



**PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE LINHAS DE TRANSMISSÃO  
BASEADA NA TEORIA DE ONDAS VIAJANTES  
APLICADA EM LINHAS HÍBRIDAS**

**CAIO MULLER SANTOS RIBEIRO**

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

**FACULDADE DE TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE LINHAS DE TRANSMISSÃO  
BASEADA NA TEORIA DE ONDAS VIAJANTES APLICADA EM  
LINHAS HÍBRIDAS

CAIO MULLER SANTOS RIBEIRO

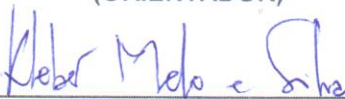
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.

APROVADA POR:



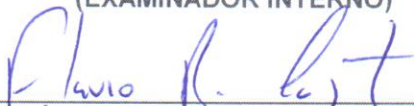
---

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



---

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



---

FLÁVIO BEZERRA COSTA, Dr., UFRN  
(EXAMINADOR EXTERNO)

Brasília, 26 de outubro de 2018.

## FICHA CATALOGRÁFICA

RIBEIRO, CAIO MULLER SANTOS

Proteção Diferencial de Linhas de Transmissão Baseada na Teoria de Ondas Viajantes Aplicada em Linhas Híbridas. [Distrito Federal] 2018.

xxv, 123p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Mestre, Engenharia Elétrica, 2018).

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

Departamento de Engenharia Elétrica

1. Proteção Diferencial

3. Linhas Híbridas

I. ENE/FT/UnB

2. Ondas Viajantes

4. Domínio do Tempo

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

RIBEIRO, C. M. S. (2018). Proteção Diferencial de Linhas de Transmissão Baseada na Teoria de Ondas Viajantes Aplicada em Linhas Híbridas, Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação 708/2018 DM PPGE, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 123p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Caio Muller Santos Ribeiro

TÍTULO: Proteção Diferencial de Linhas de Transmissão Baseada na Teoria de Ondas Viajantes Aplicada em Linhas Híbridas.

GRAU: Mestre ANO: 2018

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

Caio Muller Santos Ribeiro

Caio Muller Santos Ribeiro

Universidade de Brasília (UnB)

Campus Darcy Ribeiro

Faculdade de Tecnologia (FT)

Departamento de Engenharia Elétrica (ENE)

CEP 70.919-970 - Brasília - DF - Brasil

*Aos meus pais, Dila e Paiano, DEDICO.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiro e sempre a Deus e Nossa Senhora Aparecida por me iluminarem em mais esta etapa da minha vida, dando-me forças para enfrentar os desafios e sendo a base a realização deste sonho.

Aos meus pais Dila e Paiano por sempre apoiarem e acreditarem em mim.

Ao professor Dr. Felipe V. Lopes pela atenção, conselhos, disponibilidade, confiança e apoio fundamentais para a realização deste trabalho.

A todos os meus amigos e colegas do Laboratório de Proteção de Sistemas Elétricos (LAPSE), pelo incentivo e apoio durante essa caminhada.

Aos professores e colegas de aula no Departamento de Engenharia Elétrica (ENE) por compartilharem comigo seus conhecimentos.

Aos porteiros, seguranças, auxiliares de limpeza, vigilantes e secretários da Universidade de Brasília (UnB) por proporcionarem o ambiente necessário para a realização deste trabalho.

Aos amigos e familiares de Brasília por me receberem tão bem nesta cidade, além de proporcionar momentos em que eu pudesse recarregar as energias para conseguir desenvolver as atividades do mestrado.

Aos amigos e familiares da minha cidade natal Correntina-BA por todo incentivo para que prosseguisse nos estudos após o término da graduação.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro desta pesquisa.

Por fim, a todos que de alguma forma tenham contribuído para a realização deste trabalho.

## RESUMO

Apresenta-se nesta dissertação uma avaliação de desempenho da função de proteção diferencial de linhas de transmissão (LTs) baseada na teoria de ondas viajantes (TW87) quando aplicada em linhas híbridas. As funções de proteção no domínio do tempo têm sido uma tendência em relés digitais comerciais, pois essas eliminam a necessidade de estimar fasores, operando assim mais rapidamente do que as funções de proteção tradicionais. Dentre as funções no domínio do tempo, destacam-se as baseadas na teoria de ondas viajantes (OVs), e em especial a função TW87, que tem apresentado tempos de atuação da ordem de poucos milissegundos, mantendo a segurança da proteção. Em sua concepção, a TW87 foi desenvolvida para proteger LTs aéreas, porém, de acordo com seus desenvolvedores, a função pode ser aplicada em linhas híbridas (formadas por trechos aéreos e cabos subterrâneos e/ou submarinos), desde que algumas restrições sejam levadas em consideração. Nesse sentido, buscou-se nesta dissertação esclarecer tais particularidades. Para tanto, foram simuladas faltas internas e externas em um sistema teste de 230 kV/60 Hz composto por uma linha híbrida com diferentes composições de trechos aéreos e subterrâneos no *Alternative Transients Program* (ATP). A partir dos testes realizados, avaliou-se a influência do número de trechos da linha híbrida e de aproximações da linha híbrida por uma LT aérea de igual comprimento sobre o desempenho da TW87. Dos resultados obtidos, percebe-se que as amplitudes das OVs são alteradas nas junções entre trechos, e tal fato se reflete nas variáveis da TW87. Além disso, nota-se que existe uma diferença entre as velocidades de propagação das OVs entre trechos, o que repercute na localização de faltas estimada e no cálculo da amplitude do sinal de restrição da função quando se aproxima a linha híbrida por uma LT aérea, implicando assim em restrições no comprimento do(s) trecho(s) subterrâneo(s). Dessa forma, conclui-se das análises realizadas que a aplicação da TW87 em linhas híbridas requer cautela, ainda que tenha se mostrado confiável na maioria dos casos avaliados.

**Palavras-chave:** Linhas híbridas, linhas de transmissão, ondas viajantes, proteção diferencial, proteção no domínio do tempo, TW87.

## ABSTRACT

This paper presents a performance evaluation of the transmission line (TL) differential protection function based on the theory of traveling waves (TW87) when applied to hybrid lines. Time domain protection functions have been a trend in the market for digital relays since they eliminate the need to estimate phasors, thus operating faster than traditional protection functions. Among the time domain functions, those based on the theory of traveling waves (TWs), and in particular the TW87 function, which has presented operation times of the order of a few milliseconds, maintaining the protection security. In its design, the TW87 was developed to protect overhead TLs, but according to the developers, such a function can be applied to hybrid lines (formed by overhead, and underground and/or submarine cable sections), provided that some restrictions are taken into account. Thereby, dissertation aims to clarify such particularities. To do so, internal and external faults were simulated in a 230 kV/60 Hz test system composed by a hybrid line with different compositions of overhead and underground sections in the Alternative Transients Program (ATP). From the performed tests, the influence of the hybrid line number of sections and approximations of the hybrid line by an overhead TL with the same length on the TW87 performance was evaluated. From the obtained results, it is noticed that the amplitudes of the TWs change at the junctions between the sections, affecting the TW87 variables. In addition, it is noticed that there is a difference between the TW propagation speeds between sections, which has an impact on the estimated fault location and on the calculation of the restriction signal amplitude in cases where the hybrid line is approximated by an overhead TL, implying restrictions on the length of the underground sections. Thus, it is concluded that the application of the TW87 in hybrid lines requires caution, although it has proved to be reliable in most evaluated cases.

**Keywords:** Hybrid lines, transmission lines, traveling waves, differential protection, time-domain protection, TW87.

# SUMÁRIO

<b>Sumário</b>	i
<b>Lista de Figuras</b>	iii
<b>Lista de Tabelas</b>	xi
<b>Lista de Símbolos</b>	xii
<b>Glossário</b>	xvii
<b>Capítulo 1 – Introdução</b>	1
1.1 Contextualização do Tema . . . . .	1
1.2 Objetivos . . . . .	4
1.3 Contribuição da Dissertação . . . . .	5
1.4 Organização do Texto . . . . .	5
<b>Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica</b>	6
2.1 Proteção Diferencial Baseada em Componentes Fundamentais . . . . .	6
2.2 Proteção Diferencial Baseada na Teoria de Ondas Viajantes . . . . .	10
2.3 Síntese do Capítulo . . . . .	16
<b>Capítulo 3 – Fundamentação Teórica</b>	19
3.1 Modelagem de LTs . . . . .	19
3.1.1 Parâmetros Concentrados . . . . .	19
3.1.2 Parâmetros Distribuídos . . . . .	20
3.2 Propagação de Ondas Viajantes em LTs . . . . .	21
3.3 Coeficientes de Reflexão e Transmissão de OV's . . . . .	26
3.4 Diagrama de Reflexões de Ondas Viajantes . . . . .	30
3.5 Amplitude de uma OV Lançada por uma Falta . . . . .	31
3.6 Transformação Modal . . . . .	33
3.7 Síntese do Capítulo . . . . .	35



<b>Capítulo 4 – A Função TW87</b>	<b>36</b>
4.1 Princípio de Operação . . . . .	36
4.2 Filtro DS . . . . .	37
4.3 Detector de Distúrbios por OV's . . . . .	39
4.4 Implementação Numérica . . . . .	40
4.5 Condições Adicionais de Segurança (CAS) . . . . .	43
4.5.1 Tensão de Polarização . . . . .	43
4.5.2 Supervisão de Sobrecorrente . . . . .	44
4.6 Seleção de Fases . . . . .	50
4.7 Síntese do Capítulo . . . . .	51
<b>Capítulo 5 – Aplicando a Função TW87 em Linhas Híbridas</b>	<b>52</b>
5.1 Influência da Velocidade de Propagação . . . . .	52
5.1.1 Perda da OV de Saída . . . . .	54
5.1.2 Erros na Localização de Faltas . . . . .	55
5.2 Alteração de Amplitude das OV's . . . . .	58
5.3 Aproximação da Impedância Série . . . . .	65
5.4 Síntese do Capítulo . . . . .	66
<b>Capítulo 6 – Análise dos Resultados</b>	<b>69</b>
6.1 Sistema Teste e Simulações . . . . .	69
6.2 Parametrização dos Ajustes . . . . .	73
6.3 Caso 1: Linha de Transmissão Aérea . . . . .	79
6.4 Caso 2: Linha Híbrida com Dois Trechos . . . . .	81
6.4.1 Caso 2.1: Comprimento Total Fixo e Trecho Subterrâneo Complementar	81
6.4.2 Caso 2.2: Comprimento Total Variável e Trecho Subterrâneo Adicional	87
6.5 Avaliação das CAS para os Casos 1 e 2 . . . . .	89
6.6 Caso 3: Linha Híbrida com Três Trechos . . . . .	96
6.7 Caso 4: Linha Híbrida com Quatro Trechos . . . . .	100
6.8 Caso 5: Linha Híbrida com Cinco Trechos . . . . .	104
6.9 Avaliação Global . . . . .	108
6.10 Síntese do Capítulo . . . . .	116
<b>Capítulo 7 – Conclusões e Propostas para Trabalhos Futuros</b>	<b>117</b>
<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>120</b>

## LISTA DE FIGURAS

1.1	Capacidade de transferência de potência e o critério das áreas iguais. . . . .	2
3.1	Modelo de LT a parâmetros distribuídos. . . . .	20
3.2	Segmento de comprimento $\Delta x$ de uma LT. . . . .	21
3.3	Ondas viajantes progressivas e regressivas. . . . .	24
3.4	Reflexão e transmissão de ondas viajantes. . . . .	27
3.5	Exemplo de diagrama de <i>Lattice</i> para uma falta interna a uma LT com três trechos. . . . .	30
3.6	OVs lançadas por uma falta. . . . .	31
4.1	Diagrama de <i>Lattice</i> para casos de falta interna e externa a LT monitorada. . . . .	36
4.2	Etapas do processo do filtro DS. . . . .	37
4.3	Janela de dados do filtro DS . . . . .	38
4.4	Resposta do filtro DS para uma entrada em: (a) degrau (b) rampa. . . . .	38
4.5	Extração das OVs de corrente dos sinais medidos por meio do filtro DS . . . . .	39
4.6	Lógica de detecção de distúrbios baseada na análise de OVs . . . . .	40
4.7	Lógica simplificada da função TW87 (SCHWEITZER <i>et al.</i> , 2015). . . . .	42
4.8	Cálculo de $V_{POL}$ (SEL, 2017). . . . .	43
4.9	Exemplo da aplicação do princípio da superposição em um circuito sob falta. . . . .	45
4.10	Corrente (a) no circuito sob falta (b) no circuito de pré-falta (c) no circuito puro de falta (d) incremental $p = 1$ (e) incremental e réplica incremental (f) réplica incremental $p = 1$ . . . . .	46
4.11	Princípio de operação do <i>Starting Logic</i> . . . . .	48

4.12	Correntes réplicas incrementais integradas e ajuste <i>pickup</i> : (a) sem <i>MS</i> (b) com <i>MS</i> . . . . .	48
4.13	Princípio da seleção de fases para uma: (a) falta AT. (b) falta BC. (SEL, 2017).	50
5.1	Valores de $\kappa$ . . . . .	54
5.2	Detecção e cálculo da amplitude das OV's de saída em linhas híbridas. . . . .	55
5.3	Falta próxima da Barra L: (a) Comprimento Total Fixo e Trecho Subterrâneo Complementar. (b) Comprimento Total Variável e Trecho Subterrâneo Adicional.	58
5.4	Falta próxima da Barra R: (a) Comprimento Total Fixo e Trecho Subterrâneo Complementar. (b) Comprimento Total Variável e Trecho Subterrâneo Adicional.	58
5.5	Erro Absoluto em $m_{87}$ : (a) Comprimento Total Fixo e Trecho Subterrâneo Complementar. (b) Comprimento Total Variável e Trecho Subterrâneo Adicional. . .	58
5.6	Diagrama de <i>Lattice</i> para casos faltas externas a LT totalmente aérea. . . . .	60
5.7	Diagrama de <i>Lattice</i> para casos de faltas externas a uma linha híbrida com dois trechos. . . . .	61
5.8	Diagrama de <i>Lattice</i> para casos de faltas externas a uma linha híbrida com três trechos. . . . .	62
5.9	Diagrama de <i>Lattice</i> para casos de faltas externas a uma linha híbrida com quatro trechos. . . . .	63
5.10	Diagrama de <i>Lattice</i> para casos de faltas externas a uma linha híbrida com cinco trechos. . . . .	64
5.11	Variação do módulo da impedância de: (a) sequência positiva. (b) sequência zero.	66
6.1	Sistema teste. (a) Geral. (b) Detalhe. . . . .	69
6.2	Aplicação de curto-circuito para determinação dos ajustes da função OC87. . . .	74
6.3	Circuito de sequência para uma: (a) falta AT (b) falta BC. . . . .	76
6.4	Sistema teste para uma LT totalmente aérea. . . . .	79
6.5	Caso 1: LT Aérea - Faltas internas - Condição 1: (a) $ I_L $ (b) $ I_R $ . . . . .	80

6.6	Caso 1: LT Aérea - Faltas internas - Condições 1 e 2: (a) $ I_{OP} $ (b) $ I_{OP} $ e $SLP \cdot I_{RT}$ . . . . .	80
6.7	Caso 1: LT Aérea - Faltas internas - Condição 3: (a) $m_{87}$ (b) Erro Absoluto. . . . .	80
6.8	Sistema teste para uma linha híbrida composta por dois trechos. . . . .	81
6.9	Caso 2.1: Linha Híbrida com Dois Trechos - Comprimento Total Fixo e Trecho Subterrâneo Complementar - Falta externa na metade da LT ADJ1 - Condição 1: (a) $ I_L $ (b) $ I_R $ (c) $ I_{OP} $ . . . . .	82
6.10	Caso 2.1: Linha Híbrida com Dois Trechos - Comprimento Total Fixo e Trecho Subterrâneo Complementar - Falta externa na metade da LT ADJ1 - Condição 2: $ I_{OP} $ e $SLP \cdot I_{RT}$ para (a) $\tau = \tau_a$ . (b) $\tau = \tau_h$ . . . . .	82
6.11	Caso 2.1: Linha Híbrida com Dois Trechos - Comprimento Total Fixo e Trecho Subterrâneo Complementar - Falta externa na metade da LT ADJ1 - Condição 3: $m_{87}$ para (a) $\tau = \tau_a$ . (b) $\tau = \tau_h$ . . . . .	82
6.12	Caso 2.1: Linha Híbrida com Dois Trechos - Comprimento Total Fixo e Trecho Subterrâneo Complementar - Falta externa na metade da LT ADJ2 - Condição 1: (a) $ I_L $ (b) $ I_R $ (c) $ I_{OP} $ . . . . .	83
6.13	Caso 2.1: Linha Híbrida com Dois Trechos - Comprimento Total Fixo e Trecho Subterrâneo Complementar - Falta externa na metade da LT ADJ2 - Condição 2: $ I_{OP} $ e $SLP \cdot I_{RT}$ para (a) $\tau = \tau_a$ (b) $\tau = \tau_h$ . . . . .	83
6.14	Caso 2.1: Linha Híbrida com Dois Trechos - Comprimento Total Fixo e Trecho Subterrâneo Complementar - Falta externa na metade da LT ADJ2 - Condição 3: $m_{87}$ para (a) $\tau = \tau_a$ (b) $\tau = \tau_h$ . . . . .	85
6.15	Caso 2.1: Linha Híbrida com Dois Trechos - Comprimento Total Fixo e Trecho Subterrâneo Complementar - Faltas internas no trecho aéreo - Condição 1: (a) $I_L$ . (b) $I_R$ . . . . .	86
6.16	Caso 2.1: Linha Híbrida com Dois Trechos - Comprimento Total Fixo e Trecho Subterrâneo Complementar - Faltas internas no trecho aéreo - Condições 1 e 2: (a) $I_{OP}$ . (b) $SLP \cdot I_{RT}$ para $\tau = \tau_a$ . . . . .	86

6.17	Caso 2.1: Linha Híbrida com Dois Trechos - Comprimento Total Fixo e Trecho Subterrâneo Complementar - Faltas internas - Condição 3: (a) $m_{87}$ (b) Erro Absoluto. . . . .	86
6.18	Caso 2.2: Linha Híbrida com Dois Trechos - Comprimento Total Variável e Trecho subterrâneo Adicional - Condição 2 - $I_{OP}$ e $SLP \cdot I_{RT}$ - Falta externa na metade da: (a) LT ADJ1 (b) LT ADJ2. . . . .	88
6.19	Caso 2.2: Linha Híbrida com Dois Trechos - Comprimento Total Variável e Trecho subterrâneo Adicional - Condição 3 - $m_{87}$ para $\tau = \tau_a$ - Falta externa na metade da: (a) LT ADJ1 (b) LT ADJ2. . . . .	88
6.20	Caso 2.2: Linha Híbrida com Dois Trechos - Comprimento Total Variável e Trecho Subterrâneo Complementar - Faltas internas no trecho aéreo - Condição 2: $I_{OP}$ e $SLP \cdot I_{RT}$ para $\tau = \tau_a$ . . . . .	89
6.21	Caso 2.2: Linha Híbrida com Dois Trechos - Comprimento Total Variável e Trecho Subterrâneo Complementar - Faltas internas no trecho aéreo - Condição 3 para $\tau = \tau_a$ : (a) $m_{87}$ (b) Erro Absoluto. . . . .	89
6.22	Avaliação das CAS para o Caso 1: LT aérea (a) $V_{POL}$ . (b) $I_{OP}$ . . . . .	90
6.23	Avaliação das CAS para o Caso 2.1: Linha Híbrida com Dois Trechos - Comprimento Total Fixo e Trecho Subterrâneo Complementar (a) $V_{POL}$ . (b) $I_{OP}$ . . . . .	91
6.24	Avaliação das CAS para o Caso 2.2: Linha Híbrida com Dois Trechos - Comprimento Total Variável e Trecho Subterrâneo Adicional (a) $V_{POL}$ . (b) $I_{OP}$ . . . . .	91
6.25	Avaliação das CAS para o Caso 1: LT aérea: Falta externa na Barra R: (a) $\Delta i_{ZAT}/TP50G$ (b) $\int \Delta i_{ZAT} dt$ , $\int TP50G dt$ e $\int TP50G dt + MS$ . . . . .	93
6.26	Avaliação das CAS para o Caso 1: LT aérea: Falta externa em 0,9 p.u. da LT ADJ2: (a) $\Delta i_{ZAT}/TP50G$ (b) $\int \Delta i_{ZAT} dt$ , $\int TP50G dt$ e $\int TP50G dt + MS$ . . . . .	93
6.27	Avaliação das CAS para o Caso 1: LT aérea: Falta interna em 0,1 p.u. da LT monitorada: (a) $\Delta i_{ZAT}/TP50G$ (b) $\int \Delta i_{ZAT} dt$ , $\int TP50G dt$ e $\int TP50G dt + MS$ . . . . .	93

- 6.28 Avaliação das CAS para o Caso 2.1: Linha Híbrida com Dois Trechos - Comprimento Total Fixo e Trecho Subterrâneo Complementar - Para  $\ell_S = 6$  km: Falta externa na Barra R: (a)  $\Delta i_{ZAT}/TP50G$  (b)  $\int \Delta i_{ZAT} dt$ ,  $\int TP50G dt$  e  $\int TP50G dt + MS$ . . . . . 94
- 6.29 Avaliação das CAS para o Caso 2.1: Linha Híbrida com Dois Trechos - Comprimento Total Fixo e Trecho Subterrâneo Complementar - Para  $\ell_S = 6$  km: Falta externa em 0,9 p.u. da LT ADJ2: (a)  $\Delta i_{ZAT}/TP50G$  (b)  $\int \Delta i_{ZAT} dt$ ,  $\int TP50G dt$  e  $\int TP50G dt + MS$ . . . . . 94
- 6.30 Avaliação das CAS para o Caso 2.1: Linha Híbrida com Dois Trechos - Comprimento Total Fixo e Trecho Subterrâneo Complementar - Para  $\ell_S = 6$  km: Falta interna em 0,1 p.u. da LT: (a)  $\Delta i_{ZAT}/TP50G$  (b)  $\int \Delta i_{ZAT} dt$ ,  $\int TP50G dt$  e  $\int TP50G dt + MS$ . . . . . 94
- 6.31 Avaliação das CAS para o Caso 2.2: Linha Híbrida com Dois Trechos - Comprimento Total Variável e Trecho Subterrâneo Adicional - Para  $\ell_S = 6$  km: Falta externa na Barra R: (a)  $\Delta i_Z$  (b)  $\int \Delta i_Z$ ,  $\int TP50G dt$  e  $\int TP50G dt + MS$ . . . . . 95
- 6.32 Avaliação das CAS para o Caso 2.2: Linha Híbrida com Dois Trechos - Comprimento Total Variável e Trecho Subterrâneo Adicional - Para  $\ell_S = 6$  km: Falta externa em 0,9 p.u. da LT ADJ2: (a)  $\Delta i_Z$  (b)  $\int \Delta i_Z$ ,  $\int TP50G dt$  e  $\int TP50G dt + MS$ . . . . . 95
- 6.33 Avaliação das CAS para o Caso 2.2: Linha Híbrida com Dois Trechos - Comprimento Total Variável e Trecho Subterrâneo Adicional - Para  $\ell_S = 6$  km: Falta interna em 0,1 p.u. da LT: (a)  $\Delta i_Z$  (b)  $\int \Delta i_Z$ ,  $\int TP50G dt$  e  $\int TP50G dt + MS$ . 95
- 6.34 Sistema teste para uma linha híbrida composta por três trechos. . . . . 96
- 6.35 Caso 3: Linha Híbrida com Três Trechos: Falta externa na metade da LT ADJ1 - Condição 1: (a)  $|I_L|$  (b)  $|I_R|$  (c)  $|I_{OP}|$ . . . . . 98
- 6.36 Caso 3: Linha Híbrida com Três Trechos: Falta externa na metade da LT ADJ1 - Condição 2:  $|I_{OP}|$  e  $SLP \cdot I_{RT}$  para: (a)  $\tau = \tau_a$ . (b)  $\tau = \tau_h$ . . . . . 98
- 6.37 Caso 3: Linha Híbrida com Três Trechos: Falta externa na metade da LT ADJ1 - Condição 3:  $m_{87}$  para: (a)  $\tau = \tau_a$ . (b)  $\tau = \tau_h$ . . . . . 98

6.38	Caso 3: Linha Híbrida com Três Trechos: Falta externa na metade da LT ADJ2	
	- Condição 1: (a) $ I_L $ (b) $ I_R $ (c) $ I_{OP} $ . . . . .	99
6.39	Caso 3: Linha Híbrida com Três Trechos: Falta externa na metade da LT ADJ2	
	- Condição 2: $ I_{OP} $ e $SLP \cdot I_{RT}$ para: (a) $\tau = \tau_a$ . (b) $\tau = \tau_h$ . . . . .	99
6.40	Caso 3: Linha Híbrida com Três Trechos: Falta externa na metade da LT ADJ2	
	- Condição 3: $m_{87}$ para: (a) $\tau = \tau_a$ . (b) $\tau = \tau_h$ . . . . .	99
6.41	Sistema teste para uma linha híbrida composta por quatro trechos. . . . .	100
6.42	Caso 4: Linha Híbrida com Quatro Trechos: Falta externa na metade da LT ADJ1 - Condição 1: (a) $ I_L $ (b) $ I_R $ (c) $ I_{OP} $ . . . . .	102
6.43	Caso 4: Linha Híbrida com Quatro Trechos: Falta externa na metade da LT ADJ1 - Condição 2: $ I_{OP} $ e $SLP \cdot I_{RT}$ para: (a) $\tau = \tau_a$ . (b) $\tau = \tau_h$ . . . . .	102
6.44	Caso 4: Linha Híbrida com Quatro Trechos: Falta externa na metade da LT ADJ1 - Condição 3: $m_{87}$ para: (a) $\tau = \tau_a$ . (b) $\tau = \tau_h$ . . . . .	102
6.45	Caso 4: Linha Híbrida com Quatro Trechos: Falta externa na metade da LT ADJ2 - Condição 1: (a) $ I_L $ (b) $ I_R $ (c) $ I_{OP} $ . . . . .	103
6.46	Caso 4: Linha Híbrida com Quatro Trechos: Falta externa na metade da LT ADJ2 - Condição 2: $ I_{OP} $ e $SLP \cdot I_{RT}$ para: (a) $\tau = \tau_a$ . (b) $\tau = \tau_h$ . . . . .	103
6.47	Caso 4: Linha Híbrida com Quatro Trechos: Falta externa na metade da LT ADJ2 - Condição 3: $m_{87}$ para: (a) $\tau = \tau_a$ . (b) $\tau = \tau_h$ . . . . .	103
6.48	Sistema teste para uma linha híbrida composta por cinco trechos. . . . .	104
6.49	Caso 5: Linha Híbrida com Cinco Trechos: Falta externa na metade da LT ADJ1 - Condição 1: (a) $ I_L $ (b) $ I_R $ (c) $ I_{OP} $ . . . . .	106
6.50	Caso 5: Linha Híbrida com Cinco Trechos: Falta externa na metade da LT ADJ1 - Condição 2: $ I_{OP} $ e $SLP \cdot I_{RT}$ para: (a) $\tau = \tau_a$ . (b) $\tau = \tau_h$ . . . . .	106
6.51	Caso 5: Linha Híbrida com Cinco Trechos: Falta externa na metade da LT ADJ1 - Condição 3: $m_{87}$ para: (a) $\tau = \tau_a$ . (b) $\tau = \tau_h$ . . . . .	106
6.52	Caso 5: Linha Híbrida com Cinco Trechos: Falta externa na metade da LT ADJ2 - Condição 1: (a) $ I_L $ (b) $ I_R $ (c) $ I_{OP} $ . . . . .	107

- 6.53 Caso 5: Linha Híbrida com Cinco Trechos: Falta externa na metade da LT ADJ2  
 - Condição 2:  $|I_{OP}|$  e  $SLP \cdot I_{RT}$  para: (a)  $\tau = \tau_a$ . (b)  $\tau = \tau_h$ . . . . . 107
- 6.54 Caso 5: Linha Híbrida com Cinco Trechos: Falta externa na metade da LT ADJ2  
 - Condição 3:  $m_{87}$  para: (a)  $\tau = \tau_a$ . (b)  $\tau = \tau_h$ . . . . . 107
- 6.55 Caso 2.1: Linha Híbrida com Dois Trechos - Comprimento Total Fixo e Trecho Subterrâneo Complementar - Falta externa na metade da LT ADJ1 - Ajuste  $\tau = \tau_a$ . 109
- 6.56 Caso 2.1: Linha Híbrida com Dois Trechos - Comprimento Total Fixo e Trecho Subterrâneo Complementar - Falta externa na metade da LT ADJ1 - Ajuste  $\tau = \tau_h$ . 109
- 6.57 Caso 2.1: Linha Híbrida com Dois Trechos - Comprimento Total Fixo e Trecho Subterrâneo Complementar - Falta externa na metade da LT ADJ2 - Ajuste  $\tau = \tau_a$ . 109
- 6.58 Caso 2.1: Linha Híbrida com Dois Trechos - Comprimento Total Fixo e Trecho Subterrâneo Complementar - Falta externa na metade da LT ADJ2 - Ajuste  $\tau = \tau_h$ . 109
- 6.59 Caso 2.2: Linha Híbrida com Dois Trechos - Comprimento Total Variável e Trecho Subterrâneo Adicional - Falta externa na metade da LT ADJ1 - Ajuste  $\tau = \tau_a$ . . . . . 110
- 6.60 Caso 2.2: Linha Híbrida com Dois Trechos - Comprimento Total Variável e Trecho Subterrâneo Adicional - Falta externa na LT metade da ADJ1 - Ajuste  $\tau = \tau_h$ . . . . . 110
- 6.61 Caso 2.2: Linha Híbrida com Dois Trechos - Comprimento Total Variável e Trecho Subterrâneo Adicional - Falta externa na LT metade da ADJ2 - Ajuste  $\tau = \tau_a$ . . . . . 110
- 6.62 Caso 2.2: Linha Híbrida com Dois Trechos - Comprimento Total Variável e Trecho Subterrâneo Adicional - Falta externa na metade da LT ADJ2 - Ajuste  $\tau = \tau_h$ . . . . . 110
- 6.63 Caso 3: Linha Híbrida com Três Trechos - Falta externa na metade da LT ADJ1  
 - Ajuste  $\tau = \tau_a$ . . . . . 112
- 6.64 Caso 3: Linha Híbrida com Três Trechos - Falta externa na metade da LT ADJ1  
 - Ajuste  $\tau = \tau_h$ . . . . . 112



6.65	Caso 3: Linha Híbrida com Três Trechos - Falta externa na metade da LT ADJ2	
	- Ajuste $\tau = \tau_a$ .	112
6.66	Caso 3: Linha Híbrida com Três Trechos - Falta externa na metade da LT ADJ2	
	- Ajuste $\tau = \tau_h$ .	112
6.67	Caso 4: Linha Híbrida com Quatro Trechos - Falta externa na metade da LT	
	ADJ1 - $\tau = \tau_a$ .	113
6.68	Caso 4: Linha Híbrida com Quatro Trechos - Falta externa na metade da LT	
	ADJ1 - Ajuste $\tau = \tau_h$ .	113
6.69	Caso 4: Linha Híbrida com Quatro Trechos - Falta externa na metade da LT	
	ADJ2 - Ajuste $\tau = \tau_a$ .	113
6.70	Caso 4: Linha Híbrida com Quatro Trechos - Falta externa na metade da LT	
	ADJ2 - Ajuste $\tau = \tau_h$ .	113
6.71	Caso 5: Linha Híbrida com Cinco Trechos - Falta externa na metade da LT	
	ADJ1 - Ajuste $\tau = \tau_a$ .	114
6.72	Caso 5: Linha Híbrida com Cinco Trechos - Falta externa na metade da LT	
	ADJ1 - Ajuste $\tau = \tau_h$ .	114
6.73	Caso 5: Linha Híbrida com Cinco Trechos - Falta externa na metade da LT	
	ADJ2 - Ajuste $\tau = \tau_a$ .	114
6.74	Caso 5: Linha Híbrida com Cinco Trechos - Falta externa na metade da LT	
	ADJ2 - Ajuste $\tau = \tau_h$ .	114

## LISTA DE TABELAS

1.1	Exemplos de linhas híbridas no Brasil. . . . .	3
2.1	Resumo da revisão bibliográfica. . . . .	18
3.1	<i>Loops</i> de corrente. . . . .	35
4.1	<i>Loops</i> de tensão incremental e corrente réplica incremental no domínio do tempo. . . . .	47
5.1	Coefficientes de transmissão e reflexão. . . . .	60
5.2	Resumo da avaliação das alterações de amplitude das OV's em linhas híbridas. . . . .	68
6.1	Resumo dos casos avaliados. . . . .	70
6.2	Parâmetros elétricos dos trechos aéreos e subterrâneos. . . . .	71
6.3	Dados dos circuitos equivalentes de Thévenin. . . . .	71
6.4	<i>Loops</i> de tensão incremental e corrente réplica incremental no domínio fasorial. . . . .	76
6.5	Ajustes de campo das funções TW87 e OC87. . . . .	78
6.6	Ajustes de fábrica da função TW87. . . . .	78
6.7	Resultados para faltas externas na metade das LTs ADJ1 e ADJ2. . . . .	79

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a$	Operador complexo $1\angle 120^\circ$ .
$C$	Capacitância de uma LT por unidade de comprimento.
$d$	Localização da falta em p.u..
$D$	Ganho do filtro <i>Differentiator-Smoother</i> .
$f$	Frequência fundamental do SEE.
$f_C$	Frequência de corte.
$f_s$	Frequência de amostragem.
$f_{IZ}$	Função para cálculo da corrente réplica.
$G$	Condutância de uma LT por unidade de comprimento.
$i^+$	Onda viajante progressiva de corrente no domínio do tempo.
$i^-$	Onda viajante regressiva de corrente no domínio do tempo.
$I^+$	Onda viajante progressiva de corrente no domínio fasorial.
$I^-$	Onda viajante regressiva de corrente no domínio fasorial.
$i_{min}$	Onda viajante de corrente mínima ( <i>pickup</i> ).
$i_{OV}$	Onda viajante de corrente.
$i_{OVA}$	Onda viajante de corrente na Fase A.
$i_{OVB}$	Onda viajante de corrente na Fase B.
$i_{OVC}$	Onda viajante de corrente na Fase C.
$i_{OVL}$	Onda viajante de corrente na Barra Local.

---

$i_{OVR}$	Onda viajante de corrente na Barra Remota.
$i_{OP}$	Sinal de operação.
$i_{RT}$	Sinal de restrição.
$i_{RTL}$	Sinal de restrição na Barra L.
$i_{RTR}$	Sinal de restrição na Barra R.
$I_L$	Amplitude da onda viajante na Barra Local.
$I_R$	Amplitude da onda viajante na Barra Remota.
$I_{OP}$	Amplitude do sinal de operação.
$I_{RT}$	Amplitude do sinal de restrição.
$I_{RTL}$	Amplitude do sinal de restrição na Barra L.
$I_{RTR}$	Amplitude do sinal de restrição na Barra R.
$k$	Amostra.
$\kappa$	Diferença entre os tempos de propagação das OVs em uma linha híbrida e uma LT aérea de igual comprimento.
$K_{OV}$	Fator de ajuste de sensibilidade.
$L$	Indutância de uma LT por unidade de comprimento.
$\ell$	Comprimento da linha de transmissão monitorada.
$\ell_A$	Comprimento do trecho aéreo da linha híbrida.
$\ell_{Ai}$	Comprimento do $i$ -ésimo trecho aéreo da linha híbrida.
$\ell_S$	Comprimento do trecho subterrâneo da linha híbrida.
$\ell_{Si}$	Comprimento do $i$ -ésimo trecho subterrâneo da linha híbrida.
$M$	Metade do tamanho da janela de coeficientes do filtro DS ( $T_{DS}/2$ ).
$MC$	Margem de confiabilidade.
$MS$	Margem de segurança.
$m_{87}$	Localização da falta em p.u. da Função TW87.

---

$n_A$	Número de trechos aéreos da linha híbrida.
$n_S$	Número de trechos subterrâneos da linha híbrida.
$N_{L1}$	Amostra de tempo da OV incidente na Barra L.
$N_{R1}$	Amostra de tempo da OV incidente na Barra R.
$N_{Lsai}$	Amostra de tempo da OV de saída na Barra L.
$N_{Rsai}$	Amostra de tempo da OV de saída na Barra R.
$p$	Número de ciclos da grandeza incremental.
$P$	Intervalo de tempo entre as OVs incidentes.
$P_e$	Potência elétrica.
$P_m$	Potência mecânica.
$Q$	Fator de correção para manter um ganho unitário das OVs de corrente.
$R$	Resistência de uma LT por unidade de comprimento.
$R_F$	Resistência de falta.
$R_{12}$	Coeficiente de reflexão do trecho tipo 1 para o trecho tipo 2.
$R_{21}$	Coeficiente de reflexão do trecho tipo 2 para o trecho tipo 1.
$R_{SA}$	Coeficiente de reflexão do trecho subterrâneo para o aéreo.
$R_{AS}$	Coeficiente de reflexão do trecho aéreo para o subterrâneo.
$STR$	<i>Loop</i> mais forte.
$SLP$	Fator de restrição.
$S_1$	Área de aceleração.
$S_2$	Área de desaceleração.
$t$	Tempo.
$T_{12}$	Coeficiente de transmissão do trecho tipo 1 para o trecho tipo 2.
$T_{21}$	Coeficiente de transmissão do trecho tipo 2 para o trecho tipo 1.

---

$T_{SA}$	Coefficiente de transmissão do trecho subterrâneo para o aéreo.
$T_{AS}$	Coefficiente de transmissão do trecho aéreo para o subterrâneo.
$T_{DS}$	Tamanho da janela de coeficientes do filtro DS.
$\tau$	Ajuste do tempo de propagação da função TW87.
$\tau_a$	Tempo de propagação da LT totalmente aérea de comprimento igual a 200 km.
$\tau$	Tempo de propagação da linha híbrida (soma dos tempos de propagação de cada trecho).
$\tau'$	Tempo de propagação da linha monitorada convertido em amostras.
$TP50G$	Limiar da supervisão de sobrecorrente para loops monofásicos.
$TP50P$	Limiar da supervisão de sobrecorrente para loops bifásicos.
$\Delta P_m$	Variação da potência mecânica.
$\theta$	Ângulo de incidência.
$\delta$	Ângulo de potência.
$\gamma$	Constante de propagação das ondas viajantes.
$v^+$	Onda viajante progressiva de tensão no domínio do tempo.
$v^-$	Onda viajante regressiva de tensão no domínio do tempo.
$V^+$	Onda viajante progressiva de tensão no domínio fasorial.
$V^-$	Onda viajante regressiva de tensão no domínio fasorial.
$v_L$	Sinal de tensão na Barra L.
$v_p$	Velocidade de propagação das ondas viajantes.
$v_{OV}$	Onda viajante de tensão.
$v_R$	Sinal de tensão na Barra R.
$v_{p1}$	Velocidade de propagação das ondas viajantes para trecho tipo 1.
$v_{p2}$	Velocidade de propagação das ondas viajantes para trecho tipo 2.
$v_{pA}$	Velocidade de propagação das ondas viajantes para trechos aéreos.

---

$v_{pS}$	Velocidade de propagação das ondas viajantes para trechos subterrâneos.
$V_{POL}$	Tensão de polarização.
$\hat{V}_{FL}$	Tensão fasorial na Barra L.
$\hat{V}_{FR}$	Tensão fasorial na Barra R.
$\hat{V}_F$	Tensão fasorial de falta.
$Y$	Admitância <i>shunt</i> da linha de transmissão.
$Z$	Impedância série da linha de transmissão.
$Z_C$	Impedância característica da linha de transmissão.
$Z_{LT}$	Impedância série da linha de transmissão.
$Z_{FL}$	Impedância equivalente da fonte local.
$Z_{FR}$	Impedância equivalente da fonte remota.
$Z_S$	Impedância de surto.
$Z_{S1}$	Impedância de surto de sequência positiva para trecho tipo 1.
$Z_{S2}$	Impedância de surto de sequência positiva para trecho tipo 2.
$Z_{SA}$	Impedância de surto de sequência positiva do trecho aéreo.
$Z_{SS}$	Impedância de surto de sequência positiva do trecho subterrâneo.

## GLOSSÁRIO

87	Proteção Diferencial.
AJ	Ajustes.
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica.
ASP	Análise de Sensibilidade Paramétrica.
ATP	<i>Alternative Transients Program.</i>
BPA	<i>Bonneville Power Administration.</i>
CAS	Condições Adicionais de Segurança.
C1	Condição 1 da Lógica da TW87.
C2	Condição 2 da Lógica da TW87.
C3	Condição 3 da Lógica da TW87.
CC	Canal de Comunicação.
CF	Componentes Fundamentais.
EPE	Empresa de Pesquisa Energética.
<i>Fault ID</i>	Lógica de Identificação do Tipo de Falta.
FL	Fonte Local.
FR	Fonte Remota.
Filtro DS	Filtro <i>Differentiator-Smoother.</i>
IN	Implementação Numérica.
LF	Localização de Falhas.
LH	Linhas Híbridas.



---

LPF	Filtro Passa-Baixas.
LT	Linha de Transmissão.
MS	Margem de Segurança.
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico.
OC	Sobrecorrente.
OC87	Supervisão de Sobrecorrente.
OV	Onda Viajante.
PIB	Produto Interno Bruto
RMS	<i>Root Mean Square.</i>
SEE	Sistema de Energia Elétrica.
SEL	<i>Schweitzer Engineering Laboratories.</i>
SIN	Sistema Interligado Nacional.
SIR	<i>Source Impedance Ratio.</i>
T400L	Relé microprocessado no domínio do tempo.
TW87	<i>Traveling Wave 87</i>
TC	Transformador de corrente.
TPC	Transformador de potencial capacitivo.
UnB	Universidade de Brasília.
VPOL	Tensão de Polarização.

### 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

A taxa de crescimento econômico de um país está intimamente relacionada ao seu consumo de energia elétrica. No Brasil, há uma projeção de crescimento do Produto Interno Bruto (PIB) para o decênio 2016-2026 a uma taxa de 2,5%, e para proporcionar tal crescimento é projetado um aumento na demanda por energia elétrica em 3,7% nesse período (EPE, 2017). Portanto, diante da projeção de crescimento na demanda energética impulsionada pelo esperado crescimento econômico brasileiro, serão necessários investimentos em expansão, melhoria e modernização do Sistema Interligado Nacional (SIN).

O SIN consiste em uma rede elétrica formada por sistemas de geração, transmissão e distribuição interconectados de forma a fornecer energia elétrica à população. Sabe-se que a maior parte do SIN é formado por linhas de transmissão (LTs). Assim, visto que a matriz energética brasileira ainda é predominantemente hidroelétrica, com usinas geradoras situadas distantes dos grandes centros consumidores, faz-se necessário o uso de LTs longas para conectar a geração aos consumidores. Segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), no ano de 2016, a soma dos comprimentos das LTs que compõem o SIN já ultrapassavam os 134.000 km de extensão <sup>1</sup>, valor esse equivalente a cerca de 1/3 da distância entre a Terra e a Lua.

Devido às suas extensões, dentre os elementos do SIN, as LTs são os mais suscetíveis à ocorrência de faltas. De fato, de acordo com o relatório anual da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o número de desligamentos forçados em LTs em 2016 corresponde a cerca de 76,1% do total (ANEEL, 2017). Nesse contexto, torna-se importante o estudo e desenvolvimento de funções de proteção, as quais visam identificar e isolar faltas em LTs, com o objetivo de diminuir o número de desligamentos no fornecimento de energia elétrica aos consumidores.

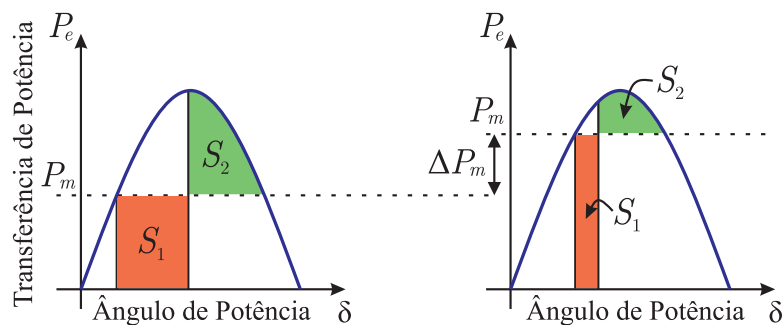
---

<sup>1</sup>Informação extraída do site [www.ons.org.br](http://www.ons.org.br), no dia 21/01/2018.

Com a expansão do SIN esperada para os próximos anos, espera-se também que LTs existentes passem a transmitir mais potência, culminando em uma operação mais próxima dos limites de estabilidade transitória. Por isso, o tempo de atuação da proteção se tornou uma variável importante na manutenção da estabilidade dos sistemas de energia elétrica (SEEs) modernos, motivando a busca por funções de proteção de ultra-alta velocidade, as quais têm como objetivo reduzir os tempos de operação, aumentando as margens de estabilidade do SEE e, portanto, conferindo segurança à rede elétrica.

Para entender melhor a importância do tempo de atuação da proteção na manutenção das margens de estabilidade dos SEEs, na Figura 1.1 são ilustradas duas curvas de capacidade de transferência de potência de uma unidade geradora de grande porte para diferentes pontos de operação de um SEE. Segundo o critério das áreas iguais, a área de aceleração  $S_1$  deve ser menor ou igual a área de desaceleração  $S_2$  para que o SEE se mantenha estável (ANDERSON, 1999). Assim, ao conseguir um esquema de proteção que opere mais rapidamente, torna-se possível um ajuste de potência mecânica  $P_m$  maior, viabilizando um aumento na potência mecânica  $\Delta P_m$ . Em termos práticos, isso implica em uma maior transmissão de potência elétrica na LT, sem comprometimento da estabilidade do SEE.

Em Eastved (1976), explica-se que uma dada LT da *Bonneville Power Administration* (BPA), ao reduzir em um ciclo o tempo de duração de uma falta, viabilizou-se um aumento na potência transmitida pela LT em cerca de 250 MW, ou seja, 15 MW adicionais para cada milissegundo reduzido no tempo de atuação da proteção. Dessa forma, visando manter a estabilidade dos SEEs e aumentar a capacidade de transferência de potência das LTs, explica-se o porquê de pesquisadores estarem envidando esforços na busca por funções de proteção de ultra-alta velocidade. Nesse sentido, atualmente, as funções no domínio do tempo têm demonstrado ser rápidas, com tempos de atuação da ordem de milissegundos (SCHWEITZER *et al.*, 2015).



**Figura 1.1.** Capacidade de transferência de potência e o critério das áreas iguais.

Dentre as funções no domínio do tempo, a função TW87 tem se destacado (LOPES *et al.*, 2016). Essa função tem como base a teoria das ondas viajantes (OVs), e tem demonstrado ser capaz de identificar curtos-circuitos internos em LTs em tempos da ordem de 1 ms, sem comprometer a segurança para curtos-circuitos externos (SCHWEITZER *et al.*, 2015). Comparando-a com as funções tradicionais baseadas em fasores que apresentam tempos de atuação da ordem de 0,5 a 1,5 ciclos fundamentais (SCHWEITZER *et al.*, 2014), a utilização dessa função se torna atrativa para proteger LTs que operam próximas dos seus limites de estabilidade transitória.

Além da velocidade de atuação, uma potencialidade adicional da TW87 é a possibilidade dessa ser aplicada em linhas híbridas, e isso tem despertado o interesse das concessionárias. Entende-se como linhas híbridas as LTs que possuem parâmetros elétricos diferentes ao longo do seu comprimento, por exemplo, LTs com trechos aéreos e cabos subterrâneos ou submarinos. LTs assim estão se tornando cada vez mais comuns, especialmente nas aéreas urbanas (KASZTENNY *et al.*, 2017). Na Tabela 1.1 são apresentados cinco exemplos de linhas híbridas no Brasil, em que se destaca o comprimento do trecho subterrâneo  $\ell_S$ , a tensão nominal  $V_{SYS}$  e o *status* de funcionamento. Para os exemplos ilustrados, observa-se que  $\ell_S$  é da ordem de poucos quilômetros, fato este que motivou por parte das concessionárias o interesse em investigar se existiria a possibilidade de ignorar os trechos compostos por cabos subterrâneos ou submarinos ao ajustar a TW87.

No que se refere à aplicação da TW87 nesse tipo de LT, devido à não-homogeneidade dos parâmetros elétricos ao longo de linhas híbridas, observam-se diferentes velocidades de propagação das OVs e mudanças de amplitude das OVs nas junções entre trechos, características essas que podem afetar a TW87, conforme analisado nos próximos capítulos. Nesse contexto, cabe

**Tabela 1.1.** Exemplos de linhas híbridas no Brasil.

Nome da LT	$\ell_S$ (km)	$V_{SYS}$ (kV)	Status
Porto Alegre 1 - Porto Alegre 8	4,267	230	Construção
Porto Alegre 1 - Porto Alegre 12	3,575	230	Construção
Biguaçu - Desterro	4,650	230	Operação
Fortaleza - Delmiro Gouveia	0,350	230	Operação
Santa Quitéria - Umbará	0,230	230	Operação

Fonte: ANEEL.

ressaltar que originalmente a TW87 não contempla aplicações em linhas híbridas, isso porque em sua concepção, o seu desenvolvimento matemático foi realizado considerando parâmetros elétricos homogêneos ao longo de toda a LT monitorada (SCHWEITZER *et al.*, 2014). Ainda assim, de acordo com os desenvolvedores da função, vislumbra-se a possibilidade de aplicação da TW87 em linhas híbridas, desde que algumas restrições relacionadas à topologia do SEE monitorado sejam levadas em consideração, o que inclui recomendações durante a parametrização dos ajustes da função (SEL, 2017).

Diante do exposto, visto que na literatura não se encontrou uma análise detalhada que relacionasse o desempenho da função TW87 quando aplicada em linhas híbridas, buscou-se nesta dissertação avaliar sua operação quando utilizada para proteger LTs com trechos não-homogêneos, tecendo considerações acerca das consequências da utilização da TW87 em linhas híbridas, bem como destacando os cuidados que devem ser tomados para garantir a segurança do esquema de proteção.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal desta dissertação é avaliar o desempenho da proteção diferencial de LTs baseada na teoria de OV's quando aplicada em linhas híbridas. Para isso, foram definidos como objetivos específicos:

- Fazer uma revisão bibliográfica sobre os fundamentos da proteção diferencial de LTs baseada em componentes fundamentais e na teoria de OV's;
- Avaliar e esclarecer os problemas da aplicação da função TW87 em linhas híbridas;
- Entender as considerações acerca da parametrização dos ajustes da TW87 quando aplicada em linhas híbridas visando manter a segurança e confiabilidade;
- Explicar as consequências da aplicação da função TW87 em linhas híbridas em termos de confiabilidade e segurança;
- Executar simulações no *Alternative Transient Program* (ATP) para avaliar o desempenho da função TW87 em linhas híbridas com diferentes topologias.

### 1.3 CONTRIBUIÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A principal contribuição desta dissertação é a realização de uma avaliação detalhada de desempenho da função TW87 quando aplicada em linhas híbridas. Através das análises realizadas, foi possível observar as particularidades operacionais da TW87 quando aplicada em LTs compostas por trechos com diferentes parâmetros elétricos, ilustrando problemáticas e soluções que conferem à função segurança e confiabilidade.

Em relação à divulgação dos resultados obtidos ao longo dos estudos realizados, enumeram-se a seguir, as publicações em anais de conferências nacionais e internacionais:

- **RIBEIRO, C. M. S.**; LOPES, F. V.; RIBEIRO, J. P. G. Traveling Wave-Based Differential Protection Applied to Hybrid Transmission Lines: Performance and Setting Studies. In: *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (VII SBSE)*. Niterói, Brasil: Maio, 2018.
- LOPES, F. V.; **RIBEIRO, C. M. S.**; RIBEIRO, J. P. G., LEITE JR, E. J. S. Performance Evaluation of the Traveling Wave-Based Differential Protection When Applied on Hybrid Transmission Lines. In: *14th International Conference on Developments in Power Systems Protection (DPSP)*. Belfast, Irlanda do Norte: Março, 2018 <sup>2</sup>.

### 1.4 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Esta dissertação está organizada de acordo com a seguinte estrutura:

- No Capítulo 2, realiza-se um levantamento do estado da arte sobre a proteção diferencial de LTs e sobre linhas híbridas.
- No Capítulo 3, realiza-se uma revisão da fundamentação teórica da função TW87.
- No Capítulo 4, descrevem-se os passos da implementação realizada da função TW87.
- No Capítulo 5, explicam-se as particularidades da aplicação da TW87 em linhas híbridas, destacando os principais aspectos que devem ser levados em consideração.
- No Capítulo 6, são analisados os resultados de simulações computacionais no ATP.
- Por fim, no Capítulo 7, são apresentadas conclusões acerca dos resultados obtidos e propostas para trabalhos futuros.

---

<sup>2</sup>Artigo publicado no *The Journal of Engineering, IET Journals, ISSN 2051-3305, estratificado com Qualis B5 na plataforma CAPES*.

# REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com o objetivo de melhor entender sobre a proteção diferencial de LTs, apresenta-se neste capítulo uma revisão bibliográfica do estado da arte de trabalhos relacionados ao tema. Para facilitar a explicação, os trabalhos são separados de acordo com os fundamentos associados, sendo considerados os seguintes grupos: algoritmos baseados em componentes fundamentais e na teoria de OV. Os trabalhos são reportados em ordem cronológica, correlacionando-os por fim no contexto de linhas híbridas.

### 2.1 PROTEÇÃO DIFERENCIAL BASEADA EM COMPONENTES FUNDAMENTAIS

No início da década de 80, a proteção diferencial de LTs se encontrava em relativa estagnação. Somente com o advento dos relés digitais e a comunicação por fibra óptica que esse tipo de proteção passou a ganhar força novamente (MOLAS, 2014). A partir dessa época, diversos estudos foram realizados visando utilizar essas novas tecnologias na busca por um esquema de proteção mais seguro e confiável. Ou seja, devido às melhorias na comunicação de dados, a proteção diferencial de LTs se tornou viável e pôde ser melhor explorada.

Um dos primeiros estudos que sugeriram o uso da proteção diferencial de LTs diante dos avanços tecnológicos é apresentado em Sun & Ray (1983). No trabalho, recomenda-se a substituição do então chamado fio piloto que conectava os relés de cada terminal por um canal de comunicação utilizando fibra óptica, evidenciando as vantagens dessa troca, como a diminuição de interferências eletromagnéticas. Além disso, são apresentadas técnicas comparativas utilizando dados de terminais distintos, em que se mostra o considerável aumento na confiabilidade do canal de comunicação com a substituição do tipo de material usado, evidenciando-se a possibilidade de aplicação de um esquema de proteção diferencial em LTs usando canais de fibra óptica para a transmissão de dados.

No ano seguinte, Sugiyama *et al.* (1984) apresentaram alguns resultados de interferências ocasionados pelo uso do fio piloto como canal de comunicação na proteção diferencial de LTs, tais como a indução eletromagnética, mostrando que, devido a essas interferências, o comprimento da LT monitorada ao utilizar esse tipo de canal deveria ser limitado. Por fim, Sugiyama *et al.* (1984) sugerem a utilização de fibra óptica na transmissão de dados, e para exemplificar as melhorias proporcionadas pela substituição no tipo de canal de comunicação, apresentam alguns resultados de testes em uma dada LT utilizando os dois tipos de comunicação.

Em Aggarwal & Johns (1986) foi apresentado um esquema de proteção diferencial aplicado em LTs de três terminais utilizando um canal de comunicação de fibra óptica para a transmissão de dados entre os relés de cada terminal. A contribuição desse trabalho é a apresentação de técnicas de filtragem e processamento de sinais que promoveram uma melhoria no desempenho da proteção diferencial de LTs, garantindo assim uma maior confiabilidade e segurança.

Ernst *et al.* (1992) propuseram um método de proteção diferencial de correntes utilizando comparação de cargas. Dessa forma, alguns problemas típicos da proteção diferencial como perda ou falha no canal de comunicação, ou ainda, a necessidade de uma certa largura de banda e de compensar possíveis atrasos no canal de comunicação foram amenizados. Ainda nesse trabalho, os autores apresentam a característica de restrição do plano polar denominado arco-íris, do inglês *rainbow*, a qual antecede a característica do plano- $\alpha$ .

Ward & Erwin (1993) avaliaram e compararam os esquemas de proteção diferencial de corrente e comparação de cargas utilizando indicadores de desempenho como velocidade de atuação, sensibilidade, confiabilidade e segurança. Nesse trabalho, os esquemas de proteção foram avaliados frente a fatores de erros como a saturação de transformadores de corrente (TCs), níveis de carregamento, atrasos no canal de comunicação, presença da corrente capacitiva, entre outros. Além disso, o trabalho também apresentou formas de parametrizar os ajustes dos relés que usam a proteção diferencial de LTs baseada em componentes fundamentais.

Em Adamiak *et al.* (1998) é proposta uma abordagem diferente da proteção diferencial de LTs, em que se consegue um melhor desempenho em relação à proteção diferencial percentual convencional. Ainda nesse trabalho, são apresentadas considerações sobre os meios de comunicação entre os relés, técnicas de compensação da corrente capacitiva, técnicas de modulação de sinais e interfaces físicas para o canal de comunicação.



Em Roberts *et al.* (2000) foram avaliadas a confiabilidade e segurança da proteção diferencial de LTs. Adicionalmente, realizou-se uma análise comparativa entre os tipos de características diferenciais, circulares e não circulares, de acordo com as diferentes possibilidades de correntes de operação e restrição. Por fim, apresentou-se um elemento de proteção diferencial de LTs baseado na análise das trajetórias na característica do plano- $\alpha$ .

Em Darwish *et al.* (2005) é apresentado uma análise de um esquema de proteção diferencial que utiliza as potências ativa e reativa de cada terminal da LT monitorada no lugar da corrente para efetuar a detecção de faltas. Essa análise diferencial utilizando potências de operação e restrição é análoga a realizada pelos esquemas que usam corrente, porém pelo fato da grandeza potência não ser um fasor, elimina-se a necessidade de sincronização de dados.

Gajic *et al.* (2007) apresentaram um estudo que sugere o uso da proteção diferencial em detrimento da proteção de distância. Tal constatação foi motivada pelo aumento no número de SEEs com múltiplos terminais. Posteriormente, em Gajic *et al.* (2009), adicionou-se à lógica de proteção uma solução para a remoção da corrente capacitiva. Assim, dos resultados obtidos, evidenciou-se a robustez da proteção diferencial de LTs, mostrando que esse esquema de proteção é vantajoso para proteger SEEs com múltiplos terminais.

Sezi *et al.* (2008) analisaram o desempenho da proteção diferencial em casos de falta reais, destacando os tipos, atrasos e correções no canal de comunicação e as topologias disponíveis no mercado. Por fim, os autores propuseram uma característica de restrição diferencial adaptativa, e na ocasião ainda foram discutidos aspectos relacionados à parametrização dos ajustes do relé e os desafios a serem enfrentados pela proteção diferencial de LTs.

Em Kasztenny *et al.* (2013) é elaborado um tutorial sobre a proteção diferencial de LTs baseada em componentes fundamentais. No texto são contempladas análises, formas de implementação e utilização do referido esquema de proteção sujeito a diferentes topologias de SEEs, incluindo LTs com múltiplos terminais. As análises da proteção diferencial realizadas nesse trabalho são feitas através do plano operacional e do plano- $\alpha$ , destacando suas semelhanças, vantagens e desvantagens. Além disso, nos SEEs analisados são consideradas diferentes fontes de erro, como presença da corrente capacitiva, saturação de TCs e não sincronização do canal de comunicação. Por fim, são discutidos algoritmos adaptativos, os quais alteram o modo de operação a depender do ponto de operação do SEE.

No que se refere às primeiras aplicações de esquemas de proteção em linhas híbridas, em Tziouvaras & Needs (2014) são descritos os desafios para os engenheiros de proteção em desenvolver técnicas para LTs com cabos subterrâneos. Os autores destacam que as características elétricas desses cabos são significativamente diferentes de cabos aéreos. Ainda, comenta-se sobre a dificuldade em calcular os parâmetros elétricos de cabos subterrâneos, pois é comum não existir acoplamento magnético entre as suas fases, de forma que a impedância de sequência zero passa a ser função do tipo de isolamento do cabo, dificultando sua determinação com precisão. Ainda nesse artigo, os autores afirmam que a proteção diferencial de corrente com elementos de sequência é a que fornece a melhor seletividade e sensibilidade para proteger linhas híbridas. Por fim, os autores admitem ser comum para efeitos de autorreligamento, que quando os trechos subterrâneos são pequenos, < 300 metros, costuma-se ignorar esses trechos e considerar todas as faltas no trecho aéreo, permitindo o autorreligamento em toda LT monitorada.

Em Bucco *et al.* (2017), novamente são apresentadas análises sobre os desafios que os esquemas de proteção enfrentam quando usados em linhas híbridas, exemplificando as avaliações com resultados de testes realizados na primeira LT de circuito duplo a operar com uma tensão nominal de 500 kV composta por cabos aéreos e subterrâneos da América do Norte. A topologia da linha híbrida em análise nesse trabalho consiste em três trechos, sendo dois aéreos separados por um subterrâneo. Foram avaliadas as proteções de distância e diferencial por corrente, operando a primeira com auxílio de um esquema permissivo de *trip*. Além disso, analisaram-se também os tipos de métodos de localização de faltas, e concluiu que nessa LT não seria confiável usar o método baseado em impedância, optando assim pela instalação de um localizador de faltas baseado em OV. Por fim, os autores descrevem como foram feitas as simulações digitais em tempo-real que resultaram na avaliação de desempenho dos esquemas de proteção na linha híbrida citada.

Ao longo dos anos surgiram outros trabalhos sobre a proteção diferencial de LTs baseada em componentes fundamentais, além de análises com esquemas de proteção para linhas híbridas. Porém, já na década de 80 se existia o interesse em desenvolver esquemas de proteção que operassem mais rapidamente, fato este que fez o meio científico perceber a possibilidade de análise de OV induzidas por faltas para fins de proteção. Assim, surgiram alguns dos trabalhos que serão apresentados a seguir.

## 2.2 PROTEÇÃO DIFERENCIAL BASEADA NA TEORIA DE ONDAS VIAJANTES

Acredita-se que os primeiros trabalhos que propuseram esquemas de proteção para SEEs baseados na análise das OV's lançadas por uma falta tenham surgido em meados do final da década de 1970 com Takagi *et al.* (1977), Dommel & Michels (1978) e Takagi *et al.* (1979). Logo após, no início da década de 1980, surgiram outros trabalhos que também propuseram esquemas de proteção baseados na teoria de OV's, dentre os quais, destacam-se os que foram propostos por Johns (1980) e Crossley & McLaren (1983).

Conforme mencionado, esses trabalhos foram motivados pela busca por esquemas de proteção mais rápidos. De fato, os esquemas de proteção baseados em componentes fundamentais requerem o processo de estimação de fasores, o qual impõe atrasos tipicamente entre 0,5 a 1,5 ciclos fundamentais (SCHWEITZER *et al.*, 2014). Dessa forma, trabalhos apresentaram soluções baseadas na análise das informações contidas nos transitórios eletromagnéticos gerados logo após a ocorrência de faltas em LTs para identificar curto-circuitos internos e externos à LT monitorada. Com isso, os primeiros esquemas de proteção com uma ultra-alta velocidade foram apresentados.

Tratando mais especificamente de cada trabalho, acredita-se que os artigos pioneiros em esquemas de proteção diferencial baseados na teoria das OV's foram Takagi *et al.* (1977) e Takagi *et al.* (1979). O princípio de operação da proteção diferencial que esses autores propuseram é simples, de certo modo. Sabe-se que, desprezando os efeitos de dispersão e atenuação das OV's ao longo da LT, uma OV incidente em um terminal quando atrasada do tempo de propagação da LT é igual à OV incidente no terminal oposto para casos de falta externa à LT monitorada. Tal princípio pode ser usado para montar um conjunto de equações capazes de diferenciar curtos-circuitos internos e externos à LT monitorada. Embora seja um método teoricamente simples, este possui algumas desvantagens de aplicação, como a necessidade de uma grande largura de banda do canal de comunicação e um elevado nível de precisão na sincronização de tempo entre os relés de cada terminal. Ademais, ao analisar as equações do método, nota-se o emprego de sinais de tensão nos algoritmos, o que é um fator complicador, devido às distorções inseridas nesses sinais pelos transformadores de potencial capacitivo (TPCs) (FISCHER *et al.*, 2012).

Um ano após o trabalho de Takagi *et al.* (1977), Dommel & Michels (1978) propuseram um esquema de proteção que se baseia na análise das amplitudes das OV's incidentes em cada terminal para identificar faltas internas e externas à LT protegida. Após alguns desenvolvimentos matemáticos, os autores chegaram a um fator de discriminação  $J$ , e com base nesse fator, tornou-se possível identificar a direção da falta, sendo que, para faltas diretas o fator  $J$  assume valores elevados, e para faltas reversas o fator  $J$  assume valores baixos, criando assim um elemento de proteção direcional. Todavia, um fator complicador desse método consiste na definição de um limiar para o fator  $J$ , pois esse limiar é fundamental para a determinação da direcionalidade da falta, e conseqüentemente, para a segurança do esquema de proteção. Por fim, semelhante ao método introduzido por Takagi *et al.* (1977), o método proposto por Dommel & Michels (1978) tem como limitações a necessidade de uma grande largura de banda do canal de comunicação e uma alta fidelidade nos sinais de tensão medidos. Porém, esse último tem como vantagem não ser necessária uma sincronização precisa de tempo entre os relés de cada terminal.

No início da década de 80, Johns (1980) propôs um esquema de proteção por comparação direcional com base na análise das OV's incidentes e refletidas nos terminais da LT monitorada. Dessa forma, com base na sequência em que as OV's excediam limiares pré-ajustados, tornava-se possível determinar a direção da falta. Sendo assim, para faltas diretas, a OV incidente chega antes da OV refletida, a qual tem um certo tempo de propagação para refletir em terminais atrás do relé e propagar de volta até o terminal monitorado. Já para faltas reversas, a OV refletida na falta chega muito antes da OV refletida no terminal remoto que retorna da localização do relé, tornando possível elaborar um esquema de proteção para distinguir as duas situações. Embora seja um método interessante, possui algumas limitações, como no caso em que as LT(s) adjacente(s) possue(m) comprimento(s) menor(es) que a distância de falta. Dessa forma, as OV's refletidas na descontinuidade atrás do relé poderiam ser confundidas com as OV's provenientes da falta. Além disso, de um modo geral, esse método apresenta uma relativa dependência com a topologia do SEE adjacente à LT monitorada, o que é um fator complicador para a segurança do esquema de proteção, especialmente em SEEs mais complexos. Ademais, assim como nos métodos anteriores, também há uma dependência de uma relativa largura de banda do canal de comunicação e sinais de tensão medidos com alta fidelidade para separação de OV's incidentes e refletidas, e esse último fator conforme comentado, é um dificultador (FISCHER *et al.*, 2012).

Ainda neste período, Crossley & McLaren (1983) propuseram outro método, um esquema de proteção de distância baseado na análise de OV's. Tal método tem como princípio o fato de que a OV lançada pela falta é refletida na localização do relé, retorna até a falta, onde então é refletida novamente, e finalmente, volta até o relé. Dessa forma, é possível determinar o tempo de propagação da OV do ponto de falta até o relé, e assim, pré-estabelecendo uma velocidade de propagação das OV's, torna-se possível estimar a localização da falta. Então, para faltas internas, o esquema retornaria uma localização dentro do alcance determinado para linha protegida, autorizando a emissão de um sinal de *trip* de operação, já para faltas externas é retornado um valor diferente do alcance determinado, sobre-alcançando ou sub-alcançando a LT monitorada, o que acarretaria em um conseqüente bloqueio do esquema de proteção. O método proposto por esses autores tem como vantagens a não dependência de um canal de comunicação, porém apresenta algumas desvantagens, como no caso em que as LT's adjacentes possuem comprimentos menores que a distância do local da falta até o relé, pois nesse caso as OV's refletidas nas descontinuidades atrás do relé podem ser confundidas com OV's refletidas no ponto de falta, comprometendo a segurança do esquema de proteção. Outra desvantagem é no caso de que só exista uma LT adjacente conectada ao terminal onde está o relé, e essa LT adjacente tenha os mesmos parâmetros elétricos da LT monitorada, dessa forma, não haveria OV refletida nesse terminal, inviabilizando a aplicação do método.

O período entre as décadas de 1970 e 1980 é reconhecidamente uma época de grande produtividade científica sobre esquemas de proteção que se baseiam na teoria de OV's. Entretanto, conforme foi comentado, para a aplicação de tais esquemas se mostrava ser necessário um canal de comunicação com uma largura de banda grande, além de uma grande precisão na sincronização de tempo entre os relés de cada terminal. Por fim, embora ainda não mencionado, os esquemas de proteção que se baseiam na análise de OV's têm sua confiabilidade associada com a taxa de amostragem, requerendo processamento em altas taxas a fim de obter uma boa representação das componentes de alta frequência dos sinais monitorados. Dessa forma, por mais que esses esquemas de proteção fossem interessantes do ponto de vista da velocidade de operação das proteções, devido a limitações tecnológicas da época não ultrapassaram o ambiente acadêmico, e de certa forma, isso desencorajou novas pesquisas sobre esse tema nos anos seguintes.

Somente nos anos 2000, ressurgiram pesquisas sobre esquemas de proteção de SEEs baseados na teoria de OV. Um dos trabalhos pioneiros desse recomeço foi o de Schweitzer *et al.* (2014), no qual pela primeira vez as funções de proteção baseadas em OV foram tratadas como algo realmente factível no âmbito da proteção digital. De fato, em posse de novas tecnologias, tornou-se possível contornar limitações do passado em relação ao processamento, comunicação e sincronização de dispositivos, reavivando ideias do passado no sentido de eliminar a necessidade de estimação de fasores e, finalmente, obter um esquema de proteção mais rápido. Dessa forma, Schweitzer *et al.* (2014) revisaram alguns métodos baseados na teoria de OV disponíveis na literatura, apresentando novas funções de proteção que trabalham no domínio do tempo, dentre as quais duas baseadas na teoria de OV se destacaram: a proteção direcional (TW32) e a proteção diferencial (TW87).

No ano seguinte, em Schweitzer *et al.* (2015), apresentou-se uma revisão dos princípios de operação das funções de proteção introduzidas em Schweitzer *et al.* (2014), mas agora apresentados de forma mais detalhada. Foram compartilhadas lógicas e procedimentos de implementação em *hardware* dessa função, sendo o desempenho da TW87 exemplificado utilizando registros de faltas em LTs reais. Por fim, no mesmo ano, foi apresentado no mercado o relé que contemplaria as funções apresentadas em Schweitzer *et al.* (2015), o SEL-T400L, o qual foi considerado o primeiro relé microprocessado do mundo com funções aplicadas no domínio do tempo, com funções de fato baseadas na teoria de OV, sendo uma dessas, a TW87.

A função TW87 consiste em um algoritmo de proteção baseado na teoria de OV que está incorporado ao relé SEL-T400L, o qual tem sido fabricado sob domínio da empresa *Schweitzer Engineering Laboratories* (SEL). Esse relé microprocessado é constituído por um conjunto de funções de proteção no domínio do tempo que trabalham de forma sinérgica com o objetivo de conseguir tempos de atuação na ordem de poucos milissegundos (SCHWEITZER *et al.*, 2015). Ainda no artigo Schweitzer *et al.* (2015) foram realizadas comparações de desempenho dos novos elementos de proteção com os esquemas de proteção tradicionais baseados em componentes fundamentais, destacando-se o avanço em termos de redução nos tempos de atuação da proteção que se foi conseguido ao utilizar as funções no domínio do tempo. Nesses testes, a função TW87 demonstrou desempenho promissor, sendo capaz de operar com tempos de ordem de poucos milissegundos.

Uma vez que as funções no domínio do tempo são de certo modo novas no meio científico e empresarial, as concessionárias demonstraram grande interesse em entender melhor os princípios de operação e como são configuradas essas funções de proteção, de tal forma que em Kasztenny *et al.* (2016) foram revisados os conceitos e apresentadas recomendações de como parametrizar os ajustes das funções disponíveis no relé SEL-T400L. Embora tenham sido projetadas para serem funções que necessitam de poucos ajustes, as configurações dessas funções no domínio do tempo são críticas para o desempenho do esquema de proteção. Por exemplo, um dos poucos ajustes da função TW87 é o tempo em que uma OV leva para se propagar ao longo de todo o comprimento da LT monitorada. Ainda assim, pequenos equívocos no valor desse ajuste já podem comprometer o funcionamento da função a ponto de causar atuações indevidas para faltas externas, como será visto posteriormente.

Especificamente falando da TW87, essa função se destacou dentre as demais disponíveis no relé SEL-T400L por requerer poucos ajustes, provendo a proteção unitária de LTs de forma confiável e segura. Motivados pelo destaque da referida função, Lopes *et al.* (2016) apresentaram uma análise de sensibilidade paramétrica (ASP) da TW87. Nesse trabalho foi possível observar o comportamento da TW87 mediante cenários com diferentes localizações de falta, ângulos de incidência da falta, resistência de falta, carregamento do SEE, e valores de impedância das fontes dos equivalentes de Thévenin. Concomitantemente, os autores consideraram diferentes valores para os ajustes da função TW87, esclarecendo assim os seus níveis de sensibilidade. Por fim, foram apresentadas análises dos tempos de atuação da função para os diferentes cenários de falta avaliados.

Adicionalmente ao até então exposto, devido ao ineditismo das funções no domínio do tempo no mercado, os desenvolvedores apresentaram em Schweitzer *et al.* (2016) mais recomendações de técnicas para testar e como comparar o desempenho dessas funções com as tradicionais baseadas em componentes fundamentais. Schweitzer *et al.* (2016) redefinem alguns conceitos de desempenho de esquemas de proteção, como velocidade, segurança, confiabilidade e sensibilidade ao analisar funções no domínio do tempo. Por fim, apresentam algumas técnicas que devem ser consideradas para testar essas funções, como por exemplo, critérios de escolha para as variações de ângulos de incidência, resistência de falta, relação impedância-fonte (SIR), entre outros.

No ano seguinte foi disponibilizado pela SEL o manual de instrução do relé SEL-T400L, e tão logo apresentado em SEL (2017), percebeu-se que esse documento trazia a público a possibilidade, de que mesmo sendo a TW87 projetada para monitorar LTs aéreas, essa poderia ser adaptada a partir de uma engenharia de ajuste cuidadosa para aplicações em linhas híbridas, as quais são formadas por cabos aéreos, subterrâneos e/ou submarinos. Para tanto, basicamente, algumas restrições em relação ao comprimento e impedância de sequência zero e positiva do trecho subterrâneo/submarino devem ser consideradas, conforme reportado em SEL (2017). Além disso, no manual foram detalhados alguns processos adicionais da TW87, como a supervisão de sobrecorrente (OC87), que até então não havia sido explicada nos artigos publicados anteriormente pelos desenvolvedores da função. A supervisão OC87 é uma etapa adicional da TW87 que tem como objetivo verificar se o distúrbio detectado pela TW87 possui energia suficiente para ser considerado como um curto-circuito na LT monitorada ou em LTs adjacentes, distinguindo essas situações de casos de manobras de chaveamento, a exemplo de chaveamento de banco de capacitores, mudança de *tap* de transformadores, entre outros.

No mesmo período, surgiram trabalhos que apresentavam métodos de localização de faltas em linhas híbridas baseados na análise de OV, como o apresentado em Pires *et al.* (2016). Tal método se mostrou capaz de identificar o trecho da linha híbrida em que ocorreu a falta e a localização do defeito de forma mais precisa do que o método de localização de faltas clássico de dois terminais baseado em OV. Nesse contexto, evidencia-se também o aumento do interesse das concessionárias pelo estudo e desenvolvimento de métodos de localização de faltas e proteção para linhas híbridas, especialmente pelo aumento significativo de LTs com trechos não-homogêneos em operação (KASZTENNY *et al.*, 2017).

Em Kasztenny *et al.* (2017) foram revisados alguns conceitos sobre linhas híbridas, como a diferença de velocidades de propagação das OV entre trechos aéreo e subterrâneo, além das alterações de amplitude das OV nas junções devido as diferenças das impedâncias de surto entre trechos. Em seguida, foi apresentado um método de localização de faltas para linhas híbridas com o objetivo de proporcionar um esquema de controle de autorreligamento adaptativo. Tal aplicação foi motivada pelo fato de faltas no trecho subterrâneo tenderem a consistir em curtos-circuitos permanentes, de modo que o autorreligamento deve ser cancelado, enquanto que faltas no trecho aéreo tendem a serem temporárias, sendo indicado o religamento da LT.



Em Abboud & Dolezilek (2017) foram apresentados os benefícios da utilização da função TW87, por exemplo, a melhoria das margens de estabilidade das LTs proporcionada pela diminuição no tempo de atuação da proteção, além de melhorias na qualidade da energia elétrica. Por fim, os autores revisam os benefícios do autorreligamento adaptativo baseado na localização de faltas para linhas híbridas apresentado em Kasztenny *et al.* (2017).

Motivados pelas pesquisas supracitadas, Lopes *et al.* (2018) apresentaram uma avaliação de desempenho da função TW87 quando aplicada em linhas híbridas. Nesse trabalho foi possível observar as particularidades de aplicação da referida função em uma LT formada por um trecho com cabos aéreos e outro trecho com cabos subterrâneos. Buscou-se avaliar a proteção de uma linha híbrida por meio da função TW87, sendo esta ajustada para proteger uma LT totalmente aérea de igual comprimento, simulando o caso de desconsideração do trecho subterrâneo. Como resultado, percebeu-se que visando manter a segurança da função de proteção ao configurá-la dessa forma, faziam-se necessárias considerações acerca do comprimento e da impedância característica do trecho subterrâneo. Concomitantemente, em Ribeiro *et al.* (2018) foram apresentados resultados mostrando a robustez da função TW87 quando aplicada em linhas híbridas. Em termos de resultados, concluiu-se que embora a função seja ajustada aproximando a linha híbrida por uma LT totalmente aérea, a segurança para faltas internas foi mantida para os casos analisados no trabalho, bem como a segurança para curtos-circuitos externos desde que algumas restrições em relação ao comprimento do trecho subterrâneo fossem levadas em consideração.

## 2.3 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Na Tabela 2.1, apresenta-se o resumo da revisão bibliográfica apresentada neste capítulo a respeito da proteção diferencial de LTs. Na tabela, destacam-se os conteúdos abordados em cada trabalho do ponto de vista da fundamentação teórica, ajustes, funções auxiliares e implementação. Do exposto, percebe-se que os pesquisadores estudavam inicialmente técnicas para a transmissão de dados entre os relés da LT monitorada, na busca por um canal de comunicação que atendesse as necessidades de um esquema de proteção diferencial, para somente mais adiante surgirem estudos mais detalhados sobre a proteção de fato.

O início da década de 1980 se destaca pelo número de trabalhos sobre esquemas de proteção diferencial baseados na análise de componentes fundamentais. De fato, devido às limitações tecnológicas existentes da época, como, no canal de comunicação, amostragem e resolução de sinais medidos, os esquemas de proteção baseados em componentes fundamentais se destacaram em relação aos baseados na teoria de OV's, sendo portanto, alvo de mais estudos e mais frequentemente encontrados no mercado.

Nos anos seguintes, surgiram estudos que apresentaram variações da proteção diferencial de LTs baseada em componentes fundamentais, tais como, utilizando-se a comparação de fases, potências ativa e reativas, entre outros. Além disso, surgiram características operacionais como o plano *rainbow* e o plano- $\alpha$ . Alguns trabalhos também analisaram a proteção diferencial para diferentes topologias de SEEs, por exemplo, múltiplos terminais, além de, testes frente a fontes de erros, como saturação de TCs, entre outros. Além disso, foram apresentadas considerações acerca dos ajustes e detalhes sobre a implementação numérica de diferentes esquemas de proteção. Por fim, surgiram trabalhos que apresentaram desafios para as funções de proteção baseados em componentes fundamentais quando aplicadas em linhas híbridas, destacando as particularidades desse tipo de LT.

Ressalta-se que alguns pesquisadores avançaram os estudos de esquemas de proteção baseados na teoria de OV's em anos recentes. Nessas pesquisas, buscavam-se tempos de atuação mais rápidos do que apresentados pelos relés tradicionais. Para tanto, a solução encontrada em vez de utilizar as componentes fundamentais que requerem a estimação fasorial, consistiu na análise das OV's lançadas por uma falta (SCHWEITZER *et al.*, 2014). Recentemente, apresentou-se a proteção diferencial baseada na teoria de OV's (função TW87) e logo após, surgiram trabalhos sobre proteção e localização de faltas que avaliaram o desempenho dessa função em diferentes cenários de curto-circuito e frente a variações na topologia do SEE. Por fim, SEL (2017) demonstrou a possibilidade de aplicação da TW87 em linhas híbridas, fato este que motivou os estudos apresentados no presente trabalho.

**Tabela 2.1.** Resumo da revisão bibliográfica.

Referência	Conteúdo Abordado							
	Classificação	CC	87	AJ	LF	LH	OC	IN
Sun & Ray (1983)	CF	✓	–	–	–	–	–	–
Sugiyama <i>et al.</i> (1984)	CF	✓	–	–	–	–	–	–
Aggarwal & Johns (1986)	CF	–	✓	–	–	–	–	–
Ernst <i>et al.</i> (1992)	CF	✓	✓	–	–	–	–	–
Ward & Erwin (1993)	CF	✓	✓	✓	–	–	–	–
Adamiak <i>et al.</i> (1998)	CF	✓	✓	–	–	–	–	–
Roberts <i>et al.</i> (2000)	CF	–	✓	–	–	–	–	–
Darwish <i>et al.</i> (2005)	CF	✓	✓	–	–	–	–	–
Gajic <i>et al.</i> (2007)	CF	–	✓	–	–	–	–	–
Sezi <i>et al.</i> (2008)	CF	✓	✓	✓	–	–	–	–
Gajic <i>et al.</i> (2009)	CF	–	✓	–	–	–	–	–
Kasztenny <i>et al.</i> (2013)	CF	–	✓	–	–	–	–	✓
Tziouvaras & Needs (2014)	CF	–	✓	–	–	✓	–	–
Bucco <i>et al.</i> (2017)	CF	–	✓	✓	✓	✓	–	–
Takagi <i>et al.</i> (1977)	OV	✓	✓	–	–	–	–	–
Dommel & Michels (1978)	OV	✓	–	–	–	–	–	–
Takagi <i>et al.</i> (1979)	OV	✓	✓	–	–	–	–	–
Johns (1980)	OV	✓	–	–	–	–	–	–
Crossley & McLaren (1983)	OV	–	–	–	–	–	–	–
Schweitzer <i>et al.</i> (2014)	OV	–	✓	–	–	–	–	–
Schweitzer <i>et al.</i> (2015)	OV	–	–	–	–	–	–	✓
Schweitzer <i>et al.</i> (2016)	OV	–	✓	–	–	–	–	–
Kasztenny <i>et al.</i> (2016)	OV	–	✓	✓	–	–	–	–
Lopes <i>et al.</i> (2016)	OV	–	✓	✓	–	–	–	✓
Pires <i>et al.</i> (2016)	OV	–	–	–	✓	✓	–	–
Kasztenny <i>et al.</i> (2017)	OV	–	–	–	✓	✓	–	–
Abboud & Dolezilek (2017)	OV	–	✓	–	✓	✓	–	–
SEL (2017)	OV	✓	✓	✓	–	–	–	✓
Lopes <i>et al.</i> (2018)	OV	–	✓	✓	–	✓	✓	✓
Ribeiro <i>et al.</i> (2018)	OV	–	✓	✓	✓	✓	–	✓
<b>Esta Dissertação</b>	OV	–	✓	✓	✓	✓	✓	✓

**Legenda:**

CF = Componentes Fundamentais; OV = Ondas Viajantes; CC = Canal de Comunicação;  
87 = Proteção Diferencial; AJ = Ajustes; LF = Localização de Faltas;  
LH = Linhas Híbridas; OC = Sobrecorrente; IN = Implementação Numérica.

# FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, apresenta-se a fundamentação teórica da proteção diferencial baseada na teoria de OV's, a função TW87. Destacam-se os principais conceitos físicos e matemáticos que norteiam a TW87, de tal forma a facilitar o entendimento do leitor acerca da implementação da função, bem como de suas particularidades quando aplicada em linhas híbridas.

### 3.1 MODELAGEM DE LTS

Primeiramente, faz-se uma breve revisão teórica dos modelos de LTS, pois o entendimento do princípio de operação da função TW87 pode ser compreendido a partir dos modelos de LT longa. No que tange a modelagem de LTS, as formas mais comuns de se modelar consideram os parâmetros elétricos concentrados ou distribuídos ao longo do comprimento da LT, recaindo assim em dois modelos principais, os quais serão explicados a seguir.

#### 3.1.1 Parâmetros Concentrados

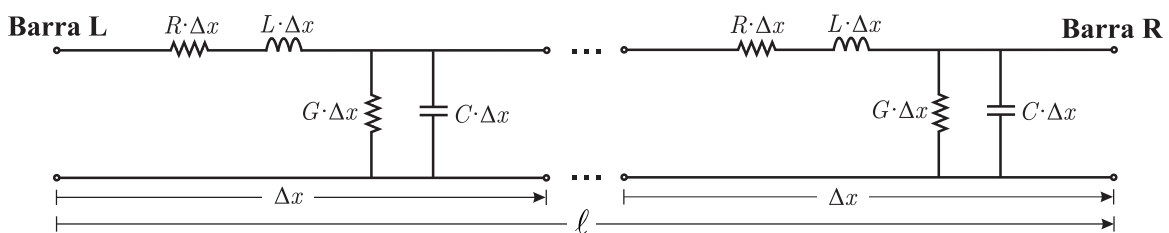
Representar uma LT a parâmetros concentrados é uma aproximação realizável para comprimentos pequenos  $\ell$  de LT (ARAÚJO; NEVES, 2005). Para Glover *et al.* (2009) esse modelo ainda é subdividido em LTS curtas e médias, sendo que LTS aéreas em um SEE que opera a 60 Hz são consideradas curtas quando  $\ell < 25$  km. Assim, permite-se sua representação apenas por uma impedância equivalente calculada na frequência nominal do SEE, desprezando o efeito capacitivo. Quando  $25 < \ell < 250$  km, as LTS são consideradas médias (GLOVER *et al.*, 2009), e nesse submodelo, inclui-se o efeito capacitivo através da inserção de admitâncias em derivação ao submodelo de LTS curtas. Nesse caso, é comum dividir essa admitância em duas parcelas iguais, as quais são colocadas nas extremidades da LT.

Ao modelar uma LT a parâmetros concentrados, as variações de tensão e a corrente que ocorrem em um terminal serão instantaneamente percebidas no terminal oposto, o que não é o que ocorre na prática. De fato, sabe-se que as variações nos sinais em um terminal levam um certo tempo para se propagarem ao longo da LT até o terminal oposto (SAHA *et al.*, 2010), o que fica mais evidente no caso de LTS longas. Portanto, representar uma LT a parâmetros concentrados implica na desconsideração desse tempo de propagação dos sinais ao longo do comprimento da LT, o que em alguns estudos envolvendo a TW87 é aceitável. Conforme mencionado anteriormente, essa função tem como base a propagação de OV's ao longo de uma LT (SCHWEITZER *et al.*, 2014). Então, para avaliar a TW87, faz-se necessário considerar o modelo de LTS a parâmetros distribuídos, possibilitando a análise do fenômeno de propagação das OV's.

### 3.1.2 Parâmetros Distribuídos

Ao modelar uma LT a parâmetros distribuídos, o tempo de propagação da LT é considerado. Sendo assim, para calcular o perfil das tensões e correntes ao longo da LT, faz-se necessário conhecer as tensões e correntes em pelo menos uma das extremidades da linha bem como a distância do ponto no sistema em que se pretende calcular as referidas grandezas elétricas (SAHA *et al.*, 2010).

Na Figura 3.1, ilustra-se o circuito equivalente de uma LT modelada a parâmetros distribuídos, sendo o comprimento total entre a Barra Local (Barra L) e Barra Remota (Barra R) igual a  $\ell$ . Observa-se que nesse modelo a LT é composta por vários elementos infinitesimais de comprimento  $\Delta x$ , em que  $R$  e  $L$  representam a resistência e indutância série, respectivamente,  $G$  e  $C$ , representam a condutância e capacitância em derivação, respectivamente, por unidade de comprimento.



**Figura 3.1.** Modelo de LT a parâmetros distribuídos.

Percebe-se que os sinais de tensão e corrente dependem do espaço e do tempo. Sendo assim, de posse de registradores digitais com uma alta taxa de amostragem nas barras da LT é possível identificar, por exemplo, os tempos de chegada das OV's lançadas por uma falta em cada terminal. Diante do exposto, conclui-se que modelar a LT a parâmetros distribuídos é fundamental para a avaliação da TW87, sendo este o modelo utilizado nesta dissertação.

### 3.2 PROPAGAÇÃO DE ONDAS VIAJANTES EM LTS

Na Figura 3.2, representa-se um segmento de comprimento  $\Delta x$  de uma LT de comprimento  $\ell$  representada a parâmetros distribuídos, conforme ilustrada na Figura 3.1, sendo  $v$  a tensão fase-terra e  $i$  a corrente de linha. Portanto, ao aplicar a Lei de Kirchhoff das Correntes e das Tensões no nó 1 e na malha I, respectivamente, obtêm-se:

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

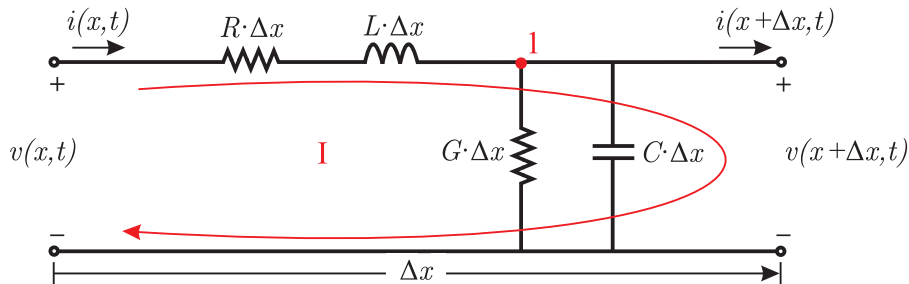
$$i(x + \Delta x, t) - i(x, t) = -G \cdot \Delta x \cdot v(x + \Delta x, t) - C \cdot \Delta x \cdot \frac{\partial v(x + \Delta x, t)}{\partial t}, \quad (3.2)$$

Dividindo ambos os lados de (3.1) e (3.2) pelo comprimento do segmento da LT em análise  $\Delta x$ , obtêm-se do lado esquerdo da igualdade a taxa de variação de tensão e corrente com relação a  $\Delta x$ , respectivamente. Dessa forma, considerando o comprimento do segmento de LT avaliado como sendo infinitesimal ( $\Delta x \rightarrow 0$ ), têm-se:

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

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

As Equações (3.3) e (3.4) são as equações diferenciais de LTS no domínio do tempo, em que é possível concluir que as OV's de tensão e corrente têm sua amplitude reduzida à medida que



**Figura 3.2.** Segmento de comprimento  $\Delta x$  de uma LT.

se propagam ao longo da LT no sentido positivo de  $x$ , pois as taxas de variação dos sinais são proporcionais ao negativo dos parâmetros elétricos da LT (SCHWEITZER *et al.*, 2014). Com a solução desse par de equações, determina-se a variação dos sinais de tensão e corrente tanto no tempo quanto ao longo do comprimento da LT (ARAÚJO; NEVES, 2005).

A fim de facilitar as demonstrações matemáticas que se sucedem, transformam-se (3.3) e (3.4), que estão no domínio do tempo, para o domínio da frequência. Para tal, utiliza-se da Transformada de Laplace (NISE, 2002):

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

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

na qual  $V(x, s)$  e  $I(x, s)$  são  $v(x, t)$  e  $i(x, t)$ , respectivamente quando transformadas do domínio do tempo para o domínio de Laplace, considerando as condições iniciais nulas.

Ao analisar SEE, costuma-se tratar os sinais utilizando a Transformada de Fourier (NISE, 2002), que é um caso particular da Transformada de Laplace no qual a variável  $s$  do domínio de Laplace é igual a  $j\omega$ , sendo  $j$  referente à unidade imaginária,  $j = \sqrt{-1}$ , e  $\omega$  a frequência angular dada em rad/s e calculada como sendo  $\omega = 2\pi f$ , em que  $f$  a frequência dada em Hz. Ao aplicar esses conceitos, (3.5) e (3.6) se tornam:

$$\frac{\partial V(x, \omega)}{\partial x} = -(R + j\omega L) \cdot I(x, \omega), \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial I(x, \omega)}{\partial x} = -(G + j\omega C) \cdot V(x, \omega), \quad (3.8)$$

de modo que a impedância série e a admitância *shunt* por unidade de comprimento são definidas como  $Z = R + j\omega L$  e  $Y = G + j\omega C$ , respectivamente. Dessa forma, (3.7) e (3.8) podem ser reescritas como:

$$\frac{\partial V(x, \omega)}{\partial x} = -Z \cdot I(x, \omega), \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial I(x, \omega)}{\partial x} = -Y \cdot V(x, \omega), \quad (3.10)$$

as quais ao serem derivadas em relação  $x$ , resultam em:

$$\frac{\partial V^2(x, \omega)}{\partial x^2} = -Z \cdot \frac{I(x, \omega)}{\partial x} \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial I^2(x, \omega)}{\partial x^2} = -Y \cdot \frac{V(x, \omega)}{\partial x} \quad (3.12)$$

Dessa forma, ao substituir (3.9) em (3.12) e (3.10) em (3.11), têm-se que:

$$\frac{\partial V^2(x, \omega)}{\partial x^2} = Z \cdot Y \cdot V(x, \omega), \quad (3.13)$$

$$\frac{\partial I^2(x, \omega)}{\partial x^2} = Y \cdot Z \cdot I(x, \omega). \quad (3.14)$$

A partir de (3.14) e (3.13), define-se então uma variável chamada de constante de propagação  $\gamma$  das OV's, a qual é dada por:

$$\gamma = \sqrt{Z \cdot Y}, \quad (3.15)$$

de tal forma que,  $\gamma = \alpha + j\beta$  é um número complexo, em que a parte real  $\alpha$  representa a constante de atenuação das OV's ao longo da LT, cuja unidade é Np/m e  $\beta$  representa a constante de fase, cuja unidade é rad/m (SCHWEITZER *et al.*, 2013). Assim, substituindo  $\gamma$  em (3.13) e (3.14), obtêm-se:

$$\frac{\partial V^2(x, \omega)}{\partial x^2} - \gamma^2 \cdot V(x, \omega) = 0, \quad (3.16)$$

$$\frac{\partial I^2(x, \omega)}{\partial x^2} - \gamma^2 \cdot I(x, \omega) = 0. \quad (3.17)$$

As soluções gerais de (3.16) e (3.17) são:

$$V(x, \omega) = V^+(\omega) \cdot e^{-\gamma x} + V^-(\omega) \cdot e^{+\gamma x}, \quad (3.18)$$

$$I(x, \omega) = I^+(\omega) \cdot e^{-\gamma x} + I^-(\omega) \cdot e^{+\gamma x}. \quad (3.19)$$

Portanto, a partir de (3.18) e (3.19), conclui-se que as OV's de tensão e corrente lançadas em LTs são formadas pela superposição de duas parcelas que se propagam em sentidos opostos, uma OV progressiva e uma OV regressiva. Para melhor ilustrar esse comportamento, na Figura 3.3 são apresentadas as correspondentes OV's de tensão e corrente  $V(x, \omega)$  e  $I(x, \omega)$  vistas no domínio do tempo, ou seja,  $v(x, t)$  e  $i(x, t)$ , respectivamente.

Ao substituir (3.18) e (3.19) em (3.9) e (3.10), respectivamente, obtêm-se:

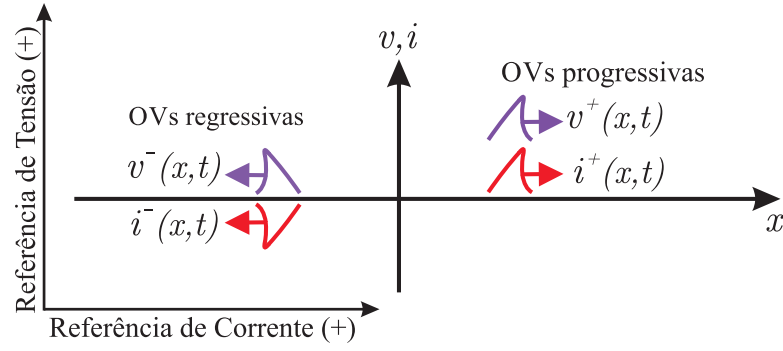
$$\gamma \cdot (-V^+(\omega) \cdot e^{-\gamma x} + V^-(\omega) \cdot e^{+\gamma x}) = -Z \cdot (I^+(\omega) \cdot e^{-\gamma x} + I^-(\omega) \cdot e^{+\gamma x}), \quad (3.20)$$

$$\gamma \cdot (-I^+(\omega) \cdot e^{-\gamma x} + I^-(\omega) \cdot e^{+\gamma x}) = -Y \cdot (V^+(\omega) \cdot e^{-\gamma x} + V^-(\omega) \cdot e^{+\gamma x}). \quad (3.21)$$

Então, ao igualar os coeficientes de  $e^{-\gamma x}$  e  $e^{+\gamma x}$  em (3.20) e (3.21), tem-se:

$$Z_C = \frac{V^+(\omega)}{I^+(\omega)} = -\frac{V^-(\omega)}{I^-(\omega)}, \quad (3.22)$$





**Figura 3.3.** Ondas viajantes progressivas e regressivas.

obtendo com essa razão entre a tensão e a corrente a definição da impedância característica  $Z_C$  de uma LT, a qual consistem em uma grandeza constante que depende apenas dos parâmetros elétricos da LT:

$$Z_C = \sqrt{\frac{Z}{Y}} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}. \quad (3.23)$$

Por fim, (3.19) pode ser reescrita como sendo:

$$I(x, \omega) = \frac{1}{Z_C} \cdot (V^+(\omega) \cdot e^{-\gamma x} - V^-(\omega) \cdot e^{+\gamma x}). \quad (3.24)$$

Ao realizar análises com sinais de alta frequência ( $\omega \rightarrow \infty$ ), como é o caso das OV, percebe-se que as partes imaginárias de  $Z$  e  $Y$  são preponderantes em relação às partes reais. Sendo assim, a impedância característica pode ser aproximada pela impedância de surto  $Z_S$ , sendo essa definida como:

$$Z_S = \lim_{\omega \rightarrow \infty} Z_C = \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (3.25)$$

na qual  $\omega$  representa a frequência angular, e  $L$  e  $C$  a indutância série e a capacitância *shunt* da LT, respectivamente, sendo as duas últimas grandezas por unidade de comprimento.

Da Equação (3.25), percebe-se que a impedância de surto ao quadrado de uma LT é diretamente proporcional à sua indutância série e inversamente proporcional à sua capacitância *shunt*. Diante disso, e sabendo que em uma linha híbrida o efeito capacitivo nos trechos subterrâneos é mais pronunciado que em trechos aéreos devido à forma com que os condutores são organizados e isolados abaixo da terra, conclui-se que  $Z_S$  tende a ser menor em trechos subterrâneos do que em trechos aéreos. De fato, para trechos aéreos, impedância de surto associada  $Z_{SA}$  varia tipicamente entre 300 e 400  $\Omega$ , enquanto que em trechos subterrâneos a impedância de surto associada  $Z_{SS}$  pode variar entre 50 e 70  $\Omega$  (KASZTENNY *et al.*, 2017). Tal constatação é

importante, pois o valor de  $Z_S$  está relacionado com a amplitude da OV lançada por uma falta, e também com os coeficientes de reflexão e transmissão das OVs nos pontos de junção entre trechos.

Outra característica que advém da modelagem de LTs a parâmetros distribuídos é a velocidade de propagação das OVs. De (3.5) e (3.6), deriva-se a velocidade das OVs ao longo da LT. Assim, sabendo que as OVs são sinais de alta frequência, pode-se aproximar o modelo de LT para o caso em que as perdas são desprezíveis, ou seja,  $R = 0 \Omega$  e  $G = 0 S$ , obtendo-se:

$$\frac{\partial V(x, s)}{\partial x} = -s \cdot L \cdot I(x, s), \quad (3.26)$$

$$\frac{\partial I(x, s)}{\partial x} = -s \cdot C \cdot V(x, s). \quad (3.27)$$

Derivando (3.26) em relação a  $x$ , e isolando a derivada parcial da corrente, obtém-se que:

$$\frac{\partial I(x, s)}{\partial x} = -\frac{1}{s \cdot L} \frac{\partial^2 V(x, s)}{\partial x^2}. \quad (3.28)$$

Ao substituir (3.27) em (3.28), isolando a segunda derivada da tensão em relação a  $x$ :

$$\frac{\partial^2 V(x, s)}{\partial x^2} - s^2 \cdot LC \cdot V(x, s) = 0. \quad (3.29)$$

Analogamente, para a corrente em relação a  $x$ , tem-se que:

$$\frac{\partial^2 I(x, s)}{\partial x^2} - s^2 \cdot LC \cdot I(x, s) = 0. \quad (3.30)$$

Observa-se que (3.29) e (3.30) são equações diferenciais de 2ª ordem cujas soluções são dadas por:

$$\xi = \pm \sqrt{LC}, \quad (3.31)$$

de modo que ao substituir nas soluções gerais, têm-se:

$$V(x, s) = V^+(s) \cdot e^{-s \cdot x / (1/\sqrt{LC})} + V^-(s) \cdot e^{+s \cdot x / (1/\sqrt{LC})}, \quad (3.32)$$

$$I(x, s) = I^+(s) \cdot e^{-s \cdot x / (1/\sqrt{LC})} + I^-(s) \cdot e^{+s \cdot x / (1/\sqrt{LC})}. \quad (3.33)$$

Percebe-se que existe uma relação espaço-tempo no expoente, a qual pode ser definida como uma velocidade. Dessa forma, obtém-se a expressão matemática para a velocidade de propagação das OVs,  $v_p$ , sendo dada por:

$$v_p = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (3.34)$$

Da Equação (3.34), observa-se que a  $v_p^2$  é inversamente proporcional à indutância série e da capacitância *shunt* da LT. Sendo assim, para trechos em que o efeito capacitivo não é tão pronunciado,  $v_p$  tende a apresentar maiores, próximos à velocidade da luz, como em trechos aéreos, enquanto nos trechos com valores de capacitâncias maiores  $v_p$  tende a valores mais baixos, como em trechos subterrâneos. De fato, a  $v_p$  de uma OV em um trecho aéreo é cerca de 98% da velocidade da luz no vácuo, enquanto a  $v_p$  em um trecho de cabos subterrâneos pode ser da ordem de 50% da velocidade da luz no vácuo (KASZTENNY *et al.*, 2017).

Ainda com base na velocidade de propagação de OVs na LT, pode-se definir o tempo que uma OV leva para se propagar ao longo de uma LT de comprimento  $\ell$ , como sendo:

$$\tau = \frac{\ell}{v_p}. \quad (3.35)$$

Da mesma forma, percebe-se que para um trecho com comprimento  $\ell$  fixo, se a  $v_p$  for maior, como no caso dos trechos aéreos, o  $\tau$  tende a ser menor, enquanto para uma  $v_p$  menor, como caso dos trechos subterrâneos, o  $\tau$  tende a ser maior.

A função TW87 se baseia no  $\tau$  das OVs ao longo da LT monitorada para criar seu princípio de operação. Dessa forma, compreender como surgem as OVs, com que velocidade se propagam e o tempo que levam para percorrer a LT é importante para o entendimento dessa função e das suas particularidades quando aplicada em linhas híbridas. Além disso, outra característica intrínseca das OVs é a alteração de amplitude ao passarem por transições de impedâncias de surto diferentes, por exemplo, junções entre trechos aéreos e subterrâneos em linhas híbridas. Tal fato pode afetar o funcionamento da TW87 e é explicado a seguir.

### 3.3 COEFICIENTES DE REFLEXÃO E TRANSMISSÃO DE OVS

Uma vez explicados os fundamentos básicos da propagação de OVs em LTs, apresenta-se uma análise sobre as possíveis mudanças de amplitude que podem ocorrer quando OVs encontram descontinuidades ao longo de uma LT. Primeiramente, entende-se como sendo descontinuidade um ponto de transição no qual ocorre uma mudança súbita nos parâmetros elétricos da LT (SAHA *et al.*, 2010). Sendo assim, quando uma OV lançada por uma falta encontra uma descontinuidade, como no caso das junções entre trechos aéreos e subterrâneos, ou nos terminais de uma LT, essa OV é dividida em duas parcelas, sendo uma refletida e outra transmitida.

Para melhor entender o fenômeno citado, na Figura 3.4, ilustra-se um segmento de LT na junção de dois trechos com impedâncias características  $Z_{C1}$  e  $Z_{C2}$  e as OV's de tensão e corrente incidentes  $v_i(x, t)$ ,  $i_i(x, t)$ , refletidas  $v_r(x, t)$ ,  $i_r(x, t)$  e transmitidas  $v_t(x, t)$ ,  $i_t(x, t)$  em relação à descontinuidade no ponto  $x = 0$ , respectivamente, no domínio do tempo. Sabe-se que o formato das OV's de tensão e corrente que serão refletidas e transmitidas depende dos coeficientes de reflexão e transmissão, sendo possível obter equações matemáticas que relacionam as amplitudes das OV's que incidem em uma terminação com as OV's que são refletidas e/ou transmitidas.

Antes da incidência no trecho com impedância característica  $Z_{C2}$ , as OV's de tensão e corrente  $v_i(x, t)$ ,  $i_i(x, t)$  são dadas no domínio de Laplace por (NISE, 2002):

$$V_i(x, s) = A_1(s)^{-s \cdot x / v_p}, \quad (3.36)$$

$$I_i(x, s) = \frac{1}{Z_{C1}} \cdot A_1(s)^{-s \cdot x / v_p}, \quad (3.37)$$

nas quais  $A_1(s)$  é a amplitude da OV incidente e  $v_p$  a velocidade de propagação das OV's.

Após a incidência da OV no trecho com impedância característica  $Z_{C2}$ , as OV's de tensão e corrente refletidas terão sentidos opostos e possivelmente amplitudes diferentes, sendo:

$$V_r(x, s) = A_2(s)^{+s \cdot x / v_p}, \quad (3.38)$$

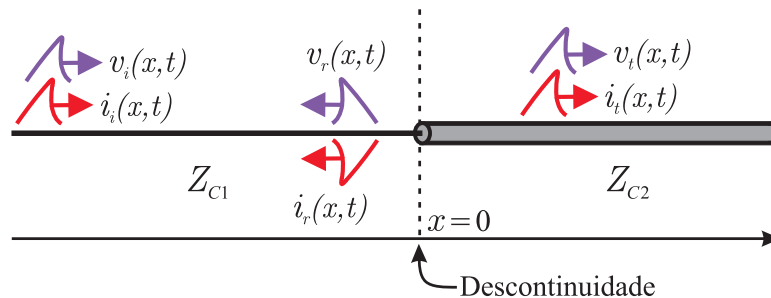
$$I_r(x, s) = -\frac{1}{Z_{C1}} \cdot A_2(s)^{+s \cdot x / v_p}, \quad (3.39)$$

nas quais  $A_2(s)$  é a amplitude da OV refletida.

No ponto de junção entre os trechos (local da descontinuidade) em  $x = 0$ , tem-se:

$$V_i(0, s) = A_1(s), \quad (3.40)$$

$$I_i(0, s) = \frac{1}{Z_{C1}} \cdot A_1(s), \quad (3.41)$$



**Figura 3.4.** Reflexão e transmissão de ondas viajantes.

$$V_r(0, s) = A_2(s), \quad (3.42)$$

$$I_r(0, s) = -\frac{1}{Z_{C1}} \cdot A_2(s). \quad (3.43)$$

Utilizando o princípio da superposição (DORF; SVOBODA, 2010), no ponto  $x = 0$ , tem-se que as OV's de tensão e corrente medidas são dadas pela soma das parcelas das incidentes e refletidas, de modo que:

$$V(0, s) = V_i(0, s) + V_r(0, s), \quad (3.44)$$

$$I(0, s) = I_i(0, s) + I_r(0, s). \quad (3.45)$$

Então, substituindo (3.40), (3.41), (3.42) e (3.43) em (3.44) e (3.45), têm-se:

$$V(0, s) = A_1(s) + A_2(s), \quad (3.46)$$

$$I(0, s) = \frac{A_1(s) + A_2(s)}{Z_{C1}}. \quad (3.47)$$

Outra condição de contorno em  $x = 0$  é que:

$$V(0, s) = Z_{C2} \cdot I(0, s). \quad (3.48)$$

Assim, ao substituir (3.46) e (3.47) em (3.48), tem-se:

$$A_1(s) + A_2(s) = Z_{C2} \cdot \left[ \frac{A_1(s) + A_2(s)}{Z_{C1}} \right], \quad (3.49)$$

ou seja,

$$A_2(s) = \left[ \frac{Z_{C2} - Z_{C1}}{Z_{C1} + Z_{C2}} \right] \cdot A_1(s). \quad (3.50)$$

A parcela entre colchetes em (3.50) relaciona a amplitude da OV refletida  $A_2(s)$  com a amplitude da OV incidente  $A_1(s)$ . Portanto, define-se dessa relação o coeficiente de reflexão de uma OV de tensão que se propaga em um trecho de impedância característica  $Z_{C1}$  e encontra uma descontinuidade com um trecho de impedância característica  $Z_{C2}$ :

$$R_{12}^v = \frac{Z_{C2} - Z_{C1}}{Z_{C1} + Z_{C2}}. \quad (3.51)$$

O coeficiente de reflexão das OV's de corrente é calculado substituindo (3.50) em (3.39):

$$R_{12}^i = -\frac{Z_{C2} - Z_{C1}}{Z_{C1} + Z_{C2}}. \quad (3.52)$$

De forma semelhante, define-se o coeficiente de transmissão das OV's. Para tanto, substitui-se (3.50) em (3.46):

$$V(0, s) = \left[ \frac{2 \cdot Z_{C2}}{Z_{C1} + Z_{C2}} \right] \cdot A_1(s), \quad (3.53)$$

na qual  $V(0, s)$  é a OV de tensão em  $x = 0$  que é igual à OV transmitida  $V_t(0, s)$  nesse ponto.

Diante do exposto, define-se então como o coeficiente de transmissão para uma OV de tensão que se propaga em um trecho de impedância característica  $Z_{C1}$  e encontra uma descontinuidade com um trecho de impedância característica  $Z_{C2}$ , como sendo:

$$T_{12}^v = \frac{2 \cdot Z_{C2}}{Z_{C1} + Z_{C2}}. \quad (3.54)$$

Considerando que as OV's de tensão e corrente se propagam em conjunto, tem-se:

$$I(0, s) = \frac{V(0, s)}{Z_{C2}}. \quad (3.55)$$

Comparando (3.55) e (3.41), obtém-se o coeficiente de transmissão para uma OV de corrente:

$$T_{12}^i = \frac{2 \cdot Z_{C1}}{Z_{C1} + Z_{C2}}. \quad (3.56)$$

Por se tratar de transitórios eletromagnéticos de alta frequência, conforme já mencionado na Seção 3.2, nos cálculos realizados analisando OV's, as impedâncias características  $Z_C$  podem ser aproximadas por impedâncias de surto  $Z_S$ . Além disso, no caso em particular da TW87, na concepção da função o princípio de operação é criado com base na análise apenas OV's de corrente (SCHWEITZER *et al.*, 2014). Portanto, para simplificar a notação, deste ponto em diante será suprimido os sobrescritos  $v$  e  $i$  dos coeficientes de transmissão e reflexão, ficando subentendido que ambos se tratam de coeficientes relacionados à OV's de corrente. Por fim, dada uma OV de corrente que se propaga em um trecho com impedância de surto  $Z_{S1}$  e encontra uma descontinuidade com um trecho de impedância de surto  $Z_{S2}$ , os coeficientes de reflexão e transmissão, são dados por:

$$R_{12} = -\frac{Z_{S2} - Z_{S1}}{Z_{S1} + Z_{S2}}, \quad (3.57)$$

$$T_{12} = \frac{2 \cdot Z_{S1}}{Z_{S1} + Z_{S2}}. \quad (3.58)$$

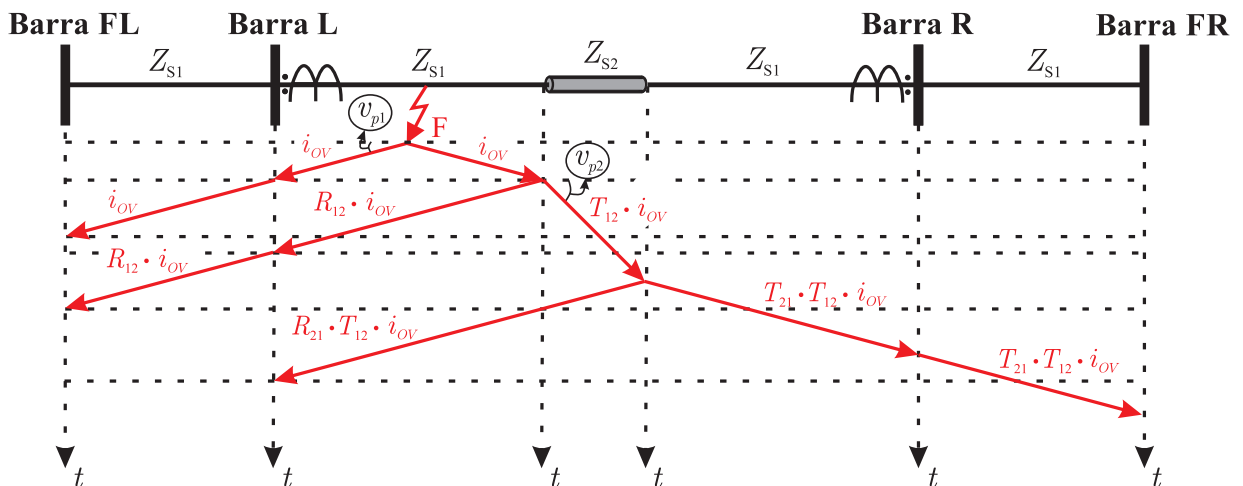
Sabe-se que a impedância de surto de trechos aéreos  $Z_S$  varia tipicamente entre 300 e 400  $\Omega$ , enquanto que em trechos subterrâneos  $Z_S$  pode variar entre 50 e 70  $\Omega$  (KASZTENNY *et al.*,

2017). Por exemplo, assumindo que a impedância de surto do trecho aéreo seja igual a  $350 \Omega$  e a impedância de surto do trecho subterrâneo seja igual a  $60 \Omega$ , considerando uma transição do trecho aéreo para o trecho subterrâneo, tem-se  $Z_{S1} = 350 \Omega$  e  $Z_{S2} = 60 \Omega$  ou seja, de acordo com (3.57) e (3.58), obtém-se  $R_{12} = 0,805$  e  $T_{12} = 1,944$ , valor este que ilustra uma situação na qual após a incidência de uma OV na junção, a OV transmitida terá uma amplitude 94% maior que a OV incidente, e a OV refletida terá uma amplitude de cerca de 80% do valor da OV incidente. Por outro lado, considerando uma transição no sentido trecho subterrâneo para o trecho aéreo, tem-se  $Z_{S1} = 60 \Omega$  e  $Z_{S2} = 350 \Omega$  de modo que  $R_{12} = -0,805$  e  $T_{12} = 0,333$ , ou seja, após a incidência de uma OV de corrente na junção, a OV transmitida terá uma amplitude de cerca de 33% da OV incidente, ao mesmo tempo que a OV refletida terá uma amplitude de cerca de 80% da OV incidente com polaridade oposta.

### 3.4 DIAGRAMA DE REFLEXÕES DE ONDAS VIAJANTES

Conhecido por diagrama de *Lattice* ou de treliças, esse diagrama consiste em um método gráfico que auxilia na compreensão e visualização dos trajetos, amplitudes e polaridades de OVs ao longo de uma LT após a ocorrência de uma falta. Esse diagrama é formado por eixos ortogonais, sendo um eixo horizontal com dimensão espacial que representa o comprimento das LTs, e eixos verticais com dimensão temporal colocados nas barras das LTs e em pontos de descontinuidades ao longo do SEE analisado (BEWLEY, 1931).

Na Figura 3.5, ilustra-se um exemplo de um diagrama de *Lattice* para uma falta interna a uma LT com três trechos.



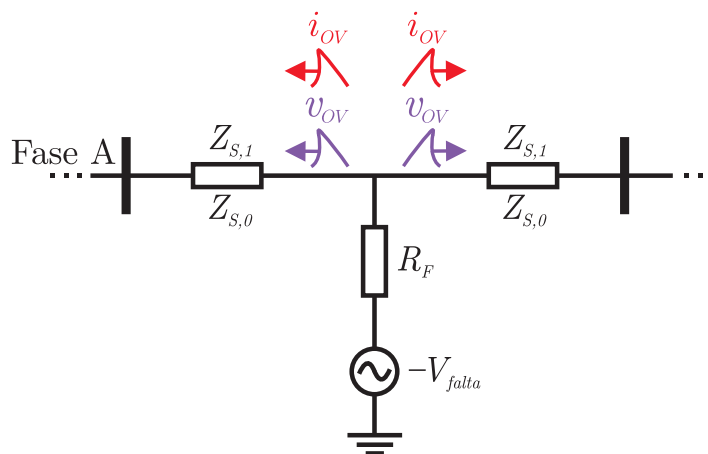
**Figura 3.5.** Exemplo de diagrama de *Lattice* para uma falta interna a uma LT com três trechos.

uma LT monitorada, a qual é composta por três trechos, sendo  $Z_S$  igual a  $Z_{S1}$  ou  $Z_{S2}$ . Nota-se que a confecção do diagrama consiste basicamente em traçar retas a partir do ponto de falta representando a OV lançada em direção aos eixos verticais, sendo a inclinação dessas retas dada pela velocidade de propagação da OV  $v_p$ . Assim, consideram-se os casos de  $Z_S = Z_{S1}$ ,  $v_p = v_{p1}$  e  $Z_S = Z_{S2}$ ,  $v_p = v_{p2}$ , a depender do trecho em questão. Por fim, ao atingirem os eixos verticais são traçadas novas retas representando as OVs refletida e transmitida. Dessa forma, as amplitudes das OVs podem ser estimadas com base na OV incidente e os coeficientes de reflexão e transmissão,  $R_{12}$  e  $R_{21}$ , bem como  $T_{12}$  e  $T_{21}$ .

Sendo assim, de posse dos coeficientes de reflexão e transmissão, e da amplitude da OV lançada pela falta, sabendo que a OV medida em um dado ponto da LT é dada pela soma da OV incidente e refletida, nesse ponto é possível estimar os valores das OVs medidas. Tal entendimento será importante para as análises que serão realizadas com a TW87 sendo aplicada em linhas híbridas.

### 3.5 AMPLITUDE DE UMA OV LANÇADA POR UMA FALTA

Até o momento, ainda não foi comentada a teoria que justifica diferentes amplitudes das OVs lançadas por faltas. Na Figura 3.6, ilustra-se uma falta monofásica na fase A em uma LT com impedâncias de surto de sequência positiva e zero  $Z_{S,1}$  e  $Z_{S,0}$ , respectivamente, sendo  $R_F$  a resistência de falta, e  $V_{falta}$  a amplitude da tensão fase-terra um instante imediatamente antes da falta, e  $V_{SYS}$  é a tensão nominal do SEE.



**Figura 3.6.** OVs lançadas por uma falta.



Nesta dissertação, serão avaliados somente curtos-circuitos monofásicos, os quais representam a maior parte dos curtos-circuitos em SEEs (EPE, 2017). Além disso, como será explicado no Capítulo 5, as alterações de amplitude das OVs sofridas ao longo de linhas híbridas são iguais independente do tipo de falta, mudando apenas a amplitude da OV lançada, dessa forma, as considerações para faltas monofásicas podem por analogia ser estendidas para os demais tipos de falta. Assim, para uma falta AT, ao utilizar a Transformada de Clarke (CLARKE, 1950) nos sinais medidos, a exemplo da função TW87, o modo  $\alpha$  e zero são sensibilizados. Sendo, nesse cenário de falta, o modo  $\alpha$  utilizados pela TW87 para suas análises. Portanto, restringe-se aqui em calcular as amplitudes das OVs de tensão e corrente para esse modo quando referenciados a fase A, as quais são dadas de acordo com Shi *et al.* (2005) por:

$$v_{OV} = \frac{2 \cdot Z_{S,1}}{(Z_{S,0} + 2 \cdot Z_{S,1}) + 6 \cdot R_F} \cdot V_{falta}, \quad (3.59)$$

sendo:

$$i_{OV} = \frac{v_{OV}}{Z_{S,1}}. \quad (3.60)$$

A tensão no ponto de falta um instante antes da ocorrência do distúrbio é dada por:

$$V_{falta} = \frac{V_{SYS}}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2} \cdot \text{sen}(\theta), \quad (3.61)$$

na qual  $\theta$  é o ângulo de incidência da falta, assumindo uma referência senoidal.

Por exemplo, para o sistema teste que será analisado nesta dissertação, o qual será apresentado no Capítulo 6, têm-se que  $V_{SYS} = 230$  kV, sendo  $Z_{S,0} = 786,490 \Omega$  e  $Z_{S,1} = 401,407 \Omega$  no trecho aéreo. Supondo que uma falta com  $R_F = 0 \Omega$  e  $\theta = 90^\circ$  ocorra nesse trecho, de acordo com (3.59) a (3.61), a amplitude da OV de corrente lançada pela falta  $i_{OV} = 236,3226$  A.

Saber estimar a amplitude da OV de corrente é importante, pois um dos ajustes de fábrica da função TW87 é a amplitude da OV mínima esperada  $I_{min}$  após a ocorrência de uma falta. Tal ajuste é utilizado na lógica da função para analisar se a OV detectada tem energia suficiente para ser avaliada de forma confiável, evitando análises de transitórios atenuados que não contêm informação suficiente para a tomada de decisão da proteção. Embora esse ajuste não seja o foco desta dissertação, devido às alterações das OVs nas junções de trechos aéreos e subterrâneos em uma linha híbrida, entender até qual ponto esse valor pode ser comprometido com possíveis atenuações ajuda a compreender os limites de sensibilidade da TW87.

### 3.6 TRANSFORMAÇÃO MODAL

Conforme mencionado anteriormente, a função TW87 utiliza sinais modais para criar sua lógica de operação, os quais são calculados utilizando a Transformada de Clarke (SEL, 2017). Sinais modais consistem em combinações lineares dos sinais de fase, de modo que permitem a análise de circuitos polifásicos de forma desacoplada. A utilização da transformação modal na TW87 foi inserida com o objetivo de simplificar as análises realizadas pela função, evitando problemas decorrentes do acoplamento entre fases (SCHWEITZER *et al.*, 2013). Portanto, quando se pretende analisar a propagação de OV's em SEEs com LTs com múltiplos condutores, torna-se interessante trabalhar com sinais modais para separar as OV's de diferentes modos, as quais possuem velocidades distintas (HEEDMAN, 1965). Dessa forma, apresenta-se em (3.62) as componentes de Clarke de corrente, obtidas tomando a fase A como referência.

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix}. \quad (3.62)$$

Os três modos de Clarke são chamados de zero (modo 0), alfa (modo  $\alpha$ ) e beta (modo  $\beta$ ). Sendo assim, ao analisar (3.62), nota-se que em condições normais de operação, as correntes fluem de forma equilibrada nas fases A, B e C, não existindo o modo zero. Por outro lado, durante uma falta do tipo AT, por exemplo, a corrente fluirá pela fase A e retornará metade pela fase B e metade pela fase C, dessa forma, o modo  $\alpha$  é que será sensibilizado. Ainda, quando ocorre uma falta do tipo BC, por exemplo, a corrente fluirá pela fase B e retornará pela fase C, fazendo com que o modo  $\beta$  seja sensibilizado (SCHWEITZER *et al.*, 2013). Dessa forma, as componentes de Clarke com referência na fase A funcionam bem para faltas do tipo AT e BC, mas não para os demais tipos de falta. Sendo assim, faz-se necessária a utilização de matrizes de transformação com referência para cada fase, como mostrado em (3.63), (3.64) e (3.65).

$$\begin{bmatrix} i_0^A \\ i_\alpha^A \\ i_\beta^A \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix}, \quad (3.63)$$

$$\begin{bmatrix} i_0^B \\ i_\alpha^B \\ i_\beta^B \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -\sqrt{3} & 0 & \sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix}, \quad (3.64)$$

$$\begin{bmatrix} i_0^C \\ i_\alpha^C \\ i_\beta^C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & 2 \\ \sqrt{3} & -\sqrt{3} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix}. \quad (3.65)$$

De (3.63) a (3.65), conclui-se que,  $i_0^A = i_0^B = i_0^C$ , ou seja, a corrente de modo zero  $i_0$  é igual para qualquer referência de fase, sendo calculada da seguinte forma:

$$i_0 = \frac{i_A + i_B + i_C}{3}, \quad (3.66)$$

enquanto que as correntes dos modos  $\alpha$  e  $\beta$  são diferentes de acordo com a referência de fase. Nesse contexto, sabe-se que as correntes de modo  $\alpha$  são apropriadas para faltas monofásicas, e as correntes de modo  $\beta$  são apropriadas para faltas bifásicas (SCHWEITZER *et al.*, 2013).

Na busca de contemplar os *loops* de falta monofásicos (AT, BT, CT) e, bifásicos (AB, BC e CA), realizam-se desenvolvimentos matemáticos para obter os sinais mais apropriados para análise de cada tipo de falta. Para uma falta AT, que sensibiliza o modo  $\alpha$  quando referenciado a fase A, tem-se que:

$$\begin{aligned} i_{AT} &= \frac{2}{3} \cdot i_A - \frac{1}{3} \cdot i_B - \frac{1}{3} \cdot i_C = \left(i_A - \frac{1}{3} \cdot i_A\right) - \frac{1}{3} \cdot i_B - \frac{1}{3} \cdot i_C, \\ i_{AT} &= i_A - i_0, \end{aligned} \quad (3.67)$$

na qual  $i_{AT}$  é a corrente do *loop* AT.

Analogamente, o desenvolvimento matemático pode ser realizado para faltas monofásicas do tipo BT e CT. Por outro lado, ao analisar uma falta bifásica do tipo BC, o modo  $\beta$  referenciado à fase A é sensibilizado, resultando em:

$$\begin{aligned} i_{BC} &= \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot i_B - \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot i_C = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot i_B - \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot i_C, \\ i_{BC} &= \frac{i_B - i_C}{\sqrt{3}}, \end{aligned} \quad (3.68)$$

na qual  $i_{BC}$  é a corrente do *loop* BC.

De forma semelhante, o desenvolvimento matemático pode ser realizado para faltas bifásicas do tipo AB e CA. Definem-se então relações entre as correntes das fases e correntes de *loop* para faltas monofásicas e bifásicas. Na Tabela 3.1, listam-se as seis correntes de *loop*, a corrente modal referenciada à fase associada ao *loop*, e ainda, as relações para calcular essas correntes de *loop* através das correntes de fase. Portanto, é com base nessas correntes de *loop* que a função TW87 realiza a análise com as OVs de corrente que são extraídas a partir do processo de filtragem de transitórios eletromagnéticos.

**Tabela 3.1.** *Loops* de corrente.

Corrente de <i>Loop</i>	Corrente Modal	Cálculo da Corrente de <i>Loop</i>
$i_{AT}$	$i_{\alpha}^A$	$i_A - i_0$
$i_{BT}$	$i_{\alpha}^B$	$i_B - i_0$
$i_{CT}$	$i_{\alpha}^C$	$i_C - i_0$
$i_{AB}$	$i_{\beta}^C$	$(i_A - i_B)/\sqrt{3}$
$i_{BC}$	$i_{\beta}^A$	$(i_B - i_C)/\sqrt{3}$
$i_{CA}$	$i_{\beta}^B$	$(i_C - i_A)/\sqrt{3}$

### 3.7 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados os principais conceitos que norteiam a função TW87. Primeiramente, explicou-se sobre a modelagem de LTs, a qual está intimamente relacionada com as análises que são realizadas pela função, mostrando-se a importância de modelar a LT a parâmetros distribuídos para que seja possível representar os transitórios eletromagnéticos que se propagam na forma de OV's em LTs após a ocorrência de faltas.

Dando continuidade, explicou-se como surgem e propagam as OV's em LTs, demonstrando-se o desenvolvimento matemático que comprova a propagação das OV's. Ademais, destacaram-se os conceitos de impedância de surto  $Z_S$ , bem como da velocidade de propagação  $v_p$  e tempo de propagação  $\tau$  das OV's em LTs, haja vista que esses são conceitos importantes para o entendimento das particularidades da aplicação da TW87 em linhas híbridas.

Em seguida, demonstraram-se as relações de amplitudes entre as OV's incidentes e refletidas e/ou transmitidas em descontinuidades, como junções entre trechos aéreos e subterrâneos. Tais relações são definidas por coeficientes de reflexão e transmissão, e no momento, demonstrou-se como calculá-los, os quais serão importantes nos estudos da TW87 em linhas híbridas.

Ainda, explicou-se o método gráfico utilizado em análises com OV's, conhecido como diagrama de *Lattice*. Foi apresentado também como se calcula a amplitude de uma OV que é lançada após a ocorrência de uma falta e, por fim, fez-se uma breve revisão da Transformada de Clarke (CLARKE, 1950), a qual é utilizada pela função TW87 para desacoplar os sinais das fases. Diante de todo o conhecimento teórico até aqui explicado, segue-se para o próximo capítulo em que será apresentada a forma com que a TW87 foi implementada neste trabalho.

Neste capítulo, apresenta-se a implementação numérica da proteção diferencial baseada na teoria de OV, a função TW87, e dos processos auxiliares empregados em sua lógica de operação. Destacam-se características da função, o princípio de funcionamento e a lógica de operação, de tal forma, a facilitar o entendimento do leitor acerca dos estudos e análises que serão realizados nos capítulos posteriores.

#### 4.1 PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO

A TW87 tem como princípios básicos: a propagação de OV em LTs e a Lei de Kirchhoff das Correntes. Basicamente, considerando os sinais medidos sincronizados, essa função analisa as OV de corrente que entram e saem da LT monitorada. Assim, com base nas amplitudes, polaridades e instantes de detecção dessas OV, torna-se possível identificar faltas internas e externas (SCHWEITZER *et al.*, 2014).

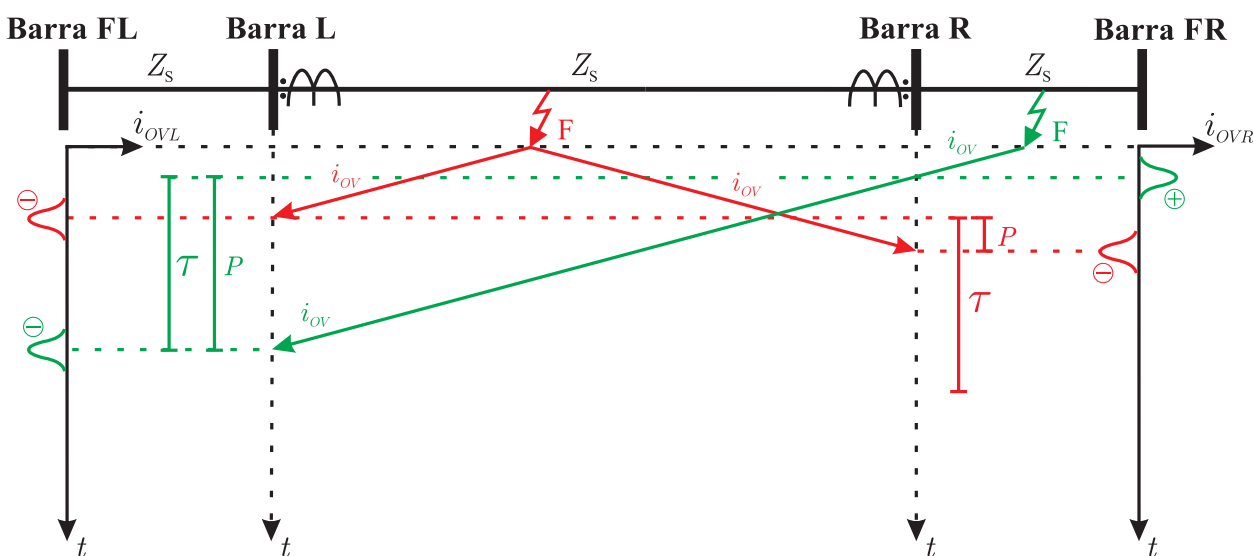


Figura 4.1. Diagrama de *Lattice* para casos de falta interna e externa a LT monitorada.

Para melhor entender o funcionamento da TW87, ilustra-se na Figura 4.1 o diagrama de *Lattice* para os casos de uma falta interna e outra externa, na qual  $i_{OVL}$  e  $i_{OVR}$  representam as OV's de corrente nos terminais local e remoto, respectivamente. No caso ilustrado, a LT monitorada é totalmente aérea. Devido às polaridades dos TCs, as OV's de corrente que entram e saem na LT possuem polaridades contrárias (LOPES *et al.*, 2016). Assim, percebe-se que para uma falta interna, as OV's de corrente que incidem nos terminais local e remoto possuem polaridades iguais, e que o intervalo de tempo  $P$  entre os instantes de incidência dessas OV's é menor do que o tempo de propagação da LT  $\tau$ . Já para faltas externas, as OV's de corrente incidentes têm polaridades contrárias, sendo  $P \approx \tau$ . Assim, definem-se correntes de operação  $i_{OP}$  e de restrição  $i_{RT}$  que, de acordo com SEL (2017) são calculadas usando:

$$i_{OP} = i_{OVL}(t \pm P) + i_{OVR}(t), \quad (4.1)$$

$$i_{RT} = \max(i_{RTL}, i_{RTR}), \quad (4.2)$$

sendo:

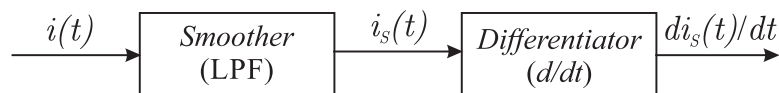
$$i_{RTL} = |i_{OVL}(t - \tau) - i_{OVR}(t)|, \quad (4.3)$$

$$i_{RTR} = |i_{OVR}(t - \tau) - i_{OVL}(t)|. \quad (4.4)$$

Diante do exposto, para casos de curtos-circuitos internos à LT monitorada,  $i_{RT}$  apresenta valores baixos, enquanto que  $|i_{OP}|$  apresenta valores elevados. Por outro lado, em situações de curtos-circuitos externos,  $i_{RT}$  assume valores mais elevados, enquanto  $|i_{OP}|$  assume valores idealmente nulos, ao considerar uma LT aérea sem perdas (LOPES *et al.*, 2016).

## 4.2 FILTRO DS

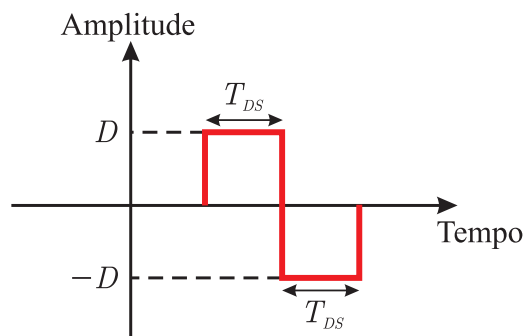
A operação da TW87 se inicia com a extração de informações sobre as OV's de corrente nos terminais monitorados. Tal processo é realizado por meio do filtro *Differentiator-Smoother* (filtro DS), cujos conceitos são apresentados em Schweitzer *et al.* (2013), sendo este constituído basicamente por duas etapas: uma de suavização dos transitórios e outra de diferenciação, conforme ilustrado na Figura 4.2.



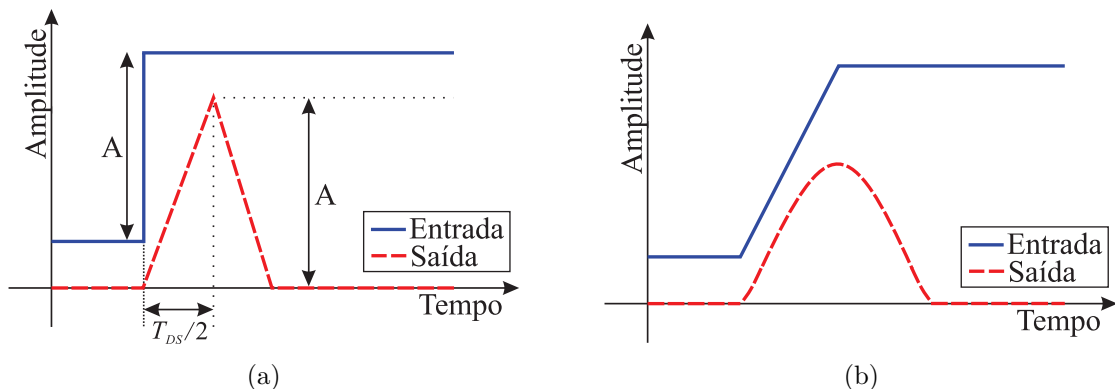
**Figura 4.2.** Etapas do processo do filtro DS.

Na primeira etapa da filtragem, realiza-se a suavização dos transitórios medidos (bloco *Smoother*), em que são reduzidos os efeitos de distorção dos sinais, tornando a borda de subida menos íngreme, sendo um processo equivalente ao de um filtro passa-baixas (LPF). Na etapa seguinte, os sinais suavizados são diferenciados (bloco *Differentiator*), de modo que, para uma entrada em forma de degrau, por exemplo, a saída terá um formato triangular (SCHWEITZER *et al.*, 2013).

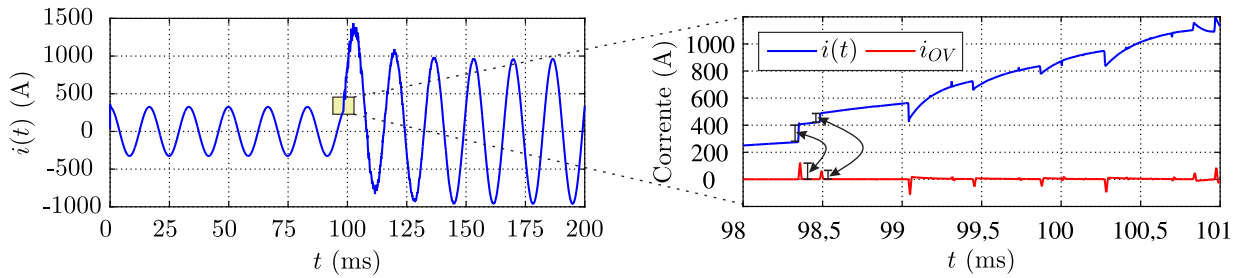
Na Figura 4.3, ilustra-se o processo de janelamento de dados do filtro DS e seus coeficientes. Observa-se que na primeira metade da janela de coeficientes considera-se um ganho de  $D$ , enquanto que na segunda metade se aplica um ganho de  $-D$ . Embora o valor do ajuste  $D$  não tenha sido demonstrado em detalhes na literatura, neste trabalho, o filtro foi implementado de tal forma que para uma entrada em degrau a saída tenha um formato triangular com ganho unitário, assim como reportado em Schweitzer *et al.* (2013). Portanto, é possível demonstrar que para isso,  $D$  deve ser igual  $2/N_{DS}$ , sendo  $N_{DS}$  o número de coeficientes do filtro, e  $T_{DS}$  é o tamanho da janela do filtro convertido para unidade de tempo. Ao contrário do ajuste  $D$ , o  $T_{DS}$  é um valor fornecido pelos desenvolvedores, o qual é igual a  $20 \mu\text{s}$  (SEL, 2017).



**Figura 4.3.** Janela de dados do filtro DS



**Figura 4.4.** Resposta do filtro DS para uma entrada em: (a) degrau (b) rampa.



**Figura 4.5.** Extração das OVs de corrente dos sinais medidos por meio do filtro DS

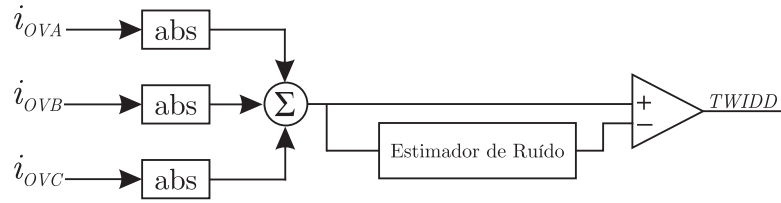
Via de regra, as OVs induzidas por uma falta são realmente parecidas com degraus superpostos aos sinais medidos,. Dessa forma, o filtro DS responde a essa mudança em degrau com uma saída triangular, cujo valor de pico está associado ao tempo de chegada da OV no terminal. Ainda assim, quando os transitórios eletromagnéticos estão atenuados, os quais têm sinais de entrada com formato similar a uma rampa em vez de degraus, o filtro DS responde com uma saída em forma de parábola, cujo pico também pode ser associado ao instante de chegada da OV no terminal (SCHWEITZER *et al.*, 2015). Na Figura 4.4 são ilustrados os dois tipos de entradas e as respectivas respostas do filtro DS, onde se percebe que o instante de chegada se encontra atrasado de  $T_{DS}/2$  segundos para entradas em degrau, sendo tal atraso inerente ao filtro DS.

Por fim, para ilustrar o processo de filtragem, apresenta-se na Figura 4.5 uma simulação computacional em que fica claro que respeitadas as condições reportadas anteriormente, o filtro DS responde aos transitórios eletromagnéticos nos sinais medidos respeitando as amplitudes e polaridades, sendo essa uma etapa fundamental para os demais cálculos realizados pela função TW87.

### 4.3 DETECTOR DE DISTÚRBIOS POR OVS

Outro processo auxiliar incorporado à função TW87 é o detector de distúrbio baseado na análise de OVs. A TW87 usa esse processo de detecção de distúrbio para separar os períodos de pré-falta e falta, e assim, iniciar a verificação das OVs de saída em cada terminal, o que é o início de todo o processo de análise da lógica de operação da função. Porém, esse processo apenas detecta um dado distúrbio, cabendo à TW87 analisar os transitórios eletromagnéticos e verificar se a perturbação consiste em um curto-circuito interno.





**Figura 4.6.** Lógica de detecção de distúrbios baseada na análise de OV's

De certa forma, o processo do detector de distúrbios é simples. Para ilustrar seu funcionamento, mostra-se na Figura 4.6 a lógica de detecção que foi implementada, a qual consiste na análise da soma dos módulos das OV's de correntes das três fases  $i_{OV\Sigma}$  e compara esse sinal a um limiar adaptativo, que é calculado a partir de uma estimativa de ruído. Em (4.5), apresenta-se o equacionamento que foi implementado.

$$i_{OV\Sigma} = |i_{OVA}| + |i_{OVB}| + |i_{OVC}| \quad (4.5)$$

onde  $i_{OVA}$ ,  $i_{OVB}$  e  $i_{OVC}$  são as OV's de correntes nas fases A, B e C, respectivamente.

Dessa forma, o estimador de ruídos foi implementado com base em um monitoramento do sinal  $i_{OV\Sigma}$ . Assim, cria-se um limiar adaptativo para o comparador da Figura 4.6 como sendo um valor 10% maior do máximo sinal  $i_{OV\Sigma}$  em um tempo atrasado de um período fundamental do instante em que o sinal está sendo avaliado (SEL, 2017).

Os cálculos realizados pela função TW87 são iniciados apenas quando o *word bit* TWIDD, representado na Figura 4.6 é setado. Por isso é fundamental entender essa etapa para as demais explicações sobre a TW87 que serão dadas a seguir.

Por fim, destaca-se como uma vantagem desse método de detecção de distúrbio por OV's, o fato de não necessitar de parametrização de ajustes. Sendo assim, efeitos de fontes de erros que podem comprometer o funcionamento de um detector de distúrbios são reduzidas.

#### 4.4 IMPLEMENTAÇÃO NUMÉRICA

Uma vez detectado o distúrbio, seja interno ou externo à LT monitorada, a TW87 inicia seus cálculos. As OV's de corrente filtradas, que estão no domínio de fases, são primeiramente transformados nas seis correntes de *loops* correspondentes (SEL, 2017), calculadas de acordo com a Tabela 3.1. Assim, os cálculos de amplitudes que serão apresentados em (4.6), (4.7) e (4.8) são realizados para cada *loop* de falta.

Inicialmente são detectadas as primeiras OV's incidentes nos terminais local e remoto, identificando os instantes de chegada  $t_{L1}$  e  $t_{R1}$ , os quais são associados às suas respectivas amostras,  $N_{L1}$  e  $N_{R1}$ , respectivamente. Por fim, calculam-se as amplitudes das OV's incidentes nos terminais local e remoto,  $I_L$  e  $I_R$ , respectivamente. Nesse momento também é calculada a amplitude do sinal de operação  $I_{OP}$ . Esses cálculos são implementados da seguinte forma:

$$I_L = Q \cdot \sum_{k=-M}^{k=M} i_{OVL}(N_{L1} - k), \quad (4.6)$$

$$I_R = Q \cdot \sum_{k=-M}^{k=M} i_{OVR}(N_{R1} - k), \quad (4.7)$$

$$I_{OP} = Q \cdot \sum_{k=-M}^{k=M} [i_{OVL}(N_{L1} - k) + i_{OVR}(N_{R1} - k)], \quad (4.8)$$

onde  $Q$  é um fator de correção para manter um ganho unitário no cálculo da amplitude das OV's de corrente, e  $M$  é metade da janela do filtro DS em amostras, ou seja,  $N_{DS}/2$ .

De posse das amplitudes calculadas de  $I_L$ ,  $I_R$  e  $I_{OP}$  para cada *loop* de falta, a próxima etapa da TW87 é selecionar o *loop* mais forte, e isso é feito com base nas amplitudes do sinal de operação. Esse processo é implementado da seguinte forma (SEL, 2017):

$$STR = \max(I_{OPAT}, I_{OPBT}, I_{OPCT}, I_{OPAB}, I_{OPBC}, I_{OPCA}), \quad (4.9)$$

onde  $I_{OPAT}$ ,  $I_{OPBT}$ ,  $I_{OPCT}$ ,  $I_{OPAB}$ ,  $I_{OPBC}$  e  $I_{OPCA}$  são as amplitudes de  $I_{OP}$  para os *loops* AT, BT, CT, AB, BC, e CA, respectivamente, e  $STR$  o *loop* selecionado. Definido então o *loop* mais forte, escolhe-se dentre as seis amplitudes calculadas de cada  $I_L$ ,  $I_R$  e  $I_{OP}$ , os três valores do *loop* selecionado. Deste ponto em diante, os cálculos realizados são para apenas esse *loop*.

Na sequência, após um período de tempo  $\tau$ , criam-se janelas de busca nos sinais filtrados medidos nos terminais opostos. Dentro dessas janelas de busca, identificam-se os instantes em que os sinais avaliados são máximos, os quais são definidos como os instantes de tempo das OV's de saída nos terminais local e remoto, a saber,  $t_{Lsai}$  e  $t_{Rsai}$ , respectivamente. Esses instantes são associados às suas respectivas amostras  $N_{Lsai}$  e  $N_{Rsai}$  (SCHWEITZER *et al.*, 2015) e, por fim, criam-se outras janelas, agora para o cálculo das amplitudes das OV's de saída. Cabe ressaltar que, ambas janelas, de busca e de cálculo, possuem o mesmo tamanho, a saber,  $N_{DS}$ , dado em número de amostras.

Usando essas informações, calculam-se as amplitudes das correntes de restrição nos terminais local e remoto, respectivamente,  $I_{RTL}$  e  $I_{RTR}$ , usando as seguintes expressões:

$$I_{RTL} = Q \cdot \left| \sum_{k=-M}^{k=M} [i_{OVL}(N_{L1} - k) - i_{OVR}(N_{Rsai} - k)] \right|, \quad (4.10)$$

$$I_{RTR} = Q \cdot \left| \sum_{k=-M}^{k=M} [i_{OVR}(N_{R1} - k) - i_{OVL}(N_{Lsai} - k)] \right|, \quad (4.11)$$

de modo que, o máximo de  $I_{RTL}$  e  $I_{RTR}$  é definido como a amplitude do sinal de restrição  $I_{RT}$ :

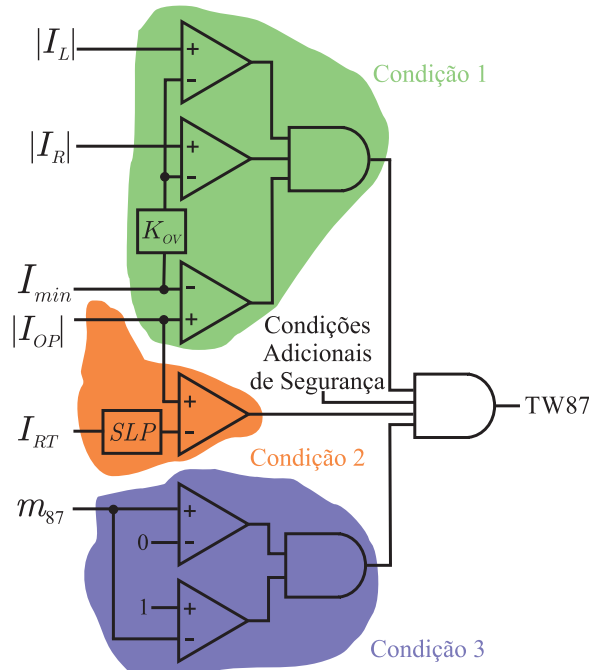
$$I_{RT} = \max(I_{RTL}, I_{RTR}). \quad (4.12)$$

Por fim, calcula-se uma estimativa da localização da falta  $m_{87}$  com base nas equações clássicas para localização de faltas com dados sincronizados de dois terminais (SCHWEITZER *et al.*, 2015):

$$m_{87} = 0,5 \cdot \left( 1 + \frac{N_{L1} - N_{R1}}{\tau'} \right), \quad (4.13)$$

onde  $\tau'$  é o  $\tau$  convertido em amostras.

Com base nessas informações, cria-se a lógica de operação da TW87, a qual é ilustrada na Figura 4.7, onde  $K_{OV}$  é um fator de ajuste de sensibilidade,  $SLP$  um fator de restrição e  $I_{min}$  uma amplitude mínima de OV de corrente. Percebe-se que, basicamente, a lógica é



**Figura 4.7.** Lógica simplificada da função TW87 (SCHWEITZER *et al.*, 2015).

formada por três condições principais. A Condição 1 analisa se as OV's de corrente medidas nos terminais após um distúrbio possuem uma energia mínima para serem avaliadas de forma confiável. Essa condição é satisfeita quando as correntes  $|I_L|$ ,  $|I_R|$  e  $|I_{OP}|$  excedem um nível mínimo pré-ajustado. A Condição 2 verifica se  $|I_{OP}| > SLP \cdot I_{RT}$ . Conforme explicado anteriormente, essa condição é satisfeita apenas para curtos-circuitos internos. A Condição 3 faz uma análise da localização da falta estimada  $m_{87}$  (em p.u.), verificando se essa está localizada na LT monitorada, sendo que, faltas externas resultam em localizações nos terminais da LT.

Por segurança, condições adicionais são consideradas na lógica da TW87, dentre as quais se destacam uma supervisão baseada na análise da tensão de polarização (VPOL) e outra na análise de sobrecorrente (função OC87) (SCHWEITZER *et al.*, 2015; SEL, 2017). A supervisão VPOL foi pensada especialmente para casos em que a TW87 esteja protegendo uma LT de circuito duplo, pois seu objetivo é identificar se um distúrbio detectado pela TW87 está no circuito monitorado ou no circuito em paralelo. Já a função OC87 tem como objetivo confirmar se um distúrbio detectado pela TW87 tem energia suficiente para ser considerado um curto-circuito, evitando atuações devido a processos de chaveamento, por exemplo.

## 4.5 CONDIÇÕES ADICIONAIS DE SEGURANÇA (CAS)

### 4.5.1 Tensão de Polarização

Basicamente, a supervisão VPOL compara as polaridades de  $I_{OP}$  e da tensão no ponto de falta imediatamente antes da ocorrência do distúrbio  $V_{POL}$ . O cálculo de  $I_{OP}$  foi apresentado em (4.8). Por outro lado, o cálculo de  $V_{POL}$  é ilustrado na Figura 4.8, sendo esse realizado por meio de uma interpolação linear das tensões instantâneas medidas nas Barras L e R da LT monitorada  $v_L$  e  $v_R$ , respectivamente, e da localização da falta estimada pela TW87  $m_{87}$ .

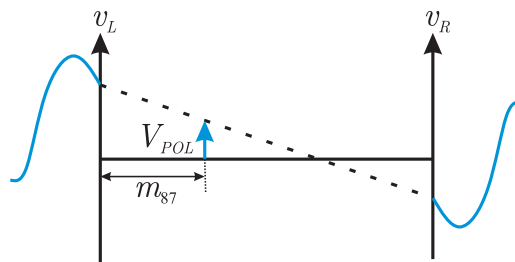


Figura 4.8. Cálculo de  $V_{POL}$  (SEL, 2017).

O cálculo computacional de  $V_{POL}$  foi implementado utilizando (4.14), e é realizado para a fase que possui a maior tensão pré-falta em ambas as barras.

$$V_{POL} = [v_R(N_{R1} - N_{DS}) - v_L(N_{L1} - N_{DS})] \cdot m_{87} + v_L(N_{L1} - N_{DS}). \quad (4.14)$$

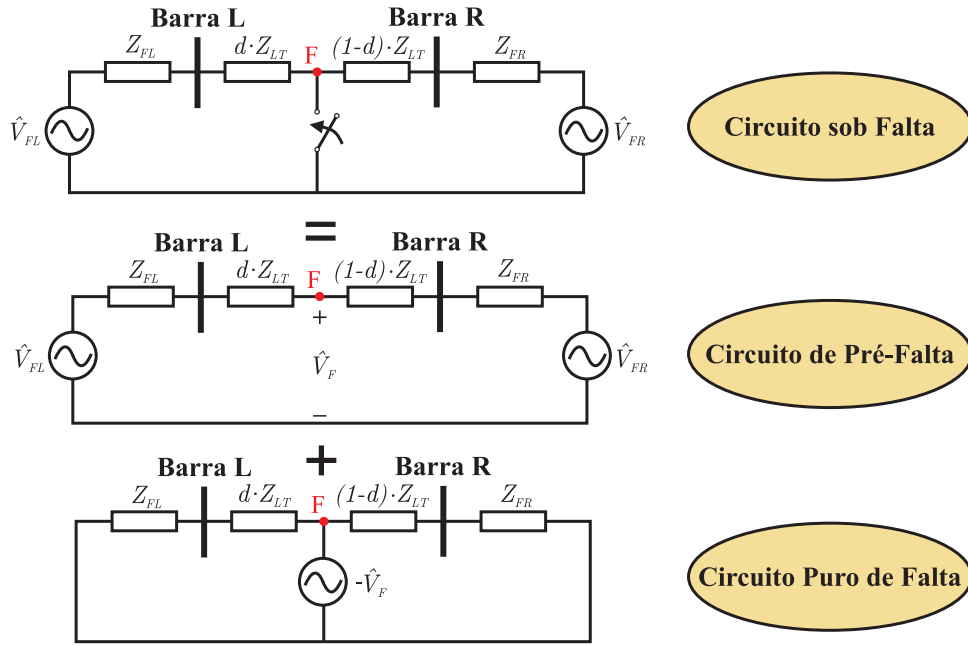
Para faltas internas, quando a polaridade de  $V_{POL}$  é positiva, significa que a tensão no ponto de falta diminuirá após a ocorrência da falta, lançando uma OV de corrente com polaridade negativa. Dessa forma, essa OV negativa, se proveniente de uma LT em paralelo com a LT monitorada, propagará do ponto de falta em direção às barras da LT monitorada, entrando na LT sob supervisão com polaridade positiva. Como resultado, para uma falta interna à LT monitorada, espera-se um  $I_{OP}$  positivo quando a  $V_{POL}$  é positiva. Caso contrário, espera-se um  $I_{OP}$  negativo quando a  $V_{POL}$  é negativa (SEL, 2017).

Do exposto, destaca-se a dependência de  $V_{POL}$  em relação à estimação  $m_{87}$ , o que implica que eventuais erros na estimação da localização da falta pela função, como os que são esperados em aplicações com linhas híbridas (PIRES *et al.*, 2016), podem ser propagados para os resultados de  $V_{POL}$ , interferindo na supervisão VPOL.

#### 4.5.2 Supervisão de Sobrecorrente

A função TW87 conta também com a supervisão de sobrecorrente (função OC87). Basicamente, a OC87 compara ao longo do tempo as correntes réplicas incrementais integradas (SCHWEITZER *et al.*, 2014), as quais são comparadas com uma integração do ajuste de *pickup* acrescido de uma margem de segurança  $MS$  (SEL, 2017). Assim que a corrente réplica incremental integrada apresenta valores maiores que a integral do *pickup*+ $MS$ , a falta é confirmada e a função TW87 é autorizada a operar pelas condições mostradas na Figura 4.7.

A OC87 tem como base o princípio da superposição, o qual estabelece que uma saída de um circuito linear devido a várias de entradas pode ser expresso pela soma das saídas devido a cada entrada separadamente (DORF; SVOBODA, 2010). Assim, um dado circuito sob falta, por exemplo, pode ser representado por dois circuitos, um de pré-falta, que representa a operação normal do SEE, e outro chamado puro de falta, que representa a parcela exclusivamente referente ao defeito. Sendo assim, os sinais de tensão e corrente em qualquer ponto do circuito sob falta pode ser expresso pela soma dos sinais dos circuitos de pré-falta e puro de falta.



**Figura 4.9.** Exemplo da aplicação do princípio da superposição em um circuito sob falta.

Na Figura 4.9, ilustra-se a aplicação do princípio da superposição em um circuito sob falta, e que apenas por simplificação se optou por representá-los no domínio fasorial. Obviamente, antes da ocorrência do distúrbio, o circuito puro de falta não existe, de modo que suas grandezas são idealmente nulas. Porém, no momento em que ocorre o defeito, o circuito puro de falta é energizado, e se estabelece um período transitório que perdura até ser alcançado o regime permanente de falta. No exemplo em análise, aplicou-se o curto-circuito franco. Dessa forma, a variação da tensão no ponto de falta é representada por uma fonte de tensão com mesmo módulo porém em oposição de fase à tensão no ponto de falta verificada no circuito de pré-falta imediatamente antes da ocorrência do defeito  $\hat{V}_F$ .

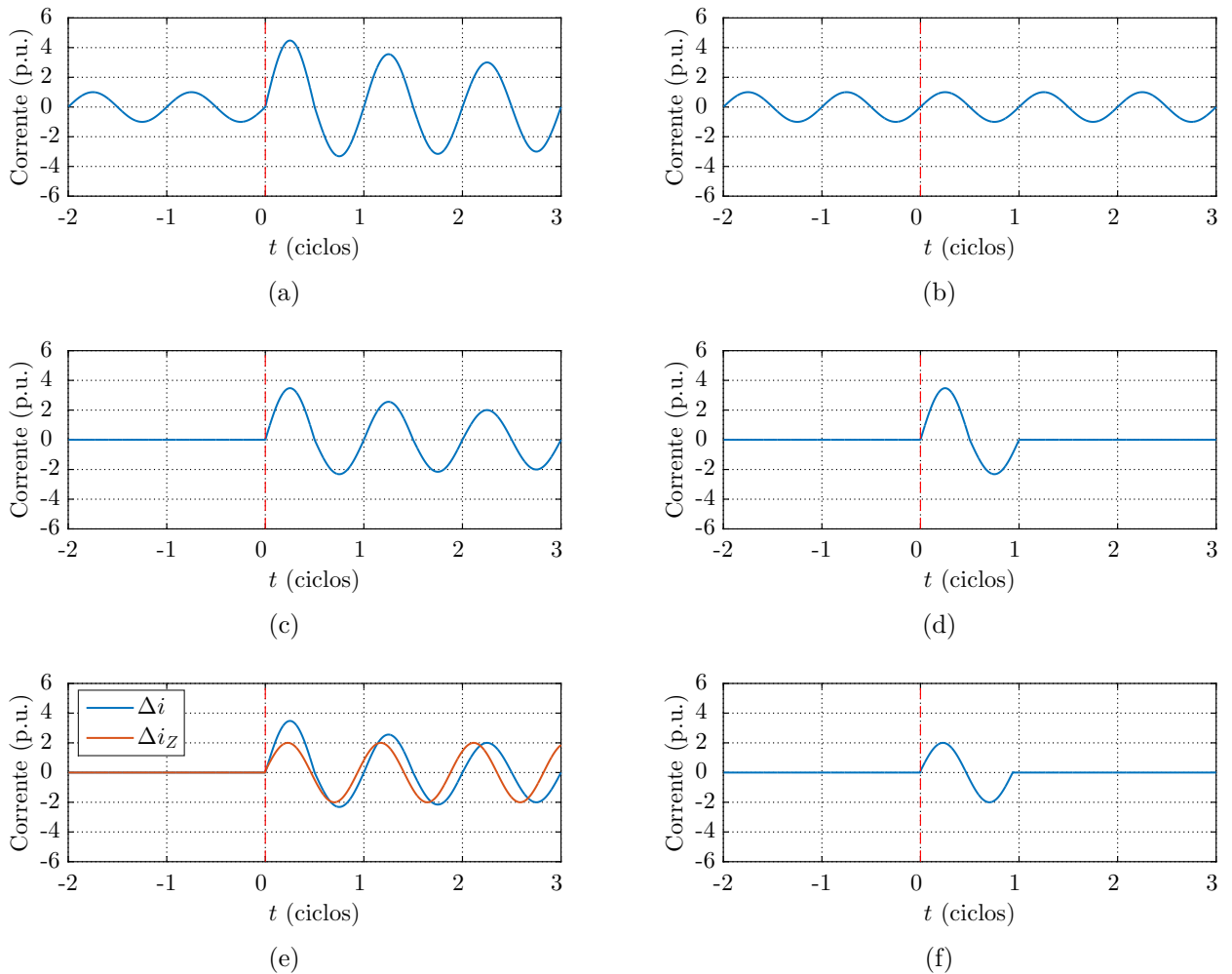
Assim, para implementar a função OC87, os sinais de tensão e corrente medidos a cada instante nos terminais da LT monitorada são tomados como do circuito sob falta e as medições atrasadas são tomadas como do circuito de pré-falta. Assim, ao subtrair esses sinais com amostras atuais e atrasadas de múltiplos do período fundamental, obtêm-se os sinais do circuito puro de falta, as quais são denominadas de incrementais. Neste trabalho, o cálculo dessas grandezas segue o procedimento reportado em (SCHWEITZER *et al.*, 2014), ou seja:

$$\Delta s(k) = s(k) - s(k - p \cdot T) \quad (4.15)$$

na qual  $s$  é o sinal instantâneo (tensão  $v$  ou corrente  $i$ ),  $p = 1$  é o número de ciclos de duração da grandeza incremental, e  $T$  o período fundamental do SEE dado em amostras.

Como resultado dos procedimentos descritos, são obtidas as tensões e correntes incrementais,  $\Delta v$  e  $\Delta i$  respectivamente, pra cada fase e barra da LT monitorada. Na Figura 4.10(a), apresenta-se um sinal de corrente de um circuito sob falta, em que se observa que tal sinal é o resultado da soma da corrente no circuito de pré-falta, representado na Figura 4.10(b) e do circuito puro de falta, representado na Figura 4.10(c). Ao aplicar (4.15) considerando  $p = 1$  para a corrente medida, obtém-se a corrente incremental ilustrada na Figura 4.10(d).

Observa-se que o defeito impõe uma componente CC de decaimento exponencial na corrente. De fato, sabe-se que a depender do ângulo de incidência da falta pode existir um conteúdo maior ou menor dessa componente (RIBEIRO *et al.*, 2016). Para resolver esse problema, Schweitzer *et al.* (2014) propuseram usar na OC87 a corrente réplica incremental  $\Delta i_Z$ , a qual conforme ilustrado nas Figuras 4.10(e) e 4.10(f), remove quase toda a componente CC de decaimento exponencial, assemelhando-se a aplicação de um filtro mímico digital (RIBEIRO *et al.*, 2016).



**Figura 4.10.** Corrente (a) no circuito sob falta (b) no circuito de pré-falta (c) no circuito puro de falta (d) incremental  $p = 1$  (e) incremental e réplica incremental (f) réplica incremental  $p = 1$ .

Entretanto, ao usá-la, a função passa a depender dos parâmetros elétricos da LT, os quais são ajustes do relé SEL-T400L no qual a função TW87 se encontra implementada.

O cálculo das correntes réplica incrementais  $\Delta i_Z$  para cada fase foi implementado da seguinte forma (SCHWEITZER *et al.*, 2014).

$$\Delta i_Z = f_{IZ}(\Delta i, R_{LT,1}, L_{LT,1}), \quad (4.16)$$

sendo:

$$f_{IZ}(\Delta i, R_{LT,1}, L_{LT,1}) = B_X \cdot \Delta i + B_Y \cdot \frac{d}{dt} \cdot \Delta i, \quad (4.17)$$

onde:

$$B_X = \frac{R_{LT,1}}{|Z_{LT,1}|} \quad \text{e} \quad B_Y = \frac{L_{LT,1}}{|Z_{LT,1}|} \quad (4.18)$$

onde  $R_{LT,1}$ ,  $L_{LT,1}$  e  $Z_{LT,1}$  são a resistência, indutância e impedância série de sequência positiva da LT monitorada.

Em seguida, as componentes de alta frequência das correntes réplicas incrementais de cada fase são removidas por meio de um filtro passa-baixas com frequência de corte  $f_C = 1$  kHz. Por fim, as tensões incrementais e correntes réplicas incrementais por fase são transformadas em quantidades por *loop* de falta utilizando a Tabela 4.1, sendo a corrente réplica incremental de modo zero  $\Delta i_{0Z}$  dada por:

$$\Delta i_{0Z} = f_{IZ}(\Delta i_0, R_{LT,1}, L_{LT,1}) - \frac{|Z_{LT,0}|}{|Z_{LT,1}|} \cdot f_{IZ}(\Delta i_0, R_{LT,0}, L_{LT,0}), \quad (4.19)$$

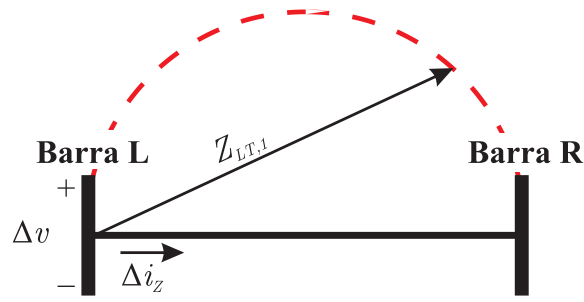
em que  $R_{LT,0}$ ,  $L_{LT,0}$  e  $Z_{LT,0}$  são a resistência, indutância e impedância série de sequência zero da LT monitorada, e  $\Delta i_0$  a corrente incremental de modo zero dada por:

$$\Delta i_0 = \left( \frac{\Delta i_A + \Delta i_B + \Delta i_C}{3} \right). \quad (4.20)$$

**Tabela 4.1.** *Loops* de tensão incremental e corrente réplica incremental no domínio do tempo.

<i>Loop</i>	Tensão Incremental $\Delta v$	Corrente Réplica Incremental $\Delta i_Z$
AT	$\Delta v_A$	$\Delta i_{AZ} - \Delta i_{0Z}$
BT	$\Delta v_B$	$\Delta i_{BZ} - \Delta i_{0Z}$
CT	$\Delta v_C$	$\Delta i_{CZ} - \Delta i_{0Z}$
AB	$\Delta v_A - \Delta v_B$	$\Delta i_{AZ} - \Delta i_{BZ}$
BC	$\Delta v_B - \Delta v_C$	$\Delta i_{BZ} - \Delta i_{CZ}$
CA	$\Delta v_C - \Delta v_A$	$\Delta i_{CZ} - \Delta i_{AZ}$





**Figura 4.11.** Princípio de operação do *Starting Logic*

De posse das tensões incrementais e correntes réplica incrementais filtradas por *loop* de falta, a OC87 utiliza de uma lógica de supervisão não-direcional para iniciar a integralização das grandezas incrementais. Esse processo é denominado *Starting Logic*, cujo princípio de operação é ilustrado na Figura 4.11.

Assumindo os valores de  $\Delta v$  e  $\Delta i_z$  na Barra L, a lógica consiste em estimar o valor da tensão incremental em um ponto cuja distância dessa barra seja equivalente à impedância da LT monitorada (SEL, 2017). Esse processo foi implementado da seguinte forma:

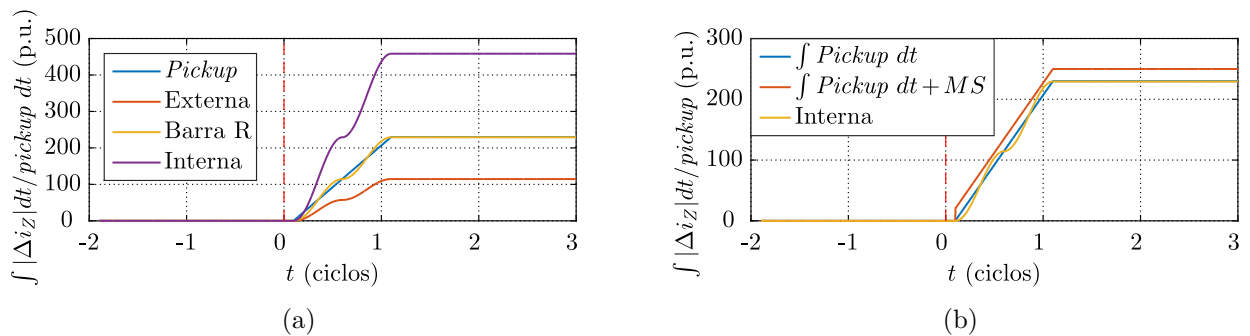
$$|\Delta v| + MC \cdot |Z_{LT,1}| \cdot |\Delta i_z| > \Delta v_{START}, \quad (4.21)$$

onde  $MC$  é uma margem de confiabilidade, e  $\Delta v_{START}$  é o valor mínimo de variação de tensão.

Além dessa condição, por questões de segurança, no *Starting Logic* também está incluída uma análise dos níveis das correntes incrementais de cada fase, implementado da seguinte forma:

$$|\Delta i_A| > \Delta i_{min} \quad \text{ou} \quad |\Delta i_B| > \Delta i_{min} \quad \text{ou} \quad |\Delta i_C| > \Delta i_{min}, \quad (4.22)$$

onde  $\Delta i_{min}$  é o valor mínimo de corrente incremental.



**Figura 4.12.** Correntes réplica incrementais integradas e ajuste *pickup*: (a) sem *MS* (b) com *MS*.

Diante do exposto, satisfeitas as inequações (4.21) e (4.22), o *word bit* do *Starting Logic* é setado e então se inicia o processo de integração das correntes réplicas incrementais e do ajuste de *pickup* da OC87.

Na Figura 4.12(a) é ilustrado o processo realizado pela função OC87 para três casos de falta, uma interna, outra externa e uma na Barra Remota (Barra R) da LT monitorada. Ajustou-se o *pickup* como sendo o nível máximo de curto-circuito na Barra R para uma dada condição do SEE. Considerando as mesmas condições, observa-se que para a falta externa, os valores da corrente réplica incremental integrada na Barra L não atingem os valores de integração de *pickup* ajustados, indicando que esse evento não tem energia suficiente para ser uma falta interna a LT monitorada. Já para a falta interna, os valores integrados da corrente superam os de *pickup*, afirmando que o distúrbio detectado se trata de uma falta interna a LT monitorada. Por fim, para uma falta na Barra R os valores integrados da corrente réplica incremental excursionam em torno do *pickup*. Dessa forma, por essa falta na barra se tratar de uma falta externa, e por questões de segurança, adiciona-se ao *pickup* uma *MS*, conforme ilustrado na Figura 4.12(b). Sendo assim, a OC87 tem sua operação bem sucedida, viabilizando uma identificação prévia de correntes que podem ser decorrentes de curtos-circuitos internos à LT monitorada.

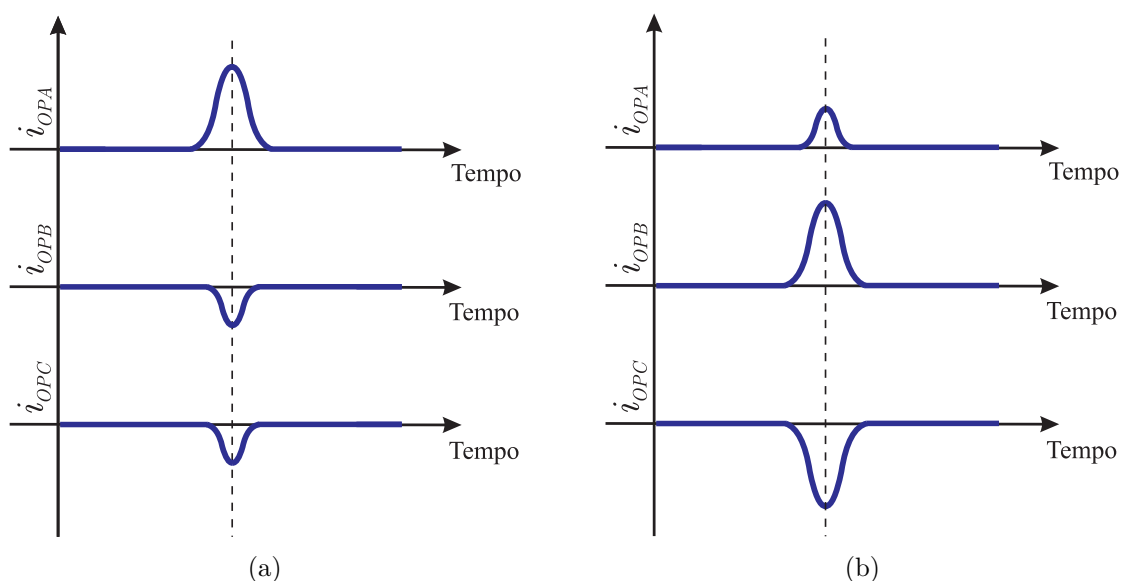
Por ser segregada por *loop* de falta, os ajustes de *pickup* da OC87 são divididos em elementos para faltas monofásicas e para faltas bifásicas, *TP50G* e *TP50P*, respectivamente. Em Kasztenny *et al.* (2016) foram apresentadas recomendações de parametrização desses ajustes, em que ficou evidente que a OC87 pode ser tão sensível como desejado. Entretanto, os valores de alguns ajustes da OC87 não foram encontrados na literatura, como o valor da *MS*, do  $v_{START}$  e  $\Delta i_{min}$ . Os valores desses ajustes utilizados nesta dissertação serão apresentados na Seção 6.2.

Diante do exposto sobre a OC87, nota-se que a função é intrinsecamente dependente dos ajustes. Além disso, por usar correntes réplicas incrementais em sua concepção, a OC87 passa a depender dos parâmetros elétricos da LT. Dessa forma, no que tange a aplicação da função em linhas híbridas, ao aproximar esse tipo de LT por uma LT aérea durante a parametrização dos ajustes, pode levar à diminuição ou elevação dos níveis de curto-circuito calculados, em comparação aos ajustados, de tal forma, a tornar a OC87 mais ou menos sensível quando da ocorrência de um curto-circuito. Tais considerações serão analisadas nesta dissertação.

## 4.6 SELEÇÃO DE FASES

A lógica de identificação das fases envolvidas em um curto-circuito (*fault ID*) é um outro processo associado à TW87 (SEL, 2017). O processo de seleção de fases é realizado utilizando as OV's de corrente advindas do filtro DS, sendo iniciado quando as condições da lógica da TW87 apresentadas na Figura 4.7 são satisfeitas, ou seja, quando a falta é confirmada.

Basicamente, o *fault ID* analisa as polaridades e amplitudes relativas dos sinais de operação  $i_{OP}$  das três fases. Na Figura 4.13, ilustra-se o princípio de operação do *fault ID*, onde  $i_{OPA}$ ,  $i_{OPB}$  e  $i_{OPC}$  são os sinais de operação das fases A, B e C, respectivamente. Percebe-se que, para faltas monofásicas, tal como uma falta AT ilustrada na Figura 4.13(a), a amplitude do  $i_{OP}$  da fase envolvida no curto-circuito é aproximadamente duas vezes maior que o  $I_{OP}$  das fases sãs, e com polaridade oposta. Por outro lado, para faltas bifásicas, tal como uma falta BC ilustrada na Figura 4.13(b), a amplitude de  $i_{OP}$  das fases envolvidas no curto-circuito são consideravelmente maiores que a amplitude das fases sãs, e possuem polaridades opostas entre as fases. Diante disso, torna-se possível identificar qual(is) fase(s) estão envolvidas no curto-circuito, promovendo assim, *trips* monopolares (SEL, 2017).



**Figura 4.13.** Princípio da seleção de fases para uma: (a) falta AT. (b) falta BC. (SEL, 2017).

## 4.7 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados os princípios de operação e implementação numérica da função TW87, além dos processos auxiliares que dão suporte a essa função.

A TW87 tem como princípios básicos: a propagação de OV's em LT's e a Lei de Kirchhoff das Correntes, sendo então criada uma lógica de operação capaz de identificar faltas internas e externas (SCHWEITZER *et al.*, 2014).

Dentre os processos auxiliares da TW87, destacam-se o filtro DS e o detector de distúrbios por OV's. Isso porque, as OV's que a TW87 utiliza para compor sua operação são extraídas por meio do filtro DS, sendo fundamental o entendimento desse processo para a compreensão do esquema de proteção diferencial como um todo. Além disso, explicou-se como funciona o detector de distúrbios por OV's pelo fato desse processo ser o responsável por iniciar todo as análises que visam a identificação da falta ou distúrbio realizada pela função TW87.

Em seguida, as etapas do processo de implementação da TW87 foram descritas, sendo discriminadas as equações relativas aos cálculos das variáveis da função, que são: a amplitude das OV's medidas na Barra L e R, e dos sinais de operação e restrição,  $I_L$  e  $I_R$ ,  $I_{OP}$  e  $I_{RT}$ , respectivamente, além de uma localização de falta estimada pela função  $m_{87}$ . Por fim, apresentou-se a lógica de operação na Figura 4.7, estabelecendo assim as principais condições de segurança que formam esse esquema de proteção.

Dando continuidade, mostrou-se a existência de condições adicionais de segurança (CAS) na lógica da TW87, sendo na sequência explicadas. A primeira CAS descrita foi a tensão de polarização (VPOL) que tem como objetivo identificar se uma falta detectada está no circuito monitorada ou no circuito em paralelo, para os casos de LT's monitoradas de circuito duplo. A outra CAS é uma supervisão de sobrecorrente (função OC87), que tem como objetivo analisar se um dado distúrbio detectado pela TW87 tem energia suficiente para ser considerado proveniente de uma falta interna à LT monitorada. Por fim, apresentou-se a lógica de seleção de fases da TW87 (*fault ID*) utilizada pela TW87, a qual visa prover seletividade ao esquema de proteção.

## CAPÍTULO 5

# APLICANDO A FUNÇÃO TW87 EM LINHAS HÍBRIDAS

Apresentam-se neste capítulo as particularidades da aplicação da TW87 em linhas híbridas, destacando as problemáticas que serão testadas nos capítulos seguintes. Entende-se como linha híbrida uma dada LT não-homogênea, formada por partes com parâmetros elétricos diferentes ao longo do seu comprimento. Os trechos da LT, por exemplo, podem ser compostos por condutores aéreos e cabos subterrâneos, cujas diferenças nos parâmetros decorrem da forma como são lançados e isolados.

Ao projetar um esquema de proteção, tipicamente, considera-se a LT protegida como sendo homogênea com parâmetros elétricos distribuídos uniformemente ao longo de todo o seu comprimento. Esse é também o caso da função TW87. Entretanto, os desenvolvedores alegam que com uma engenharia cuidadosa a função pode ser aplicada em linhas híbridas. Dessa forma, visando entender essa possível aplicação, a seguir serão apresentadas algumas particularidades do uso da função nesses tipos de LTs.

Dada uma linha híbrida composta por trechos aéreos e subterrâneos, ao utilizar a TW87 para protegê-la, dentre as particularidades observadas se destacam os fatos de que há uma diferença entre as velocidades de propagação das OV's entre trechos, e também que ocorrem alterações nas amplitudes das OV's transmitidas pelas junções entre os trechos aéreos e subterrâneos. Como será explicado, tais particularidades podem afetar o funcionamento da TW87.

### 5.1 INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO

A primeira observação acerca da aplicação da TW87 em linhas híbridas se refere à diferença entre as velocidades de propagação das OV's  $v_p$  entre os trechos aéreos e subterrâneos. Conforme explicado no Capítulo 3, a  $v_p$  é uma função dos parâmetros elétricos da LT, podendo ser calculada usando (3.34). Assim, cientes que o efeito capacitivo em trechos subterrâneos tende a

ser mais pronunciado do que em trechos aéreos, sabendo que  $v_p$  é inversamente proporcional à capacitância *shunt*, e considerando que a indutância série da LT não varia tão significativamente entre os trechos quanto a capacitância *shunt*, as OV's tendem a se propagar mais lentamente em trechos subterrâneos do que em trechos aéreos. De acordo com Kasztenny *et al.* (2017), a  $v_p$  de uma OV em um trecho aéreo é cerca de 98% da velocidade da luz no vácuo  $c$ , enquanto a  $v_p$  em um trecho subterrâneo é em torno de 50% de  $c$ .

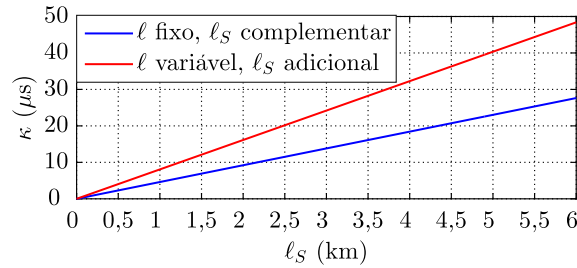
A diferença na  $v_p$  reflete diretamente no tempo de propagação da LT  $\tau$ , sendo esse um dos ajustes da função TW87, conforme explicado no Capítulo 4. Sabendo que  $\tau$  é inversamente proporcional a  $v_p$ , segundo (3.35), para um mesmo comprimento de LT, quão menor  $v_p$  maior será o  $\tau$ . Sendo assim, para uma linha híbrida composta por trechos aéreos e subterrâneos com tempo de propagação total  $\tau_h$  dado pela soma dos tempos de propagação de cada trecho, e uma LT aérea com tempo de propagação  $\tau_a$ , sendo o comprimento de ambas iguais, pode se afirmar que,  $\tau_h > \tau_a$ , ou seja, para comprimentos iguais de LTs, a presença de um ou mais trechos subterrâneos ao longo de uma linha híbrida aumenta o  $\tau$  da LT em relação ao  $\tau$  de LTs aéreas.

Com base nos parâmetros elétricos do sistema teste que será avaliado nesta dissertação, os quais estão disponíveis na Tabela 6.2 e que serão explicados em mais detalhes no Capítulo 6, calcula-se as  $v_p$  de uma OV de modo  $\alpha$  no trecho aéreo  $v_{pA}$  como sendo  $v_{pA} = 288.896$  km/s e para o trecho subterrâneo  $v_{pS}$  como sendo  $v_{pS} = 123.957$  km/s. Considerando  $c = 3 \times 10^5$  km/s, conclui-se que  $v_{pA}$  e  $v_{pS}$  do sistema teste como sendo 96,299% e 41,319% de  $c$ , respectivamente, valores coerentes com o indicado na literatura para as  $v_p$  em cada trecho, que é de aproximadamente 98% e 50% de  $c$ , para trechos aéreos e subterrâneos, respectivamente (KASZTENNY *et al.*, 2017).

Considerando uma LT totalmente aérea com comprimento  $\ell = 200$  km e assumindo as  $v_p$  calculadas no parágrafo anterior, de (3.35), tem-se  $\tau_a = 692,289 \mu\text{s}$ . Dessa forma, pode-se calcular os valores da diferença  $\kappa$  entre o  $\tau_a$  e os  $\tau_h$  de uma linha híbrida, ou seja:

$$\kappa = \tau_h - \tau_a, \quad (5.1)$$

na qual é possível adotar duas formas de composição da linha híbrida: 1) assumir comprimento total da LT fixo, com uma linha híbrida com comprimento complementar ao do trecho aéreo, considerando apenas um trecho subterrâneo; 2) assumir comprimento do trecho aéreo fixo e considerar um trecho subterrâneo adicional ao comprimento da LT aérea. Na Figura 5.1



**Figura 5.1.** Valores de  $\kappa$ .

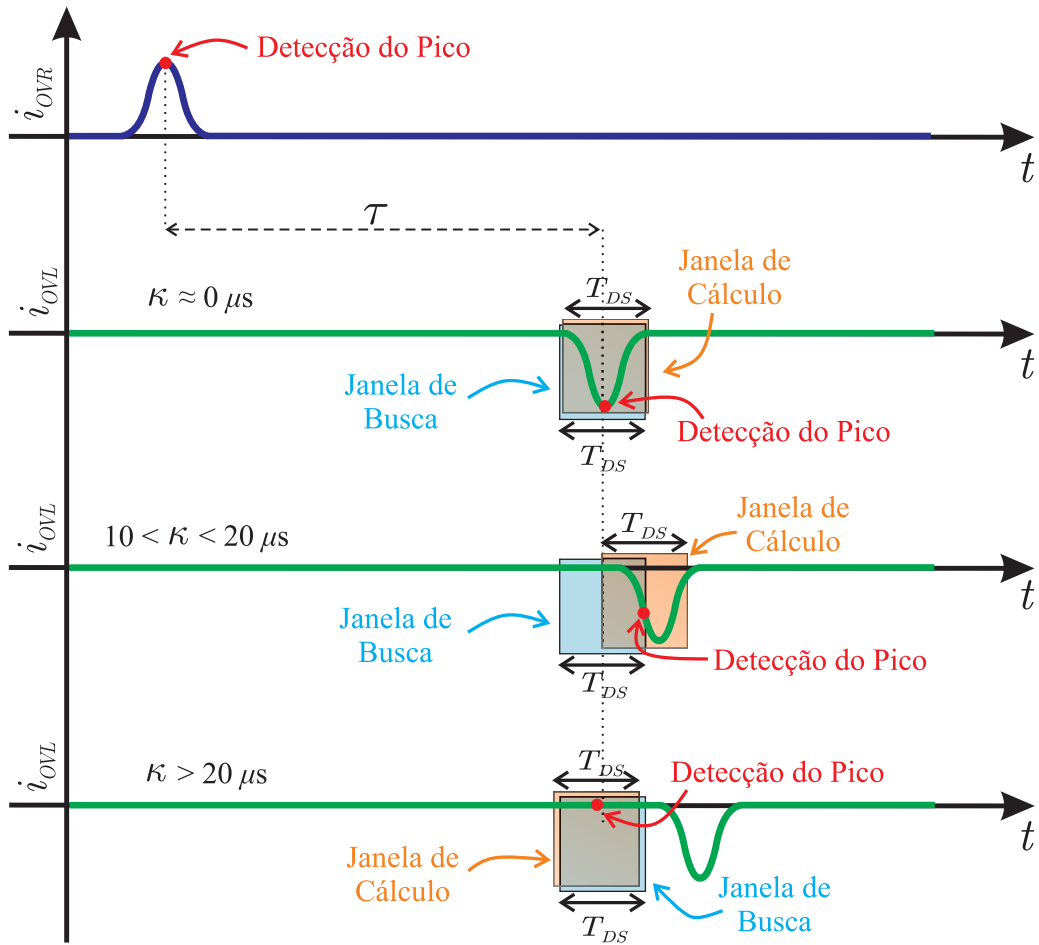
apresentam-se os valores obtidos de  $\kappa$  para ambos os casos em função do comprimento do trecho subterrâneo  $\ell_S$ .

No que se refere a TW87, embora seja indicado ajustar  $\tau = \tau_h$ , caso eventualmente o trecho subterrâneo seja desconsiderado de modo a empregar o ajuste  $\tau = \tau_a$ , dois problemas podem ocorrer: 1) a perda da OV de saída; e 2) o aumento nos erros na localização de faltas  $m_{87}$ , conforme será detalhado a seguir.

### 5.1.1 Perda da OV de Saída

Da Figura 5.1, percebe-se que  $\kappa$  cresce com o aumento de  $\ell_S$ . De fato, a presença de um trecho subterrâneo aumenta o  $\tau_h$  em relação ao que seria apenas  $\tau_a$ . Assim, sabendo que a função TW87 cria uma janela de busca das OVs de saída centrada em  $\tau$  segundos depois da primeira detecção de OV no terminal de referência, e cientes que essa janela tem tamanho igual a  $20 \mu s$ , o ajuste errado de  $\tau$  pode resultar na perda da OV de saída que deve ser medida para cálculo de  $I_{RT}$ . Neste contexto, sabe-se que para um caso ideal de falta externa, quando  $\kappa \approx 0 \mu s$ , a OV de saída aparece no centro da janela de busca. No entanto, para  $10 < \kappa < 20 \mu s$ , pode-se perder parcialmente a OV de saída, enquanto que para  $\kappa > 20 \mu s$  a OV de saída é perdida totalmente. Ou seja, maiores valores de  $\kappa$  aumentam as chances de comprometimento do cálculo da amplitude do sinal de restrição  $I_{RT}$  para faltas externas. Assim, ao considerar o fator de restrição  $SLP$ , pode-se obter  $|I_{OP}| > SLP \cdot I_{RT}$ , o que, conseqüentemente, pode ocasionar uma atuação indevida da TW87.

Na Figura 5.2, ilustra-se o comportamento das OVs para uma falta externa a justante da Barra Remota (Barra R) de uma linha híbrida para diferentes valores de  $\ell_S$ . Nota-se que ao ajustar o  $\tau$  ignorando o trecho composto pelos cabos subterrâneos, ou seja, usando  $\tau = \tau_a$



**Figura 5.2.** Detecção e cálculo da amplitude das OVs de saída em linhas híbridas.

apenas, quão maior for  $\ell_S$  mais atrasada será a OV de saída que chegará ao terminal oposto. Assim, criam-se as diferenças entre a OV de saída e a janela de busca criada com base em parâmetros puramente aéreos. Como consequência, pode-se perder parcialmente ou totalmente as OVs de saída, o que implica em erros no cálculo das amplitudes dessas OVs, comprometendo o cálculo do  $I_{RT}$ . De fato, a depender do valor do  $SLP$ , a Condição 2 da lógica da TW87 pode ser equivocadamente satisfeita (ver Figura 4.7), prejudicando a segurança da função.

### 5.1.2 Erros na Localização de Faltas

Outra consequência relacionada à parametrização do ajuste  $\tau$  aproximando a linha híbrida por uma LT aérea de igual comprimento se traduz em maiores erros na localização de faltas estimada pela função TW87,  $m_{87}$ . De (4.13) no Capítulo 4, tem-se que  $m_{87}$  depende das amostras de detecção das primeiras OVs nos terminais local e remoto, ou seja,  $N_{L1}$  e  $N_{R1}$ ,



respetivamente, bem como do ajuste do tempo de propagação da LT monitorada convertido em número de amostras  $\tau'$ . Sendo assim, quando a TW87 é ajustada com  $\tau = \tau_a$ , algumas consequências podem ser observadas. Por exemplo, em caso de falta externa a montante da Barra L, sendo  $\tau_h$  o tempo de propagação total da linha híbrida, tem-se que:

$$N_{L1} - N_{R1} = -\tau'_h. \quad (5.2)$$

sendo  $\tau'_h$  o valor de  $\tau_h$  convertido em número de amostras. Portanto:

$$m_{87} = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{\tau'_h}{\tau'_a}\right). \quad (5.3)$$

sendo  $\tau'_a$  o  $\tau_a$  convertido em número de amostras.

Nota-se que sendo  $(\tau_h/\tau_a) > 1$ , tem-se  $(\tau'_h/\tau'_a) > 1$ . Dessa forma, o resultado da diferença entre parênteses de (5.3) é negativo, implicando em um resultado para  $m_{87}$  negativo, sendo que nesse caso se espera  $m_{87} = 0$  p.u., portanto, para esse caso, ao ajustar a TW87 ignorando o trecho subterrâneo os erros que se esperam em  $m_{87}$  não transformam em localizações internas a LT monitorada, mesmo usando  $\tau = \tau_a$ , de modo que a Condição 3 da lógica da TW87 não seria satisfeita (ver Figura 4.7), conforme esperado.

Analogamente, para uma falta externa a jusante da Barra R, espera-se que:

$$N_{L1} - N_{R1} = \tau'_h, \quad (5.4)$$

de forma que:

$$m_{87} = 0,5 \cdot \left(1 + \frac{\tau'_h}{\tau'_a}\right). \quad (5.5)$$

Sendo  $(\tau'_h/\tau'_a) > 1$ , o resultado entre parenteses em (5.5) é maior que 2, implicando em um resultado para  $m_{87} > 1$  em um caso em que se espera  $m_{87} = 1$  p.u.. Novamente, os erros esperados não são suficientes para retornar  $m_{87}$  interno a LT monitorada e, portanto, a Condição 3 da lógica de atuação da TW87 também não seria satisfeita, conforme esperado.

Por fim, para faltas internas no trecho aéreo de uma linha híbrida composta por um trecho aéreo e outro subterrâneo, sendo esse último trecho próximo da Barra R, quando acontecem faltas próxima da Barra L, espera-se que  $N_{L1} \approx 0$  e  $N_{R1} \approx \tau'_h$ , portanto de (4.13), tem-se:

$$m_{87} = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{\tau'_h}{\tau'_a}\right). \quad (5.6)$$

De (5.1), convertendo  $\kappa$  em número de amostras:

$$\tau'_h = \kappa' + \tau'_a, \quad (5.7)$$

resultando em:

$$m_{87} = -0,5 \cdot \frac{\kappa'}{\tau'_a}, \quad (5.8)$$

sendo nesses casos esperado  $m_{87} \approx 0$  p.u.. Analogamente, para faltas próximas da Barra R, tem-se  $N_{L1} \approx \tau'_h$  e  $N_{R1} \approx 0$ , portanto, tem-se:

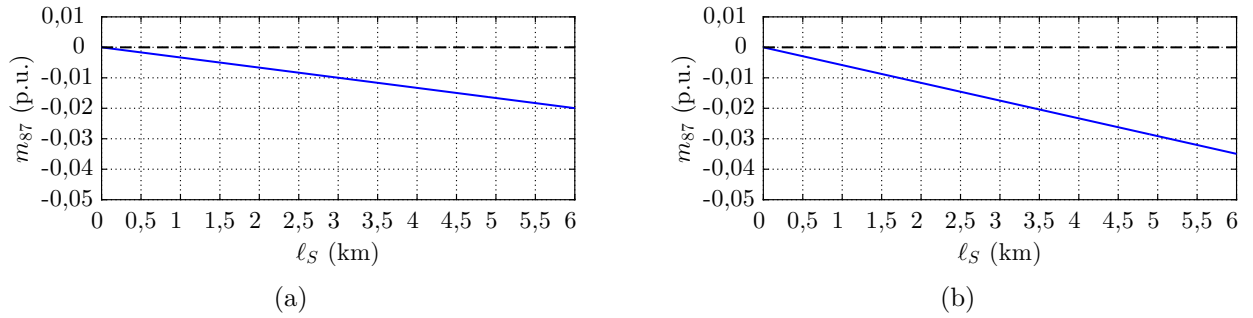
$$m_{87} = 1 + 0,5 \cdot \frac{\kappa'}{\tau'_a}. \quad (5.9)$$

Nesses casos, espera-se  $m_{87} \approx 1$  p.u.. Portanto, a parcela do erro referente à aproximação de uma linha híbrida por uma LT aérea é a mesma tanto para faltas a montante da Barra L quando a justante da Barra R, e é igual em módulo a:

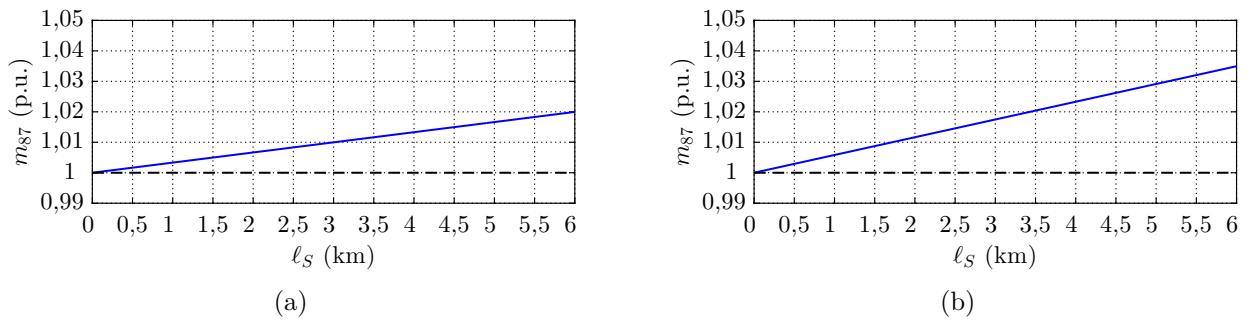
$$|m_{87} - d| = \left| 0,5 \cdot \frac{\kappa'}{\tau'_a} \right|. \quad (5.10)$$

Nas Figuras 5.3 e 5.4, ilustram-se os valores de  $m_{87}$  calculados após a parametrização do ajuste  $\tau$  ignorando o trecho subterrâneo. Da Figura 5.1, percebe-se que  $\kappa$  depende do comprimento do trecho subterrâneo  $\ell_S$ , e assim, é possível relacionar os valores de  $m_{87}$  e  $\ell_S$ . Observa-se que a diferença entre os valores de  $m_{87}$  apresentados e o esperado sem a aproximação no ajuste  $\tau$  da linha híbrida por uma LT totalmente aérea aumenta proporcionalmente com  $\ell_S$ , e por consequência, os erros absolutos em  $m_{87}$  têm a mesma relação de proporcionalidade com  $\ell_S$ , sendo que para os valores máximos de  $\ell_S$  analisados, esperam-se erros absolutos da ordem de 4 km e 7 km, para os casos em que o comprimento total da linha híbrida é fixo e o trecho subterrâneo é complementar ao comprimento do trecho aéreo, e para casos em que o comprimento total da linha híbrida é variável e o trecho subterrâneo é adicional à LT aérea, respectivamente (ver Figura 5.5).

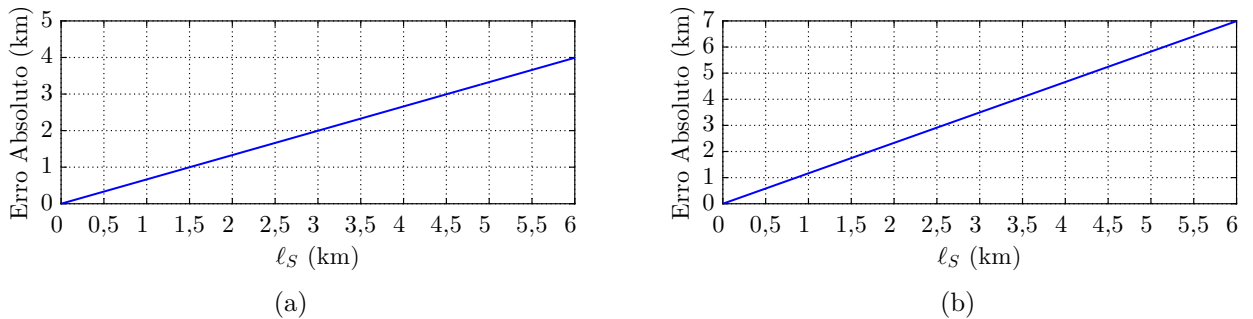
Sendo assim, conclui-se que para os casos avaliados, até então, que os erros esperados em  $m_{87}$  não restringiriam a Condição 3 da lógica da TW87 para os casos de faltas internas ao trecho aéreo da linha híbrida, desde que, o ponto de falta esteja dentro do intervalo de  $0,02 < d < 0,98$  p.u. para o caso em que o comprimento total é fixo e o trecho subterrâneo é complementar à LT aérea, e  $0,04 < d < 0,96$  p.u. para o caso em que o comprimento total é variável e o trecho subterrâneo é adicional a LT aérea.



**Figura 5.3.** Falta próxima da Barra L: (a) Comprimento Total Fixo e Trecho Subterrâneo Complementar. (b) Comprimento Total Variável e Trecho Subterrâneo Adicional.



**Figura 5.4.** Falta próxima da Barra R: (a) Comprimento Total Fixo e Trecho Subterrâneo Complementar. (b) Comprimento Total Variável e Trecho Subterrâneo Adicional.



**Figura 5.5.** Erro Absoluto em  $m_{87}$ : (a) Comprimento Total Fixo e Trecho Subterrâneo Complementar. (b) Comprimento Total Variável e Trecho Subterrâneo Adicional.

## 5.2 ALTERAÇÃO DE AMPLITUDE DAS OVS

Outra particularidade da aplicação da função TW87 em linhas híbridas é o fato de que as OVs têm suas amplitudes alteradas ao passarem por junções de trechos que possuem parâmetros elétricos diferentes. Tal fenômeno decorre da diferença nas impedâncias de surto  $Z_S$  entre trechos, as quais são de fato diferentes, como em uma linha híbrida composta por um trecho subterrâneo e outro aéreo. A  $Z_S$  de sequência positiva de trechos aéreos varia tipicamente entre 300 e 400  $\Omega$ , enquanto que em trechos subterrâneos essa impedância pode variar entre 50 e 70

$\Omega$  (KASZTENNY *et al.*, 2017). Dessa forma, as OVs sofrem por reflexões e/ou transmissões nos pontos de junção, tendo suas amplitudes atenuadas ou amplificadas, a depender dos valores de coeficientes de transmissão e reflexão.

Dada um linha híbrida composta por trechos aéreos e subterrâneos de impedâncias de surto de sequência positiva  $Z_{SA}$  e  $Z_{SS}$ , respectivamente, quando uma OV de corrente incide em uma junção entre dois trechos diferentes, e sendo essa OV proveniente de um trecho aéreo, tem-se então que, a amplitude da OV transmitida para o trecho subterrâneo será dada pelo produto da OV incidente por um coeficiente de transmissão, que para esse caso será chamado de  $T_{AS}$  e calculado da seguinte forma:

$$T_{AS} = \frac{2 \cdot Z_{SA}}{Z_{SS} + Z_{SA}}. \quad (5.11)$$

Por outro lado, quando uma OV de corrente que incide na junção é proveniente de um trecho subterrâneo, o coeficiente de transmissão  $T_{SA}$  que relaciona a amplitude da OV transmitida com a OV incidente é calculado usando a seguinte expressão:

$$T_{SA} = \frac{2 \cdot Z_{SS}}{Z_{SS} + Z_{SA}}. \quad (5.12)$$

Da mesma forma, podem ser definidos os coeficientes de reflexão  $R_{AS}$  e  $R_{SA}$  para os casos em que uma OV de corrente viaja por um trecho aéreo e encontra um trecho subterrâneo, e para os casos em que uma OV de corrente viaja por um trecho subterrâneo e encontra um trecho aéreo, respectivamente, sendo calculados da seguinte forma:

$$R_{AS} = -\frac{Z_{SS} - Z_{SA}}{Z_{SS} + Z_{SA}}, \quad (5.13)$$

$$R_{SA} = -\frac{Z_{SA} - Z_{SS}}{Z_{SS} + Z_{SA}}. \quad (5.14)$$

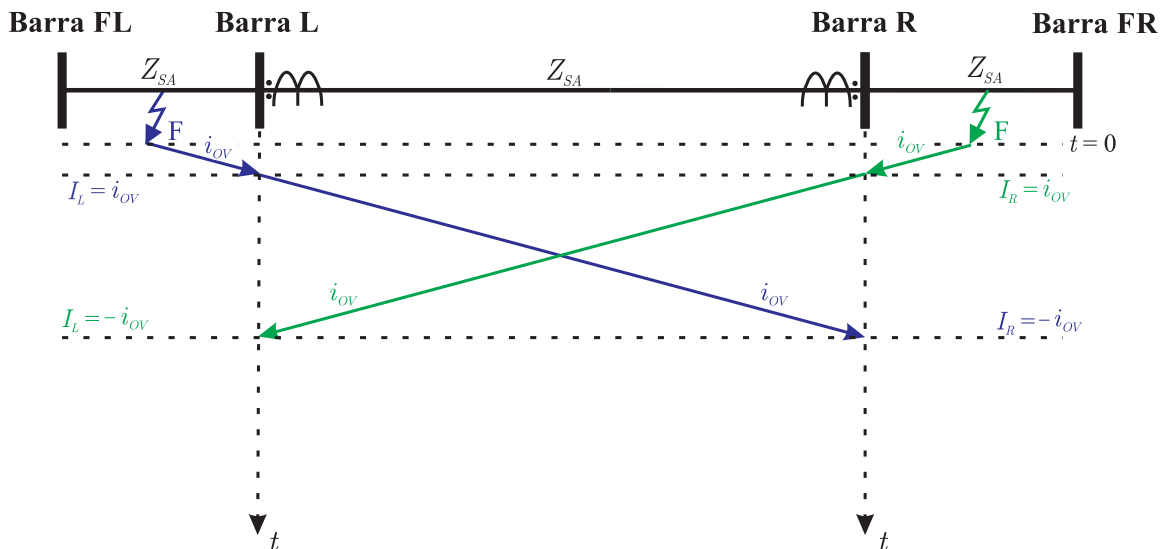
Sabendo os valores dos coeficientes de transmissão e reflexão é possível calcular as alterações sofridas pelas amplitudes das OVs e ainda estimar os valores das OVs que serão medidas nos terminais da LT monitorada. Por exemplo, para o sistema teste que será avaliado nesta dissertação, o qual será apresentado no Capítulo 6, tem-se como valores de impedâncias de surto de sequência positiva dos trechos aéreo e subterrâneos,  $Z_{SA} = 401,407 \Omega$  e  $Z_{SS} = 75,626 \Omega$ . Com base nessas impedâncias de surto e utilizando as equações de (5.11) a (5.14), calculam-se os coeficientes para esse sistema teste, os quais são apresentados na Tabela 5.1.

**Tabela 5.1.** Coeficientes de transmissão e reflexão.

$T_{AS}$	$T_{SA}$	$R_{AS}$	$R_{SA}$
1,683	0,317	0,683	-0,683

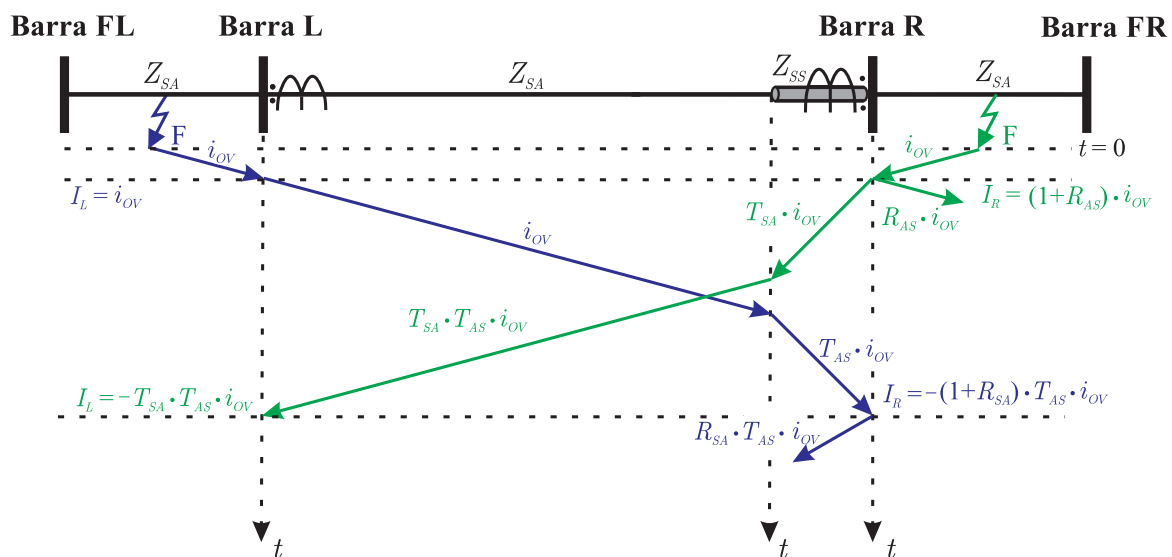
Serão analisados a seguir casos de faltas externas a montante da Barra Local (Barra L) e a jusante da Barra Remota (Barra R) da LT monitorada, sendo essa aplicada em cinco topologias diferentes. Primeiramente, considera-se uma LT totalmente aérea e, em seguida, estudam-se os casos de linhas híbridas com dois, três, quatro e cinco trechos, entre aéreos e subterrâneos. Para todos os casos o ajuste  $\tau$  da TW87 é parametrizado sem aproximações, ou seja, nos casos de linhas híbridas, o  $\tau$  utilizado é dado pela soma dos tempos de propagação de cada trecho, assumindo que as LTs adjacentes possuem  $Z_S$  iguais a do trecho aéreo. Por fim, a propagação das OV's, incluindo reflexões e transmissões são analisadas através de diagramas de reflexões.

Na Figura 5.6, ilustra-se o diagrama de *Lattice* para faltas externas à LT totalmente aérea. Para uma falta externa a montante da Barra L, espera-se que a TW87 calcule as amplitudes das OV's em cada terminal como sendo  $I_L = i_{OV}$  e  $I_R = -i_{OV}$ , desconsiderando as perdas na LT. Portanto, estima-se  $I_{OP} \approx 0$  e  $I_{RT} = 2 \cdot i_{OV}$ . Adicionalmente, para uma falta externa a jusante da Barra R, a TW87 calcularia  $I_L = -i_{OV}$  e  $I_R = i_{OV}$ , desconsiderando as perdas da LT. Portanto, estima-se  $I_{OP} \approx 0$  e  $I_{RT} = 2 \cdot i_{OV}$ , garantindo assim que para ambos os casos de falta, a Condição 2 da lógica de operação da TW87 não seja satisfeita para valores de fator de restrição  $SLP > 0$ .

**Figura 5.6.** Diagrama de *Lattice* para casos faltas externas a LT totalmente aérea.

O diagrama de *Lattice* para faltas externas a uma linha híbrida com dois trechos é ilustrado na Figura 5.7. Para a falta externa a montante da Barra L, desconsiderando as perdas nas LTs, a TW87 calcularia  $I_L = i_{OV}$ . Por outro lado, para a OV medida na Barra R, ocorre uma alteração de amplitude na transição do trecho aéreo para o subterrâneo resultando em  $T_{AS} \cdot i_{OV}$ . Em seguida, essa OV reflete na Barra R e volta com amplitude  $R_{SA} \cdot T_{AS} \cdot i_{OV}$ . Como consequência, sabendo que a OV medida é dada pela soma da OV incidente e refletida, tem-se que  $I_R = -(1 + R_{SA}) \cdot T_{AS} \cdot i_{OV}$ , sendo o sinal negativo decorrente da polaridade do TC. Pode-se então estimar  $I_{OP} = (1 - T_{AS} - R_{SA} \cdot T_{AS}) \cdot i_{OV}$  e  $I_{RT} = (1 + T_{AS} + R_{SA} \cdot T_{AS}) \cdot i_{OV}$ . Substituindo os valores dos coeficientes de transmissão e reflexão da Tabela 5.1, tem-se  $I_L = i_{OV}$ ,  $I_R = -0,533 \cdot i_{OV}$ ,  $I_{OP} = 0,467 \cdot i_{OV}$  e  $I_{RT} = 1,533 \cdot i_{OV}$ . Percebe-se que há uma elevação de  $I_{OP}$  e uma diminuição de  $I_{RT}$  quando comparada ao caso de uma LT totalmente aérea, necessitando assim de um  $SLP > 0,305$  para que a Condição 2 da lógica da TW87 não seja satisfeita para esse caso de falta externa.

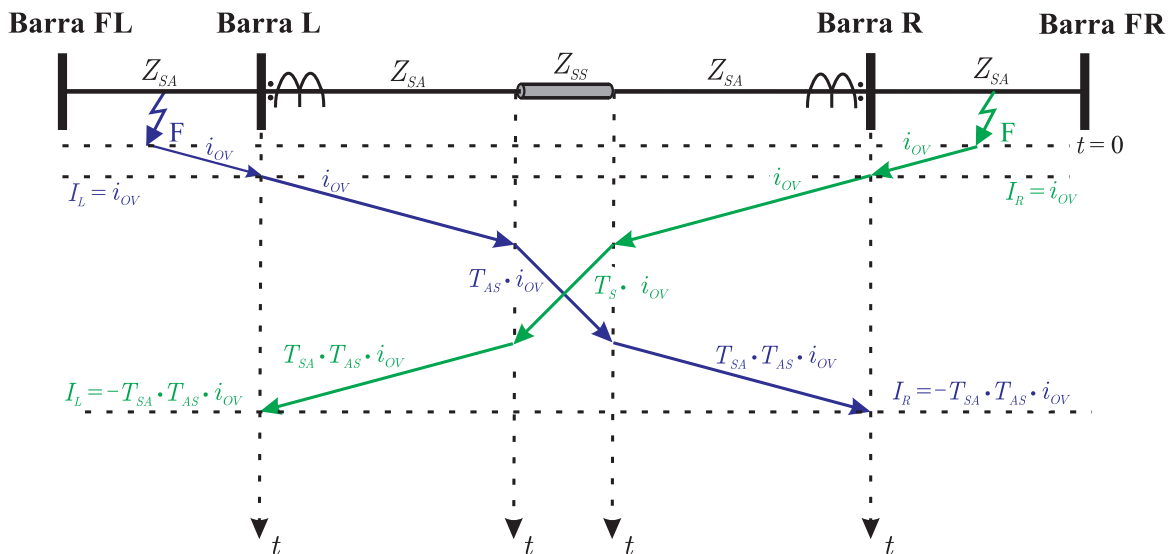
Ainda sobre a Figura 5.7, para a falta externa a jusante da Barra R, desconsiderando as perdas nas LTs, a TW87 calcularia  $I_R = (1 + R_{AS}) \cdot i_{OV}$ , resultado da soma da OV incidente  $i_{OV}$  e refletida  $R_{AS} \cdot i_{OV}$ . Por outro lado, para a Barra L a OV passará por duas transições de trechos aéreos e subterrâneos, resultando em  $I_L = -T_{SA} \cdot T_{AS} \cdot i_{OV}$ , sendo o sinal negativo devido a polaridade do TC. Portanto, estima-se  $I_{OP} = (1 + R_{AS} - T_{AS} \cdot T_{SA}) \cdot i_{OV}$  e  $I_{RT} = (1 + R_{AS} + T_{AS} \cdot T_{SA}) \cdot i_{OV}$ . Ao substituir os valores da Tabela 5.1, tem-se  $I_L = -0,533 \cdot i_{OV}$ ,  $I_R = 1,683 \cdot i_{OV}$ ,  $I_{OP} = 2,216 \cdot i_{OV}$  e  $I_{RT} = 1,150 \cdot i_{OV}$ . Portanto, há uma elevação nos valor de



**Figura 5.7.** Diagrama de *Lattice* para casos de faltas externas a uma linha híbrida com dois trechos.

$I_{OP}$  e  $I_{RT}$  quando comparado ao caso de uma LT monitorada totalmente aérea, o que implica na necessidade do uso de  $SLP > 0,519$  para evitar que a Condição 2 da lógica da função TW87 seja satisfeita indevidamente nesse caso de falta externa.

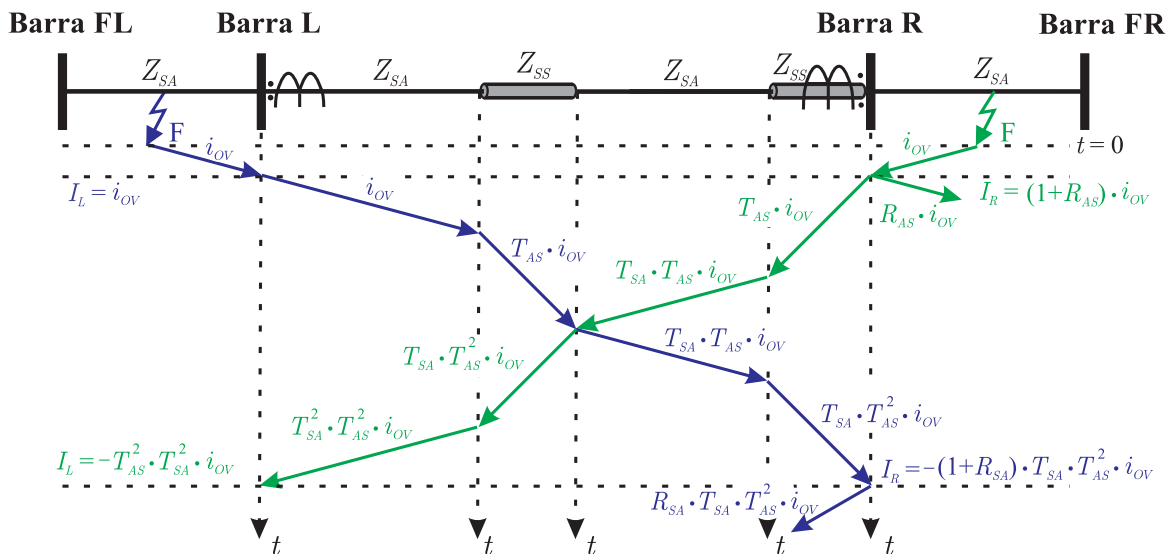
Quando a linha híbrida é composta por três trechos, para os casos de falta externa analisados nesta seção, o diagrama de *Lattice* fica disposto conforme ilustrado na Figura 5.8. Para uma falta externa a montante da Barra L, desconsiderando as perdas na LT, a função TW87 calcularia  $I_L = i_{OV}$ . Entretanto, a OV medida antes de chegar na Barra R altera de amplitude em duas transições de trechos aéreos e subterrâneos, o que resulta  $I_R = -T_{SA} \cdot T_{AS} \cdot i_{OV}$ , sendo o sinal negativo decorrente da polaridade do TC. Como consequência, estima-se  $I_{OP} = (1 - T_{SA} \cdot T_{AS}) \cdot i_{OV}$  e  $I_{RT} = (1 + T_{SA} \cdot T_{AS}) \cdot i_{OV}$ . Substituindo os valores da Tabela 5.1, tem-se  $I_L = i_{OV}$ ,  $I_R = -0,533 \cdot i_{OV}$ ,  $I_{OP} = 0,467 \cdot i_{OV}$  e  $I_{RT} = 1,533 \cdot i_{OV}$ . Tem-se então uma elevação no valor de  $I_{OP}$  e uma diminuição de  $I_{RT}$  quando comparado ao caso de um LT monitorada totalmente aérea, implicando na necessidade do uso de  $SLP > 0,305$  para evitar que a Condição 2 da lógica da TW87 seja satisfeita indevidamente. Para uma falta externa a jusante da Barra R ocorrem as mesmas alterações de amplitude do caso de uma falta a montante da Barra L, entretanto com uma sequência invertida. Como o cálculo se trata de um produto entre coeficientes de transmissão, o resultado é igual ao caso anterior, sendo assim a TW87 calcularia  $I_L = -T_{SA} \cdot T_{AS} \cdot i_{OV}$  e  $I_R = i_{OV}$ , considerando a LT sem perdas. Portanto, estima-se  $I_{OP} = (1 - T_{SA} \cdot T_{AS}) \cdot i_{OV}$  e  $I_{RT} = (1 + T_{SA} \cdot T_{AS}) \cdot i_{OV}$ . Ao substituir os valores da Tabela 5.1, tem-se  $I_L = -0,533 \cdot i_{OV}$ ,  $I_R = i_{OV}$ ,  $I_{OP} = 0,467 \cdot i_{OV}$  e  $I_{RT} = 1,533 \cdot i_{OV}$ . Assim, verifica-se novamente a necessidade



**Figura 5.8.** Diagrama de *Lattice* para casos de faltas externas a uma linha híbrida com três trechos.

de valores de  $SLP > 0,305$ , os quais seriam suficientes para evitar que a Condição 2 da lógica da TW87 seja satisfeita indevidamente.

Dando continuidade, quando a LT monitorada é uma linha híbrida com quatro trechos, considerando os casos de faltas externas em análise nesta seção, tem-se o diagrama de *Lattice* ilustrado na Figura 5.9. Para uma falta externa a montante da Barra L, desconsiderando as perdas na LT, a função TW87 calcularia  $I_L = i_{OV}$ . Porém, para a OV na Barra R ocorrem três alterações de amplificação em transições de trechos aéreos e subterrâneos ao longo da linha híbrida, resultando em uma OV que incide nessa barra com amplitude  $T_{SA} \cdot T_{AS}^2 \cdot i_{OV}$ , ocorrendo em seguida uma reflexão dessa OV, a qual retorna com amplitude  $R_{SA} \cdot T_{SA} \cdot T_{AS}^2 \cdot i_{OV}$ . Sabendo que a OV medida é igual a soma da OV incidente e refletida, tem-se que  $I_R = -(1 + R_{AS}) \cdot T_{SA} \cdot T_{AS}^2 \cdot i_{OV}$ . Portanto, estima-se  $I_{OP} = \{1 - [(1 + R_{AS}) \cdot T_{SA} \cdot T_{AS}^2]\} \cdot i_{OV}$  e  $I_{RT} = \{1 + [(1 + R_{AS}) \cdot T_{SA} \cdot T_{AS}^2]\} \cdot i_{OV}$ . Sendo assim, ao substituir os valores dos coeficientes de transmissão e reflexão da Tabela 5.1, tem-se  $I_L = i_{OV}$ ,  $I_R = -0,285 \cdot i_{OV}$ ,  $I_{OP} = 0,715 \cdot i_{OV}$  e  $I_{RT} = 1,285 \cdot i_{OV}$ . Novamente, têm-se uma elevação de  $I_{OP}$  e uma diminuição de  $I_{RT}$  em comparação com uma LT monitorada totalmente aérea, implicando na necessidade do uso de  $SLP > 0,556$  para que a Condição 2 da lógica da TW87 não seja satisfeita. Já para uma falta externa a jusante da Barra R, a TW87 calcularia  $I_R = (1 + R_{AS}) \cdot i_{OV}$ , resultado advindo da soma das OV's incidente e refletidas na Barra R. Por outro lado, na Barra L, a OV medida  $I_L$  é resultado de quatro transições sucessivas, sendo  $I_L = -T_{SA}^2 \cdot T_{AS}^2 \cdot i_{OV}$ , cujo sinal negativo é resultado da polaridade do TC. Portanto, estima-se  $I_{OP} = (1 + R_{AS} - T_{SA}^2 \cdot T_{AS}^2) \cdot i_{OV}$  e

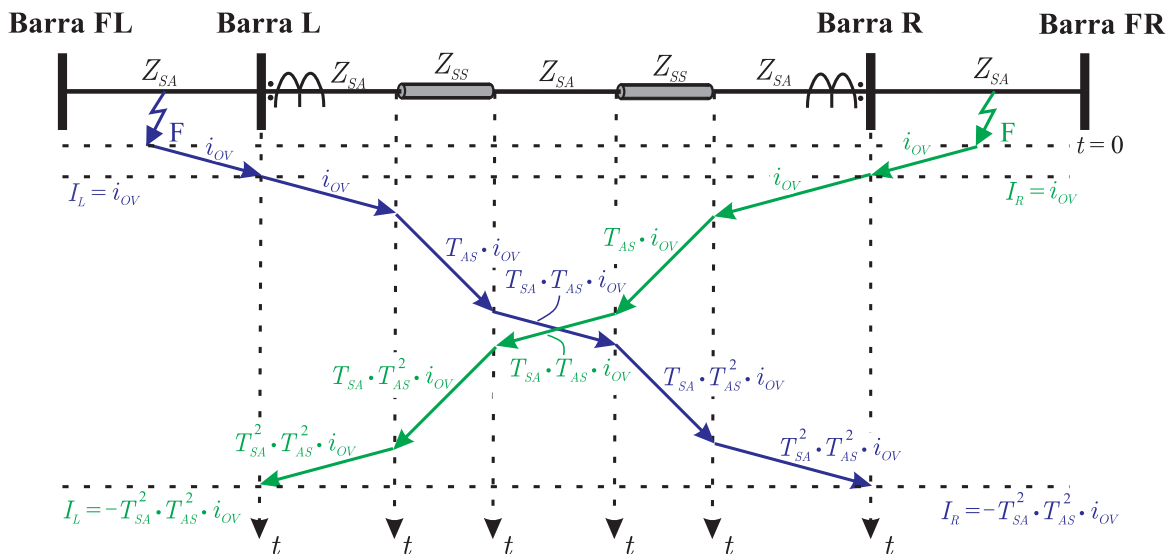


**Figura 5.9.** Diagrama de *Lattice* para casos de faltas externas a uma linha híbrida com quatro trechos.



$I_{RT} = (1 + R_{AS} + T_{SA}^2 \cdot T_{SA}^2) \cdot i_{OV}$ , e ao substituir os valores da Tabela 5.1, tem-se  $I_L = -0,285 \cdot i_{OV}$ ,  $I_R = 1,683 \cdot i_{OV}$ ,  $I_{OP} = 1,398 \cdot i_{OV}$  e  $I_{RT} = 1,968 \cdot i_{OV}$ , implicando na necessidade de um  $SLP > 0,710$  para que a Condição 2 da lógica da TW87 não seja satisfeita.

O último exemplo é de uma linha híbrida com cinco trechos em que são realizadas faltas externas a montante e a jusante das Barras L e R, respectivamente, conforme ilustrado na Figura 5.10. Para a falta externa a montante da Barra L, desconsiderando as perdas, a TW87 calcularia  $I_L = i_{OV}$ . Porém antes da OV chegar na Barra R ela passaria por quatro discontinuidades, o que resulta em  $I_R = -T_{SA}^2 \cdot T_{AS}^2 \cdot i_{OV}$ , sendo o sinal negativo devido a polaridade do TC. Como consequência, estima-se  $I_{OP} = (1 - T_{SA}^2 \cdot T_{AS}^2) \cdot i_{OV}$  e  $I_{RT} = (1 + T_{SA}^2 \cdot T_{AS}^2) \cdot i_{OV}$ . Substituindo os valores da Tabela 5.1, obtêm-se  $I_L = i_{OV}$ ,  $I_R = -0,285 \cdot i_{OV}$ ,  $I_{OP} = 0,715 \cdot i_{OV}$  e  $I_{RT} = 1,285 \cdot i_{OV}$ . Têm-se novamente uma elevação de  $I_{OP}$  e uma diminuição de  $I_{RT}$  quando comparado ao caso de uma LT monitorada totalmente aérea, o implica na necessidade do uso de  $SLP > 0,556$  a fim de que a Condição 2 da lógica da função TW87 não seja satisfeita indevidamente. E para a falta externa a jusante da Barra R, a TW87 calcularia  $I_L = -T_{SA}^2 \cdot T_{AS}^2 \cdot i_{OV}$  e  $I_R = i_{OV}$ , considerando a LT sem perdas. Nessa situação ocorre o mesmo número de transmissões do exemplo anterior para uma falta externa a montante da Barra L, porém, com a sequência de transmissões das OV's invertida. Por se tratar de um produto de coeficientes, o resultado obtido é idêntico ao caso anterior com os valores medidos invertidos dos terminais, de modo que estima-se  $I_L = -0,285 \cdot i_{OV}$ ,  $I_R = i_{OV}$ ,  $I_{OP} = 0,715 \cdot i_{OV}$  e  $I_{RT} = 1,285 \cdot i_{OV}$ , o que requer  $SLP > 0,556$  para evitar que Condição 2 da lógica da TW87 seja satisfeita indevidamente.



**Figura 5.10.** Diagrama de *Lattice* para casos de faltas externas a uma linha híbrida com cinco trechos.

### 5.3 APROXIMAÇÃO DA IMPEDÂNCIA SÉRIE

Uma consequência direta de ignorar um trecho subterrâneo de linha híbrida e considerá-la totalmente aérea consiste em aproximar a impedância série total da linha híbrida pela impedância série da LT aérea. No que se refere à TW87, tal aproximação pode repercutir na lógica de supervisão de sobrecorrente (função OC87), haja vista que durante a implementação dessa função, faz-se uso de correntes réplicas incrementais  $\Delta i_Z$ , cujos valores mudam a depender das impedâncias da LT. Sendo assim, ao aproximar a impedância série, as  $\Delta i_Z$  podem ser calculadas de forma equivocada, assim como os ajustes de *pickup*  $TP50G$  e  $TP50P$  podem ter seus valores incorretos para o sistema teste em estudo, o que pode afetar a sensibilidade da OC87.

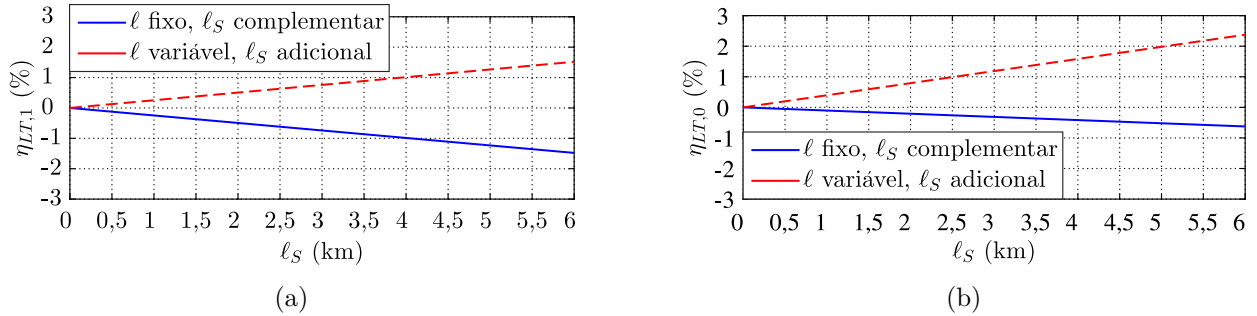
Por exemplo, para uma dada LT aérea com comprimento  $\ell = 200$  km, com base nos parâmetros elétricos do sistema teste que será avaliado nesta dissertação, os quais estão disponíveis na Tabela 6.2, tem-se como impedâncias série totais de sequência positiva e zero para essa LT  $Z_{LT,1} = 20,226 + j104,760 \Omega$  e  $Z_{LT,0} = 77,276 + j285,250 \Omega$ , respectivamente. Sendo assim, podem ser criadas linhas híbridas a partir dessa LT aérea e relacionar os parâmetros elétricos entre esses dois tipos de LTs. As duas possibilidades para a formação da linha híbrida utilizadas anteriormente são novamente analisadas. Apenas para facilitar o entendimento dos casos, repetem-se aqui as definições. A primeira forma é manter o comprimento total da LT monitorada fixo, complementando a LT aérea com um trecho subterrâneo, e segunda possibilidade consiste em adicionar um trecho subterrâneo à LT aérea, o que tornaria o comprimento total da LT monitorada variável. Dessa forma, definindo as impedâncias série totais de sequência positiva e zero de ambas as linhas híbridas como  $Z_{LH,1}$  e  $Z_{LH,0}$ , respectivamente, calculadas pela soma das impedâncias série totais de sequência positiva e zero do trecho aéreo  $Z_{TA,1}$  e  $Z_{TA,0}$  e do trecho subterrâneo  $Z_{TS,1}$  e  $Z_{TS,0}$ , ou seja:

$$Z_{LH,1} = Z_{TA,1} + Z_{TS,1}, \quad (5.15)$$

$$Z_{LH,0} = Z_{TA,0} + Z_{TS,0}, \quad (5.16)$$

pode-se calcular a variação entre os valores absolutos de  $Z_{LH,1}$  e  $Z_{LH,0}$ , e  $Z_{LT,1}$  e  $Z_{LT,0}$ , respectivamente, utilizando os dados de cabos subterrâneos da Tabela 6.2, como sendo:

$$\eta_{LT,X} (\%) = \frac{|Z_{LH,X}| - |Z_{LT,X}|}{|Z_{LT,X}|} \cdot 100\%, \quad (5.17)$$



**Figura 5.11.** Variação do módulo da impedância de: (a) sequência positiva. (b) sequência zero.

na qual  $X = 1$  representa a sequência positiva e  $X = 0$  representa a sequência zero.

Sendo assim, obtêm-se os gráficos apresentados na Figura 5.11, nos quais relacionam-se  $\eta_{LT,1}$  e  $\eta_{LT,0}$  com o comprimento do trecho subterrâneo  $\ell_S$ . Observa-se que, para o caso de comprimento do trecho subterrâneo complementar ao trecho aéreo ocorre uma diminuição na impedância da LT monitorada quando se compara à linha híbrida com a LT totalmente aérea, podendo chegar a quase 2% e 1% menor para  $\ell_S = 6$  km na sequência positiva e zero, respectivamente. Por outro lado, para do trecho subterrâneo adicional com comprimento fixo da LT aérea, verifica-se um aumento da impedância da LT monitorada. Entretanto, para o caso em análise, esse aumento é de aproximadamente 2% para ambas sequências, positiva e zero. De fato, como se espera, o parâmetro elétrico com variação mais significativa entre trechos de cabos aéreos e subterrâneos é a capacitância *shunt*, porém no desenvolvimento da corrente  $\Delta i_Z$ , utilizada pela OC87, considera-se a LT monitorada como um circuito RL (KASZTENNY *et al.*, 2016). Portanto, não se espera erros significativos no cálculo de  $\Delta i_Z$  com essa aproximação de impedâncias.

## 5.4 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentadas particularidades da função TW87 em linhas híbridas, dentre as quais se destacam a diferença entre as velocidades de propagação  $v_p$  das OV's entre trechos aéreos e subterrâneos, as alterações de amplitude sofridas pelas OV's nas junções entre trechos aéreos e subterrâneos, e as diferenças entre as impedâncias série de linhas híbridas e LTs aéreas. Dessa forma, foi possível observar quais características são mais críticas, devendo ser levadas em consideração nas próximas análises, desde a parametrização dos ajustes até a inerente consequência da presença de trechos com diferentes parâmetros ao longo de uma LT.

Primeiramente, explicaram-se os impactos das diferentes  $v_p$  dos trechos aéreos e subterrâneos de uma linha híbrida sobre a TW87, demonstrando que no caso de ajuste de  $\tau$  aproximando a linha híbrida por uma LT aérea de igual comprimento, deve-se restringir o(s) comprimento(s) do(s) trecho(s) subterrâneo(s), para que a função não perca a medição da OV de saída em casos de faltas externas.

Em seguida, apresentaram-se observações sobre as alterações das amplitudes das OVs quando transmitidas através de junções entre trechos aéreos e subterrâneos. Percebeu-se que a presença de trechos com diferentes parâmetros provoca diferenças entre as amplitudes esperadas para as OVs, de modo que a TW87 pode ser influenciada. Para exemplificar a referida problemática, foram analisadas faltas externas a uma linha híbrida com diferentes topologias. Primeiramente uma LT totalmente aérea e, em seguida, com dois, três, quatro e cinco trechos distintos. Das análises, concluiu-se que o aumento do número de trechos implica na necessidade de maiores valores do fator de restrição  $SLP$  a fim de evitar que a Condição 2 da lógica de operação da função TW87 não seja satisfeita indevidamente durante faltas externas.

Da Tabela 5.2, nota-se que a TW87 quando aplicada em linhas híbridas se torna mais insegura à medida que aumenta o número de trechos da linha híbrida. Para evitar atuações indevidas, deve-se elevar o valor de  $SLP$ , o que pode eventualmente reduzir a sensibilidade da TW87 para curtos-circuitos internos. Em geral, nota-se que os sinais de operação e restrição  $I_{OP}$  e  $I_{RT}$  tendem a aumentar e diminuir, respectivamente, com o aumento no número de trechos. Ainda, conclui-se que à medida que aumenta o número de trechos da linha híbrida, a amplitude das OVs no terminal mais distante da falta é reduzida devido ao aumento no número de junções no caminho de propagação.

Por fim, foram apresentadas as implicações de aproximações da impedância série de uma linha híbrida. Da implementação da TW87, nota-se a supervisão de sobrecorrente (função OC87) pode ser afetada, visto que utiliza correntes réplica incrementais (SCHWEITZER *et al.*, 2014) desenvolvidas considerando uma LT homogênea. Assim, a depender dos desvios entre ajustes e parâmetros reais do SEE, a OC87 pode ter seu nível de sensibilidade afetado.

**Tabela 5.2.** Resumo da avaliação das alterações de amplitude das OV's em linhas híbridas.

LT	$I_L$	$I_R$	$I_{OP}$	$I_{RT}$	$SLP$
Falta externa a montante da Barra L					
Aérea	$i_{OV}$	$-i_{OV}$	$\approx 0$	$2 \cdot i_{OV}$	$> 0$
Dois Trechos	$i_{OV}$	$-0,533 \cdot i_{OV}$	$0,467 \cdot i_{OV}$	$1,533 \cdot i_{OV}$	$> 0,305$
Três Trechos	$i_{OV}$	$-0,533 \cdot i_{OV}$	$0,467 \cdot i_{OV}$	$1,533 \cdot i_{OV}$	$> 0,305$
Quatro Trechos	$i_{OV}$	$-0,285 \cdot i_{OV}$	$0,715 \cdot i_{OV}$	$1,285 \cdot i_{OV}$	$> 0,556$
Cinco Trechos	$i_{OV}$	$-0,285 \cdot i_{OV}$	$0,715 \cdot i_{OV}$	$1,285 \cdot i_{OV}$	$> 0,556$
Falta externa a jusante da Barra R					
Aérea	$-i_{OV}$	$i_{OV}$	$\approx 0$	$2 \cdot i_{OV}$	$> 0$
Dois Trechos	$-0,533 \cdot i_{OV}$	$1,683 \cdot i_{OV}$	$1,150 \cdot i_{OV}$	$2,216 \cdot i_{OV}$	$> 0,519$
Três Trechos	$-0,533 \cdot i_{OV}$	$i_{OV}$	$0,467 \cdot i_{OV}$	$1,533 \cdot i_{OV}$	$> 0,305$
Quatro Trechos	$-0,285 \cdot i_{OV}$	$1,683 \cdot i_{OV}$	$1,398 \cdot i_{OV}$	$1,968 \cdot i_{OV}$	$> 0,710$
Cinco Trechos	$-0,285 \cdot i_{OV}$	$i_{OV}$	$0,715 \cdot i_{OV}$	$1,285 \cdot i_{OV}$	$> 0,556$

## ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são analisados os resultados obtidos de testes computacionais da TW87 quando aplicada em linhas híbridas. Para tanto, realizaram-se simulações computacionais em um sistema teste 230 kV/60 Hz no *Alternative Transients Program* (ATP) para diferentes topologias da LT monitorada.

### 6.1 SISTEMA TESTE E SIMULAÇÕES

Na Figura 6.1, ilustra-se o sistema teste utilizado, onde  $\ell$ ,  $\ell_{Ai}$  e  $\ell_{Si}$  são o comprimento total da linha híbrida, do  $i$ -ésimo trecho aéreo e subterrâneo, respectivamente, e  $n_A$  e  $n_S$  o número de trechos aéreos e subterrâneos, respectivamente. Por fim, LT ADJ1 e LT ADJ2 são LTs adjacentes à LT monitorada, FL e FR são as Fontes Local e Remota, respectivamente, sendo o restante do SEE representado por impedâncias equivalentes de Thévenin  $Z_{FL}$  e  $Z_{FR}$ .

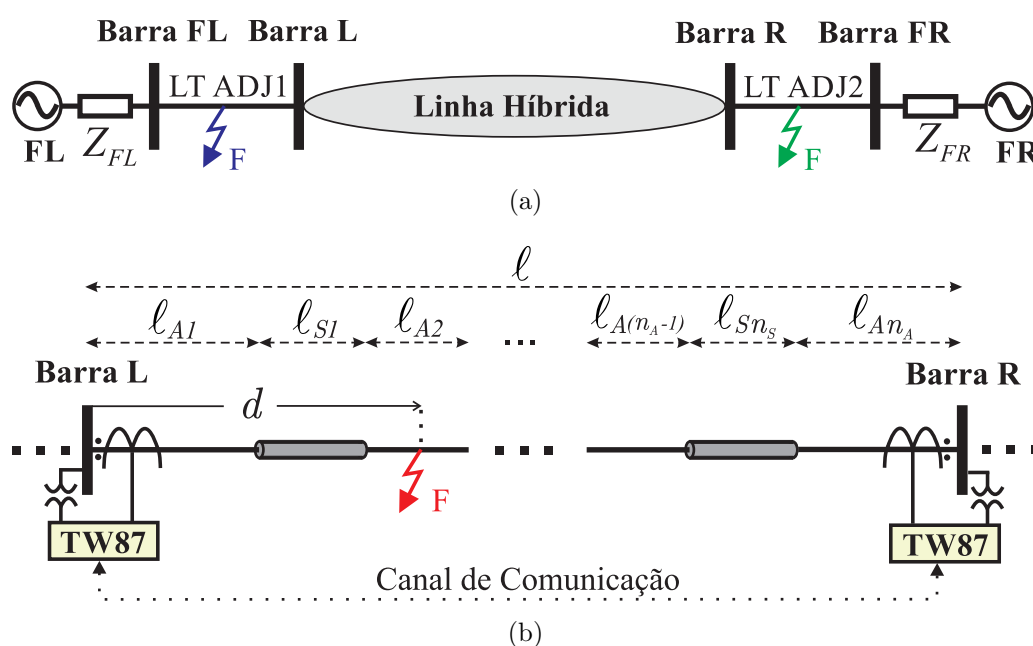


Figura 6.1. Sistema teste. (a) Geral. (b) Detalhe.

Os testes foram divididos em cinco casos. No Caso 1, realiza-se um estudo da TW87 aplicada a uma LT aérea. No Caso 2, a LT monitorada é formada por uma linha híbrida com dois trechos, sendo esse caso subdividido em Caso 2.1 quando  $\ell$  é fixo e o trecho subterrâneo é complementar ao trecho aéreo para compor a linha híbrida, e no Caso 2.2 no qual o comprimento  $\ell$  é variável com o trecho subterrâneo sendo adicionado à LT monitorada. Por fim, nos Casos 3, 4 e 5, a linha híbrida é composta por três, quatro e cinco trechos, respectivamente, sendo  $\ell$  fixo. Na Tabela 6.1, apresenta-se um resumo dos casos avaliados, sendo  $\ell_S$  limitado a 6 km por ser suficiente para as análises propostas, haja vista que conforme ilustrado na Figura 5.1 do Capítulo 5 para valores de  $\ell_S$  menores que esse máximo estabelecido, a OV de saída já é perdida totalmente para a situação em que se aproxima uma linha híbrida por uma LT aérea de igual comprimento. Além disso, quando são consideradas as particularidades da linha híbrida ao ajustar a TW87, para  $\ell_S > 6$  km, as variáveis da função tendem a se manterem aproximadamente constantes.

A modelagem das LTs no ATP foi realizada com base em dados reais de um SEE em operação no SIN. Entretanto, de uma pesquisa junto a empresas, foram disponibilizados apenas os valores de resistência e indutância série, e capacitância *shunt* de sequência positiva e zero de trechos aéreos e subterrâneos. Sendo assim, ao modelar cada trecho da linha híbrida, utilizou-se do modelo a parâmetros distribuídos e constantes na frequência de LTs trifásicas perfeitamente transpostas (DOMMEL, 1986). Embora não seja a modelagem completa de cabos subterrâneos, tal modelo representa a influência da velocidade de propagação  $v_p$  das OVs, a alteração das OVs nas discontinuidades entre trechos e a diferença entre impedâncias série de LTs, sendo essas características críticas para avaliar o desempenho da TW87 quando aplicada em linhas híbridas.

**Tabela 6.1.** Resumo dos casos avaliados.

	LT	$n_A$	$n_S$	$\ell$ (km)	$\ell_{Ai}$ (km)	$\ell_{Si}$ (km)	
Caso 1	Aérea	1	0	200	$\ell$	–	
Caso 2	Caso 2.1	Dois Trechos	1	1	200	$(\ell - n_S \cdot \ell_{Si})/n_A$	$0, 1 < \ell_S < 6$
	Caso 2.2	Dois Trechos	1	1	$\ell_A + \ell_S$	200	$0, 1 < \ell_S < 6$
Caso 3	Três Trechos	2	1	200	$(\ell - n_S \cdot \ell_{Si})/n_A$	$0, 1 < \ell_S < 6$	
Caso 4	Quatro Trechos	2	2	200	$(\ell - n_S \cdot \ell_{Si})/n_A$	$0, 1 < \ell_S < 6$	
Caso 5	Cinco Trechos	3	2	200	$(\ell - n_S \cdot \ell_{Si})/n_A$	$0, 1 < \ell_S < 6$	

$i$  é o  $i$ -ésimo trecho aéreo ou subterrâneo.

Com o intuito de diminuir a presença de erros que não estão associados às análises propostas, sinais primários de tensão e corrente foram utilizados. Dessa forma, elimina-se a influência da resposta em frequência dos transformadores de potencial capacitivo (TPCs) e transformadores de corrente (TCs) dos resultados (FISCHER *et al.*, 2012), concentrando os estudos aos aspectos de fato de interesse para esta dissertação.

Na Tabela 6.2, apresentam-se os valores dos parâmetros elétricos para os trechos aéreos e subterrâneos que foram utilizados nos testes, e na Tabela 6.3 são apresentados os dados dos circuitos equivalentes de Thévenin. Por fim, as LTs adjacentes foram modeladas com parâmetros elétricos iguais aos dos trechos aéreos e comprimento total de cada uma igual a 100 km.

Conforme mencionado anteriormente, os resultados foram obtidos com base em registros de falta simulados no ATP. Em cada caso utilizou-se uma frequência de amostragem  $f_S = 1$  MHz, taxa essa utilizada pela função TW87, com a exceção de alguns casos em que se fez necessário  $f_S = 10$  MHz devido ao comprimento de alguns trechos da linha híbrida serem relativamente

**Tabela 6.2.** Parâmetros elétricos dos trechos aéreos e subterrâneos.

Sequência	$R$ ( $\Omega/\text{km}$ )	$X$ ( $\Omega/\text{km}$ )	$\omega C$ ( $\mu S/\text{km}$ )	$Z_S$ ( $\Omega$ )
Trecho Aéreo				
Zero	0,386	1,426	2,306	786,490
Positiva	0,101	0,524	3,251	401,407
Trecho Subterrâneo				
Zero	0,230	1,150	8,013	378,824
Positiva	0,230	0,230	40,215	75,626

**Tabela 6.3.** Dados dos circuitos equivalentes de Thévenin.

Tensão (p.u.)	Impedâncias ( $\Omega$ )	
	Sequência Zero	Sequência Positiva
Fonte Local (FL)		
$\hat{V}_{FL} = 1,00 \angle 0^\circ$	$Z_{FL,0} = 15,455 + j57,049$	$Z_{FL,1} = 4,045 + j20,952$
Fonte Remota (FR)		
$\hat{V}_{FR} = 0,96 \angle -25^\circ$	$Z_{FR,0} = 15,455 + j57,049$	$Z_{FR,1} = 4,045 + j20,952$



pequenos para o passo de integração do ATP. Tratando-se de um passo de integração considerado baixo, os sinais da simulação foram tomados diretamente como sinais digitalizados para uso na TW87, não sendo realizado o procedimento de subamostragem.

No total, foram simulados 1790 curtos-circuitos internos e externos, considerando como variáveis os comprimentos e impedâncias dos trechos aéreos e subterrâneos da linha híbrida. Além disso, foram também variadas as localizações da falta  $d$ , sendo simuladas apenas faltas monofásicas francas do tipo AT com ângulo de incidência  $\Theta$  igual a  $90^\circ$ , por ser o caso mais frequente em SEEs (EPE, 2017). Destaca-se que o intuito desse trabalho não é a avaliação decorrente da atenuação das OV's, mas sim, dos efeitos resultantes das diferentes  $v_p$  e impedâncias dos trechos da linha híbrida, conforme explicado anteriormente.

Para cada caso, criaram-se gráficos e tabelas dos módulos das amplitudes das OV's de correntes nas Barra L e R,  $|I_L|$  e  $|I_R|$ , respectivamente, dos sinais de operação  $|I_{OP}|$  e restrição  $I_{RT}$  para diferentes valores de fator de restrição  $SLP$  em função da localização de falta  $d$  e/ou do comprimento do trecho subterrâneo  $\ell_S$ , comparando essas amplitudes com os ajustes  $I_{min}$  e  $K_{OV}$  da função TW87. Além disso, foram criados gráficos da localização de faltas estimada  $m_{87}$  pela TW87 em função de  $d$  e de erros absolutos entre  $m_{87}$  e  $d$  para diferentes valores de  $\ell_S$ , sendo os erros absolutos calculados da seguinte forma:

$$\text{Erro Absoluto (km)} = (m_{87} - d) \cdot \ell. \quad (6.1)$$

Apresentar-se-ão os erros absolutos na forma de *boxplots*. Esse tipo de gráfico permite a representação da distribuição em formato visual por meio de cinco índices: o valor máximo, representado pela cauda superior; o quartil superior (erro máximo em 75% dos dados), representado pelo limite superior da caixa; a mediana (erro máximo em 50% dos dados), representada pela linha intermediária da caixa; o quartil inferior (erro máximo em 25% dos dados), representado pelo limite inferior da caixa; e o valor mínimo, representado pela cauda inferior. Dessa forma, torna-se possível relacionar a dispersão dos resultados com a variável analisada.

Com base nos gráficos criados, o desempenho da função TW87 é avaliado de acordo com a lógica de operação apresentada na Figura 4.7. Para faltas internas, espera-se que as Condições 1, 2 e 3 da lógica de operação da TW87 sejam satisfeitas. A Condição 1 é satisfeita quando  $|I_L| > K_{OV} \cdot I_{min}$  e  $|I_R| > K_{OV} \cdot I_{min}$  e  $|I_{OP}| > I_{min}$ , a Condição 2 é satisfeita quando

$|I_{OP}| > SLP \cdot I_{RT}$ , e a Condição 3 quando  $0 < m_{87} < 1$  p.u.. E em casos de faltas externas, nenhuma dessas condições devem ser satisfeitas, porém, ao aplicar a TW87 em linhas híbridas, algumas dessas condições podem ser satisfeitas indevidamente.

Para ilustrar o desempenho das condições adicionais de segurança (CAS), criaram-se gráficos da tensão de polarização  $V_{POL}$  em função de  $d$  e  $\ell_S$  somente para faltas internas, de tal forma que a supervisão VPOL é satisfeita quando a polaridade do sinal  $V_{POL}$  é igual à polaridade de  $I_{OP}$ , ou seja,  $\text{sign}(V_{POL}) = \text{sign}(I_{OP})$ . Por fim, o desempenho da supervisão de sobrecorrente OC87 é ilustrado com gráficos da corrente réplica incremental  $\Delta i_Z$  e corrente réplica incremental integrada  $\int \Delta i_Z dt$  no tempo  $t$ , em que se é observada a amplitude das grandezas frente a aplicação da TW87 em linhas híbridas.

## 6.2 PARAMETRIZAÇÃO DOS AJUSTES

Antes de analisar os resultados, precisa-se realizar o ajuste da TW87, onde são definidos os parâmetros da função. De um modo geral, os ajustes da TW87 são divididos em ajustes de campo e de fábrica (KASZTENNY *et al.*, 2016). Em relação aos ajustes de campo, destacam-se o tempo de propagação das OVs  $\tau$  ao longo da LT monitorada e o *pickup* da supervisão de sobrecorrente (função OC87) para loops monofásicos e bifásicos  $TP50G$  e  $TP50P$ , respectivamente. No que se refere aos ajustes de fábrica, os principais são o fator de restrição  $SLP$ , a amplitude mínima da OV  $I_{min}$ , o fator de ajuste de sensibilidade  $K_{OV}$ , a margem de segurança da OC87  $MS$  e a tensão e corrente incremental mínima do *Starting Logic*,  $v_{START}$  e  $\Delta i_{min}$ , respectivamente. A seguir, são apresentadas as considerações acerca da parametrização desses ajustes, e os valores utilizados na realização dos testes, além de concomitantemente, comentar sobre a relação de cada ajuste ao aplicar da TW87 em linhas híbridas.

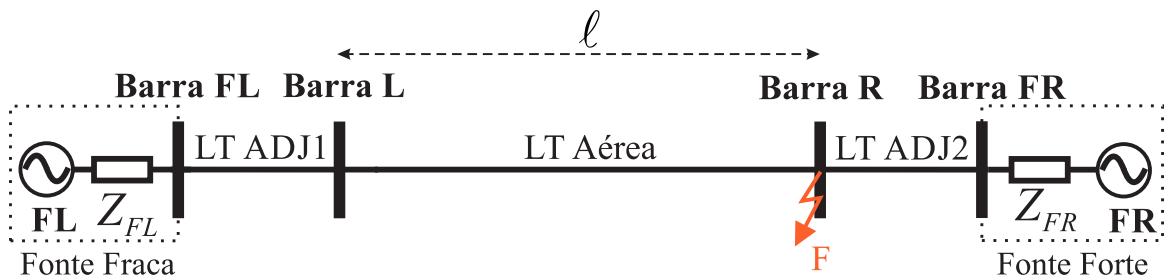
O ajuste  $\tau$  é utilizado pela TW87 para encontrar possíveis OVs de saída e no cálculo da localização de falta  $m_{87}$  (ver Seção 4.4). Em geral, pode-se calcular o  $\tau$  com base nos parâmetros elétricos da LT, a partir da  $v_p$  e do comprimento da LT usando (3.35). Com base na Tabela 6.2 e utilizando (3.34), calculam-se as velocidades de propagação para os trechos aéreo  $v_{pA}$  e subterrâneo  $v_{pS}$ , como sendo  $v_{pA} = 288.896$  km/s e  $v_{pS} = 123.957$  km/s. Portanto, para casos em que se aproxima a linha híbrida por uma LT aérea de igual comprimento  $\ell = 200$  km, utilizou-se

$\tau_a = 692,289 \mu\text{s}$ , enquanto que para casos em que foram consideradas as particularidades da linha híbrida, o ajuste foi parametrizado como  $\tau = \tau_h$ , sendo:

$$\tau_h = \sum_{i=1}^{n_A} \left( \frac{\ell_{Ai}}{v_{pA}} \right) + \sum_{i=1}^{n_S} \left( \frac{\ell_{Si}}{v_{pS}} \right), \quad (6.2)$$

onde  $\ell_{Ai}$  e  $\ell_{Si}$  são os comprimentos dos  $i$ -ésimos trechos aéreos e subterrâneos, respectivamente, e  $n_A$  e  $n_S$  o número de trechos aéreos e subterrâneos da linha híbrida avaliada, respectivamente. Nesse contexto, ressalta-se que os desenvolvedores da TW87 recomendam realizar um teste de energização para o cálculo do  $\tau$ , porém, nas simulações realizadas, observou-se que a diferença entre o  $\tau$  calculado com base nos parâmetros elétricos e através de teste de energização foi insignificante.

Os próximos ajustes de campo a serem parametrizados são: o  $TP50G$  e o  $TP50P$  da função OC87. Em Kasztenny *et al.* (2016), recomenda-se que para parametrizar o relé localizado na Barra Local (Barra L) da LT monitorada, devem-se calcular as contribuições de curto-circuito para uma configuração do SEE em que o equivalente de Thévenin local esteja em uma situação de fonte fraca e o equivalente de Thévenin remoto com fonte forte. Entretanto, não se definiu em Kasztenny *et al.* (2016) o grau de força e fraqueza das fontes e, portanto, nesta dissertação, utilizou-se o dobro e a metade do valor da impedância equivalente de Thévenin do SEE em operação normal como fontes fraca e forte, respectivamente, conforme descrito na Tabela 6.3. Assim, para Fonte Local (FL), tem-se  $Z_{FL,1} = Z_{FL,2} = 8,0904 + j41,9048 \Omega$  e  $Z_{FL,0} = 30,9104 + j114,0984 \Omega$ , e para Fonte Remota (FR), tem-se  $Z_{FR,1} = Z_{FR,2} = 2,0226 + j10,4762 \Omega$  e  $Z_{FR,0} = 7,7276 + j28,5246 \Omega$ , em que  $Z_{X,1}$ ,  $Z_{X,2}$  e zero  $Z_{X,0}$  representam as impedâncias de sequência positiva, negativa e zero de um dado  $X$ -ésimo equivalente de Thévenin ou  $X$ -ésima LT. Os ajustes serão calculados para uma LT monitorada aérea com comprimento  $\ell = 200$  km, e para LTs adjacentes LT ADJ1 e LT ADJ2 com comprimentos iguais a 100 km, apresentando parâmetros elétricos iguais aos do trecho aéreo simulado. Logo, da Tabela 6.2,



**Figura 6.2.** Aplicação de curto-circuito para determinação dos ajustes da função OC87.

obtém-se  $Z_{LT,1} = Z_{LT,2} = 20,226 + j104,760 \Omega$ ,  $Z_{LT,0} = 77,276 + j285,250 \Omega$ ,  $Z_{LTADJ1,1} = Z_{LTADJ1,2} = Z_{LTADJ2,1} = Z_{LTADJ2,2} = 10,113 + j52,381 \Omega$  e  $Z_{LTADJ1,0} = Z_{LTADJ2,0} = 38,638 + j142,620 \Omega$ .

Como se está parametrizando o relé da Barra L, deve-se aplicar o curto-circuito na Barra Remota (Barra R), sendo o valor da resistência de falta  $R_F$  de acordo com a sensibilidade que se almeja (KASZTENNY *et al.*, 2016). Dessa forma, apresenta-se na Figura 6.2 o sistema teste nas condições do SEE citadas para o cálculo dos ajustes  $TP50G$  e  $TP50P$ . Com o intuito de simplificar os cálculos, a parametrização dos ajustes de *pickup* será realizada no domínio fasorial, mapeando na sequência os resultados obtidos para o domínio do tempo.

Para o cálculo do ajuste  $TP50G$ , a falta aplicada na Barra R deve ser do tipo monofásica. Por conveniência, optou-se por aplicar uma falta tipo AT com  $R_F = 0 \Omega$ , dessa forma, o circuito de sequência deve ser estudado conforme ilustrado na Figura 6.3(a), onde:

$$Z_1 = (Z_{FR,1} + Z_{LTADJ2,1}) / (Z_{LTADJ1,1} + Z_{LT,1} + Z_{FL,1}), \quad (6.3)$$

$$Z_2 = (Z_{FR,2} + Z_{LTADJ2,2}) / (Z_{LTADJ1,2} + Z_{LT,2} + Z_{FL,2}), \quad (6.4)$$

$$Z_0 = (Z_{FR,0} + Z_{LTADJ2,0}) / (Z_{LTADJ1,0} + Z_{LT,0} + Z_{FL,0}). \quad (6.5)$$

Portanto, para os valores das impedâncias das LTs e dos equivalentes de Thévenin, obtém-se  $Z_1 = Z_2 = 48,654 \angle 79,07^\circ \Omega$  e  $Z_0 = 134,761 \angle 74,84^\circ \Omega$ .

Cabe ressaltar que, ao realizar a análise de curto-circuito dessa forma as contribuições de carga não são consideradas. Sendo assim, as correntes calculadas são quantidades incrementais provenientes do circuito puro de falta. Portanto:

$$\Delta \hat{I}_0 = \Delta \hat{I}_1 = \Delta \hat{I}_2 = \frac{\hat{V}_1}{Z_1 + Z_2 + Z_0} = 572,585 \angle -76,61^\circ \text{ A}. \quad (6.6)$$

Dessa forma, a corrente incremental de sequência zero na Barra L  $\Delta \hat{I}_{0L}$ , ou seja, a contribuição de corrente de sequência zero devido a falta pela Fonte Local (FL) é dada por:

$$\Delta \hat{I}_{0L} = \left( \frac{Z_{LTADJ2,0} + Z_{FR,0}}{Z_{FL,0} + Z_{LTADJ1,0} + Z_{LT,0} + Z_{LTADJ2,0} + Z_{FR,0}} \right) \cdot \Delta \hat{I}_0, \quad (6.7)$$

Para os valores de impedâncias das LTs e equivalentes de Thévenin, obtém-se  $\Delta \hat{I}_{0L} = 74,600 \angle -76,62^\circ \text{ A}$ . Transformando do domínio de sequência para o domínio de fases, através

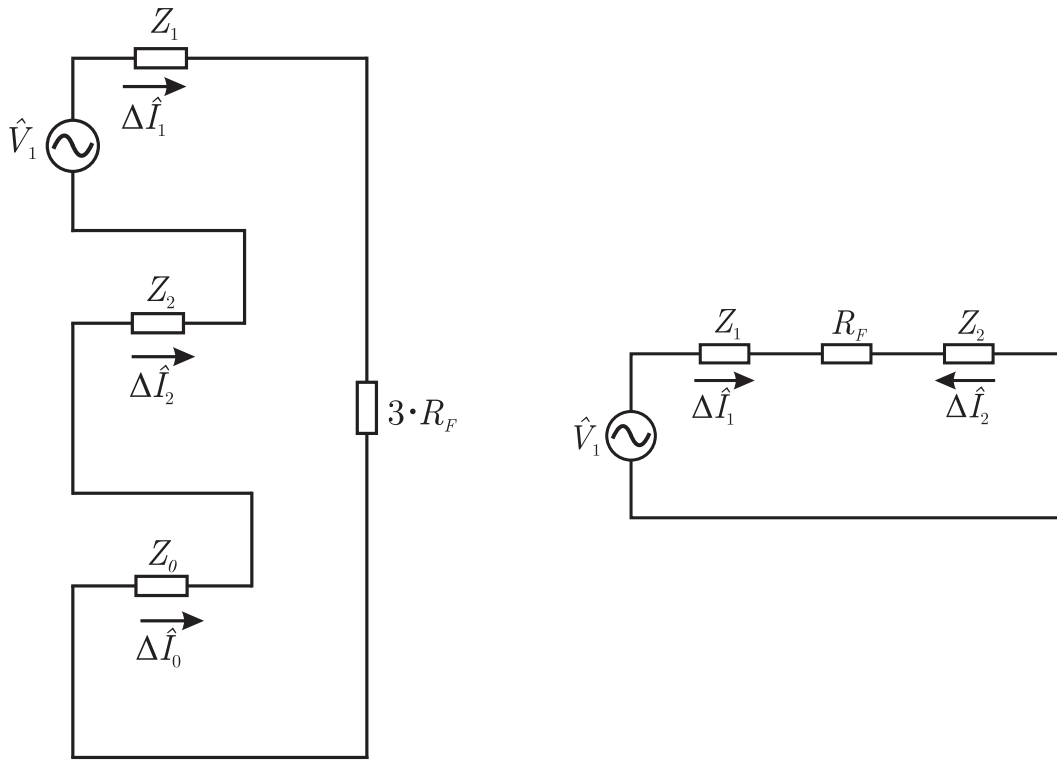
**Tabela 6.4.** Loops de tensão incremental e corrente réplica incremental no domínio fasorial.

Loop	Tensão Incremental $\Delta\hat{V}$	Corrente Réplica Incremental $\Delta\hat{I}_Z$
AT	$\Delta\hat{V}_A$	$\Delta\hat{I}_A \angle Z_{LT,1} - \Delta\hat{I}_0 \left(1 \angle Z_{LT,1} - \frac{ Z_{LT,0} }{ Z_{LT,1} } \angle Z_{LT,0}\right)$
BT	$\Delta\hat{V}_B$	$\Delta\hat{I}_B \angle Z_{LT,1} - \Delta\hat{I}_0 \left(1 \angle Z_{LT,1} - \frac{ Z_{LT,0} }{ Z_{LT,1} } \angle Z_{LT,0}\right)$
CT	$\Delta\hat{V}_C$	$\Delta\hat{I}_C \angle Z_{LT,1} - \Delta\hat{I}_0 \left(1 \angle Z_{LT,1} - \frac{ Z_{LT,0} }{ Z_{LT,1} } \angle Z_{LT,0}\right)$
AB	$\Delta\hat{V}_A - \Delta\hat{V}_B$	$\Delta\hat{I}_A \angle Z_{LT,1} - \Delta\hat{I}_B \angle Z_{LT,1}$
BC	$\Delta\hat{V}_B - \Delta\hat{V}_C$	$\Delta\hat{I}_B \angle Z_{LT,1} - \Delta\hat{I}_C \angle Z_{LT,1}$
CA	$\Delta\hat{V}_C - \Delta\hat{V}_A$	$\Delta\hat{I}_C \angle Z_{LT,1} - \Delta\hat{I}_A \angle Z_{LT,1}$

da matriz de transformação mostrada em (6.8), onde  $a = 1 \angle 120^\circ$  é um operador complexo, têm-se  $\Delta\hat{I}_{AL} = 3 \cdot \Delta\hat{I}_{0L} = 412,261 \angle -76,62^\circ$  A.

$$\begin{bmatrix} \Delta\hat{I}_{AL} \\ \Delta\hat{I}_{BL} \\ \Delta\hat{I}_{CL} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\hat{I}_{0L} \\ \Delta\hat{I}_{1L} \\ \Delta\hat{I}_{2L} \end{bmatrix}. \quad (6.8)$$

Portanto, utilizando a Tabela 6.4, pode-se calcular o módulo da corrente réplica incremental



(a)

(b)

**Figura 6.3.** Circuito de seqüência para uma: (a) falta AT (b) falta BC.

para o *loop* AT pela Fonte Local (FL)  $|\Delta\hat{I}_{ZAT,L}|$ , como sendo  $|\Delta\hat{I}_{ZAT,L}| = 655,033$  A.

$$|\Delta\hat{I}_{ZAT,L}| = \left| \Delta\hat{I}_{AL} \angle Z_{LT,1} - \Delta\hat{I}_{0L} \left( 1 \angle Z_{LT,1} - \frac{|Z_{LT,0}|}{|Z_{LT,1}|} \angle Z_{LT,0} \right) \right|. \quad (6.9)$$

Dessa forma, considera-se o ajuste *TP50G* como o valor de pico de  $|\Delta\hat{I}_{ZAT,L}|$ , ou seja:

$$TP50G = \sqrt{2} \cdot |\Delta\hat{I}_{ZAT,L}| = 926,356 \text{ A} \quad (6.10)$$

De forma semelhante, realiza-se o cálculo do ajuste *TP50P*, porém, aplica-se uma falta bifásica na Barra R, em que, por conveniência, optou-se por ser do tipo BC. Dessa forma, o circuito de sequência é montado conforme ilustrado na Figura 6.3(b), sendo:

$$\Delta\hat{I}_1 = \Delta\hat{I}_2 = \frac{\hat{V}_1}{Z_1 + Z_2} = 1,365 \angle -79,07^\circ \text{ kA}. \quad (6.11)$$

Sendo assim, a contribuição devido a falta por parte da FL, ou seja, a corrente incremental de sequência positiva que passa pelo relé da Barra L  $\Delta\hat{I}_{1L}$ , é dada por:

$$\Delta\hat{I}_{1L} = \left( \frac{Z_{LTADJ2,1} + Z_{FR,1}}{Z_{FL,1} + Z_{LTADJ1,1} + Z_{LT,1} + Z_{LTADJ2,1} + Z_{FR,1}} \right) \cdot \Delta\hat{I}_1, \quad (6.12)$$

de modo que para os valores de impedâncias de LTs e equivalentes de Thévenin do SEE avaliado, obtém-se:

$$\Delta\hat{I}_{1L} = 327,516 \angle -79,07^\circ \text{ A}.$$

Transformando do domínio de sequência para o domínio de fases por meio de (6.8), obtém-se:

$$\Delta\hat{I}_{BL} = 567,275 \angle -169,07^\circ \text{ A} \quad \text{e} \quad \Delta\hat{I}_{CL} = 567,275 \angle 10,92^\circ \text{ A}.$$

Dessa forma, utilizando a Tabela 6.4 para calcular o módulo da corrente réplica incremental do *loop* de falta BC que passa pela Barra L  $|\Delta\hat{I}_{ZBC,L}|$ , tem-se:

$$|\Delta\hat{I}_{ZBC,L}| = |\Delta\hat{I}_{BL} \angle Z_{LT,1} - \Delta\hat{I}_{CL} \angle Z_{LT,1}|, \quad (6.13)$$

resultando em:

$$|\Delta\hat{I}_{ZBC,L}| = 1,135 \text{ kA}.$$

Por fim, convertendo os valores de raiz do valor quadrático médio (do inglês *root mean square* RMS) do fasor para o valor de pico, tem-se:

$$TP50P = \sqrt{2} \cdot |\Delta\hat{I}_{ZBC,L}| = 1,605 \text{ kA}. \quad (6.14)$$

Na Tabela 6.5, apresenta-se um resumo com a descrição e valores dos ajustes de campo que foram utilizados nos testes realizados com a função TW87 aplicada em linhas híbridas. Sendo o ajuste  $\tau = \tau_a$  quando a linha híbrida monitorada é aproximada por uma LT aérea de igual comprimento e  $\tau = \tau_h$  quando se considera as particularidades da linha híbrida. Por fim, os ajustes *TP50G* e *TP50P* foram calculados para uma LT aérea, e será analisada a sensibilidade da OC87 quando a LT monitorada é na verdade uma linha híbrida.

No que se refere ao ajustes de fábrica, alguns foram encontrados na literatura, já outros não. São valores que os desenvolvedores da função TW87 não disponibilizam. Na implementação e nas análises realizadas nesta dissertação, utilizaram-se os valores apresentados na Tabela 6.6.

**Tabela 6.5.** Ajustes de campo das funções TW87 e OC87.

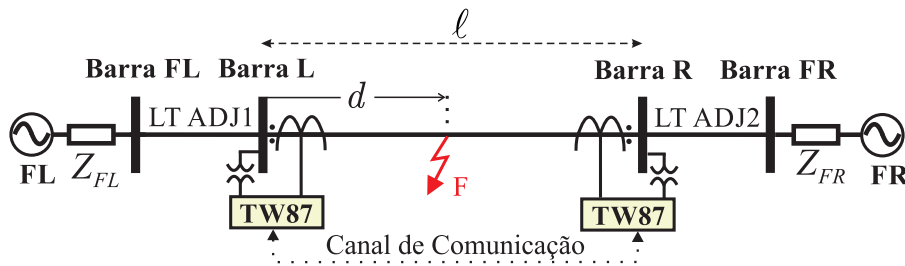
Ajuste	Descrição	Valor
$\tau$	Tempo de propagação das OVs	$\tau_a = 692, 289 \mu s$ ou $\tau_h$ dado por (6.2)
<i>TP50G</i>	<i>Pickup</i> para faltas monofásicas	926, 356 A
<i>TP50G</i>	<i>Pickup</i> para faltas bifásicas	1, 605 kA

**Tabela 6.6.** Ajustes de fábrica da função TW87.

Ajuste	Descrição	Valor
<b>TW87</b>		
<i>SLP</i>	Fator de restrição	0, 4; 0, 5; 0, 6 e 0, 7
$I_{min}$	Amplitude mínima de OV	100 A
$K_{OV}$	Fator de ajuste de sensibilidade	0,2
<b>OC87</b>		
<i>MS</i>	Margem de segurança	6,5%
<b>Starting Logic</b>		
$v_{START}$	Tensão mínima	5% de $V_{SYS} = 11,5$ kV
<i>MC</i>	Margem de confiabilidade	1, 1
$\Delta i_{min}$	Corrente incremental mínima	100 A
<b>Filtro DS</b>		
$T_{DS}$	Tamanho da janela de coeficientes (SEL, 2017)	20 $\mu s$
<i>D</i>	Ganho	$2/N_{DS}$

### 6.3 CASO 1: LINHA DE TRANSMISSÃO AÉREA

O primeiro caso analisado se trata da aplicação da função TW87 para proteger uma LT aérea. O objetivo desses testes é entender o comportamento das variáveis da função frente a uma situação para a qual foi projetada, de tal forma que em seguida sejam estabelecidas relações das consequências da troca da LT monitorada aérea por um linha híbrida composta por trechos aéreos e subterrâneos. Na Figura 6.4, ilustra-se o sistema teste que será analisado, onde o comprimento da LT  $\ell = 200$  km.



**Figura 6.4.** Sistema teste para uma LT totalmente aérea.

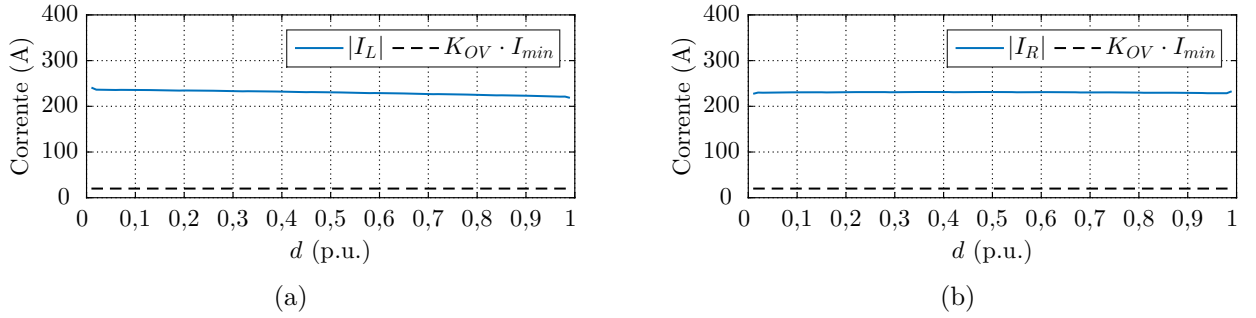
Sabe-se da Seção 3.5 que a amplitude da OV de corrente de modo  $\alpha$  lançada por uma falta monofásica franca com ângulo de incidência  $\theta = 90^\circ$  quando considerados os valores de impedância de surto do sistema teste analisado é estimada como sendo  $i_{OV} = 236,3226$  A. Portanto, na Tabela 6.7, ilustram-se os resultados para faltas externas na metade das LTs ADJ1 e ADJ2, concluindo-se que  $|I_L| \approx |I_R| \approx i_{OV}$ , valor esse superior ao ajuste  $K_{OV} \cdot I_{min} = 20$  A. No entanto,  $|I_{OP}|$  assume valores menores que  $I_{min} = 100$  A, o que bloqueia a Condição 1 da lógica da TW87 (ver Figura 4.7). Por outro lado,  $I_{RT} \approx 2 \cdot i_{OV}$ , que quando comparado ao  $|I_{OP}|$ , restringe a Condição 2 para  $SLP > 0,0165$ , o qual é maior. Por fim, a localização de falta estimada da função  $m_{87}$  não é interna à LT monitorada, bloqueando também a Condição 3 da lógica. Portanto, para ambos os casos de faltas externas analisados, a TW87 não atuaria, conforme esperado.

**Tabela 6.7.** Resultados para faltas externas na metade das LTs ADJ1 e ADJ2.

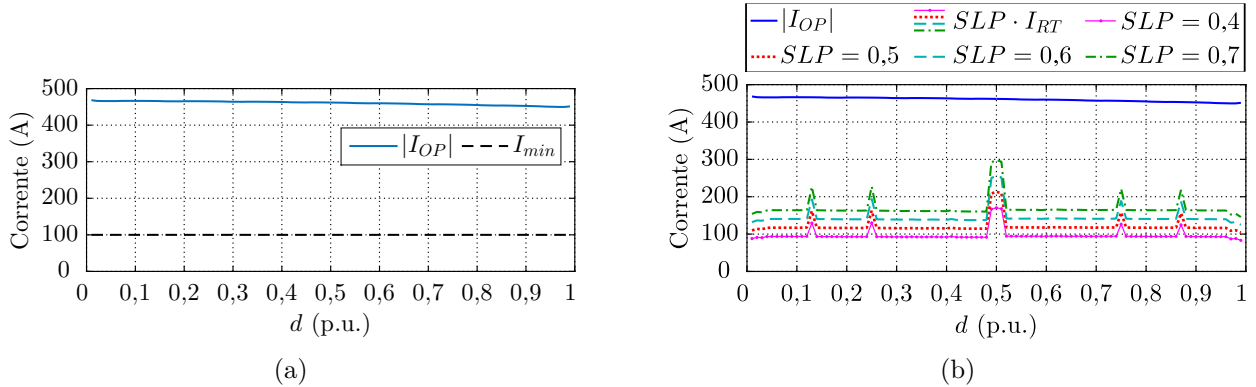
	$ I_L $ (A)	$ I_R $ (A)	$ I_{OP} $ (A)	$I_{RT}$ (A)	$m_{87}$ (p.u.)
LT ADJ1	236,6821	229,1954	7,4867	465,8775	-0,0014
LT ADJ2	215,9557	223,1987	7,2430	439,1543	1,0014



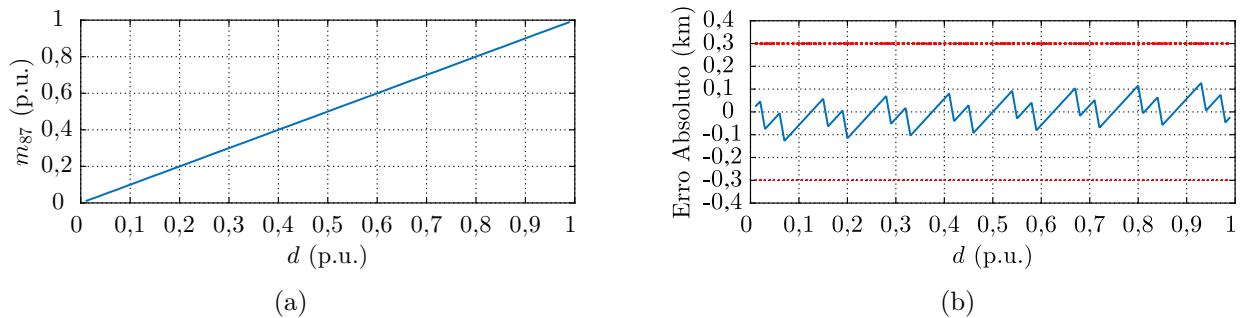
Para faltas internas, da Figura 6.5, percebe-se que  $|I_L| \approx |I_R| \approx i_{OV} > K_{OV} \cdot I_{min}$ , conforme esperado. Da Figura 6.6(a), tem-se que  $|I_{OP}| \approx 2 \cdot i_{OV} > I_{min}$ , conforme esperado, e da Figura 6.6(b), conclui-se que  $|I_{OP}| > SLP \cdot I_{RT}$  para os valores de  $SLP$  analisados. Observam-se também picos em  $I_{RT}$  em  $d = 0,125, 0,25, 0,5, 0,75$  e  $0,875$  p.u., fato que se deve a reflexões nas Barras FL e FR que coincidentemente caem na janela de busca da função. Ainda assim,  $SLP \cdot I_{RT}$  não supera  $|I_{OP}|$ , para os valores de  $SLP$  analisados. Por fim, da Figura 6.7, tem-se que  $0 < m_{87} < 1$  p.u., conforme esperado, e os erros absolutos em  $m_{87}$  se mantêm dentro da faixa esperada para os métodos de dois terminais baseados na teoria de OV's com  $f_S = 1$  MHz, que é  $\approx 300$  m (SCHWEITZER *et al.*, 2014). Portanto, todas as condições da lógica da função são satisfeitas, e a TW87 operaria para todas as faltas internas analisadas, conforme esperado.



**Figura 6.5.** Caso 1: LT Aérea - Faltas internas - Condição 1: (a)  $|I_L|$  (b)  $|I_R|$ .



**Figura 6.6.** Caso 1: LT Aérea - Faltas internas - Condições 1 e 2: (a)  $|I_{OP}|$  (b)  $|I_{OP}|$  e  $SLP \cdot I_{RT}$ .



**Figura 6.7.** Caso 1: LT Aérea - Faltas internas - Condição 3: (a)  $m_{87}$  (b) Erro Absoluto.

## 6.4 CASO 2: LINHA HÍBRIDA COM DOIS TRECHOS

Neste caso, analisa-se o desempenho da TW87 ao substituir uma parte da LT aérea analisada no Caso 1 por um trecho subterrâneo, e ainda quando se acrescenta um trecho subterrâneo à referida LT aérea. Dessa forma, tem-se que ao substituir parte da LT aérea por um trecho subterrâneo, o comprimento total  $\ell = 200$  km, fixo, e o trecho subterrâneo será complementar ao trecho aéreo, ou seja, à medida que o comprimento do trecho subterrâneo  $\ell_S$  aumenta, o comprimento do trecho aéreo  $\ell_A$  diminui, caso esse definido como Caso 2.1. Por outro lado, ao acrescentar um trecho subterrâneo à LT aérea,  $\ell_A = 200$  km, fixo, e o trecho subterrâneo será um adicional, ou seja, à medida que  $\ell_S$  aumenta,  $\ell$  também aumenta, definindo-se assim o Caso 2.2. Portanto, apresenta-se na Figura 6.8 o sistema teste para ambas as possibilidades.

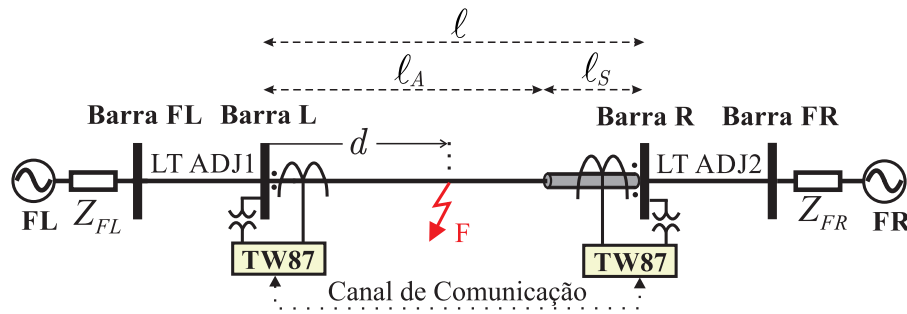
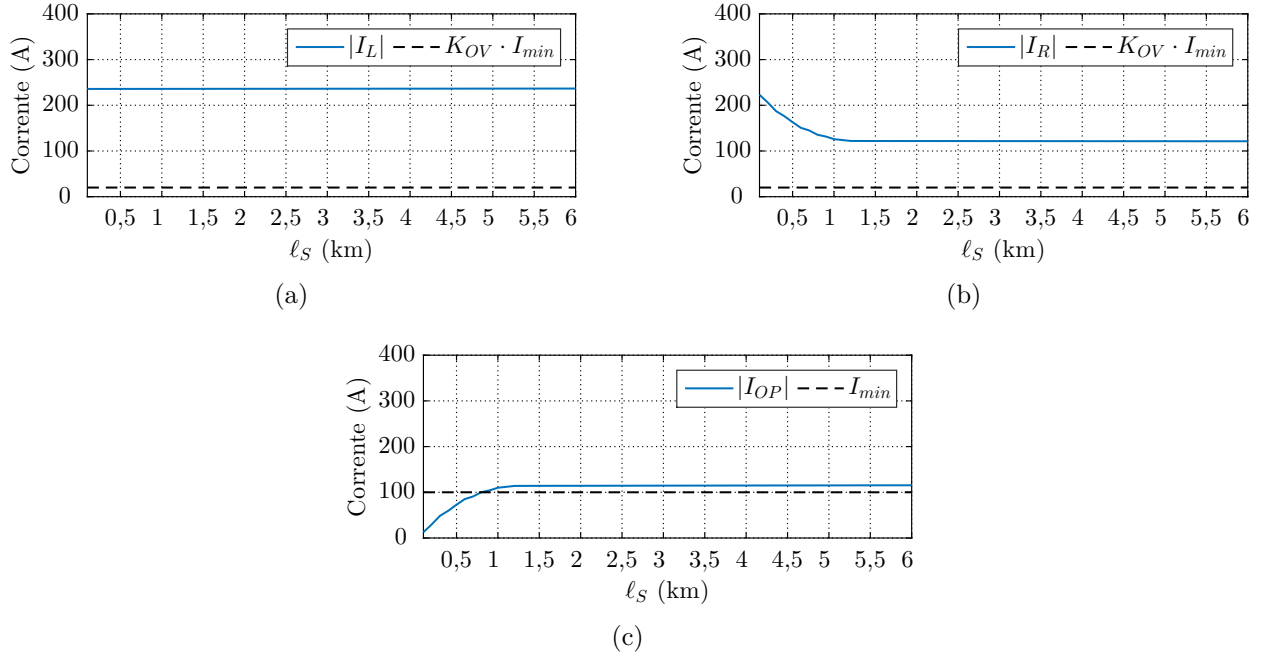


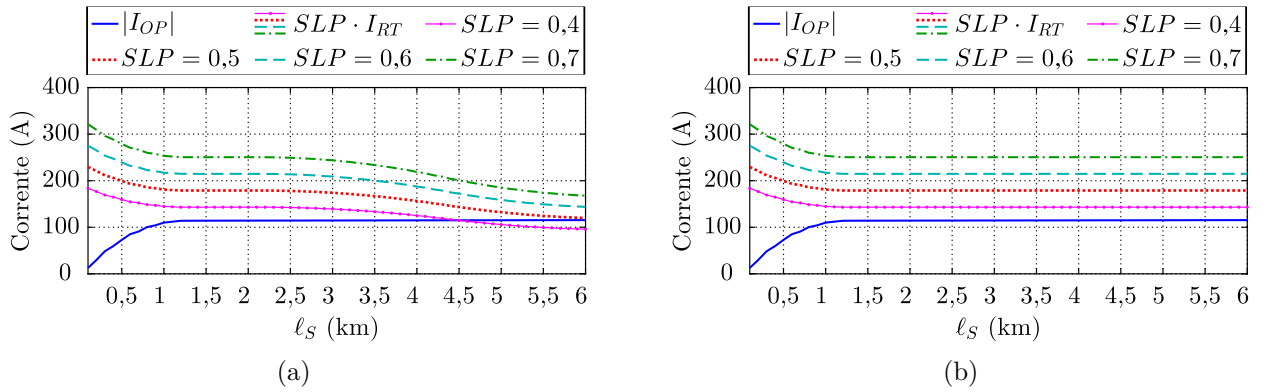
Figura 6.8. Sistema teste para uma linha híbrida composta por dois trechos.

### 6.4.1 Caso 2.1: Comprimento Total Fixo e Trecho Subterrâneo Complementar

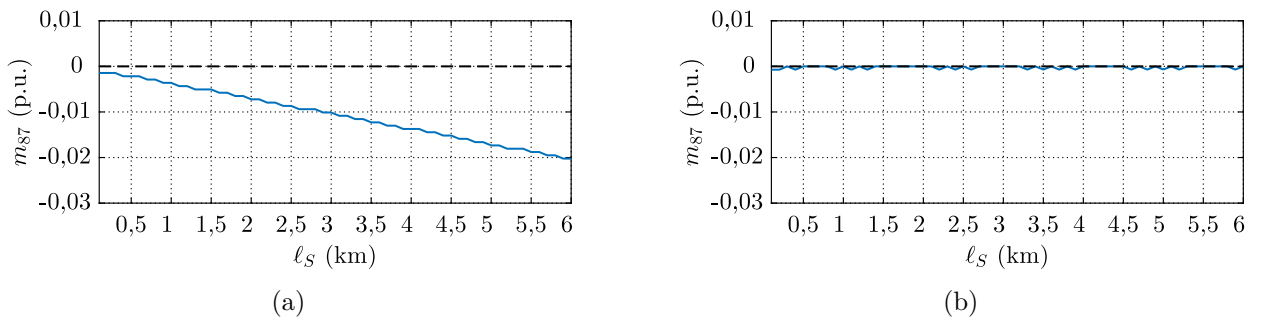
Para faltas externas na metade da LT ADJ1, da Figura 6.9, tem-se que  $|I_L| \approx i_{OV}$ , que  $|I_R|$  tem uma variação até  $\ell_S = 1$  km decorrente de uma segunda reflexão no trecho subterrâneo que cai dentro da janela de cálculo da amplitude da OV, mas se estabiliza em  $\approx 0,51 \cdot i_{OV}$ . Ainda assim, para todos os valores de  $\ell_S$ ,  $I_L$  e  $I_R$  são maiores em módulo que  $K_{OV} \cdot I_{min}$ . Da Figura 6.9(c), tem-se que  $|I_{OP}|$  varia até  $\ell_S = 1$  km, novamente devido a uma segunda reflexão no trecho subterrâneo, até estabilizar em  $\approx 0,49 \cdot i_{OV}$ . Devido à alteração de amplitude das OVs na descontinuidade entre trechos, cria-se uma diferença entre as OVs de corrente em cada terminal, e assim, tem-se  $|I_{OP}| > I_{min}$  para  $\ell_S > 0,7$  km, satisfazendo a Condição 1 para esses valores de comprimento de trecho subterrâneo. Como as variáveis da Condição 1  $I_L$ ,  $I_R$  e  $I_{OP}$  não dependem do ajuste  $\tau$ , (ver Seção 4.4), os resultados são iguais tanto para  $\tau = \tau_a$  e  $\tau = \tau_h$ .



**Figura 6.9.** Caso 2.1: Linha Híbrida com Dois Trechos - Comprimento Total Fixo e Trecho Subterrâneo Complementar - Falta externa na metade da LT ADJ1 - Condição 1: (a)  $|I_L|$  (b)  $|I_R|$  (c)  $|I_{OP}|$ .

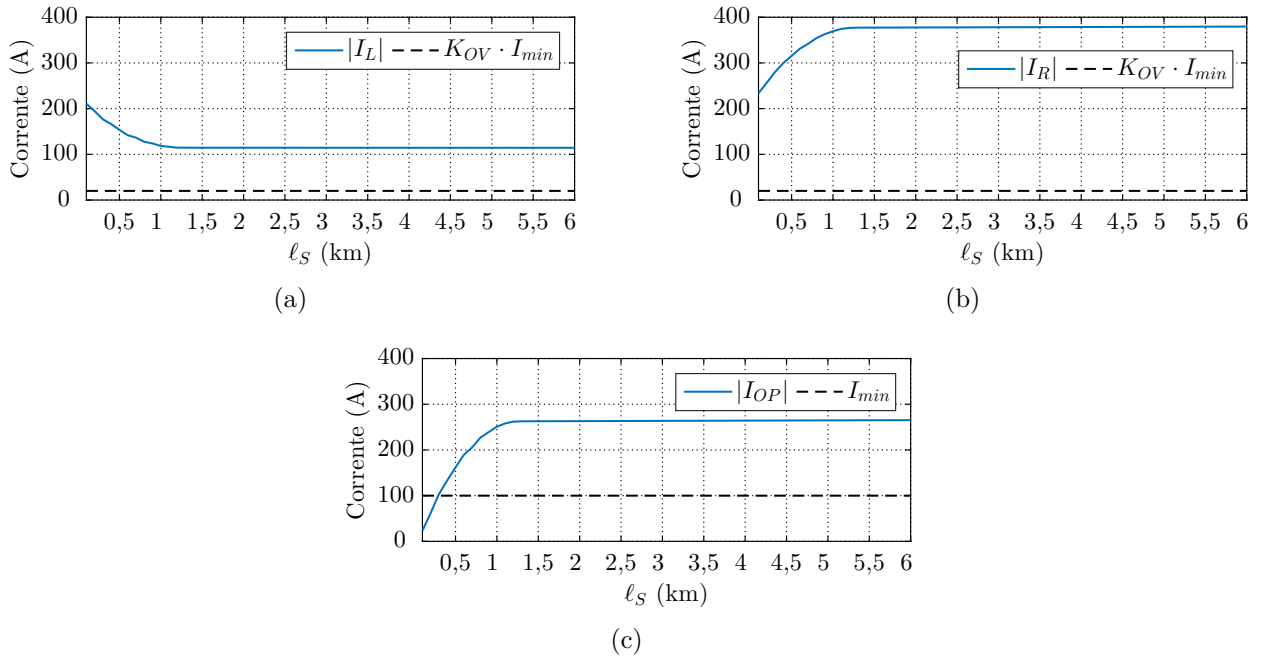


**Figura 6.10.** Caso 2.1: Linha Híbrida com Dois Trechos - Comprimento Total Fixo e Trecho Subterrâneo Complementar - Falta externa na metade da LT ADJ1 - Condição 2:  $|I_{OP}|$  e  $SLP \cdot I_{RT}$  para (a)  $\tau = \tau_a$ . (b)  $\tau = \tau_h$ .

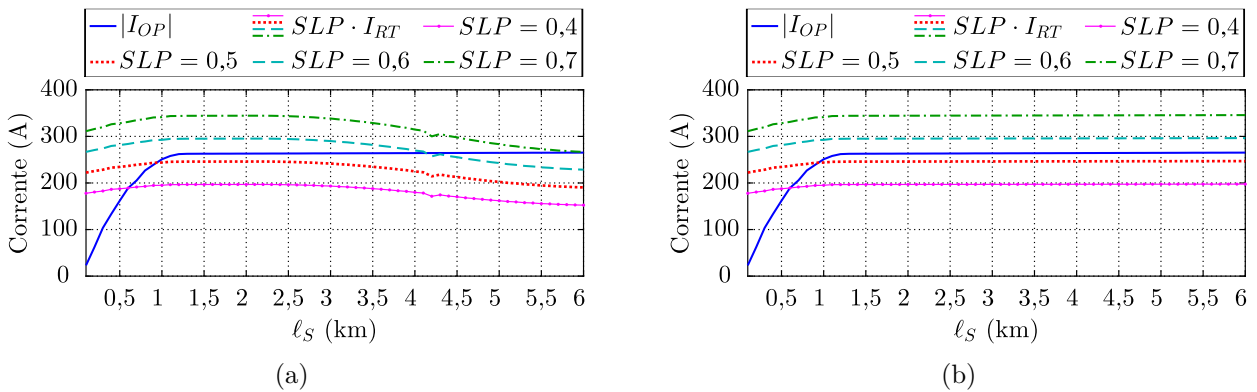


**Figura 6.11.** Caso 2.1: Linha Híbrida com Dois Trechos - Comprimento Total Fixo e Trecho Subterrâneo Complementar - Falta externa na metade da LT ADJ1 - Condição 3:  $m_{87}$  para (a)  $\tau = \tau_a$ . (b)  $\tau = \tau_h$ .

Da Figura 6.10, para  $\tau = \tau_a$ , conclui-se que  $|I_{OP}| > SLP \cdot I_{RT}$  somente quando  $SLP = 0,4$  e  $\ell_S > 4,5$  km. Sendo assim, para esses casos, a Condição 2 da TW87 seria satisfeita para esses valores de comprimento de trecho subterrâneo. O  $|I_{OP}|$  supera o produto  $SLP \cdot I_{RT}$  devido ao valor do  $SLP = 0,4$  ser relativamente baixo, mas além disso, devido ao fato de que o ajuste  $\tau$  inserido foi para o caso de uma LT monitorada aérea, à medida que  $\ell_S$  aumenta, a diferença  $\kappa$  aumenta e o cálculo do  $I_{RT}$  fica comprometido, tendendo a diminuir seu valor, conforme ilustrado na Figura 5.2 do Capítulo 5. De fato, ao perder a OV de saída, resta apenas



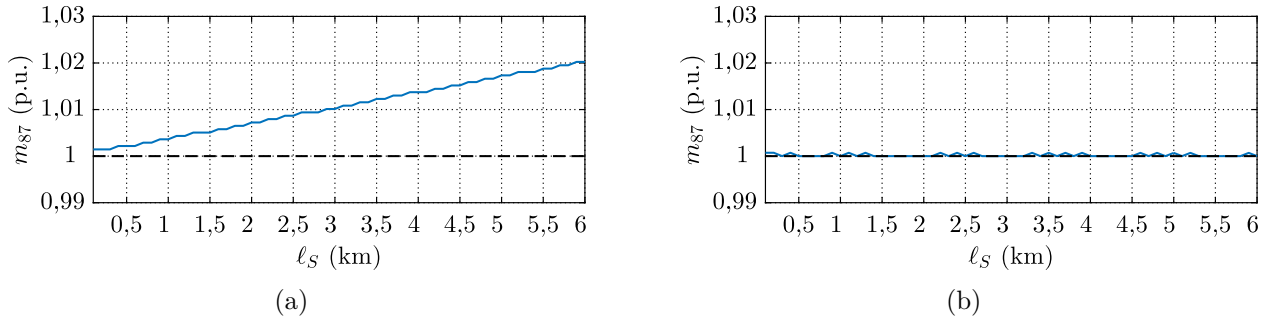
**Figura 6.12.** Caso 2.1: Linha Híbrida com Dois Trechos - Comprimento Total Fixo e Trecho Subterrâneo Complementar - Falta externa na metade da LT ADJ2 - Condição 1: (a)  $|I_L|$  (b)  $|I_R|$  (c)  $|I_{OP}|$ .



**Figura 6.13.** Caso 2.1: Linha Híbrida com Dois Trechos - Comprimento Total Fixo e Trecho Subterrâneo Complementar - Falta externa na metade da LT ADJ2 - Condição 2:  $|I_{OP}|$  e  $SLP \cdot I_{RT}$  para (a)  $\tau = \tau_a$  (b)  $\tau = \tau_h$ .

a amplitude da primeira OV incidente no valor de  $I_{RT}$ . Por outro lado, para  $\tau = \tau_h$ , tem-se que  $\kappa \approx 0 \mu s$ , não sendo perdida a OV de saída. Portanto, para os casos analisados ilustrados na Figura 6.10(b), a Condição 2 da lógica da TW87 não seria satisfeita para os valores de  $SLP$  considerados. Por fim, da Figura 6.11, conclui-se que a Condição 3 não é satisfeita, mesmo ajustando a  $\tau = \tau_a$ , conforme esperado, conforme exposto na Seção 5.1.2. Portanto, quando a TW87 é ajustada ignorando o trecho subterrâneo, a Condição 1 é satisfeita indevidamente para  $\ell_S > 0,7$  km e a Condição 2 é satisfeita indevidamente para  $SLP = 0,4$  e  $\ell_S > 4,5$  km.

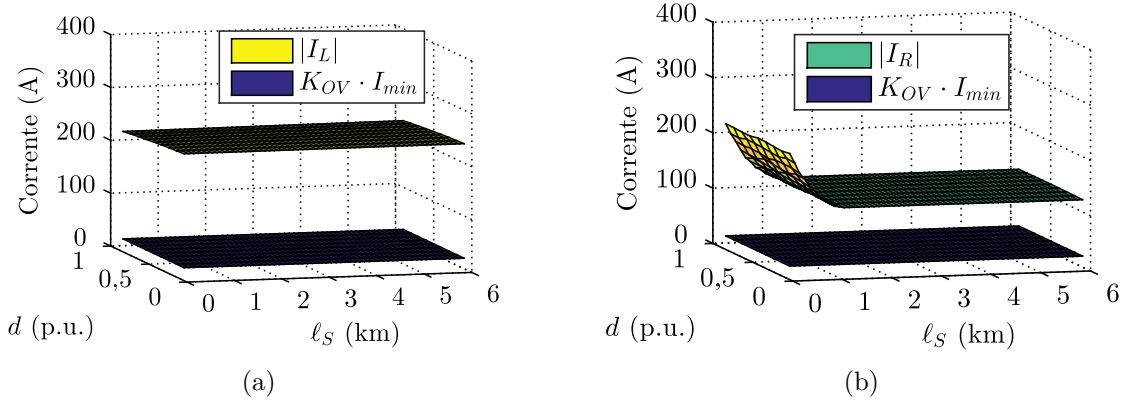
Para faltas externas na metade da LT ADJ2, da Figura 6.12(a), percebe-se que  $|I_L|$  assume valores que entre 200 A e 115 A para  $\ell_S < 1$  km. Isso ocorre porque há uma segunda reflexão no trecho subterrâneo, e para  $\ell_S > 1$  km,  $|I_L| \approx 0,49 \cdot i_{OV}$ , conforme esperado, proporção esta referente ao produto dos coeficientes de transmissão entre os trechos aéreo-subterrâneo e subterrâneo-aéreo, pois existem duas descontinuidades do ponto em que ocorre a falta até a medição na Barra L. Por outro lado, na Barra R, da Figura 6.12(b), percebe-se que, similar a  $|I_L|$ ,  $|I_R|$  varia no primeiro quilômetro de  $\ell_S$  pelas mesmas razões citadas anteriormente, até se estabilizar em uma valor 61% maior que  $i_{OV}$ , o que é esperado, pois a OV medida nessa barra é dada pela soma das OVs incidente e refletida. Dessa forma, conclui-se que para todos os valores de  $\ell_S$ , o  $|I_L|$  e  $|I_R|$  são maiores que  $K_{OV} \cdot I_{min}$ . Da Figura 6.12(c), nota-se que ocorre uma variação em  $|I_{OP}|$  até  $\ell_S = 1$  km, devido novamente a uma segunda reflexão no trecho subterrâneo, porém após esse primeiro quilômetro  $|I_{OP}| \approx 1,12 \cdot i_{OV}$ , conforme esperado, tendo para  $\ell_S > 0,25$  km,  $I_{OP} > I_{min}$ , o que satisfaz a Condição 1 da lógica da TW87 para esses valores de  $\ell_S$ . Da Figura 6.13(a), quando o ajuste  $\tau = \tau_a$ , percebe-se que a Condição 2 seria satisfeita para  $SLP = 0,4, 0,5$  e  $0,6$  quando  $\ell_S > 0,6, 0,8$  e  $4$  km, respectivamente. Tal fato é decorrente da parametrização do ajuste  $\tau$  aproximando a linha híbrida por uma LT aérea de igual comprimento e das alterações de amplitude das OVs nas descontinuidades entre trechos. Por outro lado, embora para  $SLP = 0,7$  a Condição 2 não seja satisfeita, ressalta-se que para tal valor de  $SLP$ , elevado se comparado aos demais, pode ser diminuída a sensibilidade da TW87 em alguns casos de faltas internas. Para  $\tau = \tau_h$ , não se perderia a informação da OV de saída, porém ainda assim, devido às alterações de amplitude das OVs nas descontinuidades ao longo da linha híbrida, a Condição 2 seria satisfeita para valores de  $SLP = 0,4$  e  $0,5$  quando  $\ell_S > 0,6$  e  $0,8$  km.



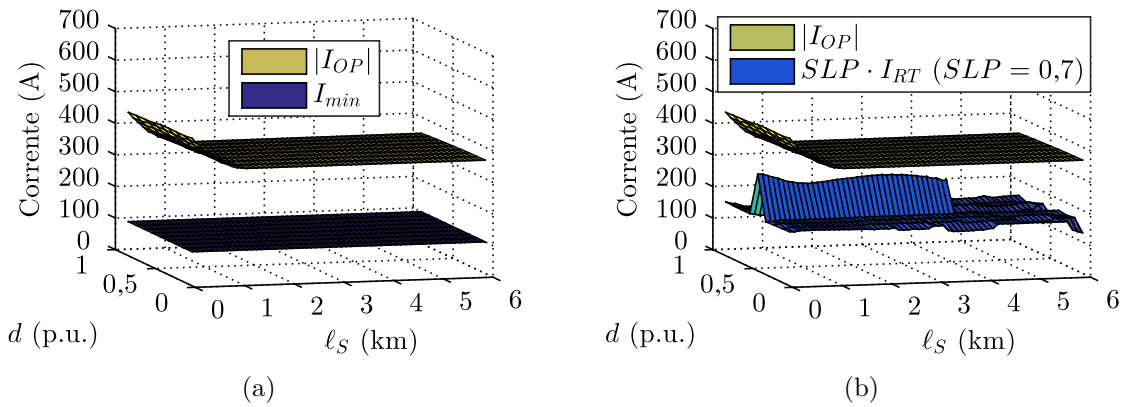
**Figura 6.14.** Caso 2.1: Linha Híbrida com Dois Trechos - Comprimento Total Fixo e Trecho Subterrâneo Complementar - Falta externa na metade da LT ADJ2 - Condição 3:  $m_{87}$  para (a)  $\tau = \tau_a$  (b)  $\tau = \tau_h$ .

Da Figura 6.14, nota-se que para  $\tau = \tau_a$ ,  $m_{87}$  apresenta erros em relação aos valores esperado de 1 p.u. para esse caso. Porém, esses erros não resultam em estimativas de falta dentro da LT monitorada. Ademais, para  $\tau = \tau_h$ ,  $m_{87} \approx 1$  p.u.. Portanto, para ambas situações de ajustes  $\tau$ , a Condição 3 não seria satisfeita, impedindo atuações indevidas da TW87.

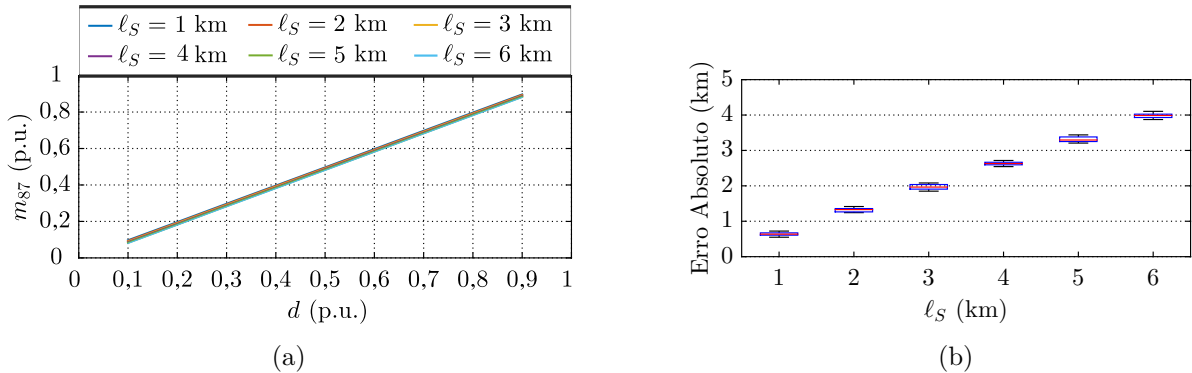
Para faltas internas no trecho aéreo da LT monitorada, sendo  $d$  (p.u.) dado por  $d/\ell$ , pois neste caso  $\ell$  é fixo, da Figura 6.15(a), percebe-se que para os casos de falta interna avaliados, em todos os valores de  $d$  e  $\ell_S$  considerados,  $|I_L| \approx i_{OV}$ , conforme esperado, pois não há descontinuidade entre os pontos de falta e a Barra L. Dessa forma,  $|I_L| > K_{OV} \cdot I_{min}$  para todos os casos. Da Figura 6.15(b), nota-se que ocorre também uma variação em  $|I_R|$  no quilômetro subterrâneo inicial até se estabilizar 52% de  $i_{OV}$ , conforme esperado, devido à atenuação na junção entre os trechos aéreo e subterrâneo. Porém, para todos os casos  $|I_R| > K_{OV} \cdot I_{min}$ . Ainda, da Figura 6.16(a), nota-se que  $|I_{OP}| \approx 1,52 \cdot i_{OV}$ , conforme esperado, sendo  $|I_{OP}| > I_{min}$ . Portanto, diante dessas três análises, conclui-se que para os casos avaliados a Condição 1 da Lógica da TW87 seria satisfeita. Da Figura 6.16(b), percebe-se que em todos os casos avaliados, ainda que configurada com  $SLP = 0,7$  e o ajuste  $\tau$  calculado ignorando o trecho subterrâneo, tem-se  $I_{OP} > SLP \cdot I_{RT}$ , satisfazendo a Condição 2 da lógica da função TW87. De fato, para faltas internas, não se espera ou se depende de uma OV de saída para o cálculo de  $I_{RT}$ . Como as polaridades das OVs incidentes são iguais, isso já faz com que o  $|I_{OP}|$  assumira valores consideráveis, de tal forma a serem superiores a  $SLP \cdot I_{RT}$ . Um detalhe é que em  $d = 0,5$  p.u. uma OV que reflete nas descontinuidades atrás do relé, Barras Fonte Local (Barra FL) e Fonte Remota (Barra FR), cai coincidentemente na janela de busca, aumentando assim o valor de  $I_{RT}$  para esses casos. Ainda assim, a Condição 2 continua sendo satisfeita.



**Figura 6.15.** Caso 2.1: Linha Híbrida com Dois Trechos - Comprimento Total Fixo e Trecho Subterrâneo Complementar - Falta interna no trecho aéreo - Condição 1: (a)  $I_L$ . (b)  $I_R$ .



**Figura 6.16.** Caso 2.1: Linha Híbrida com Dois Trechos - Comprimento Total Fixo e Trecho Subterrâneo Complementar - Falta interna no trecho aéreo - Condições 1 e 2: (a)  $I_{OP}$ . (b)  $SLP \cdot I_{RT}$  para  $\tau = \tau_a$ .



**Figura 6.17.** Caso 2.1: Linha Híbrida com Dois Trechos - Comprimento Total Fixo e Trecho Subterrâneo Complementar - Falta interna - Condição 3: (a)  $m_{87}$  (b) Erro Absoluto.

Por fim, da Figura 6.17(a), nota-se uma sobreposição visual de  $m_{87}$  para os valores de  $\ell_S$  representados. Além disso, conclui-se que para  $0,1 < d < 0,9$  p.u., tem-se  $0,1 < m_{87} < 0,9$  p.u., satisfazendo assim a Condição 3 da TW87 para os casos analisados. Da Figura 6.17(b), percebe-se que os erros absolutos em  $m_{87}$  crescem com o aumento de  $\ell_S$ , conforme esperado. No entanto, para intervalo de  $d$  avaliado, os erros observados em  $m_{87}$  não são significativos a

ponto de bloquear a atuação da função, embora as localizações das faltas não correspondam exatamente às distâncias de falta reais.

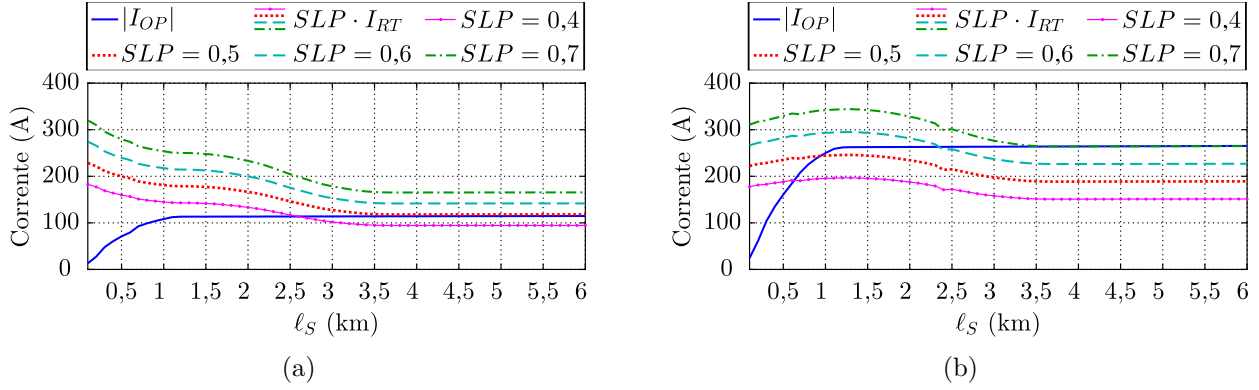
#### 6.4.2 Caso 2.2: Comprimento Total Variável e Trecho Subterrâneo Adicional

Este caso é similar ao Caso 2.1, porém em vez de substituir por um trecho subterrâneo uma parte da LT aérea analisada na Seção 6.3, aqui se é acrescentado um trecho subterrâneo à LT aérea. Dessa forma, do sistema teste representado na Figura 6.8, tem-se  $\ell_A = 200$  km,  $0,1 < \ell_S < 6$  km, e  $\ell = \ell_A + \ell_S$ . É possível notar que as alterações de amplitudes ao longo da linha híbrida neste caso são iguais ao Caso 2.1. Portanto, as análises de  $|I_R|$ ,  $|I_L|$  e  $|I_{OP}|$  realizadas anteriormente podem ser repetidas para este caso e, por essa razão, não são aqui explicadas novamente, tomando-se a Condição 1 como satisfeita para as mesmas condições de comprimento de trecho subterrâneo, ou seja, para faltas na LT ADJ1 quando  $\ell_S > 0,7$  km e para faltas na LT ADJ 2 quando  $\ell_S > 0,3$  km. O que muda entre os Casos 2.1 e 2.2 é que  $\kappa$ , que é a diferença entre o ajuste  $\tau$  ignorando o trecho aéreo  $\tau_a$  e considerando as particularidades da linha híbrida  $\tau_h$ , aumenta mais rapidamente no Caso 2.2 do que no Caso 2.1 para um acréscimo de  $\ell_S$ , conforme foi explicado e ilustrado na Figura 5.1. Dessa forma, a OV de saída tende a ser perdida, e consequentemente, o cálculo de  $I_{RT}$  fica comprometido para valores menores de comprimento do trecho subterrâneo.

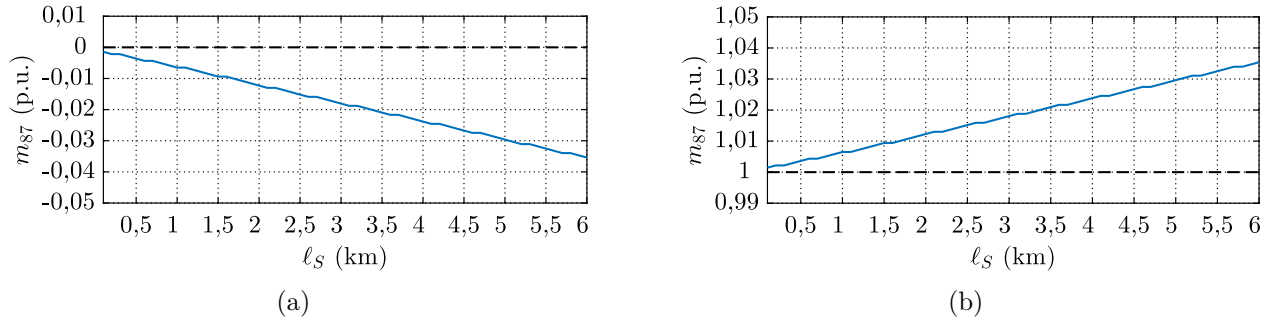
Nas Figuras 6.18 e 6.19 são apresentados os valores de  $|I_{OP}|$  e  $SLP \cdot I_{RT}$  para diferentes  $SLP$ , além dos resultados de  $m_{87}$  para casos de falta externa nas LTs ADJ1 e ADJ2, usando  $\tau = \tau_a$ , haja vista que, para  $\tau = \tau_h$  os resultados são iguais aos das Figuras 6.10(b), 6.13(b), 6.11(b) e 6.14(b), respectivamente. Da Figura 6.18(a), observa-se que em  $|I_{OP}| > SLP \cdot I_{RT}$  para  $SLP = 0,4$  e  $\ell_S > 2,5$  km, a Condição 2 seria satisfeita indevidamente. Por outro lado, para uma falta externa na LT ADJ2, Figura 6.18(b), a Condição 2 seria satisfeita quando  $\ell_S \approx 0,6, 0,8, 2,5$  e  $3,5$  km para ajustes de  $SLP$  de  $0,4, 0,5, 0,6$  e  $0,7$ , respectivamente. Tais fatos são decorrentes das alterações das OVs nas discontinuidades ao longo da linha híbrida e da perda da OV de saída devido à parametrização do ajuste  $\tau = \tau_a$ .

Da Figura 6.19, percebe-se que os erros em  $m_{87}$  são maiores do que os apresentados no Caso 2.1 (ver Figuras 6.11(a) e 6.14(a)). Tal fato decorre de que no Caso 2.2 o valor de  $\kappa$ , referente





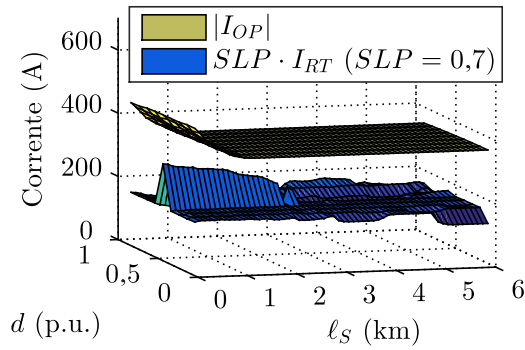
**Figura 6.18.** Caso 2.2: Linha Híbrida com Dois Trechos - Comprimento Total Variável e Trecho subterrâneo Adicional - Condição 2 -  $I_{OP}$  e  $SLP \cdot I_{RT}$  - Falta externa na metade da: (a) LT ADJ1 (b) LT ADJ2.



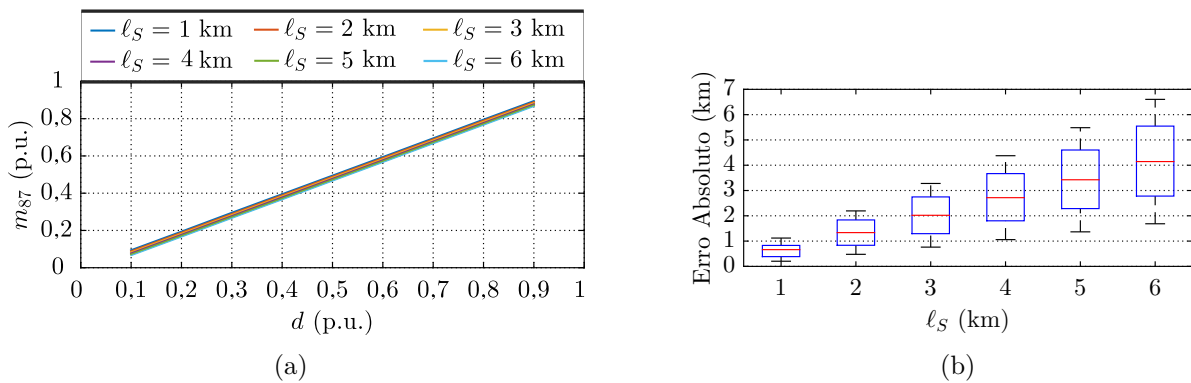
**Figura 6.19.** Caso 2.2: Linha Híbrida com Dois Trechos - Comprimento Total Variável e Trecho subterrâneo Adicional - Condição 3 -  $m_{87}$  para  $\tau = \tau_a$  - Falta externa na metade da: (a) LT ADJ1 (b) LT ADJ2.

a diferença entre  $\tau_h$  e  $\tau_a$  tem uma maior proporcionalidade ao  $\ell_S$  do que no Caso 2.1, conforme ilustrado na Figura 5.1. Ainda assim, conforme esperado, os erros em  $m_{87}$  não são significativos a ponto de transformar os resultados em localizações internas à LT monitorada, e dessa forma, a Condição 3 novamente é bloqueada.

Para faltas internas, os resultados são apresentados nas Figuras 6.20 e 6.21, em que  $|I_{OP}|$  e  $SLP \cdot I_{RT}$  estão em função de  $\ell_S$  e  $d$  (p.u), sendo  $0,1 < d < 0,9$  p.u e calculado como  $d/\ell_A$ , visto que neste caso  $\ell_A$  é fixo. Além disso, são apresentados os erros absolutos de  $m_{87}$  na forma de *boxplot*. Os resultados para  $|I_L|$ ,  $|I_R|$  e  $|I_{OP}|$  são iguais aos apresentados nas Figuras 6.15 e 6.16(a) do Caso 2.1, e por essa razão, não serão analisados aqui novamente, sendo a Condição 1 dada como satisfeita. Da Figura 6.20, percebe-se que em todos os casos simulados de faltas internas no trecho aéreo, a Condição 2 da lógica da TW87 seria satisfeita. Cabe ressaltar que, embora a TW87 tenha sido ajustada ignorando o trecho subterrâneo e o  $SLP = 0,7$ , de acordo com os resultados, a função ainda assim atuaria corretamente. Um detalhe é o aumento



**Figura 6.20.** Caso 2.2: Linha Híbrida com Dois Trechos - Comprimento Total Variável e Trecho Subterrâneo Complementar - Falta interna no trecho aéreo - Condição 2:  $I_{OP}$  e  $SLP \cdot I_{RT}$  para  $\tau = \tau_a$ .



**Figura 6.21.** Caso 2.2: Linha Híbrida com Dois Trechos - Comprimento Total Variável e Trecho Subterrâneo Complementar - Falta interna no trecho aéreo - Condição 3 para  $\tau = \tau_a$ : (a)  $m_{87}$  (b) Erro Absoluto.

de  $I_{RT}$  em  $d = 0,5$  p.u. e  $0 < \ell_S < 2$  km devido a OV's que refletem nas Barras FL e FR coincidentemente caem dentro da janela de busca. Por fim, da Figura 6.21(a), nota-se que para o intervalo de  $d$  analisado, a  $m_{87}$  se mantém dentro da LT monitorada, ou seja, os erros que são observados na Figura 6.21(b) não são significativos a ponto de bloquear a função. Conclui-se também que os erros absolutos em  $m_{87}$  crescem com o aumento de  $\ell_S$ , atingindo valores próximos aos esperados nas análises realizadas na Seção 5.1.2 (ver Figura 5.5(b)), sendo que neste caso os erros absolutos apresentam uma maior dispersão decorrente da variação de  $\ell$ .

## 6.5 AVALIAÇÃO DAS CAS PARA OS CASOS 1 E 2

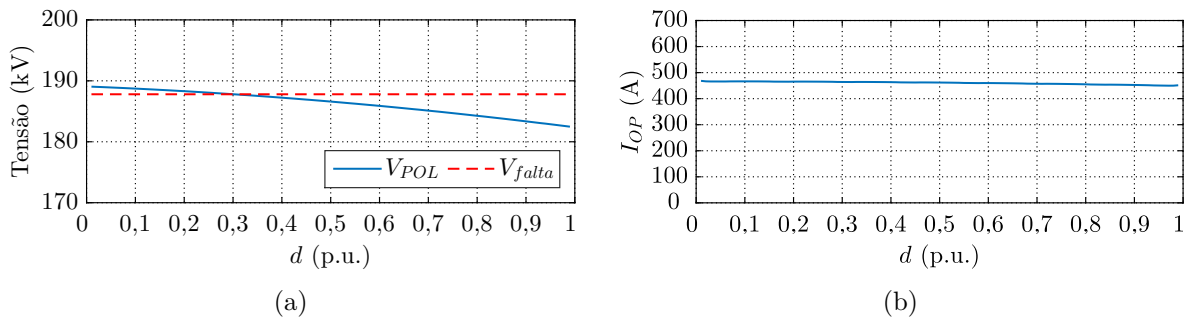
No que se refere ao desempenho das condições adicionais de segurança da TW87 quando a função é aplicada em linhas híbridas, dos resultados obtidos, percebe-se uma robustez da função ainda que parametrizada aproximando a linha híbrida por uma LT aérea de igual comprimento.

Para a supervisão VPOL, da Seção 4.5, percebe-se que para faltas internas no circuito monitorado é esperado que os sinais de  $V_{POL}$  e  $I_{OP}$  sejam iguais, já para faltas externas ou em um circuito em paralelo,  $V_{POL}$  e  $I_{OP}$  possuem sinais contrários. Porém, da implementação de  $V_{POL}$ , (4.14), percebe-se que há uma dependência no cálculo da variável com a localização de faltas estimada da TW87  $m_{87}$ . Dessa forma, erros em  $m_{87}$ , como os que são esperados em linhas híbridas (PIRES *et al.*, 2016), podem vir a repercutir no cálculo de  $V_{POL}$ , podendo chegar a bloquear a TW87 para casos de faltas internas.

Calcula-se como expectativa do valor da amplitude da tensão de operação um instante anterior a ocorrência da falta  $V_{falta}$  utilizando (3.61) da Seção 3.5, sendo um valor proporcional à tensão nominal  $V_{SYS}$  do SEE e ao ângulo de incidência  $\theta$ . Portanto, para o sistema teste em análise em que  $V_{SYS} = 230$  kV, e sendo as faltas simuladas do tipo AT com  $\theta = 90^\circ$ , tem-se  $V_{falta} = 187,7942$  kV, sendo esse o valor de tensão esperado como resultado do cálculo de  $V_{POL}$  pela função TW87.

Para o Caso 1, em que se tem uma LT monitorada aérea, a estimativa  $V_{POL}$  é aproximadamente igual a  $V_{falta}$ , conforme esperado, pois para essa situação, os erros absolutos em  $m_{87}$  são inferiores a 300 m, conforme ilustrado na Figura 6.7. Dessa forma, a função consegue estimar  $V_{POL}$  mantendo a informação do sinal de acordo com o esperado, sendo igual ao  $I_{OP}$  para os casos analisados. Assim, a supervisão VPOL é satisfeita para todas as faltas internas analisadas, não bloqueando a TW87 para esses casos.

Da mesma forma, nas Figuras 6.23 e 6.24 são apresentados os resultados de  $V_{POL}$  e  $I_{OP}$  para os Casos 2.1 e 2.2, quando o comprimento total é fixo e o trecho subterrâneo é complementar, e quando o comprimento total é variável e o trecho subterrâneo adicional, respectivamente. Sendo que, nos testes de VPOL  $\tau = \tau_a$ . Dos resultados, percebe-se que embora a função

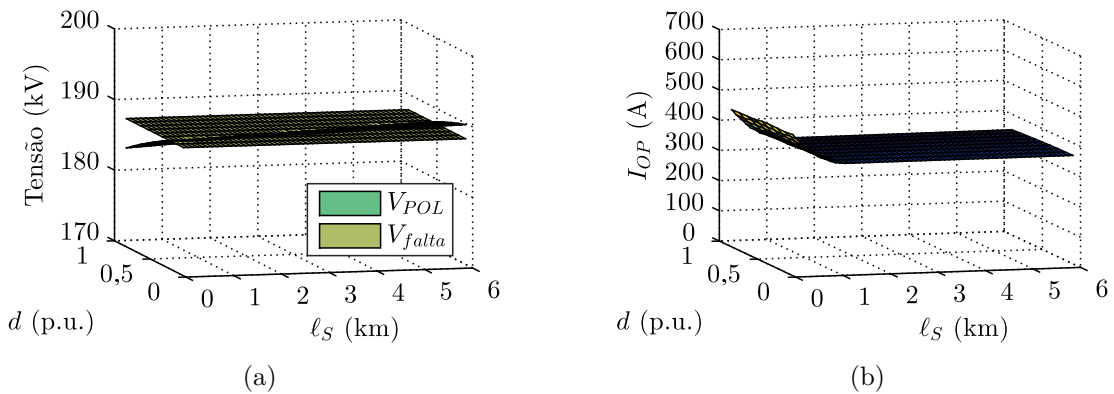


**Figura 6.22.** Avaliação das CAS para o Caso 1: LT aérea (a)  $V_{POL}$ . (b)  $I_{OP}$ .

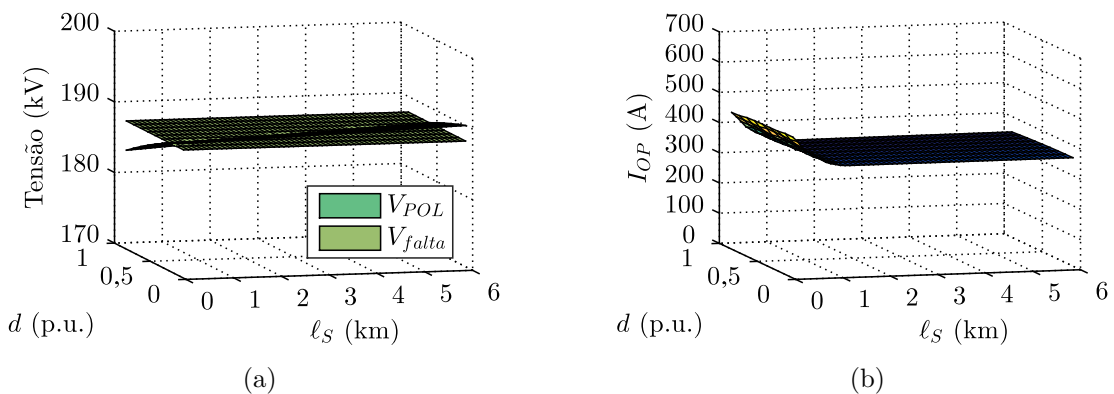
ajustada ignorando o trecho subterrâneo,  $V_{POL} \approx V_{falta}$  e com mesmo sinal de  $I_{OP}$ . Portanto a supervisão VPOL é satisfeita para todos as faltas internas analisadas e, dessa forma, a TW87 não seria bloqueada e função estaria autorizada a atuar de acordo com as condições da Figura 4.7.

Conclui-se então que, embora tenha apresentado erros em  $m_{87}$  devido à parametrização do ajuste  $\tau$  aproximando a linha híbrida por uma LT aérea, conforme apresentado nas Figuras 6.17 e 6.21, sendo esses erros chegando a aproximadamente 4 km e 7 km para os Casos 2.1 e 2.2 e valores de  $\ell_S$  analisados, respectivamente, ainda assim não foram desvios significativos a ponto de inverter o sinal do  $V_{POL}$  em relação a  $I_{OP}$ . Portanto, o desempenho da supervisão VPOL não seria afetado ao ignorar o trecho subterrâneo da linha híbrida.

A outra condição adicional de segurança da TW87 é a supervisão OC87, sendo o objetivo dessa analisar se um dado distúrbio detectado pela função tem energia suficiente para ser con-



**Figura 6.23.** Avaliação das CAS para o Caso 2.1: Linha Híbrida com Dois Trechos - Comprimento Total Fixo e Trecho Subterrâneo Complementar (a)  $V_{POL}$ . (b)  $I_{OP}$ .

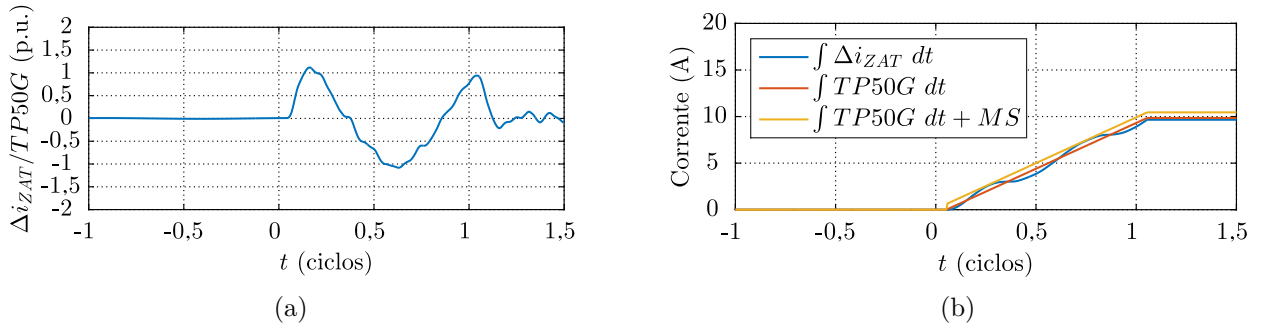


**Figura 6.24.** Avaliação das CAS para o Caso 2.2: Linha Híbrida com Dois Trechos - Comprimento Total Variável e Trecho Subterrâneo Adicional (a)  $V_{POL}$ . (b)  $I_{OP}$ .

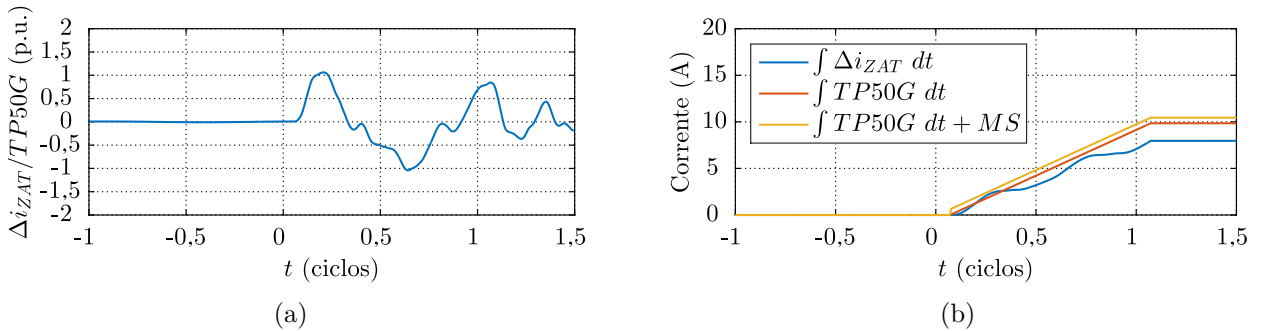
siderado uma falta interna a LT monitorada, ou então, se é uma falta externa ou evento de comutação, por exemplo, proveniente de manobras de chaveamento. Porém, de acordo com a implementação e parametrização dos ajustes da OC87 (ver Seções 4.5 e 6.2), percebe-se que os ajustes de *pickup*  $TP50G$  e  $TP50P$  e o cálculo das correntes réplicas incrementais  $\Delta i_Z$  dependem dos valores das impedâncias características de sequência positiva e zero da LT monitorada  $Z_{LT,1}$  e  $Z_{LT,0}$ . Sendo assim, para as análises propostas nesta dissertação, em que uma linha híbrida é aproximada por uma LT aérea de igual comprimento, durante a parametrização dos ajustes da OC87, a depender dos parâmetros elétricos da linha híbrida e da LT aérea, os ajustes  $TP50G$  e  $TP50P$  podem não ser tão sensíveis a ponto de detectar sobrecorrentes ou muito sensíveis, podendo assim restringir atuações da TW87 para faltas internas, ou então sensibilizar-se indevidamente para faltas externas. Ademais, do exposto na Seção 4.5, nota-se que o *Starting Logic* também depende da  $Z_{LT,1}$ , porém não se encontrou na literatura informações sobre a parametrização dos ajustes  $v_{START}$ ,  $MC$  e  $\Delta i_{min}$  e, portanto, esses ajustes não terão seus desempenhos avaliados em mais detalhes nesta dissertação.

Os valores dos ajustes de *pickup* foram calculados na Seção 6.2 com base nos parâmetros elétricos do sistema teste para uma LT monitorada aérea de comprimento total  $\ell = 200$  km, como sendo  $TP50G = 926,3561$  A e  $TP50P = 1,6045$  kA. Com bases nesses valores será analisado o desempenho da OC87. Primeiramente, serão validados os ajustes considerando as mesmas condições do SEE em que os ajustes foram calculados, ou seja, uma LT monitorada aérea operando com os equivalentes de Thévenin para configurações de Fonte Local fraca e uma Fonte Remota forte sendo o dobro e metade dos valores nominais apresentados na Tabela 6.3, respectivamente. Para tal, realizam-se faltas monofásicas do tipo AT com  $\theta = 90^\circ$  no sistema teste ilustrado na Figura 6.4 para três localizações de falta, sendo uma interna em 0,1 p.u. da LT monitorada, uma externa na Barra R, e por fim, uma externa em 0,9 p.u. da LT ADJ2. Para cada ponto de falta, ilustram-se os comportamentos de  $\Delta i_Z$  do *loop* sensibilizado, no caso *loop* AT, normalizada pelo *pickup* para faltas monofásicas  $TP50G$ . Ilustra-se também a integral no tempo da corrente réplica incremental  $\int \Delta i_Z dt$ , da integral do  $TP50G$ , e da integral do  $TP50G$  mais uma  $MS$ , sendo todos valores da Barra L.

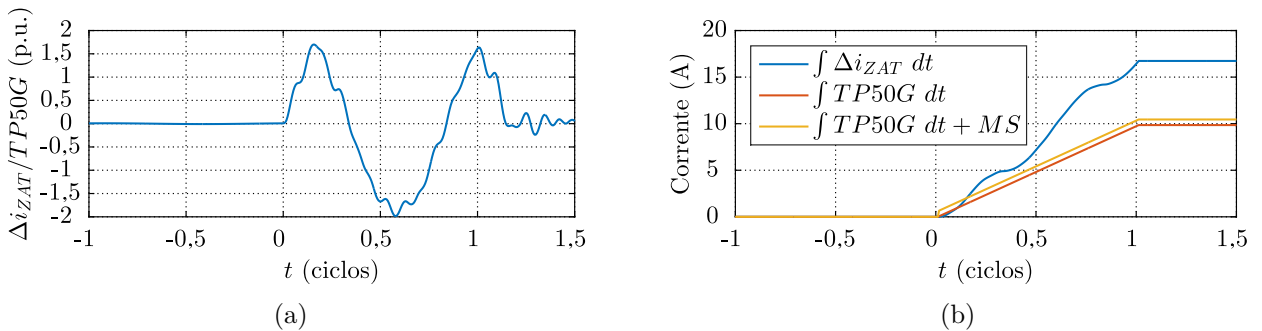
Dos resultados apresentados nas Figuras 6.25, 6.26 e 6.27, observa-se que em todos os casos analisados há uma presença de componentes de alta frequência em  $\Delta i_{ZAT}$ . Tal fato se deve à



**Figura 6.25.** Avaliação das CAS para o Caso 1: LT aérea: Falta externa na Barra R: (a)  $\Delta i_{ZAT}/TP50G$  (b)  $\int \Delta i_{ZAT} dt$ ,  $\int TP50G dt$  e  $\int TP50G dt + MS$

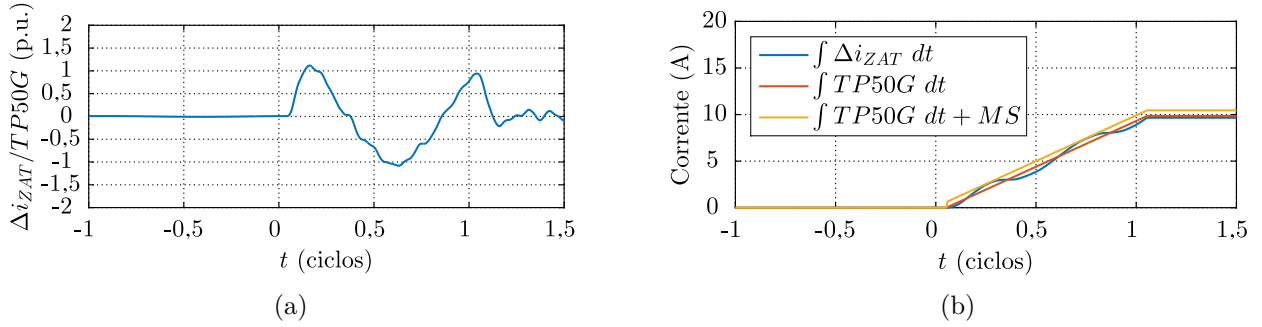


**Figura 6.26.** Avaliação das CAS para o Caso 1: LT aérea: Falta externa em 0,9 p.u. da LT ADJ2: (a)  $\Delta i_{ZAT}/TP50G$  (b)  $\int \Delta i_{ZAT} dt$ ,  $\int TP50G dt$  e  $\int TP50G dt + MS$

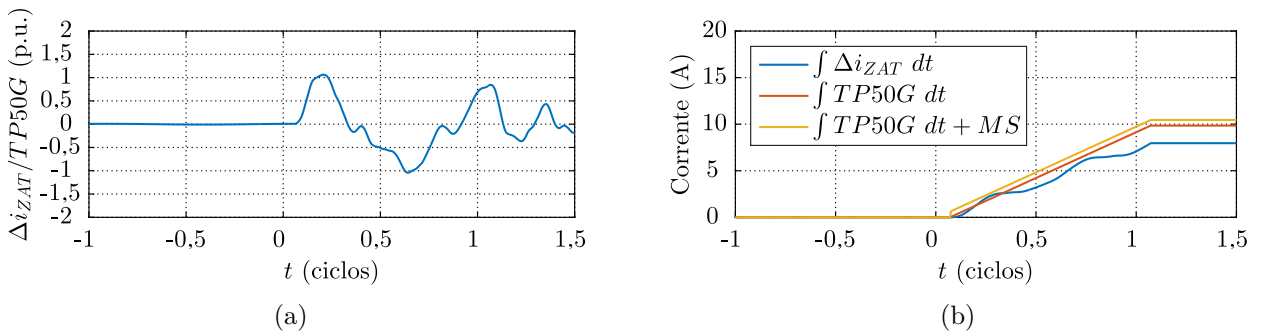


**Figura 6.27.** Avaliação das CAS para o Caso 1: LT aérea: Falta interna em 0,1 p.u. da LT monitorada: (a)  $\Delta i_{ZAT}/TP50G$  (b)  $\int \Delta i_{ZAT} dt$ ,  $\int TP50G dt$  e  $\int TP50G dt + MS$

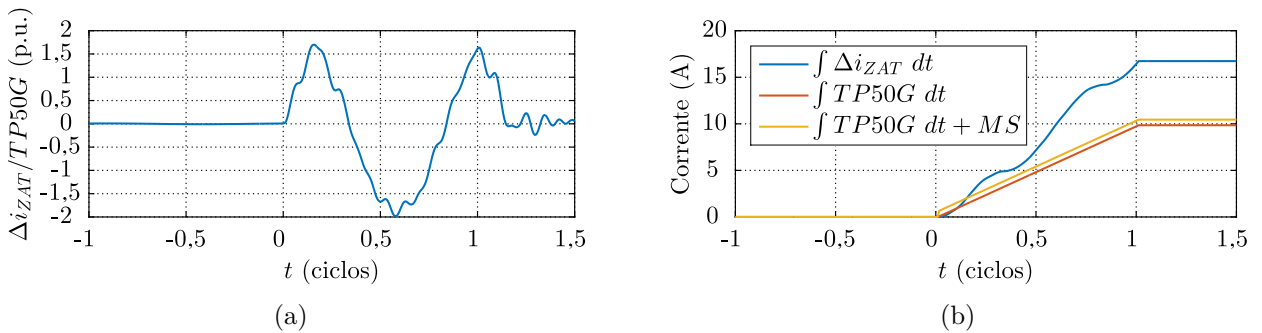
amplitude das OV's lançadas pela falta serem proporcionais ao  $\theta$ , e por serem faltas em  $\theta = 90^\circ$ , são lançadas as maiores OV's possíveis para esse sistema teste. Embora seja aplicado um filtro passa-baixas com  $f_C = 1$  kHz (ver Seção 4.5), tais componentes ainda se fazem presentes. Porém, ainda assim, dos resultados se conclui que tal fato não modifica significativamente a operação da OC87. Para a falta na Barra R, a  $\int \Delta i_{ZAT} dt$  excursiona em torno da  $\int TP50G dt$ , porém com o acréscimo da  $MS$ , os valores de  $\int \Delta i_{ZAT} dt$  não ultrapassam esse limiar. Dessa forma, a OC87 não é sensibilizada para esse caso, conforme esperado. Para a falta externa na LT ADJ2, os valores de  $\int \Delta i_Z dt$  novamente não superam o limiar, não sensibilizando a OC87,



**Figura 6.28.** Avaliação das CAS para o Caso 2.1: Linha Híbrida com Dois Trechos - Comprimento Total Fixo e Trecho Subterrâneo Complementar - Para  $\ell_S = 6$  km: Falta externa na Barra R: (a)  $\Delta i_{ZAT}/TP50G$  (b)  $\int \Delta i_{ZAT} dt$ ,  $\int TP50G dt$  e  $\int TP50G dt + MS$ .



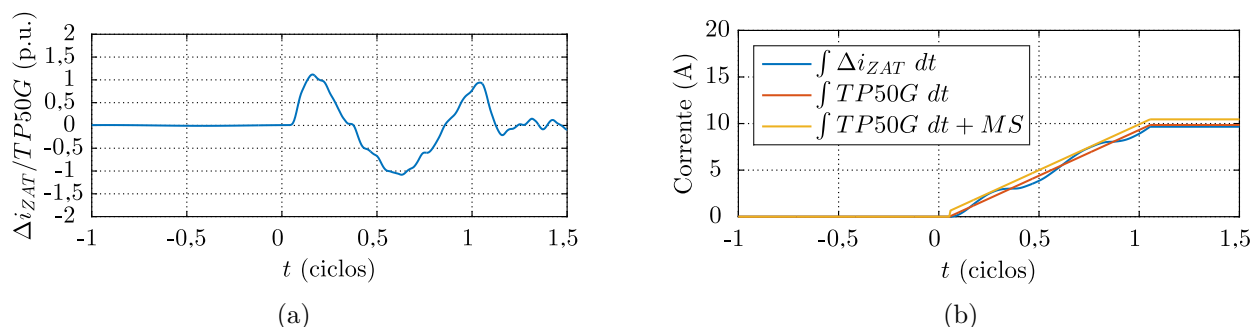
**Figura 6.29.** Avaliação das CAS para o Caso 2.1: Linha Híbrida com Dois Trechos - Comprimento Total Fixo e Trecho Subterrâneo Complementar - Para  $\ell_S = 6$  km: Falta externa em 0,9 p.u. da LT ADJ2: (a)  $\Delta i_{ZAT}/TP50G$  (b)  $\int \Delta i_{ZAT} dt$ ,  $\int TP50G dt$  e  $\int TP50G dt + MS$ .



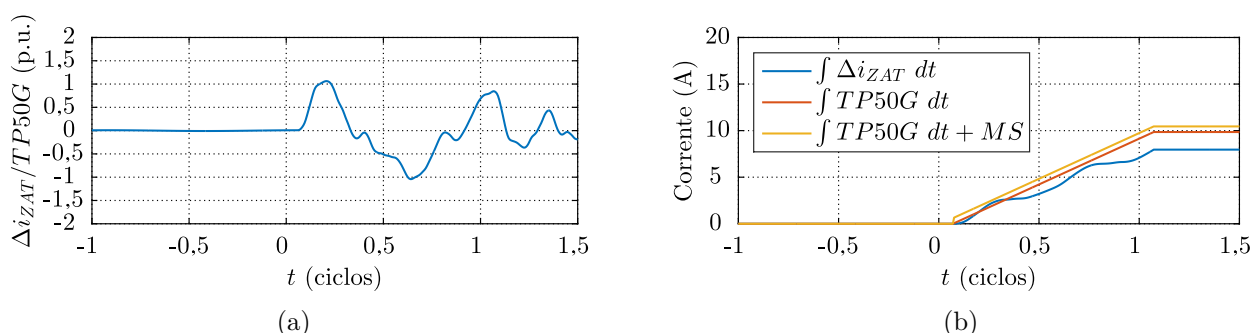
**Figura 6.30.** Avaliação das CAS para o Caso 2.1: Linha Híbrida com Dois Trechos - Comprimento Total Fixo e Trecho Subterrâneo Complementar - Para  $\ell_S = 6$  km: Falta interna em 0,1 p.u. da LT: (a)  $\Delta i_{ZAT}/TP50G$  (b)  $\int \Delta i_{ZAT} dt$ ,  $\int TP50G dt$  e  $\int TP50G dt + MS$ .

conforme esperado. E para a falta interna, a  $\int \Delta i_{ZAT} dt$  supera  $\int TP50G + MS$ , sensibilizando assim a OC87, o que permitiria a TW87 operar pelas condições apresentadas na Figura 4.7.

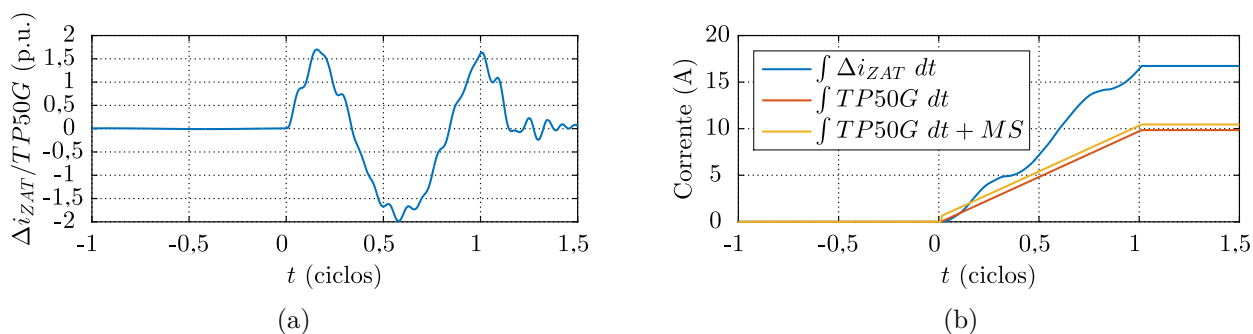
Para as mesmas condições de equivalentes de Thévenin e mantendo no cálculo das  $\Delta i_{ZAT}$  os valores  $Z_{LT,1}$  e  $Z_{LT,0}$  da LT aérea, substituiu-se 6 km dessa LT aérea por um trecho subterrâneo (Caso 2.1), e por fim, acrescentou-se 6 km de trecho subterrâneo a LT totalmente aérea (Caso 2.2). Por fim, realizaram-se os mesmos curtos-circuitos nas três localizações de falta, sendo os



**Figura 6.31.** Avaliação das CAS para o Caso 2.2: Linha Híbrida com Dois Trechos - Comprimento Total Variável e Trecho Subterrâneo Adicional - Para  $\ell_S = 6$  km: Falta externa na Barra R: (a)  $\Delta i_Z$  (b)  $\int \Delta i_Z$ ,  $\int TP50G dt$  e  $\int TP50G dt + MS$ .



**Figura 6.32.** Avaliação das CAS para o Caso 2.2: Linha Híbrida com Dois Trechos - Comprimento Total Variável e Trecho Subterrâneo Adicional - Para  $\ell_S = 6$  km: Falta externa em 0,9 p.u. da LT ADJ2: (a)  $\Delta i_Z$  (b)  $\int \Delta i_Z$ ,  $\int TP50G dt$  e  $\int TP50G dt + MS$ .



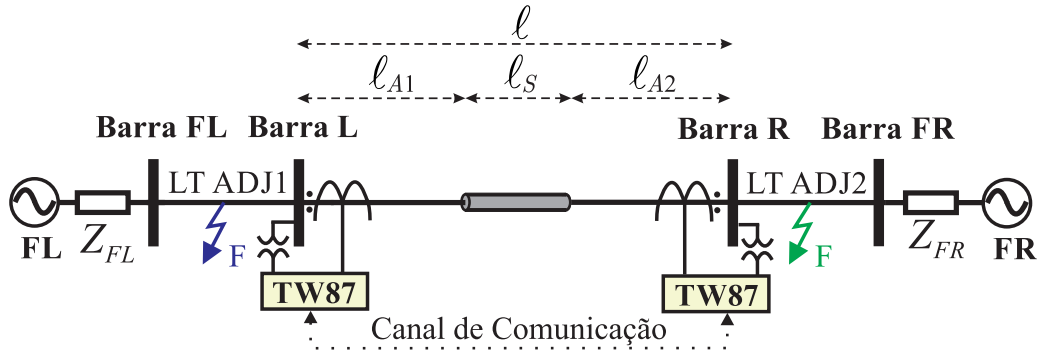
**Figura 6.33.** Avaliação das CAS para o Caso 2.2: Linha Híbrida com Dois Trechos - Comprimento Total Variável e Trecho Subterrâneo Adicional - Para  $\ell_S = 6$  km: Falta interna em 0,1 p.u. da LT: (a)  $\Delta i_Z$  (b)  $\int \Delta i_Z$ ,  $\int TP50G dt$  e  $\int TP50G dt + MS$ .

resultados apresentados nas Figuras 6.28 a 6.33. Dos resultados, conclui-se que não há uma variação significativa da  $\Delta i_{ZAT}$  entre os valores da LT aérea e para a linha híbrida, mantendo o nível de sensibilidade para os casos analisados, conforme se era esperado, pois a variação entre as impedâncias das linhas híbridas do Caso 2 e LT aérea não são significativos. De forma análoga, os testes podem ser realizados com faltas bifásicas para a avaliação do ajuste  $TP50P$ , sendo esperadas as mesmas conclusões do ajuste  $TP50G$ .



## 6.6 CASO 3: LINHA HÍBRIDA COM TRÊS TRECHOS

Neste caso, a linha híbrida é composta por três trechos, sendo dois aéreos ( $n_A = 2$ ) e um subterrâneo ( $n_S = 1$ ), conforme ilustrado na Figura 6.34, sendo  $\ell = 200$  km o comprimento total da linha híbrida,  $\ell_{A1}$  e  $\ell_{A2}$  são os comprimentos dos trechos aéreos e  $\ell_S$  o comprimento do trecho subterrâneo, em que  $0,1 < \ell_S < 6$  km. Nesse caso, à medida que  $\ell_S$  aumenta, o comprimento restante  $\ell_A$  diminui, o qual é dividido igualmente entre  $\ell_{A1}$  e  $\ell_{A2}$ , mantendo assim  $\ell = 200$  km. No presente caso e nos posteriores, restringiu-se em avaliar o desempenho da TW87 com faltas externas na metade das LTs ADJ1 e ADJ2, haja vista que, das análises realizadas nos Casos 1 e 2 se verificou não haver restrições para faltas internas. Pelo mesmo motivo, as CAS também não são avaliadas.



**Figura 6.34.** Sistema teste para uma linha híbrida composta por três trechos.

Considerou-se o ajuste  $\tau$  como sendo calculado de duas formas: primeiramente aproximando a linha híbrida por uma LT aérea de igual comprimento, ou seja,  $\tau = \tau_a$ ; em seguida, assumindo  $\tau$  como sendo o tempo de propagação equivalente da linha híbrida dado pela soma dos tempos de propagação de cada trecho, ou seja,  $\tau = \tau_h$ . Para faltas externas na metade da LT ADJ1, apresenta-se na Figura 6.35 os comportamentos dos módulos de  $|I_L|$ ,  $|I_R|$  e  $|I_{OP}|$  em função de  $\ell_S$ , em que se observa que  $|I_L| \approx i_{OV}$ , que  $|I_R|$  varia até  $\ell_S = 1$  km devido a uma segunda reflexão no trecho subterrâneo que é contabilizada no cálculo dessa amplitude, sendo para  $\ell_S > 1$  km,  $|I_R| \approx 0,51 \cdot i_{OV}$ , proporção esta referente ao produto dos coeficientes de transmissão entre os trechos aéreo-subterrâneo e subterrâneo-aéreo,  $T_{AS}$  e  $T_{SA}$ , respectivamente. Entretanto, para todos os valores  $\ell_S$ , tem-se  $|I_L| > K_{OV} \cdot I_{min}$  e  $|I_R| > K_{OV} \cdot I_{min}$ . Por fim,  $|I_{OP}| \approx 0,49 \cdot i_{OV}$ , sendo maior que o ajuste  $I_{min}$  quando  $\ell_S > 0,7$  km. Assim, a Condição 1 seria satisfeita indevidamente para  $\ell_S > 0,7$  km, lembrando que a análise dessa condição independe do valor do ajuste  $\tau$ .

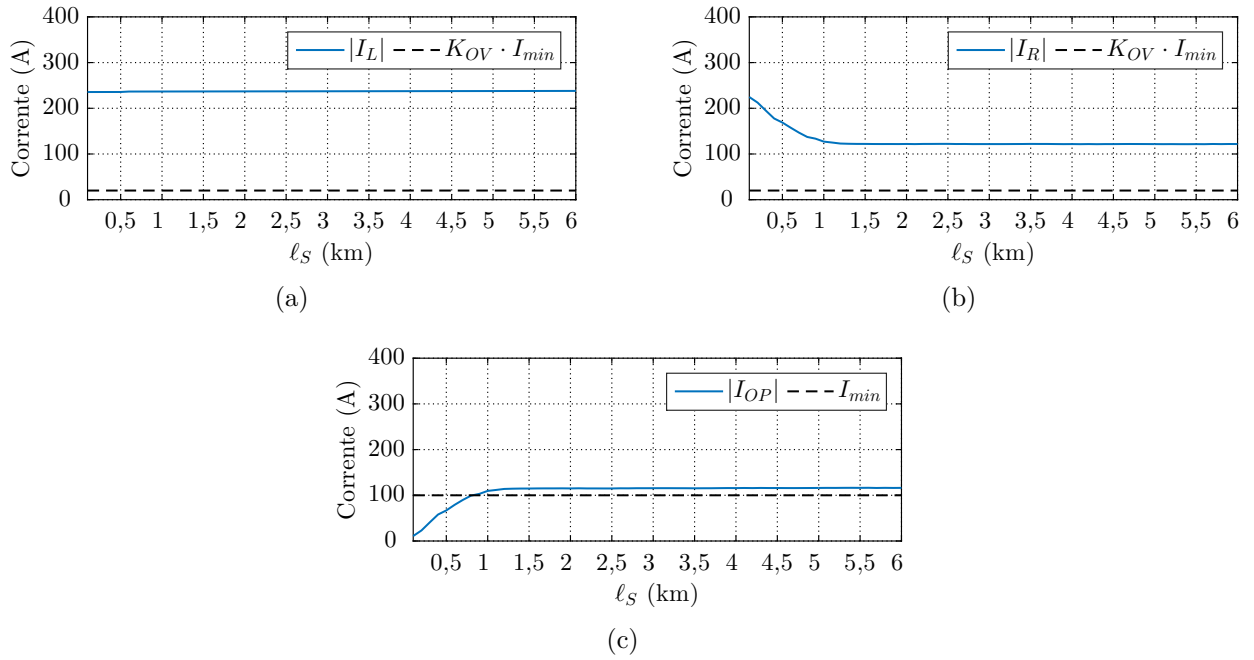
Ainda para faltas na LT ADJ 1, na Figura 6.36, apresentam-se os comportamentos de  $|I_{OP}|$  e  $SLP \cdot I_{RT}$  para diferentes valores de  $SLP$  em função de  $\ell_S$ , sendo o ajuste  $\tau = \tau_a$  e  $\tau = \tau_h$ . Percebe-se que quando se ignora a existência de um trecho subterrâneo a Condição 2 seria satisfeita indevidamente para  $SLP = 0,4$  e  $\ell_S > 4,2$  km. Porém, quando o ajuste  $\tau = \tau_h$ , a Condição 2 não seria satisfeita, conforme esperado, para nenhum dos valores de  $SLP$  e  $\ell_S$  analisados.

Por fim, na Figura 6.37, apresentam-se os valores de  $m_{87}$  em função de  $\ell_S$  para quando o ajuste  $\tau = \tau_a$  e  $\tau = \tau_h$ . Quando se aproxima a linha híbrida por uma LT aérea, são apresentados erros em  $m_{87}$  em relação ao esperado, que para essa análise seria de 0 p.u.. No entanto, esses erros não transformam em localizações internas a LT monitorada. Quando se consideram as particularidades da linha híbrida no ajuste  $\tau$ ,  $m_{87} \approx 0$  p.u., conforme esperado. Portanto, para ambas configurações de ajuste  $\tau$ , a Condição 3 não seria satisfeita para os valores de  $\ell_S$  analisados.

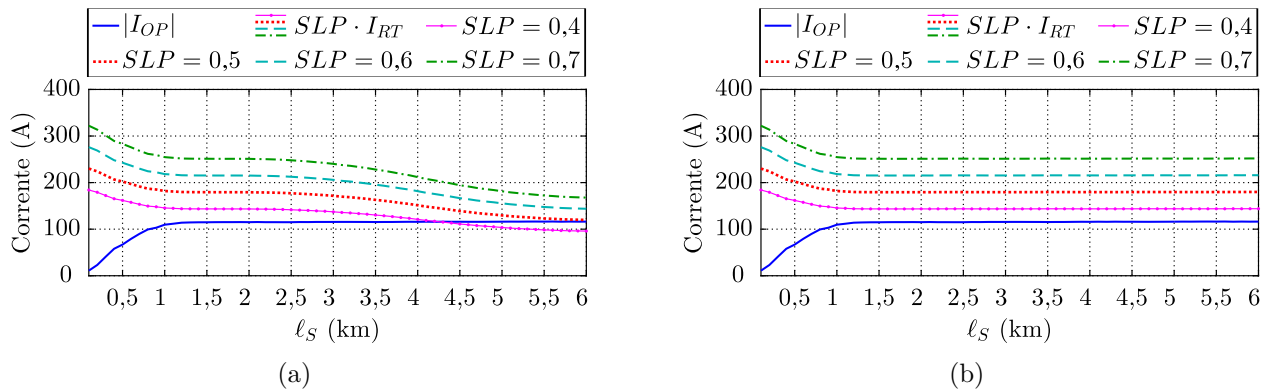
Para faltas externas na metade da LT ADJ2, apresentam-se na Figura 6.38 os valores de  $|I_L|$ ,  $|I_R|$  e  $|I_{OP}|$  para diferentes valores de  $\ell_S$ . Observa-se que  $|I_L|$  varia entre aproximadamente 200 e 115 A quando  $\ell_S < 1$  km, até se estabilizar em aproximadamente 48% de  $i_{OV}$ . Tal fato decorre de uma segunda OV refletida no trecho subterrâneo. Na Barra R, tem-se  $|I_R| \approx i_{OV}$ . Da Figura 6.35(c), nota-se que  $|I_{OP}|$  também varia pelas mesmas razões que  $|I_R|$ , sendo que para  $\ell_S > 0,7$  km,  $|I_{OP}| > I_{min}$ . Dessa forma, para esses valores de  $\ell_S$ , a Condição 1 seria satisfeita indevidamente.

Da Figura 6.36(a), conclui-se que quando se ajusta  $\tau = \tau_a$ , a Condição 2 seria satisfeita indevidamente quando  $SLP = 0,4$  e  $\ell_S > 4,2$  km. Entretanto, quando  $\tau$  é ajustado como sendo a soma dos tempos de propagação das OVs de cada trecho, a Condição 2 não seria satisfeita, conforme se espera, para nenhum dos valores de  $SLP$  e  $\ell_S$  analisados.

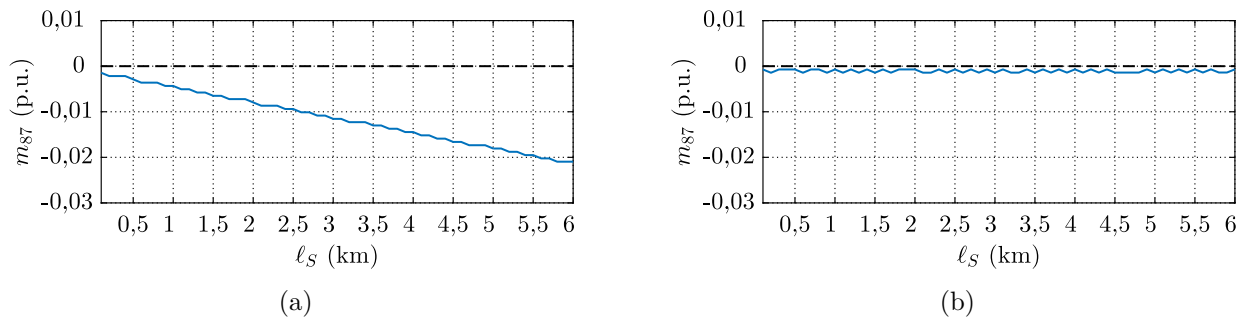
Por fim, conclui-se da Figura 6.40(a) que os erros apresentados em  $m_{87}$  devido a parametrização do ajuste  $\tau = \tau_a$  não transformam em valores internos a LT monitorada. Da Figura 6.40(b), nota-se que ao ajustar o  $\tau = \tau_h$ , os valores de  $m_{87}$  são aproximadamente iguais a 1 p.u., conforme se espera. Sendo assim, para as formas de ajustar a TW87, a Condição 3 não seria satisfeita em nenhum dos testes realizados.



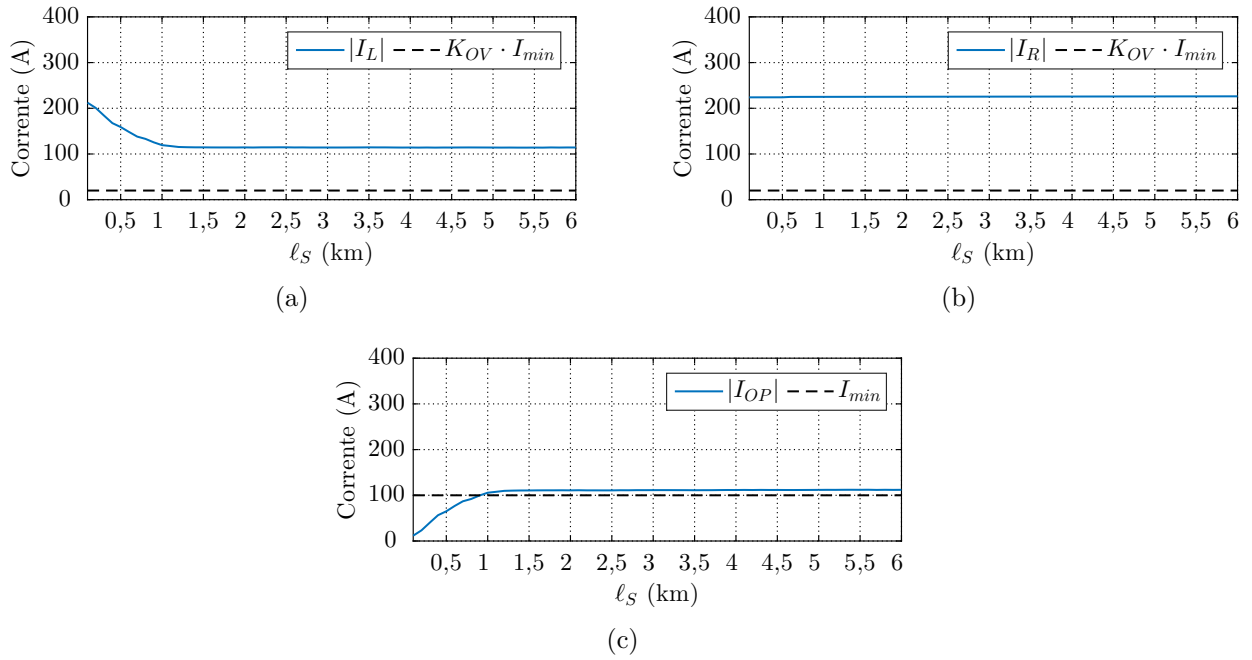
**Figura 6.35.** Caso 3: Linha Híbrida com Três Trechos: Falta externa na metade da LT ADJ1 - Condição 1: (a)  $|I_L|$  (b)  $|I_R|$  (c)  $|I_{OP}|$ .



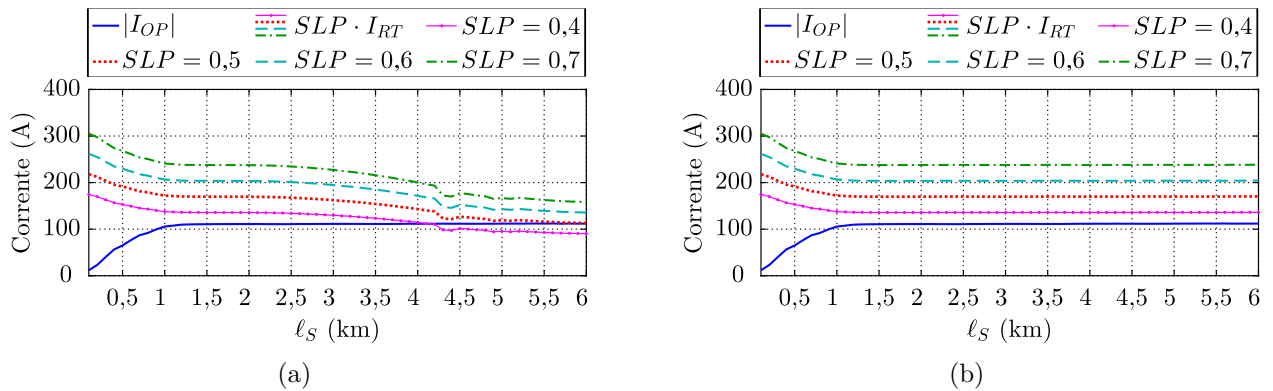
**Figura 6.36.** Caso 3: Linha Híbrida com Três Trechos: Falta externa na metade da LT ADJ1 - Condição 2:  $|I_{OP}|$  e  $SLP \cdot I_{RT}$  para: (a)  $\tau = \tau_a$ . (b)  $\tau = \tau_h$ .



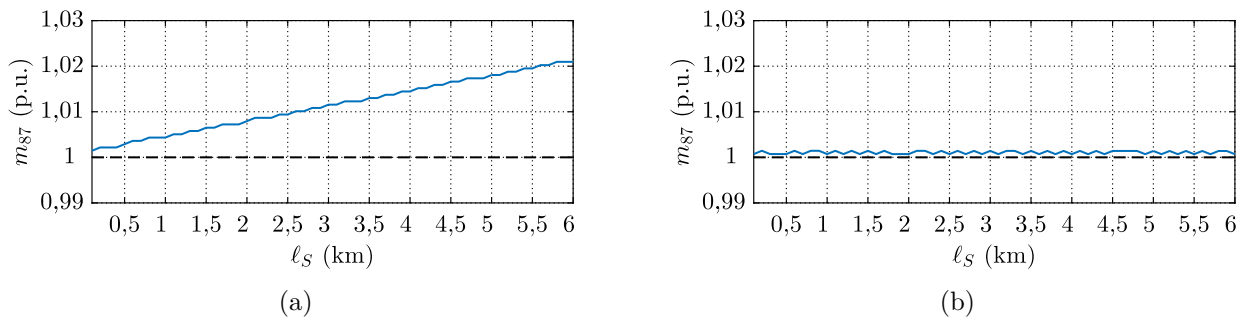
**Figura 6.37.** Caso 3: Linha Híbrida com Três Trechos: Falta externa na metade da LT ADJ1 - Condição 3:  $m_{87}$  para: (a)  $\tau = \tau_a$ . (b)  $\tau = \tau_h$ .



**Figura 6.38.** Caso 3: Linha Híbrida com Três Trechos: Falta externa na metade da LT ADJ2 - Condição 1: (a)  $|I_L|$  (b)  $|I_R|$  (c)  $|I_{OP}|$ .



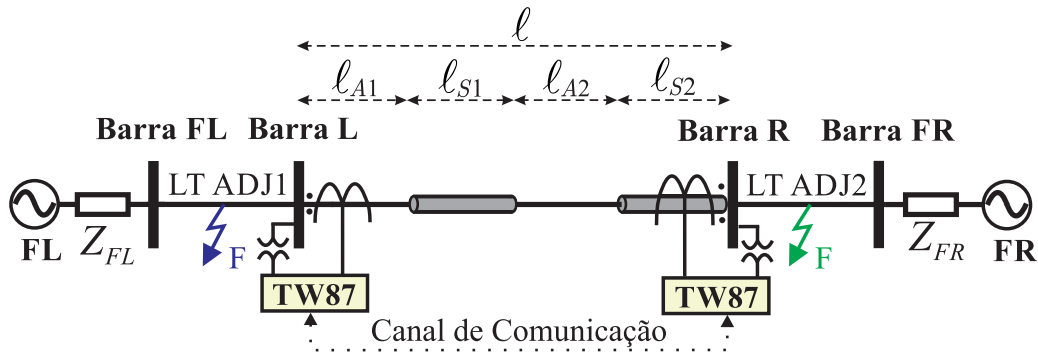
**Figura 6.39.** Caso 3: Linha Híbrida com Três Trechos: Falta externa na metade da LT ADJ2 - Condição 2:  $|I_{OP}|$  e  $SLP \cdot I_{RT}$  para: (a)  $\tau = \tau_a$ . (b)  $\tau = \tau_h$ .



**Figura 6.40.** Caso 3: Linha Híbrida com Três Trechos: Falta externa na metade da LT ADJ2 - Condição 3:  $m_{87}$  para: (a)  $\tau = \tau_a$ . (b)  $\tau = \tau_h$ .

## 6.7 CASO 4: LINHA HÍBRIDA COM QUATRO TRECHOS

Para o Caso 4, a linha híbrida é composta por quatro trechos, sendo dois trechos aéreos ( $n_A = 2$ ) e dois subterrâneos ( $n_S = 2$ ). O comprimento total  $\ell$  da linha híbrida é fixo e igual a 200 km, e os comprimentos dos dois trechos subterrâneos  $\ell_{S1}$  e  $\ell_{S2}$  foram variados concomitantemente, e por serem iguais a cada instante, foram aqui representados por  $\ell_S$ . Dessa forma, o comprimento restante da linha híbrida  $\ell_A$  igual a  $\ell - \ell_{S1} - \ell_{S2}$  foi dividido igualmente entre  $\ell_{A1}$  e  $\ell_{A2}$ . Na Figura 6.41, apresenta-se o sistema teste utilizado.



**Figura 6.41.** Sistema teste para uma linha híbrida composta por quatro trechos.

Na Figura 6.42, apresentam-se os comportamentos dos valores  $|I_L|$ ,  $|I_R|$  e  $|I_{OP}|$  em função de  $\ell_S$  para faltas externas na metade da LT ADJ1, comparando-os com os ajustes  $K_{OV}$  e  $I_{min}$ . A amplitude da OV medida na Barra L  $|I_L| \approx i_{OV}$ , já na Barra R  $|I_R|$  varia entre 210 e 64 A no primeiro quilômetro de trecho subterrâneo devido a uma segunda OV refletida no trecho subterrâneo mais próximo da falta. Porém, para  $\ell_S > 1\text{ km}$ , tem-se  $|I_R| \approx 0,27 \cdot i_{OV}$ , proporção esta referente às alterações de amplitude da OV ao longo da linha híbrida, conforme ilustrado na Figura 5.9 e previsto na Tabela 5.2. Por fim,  $I_{OP}$  também sofre uma variação para  $0,1 < \ell_S < 1\text{ km}$ , porém se mantém em aproximadamente 73% da amplitude da OV lançada pela falta, conforme previsto na Tabela 5.2, sendo que, para  $\ell_S > 0,7\text{ km}$ , a Condição 1 seria satisfeita indevidamente para esses valores de  $K_{OV}$  e  $I_{min}$ .

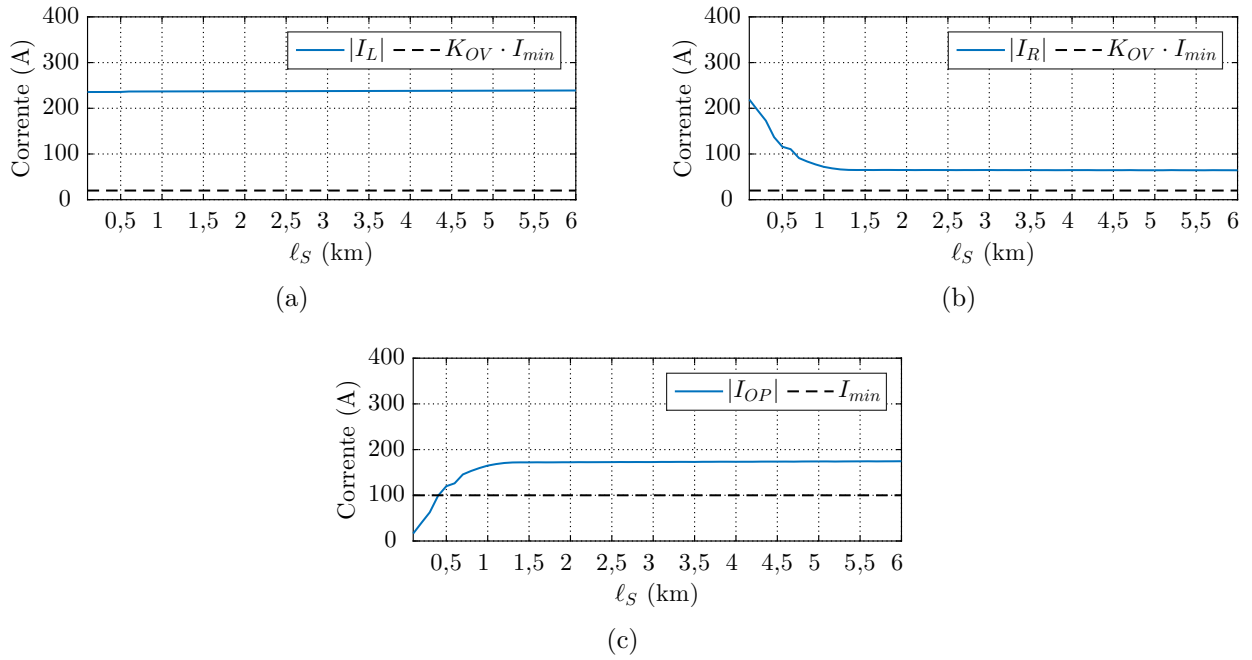
Os comportamentos de  $|I_{OP}|$  e  $SLP \cdot I_{RT}$  para diferentes valores de  $SLP$  em função de  $\ell_S$  são apresentados na Figura 6.43, sendo que o ajuste  $\tau$  da TW87 foi configurado de duas formas,  $\tau = \tau_a$  e  $\tau = \tau_h$ . Observa-se da Figura 6.43(a), quando  $\tau = \tau_a$ , que para  $SLP = 0,4$  e  $0,5$ , a Condição 2 seria satisfeita indevidamente para  $\ell_S > 0,6$  e  $0,8\text{ km}$ , respectivamente. Para  $SLP = 0,6$  e  $0,7$ ,  $\ell_S$  poderia chegar a  $1,5$  e  $2,5\text{ km}$ , sem que a Condição 2 fosse satisfeita. Ao

considerar as particularidades da linha híbrida em  $\tau$ , a Condição 2 não seria satisfeita para  $SLP = 0,6$  e  $0,7$ . Entretanto, essa condição seria satisfeita para  $\ell_S > 0,6$  e  $0,8$  km e  $SLP = 0,4$  e  $0,5$ , respectivamente. Tal fato foi previsto na Seção 5.2, em que para faltas a jusante da Barra L, ou seja, na LT ADJ1, o valor do  $SLP$  deveria ser maior que  $0,556$  para que a Condição 2 não fosse satisfeita.

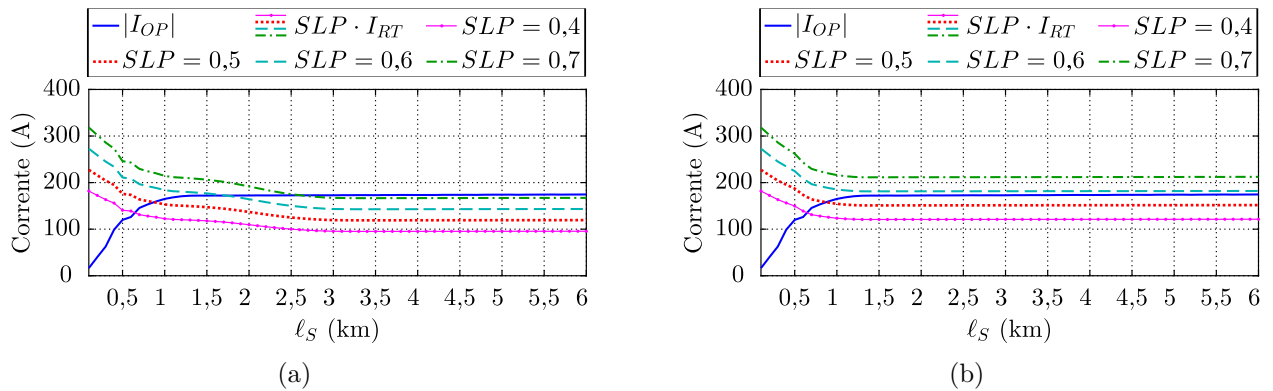
As últimas análises para faltas externas na metade da LT ADJ1 em uma linha híbrida com quatro trechos se referem à localização de faltas estimada  $m_{87}$ . Da Figura 6.44(a), quando o ajuste  $\tau = \tau_a$ , são apresentados erros em  $m_{87}$  em relação ao esperado 0 p.u.. Entretanto, a presença desses erros não implica em valores internos a LT monitorada. Por fim, para  $\tau = \tau_h$ , os valores de  $m_{87}$  excursionam em torno de 0 p.u., conforme esperado. Dessa forma, tanto para o ajuste  $\tau = \tau_a$  e  $\tau = \tau_h$ , a Condição 3 não seria satisfeita, para as condições analisadas.

Dando continuidade, para faltas externas na metade da LT ADJ2, os resultados são apresentados nas Figuras 6.45 a 6.47. Da Figura 6.45(a), nota-se que o  $|I_L|$  sofre uma variação até  $\ell_S = 1$  km devido a uma segunda reflexão no trecho subterrâneo mais próximo da falta, porém, a partir desse valor de  $\ell_S$ , tem-se  $|I_L| \approx 0,25 \cdot i_{OV}$ , que é próximo do esperado para as análises realizadas na Seção 5.2, em que se estimou  $|I_L| \approx 0,285 \cdot i_{OV}$  (ver Tabela 5.2). Da mesma forma, da Figura 6.42(b), as mesmas considerações feitas sobre  $|I_L|$  do porquê da variação de amplitude no primeiro quilômetro de trecho subterrâneo servem para  $|I_R|$ , porém para  $\ell_S > 1$  km, tem-se  $|I_R| \approx 1,6 \cdot i_{OV}$ . Por fim, da Figura 6.45(c), nota-se que a partir de  $\ell_S > 1$  km,  $|I_{OP}| \approx 1,35 \cdot i_{OV}$ , próximo ao previsto na Tabela 5.2. A Condição 1 seria satisfeita indevidamente para  $\ell_S > 0,3$  km.

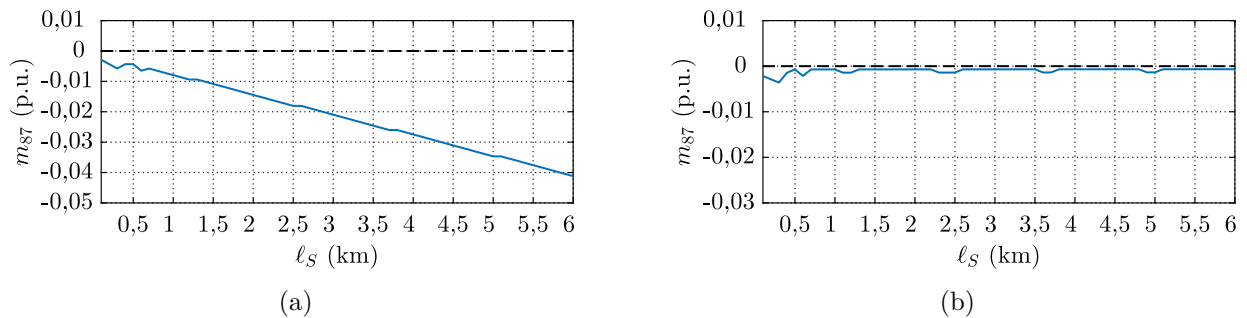
Da Figura 6.46, conclui-se que tanto para  $\tau = \tau_a$  e  $\tau = \tau_h$ , a Condição 2 seria satisfeita para  $SLP = 0,4$ ,  $0,5$ ,  $0,6$  e  $0,7$  quando  $\ell_S > 0,4$ ,  $0,5$ ,  $0,7$  e  $1$  km, respectivamente. Tal fato ocorre, devido as alterações de amplitudes ao longo da linha híbrida e a uma reflexão de OV na Barra R, que cria uma situação em que somente para  $SLP > 0,710$  a Condição 2 não seria satisfeita (ver Tabela 5.2) para falta externa a jusante da Barra R. Finalmente, da Figura 6.47, nota-se que para faltas externas na metade da LT ADJ2, tanto para  $\tau = \tau_a$  e  $\tau = \tau_h$ , a Condição 3 não seria satisfeita, ou seja, os erros apresentados para a situação em que o ajuste  $\tau = \tau_a$  não comprometem a segurança da TW87.



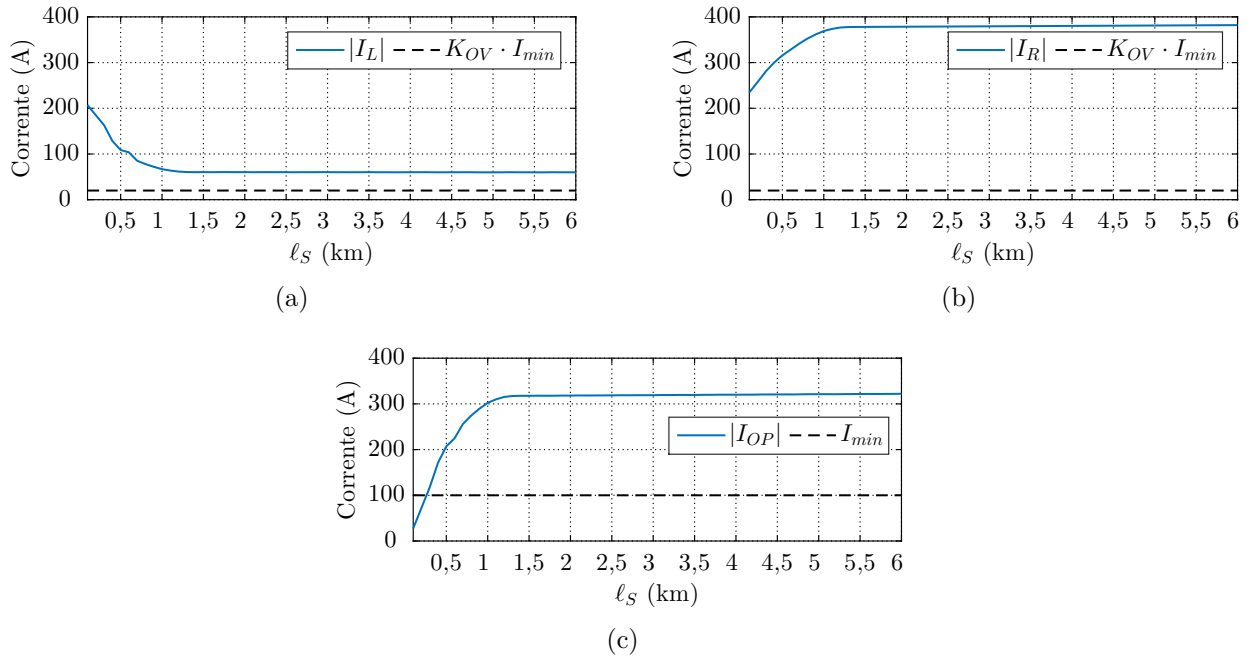
**Figura 6.42.** Caso 4: Linha Híbrida com Quatro Trechos: Falta externa na metade da LT ADJ1 - Condição 1: (a)  $|I_L|$  (b)  $|I_R|$  (c)  $|I_{OP}|$ .



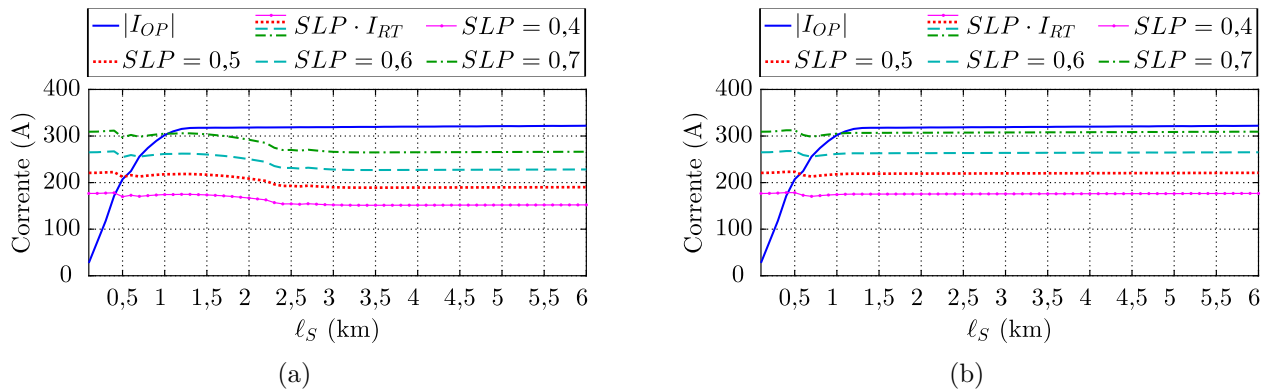
**Figura 6.43.** Caso 4: Linha Híbrida com Quatro Trechos: Falta externa na metade da LT ADJ1 - Condição 2:  $|I_{OP}|$  e  $SLP \cdot I_{RT}$  para: (a)  $\tau = \tau_a$ . (b)  $\tau = \tau_h$ .



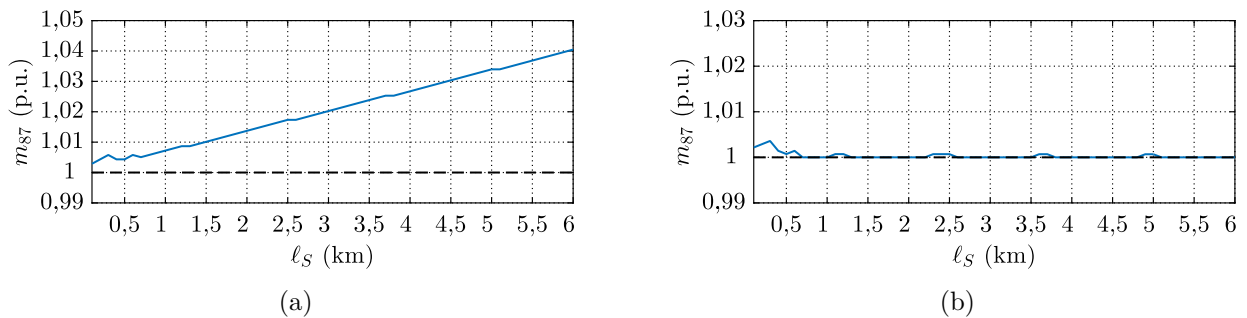
**Figura 6.44.** Caso 4: Linha Híbrida com Quatro Trechos: Falta externa na metade da LT ADJ1 - Condição 3:  $m_{87}$  para: (a)  $\tau = \tau_a$ . (b)  $\tau = \tau_h$ .



**Figura 6.45.** Caso 4: Linha Híbrida com Quatro Trechos: Falta externa na metade da LT ADJ2 - Condição 1: (a)  $|I_L|$  (b)  $|I_R|$  (c)  $|I_{OP}|$ .



**Figura 6.46.** Caso 4: Linha Híbrida com Quatro Trechos: Falta externa na metade da LT ADJ2 - Condição 2:  $|I_{OP}|$  e  $SLP \cdot I_{RT}$  para: (a)  $\tau = \tau_a$ . (b)  $\tau = \tau_h$ .

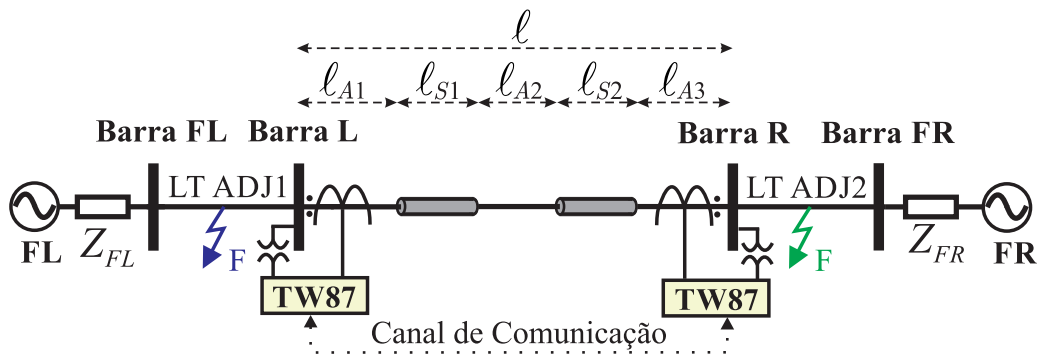


**Figura 6.47.** Caso 4: Linha Híbrida com Quatro Trechos: Falta externa na metade da LT ADJ2 - Condição 3:  $m_{87}$  para: (a)  $\tau = \tau_a$ . (b)  $\tau = \tau_h$ .



## 6.8 CASO 5: LINHA HÍBRIDA COM CINCO TRECHOS

O último caso a ser analisado se trata de uma linha híbrida composta por cinco trechos de comprimento total  $\ell = 200$  km, sendo três aéreos ( $n_A = 3$ ) e dois subterrâneos ( $n_S = 2$ ), sendo a variação dos comprimentos  $\ell_{S1}$  e  $\ell_{S2}$  realizada de forma simultânea. Assim, esses comprimentos são iguais a cada instante, e chamados aqui de  $\ell_S$ . Portanto, o comprimento  $\ell_A = \ell - \ell_{S1} - \ell_{S2}$  foi dividido igualmente entre os comprimentos  $\ell_{A1}$ ,  $\ell_{A2}$  e  $\ell_{A3}$ . Na Figura 6.48, apresenta-se o sistema teste utilizado para esse caso.



**Figura 6.48.** Sistema teste para uma linha híbrida composta por cinco trechos.

Da Figura 6.49, em que são apresentados os valores de  $|I_L|$ ,  $|I_R|$  e  $|I_{OP}|$  em função de  $\ell_S$ , sendo esses valores comparados aos ajustes  $K_{OV}$  e  $I_{min}$ . Observa-se que  $|I_L| = i_{OV}$ ,  $|I_R| \approx 0,27 \cdot i_{OV}$  e  $|I_{OP}| \approx 0,73 \cdot i_{OV}$  para  $\ell_S > 1$  km. Para  $\ell_S < 1$  km, os valores de  $|I_R|$  e  $|I_{OP}|$  sofrem variações devido a uma segunda reflexão de OV no trecho subterrâneo. Com base nessas análises, a Condição 1 é satisfeita indevidamente para  $\ell_S > 0,4$  km.

Para a Condição 2, da Figura 6.50(a), quando o ajuste  $\tau = \tau_a$ , nota-se que se  $SLP = 0,4$ ,  $0,5$ ,  $0,6$  e  $0,7$  quando  $\ell_S > 0,6$ ,  $0,8$ ,  $1,7$  e  $2,5$  km, essa condição seria satisfeita indevidamente. Por outro lado, quando  $\tau = \tau_h$ , a Condição 2 só seria satisfeita indevidamente para  $SLP = 0,4$  e  $0,5$  quando  $\ell_S > 0,6$  e  $0,8$  km, conforme previsto na Tabela 5.2, em que para essas condições de linha híbrida e localização de falta (a montante da Barra L),  $SLP > 0,556$  garantiria que a Condição 2 não fosse satisfeita.

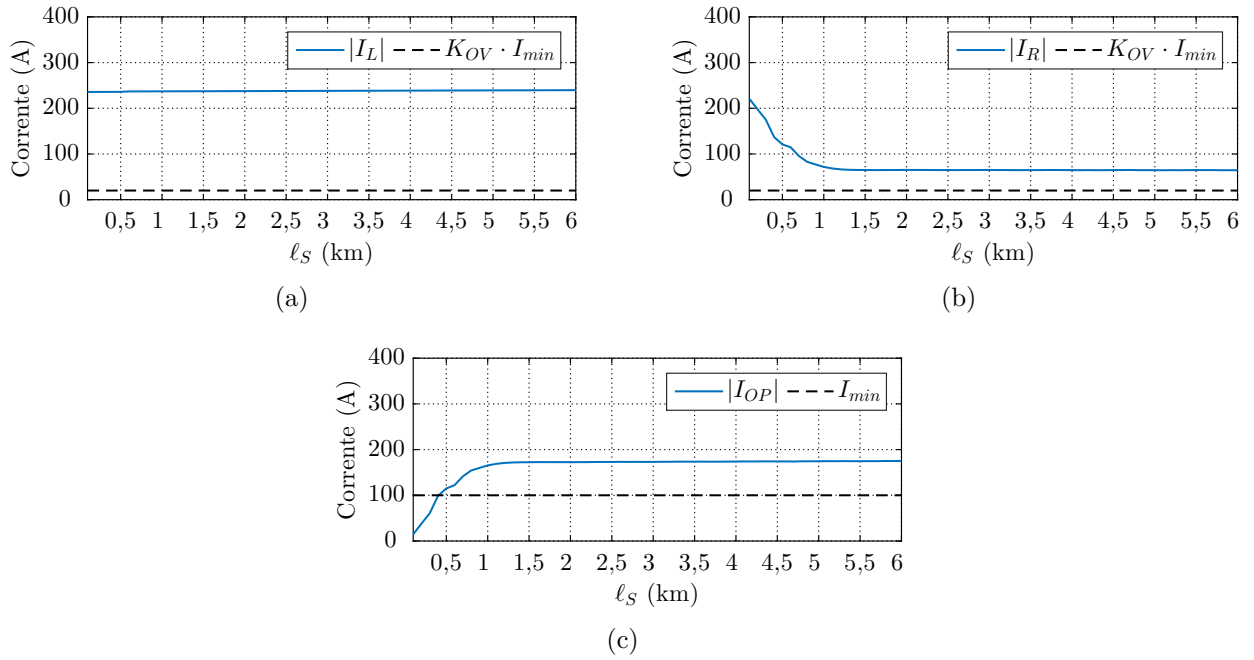
Por fim, sobre a Condição 3, quando a função é ajustada aproximando a linha híbrida por uma LT aérea de igual comprimento, ou seja,  $\tau = \tau_a$  são apresentados erros em  $m_{87}$  que podem chegar a  $0,04$  p.u. quando  $\ell_S = 6$  km em relação ao esperado que é de  $0$  p.u. para essa localização de falta a montante da Barra L, porém, caracterizando faltas externas à LT monitorada. Tal

fato foi explicado na Seção 5.1.2. Já quando o ajuste  $\tau$  é parametrizado sendo a soma dos tempos de propagação das OV's em cada trecho, ou seja,  $\tau = \tau_h$ ,  $m_{87}$  é aproximadamente igual a 0 p.u.. Diante disso, para ambas as situações de parametrização do ajuste  $\tau$ , a Condição 3 não seria satisfeita, conforme esperado, haja vista que são faltas externas.

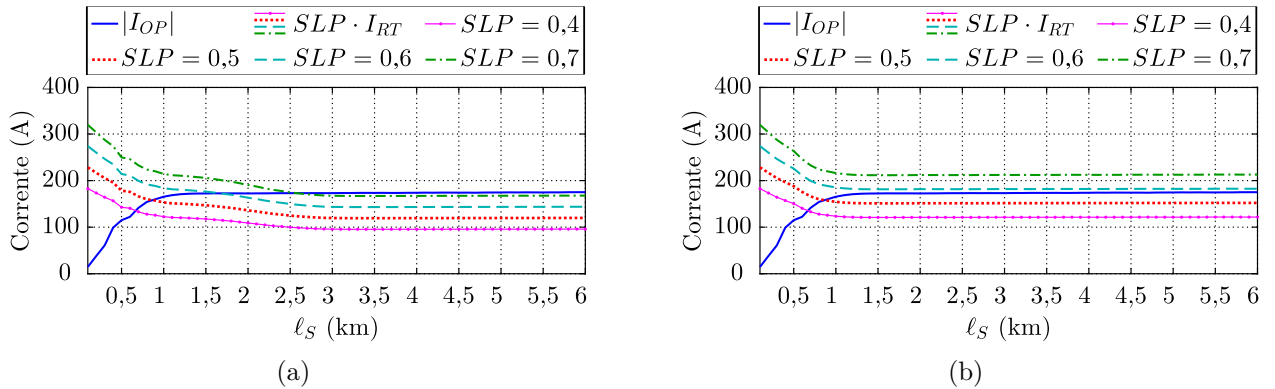
Quando se trata de faltas externas localizadas na metade da LT ADJ2, os comportamentos das variáveis da função TW87 são apresentados nas Figuras 6.52 a 6.54. Da Figura 6.52(a), observa-se que ocorre uma variação em  $|I_L|$  devido a uma segunda OV refletida no trecho subterrâneo mais próximo, porém para  $\ell_S > 1$  km,  $|I_L| \approx 0,26 \cdot i_{OV}$ . Da Figura 6.49(b), nota-se que  $|I_R| \approx i_{OV}$ . Da Figura 6.49(c), percebe-se que ocorre novamente uma variação no quilômetro inicial do trecho subterrâneo, porém para  $\ell_S > 1$  km,  $|I_{OP}| \approx 0,74 \cdot i_{OV}$ . Os resultados de  $|I_L|$ ,  $|I_R|$  e  $|I_{OP}|$  são aproximadamente iguais aos esperados de acordo com a Tabela 5.2. Por fim, com base nesses gráficos, conclui-se que a Condição 1 seria satisfeita indevidamente para  $\ell_S > 0,4$  km.

Em relação ao comportamento de  $|I_{OP}|$  e  $SLP \cdot I_{RT}$ , os resultados são apresentados na Figura 6.53. Da Figura 6.53(a), quando o ajuste  $\tau$  é parametrizado considerando os trechos subterrâneos da linha híbrida como sendo trechos aéreos, nota-se que a Condição 2 poderia ser satisfeita indevidamente para  $SLP = 0,4, 0,5, 0,6$  e  $0,7$  quando  $\ell_S > 0,6, 0,8, 1,5$  e  $2,1$  km, respectivamente. Tal fato decorre da alteração da amplitude das OV's ao longo da linha híbrida e da perda da OV de saída devido a aproximação da linha híbrida por uma LT aérea. Por outro lado, ao ajustar  $\tau = \tau_h$ , somente para  $SLP = 0,4$  e  $0,5$  e quando  $\ell_S > 0,6$  e  $0,8$  km que a Condição 2 poderia ser satisfeita indevidamente. Tal fato se era esperado a partir das análises realizadas na Seção 5.2, em que para essa situação quando  $SLP > 0,556$  garantiria que  $SLP \cdot I_{RT} > |I_{OP}|$  (ver Tabela 5.2).

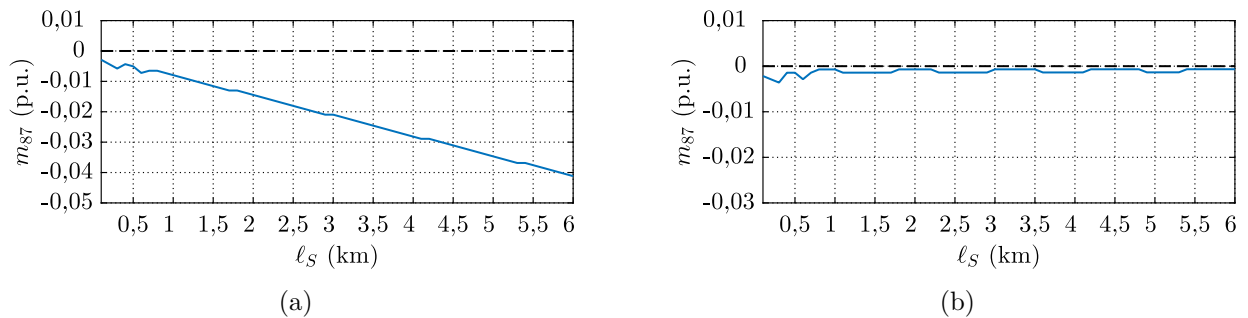
Finalmente, no que se refere a Condição 3, são apresentados erros em  $m_{87}$  quando a TW87 é ajustada aproximando a linha híbrida por uma LT aérea, porém tais erros não transformam os resultados em valores internos a LT monitorada. Tal fato é explicado na Seção 5.1.2. Já quando a TW87 é ajustada considerando as particularidades da linha híbrida, ou seja,  $\tau = \tau_h$ , tem-se  $m_{87} \approx 1$  p.u., conforme esperado. Diante disso, para ambos as situações de ajuste de  $\tau$  a Condição 3 não seria satisfeita.



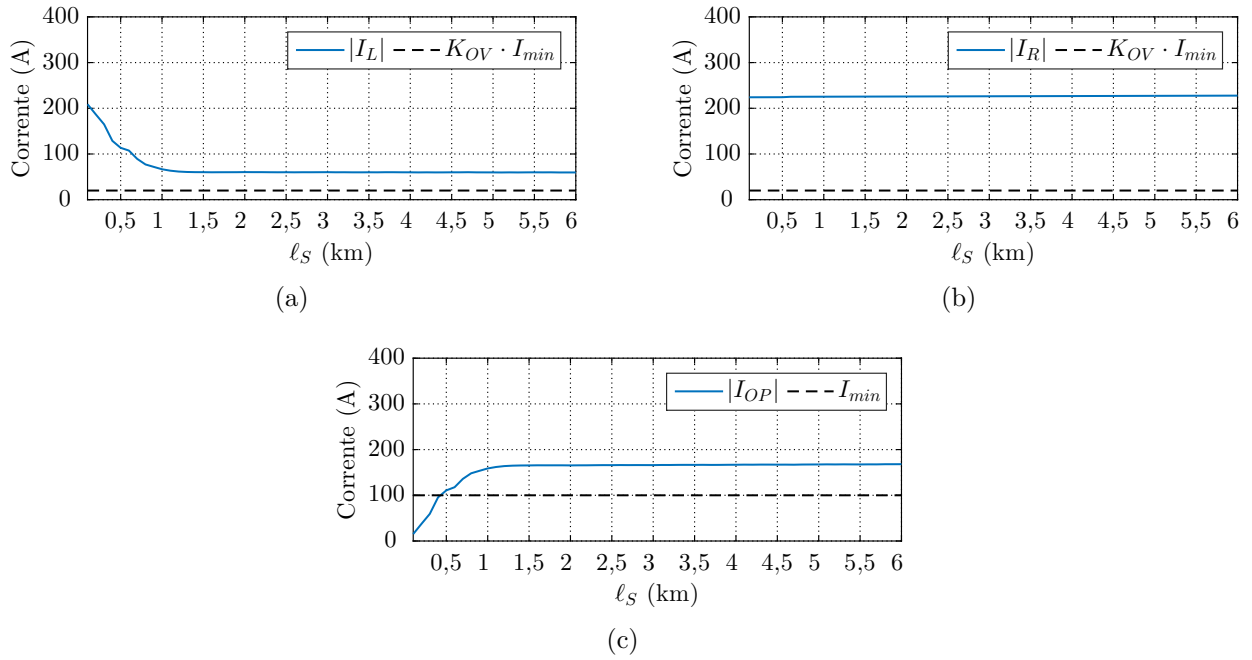
**Figura 6.49.** Caso 5: Linha Híbrida com Cinco Trechos: Falta externa na metade da LT ADJ1 - Condição 1: (a)  $|I_L|$  (b)  $|I_R|$  (c)  $|I_{OP}|$ .



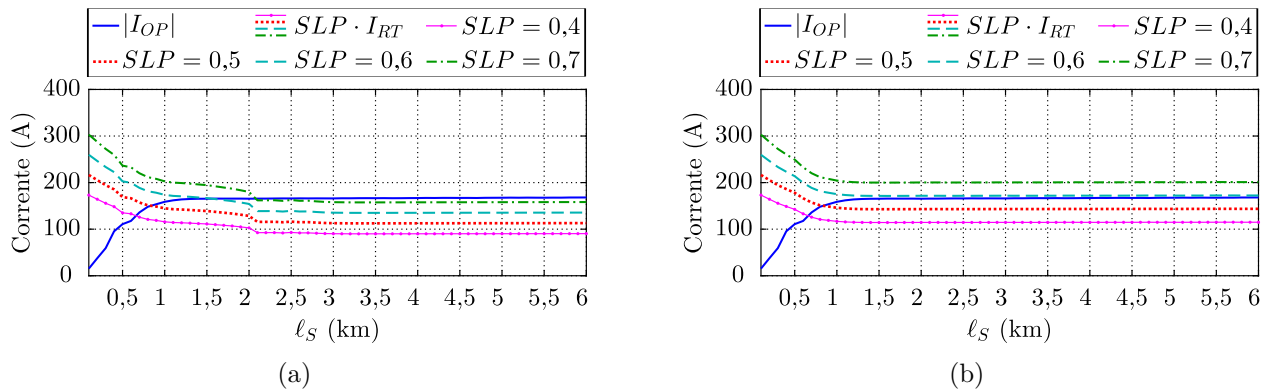
**Figura 6.50.** Caso 5: Linha Híbrida com Cinco Trechos: Falta externa na metade da LT ADJ1 - Condição 2:  $|I_{OP}|$  e  $SLP \cdot I_{RT}$  para: (a)  $\tau = \tau_a$ . (b)  $\tau = \tau_h$ .



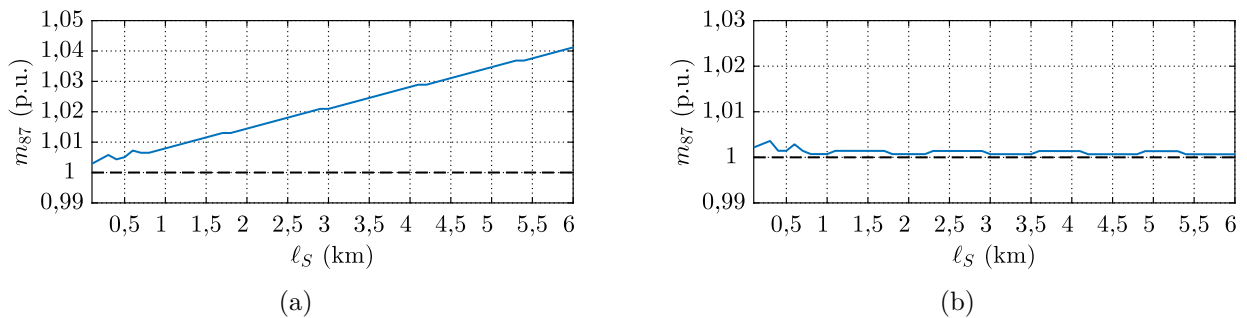
**Figura 6.51.** Caso 5: Linha Híbrida com Cinco Trechos: Falta externa na metade da LT ADJ1 - Condição 3:  $m_{87}$  para: (a)  $\tau = \tau_a$ . (b)  $\tau = \tau_h$ .



**Figura 6.52.** Caso 5: Linha Híbrida com Cinco Trechos: Falta externa na metade da LT ADJ2 - Condição 1: (a)  $|I_L|$  (b)  $|I_R|$  (c)  $|I_{OP}|$ .



**Figura 6.53.** Caso 5: Linha Híbrida com Cinco Trechos: Falta externa na metade da LT ADJ2 - Condição 2:  $|I_{OP}|$  e  $SLP \cdot I_{RT}$  para: (a)  $\tau = \tau_a$ . (b)  $\tau = \tau_h$ .



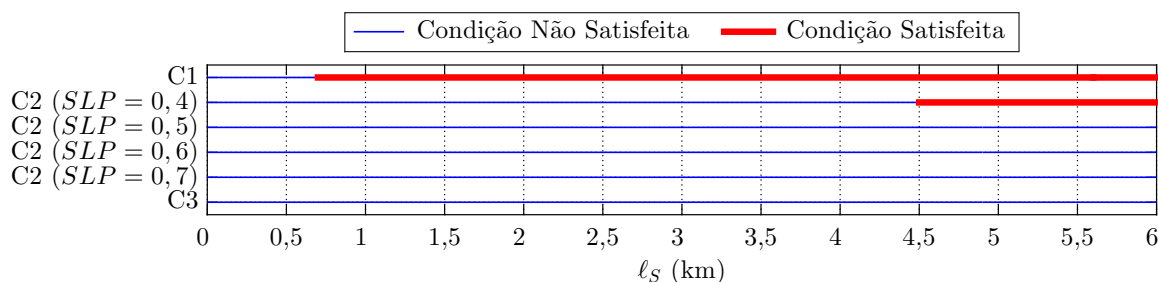
**Figura 6.54.** Caso 5: Linha Híbrida com Cinco Trechos: Falta externa na metade da LT ADJ2 - Condição 3:  $m_{87}$  para: (a)  $\tau = \tau_a$ . (b)  $\tau = \tau_h$ .

## 6.9 AVALIAÇÃO GLOBAL

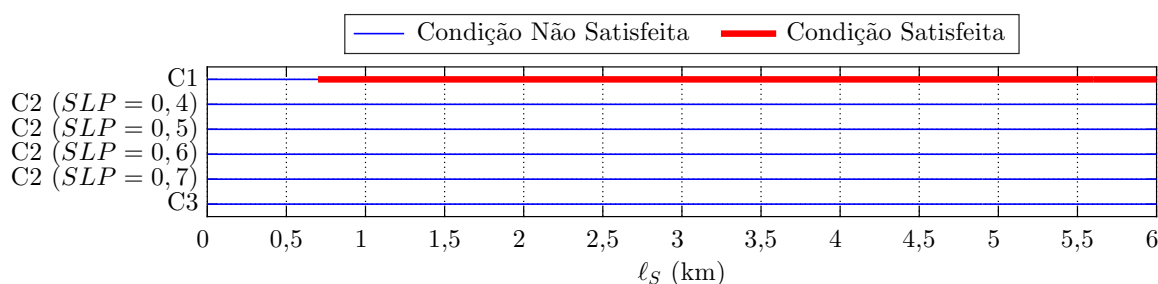
Nesta seção, realiza-se uma avaliação global dos Casos 2.1, 2.2, 3, 4 e 5. Para tanto, com base nos resultados apresentados nas Seções 6.4, 6.6, 6.7 e 6.8, identifica-se quais são os valores de comprimento de trecho subterrâneo  $\ell_S$  em que cada condição da lógica da TW87 é satisfeita. Dessa forma, criam-se gráficos das *word bit* das condições da lógica da TW87, sendo C1 a Condição 1, C2 a Condição 2 e C3 a Condição 3. Em todas as análises serão avaliadas faltas externas. Sendo assim, espera-se que as condições não sejam satisfeitas.

Das Figuras 6.55, 6.56, 6.57 e 6.58, observa-se que a Condição 1 é satisfeita ainda no primeiro quilômetro de trecho subterrâneo. Para faltas na metade da LT ADJ1, quando o ajuste  $\tau = \tau_a$  a Condição 2 seria setada para  $SLP = 0,4$  e  $\ell_S > 4,5$  km. Tal fato decorre da perda da OV de saída. Porém, ao ajustar  $\tau = \tau_h$ , a Condição 2 não seria satisfeita, conforme esperado. De fato, de acordo com a Tabela 5.2, para  $SLP > 0,305$  garantiria que essa condição não fosse satisfeita. Percebe-se que para faltas externas na metade da LT ADJ2 a Condição 2 é satisfeita indevidamente mais vezes quando comparado a faltas externas na LT ADJ1. De fato, devido à presença de um trecho subterrâneo próximo da Barra R, próximo da falta, ocorre uma reflexão de OV nessa barra que é contabilizada pela TW87, implicando na necessidade de um  $SLP > 0,519$  para que essa condição não seja satisfeita. Por fim, para as faltas externas em ambas as LTs adjacentes, a Condição 3 não seria satisfeita, conforme previsto na Seção 5.1.2.

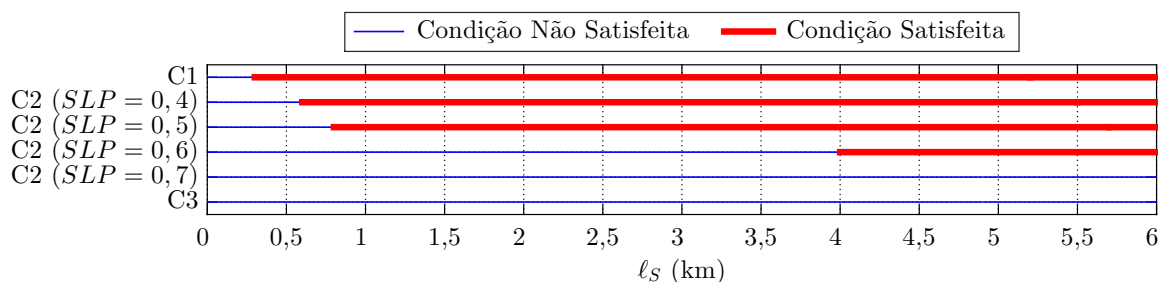
Para o Caso 2.2, os resultados são apresentados nas Figuras 6.59, 6.60, 6.61 e 6.62. Nota-se que novamente, a Condição 1 é satisfeita para  $\ell_S = 0,7$  e  $0,3$  km para faltas externas na metade das LTs ADJ1 e ADJ2, respectivamente. Ao comparar as Figuras 6.55 e 6.59, conclui-se que a Condição 2 seria satisfeita para um menor valor de  $\ell_S$  para o Caso 2.2 do que para o Caso 2.1. Tal fato se deve a perda da OV acontecer para menores valores de  $\ell_S$ , conforme foi explicado na Seção 5.1.1. Analogamente, das Figuras 6.57 e 6.61, conclui-se que o efeito da perda da OV de saída devido a forma com que o ajuste  $\tau$  é parametrizado, aproximando a linha híbrida por uma LT aérea, faz com que a Condição 2 seja satisfeita para  $SLP = 0,6$  e  $0,7$  quando  $\ell_S > 2,5$  e  $3,5$  km para faltas externas na LT ADJ2 no Caso 2.2, e tal fato acontece para maiores valores de  $\ell_S$  ou não se é observado no Caso 2.1. No que se refere a Condição 3, novamente, em todos as faltas externas em ambas as LTs adjacentes, essa condição não é satisfeita.



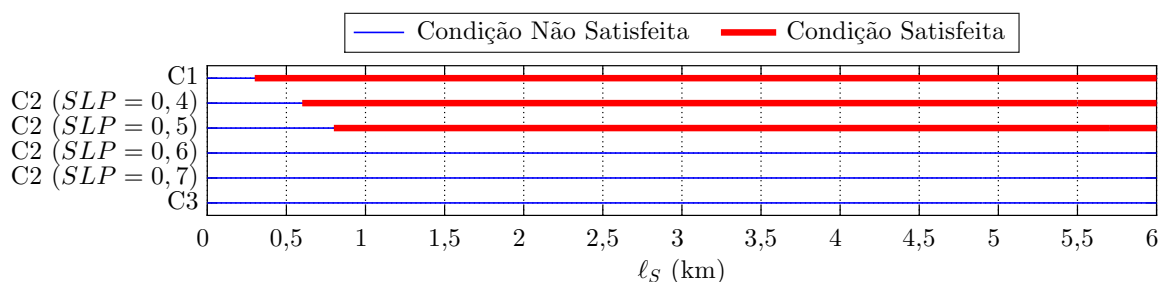
**Figura 6.55.** Caso 2.1: Linha Híbrida com Dois Trechos - Comprimento Total Fixo e Trecho Subterrâneo Complementar - Falta externa na metade da LT ADJ1 - Ajuste  $\tau = \tau_a$ .



**Figura 6.56.** Caso 2.1: Linha Híbrida com Dois Trechos - Comprimento Total Fixo e Trecho Subterrâneo Complementar - Falta externa na metade da LT ADJ1 - Ajuste  $\tau = \tau_h$ .

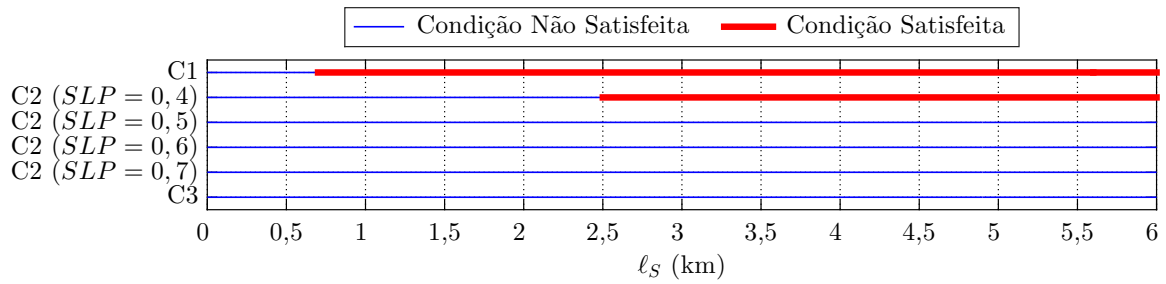


**Figura 6.57.** Caso 2.1: Linha Híbrida com Dois Trechos - Comprimento Total Fixo e Trecho Subterrâneo Complementar - Falta externa na metade da LT ADJ2 - Ajuste  $\tau = \tau_a$ .

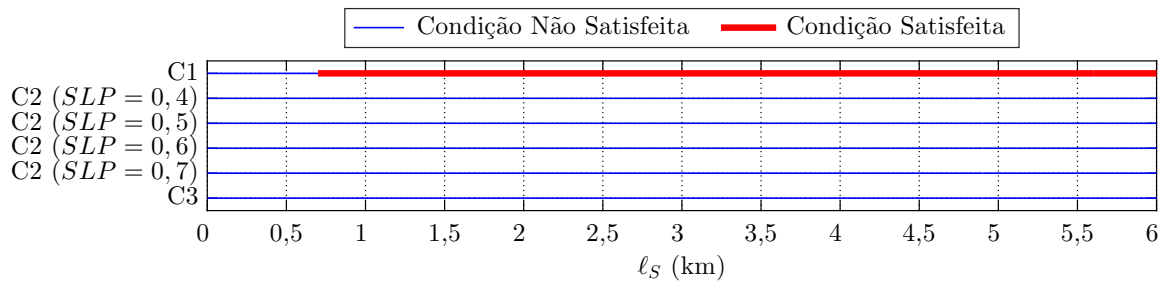


**Figura 6.58.** Caso 2.1: Linha Híbrida com Dois Trechos - Comprimento Total Fixo e Trecho Subterrâneo Complementar - Falta externa na metade da LT ADJ2 - Ajuste  $\tau = \tau_h$ .

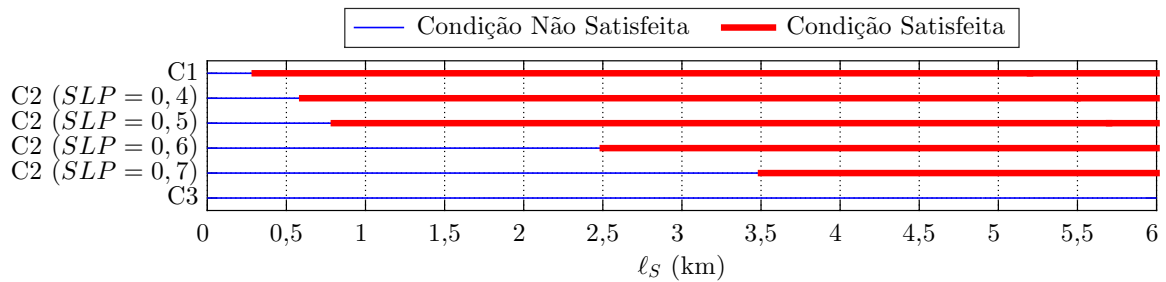
Nas Figuras 6.63 a 6.66, apresentam-se os resultados para o Caso 3 em que a linha híbrida é composta por três trechos. A Condição 1 é satisfeita para  $\ell_S > 0,7$  km, e a Condição 2 é satisfeita apenas quando  $SLP = 0,4$ ,  $\ell_S > 4,2$  km e  $\tau = \tau_a$ , devido a perda da OV de



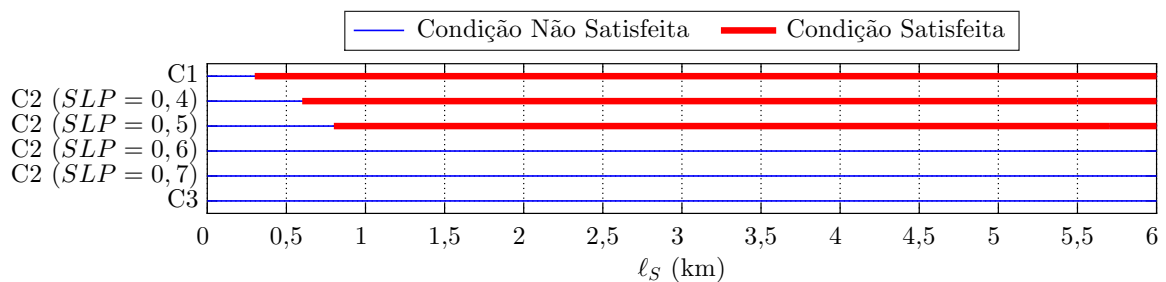
**Figura 6.59.** Caso 2.2: Linha Híbrida com Dois Trechos - Comprimento Total Variável e Trecho Subterrâneo Adicional - Falta externa na metade da LT ADJ1 - Ajuste  $\tau = \tau_a$ .



**Figura 6.60.** Caso 2.2: Linha Híbrida com Dois Trechos - Comprimento Total Variável e Trecho Subterrâneo Adicional - Falta externa na LT metade da ADJ1 - Ajuste  $\tau = \tau_h$ .



**Figura 6.61.** Caso 2.2: Linha Híbrida com Dois Trechos - Comprimento Total Variável e Trecho Subterrâneo Adicional - Falta externa na LT metade da ADJ2 - Ajuste  $\tau = \tau_a$ .



**Figura 6.62.** Caso 2.2: Linha Híbrida com Dois Trechos - Comprimento Total Variável e Trecho Subterrâneo Adicional - Falta externa na metade da LT ADJ2 - Ajuste  $\tau = \tau_h$ .

saída. Quando  $\tau = \tau_h$ , a Condição 2 não seria satisfeita para nenhum dos valores de  $SLP$  analisados. De fato, de acordo com as análises da Seção 5.2, para essa situação de falta a montante da Barra L se  $SLP > 0,305$  garante que a Condição 2 não seja satisfeita (ver Tabela

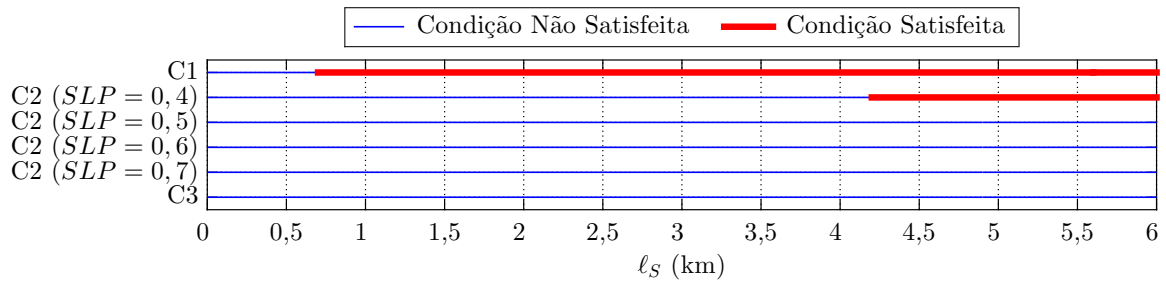
5.2). Analogamente, as mesmas considerações podem ser feitas para faltas na metade da LT ADJ2, a jusante da Barra R, pois de certo modo, existe uma simetria no caso de uma linha híbrida com três trechos. Em outras palavras, para a configuração do sistema teste em análise, as descontinuidades vistas para faltas na LT ADJ1 e ADJ2 são semelhantes com ordem de acontecimento invertida. Por fim, novamente a Condição 3 não seria satisfeita.

Para o Caso 4, em que a linha híbrida é composta por quatro trechos, os resultados são apresentados nas Figuras 6.67 a 6.70. A Condição 1 novamente é satisfeita ainda no primeiro quilômetro de trecho subterrâneo para faltas externas em ambas as LTs adjacentes e configurações de ajuste  $\tau$ . De fato, as variáveis  $|I_L|$ ,  $|I_R|$  e  $|I_{OP}|$  independem do valor de  $\tau$ , conforme pode ser visto em (4.6), (4.7) e (4.8). Ao comparar a situação de falta externa na metade da LT ADJ1, quando  $\tau = \tau_a$  e  $\tau = \tau_h$ , como ilustrado nas Figuras 6.67 e 6.68, percebe-se que ocorre um maior número de situações em que a Condição 2 é satisfeita indevidamente. Tal fato se deve à perda da OV de saída decorrente da parametrização do ajuste aproximando a linha híbrida por uma LT aérea de igual comprimento. Para faltas externas na metade da LT ADJ2, a Condição 2 seria satisfeita indevidamente ainda que  $SLP = 0,7$  tanto para  $\tau = \tau_a$  ou  $\tau = \tau_h$ . De fato, das análises realizadas na Seção 5.2, previu-se que para essa situação necessitaria de  $SLP > 0,710$  para que essa condição não fosse satisfeita. Por fim, novamente a Condição 3 não seria satisfeita em nenhuma das situações analisadas.

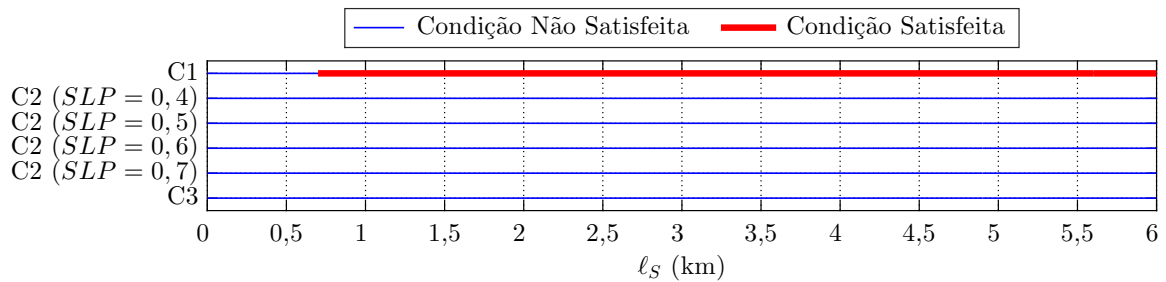
A última análise se trata de uma linha híbrida composta por cinco trechos, os resultados são apresentados nas Figuras 6.71 a 6.74. Nota-se que a Condição novamente é satisfeita ainda no primeiro quilômetro de trecho subterrâneo. Para  $\tau = \tau_h$ , a Condição 2 somente é satisfeita indevidamente para  $SLP = 0,4$  e  $0,5$ , conforme previsto na Tabela 5.2, que se atestou que para esse caso  $SLP > 0,556$  garantiriam que essa condição não fosse satisfeita. A Condição 3 novamente não é satisfeita, tanto para  $\tau = \tau_a$  quanto para  $\tau = \tau_h$ .

Dos resultados analisados, percebe-se que para os valores de  $K_{OV}$  e  $I_{min}$  utilizados (ver Tabela 6.6), a Condição 1 é satisfeita indevidamente para comprimento de trechos subterrâneos maiores que aproximadamente 1 km. Realmente, essa condição visa analisar se as OVs medidas nas barras na LT monitorada possuem energia suficientes para serem consideradas provenientes de uma falta, e sendo, nesta dissertação, as faltas simuladas com ângulo de incidência  $\theta = 90^\circ$  e condições de operação do sistema teste analisado, da Seção 3.5, mostrou-se que a amplitude da

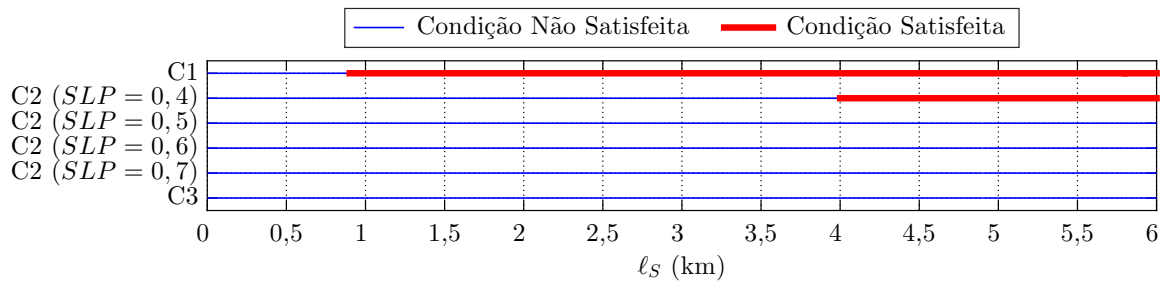




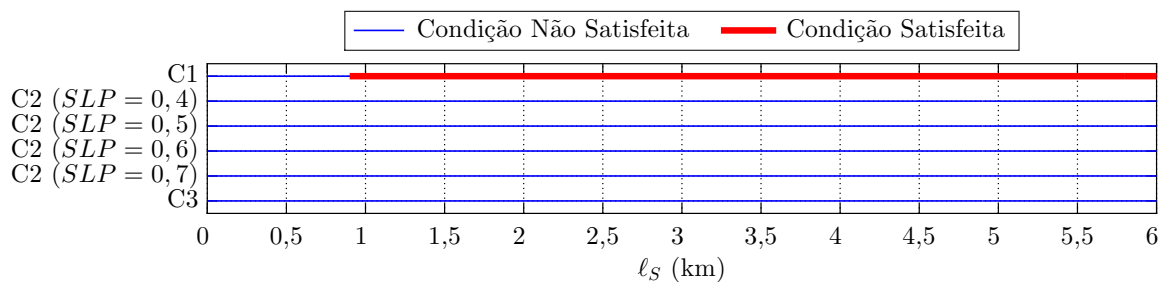
**Figura 6.63.** Caso 3: Linha Híbrida com Três Trechos - Falta externa na metade da LT ADJ1 - Ajuste  $\tau = \tau_a$ .



**Figura 6.64.** Caso 3: Linha Híbrida com Três Trechos - Falta externa na metade da LT ADJ1 - Ajuste  $\tau = \tau_h$ .

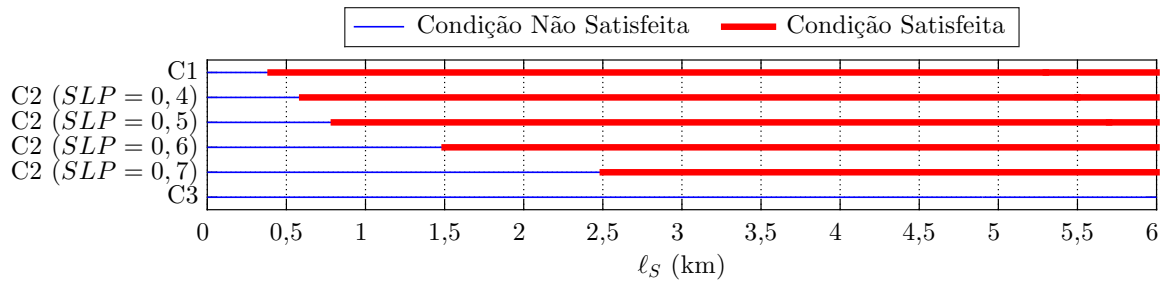


**Figura 6.65.** Caso 3: Linha Híbrida com Três Trechos - Falta externa na metade da LT ADJ2 - Ajuste  $\tau = \tau_a$ .

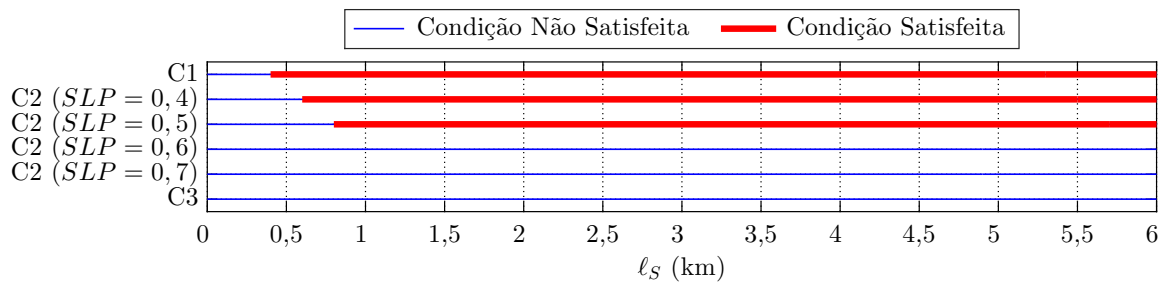


**Figura 6.66.** Caso 3: Linha Híbrida com Três Trechos - Falta externa na metade da LT ADJ2 - Ajuste  $\tau = \tau_h$ .

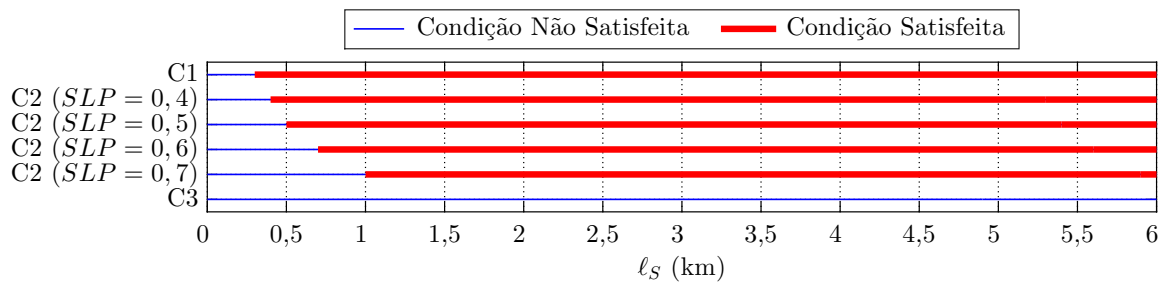
OV lançada  $i_{OV} \approx 236,3226$  A. Ao analisar as alterações de amplitudes das OVs ao longo de uma linha híbrida nas discontinuidades entre trechos aéreos e subterrâneos devido a diferença de parâmetros elétricos dos trechos, mostrou-se que a menor OV esperada em qualquer uma



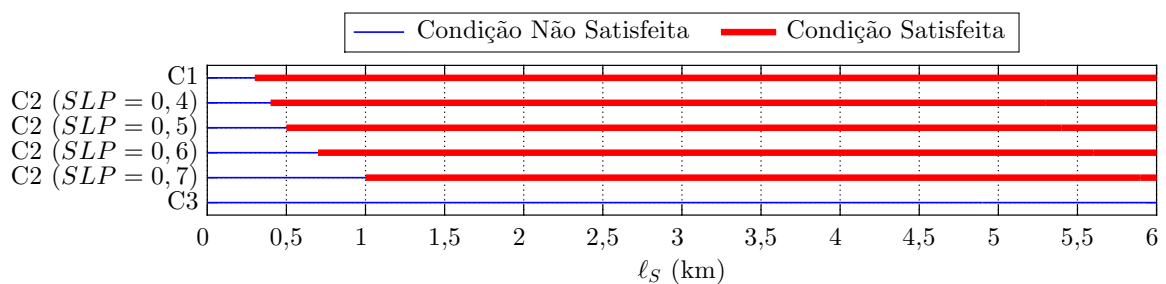
**Figura 6.67.** Caso 4: Linha Híbrida com Quatro Trechos - Falta externa na metade da LT ADJ1 - Ajuste  $\tau = \tau_a$ .



**Figura 6.68.** Caso 4: Linha Híbrida com Quatro Trechos - Falta externa na metade da LT ADJ1 - Ajuste  $\tau = \tau_h$ .

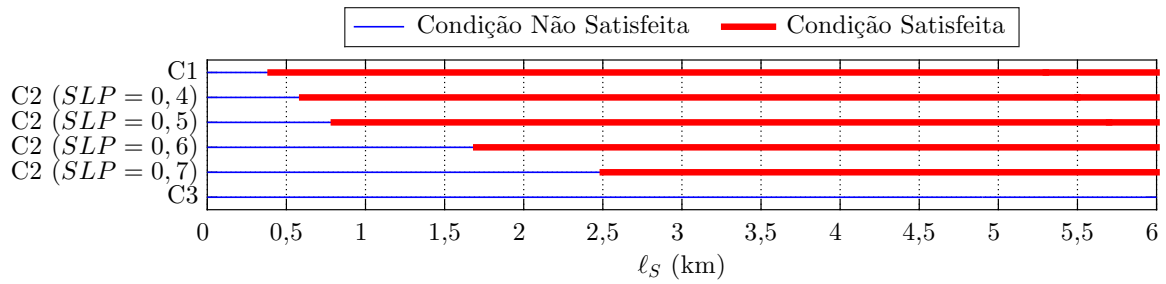


**Figura 6.69.** Caso 4: Linha Híbrida com Quatro Trechos - Falta externa na metade da LT ADJ2 - Ajuste  $\tau = \tau_a$ .

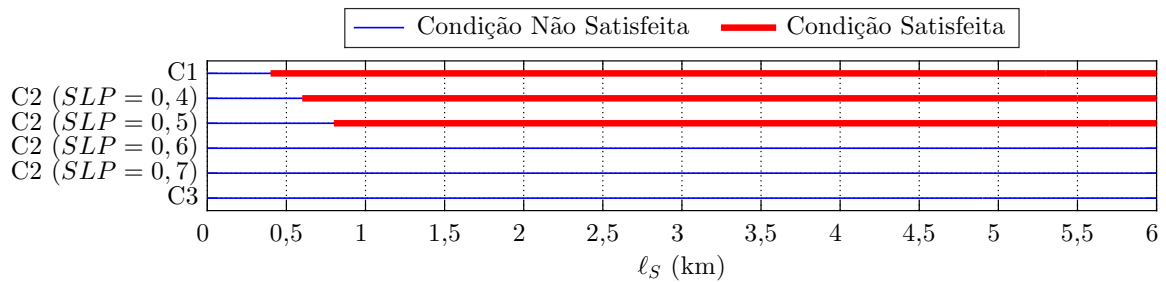


**Figura 6.70.** Caso 4: Linha Híbrida com Quatro Trechos - Falta externa na metade da LT ADJ2 - Ajuste  $\tau = \tau_h$ .

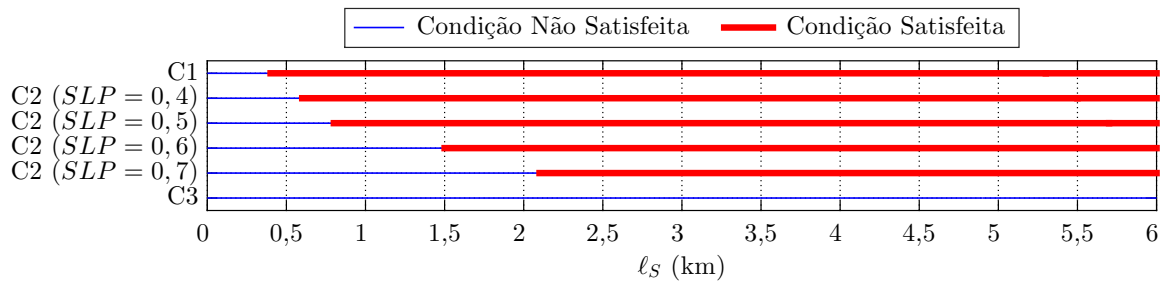
das barras da LT monitorada com essa podendo ser uma linha híbrida de até cinco trechos seria de aproximadamente  $0,285 \cdot i_{OV}$  e, conseqüentemente, espera-se um  $I_{OP}$  mínimo de aproximadamente  $0,467 \cdot i_{OV}$ . Dessa forma, para os valores de coeficientes de transmissão e reflexão do



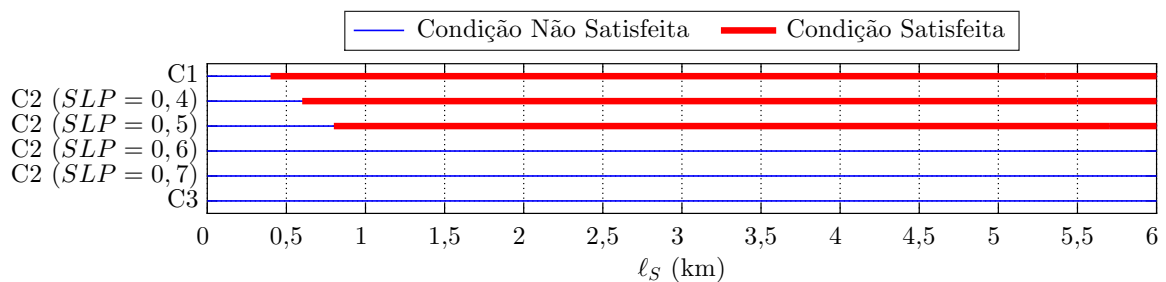
**Figura 6.71.** Caso 5: Linha Híbrida com Cinco Trechos - Falta externa na metade da LT ADJ1 - Ajuste  $\tau = \tau_a$ .



**Figura 6.72.** Caso 5: Linha Híbrida com Cinco Trechos - Falta externa na metade da LT ADJ1 - Ajuste  $\tau = \tau_h$ .



**Figura 6.73.** Caso 5: Linha Híbrida com Cinco Trechos - Falta externa na metade da LT ADJ2 - Ajuste  $\tau = \tau_a$ .



**Figura 6.74.** Caso 5: Linha Híbrida com Cinco Trechos - Falta externa na metade da LT ADJ2 - Ajuste  $\tau = \tau_h$ .

sistema teste analisado, a Condição 1 realmente seria satisfeita. Tal condição pode ser afetada a depender do valor dos ajustes  $K_{OV}$  e  $I_{min}$ , e características da falta, como ângulo de incidência  $\theta$  e resistência de falta  $R_F$ , e também, de acordo com as condições do SEE analisado,

como impedâncias de surto de sequência positiva e zero  $Z_{S,1}$  e  $Z_{S,0}$ , respectivamente, e tensão nominal  $V_{SYS}$ , que alteram a amplitude da OV lançada pela falta.

A Condição 2 depende, principalmente, do ajuste  $\tau$  e do número de trechos da linha híbrida. Dos resultados, conclui-se que ao parametrizar a TW87 aproximando uma linha híbrida por uma LT aérea, ou seja,  $\tau = \tau_a$ , a depender da diferença  $\kappa$  entre o tempo de propagação da linha híbrida  $\tau_h$  e da LT aérea  $\tau_a$  pode ocorrer da função perder total ou parcialmente a OV de saída, comprometendo assim o cálculo de  $I_{RT}$ , o que se verificou que pode levar o produto  $SLP \cdot I_{RT} < I_{OP}$  em casos de faltas externas, criando assim uma situação em que a TW87 poderia atuar indevidamente. Além disso, o número de trechos aéreos e subterrâneos que compõem a linha híbrida se relaciona com os valores de  $I_{OP}$  e  $I_{RT}$  devido as alterações de amplitude nas descontinuidades entre trechos. Dessa forma, um maior número de trechos implica em uma maior diferença entre a OV esperada pela TW87, que em sua concepção considera a LT monitorada homogênea. Tal fato, conforme verificado, cria situações em que a amplitude do sinal de operação pode superar a amplitude do sinal de restrição para faltas externas.

Por fim, para a Condição 3, foi possível concluir dos resultados que, para faltas externas, quando a TW87 é parametrizada com  $\tau = \tau_a$  são observados erros em  $m_{87}$ , porém esses erros não tornam a localização de faltas estimada pela função em valores internos a LT monitorada. Dessa forma, para faltas externas, a função poderia até ser parametrizada aproximando uma linha híbrida por uma LT aérea que não implicaria em consequências na segurança, mas poderia causar restrições em casos de faltas internas próximas das barras da LT monitorada, conforme mostrado na Seção 5.1.2. Se a TW87 for parametrizada considerando as particularidades da linha híbrida, ou seja,  $\tau = \tau_h$ , ao analisar os resultados, percebe-se que  $m_{87} \approx 0$  ou 1 p.u. para faltas a montante da Barra L e a jusante da Barra R, respectivamente, conforme esperado. Dessa forma, em ambos os casos de ajustes para  $\tau$ , a Condição 3 não foi satisfeita indevidamente para faltas externas para as situações analisadas.

## 6.10 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo, foram analisados os resultados obtidos com aplicação da TW87 em linhas híbridas por meio de 1790 faltas internas e externas simuladas em um sistema teste no ATP para diferentes composições de LT monitorada. Foram criados cinco casos de acordo com o número de trechos que compunha a linha híbrida monitorada. Além disso, os ajustes da função foram parametrizados antes dos resultados serem analisados.

Os resultados foram analisados com base na lógica de operação da função TW87, sendo possível observar que quando a TW87 é aplicada em linhas híbridas, para algumas situações de faltas externas, a função poderia atuar indevidamente. Também foram apresentadas análises das condições adicionais de segurança (CAS), em que se observou que para as situações colocadas de sistema teste e curtos-circuitos, a aproximação de uma linha híbrida por uma LT aérea para faltas internas não resultaria em inversão do sinal da tensão de polarização mantendo a condição satisfeita ou perda de sensibilidade da OC87. Por fim, foram analisados os valores de comprimento de trecho subterrâneo  $\ell_S$  em que as condições principais da TW87 avaliadas foram satisfeitas, demonstrando situações nas quais poderiam ocorrer atuações indevidas.

# CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Nesta dissertação, apresentou-se uma avaliação do desempenho da função de proteção diferencial de LTs baseada na teoria de OV, a TW87, quando aplicada em linhas híbridas. A TW87 foi fundamentada, a implementação foi descrita, as particularidades operacionais foram comentadas, e por fim, o seu desempenho foi avaliado por meio de 1790 faltas internas e externas simuladas no ATP, considerando como variáveis o número de trechos aéreos e subterrâneos, e o(s) comprimento(s) desse(s) trecho(s). Para tanto, criaram-se cinco casos com base no número de trechos da linha híbrida, e então, realizaram-se testes para diferentes valores dos ajustes da TW87: tempo de propagação das OV, o  $\tau$ , e fator de restrição, o *SLP*. Dessa forma, buscou-se estudar a influência do número de trechos que compõem a linha híbrida sobre a TW87, destacando os cuidados a serem tomados durante o ajuste da função.

Dos resultados, verificou-se que uma OV que é lançada após a ocorrência de uma falta tem sua amplitude alterada nas junções entre trechos aéreos e subterrâneos ao longo da linha híbrida. Dessa forma, as amplitudes das OV que são medidas nas barras da LT monitorada são diferentes das esperadas para o caso de uma LT aérea. Sabe-se ainda que, o grau de atenuação e/ou amplificação das OV nessas discontinuidades está relacionado com os valores dos parâmetros elétricos de cada trecho, os quais podem ser traduzidos na forma de coeficientes de transmissão e reflexão, além disso, pode-se relacionar o grau das alterações de amplitude das OV com o número de junções ao longo da linha híbrida. Por exemplo, para o caso em que a linha híbrida é composta por cinco trechos, observou-se que a OV medida em uma barra da LT monitorada chegou a ser atenuada em 70% da amplitude OV lançada. Sendo assim, ao utilizar a TW87 em linhas híbridas, devem ser tomados cuidados tanto na topologia da linha híbrida quanto na parametrização dos ajustes, para que a função não perca sensibilidade em situações de faltas internas.

Outras consequências das alterações de amplitude das OV's ao longo de uma linha híbrida para a TW87 são percebidas nos sinais de operação e restrição. Idealmente, para uma falta externa em uma LT aérea, a amplitude do sinal de operação tende a ser próximo de zero e a amplitude do sinal de restrição próximo do dobro da amplitude da OV lançada pelo curto-circuito. Assim, para essa situação, o produto do sinal de restrição pelo  $SLP$  seria maior que o sinal de operação para  $SLP > 0$ , garantindo a correta restrição da função de proteção. Porém, ao aplicar a mesma falta externa em uma linha híbrida, observou-se uma elevação no sinal de operação e diminuição, ora elevação, do sinal de restrição. Tal fato implicou em valores mínimos maiores que zero para o  $SLP$  visando evitar atuações indevidas. Por exemplo, para o caso de uma linha híbrida com quatro trechos, ao realizar uma falta externa a jusante da Barra Remota (Barra R), observou-se que necessitaria de um  $SLP > 0,710$  para que a função não atuasse indevidamente. Por fim, devido a diferença de velocidades de propagação  $v_p$  entre trechos aéreos e subterrâneos, existe uma consequente diferença entre os tempos de propagação de uma linha híbrida  $\tau_h$  e uma LT aérea  $\tau_a$  de igual comprimento. Dessa forma, ao parametrizar a função aproximando essas duas LTs, a diferença criada entre os valores de  $\tau_h$  e  $\tau_a$  se repercute no cálculo da amplitude do sinal de restrição  $I_{RT}$  em situações de faltas externas, podendo causar assim atuações indevidas. Portanto, conclui-se como necessários cuidados acerca da topologia da linha híbrida e dos valores dos ajustes  $SLP$  e  $\tau$  utilizados, visando manter a segurança da função de proteção.

No que se refere a localização de faltas estimada pela função TW87  $m_{87}$ , dos resultados, observaram-se erros quando foi realizada a aproximação de uma linha híbrida por uma LT aérea durante a parametrização do ajuste  $\tau$ . No entanto, para faltas externas, os erros apresentados não transformaram a estimativa de localização da falta em valores que caracterizam faltas internas à LT monitorada, não induzindo atuações indevidas. Para faltas internas, os erros apresentados também não comprometeriam a atuação da função, com exceção de faltas internas próximas das barras da LT monitorada, sendo o nível dessa proximidade relacionado com o valor da diferença entre o ajuste  $\tau$  parametrizado com a aproximação e tempo de propagação da linha híbrida protegida. Portanto, conclui-se que a TW87 se mostrou robusta em relação a essa condição de segurança, operando corretamente nos casos avaliados mesmo quando ajustada com base em aproximações da linha híbrida por uma LT aérea.

Por fim, para os testes realizados, não foram observadas restrições quanto as condições adicionais de segurança (CAS), supervisão da tensão de polarização (VPOL) e supervisão de sobrecorrente (função OC87) durante a aplicação da TW87 em linhas híbridas. Para faltas internas, concluiu-se que a presença de um trecho subterrâneo não inverteria o sinal da tensão de polarização  $V_{POL}$  em relação a amplitude do sinal de operação  $I_{OP}$  e, dessa forma, a supervisão VPOL seria satisfeita, conforme esperado. Não se observou variações significativas nas grandezas relacionadas a função OC87 quando essa foi aplicada em linhas híbridas. De fato, o que poderia comprometer a segurança dessa função seria a diferença das impedâncias série da linha híbrida e da LT aérea, porém para o sistema teste analisado, e para linhas híbridas em geral, o parâmetro elétrico mais discrepante é a capacitância *shunt*, sendo esse parâmetro não considerado na formulação da OC87 devido a utilização do modelo RL para LTs. Conclui-se então que, para as situações aqui analisadas, as CAS não necessitariam de significativos cuidados, porém outras aplicações requereriam aprofundamentos na busca de possíveis consequências.

Portanto, são observadas consequências para a TW87 ao aplicá-la em linhas híbridas que vão desde desde a etapa de ajuste da função ao seu próprio desempenho frente a essa utilização para a qual não foi projetada. Sendo assim, torna-se claro o amplo campo de pesquisa advinda das análises dessa aplicação. Desse modo, como continuidade do presente trabalho, sugerem-se as seguintes atividades:

- Realizar os testes com a modelagem do trecho subterrâneo utilizando o *Cable Parameters* (LCC) do *Alternative Transient Program* (ATP);
- Avaliar o desempenho da função TW87 aplicada em linhas híbridas com trechos subla-custres e submarinos;
- Avaliar o desempenho da função TW87 aplicada em linhas híbridas utilizando registros de faltas reais;
- Avaliar o desempenho da função TW87 aplicada em linhas híbridas utilizando o relé SEL-T400L;
- Propor adaptações no princípio e/ou lógica de operação da TW87 visando contemplar a aplicação em linhas híbridas de forma generalista;
- Avaliar a atenuação das OV's ao percorrerem trechos subterrâneos e/ou submarinos.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBOUD, R.; DOLEZILEK, D. Time-Domain Technology - Benefits to Protection, Control, and Monitoring of Power Systems. In: INTERNATIONAL CONFERENCE AND EXHIBITION - RELAY PROTECTION AND AUTOMATION FOR ELECTRIC POWER SYSTEMS. Saint-Petersburg, Russia, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 16 and 18.
- ADAMIAK, M. G.; ALEXANDER, G. E.; PREMARLANI, W. A New Approach to Current Differential Protection for Transmission Lines. In: PROTECTIVE RELAYING COMMITTEE MEETING. Portsmouth, NH, 1998. Citado 2 vezes nas páginas 7 and 18.
- AGGARWAL, R. K.; JOHNS, A. T. The Development of a New High Speed 3-Terminal Line Protection Scheme. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 1, n. 1, jan. 1986. Citado 2 vezes nas páginas 7 and 18.
- ANDERSON, P. M. *Power System Protection*. [S.l.]: John Wiley & Sons Inc., 1999. Citado na página 2.
- ANEEL. *Relatório de Análise: Desligamentos Forçados do Sistema de Transmissão*. Brasília, Brasil: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2017. Citado na página 1.
- ARAÚJO, A. E. A.; NEVES, W. L. A. *Cálculo de Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Energia*. [S.l.]: Editora UFMG, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 19 and 22.
- BEWLEY, L. V. Traveling Waves on Transmission Systems. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, v. 50, n. 2, jun. 1931. Citado na página 30.
- BUCCO, D.; SANDEN, C.; TORRES, A.; WONG, E.; BELL, J.; FISCHER, N.; THOMPSON, J. Protection Challenges for North America's First Combined Cable/Overhead Double-Circuit 500 kV Transmission Line with Mutual Coupling. In: 70TH ANNUAL CONFERENCE FOR PROTECTIVE RELAY ENGINEERS (CPRE). College Station, TX, USA, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 9 and 18.
- CLARKE, E. Circuit Analysis of A-C Power systems. *General Electric, Schenectady, NY*, 1950. Citado 2 vezes nas páginas 32 and 35.
- CROSSLEY, P. A.; MCLAREN, P. G. Distance Protection Based on Traveling Waves. *IEEE Power Engineering Review*, PER-3, 1983. Citado 3 vezes nas páginas 10, 12, and 18.
- DARWISH, H. A.; TAALAB, A. I.; AHMED, E. S. Investigation of Power Differential Concept for Line Protection. *IEEE Transactions On Power Delivery*, v. 20, n. 2, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 8 and 18.
- DOMMEL, H.; MICHELS, J. M. High Speed Relaying Using Traveling Wave Transient Analysis. *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, A78, feb. 1978. Citado 3 vezes nas páginas 10, 11, and 18.

- DOMMEL, H. W. *Electromagnetic Transients Program: Reference Manual: (EMTP Theory Book)*. [S.l.]: Bonneville Power Administration, 1986. Citado na página 70.
- DORF, R. C.; SVOBODA, J. A. *Introduction to Eletric Circuits*. 8. ed. USA: John Wiley & Sons Inc., 2010. Citado 2 vezes nas páginas 28 and 44.
- EASTVED, R. B. The Need for Ultra-Fast Fault Clearing. In: 3rd ANNUAL WESTERN PROTECTIVE RELAY CONFERENCE. Spokane, USA, 1976. Citado na página 2.
- EPE. *Empresa de Pesquisa Energética. Série: Estudos da Demanda*. 2017. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes>>. Citado 3 vezes nas páginas 1, 32, and 72.
- ERNST, L. J.; HINMAN, W. L.; QUAM, D. H.; THORP, J. S. Charge Comparison Protection of Transmission Lines - Relaying Concepts. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 7, n. 4, oct. 1992. Citado 2 vezes nas páginas 7 and 18.
- FISCHER, N.; SKENDZIC, V.; MOXLEY, R.; NEEDS, J. Protective relay traveling wave fault location. In: 11TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON DEVELOPMENTS IN POWER SYSTEM PROTECTION. Birmingham, UK, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 10, 11, and 71.
- GAJIC, Z.; BRNCIC, I.; EINARSSON, T.; LUDQVIST, B. Practical Experience from Multiterminal Line Differential Protection Installations. In: RELAY PROTECTION AND SUBSTATION AUTOMATION OF MODERN POWER SYSTEMS. Cheboksary, Russia, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 8 and 18.
- GAJIC, Z.; BRNCIC, I.; RIOS, F. Experience with Multiterminal Line Differential Protection Installed on Series Compensated, 400 kV Line with FiveEnds. In: ACTUAL TRENDS IN DEVELOPMENT OF POWER SYSTEM PROTECTION AND AUTOMATION. Moscow, Russia, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 8 and 18.
- GLOVER, J. D.; SARMA, M. S.; OVERBYE, T. J. *Power Systems Analysis and Design*. 4. ed. [S.l.]: CL - Engineering, 2009. Citado na página 19.
- HEEDMAN, D. E. Propagation on Overhead Transmission Lines I - Theory of Modal Analysis. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 84, n. 3, mar. 1965. Citado na página 33.
- JOHNS, A. New Ultra-High-Speed Directional Comparison Technique for the Protection of E.H.V. Transmission Lines. *IEEE Proceedings C - Generation, Transmission and Distribution*, v. 127, n. 4, jul. 1980. Citado 3 vezes nas páginas 10, 11, and 18.
- KASZTENNY, B.; BENMOUYAL, G.; ALTUVE, H. J.; FISCHER, N. *Tutorial on Operating Characteristics of Microprocessor-Based Multiterminal Line Current Differential Relays*. Wrocław University of Technology, Wrocław, Poland, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 8 and 18.
- KASZTENNY, B.; GUZMÁN, A.; FISHER, N.; MYNAM, M. V.; TAYLOR, D. Pratical Setting Considerations for Protective Relays that use Incremental Quantities and Travelling Waves. In: 43th ANNUAL WESTERN PROTECTIVE RELAY CONFERENCE. [S.l.], 2016. Citado 7 vezes nas páginas 14, 18, 49, 66, 73, 74, and 75.

- KASZTENNY, B.; GUZMÁN, A.; MYNAM, M. V.; JOSHI, T. Locating Faults Before the Breaker Opens - Adaptive Autoreclosing Based on the Locating of the Fault. In: 44th ANNUAL WESTERN PROTECTIVE RELAY CONFERENCE. Spokane, USA, 2017. Citado 9 vezes nas páginas 3, 15, 16, 18, 24, 26, 30, 53, and 59.
- LOPES, F. V.; RIBEIRO, C. M. S.; RIBEIRO, J. P. G.; LEITE JR., E. J. S. Performance Evaluation of the Traveling Wave-Based Differential Protection When Applied on Hybrid Transmission Lines. In: 14th INTERNATIONAL CONFERENCE ON DEVELOPMENTS IN POWER SYSTEMS PROTECTION. Belfast, Irlanda do Norte, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 16 and 18.
- LOPES, F. V.; SILVA, K. M.; LEITE JR., E. J. S.; OLIVEIRA, A. E. Análise de Sensibilidade Paramétrica da Proteção Diferencial de Linhas Baseada em Ondas Viajantes. In: SEMINÁRIO TÉCNICO DE PROTEÇÃO E CONTROLE. Brasília, Brasil, 2016. Citado 4 vezes nas páginas 3, 14, 18, and 37.
- MOLAS, E. C. *Proteção Diferencial de Linhas de Transmissão no Plano Alfa: Modelagem e Simulação*. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — UnB: Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, nov. 2014. Citado na página 6.
- NISE, N. S. *Engenharia de Sistemas de Controle*. 3. ed. [S.l.]: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2002. Citado 2 vezes nas páginas 22 and 27.
- PIRES, A. O.; MATOS, R. R.; CRUZ, I. H. da. Desenvolvimento de Metodologia para a Identificação de Falhas por Ondas Viajantes em Linhas Mistas. In: SEMINÁRIO TÉCNICO DE PROTEÇÃO E CONTROLE. Brasília, Brasil, 2016. Citado 4 vezes nas páginas 15, 18, 44, and 90.
- RIBEIRO, C. M. S.; LOPES, F. V.; RIBEIRO, J. P. G. Traveling Wave-Based Differential Protection Applied to Hybrid Transmission Lines: Performance and Setting Studies. In: VII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS. Niterói, Brasil, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 16 and 18.
- RIBEIRO, J. P. G.; LOPES, F. V.; LEITE JR., E. J. S. Influência da Componente CC de Decaimento Exponencial sobre o Desempenho de Elementos Direcionais Aplicados no Domínio do Tempo. In: VI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS. Natal, Brasil, 2016. Citado na página 46.
- ROBERTS, J.; TZIOUVARAS, D.; BENMOUYAUL, G.; ALTUVE, H. The Effect of Multiprinciple Line Protection on Dependability and Security. In: SOUTHERN AFRICAN POWER SYSTEM PROTECTION CONFERENCE. Johannesburg, South Africa, 2000. Citado 2 vezes nas páginas 8 and 18.
- SAHA, M. M.; IZYKOWSKI, J.; ROSOLOWSKI, E. *Fault Location on Power Networks*. [S.l.]: Ed. Springer, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 20 and 26.
- SCHWEITZER, E. O.; GUZMÁN, A.; MYNAM, M. V.; SKENDZIC, V.; KASZTENNY, B. Locating Faults by the Traveling Waves They Launch. In: 40th ANNUAL WESTERN PROTECTIVE RELAY CONFERENCE. Spokane, USA, 2013. Citado 5 vezes nas páginas 23, 33, 34, 37, and 38.

- SCHWEITZER, E. O.; KASZTENNY, B.; GUZMÁN, A.; SKENDZIC, V.; MYNAM, M. Speed of Line Protection - Can We Break Free of Phasor Limitations? In: 41st ANNUAL WESTERN PROTECTIVE RELAY CONFERENCE. Spokane, USA, 2014. Citado 17 vezes nas páginas 3, 4, 10, 13, 17, 18, 20, 22, 29, 36, 44, 45, 46, 47, 51, 67, and 80.
- SCHWEITZER, E. O.; KASZTENNY, B.; MYNAM, M. V. Performance of Time-Domain Line Protection Elements on Real-World Faults. In: 42nd ANNUAL WESTERN PROTECTIVE RELAY CONFERENCE. Spokane, USA, 2015. Citado 9 vezes nas páginas iii, 2, 3, 13, 18, 39, 41, 42, and 43.
- SCHWEITZER, E. O.; KASZTENNY, B.; MYNAM, M. V.; GUZMÁN, A.; FISCHER, N.; SKENDZIC, C. Defining and Measuring the Performance of Line Protective Relays. In: 43rd ANNUAL WESTERN PROTECTIVE RELAY CONFERENCE. Spokane, USA, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 14 and 18.
- SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES INC. *SEL-400L Relay Time-Domain Protection Instruction Manual*. Pullman, WA, 2017. Citado 16 vezes nas páginas iii, iv, 4, 15, 17, 18, 33, 37, 38, 40, 41, 43, 44, 48, 50, and 78.
- SEZI, T.; STRUECKER, O. L. A.; CHAGAS, M. Aspectos Práticos e Experiências de Campo no Uso de Relés Diferenciais de Linha Utilizando Sistemas Complexos de Telecomunicação e suas Influências. In: SEMINÁRIO TÉCNICO DE PROTEÇÃO E CONTROLE (IX STPC). Belo Horizonte, Brasil, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 8 and 18.
- SHI, S.; DONG, X.; ZHOU, S. Analysis of Single-Phase-to-Ground Fault Generated Initial Traveling Waves. In: *2005 IEEE/PES Transmission Distribution Conference Exposition: Asia and Pacific*. [S.l.: s.n.], 2005. p. 1–4. ISSN 2160-8636. Citado na página 32.
- SUGIYAMA, T.; KANO, T.; HATATA, M.; AZUMA, S. Development of a PCM current differential relaying system using fiber-optic data transmission. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 103, n. 1, jan. 1984. Citado 2 vezes nas páginas 7 and 18.
- SUN, S. C.; RAY, R. E. A Current Differential Relay System Using Fiber Optics Communications. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 102, n. 2, feb. 1983. Citado 2 vezes nas páginas 6 and 18.
- TAKAGI, T.; BARBAR, J.; KATSUHIKO, U.; SAKAGUCHI, T. Fault Protection Based on Traveling Wave Theory. *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, A77, 1977. Citado 3 vezes nas páginas 10, 11, and 18.
- TAKAGI, T.; YAMAKOSI, Y.; YAMAURA, M.; KONDOW, R.; MATSUSHIMA, T.; MASUI, M. Digital Differential Relaying System for Transmission Line Primary Protection Using Traveling Wave Theory - Its Theory and Field Experience. *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, A79, 1979. Citado 2 vezes nas páginas 10 and 18.
- TZIOUVARAS, D. A.; NEEDS, J. Protection of Mixed Overhead and Underground Cables Lines. In: 12TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON DEVELOPMENTS IN POWER SYSTEM PROTECTION. Copenhagen, Denmark, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 9 and 18.
- WARD, S.; ERWIN, T. *Current Differential Line Protection Setting Considerations*. RFL Electronics Inc., Boonton, New Jersey, 1993. Citado 2 vezes nas páginas 7 and 18.