = \frac{v_2^+}{v_1^+} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1}. \quad (3.44)$$

As Equações (3.41) e (3.44) mostram que é possível definir relações entre OV's de tensão incidente e refletida e entre OV's de tensão incidente e transmitida baseadas apenas nas impedâncias características dos meios. A estas relações dão-se os nomes de coeficientes de reflexão  $\Gamma_{r,v}$  e transmissão  $\Gamma_{t,v}$ , respectivamente, para ondas de tensão.

Com base nos coeficientes de reflexão e transmissão para ondas de tensão, é possível formular os coeficientes para ondas de corrente de forma análoga:

$$\Gamma_{r,i} = \frac{i_1^-}{i_1^+} \quad (3.45)$$

$$\Gamma_{r,i} = -\frac{v_1^-}{v_1^+} \quad (3.46)$$

$$\Gamma_{r,i} = -\Gamma_{r,v} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (3.47)$$

e

$$i_2^+ = i_1^+ - i_1^+ \Gamma_{r,v} \quad (3.48)$$

$$i_2^+ = i_1^+ \left( 1 - \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right) \quad (3.49)$$

$$\Gamma_{t,i} = \frac{i_2^+}{i_1^+} = \frac{2Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (3.50)$$

Tendo os coeficientes de transmissão e de reflexão bem definidos, é possível elaborar os chamados diagramas de reflexões sucessivas para ondas de tensão e corrente em linhas de transmissão.

### 3.4 PROPAGAÇÃO DE OVS EM LINHAS COM RAMIFICAÇÕES

Conforme visto anteriormente, uma OV que chega a um ponto de descontinuidade é refletida e transmitida em proporções que dependem das impedâncias características dos meios envolvidos. Considere que uma OV de corrente  $i_{i,1}$ , a qual se propaga em um meio de impedância característica  $Z_1$ , incide em uma junção que se ramifica em meios cujas impedâncias são  $Z_2$  e  $Z_3$ . Neste cenário, que encontra-se ilustrado na Figura 3.4, os coeficientes de reflexão e transmissão,  $\Gamma_{r,i}$  e  $\Gamma_{t,i}$ , respectivamente, podem ser calculados por:

$$\Gamma_{r,i} = \frac{Z_1 - Z_p}{Z_1 + Z_p}, \quad (3.51)$$

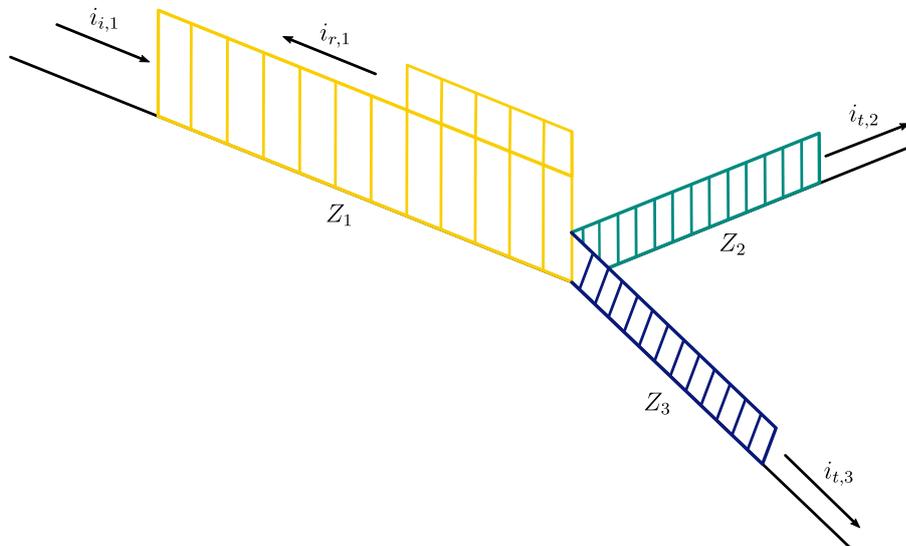
$$\Gamma_{t,i} = \frac{2 \cdot Z_1}{Z_1 + Z_p}, \quad (3.52)$$

onde  $Z_p$  é a impedância característica equivalente do paralelo de  $Z_2$  e  $Z_3$ , dado por  $Z_p = \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3}$ . A partir dessas equações, pode-se chegar nas expressões da corrente refletida,  $i_{r,1}$ , e das correntes transmitidas,  $i_{t,2}$  e  $i_{t,3}$ :

$$i_{r,1} = \Gamma_{r,i} \cdot i_{i,1}, \quad (3.53)$$

$$i_{t,2} = \frac{Z_p}{Z_2} \Gamma_{t,i} \cdot i_{i,1}, \quad (3.54)$$

$$i_{t,3} = \frac{Z_p}{Z_3} \Gamma_{t,i} \cdot i_{i,1}. \quad (3.55)$$

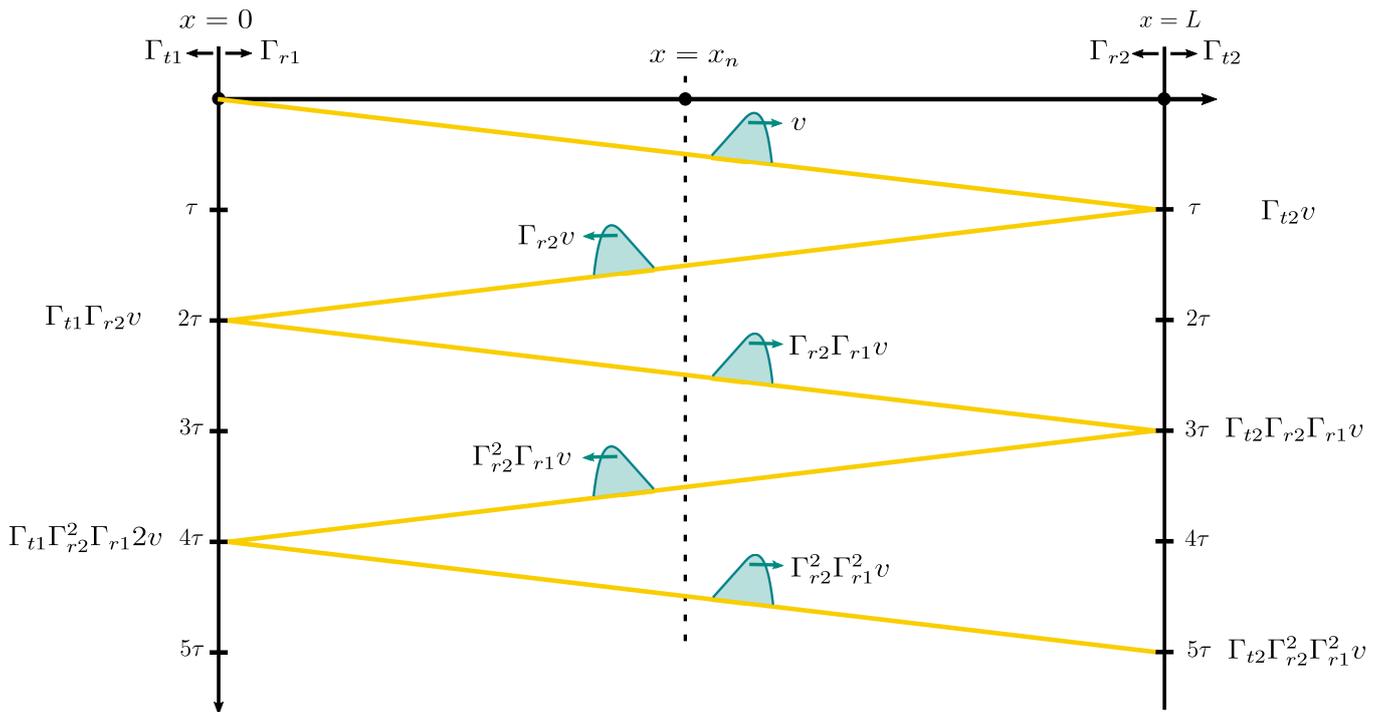


**Figura 3.4.** Onda viajante de corrente passando por uma ramificação.

### 3.5 DIAGRAMAS DE REFLEXÕES SUCESSIVAS DE ONDAS

Diagrama de reflexões sucessivas de ondas ou diagrama de “lattice” é uma ferramenta gráfica desenvolvida em Bewley (1931) que facilita a análise de propagação de OV em LTs, permitindo estudar os fenômenos de reflexão e transmissão em qualquer instante de tempo e em qualquer local da linha.

A Figura 3.5 apresenta o diagrama em questão. O eixo das abscissas é dado pelo comprimento da linha de transmissão  $L$ , ao passo que o eixo das ordenadas mostra o tempo de propagação. A OV, representada por uma linha reta cuja inclinação é sua velocidade de propagação  $v_p$  (NAIDU, 1983), partirá da origem do eixo de coordenadas em  $t = 0$  e  $x = 0$ , até atingir o outro terminal da linha  $x = L$  no instante  $t = \tau$ , onde a  $\tau$  é dado o nome de tempo de trânsito.



**Figura 3.5.** Diagrama de reflexões sucessivas de uma OV de tensão propagando-se em uma LT.

Ao chegar na terminação seguinte, a OV é multiplicada pelos coeficientes de reflexão  $\Gamma_{r2}$  e de transmissão  $\Gamma_{t2}$  da terminação em  $x = L$ , propagando-se agora para sua terminação de origem. Ao chegar novamente em  $x = 0$ , mas agora em  $t = 2\tau$ , a OV é multiplicada pelos coeficientes de reflexão e de transmissão  $\Gamma_{r1}$  e  $\Gamma_{t1}$  referentes à terminação de origem. Este processo de propagação repete-se ao longo do diagrama, reproduzindo as reflexões sucessivas

nos terminais da linha de transmissão em estudo.

O uso de diagramas de reflexões sucessivas traz diversas vantagens para a análise comportamental das OV's. Com ele, é possível traçar todo o histórico da onda, localizando sua origem e quais componentes a formaram. Além disso, é possível caracterizá-la no domínio do tempo em qualquer posição da linha de transmissão (BEWLEY, 1931).

Para o terminal em  $x = 0$ , tem-se a seguinte OV de tensão  $v_1(t)$ :

$$v_1(t) = v(t) + \Gamma_{t1}\Gamma_{r2}v(t - 2\tau) + \Gamma_{t1}\Gamma_{r2}^2\Gamma_{r1}v(t - 4\tau) + \dots \quad (3.56)$$

Para o terminal em  $x = L$ , por sua vez, a OV de tensão  $v_2(t)$  é dada por:

$$v_2(t) = \Gamma_{t2}v(t - \tau) + \Gamma_{t2}\Gamma_{r2}\Gamma_{r1}v(t - 3\tau) + \Gamma_{t2}\Gamma_{r2}^2\Gamma_{r1}^2v(t - 5\tau) + \dots \quad (3.57)$$

Por fim, pode-se generalizar a OV de tensão para uma posição qualquer na LT  $x = x_n$  como sendo:

$$v_n(t) = v\left(t - \frac{x_n}{v_p}\right) + \Gamma_{r2}v\left(t - 2\tau + \frac{x_n}{v_p}\right) + \Gamma_{r2}\Gamma_{r1}v\left(t - 2\tau - \frac{x_n}{v_p}\right) + \dots \quad (3.58)$$

É importante salientar que este diagrama permite a visualização das OV's incidentes, refletidas e transmitidas por quaisquer pontos de descontinuidade existentes no sistema, não só pelos terminais. Dada a ocorrência de um distúrbio na LT, por exemplo, tem-se três pontos de descontinuidade, a saber: os dois terminais e o próprio ponto onde se deu o distúrbio. Nessa situação, as OV's de tensão e corrente serão lançadas do ponto do distúrbio em direção aos terminais, de modo que, havendo monitoramento nas estações, essas ondas podem ser medidas ao longo do tempo.

# REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A fim de contextualizar este trabalho, o presente capítulo traz um levantamento das produções mais relevantes acerca do tema abordado, por meio da apresentação concisa das principais ideias presentes em cada artigo. Nesse sentido, são apresentados os estudos referentes à localização de faltas baseada em OV's.

### 4.1 LOCALIZAÇÃO DE FALTAS BASEADA EM ONDAS VIAJANTES

Ando *et al.* (1985) propõe uma técnica de localização de faltas a um terminal baseada em OV's para o elo de corrente contínua *Pacific HVDC Intertie*, nos Estados Unidos. Com o intuito de desacoplar as tensões e correntes do elo CC, aplica-se a matriz de transformação modal de Karrenbauer para dois modos, aéreo e terra. Feito isso, são obtidos os primeiros instantes de reflexão das OV's originadas pela falta por meio da aplicação de um filtro denominado *Differentiator-Smoother* (DS) ao sinal em conjunto com um limiar comparador, cuja função é distinguir faltas CC de outras perturbações elétricas. Por fim, lapida-se a estimação dos instantes de reflexão utilizados na formulação da localização da falta por meio de uma interpolação triangular de quatro pontos. O desempenho da metodologia descrita foi testado com dados de campo, tendo um excelente resultado quando comparado com o localizador de faltas tipo B da *Bonneville Power Administration*.

Magnago & Abur (1998) sugere um esquema de localização de faltas a um e a dois terminais com base em ondas viajantes e *wavelets*. Aplica-se a matriz de transformação modal de Clarke para desacoplamento do sistema, seguida da transformada *wavelet* discreta Daubechies4 e, por meio da avaliação dos dois primeiros coeficientes da transformada, os locais de falta são estimados. O algoritmo proposto mostra-se insensível à existência de acoplamento mútuo entre linhas e à presença de capacitores série para compensação de reativo.

Chen *et al.* (2006) tratam, em seu trabalho, dos princípios básicos da localização de faltas baseados em OV's moderna para linhas de transmissão, trazendo os equacionamentos que descrevem os métodos de um e de dois terminais. Com o intuito de aplicar esses princípios para linhas de transmissão HVDC, os autores apresentam os principais problemas técnicos envolvidos e alternativas para contorná-los. A partir disso, é desenvolvido um sistema de localização de faltas para linhas de transmissão HVDC que suporta os métodos de um e dois terminais simultaneamente. São incluídas análises de experiências em campo, dada a aplicação desse sistema em uma LT em HVDC de 500 kV em Shanghai, China.

Nanayakkara *et al.* (2011) também segue a abordagem de localização de faltas a dois terminais aliando ondas viajantes e *wavelets*, mas fazendo uso da transformada contínua ao invés da discreta proposta por Magnago & Abur (1998). Os autores atestam, através de resultados de simulações, que os coeficientes da transformada *wavelet* contínua (TWC) são mais robustos e, por isso, geram instantes de reflexão mais precisos que os da transformada *wavelet* discreta (TWD). Por fim, o algoritmo proposto é posto à prova com a aplicação de ruído ao sinal de entrada, apresentando queda em desempenho, principalmente no caso de cabos subterrâneos. Essa queda, no entanto, pode ser mitigada por meio do uso de coeficientes da transformada com ordens maiores.

Schweitzer *et al.* (2014b), Schweitzer *et al.* (2016) e Lopes (2016) buscaram desenvolver novas técnicas de detecção de faltas utilizando o princípio de detecção dos instantes de incidência de OV's através do filtro DS em conjunto com limiar comparador proposto por Ando *et al.* (1985).

Schweitzer *et al.* (2014b) apresenta um estudo aprofundado acerca da teoria de ondas viajantes para localização de faltas, com foco na abordagem tradicional a dois terminais. São apresentados os desenvolvimentos teóricos de modelagem das equações telegráficas, dos coeficientes de transmissão e reflexão, dos efeitos da atenuação e das perdas em OV's e dos fundamentos da análise modal, bem como quais modos são mais apropriados para localização de faltas a depender do perfil da falta. Em seguida, é apresentada a metodologia, desenvolvida em Ando *et al.* (1985), para detecção dos instantes de reflexão nos terminais local e remoto, utilizando a matriz de Clarke para desacoplamento e interpolação por parábola para estimação dos tempos. Também são abordadas técnicas de compensação para dispersão, responsável pela alteração da declividade do filtro DS e inserção de erros nos instantes de reflexão de OV's. Por fim,

apresentam-se os resultados do método de localização proposto para a linha de transmissão de Goshen-Drummond. Conclui-se que a precisão inerente do método é de aproximadamente 60 metros, tendo o valor real do comprimento da linha e a natureza da falta como fatores limitantes na localização.

Schweitzer *et al.* (2016) apresenta um método de localização de faltas a um terminal utilizando a teoria de ondas viajantes baseada nos instantes de tempo das duas primeiras reflexões e na velocidade de propagação. A abordagem elimina a necessidade de canais de comunicação e referências de tempo precisas para os terminais local e remoto, pois utiliza informações apenas do terminal local. Em conjunto com a localização de falta, um método de estimação do comprimento da linha de transmissão e distância entre *taps* também é apresentado, utilizando os três primeiros instantes de reflexão das OV's. A técnica proposta para localização de faltas obteve erros menores que 200 metros, confirmados pelas equipes de campo responsáveis pela linha Brasada-Harney (EUA) testada, enquanto a estimativa de comprimento de linha gerou erros de aproximadamente 0.3%.

Lopes (2016) propõe uma alternativa à localização de faltas à terra a dois terminais convencional. Aplica-se a matriz de transformação modal de Karrenbauer para sinais de corrente e, com os modos terra e aéreo resultantes, determinam-se os instantes de incidência das OV's em modos terra e aéreo para os terminais local e remoto da linha de transmissão. Deriva-se, então, uma equação que determina a posição percentual da falta em relação ao comprimento da linha apenas com os instantes de incidência previamente determinados. A técnica apresentada elimina a necessidade de sincronização de dados e o conhecimento dos parâmetros de linha (velocidade de propagação e comprimento da linha), dependendo apenas da operação em tempo real do algoritmo e da disponibilidade dos canais de comunicação para aquisição dos dados nos terminais local e remoto.

## CAPÍTULO 5

# DESCRIÇÃO DO ALGORITMO

Conforme visto no Capítulo 3, mudanças abruptas nos valores instantâneos dos sinais de tensão e corrente acontecem quando da ocorrência de uma falta em uma LT, ocasionando transitórios. Esses transitórios, na forma de ondas viajantes, se propagam na linha a partir do ponto de falta, sofrendo múltiplas reflexões e refrações até que se chegue em uma situação de regime permanente.

Neste capítulo é apresentada a metodologia utilizada no trabalho para a localização de faltas em uma linha de transmissão em HVDC partir das OV's que se propagam para os terminais a partir do ponto de defeito.

### 5.1 VISÃO GERAL DO ALGORITMO IMPLEMENTADO

A presente metodologia para a localização de faltas em uma LT parte da simulação de diferentes cenários de faltas aplicados ao modelo adotado para os testes, o qual será apresentado com mais detalhes no Capítulo 6. Primeiro, é realizada a aferição de sinais de corrente nos terminais retificador e inversor do modelo, os quais são armazenados em um arquivo para que possam ser posteriormente carregados e tratados. Aqui, optou-se pela utilização dos sinais de corrente em lugar dos de tensão porque eles se mostraram menores variações em suas formas de onda.

Depois disso, é efetuada a extração das componentes de alta frequência dos sinais medidos mediante duas etapas: a aplicação de uma transformação modal para obter um conjunto de variáveis modais desacopladas seguida da inserção desses sinais modais na entrada de um filtro DS.

Com o intuito de determinar com precisão os instantes de chegada das frentes de onda nos terminais da LT, por sua vez, os sinais da saída do filtro passam por uma rotina que distingue

os pontos de máximo das OV's dos demais pontos de máximo do sinal, passando por uma interpolação em seguida.

Por fim, sabendo esses instantes de tempo, são estimadas as posições dos defeitos ao longo da LT através dos métodos de localização propriamente ditos, os quais serão descritos mais à frente. Baseado no procedimento supracitado, o seguinte resumo pode ser feito sobre as etapas que compõem o algoritmo, as quais serão explicadas em mais detalhes nas próximas seções:

**Tabela 5.1.** Sequência de etapas do algoritmo.

<b>Passo</b>	<b>Descrição</b>
<b>1</b>	Simulação de determinado cenário de falta na LT
<b>2</b>	Carregamento dos dados da simulação
<b>3</b>	Emprego de uma transformação modal para desacoplamento do sistema
<b>4</b>	Aplicação do filtro DS para extração das OV's
<b>5</b>	Deteção dos pontos de máximo das OV's
<b>6</b>	Interpolação dos sinais para determinação dos instantes de incidência
<b>7</b>	Estimação do local da falta via diferentes métodos de localização

## 5.2 TRANSFORMAÇÃO MODAL

Quando se trata de LTs com múltiplos condutores, chega-se a um sistema de equações cuja resolução pode ser bastante complexa por conta do acoplamento entre as grandezas de fase. Com a finalidade de simplificar essa resolução, geralmente utiliza-se uma transformação modal de escolha para obter um conjunto de variáveis modais desacopladas (HEDMAN, 1965), de forma que cada um dos modos possa ser resolvido com as mesmas equações desenvolvidas para as linhas monofásicas vistas anteriormente. De fato, existem várias matrizes de transformação que possuem a propriedade de desacoplar um sistema, sendo a transformação de componentes simétricas uma delas. No entanto, componentes simétricas são usadas para fasores de tensão e corrente e, portanto, não se aplicam à análise de grandezas instantâneas como OV's (SCHWEITZER *et al.*, 2014a).

O procedimento para transformar variáveis de fase em variáveis modais reside na teoria de autovalores e autovetores das matrizes de impedância e admitância (KIMBARK, 1970; PIPES, 1941). Contudo, para uma linha bipolar CC simétrica a transformação pode ser obtida intuitivamente e envolve apenas dois modos, a saber, modo terra e modo aéreo, os quais se-

rão denotados, respectivamente, pelos subscritos 0 e 1. Na forma matricial, a relação entre grandezas modais e de fase é dada pelas matrizes de transformação  $[T_i]$  e  $[T_v]$ : (KIMBARK, 1970):

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_1 \end{bmatrix} = [T_i] \cdot \begin{bmatrix} i_{POS} \\ i_{NEG} \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

e

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_1 \end{bmatrix} = [T_v] \cdot \begin{bmatrix} v_{POS} \\ v_{NEG} \end{bmatrix}, \quad (5.2)$$

sendo:

$$[T_i] = [T_v] = \frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}. \quad (5.3)$$

Nessas equações, além das variáveis nos modos terra e aéreo, tem-se as correntes e tensões no polo positivo,  $i_{POS}$  e  $v_{POS}$ , e no polo negativo,  $i_{NEG}$  e  $v_{NEG}$ .

Dessa maneira, a decomposição em modos supracitada permite que seja analisada a propagação de dois pares de OVs, cada um correspondente a um dos modos. No primeiro par, que diz respeito ao modo aéreo, as ondas propagam-se em uma direção por um dos polos e retornam pelo outro polo na direção oposta. Já no segundo par, referente ao modo terra, as ondas propagam-se ao longo dos dois polos e retornam pela terra (NAIDU, 1983).

É relevante observar que cada modo terá suas próprias velocidade de propagação  $v_p$ , impedância característica  $Z_c$  e constante de propagação  $\gamma_{ov}$ . Assim, tendo em vista que a velocidade de propagação e a atenuação são fatores que afetam a estimação do tempo de chegada de OVs, a seleção do modo de referência deve ser feita cuidadosamente. O modo terra, quando comparado ao aéreo, possui uma maior atenuação e dispersão por incluir a propagação de ondas pela terra, sendo, portanto, o modo menos apropriado para se utilizar em localização de defeitos (SCHWEITZER *et al.*, 2014a).

Vale ressaltar também que as variáveis modais são obtidas com respeito a uma das fases. A transformação tal como foi apresentada em (5.3) tem como referência o polo positivo, sendo essa a referência adotada no algoritmo desenvolvido neste trabalho.

### 5.3 FILTRO DS

Faltas que ocorrem em sistemas reais lançam ondas cujo formato geralmente não se assemelha à característica ideal de um degrau. Ademais, pode-se ter a situação da presença de múltiplos pontos de máximo adjacentes, oriundos de reflexões a partir de pontos de descontinuidade localizados próximos uns dos outros (SCHWEITZER *et al.*, 2014b), tornando desafiadora a determinação do tempo de chegada das ondas aos terminais. A abordagem do filtro DS surge para auxiliar nesse processo.

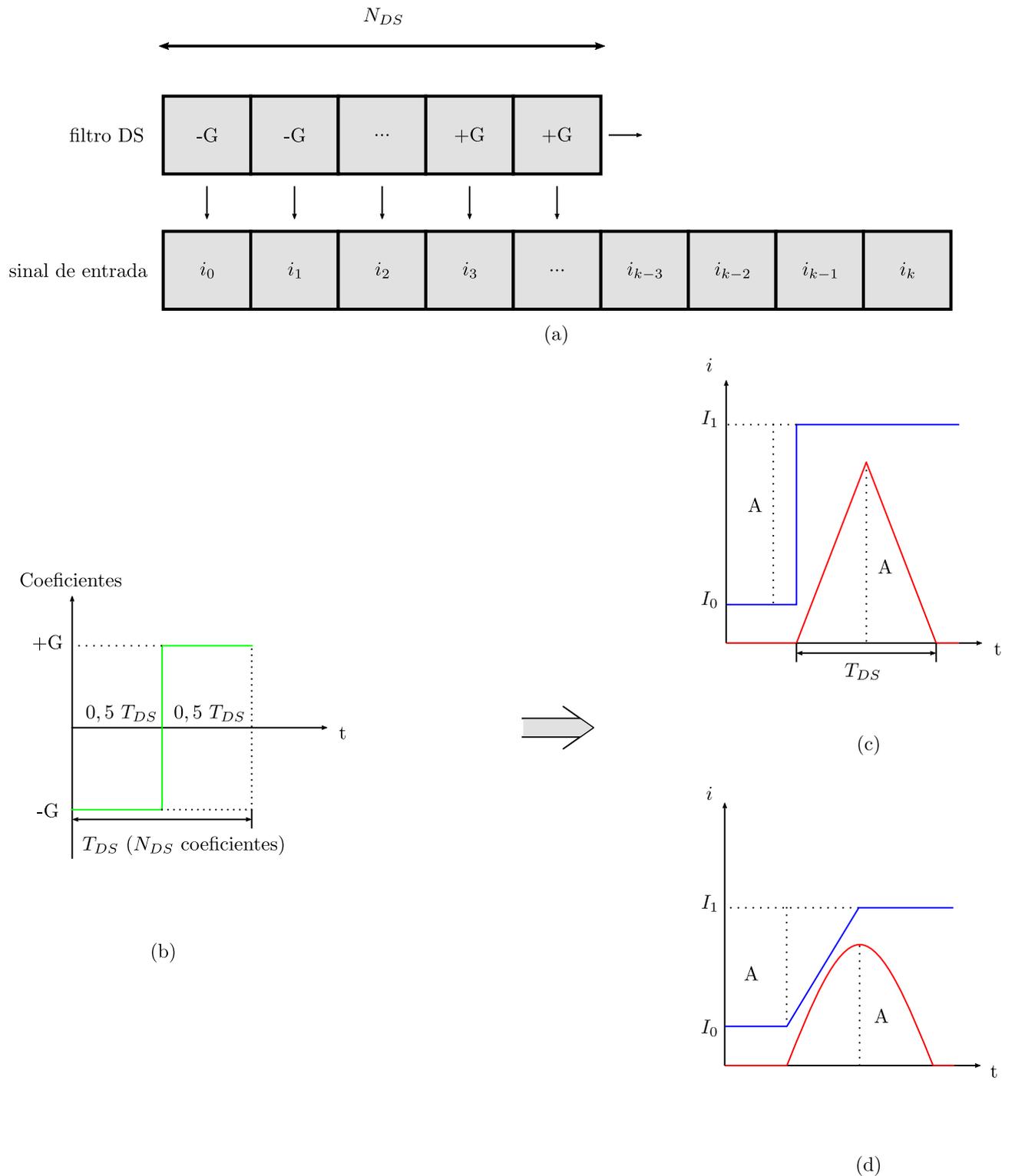
O filtro DS ou filtro *Differentiator-Smoother*, como o próprio nome indica, é composto por uma parte suavizante, (*smoother*), e uma parte diferencial (*differentiator*), as quais encontram-se em cascata. A componente suavizante tem como funções não só a de reduzir os efeitos das distorções, mas também a de realizar o espalhamento da borda de subida do sinal de entrada, viabilizando o uso de interpolação para a determinação dos tempos de incidência das ondas (SCHWEITZER *et al.*, 2014b).

Na etapa diferencial subsequente, um sinal ideal com formato em degrau é convertido para um formato triangular. Se, contudo, o sinal avaliado for dado por um transitório amortecido, este assume formato de rampa e a saída do filtro se aproxima de uma parábola (SCHWEITZER *et al.*, 2014b). Ambos os casos podem ser observados na Figura 5.1. Os picos dessas características na saída do filtro, por sua vez, serão utilizados para precisar os instantes de chegada das OV's nos terminais monitorados, conforme será visto à frente.

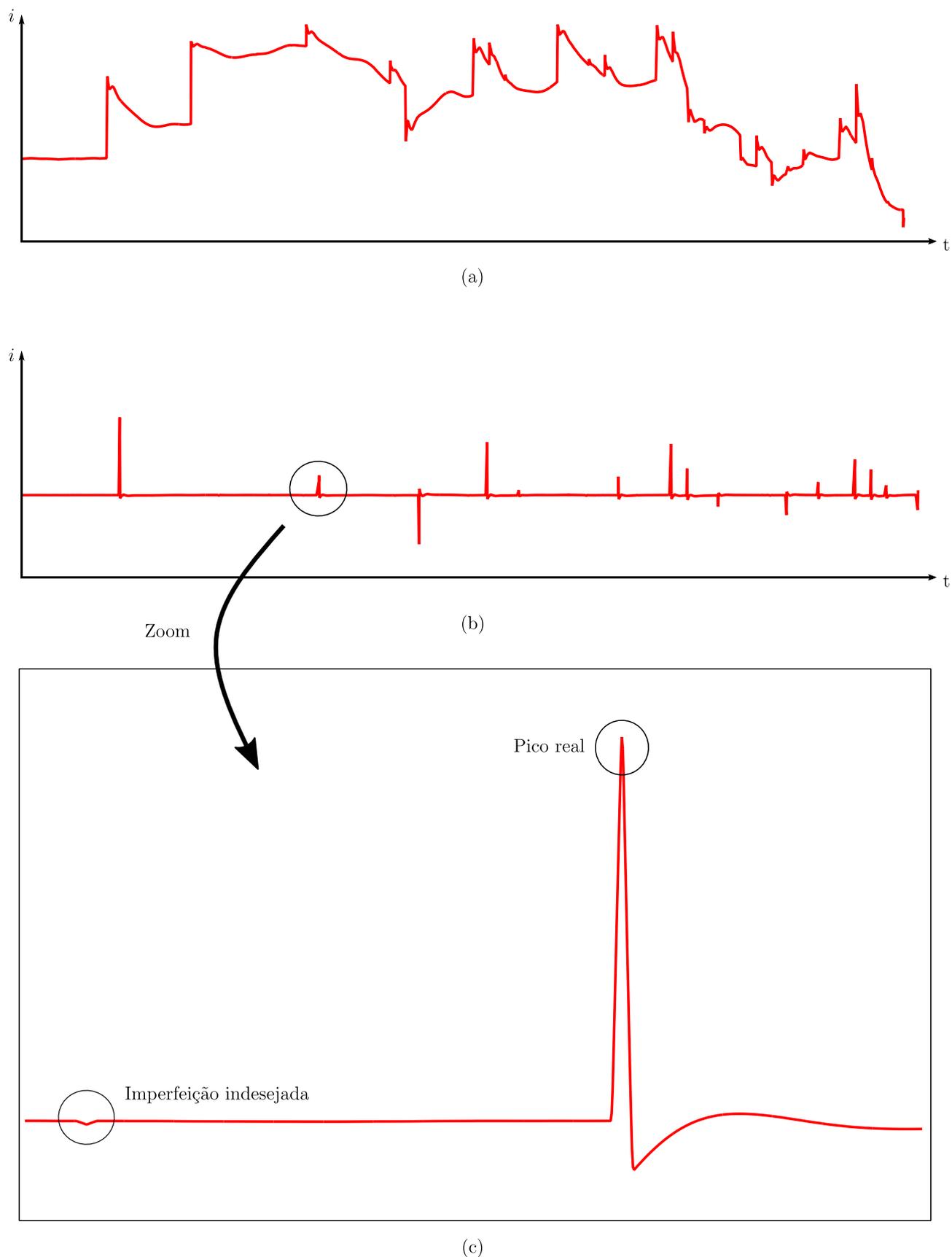
O processo de filtragem descrito pode ser conduzido computacionalmente através da convolução de tempo discreto entre o sinal de entrada e uma janela de dados de duração  $T_{DS}$  compreendendo os coeficientes do filtro, conforme ilustrado na Figura 5.1. A duração da janela, por sua vez, relaciona-se ao número de coeficientes do filtro através de  $T_{DS} = N_{DS} \cdot \Delta t$ , em que  $\Delta t$  é o passo de amostragem do sinal avaliado. Para que o filtro tenha ganho unitário, o parâmetro  $G$  deve ser ajustado para  $G = \frac{2}{N_{DS}}$ , sendo  $N_{DS}$  o número de coeficientes do filtro.

À vista disso, aplicou-se uma janela de duração  $T_{DS} = 20\mu s$  aos sinais de corrente nos modos aéreo e terra vistos de ambos os terminais, para a obtenção das OV's correspondentes. Na Figura 5.2(a) é apresentado um sinal de corrente à entrada do filtro DS, coletado quando da ocorrência de uma falta entre um polo e a terra, ao passo que na Figura 5.2(b) tem-se as

OVs já extraídas na saída do filtro.



**Figura 5.1.** (a) Processo de convolução do sinal de entrada com a janela de dados do filtro DS; (b) Janela de dados do filtro DS; (c) Saída do filtro DS para uma entrada em degrau; (d) Saída do filtro DS para uma entrada em rampa.



**Figura 5.2.** (a) Exemplo de sinal de corrente coletado a partir de uma falta polo-terra; (b) Saída do filtro DS externando as OV's; (c) Imperfeições na saída do filtro DS que o algoritmo de detecção de máximos visa eliminar.

## 5.4 DETECÇÃO DOS MÁXIMOS DAS OVS

Uma vez aplicado o filtro DS, faz-se necessária uma rotina que seja capaz de discriminar os pontos de máximo dos sinais das OVs dos de quaisquer ruídos que possam estar presentes nos sinais, em conformidade com o que é ilustrado na Figura 5.2(c). Para tanto, as saídas do filtro são submetidas ao Algoritmo 1.

Nesta rotina, faz-se a detecção de todos os máximos locais do sinal para, em seguida, dar-se início a uma comparação entre as magnitudes dos picos atual e seguinte. Caso a diferença entre esses picos exceda uma certa amplitude  $X$ , estabelece-se o pico de maior valor como sendo o pico da OV. Executa-se esse algoritmo para toda a extensão dos sinais, retornando, por fim, um vetor contendo a magnitude dos máximos selecionados em conjunto com os instantes de tempo em que eles ocorreram.

**Entrada:** Vetores de magnitude e posição do sinal de entrada  $pks_i$  e  $locs_i$   
**Saída:** Vetores de magnitude e posição apenas dos picos da OV  $pks_o$  e  $locs_o$   
 Inicialização de variáveis;  
**para**  $i \leftarrow 1$  **até**  $tamanho(pks_i) - 1$  **faça**  
     **se**  $\|pks_i(i) - pks_i(i + 1)\| > X$  **então**  
          $pks_o(j) \leftarrow \max(pks_i(i), pks_i(i + 1));$   
         **fim**  
          $i \leftarrow i + 2;$   
          $j \leftarrow j + 1;$   
**fim**  
 Remover zeros do vetor de picos  $pks_o$ ;  
**para**  $i \leftarrow 1$  **até**  $tamanho(pks_i)$  **faça**  
     **para**  $j \leftarrow 1$  **até**  $tamanho(pks_o)$  **faça**  
         **se**  $pks_o(j) == pks_i(i)$  **então**  
              $locs_o(j) \leftarrow locs_i(i) - 1;$   
         **fim**  
     **fim**  
**fim**

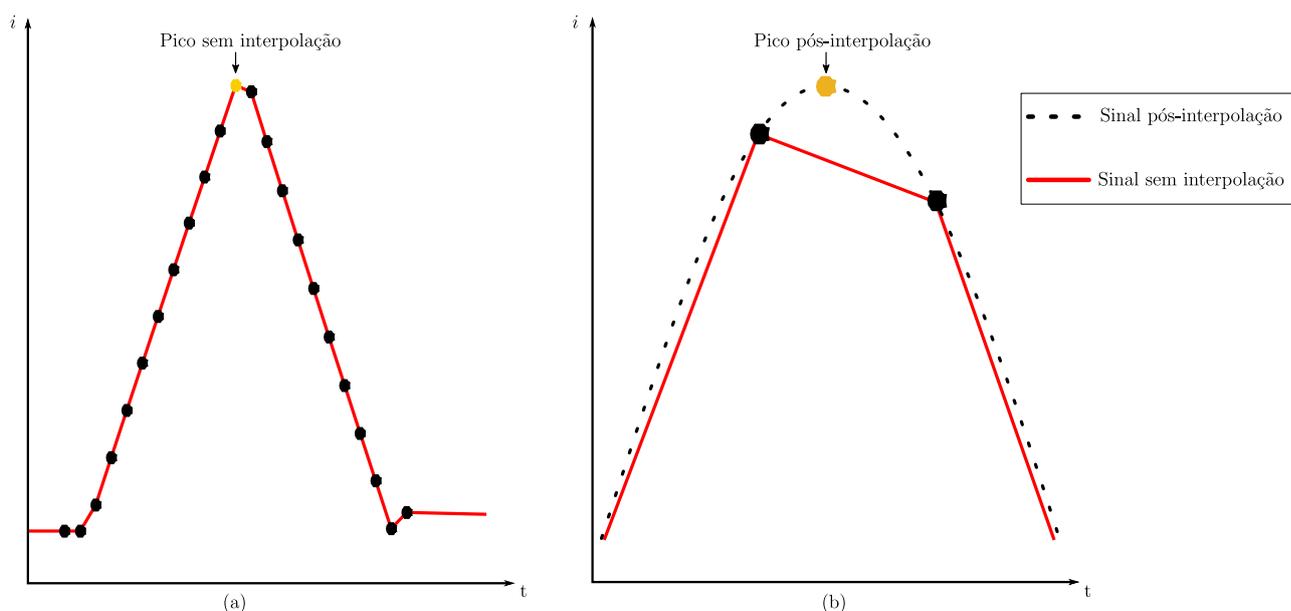
**Algoritmo 1:** Rotina de detecção de picos de OVs.

## 5.5 INTERPOLAÇÃO E DEFINIÇÃO DO INSTANTE DE CHEGADA DAS OVS NOS TERMINAIS

Até aqui, foi possível a obtenção dos pontos de máximo das OVs avaliadas. Contudo, esses pontos não necessariamente correspondem aos picos de fato das OVs, visto que a taxa de

amostragem empregada é finita, de maneira que sua utilização poderia implicar em um grande erro na determinação dos instantes de chegada das OVs aos terminais, a depender da taxa de amostragem. Para contornar esse problema, recorre-se a um processo de interpolação.

Conforme foi visto, o filtro DS entrega em sua saída um sinal cujo formato se aproxima ao de uma parábola. Por essa razão, a rotina implementada utiliza um método de interpolação parabólico, selecionando, para este fim, as  $k$  amostras anteriores e as  $k$  amostras posteriores do ponto de máximo que foi obtido na etapa anterior para cada OV. Uma vez estabelecida a curva que melhor se ajusta às amostras escolhidas, aplica-se uma função para encontrar a localização no tempo do pico da nova curva, cujo valor será utilizado como instante de incidência da OV avaliada nos métodos de localização de faltas que serão descritos a seguir. A Figura 5.3 expõe o processo descrito nessa seção.



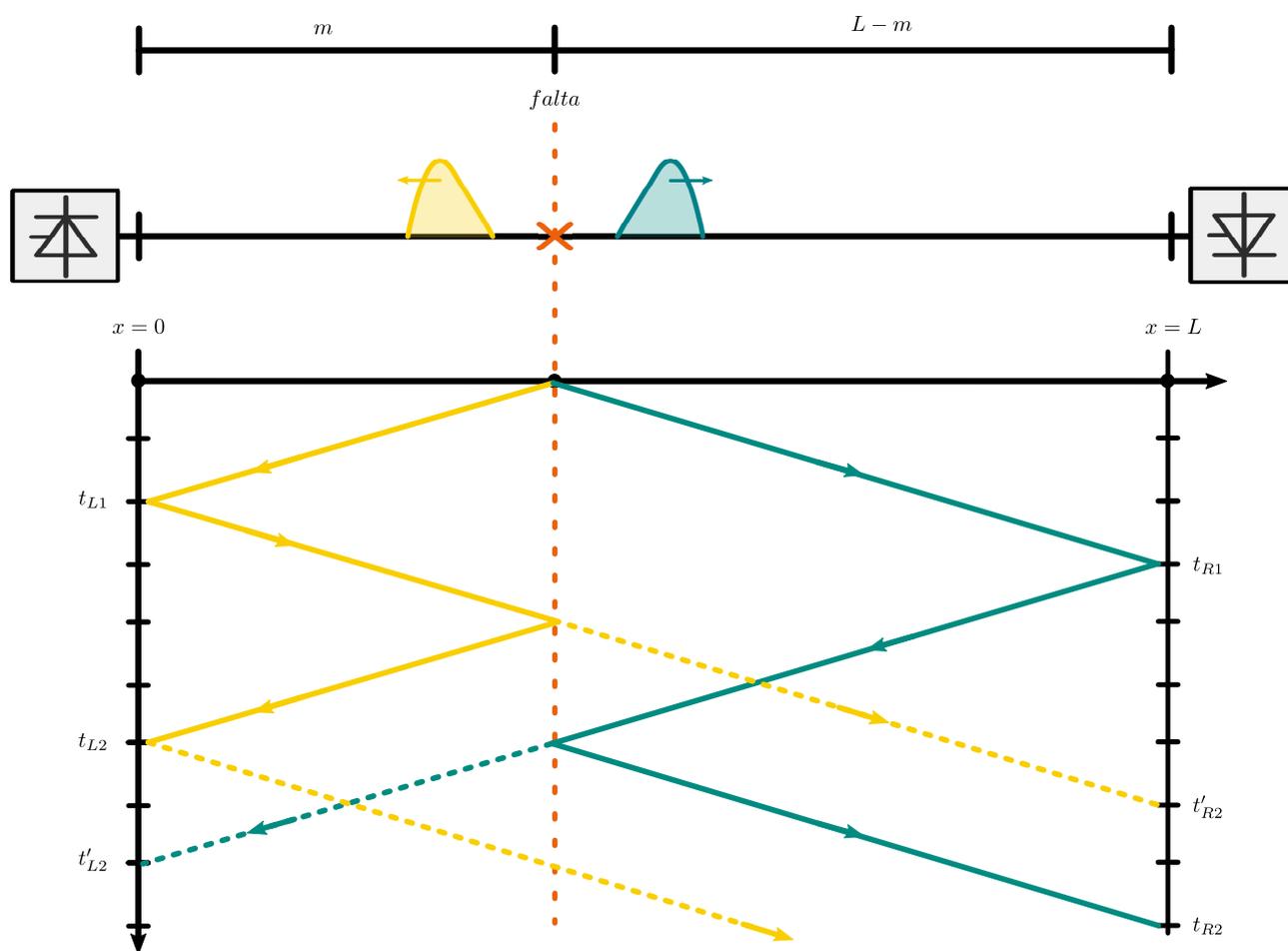
**Figura 5.3.** (a) Amostras selecionadas para a interpolação e pico do sinal anterior a esse processo; (b) Pico obtido após o processo de interpolação.

## 5.6 MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS BASEADOS EM OVS

Existem diversos métodos na literatura com a finalidade de localização de defeitos em linhas de transmissão, dentre os quais podemos citar os que se fundamentam na teoria de OVs. A seguir, são apresentados alguns desses métodos.

### 5.6.1 Método a Dois Terminais Clássico

O denominado método de localização de faltas a dois terminais clássico utiliza informações coletadas em ambos os terminais da linha, a saber, os instantes de incidência das primeiras frentes de onda em cada terminal. Essa abordagem pode ser ilustrada pelo diagrama de reflexões da Figura 5.4, em que  $L$  é o comprimento da linha,  $m$  é a distância da falta em relação ao terminal local e  $t_{L1}$  e  $t_{R1}$  são os instantes em que as primeiras OV's incidentes atingem os terminais local e remoto, respectivamente. Quanto à velocidade de propagação  $v_p$  das ondas, aqui ela é calculada pela Equação 3.19.



**Figura 5.4.** Diagrama de reflexões para um distúrbio interno à linha, considerando a propagação de OV's somente do modo aéreo.

Mediante esse princípio, pode-se expressar as distâncias que as OV's percorrem do ponto de falta a cada terminal segundo:

$$m = v_p(t_{L1} - t_{falta}) \quad (5.4)$$

$$L - m = v_p(t_{R1} - t_{falta}), \quad (5.5)$$

onde  $t_{falta}$  é o instante em que a falta ocorreu. Subtraindo (5.4) por (5.5) e rearranjando os termos, chega-se ao algoritmo clássico de dois terminais para o local da falta em relação ao terminal local (SCHWEITZER *et al.*, 2014b):

$$m_{2class} = \frac{v_p(t_{L1} - t_{R1}) + L}{2} \quad (5.6)$$

Nota-se que essa formulação requer o conhecimento do comprimento da linha monitorada  $L$ , além de depender dos parâmetros da linha, uma vez que a velocidade de propagação das OVs geralmente é calculada por (3.19). Essas grandezas, por sua vez, podem apresentar imprecisões (LOPES, 2016; SAHA *et al.*, 2010), comprometendo a precisão da localização. Ademais, a utilização deste método para localizar o ponto de falta é limitada para sistemas cujos equipamentos responsáveis pela captura dos sinais em ambos os terminais possuam uma referência de tempo comum (SCHWEITZER *et al.*, 2014b). Por outro lado, o método de dois terminais clássico possui a vantagem de utilizar somente as OVs provenientes do ponto de defeito, não dependendo, portanto, da complexidade da discriminação de OVs refletidas.

### 5.6.2 Método a Um Terminal

O método de localização de faltas a um terminal, por sua vez, utiliza informações de apenas um dos terminais da linha, eliminando, assim, a necessidade de sincronização dos dados. Para tanto, a formulação leva em consideração os instantes em que a primeira OV incidente e a OV refletida no ponto da falta atingem o terminal monitorado. Adotando o terminal local como referência, esses instantes de tempo serão dados por  $t_{L1}$  e  $t_{L2}$ , indicados na Figura 5.4. Analogamente com o que foi feito anteriormente, as distâncias percorridas por essas ondas podem ser dadas por:

$$m = v_p(t_{L1} - t_{falta}) \quad (5.7)$$

$$3m = v_p(t_{L2} - t_{falta}) \quad (5.8)$$

Subtraindo (5.8) por (5.7), chega-se a expressão para o método (SCHWEITZER *et al.*, 2014b):

$$m_{1class} = \frac{v_p(t_{L2} - t_{L1})}{2} \quad (5.9)$$

Avaliando (5.9), percebe-se que, ao contrário da abordagem de dois terminais clássica, esta solução não requer o conhecimento do comprimento da LT, embora ainda exija ajuste da velocidade de propagação das OV's. Pode-se somar a essa vantagem o fato de ser necessária a instalação de equipamentos de monitoramento em apenas um terminal, tornando menor o custo desse método.

É importante salientar, no entanto, que a confiabilidade desse método depende da correta discriminação de OV's refletidas. A formulação da maneira como foi apresentada em (5.9) é para o método de um terminal clássico, e considera a segunda OV a incidir no terminal local como sendo a que chega no instante  $t_{L2}$ , proveniente da reflexão no ponto de falta. Contudo, se a falta ocorrer em  $m > L - m$ , a OV que é refratada no ponto de falta atinge o terminal local em um instante  $t'_{L2}$  anterior a  $t_{L2}$ , dependendo do tipo de falta. Nesta nova situação, o equacionamento da segunda frente de onda se torna:

$$(L - m) + L = v_p(t'_{L2} - t_{falta}) \quad (5.10)$$

Subtraindo (5.10) por (5.7) e isolando os termos, obtém-se que a localização do defeito em relação ao terminal local será dada por:

$$m'_{1class} = L - \frac{v_p(t'_{L2} - t_{L1})}{2} \quad (5.11)$$

O mesmo raciocínio pode ser aplicado ao adotar-se o terminal remoto como referência. É importante destacar que (5.11) é uma adaptação do método de um terminal clássico para faltas ocorrendo em  $m > L - m$ . Neste trabalho, o local real da falta é utilizado como entrada para determinar qual formulação será utilizada, se (5.9) ou (5.11). Isso é realizado com o intuito de permitir a avaliação de faltas em toda a extensão da linha.

### 5.6.3 Método de Um Terminal Baseado em Múltiplos Modos

As soluções descritas nas seções 5.6.1 e 5.6.2 constam em sua formulação a propagação de OV's em apenas um modo, geralmente um aéreo. Em Liu *et al.* (2012), foi apresentado um

método de localização de faltas com conexão para a terra que utiliza-se de OVs dos modos aéreo e terra, se propagando a partir do ponto de defeito com velocidades  $v_1$  e  $v_0$ , respectivamente. Mais especificamente, aqui procura-se capturar os instantes  $t_{L1}$  e  $t_{L0}$  de incidência das frentes de onda dos dois modos no terminal avaliado, conforme ilustrado na Figura 5.5.

Ao se considerar a detecção de OVs no modo de terra, elimina-se a dependência das ondas refletidas no ponto de falta, como era o caso do método clássico de um terminal. Tomando como referência o terminal local, é possível calcular a distância que o separa do ponto de falta de duas maneiras:

$$m = v_1(t_{L1} - t_{falta}) \quad (5.12)$$

e

$$m = v_0(t_{L0} - t_{falta}) \quad (5.13)$$

Multiplicando (5.12) e (5.13), respectivamente, por  $v_0$  e  $v_1$ , e em seguida subtraindo as duas expressões resultantes e rearranjando-as, obtém-se:

$$m_{1modos} = \frac{(t_{L0} - t_{L1})v_0v_1}{(v_1 - v_0)} \quad (5.14)$$

Embora essa alternativa de localização não requeira o conhecimento de  $L$ , ela ainda apresenta dependência dos parâmetros da linha de transmissão, a saber, indutâncias e capacitâncias por unidade de comprimento da linha dos modos aéreo e terra, relacionadas às velocidades de propagação.

#### 5.6.4 Método de Dois Terminais Baseado em Múltiplos Modos

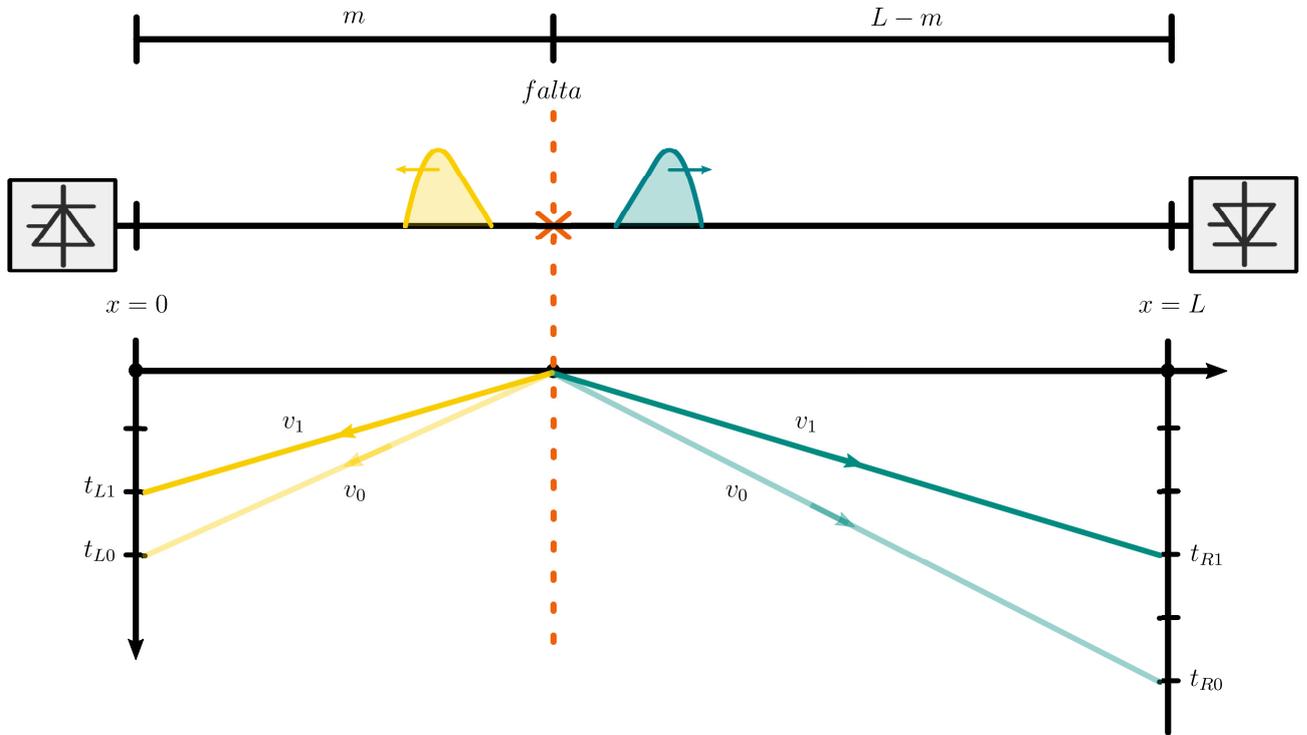
Visando a obtenção de um método que não dependa dos parâmetros da linha avaliada e tampouco necessite de sincronização dos dados, uma nova solução foi proposta em Lopes (2016). A ideia deste algoritmo consiste na utilização de informações provenientes também do terminal remoto. Assim, adotando-o como referência, pode-se adaptar (5.14):

$$L - m = \frac{(t_{R0} - t_{R1})v_0v_1}{v_1 - v_0}, \quad (5.15)$$

onde  $t_{R0}$  e  $t_{R1}$  denotam os instantes de chegada ao terminal remoto das OV's nos modos terra e aéreo, respectivamente. Sabendo que a soma de (5.14) e (5.15) resulta em uma expressão que calcula uma estimativa para o comprimento da LT, o algoritmo propõe que a distância da falta seja calculada em p.u. a partir da divisão entre (5.14) e essa estimativa, resultando em:

$$m_{2\text{modos}(pu)} = \frac{(t_{L0} - t_{L1})}{(t_{L0} - t_{L1}) + (t_{R0} - t_{R1})} \quad (5.16)$$

De fato, analisando (5.16), nota-se que as velocidades de propagação e o comprimento da linha não entram na formulação, tornando-a independente de ajustes e imune a imprecisões desses parâmetros. Caso seja necessário que a localização seja dada em unidades de comprimento, esse valor seria obtido pelo produto de (5.16) pelo comprimento da linha  $L$ .



**Figura 5.5.** Diagrama de reflexões para um distúrbio interno à linha, considerando a propagação de OV's nos modos aéreo e terra.

# APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão expostos os estudos e os respectivos testes realizados para a avaliação da robustez do algoritmo de localização de faltas apresentado no capítulo anterior. Primeiramente, são apresentados os detalhes do modelo utilizado para as simulações efetuadas no *software* ATP a partir das quais foram extraídos os sinais analisados. Em seguida, são listados os testes realizados para diferentes parâmetros da simulação, a saber, o local, o tipo, a resistência da falta e a presença de imprecisões nos parâmetros de linha. Por último, mostram-se os resultados dos testes e as técnicas são avaliadas.

Com relação às análises e às figuras apresentadas neste capítulo, erro da localização de faltas é calculado com base em (6.1), onde  $m_{est}$  é a distância estimada pelo algoritmo de localização de faltas,  $m_{real}$  é distância em que de fato ocorreu o defeito e  $L$  é comprimento total da linha de transmissão.

$$\varepsilon\% = \frac{|m_{est} - m_{real}|}{L} \cdot 100 \quad (6.1)$$

## 6.1 DESCRIÇÃO DO MODELO

O sistema de transmissão HVDC do complexo gerador do Rio Madeira foi concebido para efetuar a integração ao SIN do aproveitamento hidrelétrico do Rio Madeira, formado pelas usinas Santo Antônio e Jirau. Ele é constituído de dois bipolos (3150 MW e  $\pm 600$  kV cada), que ligam as subestações Coletora de Porto Velho (RO) e Araraquara II (SP), além de uma estação *back-to-back* composta de dois conversores (400 MW cada), conectada à subestação Porto Velho.

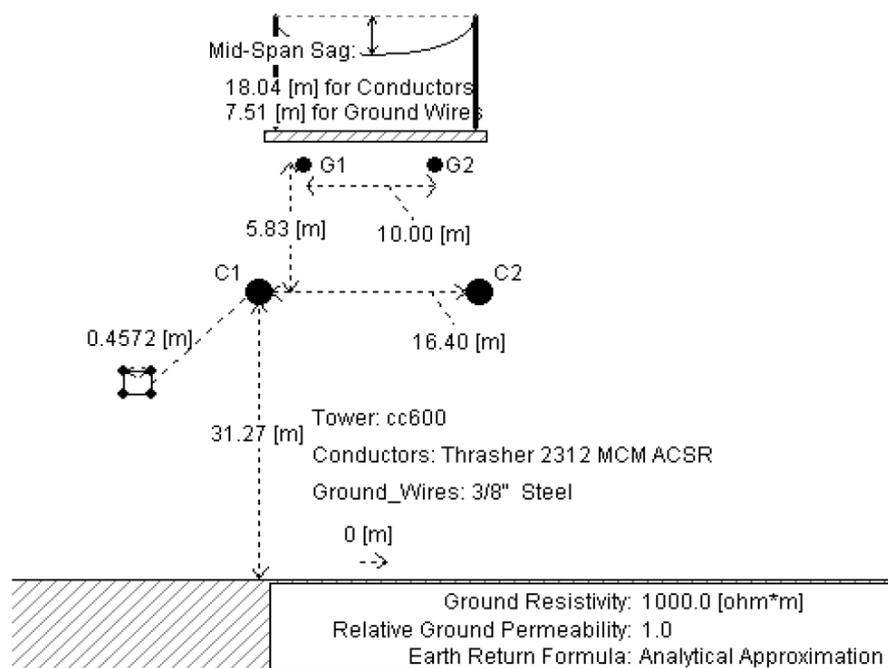
Na fase de definição dos pontos básicos para a especificação do projeto dos dois bipolos, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) solicitou o desenvolvimento de um modelo usando

o *software* PSCAD, a fim de amparar os estudos de planejamento. Posteriormente, foi feita uma transcrição deste modelo para ATP/ATPDraw, sendo disponibilizada para a comunidade de usuários da ferramenta <sup>1</sup> como contribuição para os interessados em estudos na área. Este último foi escolhido para ser utilizado nos testes apresentados neste capítulo e é mostrado na Figura 6.2. A seguir é feita uma breve descrição dos aspectos mais relevantes do modelo para este trabalho.

### 6.1.1 Linha de Transmissão CC

Sabe-se que cada modelo de LT em programas de transitórios eletromagnéticos considera diferentes parâmetros em suas rotinas internas de cálculo, podendo resultar em diferentes comportamentos. Por esse motivo, é fundamental a correta seleção, de acordo com o tipo de análise transiente a ser realizada, do modelo a ser utilizado.

A figura 6.1 mostra os dados, referentes ao elo CC do Madeira, de disposição espacial e tipo dos condutores que foram considerados durante a etapa de planejamento.



**Figura 6.1.** Dados da linha DC do Madeira utilizados na etapa de planejamento (LUZ *et al.*, 2014).

<sup>1</sup>Disponível em <<https://www.atpdraw.net/showpost.php?id=52&kind=0>>. Acesso em 11/06/2018.

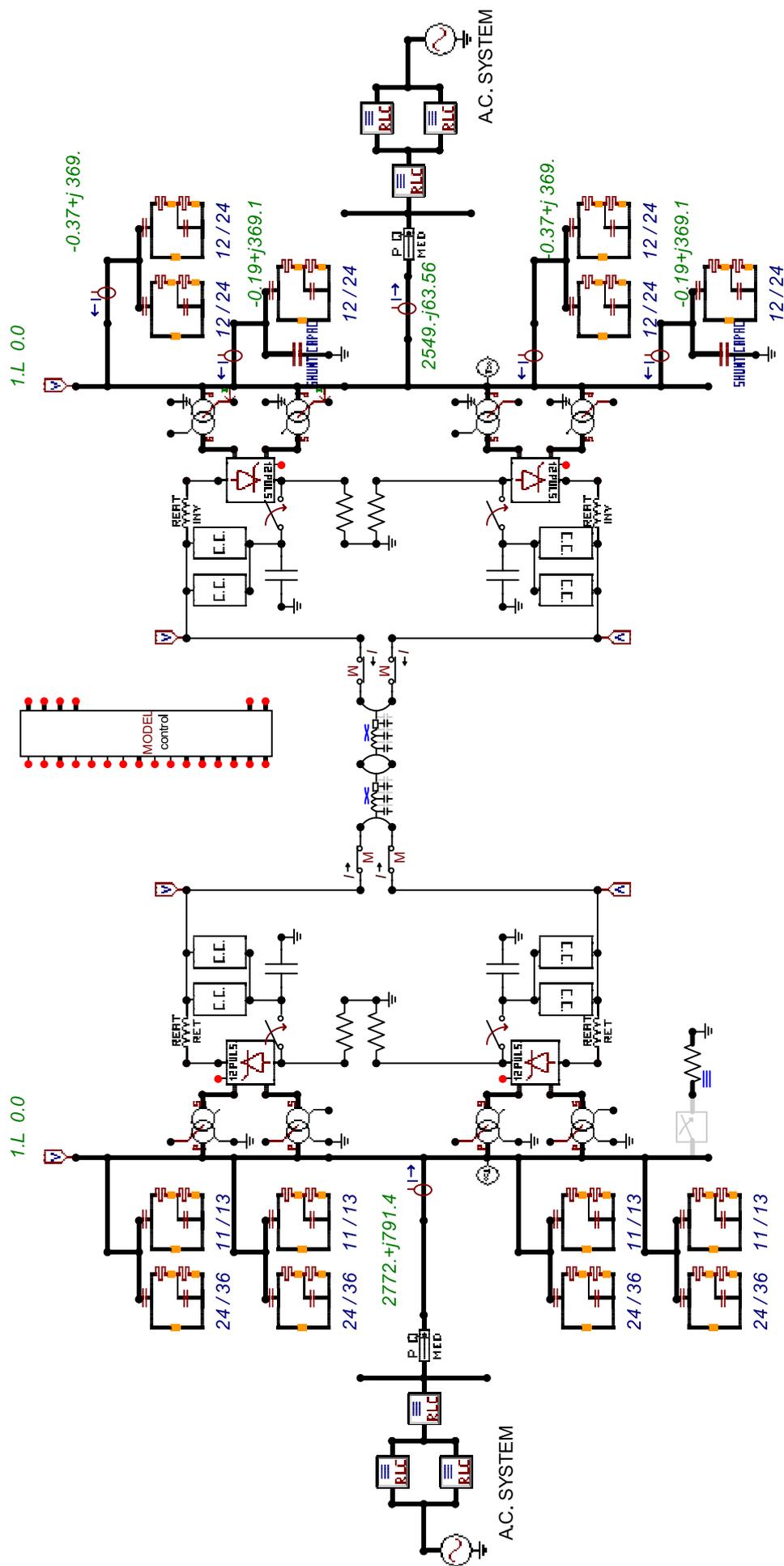


Figura 6.2. Sistema HVDC bipolar do Rio Madeira modelado em ATP/ATPDraw.

Em Luz *et al.* (2014) foi realizada, para o sistema em questão, a avaliação de diferentes modelos de linha em ambos ATP e PSCAD, onde foram analisados a resposta em frequência, a operação em regime permanente e a resposta transitória quando da aplicação de faltas tanto no lado CA quanto no lado CC do sistema.

Com base nos resultados desse estudo, optou-se por adotar o modelo a parâmetros distribuídos cujas entradas são apresentadas na Tabela 6.1, por este ter mostrado o melhor comportamento dentro do espectro de frequência considerado. Nele, são informadas resistência, indutância e capacitância por unidade de comprimento para cada modo do sistema de 2450 km de extensão. Vale destacar que esses parâmetros foram calculados a partir de um modelo dependente da frequência do PSCAD para a frequência de 0,001 Hz (LUZ *et al.*, 2014), estando, por esse motivo, mais ajustados para análise de comportamentos no lado CC do sistema. Aqui, a tensão nominal CC de cada polo é de 600 kV, um com polaridade positiva e outro com polaridade negativa, e a corrente nominal CC é de 2625 A.

**Tabela 6.1.** Parâmetros da linha de transmissão.

Modo Aéreo			Modo Terra		
$R'(\Omega/km)$	$L'(mH/km)$	$C'(\mu F/km)$	$R'(\Omega/km)$	$L'(mH/km)$	$C'(\mu F/km)$
0,00702	0,860602	0,0134166	0,008028	3,88784	0,0100794

**Tabela 6.2.** Parâmetros dos circuitos equivalentes das redes CA do retificador e do inversor.

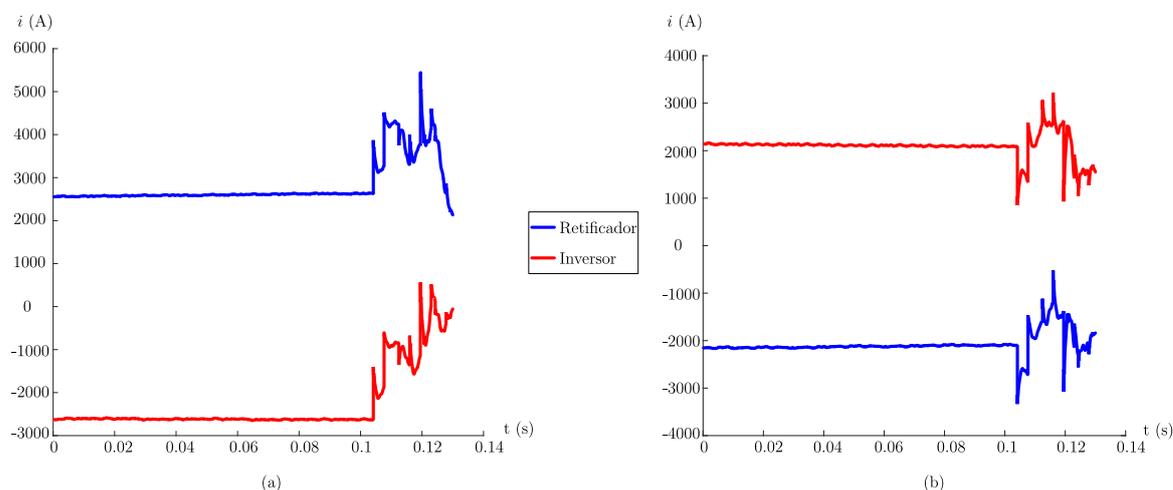
	$L_p(mH)$	$R_p(\Omega)$	$R_s(\Omega)$
<b>Retificador</b>	62,8	550	3,2
<b>Inversor</b>	24,5	550	0,33

### 6.1.2 Sistema CA

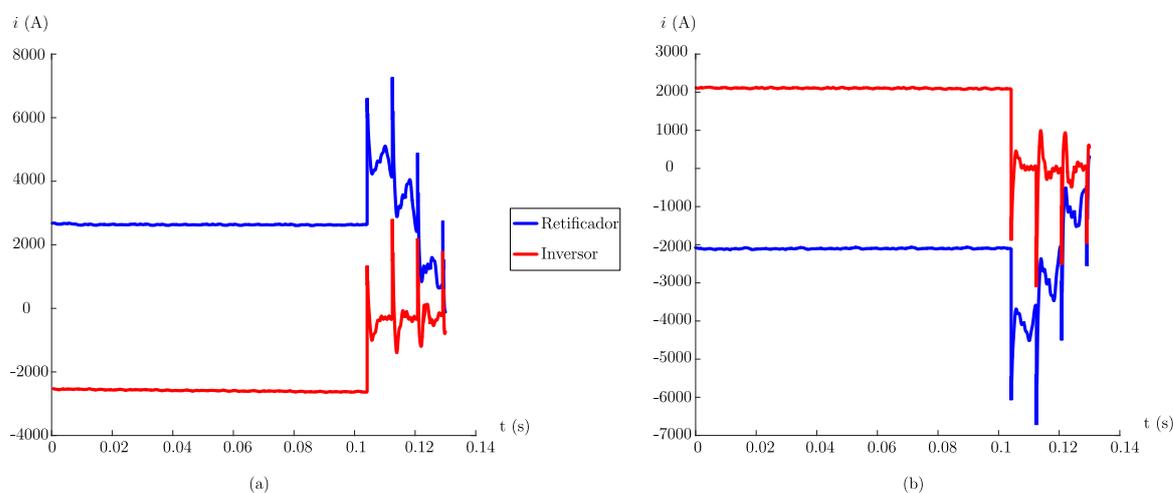
A Tabela 6.2 apresenta os parâmetros dos circuitos equivalentes que representam as redes CA de ambos os lados retificador e inversor e cujas tensões nominais CA são de 500 kV. Conforme pode ser observado na Figura 6.2, o arranjo desses circuitos foi feito a partir de três partes, a saber, uma resistência  $R_s$  em série com o paralelo de uma indutância  $L_p$  e uma outra resistência  $R_p$ .

## 6.2 SIMULAÇÕES REALIZADAS

A partir do modelo de transmissão em HVDC do bipolo do Rio Madeira descrito na seção anterior, foram conduzidos testes em que foram considerados dois cenários distintos: faltas entre polo e a terra e faltas entre polos. Em sistemas HVDC, especificamente, as primeiras são as mais usuais, embora faltas envolvendo os dois polos também possam ocorrer (KAMAKSHIAH; KAMARAJU, 2011). Para cada cenário de falta, foram extraídos os sinais de corrente dos terminais retificador e inversor de ambos os polos, conforme exemplo das Figuras 6.3 e 6.4, para, em seguida, serem submetidos ao algoritmo descrito no Capítulo 5. Os métodos de localização de faltas empregados para cada tipo de falta encontram-se listados na Tabela 6.3.



**Figura 6.3.** Sinais de corrente nos terminais retificador e inversor dos polos positivo e negativo, respectivamente, quando da aplicação de uma falta polo-terra.



**Figura 6.4.** Sinais de corrente nos terminais retificador e inversor dos polos positivo e negativo, respectivamente, quando da aplicação de uma falta polo-polo.

Para ambas as circunstâncias, avaliou-se a influência da posição do defeito para validação do algoritmo. Com esse intuito, foram realizadas simulações em massa variando esse parâmetro de 1 a 99% do comprimento da LT, com passo de 1%, resultando em um total de 99 casos. Aqui, fixou-se a resistência de falta  $R_f$  em 1  $\Omega$  para a falta polo-terra e 20  $\Omega$  para a falta polo-polo, por um motivo que ficará claro durante a análise.

Foi analisada também a influência da resistência de falta na localização, partindo-se de um valor de 0  $\Omega$  e extrapolando-o até 1000  $\Omega$ , com passos de 100  $\Omega$ . Neste estudo, o defeito foi fixado em 25%, 50% e 75% da LT. Por último, investigou-se a influência de imprecisões nos parâmetros da linha, através da introdução de um erro de +10% nas indutâncias dos modos aéreo e terra.

Nas simulações realizadas, considerou-se que o comprimento da linha  $L$  é conhecido sem erros. Ademais, no caso do método de dois terminais clássico, admite-se que os sinais em ambos os terminais estão ajustados para a mesma referência de tempo.

**Tabela 6.3.** Métodos de localização de faltas avaliados para cada cenário de falta.

Método	Falta Polo-Terra	Falta Polo-Polo
Dois Terminais	✓	✓
Um Terminal - Retificador	✓	✓
Um Terminal - Inversor	✓	✓
Dois Terminais usando Múltiplos Modos	✓	—
Um Terminal usando Múltiplos Modos - Retificador	✓	—
Um Terminal usando Múltiplos Modos - Inversor	✓	—

## 6.3 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Nesta seção, os resultados dos testes propostos para cada cenário de falta são apresentados e avaliados. Para simplificar a análise e a comparação dos resultados, todos as estimativas foram tomadas com o terminal retificador como referência. Vale salientar também que, para os métodos que utilizam em sua formulação somente um modo, adotou-se o modo aéreo, visto que esse possui menos atenuação e dispersão que o modo terra, conforme foi explicado na Seção 5.2.

### 6.3.1 Faltas Polo-Terra

Para este cenário de falta, considerou-se  $X = 100$  para a variável que auxilia na rotina de detecção das OV's, a qual foi mencionada na Seção 5.4.

#### 6.3.1.1 Variação do Local de Falta

As Figuras 6.5 e 6.7 apresentam os resultados obtidos quando da variação da posição da falta para a situação de uma falta entre um polo e a terra.

O polígono de frequência acumulada da Figura 6.5, mostra uma distribuição da frequência dos erros de estimação, em que a frequência acumulada de uma classe de erros, dada em porcentagem de casos, equivale à soma da frequência dessa classe com as frequências das classes anteriores. Neste sentido, pode-se interpretar curvas que possuam um crescimento mais abrupto e que cheguem mais rapidamente em 100% como aquelas que detêm um maior número de casos com baixos erros associados.

Desta figura, pode-se observar que o método de dois terminais com múltiplos modos foi o que apresentou o melhor desempenho, com 95% dos casos possuindo erro inferior a 0,0068%, o que corresponde a aproximadamente 167 metros. O método de um terminal, embora tenha tido um rápido crescimento inicial para ambos os terminais de referência, apresentou uma estagnação a partir de certo ponto em decorrência de alguns casos discrepantes, como pode ser visto nas Figuras 6.7(a) e (b). Ainda assim, em 90% dos casos o erro foi menor que 0,0057%.

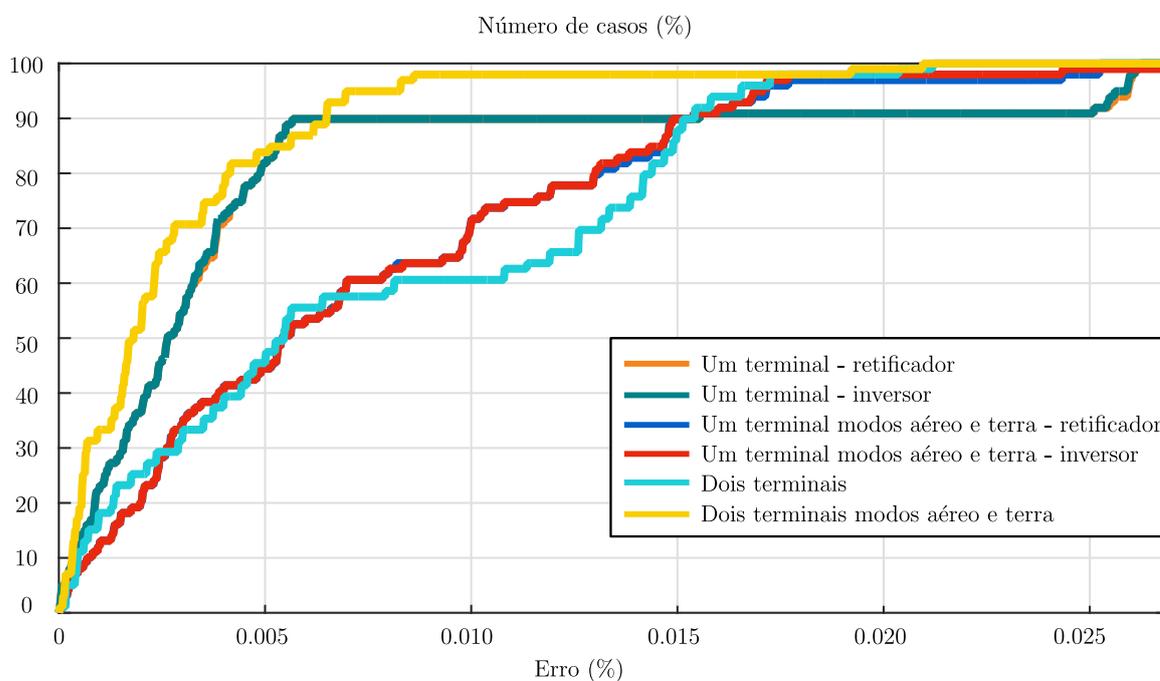
Quanto ao método de um terminal baseado em múltiplos modos, o erro foi inferior a 0,017% em 95% dos casos e exibiu um comportamento bastante similar para o monitoramento em ambos os terminais, como era esperado. Por último, o método de dois terminais resultou em erro menor que 0,016% para 95% dos casos.

A Figura 6.7, por outro lado, traz um conjunto de gráficos de barra, um para cada método, que ilustra o erro na estimativa do local da falta em função do local real em que se deu o defeito. De acordo com os itens 6.7(a) e 6.7(b), os maiores erros para a técnica de um terminal se encontram na porção intermediária da linha, apresentando valor máximo de 0,026%, conforme Tabela 6.4.

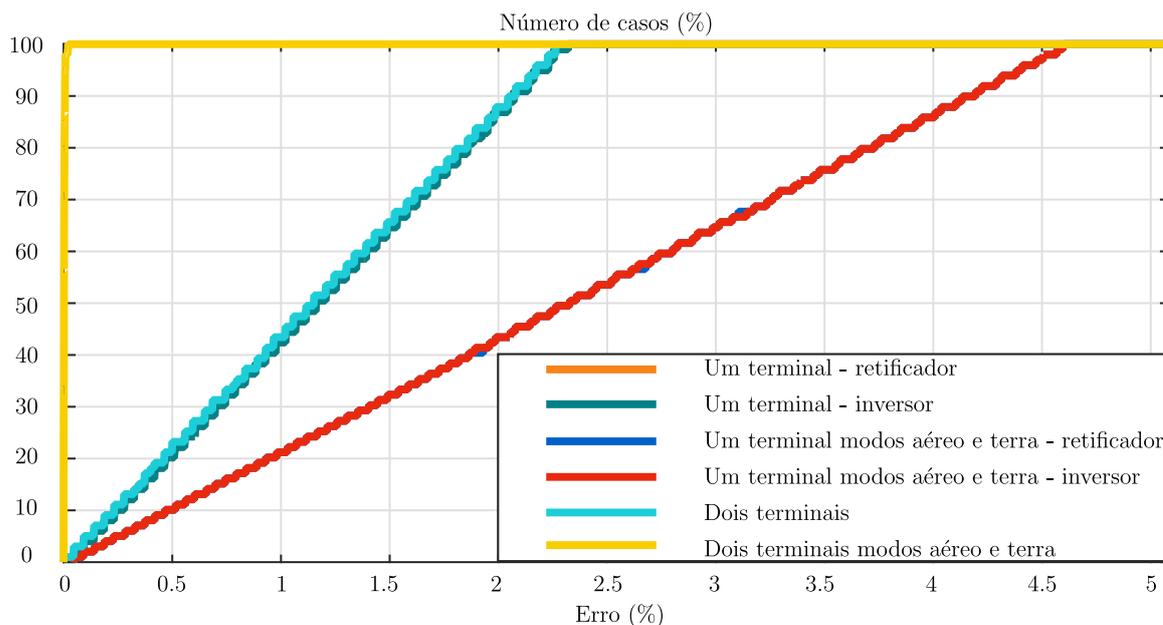
Com relação ao método de um terminal com múltiplos modos, na primeira metade da linha observa-se um erro médio de 0,0038% ou 93 metros, alcançando na segunda metade 0,0252% para o terminal retificador. Quando o terminal inversor está sendo avaliado, a metade mais próxima a ele possui erro médio de 0,0037% e metade mais distante chega a um máximo de 0,0269%. Para ambos os casos, vê-se que o método apresentou melhor desempenho quando a falta ocorreu em pontos da LT mais próximos do terminal com monitoramento. Essa deterioração da estimativa está associada ao denominado fenômeno de dispersão, que torna-se mais evidente à medida que a falta afasta-se do terminal monitorado (SCHWEITZER *et al.*, 2014a).

Ambas as técnicas de dois terminais apresentam seus menores erros no meio da LT, chegando inclusive a zero em seu centro, conforme mostram as Figuras 6.7(e) e (f). Contudo, diferentemente do de múltiplos modos, o método clássico teve um erro de estimação crescente com a aproximação do ponto de falta aos terminais da linha, chegando a um máximo de 0,0212% ou 519 metros. Esse aumento do erro também relaciona-se à dispersão supracitada.

A Tabela 6.4 traz informações adicionais que porventura não tenham sido mencionadas nesta explicação.



**Figura 6.5.** Polígonos de frequência acumulada para avaliação do desempenho dos métodos frente a uma falta polo-terra, variando-se o local do defeito.



**Figura 6.6.** Polígonos de frequência acumulada para avaliação do desempenho dos métodos frente uma falta polo-terra, considerando imprecisões nos parâmetros da linha.

**Tabela 6.4.** Valores médios, máximos e mínimos do erro de estimação de cada método para um cenário de falta polo-terra, variando-se o local da falta.

Método	Média (%)	Máximo (%)	Mínimo (%)
Um Terminal - Retificador	0,00475	0,0262	8,165E-6
Um Terminal - Inversor	0,00473	0,0262	8,165E-6
Um Terminal usando Múltiplos Modos - Retificador	0,00723	0,0252	2,533E-5
Um Terminal usando Múltiplos Modos - Inversor	0,00714	0,0269	2,533E-5
Dois Terminais	0,00752	0,0212	0
Dois Terminais usando Múltiplos Modos	0,00276	0,0210	0

**Tabela 6.5.** Valores médios, máximos e mínimos do erro de estimação de cada método para um cenário de falta polo-terra, considerando imprecisões nos parâmetros da linha.

Método	Média (%)	Máximo (%)	Mínimo (%)
Um Terminal - Retificador	1,171	2,321	0,0470
Um Terminal - Inversor	1,171	2,321	0,0470
Um Terminal usando Múltiplos Modos - Retificador	2,326	4,597	0,0464
Um Terminal usando Múltiplos Modos - Inversor	2,326	4,597	0,0464
Dois Terminais	1,145	2,264	0
Dois Terminais usando Múltiplos Modos	0,00276	0,0210	0

### 6.3.1.2 Influência de Imprecisões nos Parâmetros de Linha

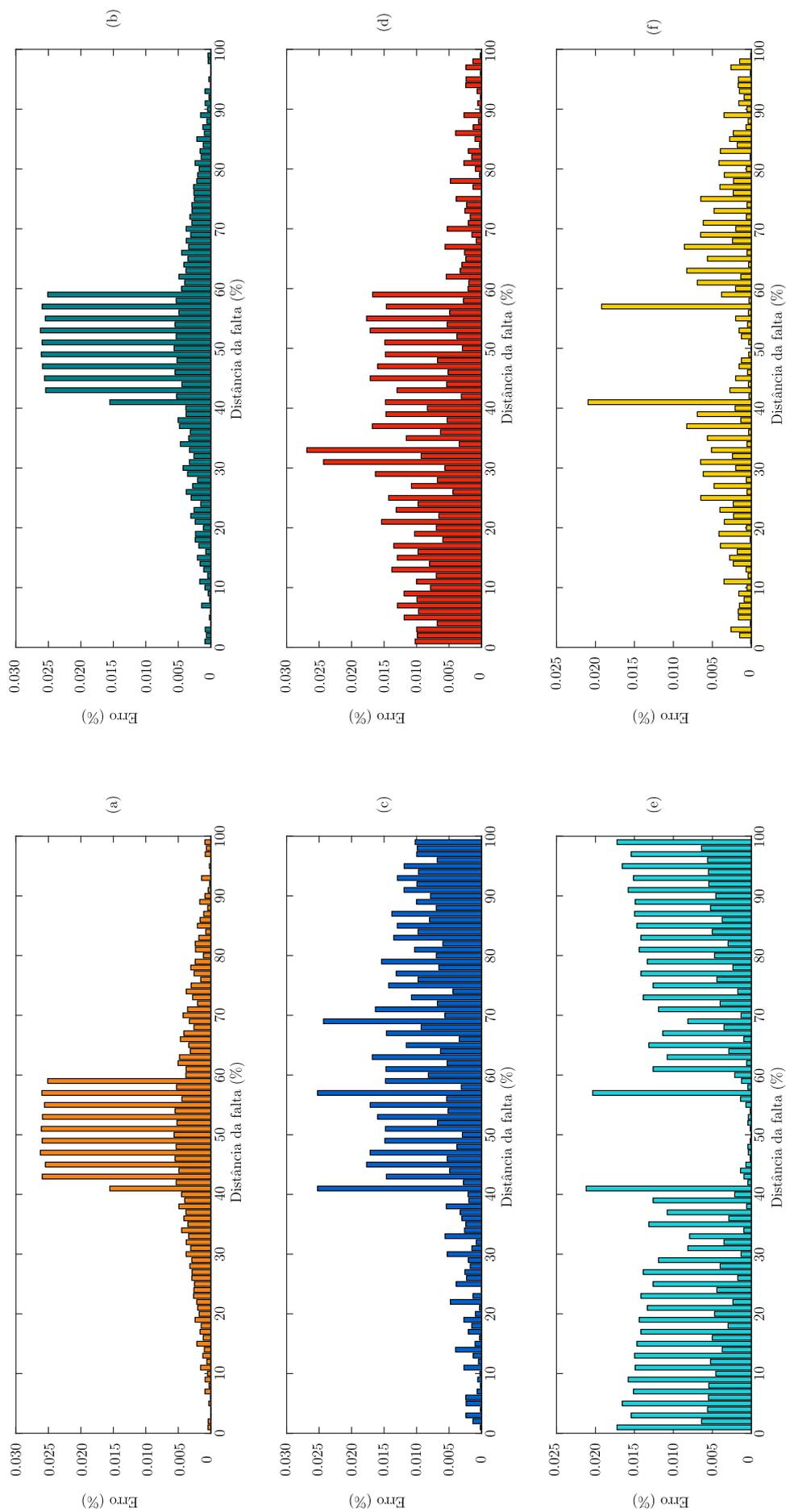
Nesta subsecção, aborda-se o desempenho dos métodos para possíveis imprecisões nos parâmetros da linha. Para tanto, introduz-se um aumento de 10% nas indutâncias dos modos

aéreo,  $L_1$ , e terra,  $L_0$ , e, variando o local de defeito, analisam-se os erros de estimação do local de falta.

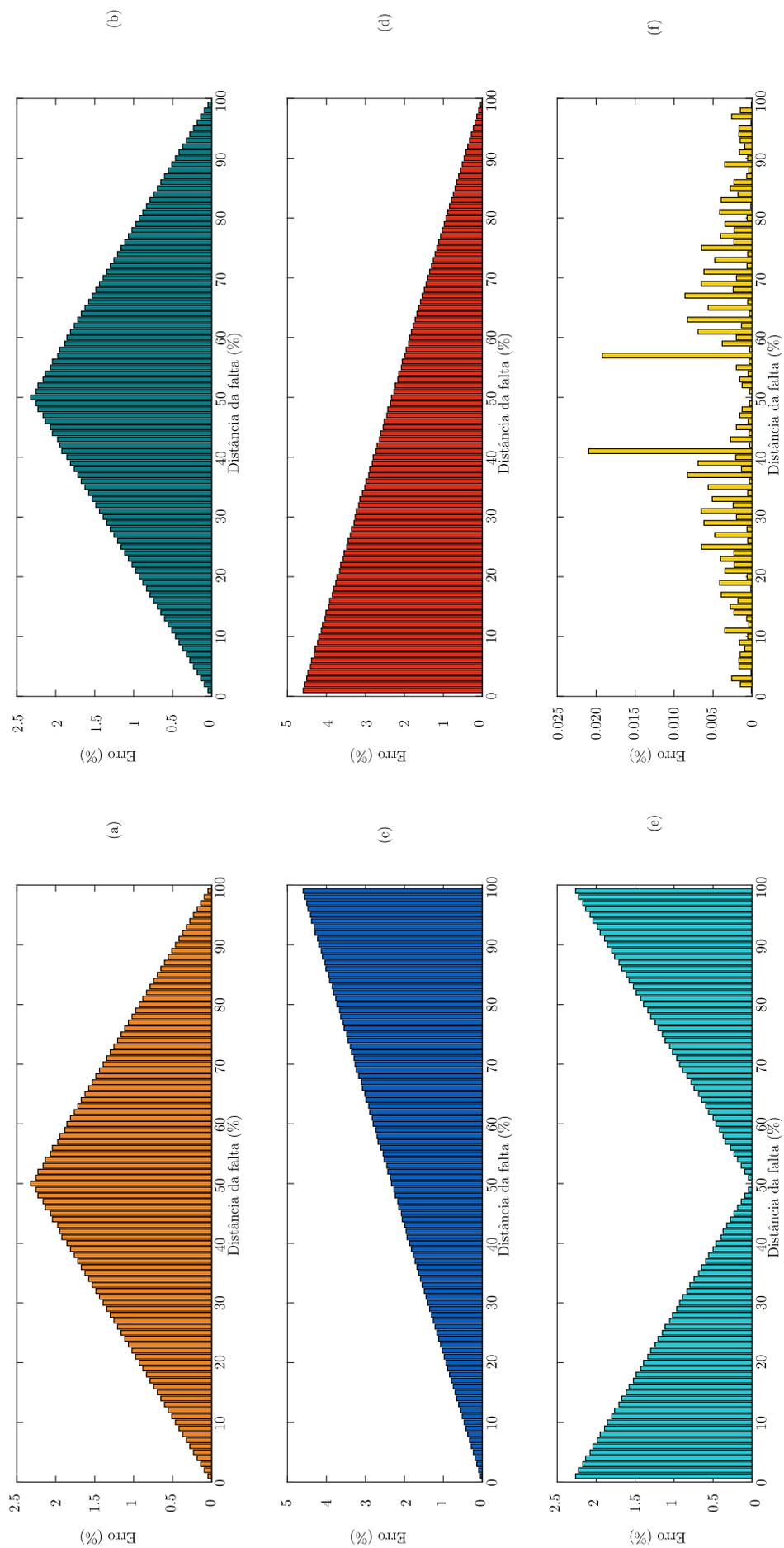
Nota-se, através dos polígonos de frequência acumulada na Figura 6.6 e dos gráficos de barras da Figura 6.8, em conjunto com a Tabela 6.5, que todas as técnicas de localização de faltas, à exceção da de dois terminais baseada em múltiplos modos, tiveram uma deterioração bastante elevada: erros que anteriormente tinham ordem de grandeza  $10^{-2}$  atingiram ordem  $10^0$ , crescendo até 325 vezes, como no caso da técnica a um terminal baseada em múltiplos modos.

Este crescimento nos erros está relacionado à dependência do ajuste da velocidade de propagação das OV's para a formulação desses métodos, conforme pode ser verificado em (5.6), (5.9), (5.11) e (5.14). A velocidade de propagação de cada modo, por sua vez, é tradicionalmente calculada por (3.19), portanto dependendo dos parâmetros indutância e capacitância por unidade de comprimento da linha. Assim, a adição de um erro ao valor da indutância acarreta em uma velocidade de propagação inferior à real, provocando uma estimação equivocada da posição do defeito.

Somente a técnica de dois terminais baseada em múltiplos modos manteve seu comportamento inalterado, uma vez que independe do ajuste de velocidade para aferição da distância do defeito, segundo (5.16). De fato, comparando as Figuras 6.7(e) e 6.7(f), percebe-se que o comportamento do método não se altera frente aos aumentos de  $L_0$  e  $L_1$ .



**Figura 6.7.** Erro na estimativa do local da falta polo-terra em função de sua posição real para os métodos de (a) um terminal - retificador; (b) um terminal - inversor; (c) um terminal em múltiplos modos - retificador; (d) um terminal em múltiplos modos - inversor; (e) dois terminais em múltiplos modos em múltiplos modos.



**Figura 6.8.** Erro na estimativa do local da falta polo-terra, considerando imprecisões nos parâmetros da linha, em função de sua posição real para os métodos de (a) um terminal - retificador; (b) um terminal - inversor; (c) um terminal em múltiplos modos - inversor; (d) um terminal em múltiplos modos - retificador; (e) dois terminais; (f) dois terminais em múltiplos modos.

### 6.3.1.3 Variação da Resistência de Falta

Os erros na localização de faltas considerando a variação da resistência de falta para os três cenários estudados estão ilustrados nas Figuras 6.9, 6.10 e 6.11.

No cenário de aplicação de uma falta à terra em 25% do comprimento da LT, os erros se mostraram constantes para todos os métodos, à exceção da técnica a um terminal com monitoramento do terminal retificador, conforme é mostrado na Figura 6.9. O erro, estimado em 0,0025% para os casos até 100  $\Omega$ , subiu para 21,057% quando do aumento da resistência de falta para 200  $\Omega$ , atingindo aproximadamente 50,009% para valores acima de 500  $\Omega$ .

Por outro lado, para a situação de ocorrência de falta em 50% da linha, todos os métodos analisados apresentaram erros na estimação bastante baixos, como pode ser visto na Figura 6.10. Vale ressaltar que nessa condição o erro de estimação das técnicas que utilizam informações de ambos os terminais da linha é nulo, fato que pode ser deduzido através da própria proposição do método.

Analogamente, para a falta à terra em 75% do comprimento da linha, os erros presentes na Figura 6.11, permanecem constantes para todos os métodos, exceto para a técnica a um terminal utilizando o terminal inversor, que apresenta o mesmo perfil de crescimento do erro: inicialmente, tem-se a estimativa de 0,0025% para os casos a 0 e 100  $\Omega$ , subindo para 21,057% quando a resistência de falta aumento para 200  $\Omega$  e, atingindo 50,009% ao alcançar em 500  $\Omega$ .

Percebe-se que, para o método de localização de faltas a um terminal, a situação de aumento da resistência de falta impacta a estimativa de posição do defeito que usa o terminal mais próximo à falta, ou seja, o cenário de defeito a 25% do comprimento da linha impacta o método que detecta OV's incidentes no lado retificador, enquanto o cenário de defeito a 75% do comprimento da linha impacta o método que detecta OV's incidentes no lado inversor.

O crescimento do erro na aferição da localização da falta à terra se dá pela diminuição da amplitude dos sinais de corrente incidentes. Como o algoritmo implementado para detecção de picos trabalha com uma comparação estática entre amplitudes de picos consecutivos, a atenuação da amplitude dos sinais comparados torna a relação condicional supracitada falsa e um pico de OV deixa de ser detectado, prejudicando a precisão do algoritmo.

Um ponto interessante que deve ser salientado na presente análise é a robustez dos métodos

a um terminal utilizando modos aéreo e terra frente à variação da resistência de falta. Diferentemente das técnicas clássicas, as técnicas modais fazem uso apenas dos primeiros instantes de incidência de OV's em cada modo, extinguindo a necessidade de detecção das segundas OV's incidentes, as quais já possuem uma baixa amplitude.

As Tabelas 6.6, 6.7 e 6.8 trazem informações adicionais que porventura não tenham sido mencionadas nesta explicação.

**Tabela 6.6.** Valores do erro de estimação de uma falta polo-terra localizada a 25% da linha para cada método, considerando a variação da resistência de falta.

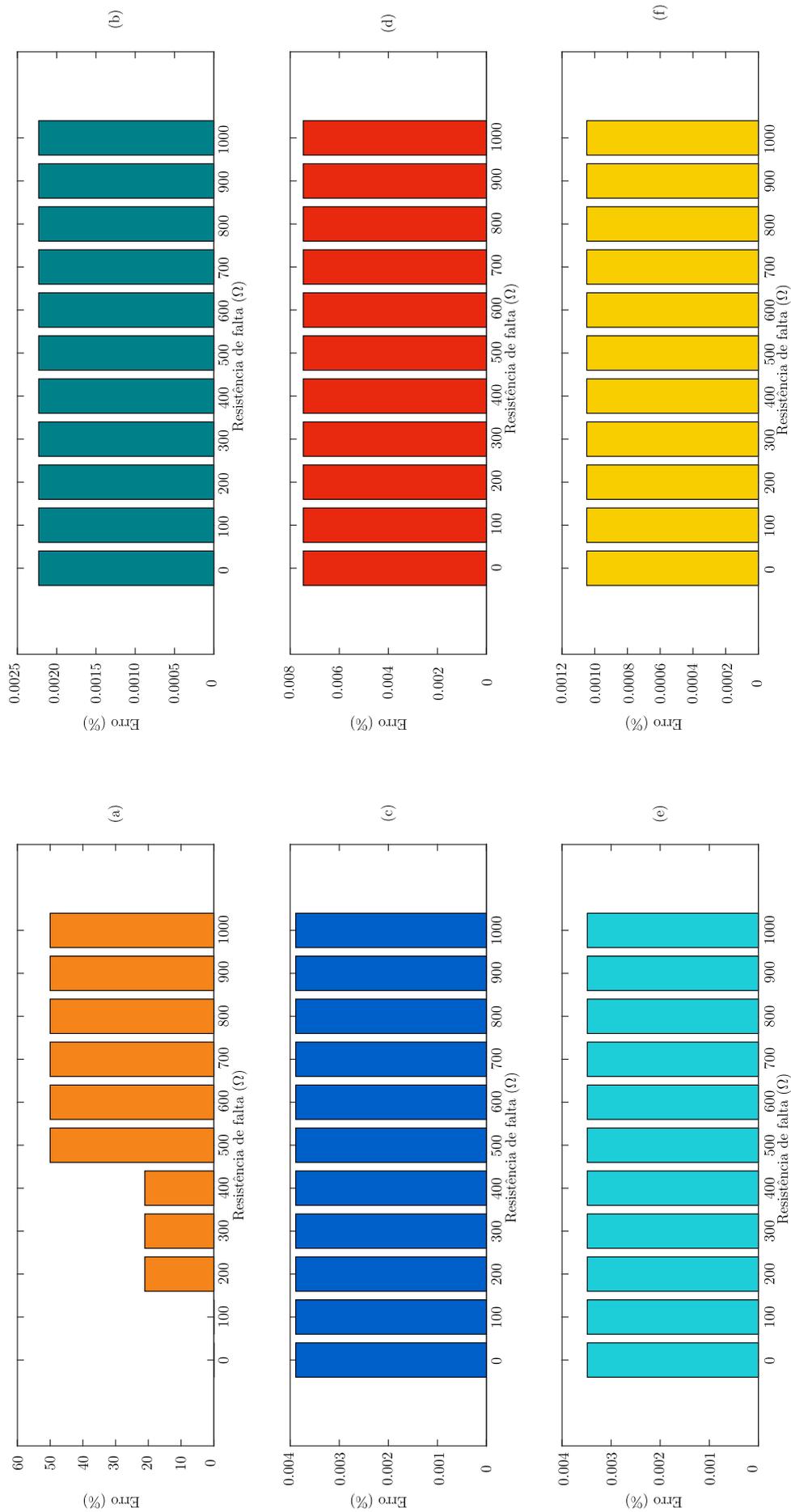
Método	0 - 100 $\Omega$ (%)	200 - 400 $\Omega$ (%)	500 - 1000 $\Omega$ (%)
Um Terminal - Retificador	0,00250	21,057	50,009
Um Terminal - Inversor	0,00223	0,00223	0,00223
Um Terminal usando Múltiplos Modos - Retificador	0,00389	0,00389	0,00389
Um Terminal usando Múltiplos Modos - Inversor	0,00747	0,00747	0,00747
Dois Terminais	0,00349	0,00349	0,00349
Dois Terminais usando Múltiplos Modos	0,00105	0,00105	0,00105

**Tabela 6.7.** Valores do erro de estimação de uma falta polo-terra localizada a 50% da linha para cada método, considerando a variação da resistência de falta.

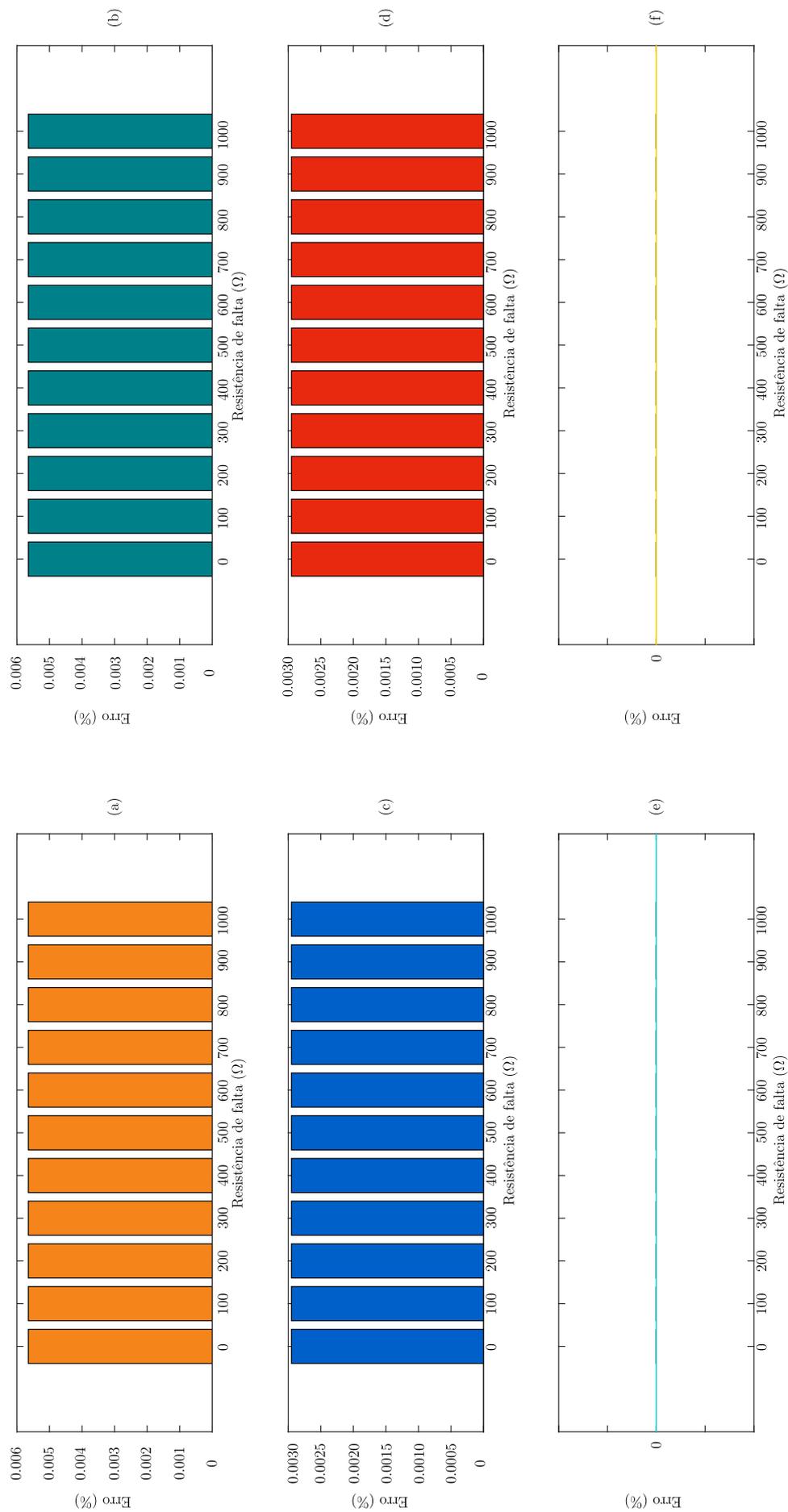
Método	0 - 1000 $\Omega$ (%)
Um Terminal - Retificador	0,00565
Um Terminal - Inversor	0,00565
Um Terminal usando Múltiplos Modos - Retificador	0,00295
Um Terminal usando Múltiplos Modos - Inversor	0,00295
Dois Terminais	0
Dois Terminais usando Múltiplos Modos	0

**Tabela 6.8.** Valores do erro de estimação de uma falta polo-terra localizada a 75% da linha para cada método, considerando a variação da resistência de falta.

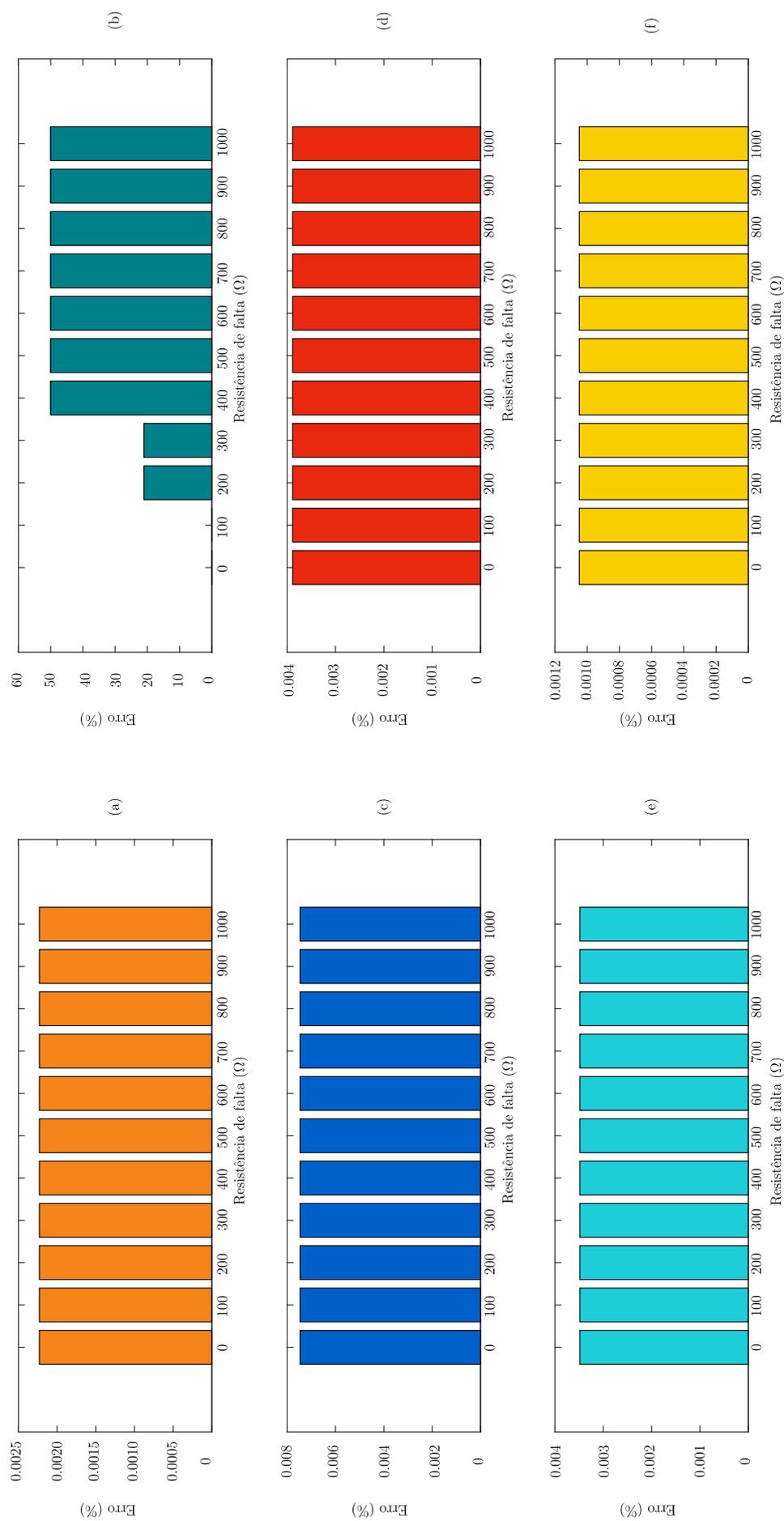
Método	0 - 100 $\Omega$ (%)	200 - 400 $\Omega$ (%)	500 - 1000 $\Omega$ (%)
Um Terminal - Retificador	0,00223	0,00223	0,00223
Um Terminal - Inversor	0,00250	21,057	50,009
Um Terminal usando Múltiplos Modos - Retificador	0,00747	0,00747	0,00747
Um Terminal usando Múltiplos Modos - Inversor	0,00389	0,00389	0,00389
Dois Terminais	0,00349	0,00349	0,00349
Dois Terminais usando Múltiplos Modos	0,00105	0,00105	0,00105



**Figura 6.9.** Erro na estimativa do local da falta polo-terra em função da resistência de falta, considerando um defeito fixado em 25%, para os métodos de (a) um terminal - retificador; (b) um terminal - inversor; (c) um terminal em múltiplos modos - retificador; (d) um terminal em múltiplos modos - inversor; (e) dois terminais; (f) dois terminais em múltiplos modos.



**Figura 6.10.** Erro na estimativa do local da falta polo-terra em função da resistência de falta, considerando um defeito fixado em 50%, para os métodos de (a) um terminal - retificador; (b) um terminal - inverter; (c) um terminal em múltiplos modos - inverter; (d) um terminal em múltiplos modos - retificador; (e) dois terminais; (f) dois terminais em múltiplos modos.



**Figura 6.11.** Erro na estimativa do local da falta polo-terra em função da resistência de falta, considerando um defeito fixado em 75%, para os métodos de (a) um terminal - inversor; (b) um terminal - retificador; (c) um terminal em múltiplos modos - inversor; (d) um terminal em múltiplos modos - retificador; (e) dois terminais; (f) dois terminais em múltiplos modos.

### 6.3.2 Faltas Polo-Polo

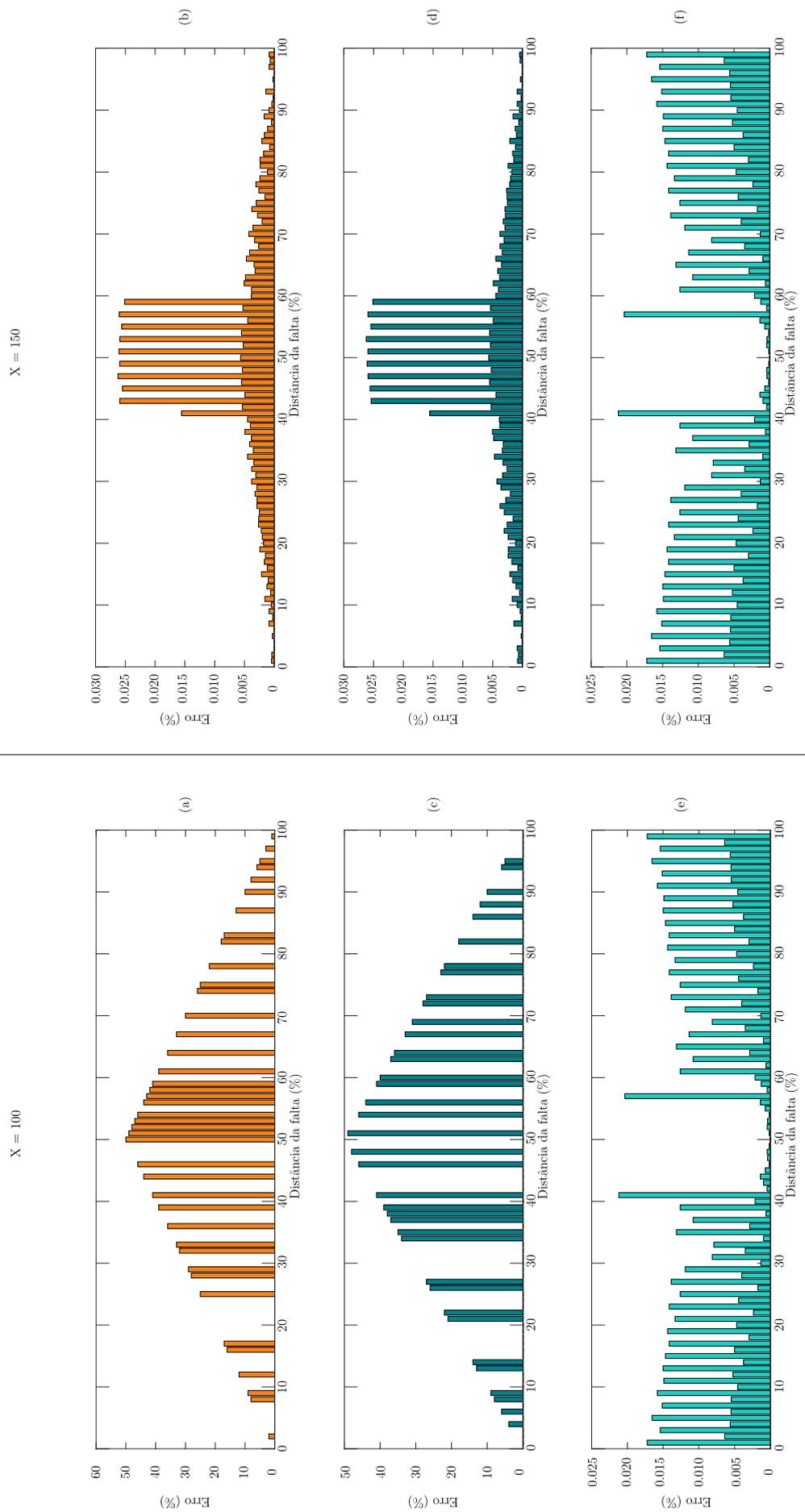
Para esta análise, não foram considerados os métodos que envolvem múltiplos modos, visto que para este tipo de falta não existe o modo terra.

#### 6.3.2.1 Variação do Local de Falta

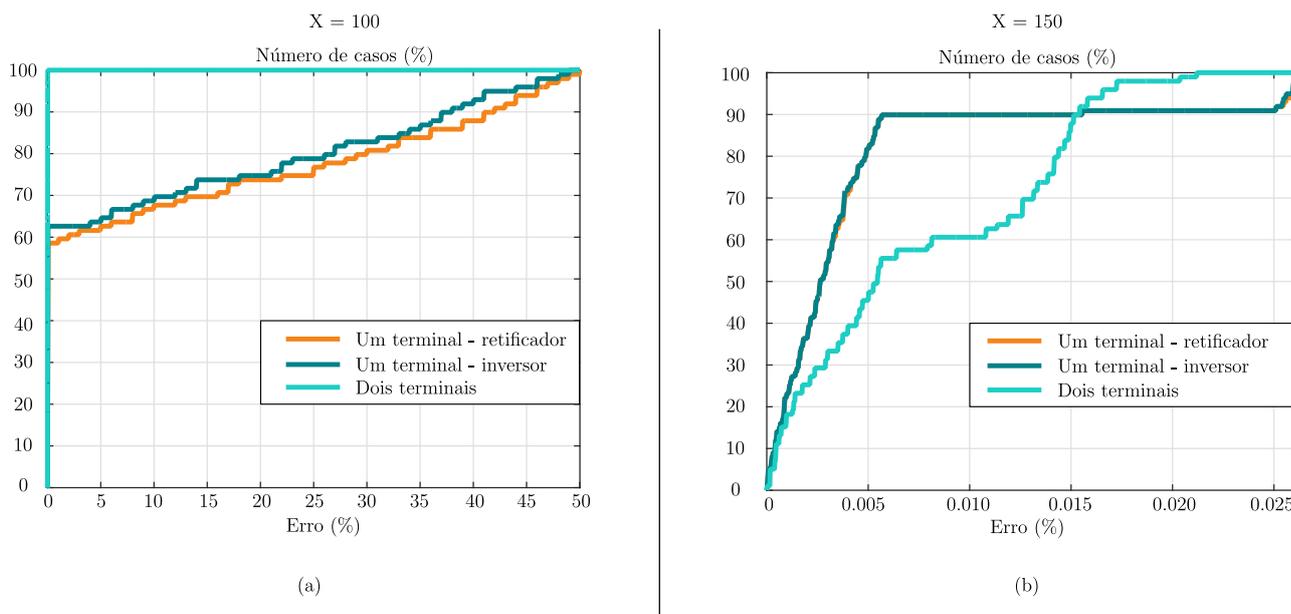
Para esta situação de falta, preliminarmente partiu-se do valor  $X = 100$  para a variável auxiliar de detecção das OV's. Contudo, como pode ser visto nas Figuras 6.12(a),(c) e (e) e 6.13(a), os erros de estimação do local do defeito para o método de um terminal atingiram valores muito altos, chegando a 50% ou 1225 km. O algoritmo, ao estabelecer um valor estático de amplitude para a comparação de picos consecutivos por meio de  $X$ , não foi capaz de discriminar o pico da OV a ser detectada de outros pontos de máximos locais do sinal e, assim o instante de chegada da OV foi erroneamente obtido pela interpolação de pontos em torno de um máximo qualquer. No caso, essa circunstância só foi problemática para o método de um terminal visto que, para faltas entre polos, as segundas frentes de onda a chegarem ao terminal monitorado apresentaram mudanças bruscas de amplitude com a variação do ponto da falta.

A fim de contornar essa questão, adotou-se  $X = 150$  para permitir a correta detecção das OV's. Na Figura 6.13(b), a qual mostra o polígono de frequência acumulada construído, o método de um terminal, para ambos os terminais, apresentou um crescimento inicial abrupto, de modo que 90% dos casos tiveram erro inferior a 0,0057%, correspondendo a 139 metros aproximadamente. A partir desse ponto, o método sofreu uma estagnação decorrente de discrepâncias de alguns casos, conforme pode ser visto na Figura 6.12(b) e (d). Novamente, esse método resultou em erros de estimação maiores para a parcela intermediária da LT.

Por outro lado, o método de dois terminais clássico, embora tenha tido um crescimento mais lento por conta da grande quantidade de casos com erros maiores, conseguiu atingir mais rapidamente 100% dos casos, isto é, o máximo erro desse método foi menor se comparado ao da outra técnica. Aqui, 95% dos casos apresentaram erro menor que 0,01723%.



**Figura 6.12.** Erro na estimativa do local da falta polo-polo em função de sua posição real para os métodos de (a) um terminal - reficador; (b) um terminal - inversor; (c) dois terminais.



**Figura 6.13.** Polígonos de frequência acumulada para avaliação do desempenho dos métodos frente uma falta polo-polo, variando-se o local do defeito, para (a)  $X=100$  e (b)  $X=150$ .

**Tabela 6.9.** Valores médios, máximos e mínimos do erro de estimação de cada método para um cenário de falta polo-polo, variando-se o local do defeito, para  $X=100$  e  $X=150$ .

Método	X = 100			X = 150		
	Média (%)	Máximo (%)	Mínimo (%)	Média (%)	Máximo (%)	Mínimo (%)
Um Terminal - Retificador	11,306	50,000	8,165E-6	0,0047	0,0262	8,165E-6
Um Terminal - Inversor	10,003	49,000	8,165E-6	0,0047	0,0262	8,165E-6
Dois Terminal	0,00752	0,0212	0	0,0075	0,0212	0

### 6.3.2.2 Influência de Imprecisões nos Parâmetros de Linha

O comportamento das técnicas de localização para o cenário de falta polo-polo é análogo ao polo-terra: o erro na estimativa cresce vertiginosamente com a variação em 10% do parâmetro de linha  $L_1$ . Aqui, todos os métodos são afetados, conforme Tabela 6.10, visto que dependem da velocidade de propagação do modo aéreo.

**Tabela 6.10.** Valores médios, máximos e mínimos do erro de estimação de cada método para um cenário de falta polo-polo, considerando imprecisões nos parâmetros da linha e  $X=150$ .

Método	Média (%)	Máximo (%)	Mínimo (%)
Um Terminal - Retificador	1,171	2,321	0,0470
Um Terminal - Inversor	1,171	2,321	0,0470
Dois Terminais	1,145	2,264	0

### 6.3.2.3 Variação da Resistência de Falta

Da mesma forma que no cenário de falta entre polo e a terra, neste teste variou-se o valor da resistência de falta de 0 a 1000  $\Omega$  para avaliar o desempenho do algoritmo.

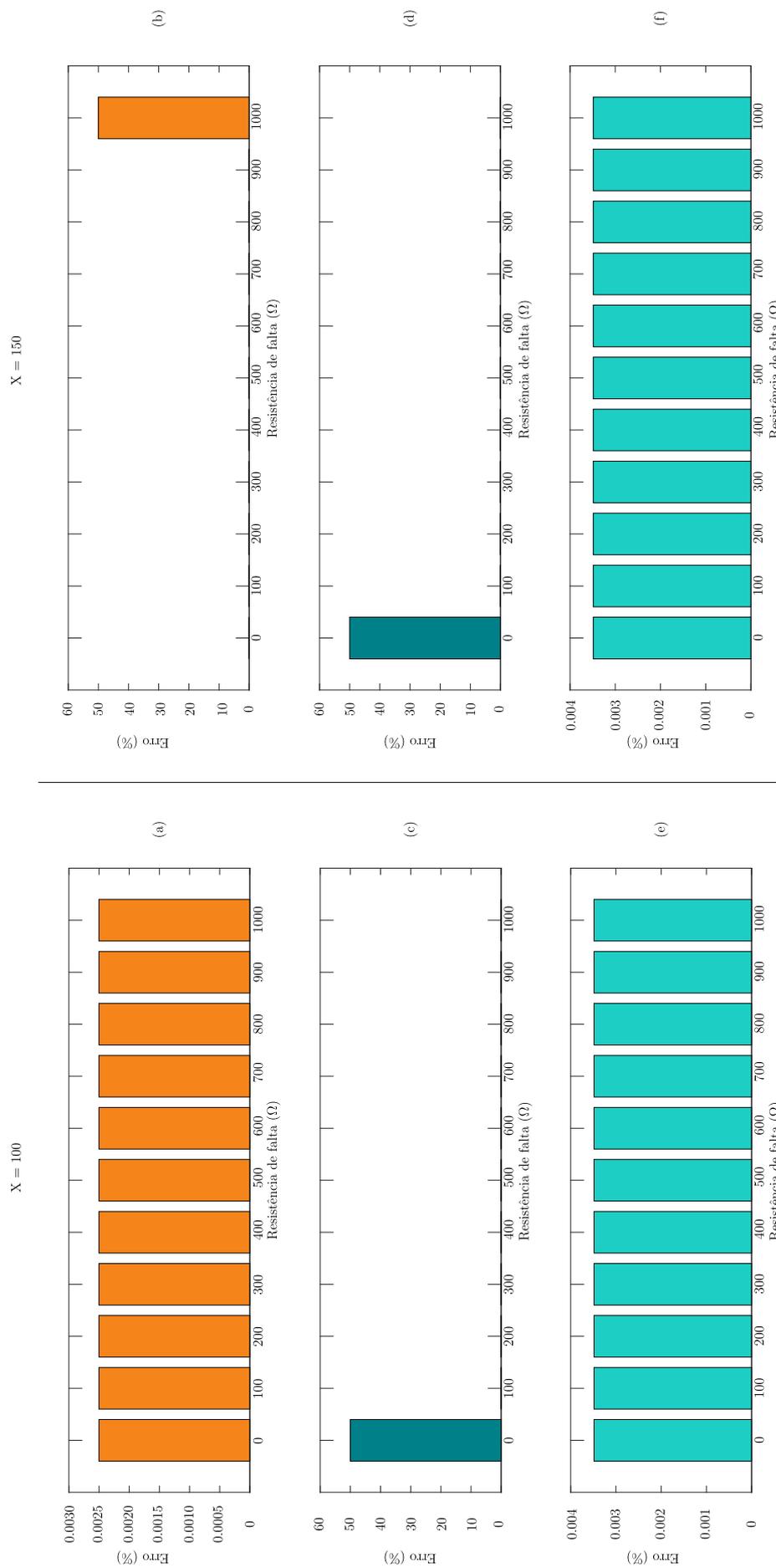
Para uma falta ocorrendo em 25% da linha, verifica-se pela Figura 6.14 e pela Tabela 6.11, que o erro de estimação para o método de dois terminais clássico não foi afetado nem pelo aumento da resistência de falta e nem pela mudança no valor de  $X$ , mantendo-se em 0,00345%. Isso pode ser justificado pelo fato de que as primeiras ondas incidentes em cada terminal apresentaram amplitudes consideráveis mesmo com resistências de falta bem altas, sendo possível sua identificação.

Quanto ao método de um terminal com monitoramento do retificador, nota-se no item (b) da Figura 6.14 um crescimento vertiginoso do erro para uma resistência de 1000  $\Omega$ , uma vez que a amplitude da segunda frente de onda se tornou menor que 150 e, portanto, o algoritmo não conseguiu detectá-la.

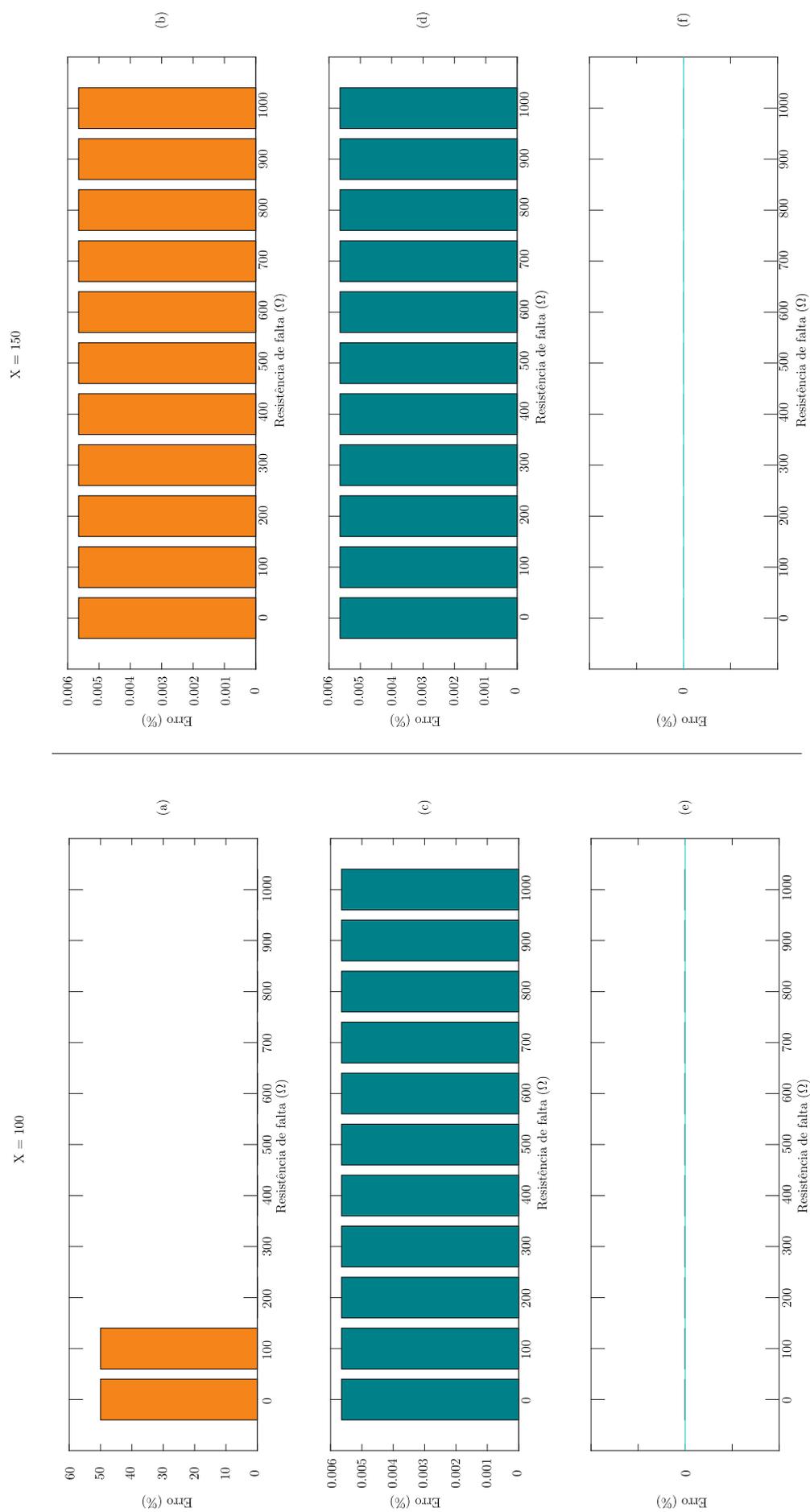
Quando o terminal monitorado é o inversor, dado que a falta ocorreu na metade da linha mais afastada no terminal, a segunda OV a chegar nele é originada da reflexão no terminal retificador e posterior refração no ponto de falta, conforme explicado na Seção 5.6.2. Para uma falta entre polos, especificamente, por tratar-se de uma falta simétrica e só existir o modo aéreo, pode-se utilizar a compreensão de OVs propagando-se em LTs com ramificações da Seção 3.4 para obter o quanto de onda é transmitida no ponto de falta. A partir de (3.54), tomando  $Z_3 = R_f$ , tem-se que, para uma resistência de falta nula, a OV refratada no ponto de falta  $i_{t,2}$  torna-se nula também. Como consequência, o algoritmo não consegue estimar corretamente a posição do curto-circuito. É por esse motivo que, para tornar possível o estudo desenvolvido na subseção 6.3.2.1, utilizou-se  $R_f = 20 \Omega$ . Por outro lado, para uma falta polo-terra, por ser assimétrica, haverá uma conexão dos diferentes modos de propagação no ponto de falta, de modo que a determinação das OVs refletidas e transmitidas neste ponto torna-se mais complexa (PHADKE; THORP, 2009).

A análise para o caso de falta em 75% da linha, evidenciada na Figura 6.16, é análoga ao do caso de 25%, porém invertendo o entendimento do método de um terminal do retificador para o do inversor, e vice-versa.

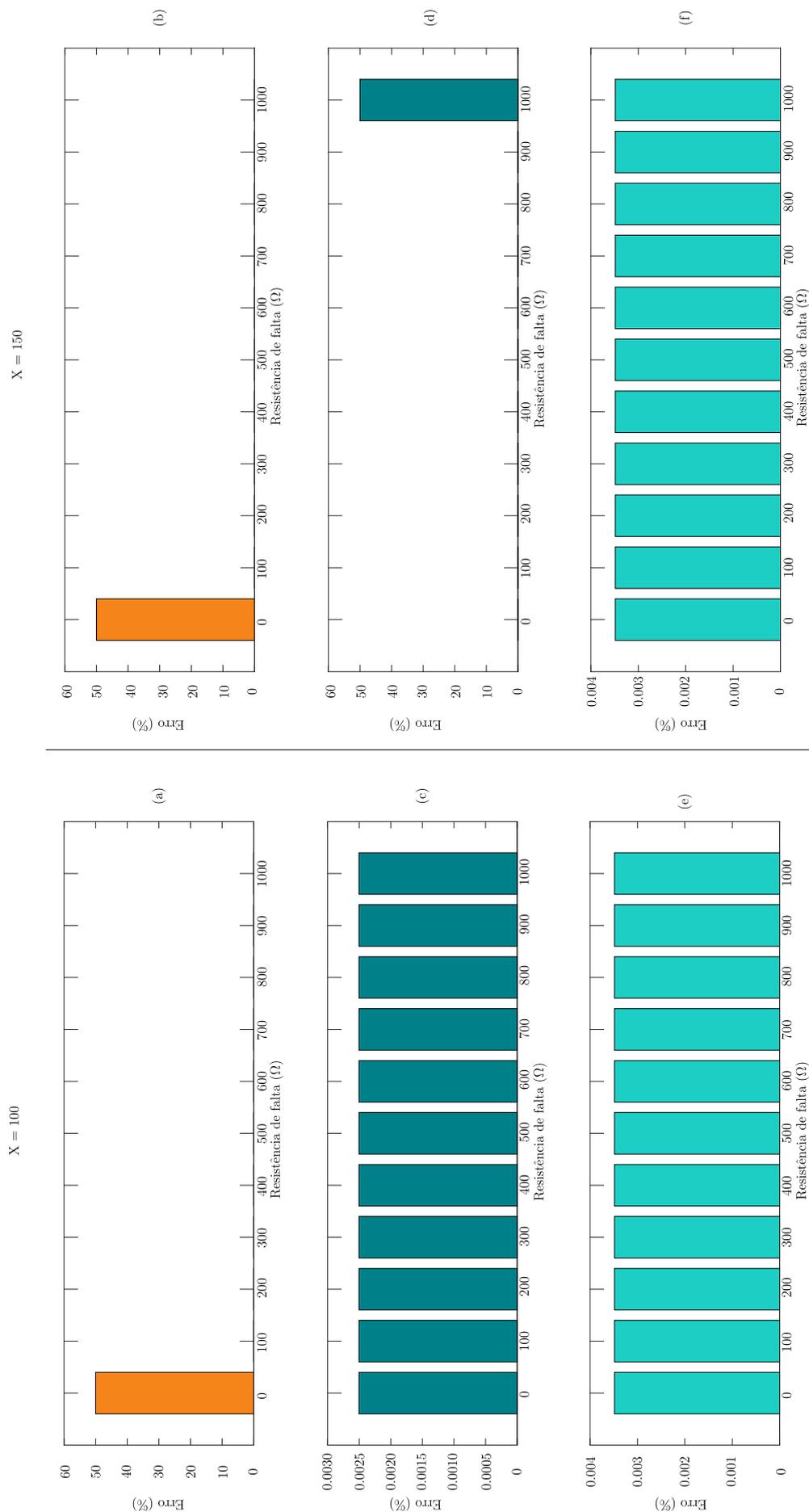




**Figura 6.14.** Erro na estimativa do local da falta polo-polo em função da resistência de falta, considerando um defeito fixado em 25%, para os métodos de (a) um terminal - retificador; (b) um terminal - inversor; (c) dois terminais.



**Figura 6.15.** Erro na estimativa do local da falta polo-polo em função da resistência de falta, considerando um defeito fixado em 50%, para os métodos de (a) um terminal - retificador; (b) um terminal - inversor; (c) dois terminais.



**Figura 6.16.** Erro na estimativa do local da falta polo-polo em função da resistência de falta, considerando um defeito fixado em 75%, para os métodos de (a) um terminal - inversor; (b) um terminal - retificador; (c) dois terminais.

# CONCLUSÕES E PROPOSTAS FUTURAS

Este trabalho avalia as técnicas de localização de defeitos em uma linha de transmissão em HVDC bipolar, as quais são fundamentadas na teoria de ondas viajantes. Para tanto, fez-se uso da transcrição de um modelo do bipolo do complexo gerador do Rio Madeira para a ferramenta ATP, a partir do qual foram simulados dois cenários de faltas, a saber, entre um dos polos e a terra e entre polos. Para cada um dos cenários, foram variados os parâmetros posição do defeito e resistência de falta. Foi também ponderada a sensibilidade da estimação do local da falta com relação a possíveis imprecisões nos parâmetros de linha.

Uma vez extraídos os sinais de corrente de ambos os polos nos terminais retificador e inversor monitorados, estes foram submetidos a um algoritmo cujo objetivo final é a correta determinação dos instantes de chegada aos terminais das OV's que são lançadas a partir do ponto de falta. Quatro métodos de localização de faltas foram avaliados com a utilização dos instantes de incidência obtidos: método a um terminal, método a dois terminais clássico, método a um terminal baseado em múltiplos modos e método a dois terminais utilizando múltiplos modos. As técnicas de um terminal foram avaliadas segundo cada um dos terminais.

Para todas as análises, calculou-se um erro percentual entre a estimativa dada pelo algoritmo e a posição em que de fato ocorreu o defeito para facilitar a avaliação dos métodos. No que se refere à aferição e comparação dos resultados de todos os métodos, utilizou-se como instrumentos os polígonos de frequência, os gráficos de barras e tabelas contendo informações de erros mínimo, máximo e médio.

A partir dos resultados, verificou-se que o método cujas estimativas de local foram mais afetadas pela introdução de um erro nos parâmetros da linha foi o de um terminal usando múltiplos modos para a falta polo-terra, com um erro máximo de 4,597% ou 112,63 km. Como esperado, o método de dois terminais usando múltiplos modos não foi afetado, visto que não utiliza esses parâmetros em sua formulação.

Com relação à influência da resistência de falta, os métodos no geral não resultaram em erros maiores quando do aumento da resistência, à exceção do método de um terminal para faltas próximas do terminal monitorado. As segundas OV's incidentes no terminal, que já possuíam uma amplitude baixa, foram ainda mais atenuadas por conta da alta resistência de falta, tornando difícil para o algoritmo identificá-las, uma vez que ele é baseado numa comparação estática de picos. Adicionalmente, para o caso de faltas polo-polo, uma resistência de falta próxima a zero para situações em que a falta se deu na metade mais distante do terminal monitorado acarretou em ondas refratadas no ponto de falta inexistentes. Como consequência o método de um terminal também resultou em erros de estimativa muito elevados.

A principal limitação do algoritmo implementado é que a comparação entre picos consecutivos do sinal avaliado para identificação de OV's é realizada tendo como base um valor  $X$  fixo. No decorrer deste trabalho, verificaram-se alguns casos em que essa falta de flexibilidade desse parâmetro resultou em estimativas equivocadas do local da falta.

Entretanto, é importante salientar também que a linha haver sido modelada como perfeitamente transposta e com parâmetros constantes com a frequência pode ter introduzido algum erro nos resultados, sobretudo no que diz respeito à determinação da velocidade de propagação. Ainda assim, dado que o algoritmo conseguiu determinar, para uma linha de 2450 km de extensão, o local da falta com erros médios de algumas centenas de metros para maioria dos casos analisados, pode-se avaliar o seu desempenho como satisfatório.

Abaixo, elencam-se propostas de trabalhos futuros dentro do tema abordado nesse texto:

- Aprimorar a etapa de detecção de picos de OV's, criando mecanismos que permitam a identificação de OV's de amplitudes variadas;
- Estudar novos cenários, como o impacto da perda de sincronismo de dados, por exemplo, para testes de desempenho das técnicas de localização de faltas;
- Elaborar uma metodologia capaz de distinguir a origem das segundas OV's em métodos a um terminal a partir dos próprios sinais (polaridade, por exemplo), em vez do conhecimento prévio do local de falta;
- Considerar a dependência dos parâmetros da linha com a frequência para nova avaliação do algoritmo;
- Estudar outros métodos de localização de faltas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDO, M.; SCHWEITZER, E.; BAKER, R. Development and field-data evaluation of single-end fault locator for two-terminal hvdc transmission lines-part 2: Algorithm and evaluation. *IEEE transactions on power apparatus and systems*, IEEE, n. 12, p. 3531–3537, 1985. Citado 2 vezes nas páginas 33 and 34.
- BEWLEY, L. V. Traveling waves on transmission systems. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, IEEE, v. 50, n. 2, p. 532–550, 1931. Citado 2 vezes nas páginas 31 and 32.
- CAVALCANTE, P. A. H. *Localização de faltas em linhas de transmissão usando morfologia matemática*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2011. Citado na página 5.
- CHEN, P.; XU, B.; LI, J. A traveling wave based fault locating system for hvdc transmission lines. In: IEEE. *Power System Technology, 2006. PowerCon 2006. International Conference on*. [S.l.], 2006. p. 1–4. Citado na página 34.
- DRAGAN, J.; KHALED, A. *High Voltage Direct Transmission - Converters, Systems and DC Grids*. [S.l.]: Wiley, 2015. Citado na página 4.
- GLOVER, J. D.; SARMA, M. S.; OVERBYE, T. *Power System Analysis & Design, SI Version*. [S.l.]: Cengage Learning, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 24, 25, and 26.
- HART, D. W. *Power electronics*. [S.l.]: Tata McGraw-Hill Education, 2011. Citado na página 16.
- HEDMAN, D. E. Propagation on overhead transmission lines i-theory of modal analysis. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, IEEE, v. 84, n. 3, p. 200–205, 1965. Citado na página 37.
- KAMAKSHIAH, S.; KAMARAJU, V. *HVDC transmission*. [S.l.]: TATA McGraw-Hill, 2011. Citado 8 vezes nas páginas 3, 10, 14, 15, 16, 18, 21, and 53.
- KIM, C.-K.; SOOD, V. K.; JANG, G.-S.; LIM, S.-J.; LEE, S.-J. *HVDC transmission: power conversion applications in power systems*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2009. Citado 3 vezes nas páginas 18, 19, and 20.
- KIMBARK, E. W. Transient overvoltages caused by monopolar ground fault on bipolar dc line: Theory and simulation. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, IEEE, n. 4, p. 584–592, 1970. Citado 2 vezes nas páginas 37 and 38.
- KIMBARK, E. W. *Direct current transmission*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1971. v. 1. Citado 4 vezes nas páginas 1, 2, 4, and 21.

- LIU, X.; OSMAN, A.; MALIK, O. Hybrid traveling wave/boundary protection for bipolar hvdc line. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 13, n. 4, p. 1073–1078, 2009. Citado na página 5.
- LIU, X.; OSMAN, A.; MALIK, O. Hybrid traveling wave/boundary protection for monopolar hvdc line. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 24, n. 2, p. 569–578, 2009. Citado na página 5.
- LIU, Y.; SHENG, G.; HE, Z.; JIANG, X. A traveling wave fault location method for earth faults based on mode propagation time delays of multi-measuring points. *Przeegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*, v. 88, p. 254–258, 2012. Citado na página 46.
- LOPES, F. V. Settings-free traveling-wave-based earth fault location using unsynchronized two-terminal data. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 31, n. 5, p. 2296–2298, 2016. Citado 4 vezes nas páginas 34, 35, 45, and 47.
- LUZ, G. S.; JUNIOR, D. S. C.; JUNIOR, S. G. HvdC transmission line modeling analysis in pscad and atp programs. In: *XIII Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning*. [S.l.: s.n.], 2014. Citado 3 vezes nas páginas v, 50, and 52.
- MAGNAGO, F. H.; ABUR, A. Fault location using wavelets. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 13, n. 4, p. 1475–1480, 1998. Citado 2 vezes nas páginas 33 and 34.
- NAIDU, S. R. *Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência*. [S.l.]: Grafset, 1983. Citado 5 vezes nas páginas 22, 26, 28, 31, and 38.
- NANAYAKKARA, K.; RAJAPAKSE, A.; WACHAL, R. Fault location in extra long hvdc transmission lines using continuous wavelet transform. In: *International Conference on Power Systems Transients*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 14–17. Citado na página 34.
- PHADKE, A. G.; THORP, J. S. *Computer relaying for power systems*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2009. Citado na página 69.
- PIPES, L. A. Linear transformations in three-phase circuits. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, IEEE, v. 60, n. 6, p. 351–356, 1941. Citado na página 37.
- RAMOS, J. P. T. *et al. Localização de faltas em linhas HVDC usando ondas viajantes e morfologia matemática*. Dissertação (Mestrado), 2015. Citado 4 vezes nas páginas iv, 3, 17, and 19.
- RASHID, M. H. *Power electronics handbook*. [S.l.]: Academic press, 2001. Citado na página 16.
- SADIKU, M. N. O. *Elements of Electromagnetics*. [S.l.]: Oxford university Press, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 24 and 25.
- SAHA, M. M.; IZYKOWSKI, J.; ROSOŁOWSKI, E. *Fault Location on Power Networks*. London: Ed. Springer, 2010. (Power Systems). ISBN 978-1-84882-885-8. Citado na página 45.
- SCHWEITZER, E.; GUZMÁN, A.; MYNAM, M.; SKENDZIC, V.; KASZTENNY, B.; GALLACHER, C.; MARX, S. Accurate single-end fault location and line-length estimation using traveling waves. In: *13th International Conference on Developments in Power System Protection*. [S.l.: s.n.], 2016. Citado 2 vezes nas páginas 34 and 35.

SCHWEITZER, E. O.; GUZMAN, A.; MYNAM, M. V.; SKENDZIC, V.; KASZTENNY, B.; MARX, S. Locating faults by the traveling waves they launch. *2014 67th Annual Conference for Protective Relay Engineers, CPRE 2014*, p. 95–110, 2014. Citado 4 vezes nas páginas 23, 37, 38, and 56.

SCHWEITZER, E. O.; GUZMÁN, A.; MYNAM, M. V.; SKENDZIC, V.; KASZTENNY, B.; MARX, S. Locating faults by the traveling waves they launch. In: IEEE. *Protective Relay Engineers, 2014 67th Annual Conference for*. [S.l.], 2014. p. 95–110. Citado 3 vezes nas páginas 34, 39, and 45.

SOOD, V. K. *HVDC and FACTS Controllers - Application of Static Converters in Power Systems*. [S.l.]: Kluwer Academics Publisher, 2004. Citado 3 vezes nas páginas 4, 9, and 10.

ZANETTA, L. C. *Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência*. [S.l.]: Edusp, 2003. Citado 3 vezes nas páginas 25, 27, and 28.

ZHANG, Y.; TAI, N.; XU, B. Fault analysis and traveling-wave protection scheme for bipolar hvdc lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 27, n. 3, p. 1583–1591, 2012. Citado na página 5.