

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA PROTEÇÃO DIFERENCIAL  
BASEADA EM ONDAS VIAJANTES QUANDO APLICADA EM  
LINHAS COM POUCO MAIS DE MEIO COMPRIMENTO DE  
ONDA**

**JOÃO VICTOR ESPINDOLA COUTO**

**TRABALHO DE GRADUAÇÃO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

Universidade de Brasília  
Faculdade de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Elétrica

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA PROTEÇÃO DIFERENCIAL  
BASEADA EM ONDAS VIAJANTES QUANDO APLICADA EM  
LINHAS COM POUCO MAIS DE MEIO COMPRIMENTO DE  
ONDA**

**JOÃO VICTOR ESPINDOLA COUTO**

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

**APROVADA POR:**

---

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

---

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

---

Eduardo Jorge Silva Leite Junior, M.Sc. (ENE-UnB)  
(Examinador Interno)

Brasília/DF, dezembro de 2017.

## FICHA CATALOGRÁFICA

COUTO, JOÃO VICTOR ESPINDOLA

Avaliação do Desempenho da Proteção Diferencial Baseada em Ondas Viajantes Quando Aplicada em Linhas com Pouco Mais de Meio Comprimento de Onda. [Distrito Federal] 2017. xiii, 78p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Engenheiro Eletricista, Engenharia Elétrica, 2016). Trabalho de Graduação – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Elétrica

- |  |   |
|--|---|
| 1. Transmissão de energia em linhas muito longas | 2. Linhas de transmissão com pouco mais de meio comprimento de onda |
| 3. Proteção baseada em ondas viajantes           | 4. Elemento diferencial TW87  |
| I. ENE/FT/UnB                                    | II. Título (série)  |

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

COUTO, J. V. E. (2017). Avaliação do Desempenho da Proteção Diferencial Baseada em Ondas Viajantes Quando Aplicada em Linhas com Pouco Mais de Meio Comprimento de Onda, Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica, Publicação 2017, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 81p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: João Victor Espindola Couto

TÍTULO: Avaliação do Desempenho da Proteção Diferencial Baseada em Ondas Viajantes Quando Aplicada em Linhas com Pouco Mais de Meio Comprimento de Onda.

GRAU: Engenheiro Eletricista ANO: 2017

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

---

João Victor Espindola Couto

Departamento de Eng. Elétrica (ENE) - FT

Universidade de Brasília (UnB)

Campus Darcy Ribeiro

CEP 70919-970 - Brasília - DF - Brasil

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e familiares, pelo apoio, compreensão e paciência. À toda a minha família que sempre me ajudou e torceu por mim até o fim do curso.

A todos os professores que fizeram parte da minha formação acadêmica, em especial ao meu orientador, professor Felipe Lopes, que com sua paciência e disposição, me forneceu orientação e ensinamentos que tornaram possíveis a realização deste trabalho.

Aos meus amigos que fiz na UnB, por toda ajuda que me deram na minha caminhada universitária, pela amizade e bons momentos que tivemos.

A todos os amigos que fiz ao longo da vida, pela amizade e apoio.

## RESUMO

A transmissão de grandes blocos de energia a longas distâncias vem sendo um assunto muito estudado no Brasil e no mundo. Nesse contexto, a utilização de linhas de transmissão com pouco mais de meio comprimento de onda foi cogitada como solução para este problema em anos recentes. Porém, embora se saiba que algoritmos de proteção baseados em fasores não funcionem apropriadamente em linhas com tão elevado comprimento, pouco se sabe sobre o desempenho de funções de proteção baseadas na teoria das ondas viajantes quando aplicadas em linhas com pouco mais de meio comprimento de onda.

Neste trabalho, apresenta-se uma análise do desempenho da proteção diferencial baseada em ondas viajantes (TW87) quando aplicada em linhas de transmissão com pouco mais de meio comprimento de onda. A função TW87 se encontra disponível em um relé comercial e já está sendo utilizada em linhas de transmissão de tamanho convencional. Para isso são avaliadas diversas condições de faltas (localização da falta, resistência de falta, ângulo de incidência), bem como variações de carregamento e diferentes ajustes da função de proteção. Para tanto, o software *Alternative Transients Program* (ATP) é utilizado para simular faltas em uma linha de tamanho convencional de 200 km e uma linha com pouco mais de meio comprimento de onda com 2600 km de extensão. Para cada caso, realiza-se a comparação dos sinais de entrada da função, do tempo de atuação e da estimativa do local da falta para ambos os tipos de linha, evidenciando o desempenho da função.

**Palavras-chave:** Linhas de transmissão com pouco mais de meio comprimento de onda, proteção diferencial baseada em ondas viajantes, função TW87.

## ABSTRACT

The transmission of bulk power over long distances is a very important topic, subject of several studies in Brazil and in the world. In this context, the use of transmission lines little longer than half-wavelength has been considered in recent years as a solution for this problem. However, although it is known that phasor-based protection algorithms misoperate in lines with such huge length, information on traveling wave-based protection functions applied to transmission lines little longer than half-wavelength are still scarce..

In this work, the performance of the traveling wave-based differential protection (TW87) when applied to transmission lines little longer than half-wavelength is evaluated. The TW87 is available in an actual numerical relay commercially available and has already been applied on conventional transmission lines. In order to do so, several fault conditions are established (fault location, fault resistance, fault inception angle) and load variations, as well different TW87 settings are analyzed. The *Alternative Transients Program*(ATP) was used to simulate faults in a conventional 200 km transmission line and in a 2600 km line with a little over half wavelength. In each case, both input signals are compared, as well as the operation time and fault location estimation for each evaluated line is highlighting issues on the TW87 performance.

**Keywords:** Half-Wavelength Transmission Lines, traveling wave-based differential protection, TW87.

# SUMÁRIO

<b>Sumário</b>	i
<b>Lista de Figuras</b>	iii
<b>Lista de Tabelas</b>	vi
<b>Lista de Símbolos</b>	vii
<b>Glossário</b>	xi
<b>Capítulo 1 – Introdução</b>	1
1.1 Contextualização do Tema . . . . .	1
1.2 Objetivos do Trabalho . . . . .	3
1.3 Organização do Texto . . . . .	4
<b>Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica</b>	5
2.1 Linhas de Transmissão Com Pouco Mais de Meio Comprimento de Onda . . . . .	5
2.2 Métodos de Proteção Baseados na Teoria de Ondas Viajantes . . . . .	8
<b>Capítulo 3 – Características de Operação das Linhas <math>\lambda/2^+</math></b>	12
3.1 Aspectos Gerais de Linhas de Transmissão . . . . .	12
3.2 Conceitos Básicos da Linha $\lambda/2^+$ . . . . .	14
3.2.1 Perfil de tensão em regime permanente . . . . .	15
3.2.2 Características de tensão e corrente ao longo da linha para diferentes condições de carregamento . . . . .	16
3.3 Faltas em Linhas de Transmissão . . . . .	18
3.3.1 Faltas em Linhas $\lambda/2^+$ . . . . .	19
3.4 Impacto das Características Operacionais de Linhas $\lambda/2^+$ Sobre Algoritmos de Monitoração . . . . .	20
3.4.1 Localização de Faltas . . . . .	20
3.4.2 Proteção de linhas $\lambda/2^+$ . . . . .	23

---

<b>Capítulo 4 – Fundamentos da Proteção de linhas de transmissão Baseada em Ondas Viajantes</b>	<b>26</b>
4.1 Propagação de Ondas Viajantes em Linhas de Transmissão . . . . .	26
4.2 Algoritmos de Proteção Baseados em Ondas Viajantes . . . . .	28
4.2.1 Esquema Baseado na Análise da Amplitude da Onda Incidente . . . . .	28
4.2.2 Esquema Diferencial Baseado nas Ondas Viajantes Usando Tensões e Correntes . . . . .	29
4.2.3 Esquema Diferencial Baseado nas Ondas Viajantes Usando Apenas Correntes . . . . .	30
4.2.4 Processamento e Aquisição dos Sinais . . . . .	32
4.3 Elemento Diferencial por Ondas Viajantes (TW87) . . . . .	34
<b>Capítulo 5 – Apresentação e Análise dos Resultados</b>	<b>38</b>
5.1 Sistemas Analisados . . . . .	38
5.2 Casos Avaliados . . . . .	39
5.2.1 Caso 1 . . . . .	41
5.2.2 Caso 2 . . . . .	45
5.2.3 Caso 3 . . . . .	48
5.2.4 Caso 4 . . . . .	50
5.3 Faltas Externas . . . . .	53
5.4 Características da Atuação . . . . .	55
<b>Capítulo 6 – Conclusão e Propostas Para Trabalhos Futuros</b>	<b>59</b>
<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>62</b>



## LISTA DE FIGURAS

3.1	Segmento infinitesimal do modelo de linha a parâmetros distribuídos. . . . .	13
3.2	Tensão no terminal receptor quando em aberto e tensão igual a 1 pu no terminal emissor para (a) linha sem perdas; (b) linha com perdas (KÜSEL <i>et al.</i> , 2012a). . . . .	16
3.3	Perfil do módulo e do ângulo de tensão para diferentes níveis de carregamento com fator de potência unitário (LOPES <i>et al.</i> , 2013). . . . .	16
3.4	Perfil do módulo e do ângulo de corrente para diferentes níveis de carregamento com fator de potência unitário (LOPES <i>et al.</i> , 2013). . . . .	16
3.5	Perfil de tensão e de corrente ao longo de uma linha de 2600 km para carregamento igual a potência característica e diferentes valores de fator de potência (KÜSEL <i>et al.</i> , 2012a). . . . .	17
3.6	Diagrama unifilar do sistema elétrico analisado (KÜSEL <i>et al.</i> , 2012b). . . . .	19
3.7	Diagrama unifilar do sistema elétrico analisado (LOPES <i>et al.</i> , 2014). . . . .	22
4.1	Linha com defeito mostrando as ondas trafegando a partir da falta em direção aos terminais da linha (SCHWEITZER <i>et al.</i> , 2014). . . . .	28
4.2	Ondas viajantes medidas nas barras local e remota: (a) Curto-circuito externo; (b) Curto-circuito interno. (LOPES <i>et al.</i> , 2016). . . . .	30
4.3	Diagrama simplificado de aquisição de dados para os algoritmos de proteção baseados em ondas viajantes (SCHWEITZER <i>et al.</i> , 2015). . . . .	32
4.4	Filtro Differentiator-Smoother: (a) Janela de dados; (b) Resposta a um degrau. (SCHWEITZER <i>et al.</i> , 2015). . . . .	33
4.5	Extração das ondas viajantes por meio do filtro <i>differentiator-smoother</i> . (LOPES <i>et al.</i> , 2016). . . . .	34

4.6	Definição das ondas viajantes incidentes e de saída da linha monitorada para o elemento TW87 (SCHWEITZER <i>et al.</i> , 2015). . . . .	35
4.7	Lógica simplificada da função TW87 (LOPES <i>et al.</i> , 2016). . . . .	36
5.1	Modelo do sistema analisado. . . . .	38
5.2	Variação das correntes em função da variação de $R_f$ para a linha de 500 kV com $\delta \approx 16^\circ$ e $\Theta = 90^\circ$ . . . . .	42
5.3	Variação das correntes em função da variação de $R_f$ para a linha $\lambda/2^+$ com $\delta \approx 16^\circ$ e $\Theta = 90^\circ$ . . . . .	43
5.4	Caso 1 aplicado à linha $\lambda/2^+$ com $R_f = 350 \Omega$ e $d = 0,05$ p.u. . . . .	44
5.5	Caso 1 aplicado à linha $\lambda/2^+$ com $R_f = 550 \Omega$ e $d = 0,95$ p.u. . . . .	44
5.6	Variação das correntes em função da variação de $R_f$ para a linha de 500 kV com $\delta \approx 96^\circ$ e $\Theta = 90^\circ$ . . . . .	45
5.7	Caso 2 aplicado à linha de 500 kV com $R_f = 250 \Omega$ e $d=0,95$ p.u. . . . .	46
5.8	Caso 2 aplicado à linha de 500 kV com $R_f = 750 \Omega$ e $d=0,75$ p.u. . . . .	47
5.9	Variação das correntes em função da variação de $R_f$ para a linha $\lambda/2^+$ com $\delta \approx 96^\circ$ e $\Theta = 90^\circ$ . . . . .	47
5.10	Variação das correntes em função da variação de $\Theta$ para a linha de 500 kV com $\delta \approx 16^\circ$ e $R_f \approx 0 \Omega$ . . . . .	48
5.11	Variação das correntes em função da variação de $\Theta$ para a linha $\lambda/2^+$ com $\delta \approx 16^\circ$ e $R_f \approx 0 \Omega$ . . . . .	49
5.12	Variação das correntes em função da variação de $\Theta$ para a linha de 500 kV com $\delta \approx 96^\circ$ e $R_f \approx 0 \Omega$ . . . . .	50
5.13	Caso 4 aplicado à linha de 500 kV com $\Theta = 180^\circ$ e $d=0,05$ p.u. . . . .	51
5.14	Caso 4 aplicado à linha de 500 kV com $\Theta = 210^\circ$ e $d=0,5$ p.u. . . . .	51
5.15	Variação das correntes em função da variação de $\Theta$ para a linha $\lambda/2^+$ com $\delta \approx 96^\circ$ e $R_f \approx 0 \Omega$ . . . . .	52

---

5.16	Não atuação para o caso de uma falta externa no lado montante da linha de 500 kV. . . . .	53
5.17	Não atuação para o caso de uma falta externa no lado jusante da linha de 500 kV. . . . .	53
5.18	Não atuação para o caso de uma falta externa no lado montante da linha $\lambda/2^+$ . . . . .	54
5.19	Não atuação para o caso de uma falta externa no lado jusante da linha $\lambda/2^+$ . . . . .	55
5.20	Relação entre distância e tempo de atuação e distância e estimativa de localização para a linha de 500 kV. . . . .	56
5.21	Relação entre distância e tempo de atuação considerando dois níveis de carregamento para a linha $\lambda/2^+$ . . . . .	56
5.22	Relação entre distância e estimativa de localização para dois níveis de carregamento para a linha $\lambda/2^+$ . . . . .	56
5.23	Falta em $d = 0,45$ p.u. e $\delta = 96^\circ$ na linha $\lambda/2^+$ . . . . .	57

## LISTA DE TABELAS

3.1	Parâmetros do sistema. . . . .	19
3.2	Parâmetros do sistema. . . . .	22
5.1	Dados da linha de transmissão de 500 kV modelada no ATP. . . . .	39
5.2	Dados da linha de transmissão de $\lambda/2^+$ modelada no ATP. . . . .	39
5.3	Casos de falta analisados . . . . .	40
5.4	Ajustes da TW87. . . . .	40
5.5	Valores reais dos ajustes da TW87. . . . .	41

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\lambda$	Comprimento de onda da linha de transmissão.
$\lambda/2^+$	Linha com pouco mais de meio comprimento de onda
$l$	Comprimento da linha de transmissão.
$f$	Frequência fundamental em Hz.
$c$	Velocidade da luz no vácuo.
$\gamma$	Constante de propagação da linha de transmissão em $m^{-1}$ .
$\alpha$	Constante de atenuação da linha de transmissão em Neper/m.
$\beta$	Constante de fase da linha de transmissão em rad/metro.
$\omega$	Frequência angular fundamental em rad/s.
$Z_C$	Impedância característica da linha de transmissão.
$Z_S$	Impedância de surto da linha de transmissão.
$P_C$	Potência característica da linha de transmissão.
$V_N$	Corrente nominal da linha de transmissão.
$R$	Resistência série da linha de transmissão em $\Omega/m$ .
$L$	Indutância série da linha de transmissão em H/m.
$C$	Capacitância em derivação da linha de transmissão em F/m.
$G$	Condutância em derivação da linha de transmissão em S/m.
$\Delta x$	Comprimento do segmento infinitesimal do modelo elétrico de uma linha de transmissão monofásica.
$i$	Corrente de linha no domínio do tempo.

---

$v$	Tensão de fase no domínio do tempo.
$V_S$	Tensão no terminal emissor da linha.
$I_S$	Corrente no terminal emissor da linha.
$V_R$	Tensão no terminal receptor da linha.
$I_R$	Corrente no terminal receptor da linha.
$\widehat{V}_S$	Fasor fundamental da tensão no terminal emissor.
$\widehat{I}_S$	Fasor fundamental da corrente no terminal emissor.
$\widehat{V}_R$	Fasor fundamental da tensão no terminal receptor/remoto.
$\widehat{I}_R$	Fasor fundamental da corrente no terminal receptor/remoto.
$V_F$	Tensão no ponto de falta.
$R_S$	Resistência da fonte S.
$L_S$	Indutância da fonte S.
$R_R$	Resistência da fonte R.
$L_R$	Indutância da fonte R.
$u$	Velocidade de propagação da onda.
$v_S$	Tensão no terminal emissor da linha no domínio do tempo.
$i_S$	Corrente no terminal emissor da linha no domínio do tempo.
$v_R$	Tensão no terminal receptor da linha no domínio do tempo.
$i_R$	Corrente no terminal receptor da linha no domínio do tempo.
$v_{FS}$	Tensão de falta no domínio do tempo.
$i_{FS}$	Corrente de falta no domínio do tempo.
$\tau_S$	Tempo que a onda leva para percorrer do ponto de falta até o terminal S.
$\Theta$	Ângulo de incidência da falta.
$D$	Fator de discriminação.

---

$\tau$	Tempo de propagação da linha.
$v_P$	Velocidade de propagação das ondas viajantes.
$\epsilon$	Sinal diferencial.
$i_{OP}$	Corrente de operação.
$i_{RT}$	Grandeza de restrição.
$k$	Fator de restrição.
$T_{DS}$	Tamanho da janela de dados do filtro diferenciador.
$V_L$	Tensão no terminal L.
$I_L$	Corrente no terminal L.
$NL_{FIRST}$	Índice de amostra da primeira onda viajante no terminal local.
$NR_{FIRST}$	Índice de amostra da primeira onda viajante no terminal remoto.
$NL_{EXIT}$	Índice de amostra da onda de saída no terminal local.
$NR_{EXIT}$	Índice de amostra da onda de saída no terminal remoto.
$T_L$	Tempo de propagação nominal da linha.
$\Delta T_L$	Margem do tempo de propagação nominal da linha.
$I_{DIF}$	Corrente da onda viajante de operação.
$I_{RST}$	Corrente da onda viajante de restrição.
$C$	Fator de escala.
$m_{87}$	Estimativa da localização da falta.
$R_f$	Resistência de falta.
$\delta$	Abertura angular entre as fontes.
$d$	Distância da falta.
$i_{pickup}$	Corrente de pickup.
$K_{OV}$	Limiar mínimo de detecção das ondas viajantes.

---

$SLP$	Slope da proteção TW87.
$i_{base}$	Corrente de base do sistema.



## GLOSSÁRIO

AC	<i>Alternating Current</i>
ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
DC	<i>Direct Current</i>
HVDC	<i>High Voltage Direct Current</i>
LT	Linha de Transmissão
ONS	Operador Nacional do Sistema
SIN	Sistema Interligado Nacional
SIR	<i>Source Impedance Ratio</i>
TC	Transformador de corrente
TPC	Transformador de potencial capacitivo
UnB	Universidade de Brasília
URSS	União das Repúblicas Socialistas Soviéticas.

### 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

Nas últimas décadas os sistemas elétricos de potência evoluíram significativamente em complexidade e tamanho, levando ao distanciamento entre as grandes usinas geradoras e os principais centros consumidores (SAHA *et al.*, 2010). Esse fato é consequência direta do crescimento constante da demanda de energia elétrica no mundo, o que limita a construção de novas usinas em locais próximos aos grandes centros consumidores de energia. Além disso, a busca pelo aproveitamento dos recursos energéticos naturais, os quais são encontrados apenas em locais específicos, leva também à instalação de usinas em locais distantes dos grandes centros urbanos.

No caso do Brasil, que é similar à situação de locais como Rússia, China e África, os principais centros de carga estão localizados a uma distância considerável das grandes fontes de energia elétrica. Na região Norte do Brasil, a pouco explorada bacia amazônica contém mais de 60% dos recursos hídricos disponíveis do país, enquanto que, a maior parte da demanda está localizada nas regiões Nordeste e Sudeste, ambas situadas a mais de 2000 km dos rios Xingu, Tapajós e Madeira, que compõem a bacia e onde foram construídas recentemente grandes usinas hidrelétricas (GOMES *et al.*, 2013).

Para a transmissão da energia gerada nas grandes usinas hidrelétricas da região Norte, ainda quando estudos de viabilidade estavam sendo executados, duas opções para transmissão de energia elétrica foram cogitadas: interligar a usina na malha de transmissão mais próxima ou construir uma linha de transmissão ligando diretamente a usina aos pontos de maior demanda (KÜSEL, 2014). Considerando o fato de que as usinas possuem uma potência instalada muito grande, o que torna o custo para a adequação da rede e das medidas operativas da região muito alto, a segunda opção se mostrou mais viável.

Considerando então a opção de construção de uma linha de transmissão única que liga a

usina ao centro consumidor, duas outras alternativas se destacaram: o uso de linhas de transmissão de alta tensão em corrente contínua, conhecidas como links HVDC (*High Voltage Direct Current*), e as linhas de transmissão com pouco mais de meio comprimento de onda, denominadas neste trabalho como linhas  $\lambda/2^+$ , que operam no regime de corrente alternada (HUBERT; GENT, 1965).

Segundo Portela & Jr. (1999), as linhas  $\lambda/2^+$  possuem vantagens técnicas e econômicas, pois não necessitam da compensação de reativos shunt e nem subestações intermediárias. Desta forma, torna-se possível realizar uma transmissão de energia ponto-a-ponto, com custos reduzidos e baixo impacto ambiental. As primeiras pesquisas sobre linhas  $\lambda/2^+$  surgiram na antiga União Soviética, em 1939, expandindo-se na década de 60, quando novos trabalhos abordando as vantagens desse tipo de linha de transmissão frente aos links HVDC foram publicados. Porém, devido ao pouco desenvolvimento tecnológico da época os estudos sobre esse tipo de linha foram deixados de lado. Entretanto, com o avanço da tecnologia, linhas  $\lambda/2^+$  passaram a ser tratadas como uma solução factível para a transmissão de grandes blocos de energia a longas distâncias, despertando o interesse de várias concessionárias de energia elétrica no cenário mundial.

Um aspecto relacionado às linhas  $\lambda/2^+$  que ainda preocupa os órgãos regulamentadores e de estudo se dá pelo fato de que devido à sua extensão, acredita-se que a incidência de faltas seja ainda maior do que a verificada em linhas com comprimento convencional existentes hoje. Sendo assim, há uma grande preocupação com o sistema de proteção e com o processo de reparo da linha após a ocorrência de distúrbios, o que pode se tornar deveras demorado dependendo da existência ou não de dispositivos precisos (LOPES *et al.*, 2016).

Estudos recentes mostram que os métodos clássicos de localização de falta baseados na impedância da linha não são capazes de localizar com confiabilidade a ocorrência de uma falta em linhas desse tipo, mesmo quando considerado o efeito shunt capacitivo da linha (LOPES *et al.*, 2016). Como exemplo, Küsel *et al.* (2012a) apresentam um estudo aprofundado sobre o desempenho da proteção de distância em linhas  $\lambda/2^+$ . Dos resultados, os autores concluem que a proteção de distância convencional para uma linha desta natureza não é confiável, nem segura, já que esta não é sensibilizada para faltas em boa parte de sua extensão. Para agravar a situação, eles notaram ainda que houveram problemas com algoritmos de seleção de fases, o

que pode inclusive inviabilizar o religamento monopolar da linha.

Tendo em vista essa inviabilidade da proteção de linhas  $\lambda/2^+$  utilizando os métodos clássicos, foi proposto a formulação de um método não convencional que considera o modelo  $\pi$ -exato da linha de transmissão para a proteção de distância. (LOPES *et al.*, 2013) (LOPES *et al.*, 2015). Trabalhos como esses mostraram-se bastante promissores, indicando a possibilidade da adoção no futuro dessa alternativa de proteção para as linhas de um pouco mais de meio comprimento de onda (LOPES *et al.*, 2013).

Em contrapartida, a localização de falta utilizando o regime transiente e baseando-se na teoria das ondas viajantes tem obtido êxito quando aplicada em linhas de transmissão de alta tensão (JENSEN; GALE, 1996)(LOPES *et al.*, 2016). Nesse contexto, com este trabalho tem-se o objetivo de analisar o desempenho da técnica de proteção baseada nas ondas viajantes aplicada em linhas  $\lambda/2^+$ . Para isso será avaliado o elemento diferencial TW87 disponível no dispositivo de proteção comercial T400L, da Schweitzer Engineering Laboratories (SCHWEITZER *et al.*, 2015). Embora esse relé possua restrições quanto ao comprimento das linhas onde é aplicado, espera-se investigar nesse trabalho potencialidades e limitações da função TW87, o que pode dar embasamento a soluções futuras em proteção.

## 1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

O principal objetivo do presente trabalho é avaliar o desempenho da proteção diferencial baseada em ondas viajantes TW87 quando aplicada em linhas  $\lambda/2^+$ . Para tanto, são definidos como objetivos específicos:

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre caracterização de linhas  $\lambda/2^+$  e proteção baseada em ondas viajantes;
- Apresentar os principais conceitos sobre linhas  $\lambda/2^+$  e proteção diferencial baseada em ondas viajantes;
- Simular diversas condições de falta em linhas de transmissão de tamanho convencional e com pouco mais de meio comprimento de onda via *Alternative Transients Program* (ATP);
- Analisar e comparar o comportamento da função de proteção TW87 na detecção de faltas

para ambas as linhas e avaliar o seu desempenho mediante as condições propostas.

### 1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este trabalho encontra-se organizado com a seguinte estrutura:

- No capítulo 2, é realizado um levantamento do estado da arte da transmissão  $\lambda/2^+$  e da proteção baseada em ondas viajantes;
- No capítulo 3, são abordados os conceitos teóricos da transmissão de energia em linhas  $\lambda/2^+$ ;
- No capítulo 4, são mostrados os fundamentos da proteção diferencial baseada em ondas viajantes;
- No capítulo 5, são apresentados os resultados obtidos a partir da simulação de diferentes condições de falta com o intuito de avaliar o desempenho da função de proteção TW87;
- Por fim, no capítulo 6, são apresentadas as conclusões e propostas para futuros trabalhos que possam dar continuidade a este estudo.

# REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

## 2.1 LINHAS DE TRANSMISSÃO COM POUCO MAIS DE MEIO COMPRIMENTO DE ONDA

Os primeiros estudos relacionados à transmissão de energia utilizando linhas com meio comprimento de onda surgiram na antiga União das Repúblicas Socialistas Sovéticas (URSS) na década de 1940 (WOLF; SCHERBATCHOV, 1940). Nesse trabalho pioneiro foram resumidas as principais análises desenvolvidas por pesquisadores soviéticos sobre a compensação de linhas de transmissão longas para a sintonização em meio comprimento de onda. Alguns aspectos sobre linhas longas, como a existência de uma relação direta entre a tensão no ponto médio da linha e a corrente no terminal de carga, começaram a ser discutidos a partir daí. Segundo relatos, ainda na URSS na década de 1950, foram publicados cerca de 78 artigos e um livro relacionados ao tema (PRABHAKARA *et al.*, 1969a).

O primeiro trabalho de grande expressão referente à transmissão de energia utilizando linhas  $\lambda/2^+$  foi publicado por (HUBERT; GENT, 1965). A motivação para o desenvolvimento desse estudo foi o alto custo e as dificuldades na operação de linhas longas com compensações elevadas que estavam sendo construídas nos Estados Unidos e no Canadá na época. No artigo os autores propuseram compensar a linha para aumentar seu comprimento elétrico até o terceiro quadrante, demonstrando vantagens operativas e econômicas ao realizar essa manobra.

De volta à extinta URSS, em 1968, foi publicado um trabalho relacionado à realização de um teste de campo da transmissão em linhas  $\lambda/2^+$  (VERSHKOV *et al.*, 1968). Para o teste, foram interligadas linhas da rede de 500 kV existentes no sistema elétrico da parte europeia da URSS, formando assim uma linha com cerca de 3000 km, porém, sintonizada a um comprimento elétrico de pouco mais de  $180^\circ$  elétricos. Os resultados obtidos foram consideravelmente próximos dos esperados teoricamente e a conclusão que se teve foi de que era necessário representar melhor

o efeito corona para estudos de fenômenos transitórios. Além do mais, foi a partir desse estudo que verificou-se a necessidade do desenvolvimento de esquemas especiais para proteção de linhas desse tipo (VERSHKOV *et al.*, 1968).

Um ano depois, em 1969, foram publicados trabalhos avaliando o desempenho de linhas  $\lambda/2^+$  naturais<sup>1</sup> e sintonizadas<sup>2</sup> por meio de compensação (PRABHAKARA *et al.*, 1969a). Desse trabalho, pôde-se constatar alguns aspectos importantes acerca das linhas  $\lambda/2^+$  naturais, como, a variação considerável da tensão na barra de geração dependendo do carregamento da linha; o fato de a linha não poder transportar mais que sua potência característica sem que um isolamento reforçado seja utilizado na sua região central; a significativa influência do fator de potência da carga sobre os perfis de tensão e corrente ao longo da linha; a baixa eficiência da linha para carregamentos baixos; a impossibilidade de seccionar a linha durante curto-circuito e; a ocorrência de sobretensões muito elevadas durante defeitos trifásicos, de forma que centelhadores deveriam ser usados para fins de proteção, entre outros. Já para as linhas sintonizadas, (PRABHAKARA *et al.*, 1969b), foram testados três métodos de compensação: circuito RL em  $\pi$  nos terminais locais e remoto da linha; circuito RL em T nos terminais local e remoto da linha e; capacitâncias em derivação ao longo da linha. Daí chegou-se à conclusão de que os resultados dos dois primeiros casos, que são bastante semelhantes, eram mais eficientes que o terceiro caso, porém, o terceiro caso aumentaria a capacidade de transmissão.

Algum tempo depois, ILICETO & CINIEMI (1988), por meio de um trabalho onde analisaram as perdas por efeito Corona na transmissão em meio comprimento de onda, concluem que essas perdas estabelecem um limite de transmissão, e que desprezá-lo poderia levar a complicações na operação. Além disso, mostraram também que as sobretensões resultantes de anomalias na linha são atenuadas drasticamente quando se considera o efeito Corona nos modelos de simulação.

No Brasil, um dos primeiros trabalhos relacionado ao tema foi publicado na década de 80 (PAVEL, 1981). Nele, é apresentada uma análise detalhada do comportamento de uma linha com meio comprimento de onda, e dela conclui-se que para distâncias maiores que 1450 km, essa

---

<sup>1</sup>Linhas no qual o seu comprimento físico é exatamente igual à metade do comprimento de onda correspondente à frequência do sistema

<sup>2</sup>Linhas com comprimento físico diferente da metade do comprimento de onda correspondente à frequência do sistema, porém, sintonizadas para terem propriedades de transmissão de linhas de meio comprimento de onda

é aparentemente a solução mais econômica e com maiores vantagens operacionais. Após este, os trabalhos focaram especialmente no desenvolvimento de soluções para os empreendimentos de geração na amazônia (KÜSEL, 2014).

Nos últimos anos, a maior parte dos trabalhos associados a esse tema trata do estudo sobre inserção de linhas  $\lambda/2^+$  em sistemas interligados, a exemplo do SIN, analisando aspectos como desempenho da linha nestas condições, comparação técnico-econômica com outros projetos, comportamento da linha para diferentes configurações, entre outros (KÜSEL, 2014).

No que se refere à proteção de linhas  $\lambda/2^+$ , o primeiro trabalho com relatos sobre o desempenho da função de distância convencional aplicada em linhas desse tipo foi publicado por Küsel *et al.* (2012a). Neste artigo, verificou-se que em linhas  $\lambda/2^+$ , a impedância aparente vista pelo relé de distância apresenta um comportamento bastante discrepante daqueles observados em linhas de tamanho convencional, de forma que o relé de distância não é capaz de identificar curtos-circuitos em grande parte da extensão da linha. Vale ressaltar que os resultados corroboraram com as conclusões expostas por uma publicação anterior, onde era analisado o comportamento da impedância vista pela proteção de distância em linhas muito longas (WEDEPOHL; MOHAMED, 1970).

Ainda em 2012, os mesmos autores publicaram um outro estudo tratando da estimação de fasores aplicada a sinais oriundos de curtos-circuitos em linhas  $\lambda/2^+$  (KÜSEL *et al.*, 2012a). Por meio deste, concluíram que os fasores utilizados nos algoritmos da proteção baseada neste método poderiam estar sujeitos a erros severos, levando a atuações indevidas dos relés. Essa conclusão se baseia na constatação de que, à medida que o ponto de defeito se afasta da barra, podem surgir componentes inter ou sub-harmônicas de amplitude significativa e frequência dependente da localização do defeito nos sinais de tensão e corrente. Como a grande maioria dos algoritmos de estimação de fasores implementados em relés comerciais são baseados na transformada de Fourier, seria impossível eliminar essas componentes.

Em 2013 foram apresentadas possíveis soluções usando relés comerciais para possibilitar a atuação do sistema de proteção para curtos-circuitos em qualquer ponto de uma linha  $\lambda/2^+$  (GOMES *et al.*, 2013). Porém, as soluções eram voltadas para viabilizar um ensaio de energização usando linhas do sistema elétrico brasileiro, de forma que os ajustes das proteções eram definidos para atuarem de forma instantânea, inclusive, para defeitos externos à linha. Além



disso, o sistema a ser ensaiado seria isolado, fazendo com que a proposta, apesar de válida, não era aplicável no caso da utilização em um sistema completo.

Também em 2013, Lopes *et al.* (2013) apresentaram uma avaliação de desempenho de uma proteção de distância não-convencional aplicada a uma linha  $\lambda/2^+$ . O algoritmo proposto era baseado no modelo  $\pi$ -exato de linhas de transmissão com os cálculos das impedâncias readequados, mas mantendo a proposta da função de distância. Com os resultados obtidos, concluiu-se que a alternativa não-convencional não podia ser aplicada diretamente em linhas desse tipo, porém, se fossem realizados alguns ajustes no algoritmo sua utilização poderia se tornar possível.

Em 2014, Lopes *et al.* (2014) lançaram mais um trabalho tratando da localização de defeitos em linhas  $\lambda/2^+$ . Nele os autores mostraram que algoritmos tradicionais baseados na medição fasorial de dois terminais podiam fornecer resultados com erros relevantes dependendo do ponto de defeito. Logo em seguida, propuseram uma solução inédita para obter resultados precisos de localização de defeitos, realizando testes em massa a fim de se validar o algoritmo.

Por último, em Lopes *et al.* (2016) divulgaram um artigo onde avaliam a localização de faltas em linhas  $\lambda/2^+$  utilizando os conceitos de ondas viajantes. Nesse trabalho, por meio de simulações, foram variadas as características das faltas, o carregamento do sistema, e foi analisada a influência de aproximações típicas da velocidade de propagação das ondas viajantes, a qual consiste na única entrada deste tipo de algoritmo. Dos resultados obtidos, comprovou-se que os métodos baseados na teoria das ondas viajantes não são influenciados pelo comportamento atípico da linha  $\lambda/2^+$ , sendo capazes de estimar com boa precisão o local da falta, mesmo com variações no carregamento do sistema e sem o conhecimento preciso dos parâmetros da linha.

## 2.2 MÉTODOS DE PROTEÇÃO BASEADOS NA TEORIA DE ONDAS VIAJANTES

O uso da teoria das ondas viajantes como método de proteção de linhas de transmissão é antigo. Os primeiros trabalhos sobre esse tema foram publicados na década de 1930, como o de BEWLEY (1931), o qual serviu de motivação para outras pesquisas nas décadas seguintes. Um exemplo desta influência pode ser vista em um outro trabalho importante, apresentado por DOMMEL & MICHELS (1978) onde os autores apresentaram conceitos de proteção ba-

seados na análise de transitórios eletromagnéticos em forma de ondas viajantes provenientes da falta. Porém, devido ao fato de que para uma boa medição do transitório eram necessários equipamentos com altas taxas de amostragem, a popularização de técnicas como esta só se deu recentemente, após o advento da tecnologia digital.

Em (GALE *et al.*, 1993), os métodos de localização de faltas baseados na teoria de ondas viajantes são classificados em grupos a depender da utilização de ondas refletidas no ponto de falta, do número de terminais monitorados e da utilização de pulsos elétricos para a localização do defeito. Algumas conclusões importantes às quais os autores chegaram são: métodos que utilizam apenas um terminal são mais susceptíveis a erros, pois dependem da detecção de ondas refletidas no ponto de falta, enquanto que os métodos de dois terminais baseados nos transitórios de falta são os mais simples, robustos e menos susceptíveis a erros, pois necessitam apenas da detecção do instante de chegada das primeiras ondas em cada um dos terminais da linha. Outro aspecto importante relacionado aos métodos de dois terminais se dá pelo fato de que eles dependem da sincronização dos dados ou de rotinas auxiliares para compensar erros de sincronismo.

Ainda na década de 1990, com a consolidação do métodos de localização de faltas baseados na teoria das ondas viajantes, grande parte dos estudos começaram a ser elaborados visando a minimização dos impactos das fontes de erro. Em JIAN *et al.* (1998), o autor propõe um novo equacionamento para métodos de dois terminais, no qual são consideradas velocidades de propagação distintas para as ondas viajantes progressivas e regressivas (LOPES, 2014).

Em 2008, FENG *et al.* (2008) apresentaram um método de três terminais que elimina a utilização da velocidade de propagação na estimação do local da falta. Como consequência, por necessitar dos registros oscilográficos de três pontos distintos do sistema elétrico monitorado, o procedimento de localização de falta pode ser mais complexo e lento se comparado às soluções de um e dois terminais.

Nos últimos anos, vêm sendo analisadas algumas versões dos métodos de dois terminais aplicadas em tempo real, como em COSTA & SOUZA, onde a sincronização de dados é necessária, e em Lopes *et al.* (2014), cuja formulação não requer a sincronização de dados. Nitidamente, ao longo dos últimos anos, as tecnologias voltadas para procedimentos de localização de faltas baseados na teoria das ondas viajantes se consolidaram. Além disso, o conhecimento e experiência

dos profissionais envolvidos em atividades de análise de registros também aumentou no que diz respeito à análise de ondas viajantes. Todo esse contexto deu margem para o desenvolvimento também de funções de proteção baseadas na teoria de ondas viajantes, sem perdas quanto à confiabilidade e segurança dos esquemas de proteção, porém conferindo maior velocidade ao procedimento de isolamento de faltas em linhas de transmissão.

Ainda em 2014, Schweitzer *et al.* (2014) demonstraram ser possível elaborar um elemento direcional baseado exclusivamente na análise de ondas viajantes de corrente, eliminando os requisitos de medições de tensão com boa precisão e tornando mais rápido o esquema de proteção baseado em ondas viajantes. Essa otimização de operação só é possível graças aos componentes eletrônicos modernos, que atingiram os níveis de potência de processamento necessários para a implementação de algoritmos de proteção cada vez mais exigentes.

No ano de 2015, Schweitzer *et al.* (2015) apresentaram uma descrição do relé de proteção T400L da Schweitzer Engineering Laboratories (SEL). Esse relé, que utiliza princípios no domínio do tempo, possui diversos elementos, dentre os quais se destaca o elemento diferencial baseado em onda viajantes (TW87), que será abordado neste trabalho. Nesse mesmo artigo são compartilhados detalhes importantes da implantação dos elementos de proteção no domínio do tempo em hardware e são realizadas análises de simulações digitais e de faltas reais para a ilustração de sua operação. Por último eles comparam o desempenho dos elementos de proteção de linha no domínio do tempo com os elementos tradicionais baseados em fasores disponíveis nos relés dos quais os registros avaliados foram tomados.

Já em 2016, Lopes *et al.* (2016) apresentaram uma análise de sensibilidade paramétrica do elemento diferencial TW87. Nesse trabalho os autores além de descreverem a referida função, avaliam por meio de simulações no ATP variando os parâmetros de falta, parâmetros do sistema e os ajustes da função. No fim eles concluem que assim como para as demais funções de proteção existentes, os ajustes da TW87 exercem influência direta nos seus limites de sensibilidade.

Por fim, no ano de 2017 foi publicado pela SEL um manual do relé T400L onde são apresentadas algumas informações adicionais acerca da operação desse equipamento de proteção. Devido ao fato de que esse manual só foi lançado quando o trabalho em questão já se encontrava em um estado avançado de desenvolvimento, os novos detalhes que compõem o manual não foram levados em consideração. Nesse documento são apresentadas algumas informações

até então desconhecidas, como por exemplo, o fato de que tal dispositivo só poderia ser aplicado em linhas com até 500 km (SEL, 2017).

Diante do exposto, embora muito se encontra na literatura sobre aplicações baseadas na teoria de ondas viajantes, não existe ainda um documento que apresente análises do desempenho da TW87 em linhas  $\lambda/2+$ , fato este motivador do presente trabalho.

## CAPÍTULO 3

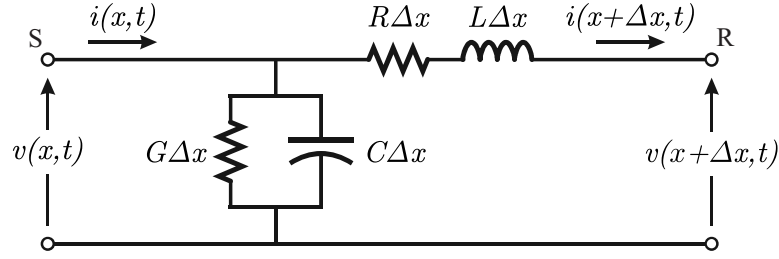
# CARACTERÍSTICAS DE OPERAÇÃO DAS LINHAS $\lambda/2^+$

Neste capítulo, apresenta-se uma caracterização da transmissão de energia por meio de linhas  $\lambda/2^+$ . Em resumo, são mostrados os principais aspectos de uma linha desse tipo, o comportamento desse sistema diante de casos de falta e, por fim, uma breve abordagem sobre possíveis aplicações voltadas para a proteção dessas linhas.

### 3.1 ASPECTOS GERAIS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

Dois ou mais condutores elétricos separados por um dielétrico e com a finalidade de transmitir energia, configuram uma linha de transmissão (DIAS, 2008). As cargas elétricas presentes nesses condutores e no solo dão origem a um campo elétrico, o que leva ao aparecimento de uma capacitância  $C$  distribuída na linha, em derivação, que é expressa em F/m (DIAS, 2008). Do movimento das cargas presentes nos condutores surgem dois efeitos, o primeiro é a queda de tensão ao longo do condutor devido à resistência elétrica do mesmo, que pode ser representada por uma resistência série,  $R$ , expressa em ohm/m. O segundo, é um fluxo magnético que surge devido à corrente que flui pelos condutores, e seu efeito pode ser representado por uma indutância série,  $L$ , dada em H/m (DIAS, 2008). Além desses, existem ainda perdas provenientes das imperfeições dos isoladores, as quais podem ser representadas por uma condutância em derivação,  $G$ , expressa em S/m (DIAS, 2008).

Por meio desses parâmetros é possível representar a linha de transmissão como uma sequência de trechos infinitesimais como o representado na Figura 3.1. Essa representação é conhecida como modelo a parâmetros distribuídos (KÜSEL, 2014).



**Figura 3.1.** Segmento infinitesimal do modelo de linha a parâmetros distribuídos.

Do modelo, pode-se determinar a variação das grandezas de tensão e corrente tanto no tempo quanto ao longo da linha. Mas para isso, antes, é necessário definir a constante de propagação, cuja unidade é  $m^{-1}$ , que caracteriza a maneira pela qual uma onda se propaga ao longo da linha de transmissão, sendo expressa por:

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L) + (G + j\omega C)}, \quad (3.1)$$

onde  $\omega$  é a frequência angular do sistema em análise.

Essa constante pode ser decomposta em duas partes, uma real e outra imaginária, para fins de se obter uma melhor interpretação física de seu significado, assumindo assim a seguinte forma:

$$\gamma = \alpha + \beta, \quad (3.2)$$

onde a parte real,  $\alpha$ , é a constante de atenuação, que afeta as amplitudes de tensão e corrente ao longo da linha e é expresso na unidade Neper/m. Já a parte imaginária,  $\beta$ , cuja unidade é rad/m, é denominada constante de fase e afeta os ângulos das grandezas de tensão e corrente ao longo da linha (KÜSEL, 2014).

A relação entre as ondas viajantes de tensão e corrente ao longo da linha até um ponto onde haja uma reflexão é determinada pela impedância característica da linha, que é expressa por:

$$Z_C = \sqrt{\frac{(R + j\omega L)}{(G + j\omega C)}}. \quad (3.3)$$

Para os casos onde a linha é ideal e sem perdas, ou seja,  $R$  e  $G$  iguais a zero, essa constante assume um valor puramente real, denominado de impedância de surto.

Nos casos em que a potência entregue à uma carga é igual a impedância característica da linha, esse valor de potência é conhecida como potência característica da linha de transmissão,  $P_C$ , e pode ser determinada pela expressão (GLOVER *et al.*, 2011):

$$P_C = \frac{V_N^2}{Z_C}, \quad (3.4)$$

onde  $V_N$  é a tensão nominal da linha de transmissão. Para um carregamento igual à sua potência característica, também chamado de carregamento natural, a linha nem gera nem consome potência reativa (KÜSEL, 2014).

Sendo assim, para uma linha de transmissão perfeitamente transposta, utilizando o modelo de linha ilustrado na Figura 3.1, as componentes fundamentais das tensões e correntes em um ponto  $x$  podem ser calculadas por meio das medições no terminal S usando (GLOVER *et al.*, 2011):

$$\begin{bmatrix} \widehat{V}(x) \\ \widehat{I}(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma x) & -Z_C \sinh(\gamma x) \\ -\frac{1}{Z_C} \sinh(\gamma x) & \cosh(\gamma x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \widehat{V}_S \\ \widehat{I}_S \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

onde  $\widehat{V}(x)$  e  $\widehat{I}(x)$  representam os fasores das componentes fundamentais das tensões e correntes, respectivamente, a uma distância  $x$  do terminal S.

### 3.2 CONCEITOS BÁSICOS DA LINHA $\lambda/2^+$

Para uma dada linha de transmissão, o comprimento de onda  $\lambda$  das grandezas de tensão e corrente pode ser calculado utilizando-se a seguinte relação:

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta}, \quad (3.6)$$

onde  $\beta$  é a parte imaginária da constante de propagação representada em (3.2).

Considerando linhas idealmente sem perdas, a parte real da constante de propagação da linha é nula e  $\beta = \omega\sqrt{LC}$ , de forma que (3.6) pode ser reescrita como:

$$\lambda = \frac{1}{f\sqrt{LC}} \approx \frac{c}{f}, \quad (3.7)$$

onde  $c$  é a velocidade da luz no vácuo.

Dessa forma, considerando o sistema elétrico brasileiro, no qual a frequência fundamental é de 60 Hz, o comprimento de onda para uma linha sem perdas é de 5000 km, de modo que a extensão de uma linha com meio comprimento de onda seria de 2500 km. Contudo, exato meio comprimento de onda é considerado um ponto de singularidade, onde pequenas variações na operação podem levar a aberturas angulares no terceiro quadrante, o que conseqüentemente leva o sistema à instabilidade. Por esse motivo é recomendável que a linha tenha algo em torno de  $190^\circ$  elétricos, ou seja, aproximadamente 2600 km (PORTELA; ALVIM, 2007).

### 3.2.1 Perfil de tensão em regime permanente

Considerando a linha perfeitamente transposta e modelada com parâmetros distribuídos, é possível representar o quadripolo correspondente às grandezas de tensão e corrente em seus terminais utilizando a sequência positiva:

$$\begin{bmatrix} \widehat{V}_S \\ \widehat{I}_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma l) & -Z_C \sinh(\gamma l) \\ -\frac{1}{Z_C} \sinh(\gamma l) & \cosh(\gamma l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \widehat{V}_R \\ \widehat{I}_R \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

onde  $\widehat{V}_S$  e  $\widehat{I}_S$  representam os fasores de tensão e a corrente de sequência positiva no terminal emissor da linha,  $\widehat{V}_R$  e  $\widehat{I}_R$  representam os fasores de tensão e corrente de sequência positiva no terminal receptor da linha,  $l$  representa o comprimento da linha e  $Z_C$  a impedância característica da linha (GLOVER *et al.*, 2011).

Com o terminal receptor em aberto, a relação entre os módulos das tensões nos terminais receptor e emissor é dada por:

$$\frac{V_R}{V_S} = \left| \frac{1}{\cosh(\gamma l)} \right|. \quad (3.9)$$

Para o caso sem perdas, onde  $\gamma = j\beta = j\frac{2\pi}{\lambda}$  e  $l$  é metade do comprimento de onda, sabendo que:

$$\cosh(\alpha l + j\beta l) = \cosh(\alpha l)\cos(\beta l) + j\sinh(\alpha l)\sen\beta l, \quad (3.10)$$

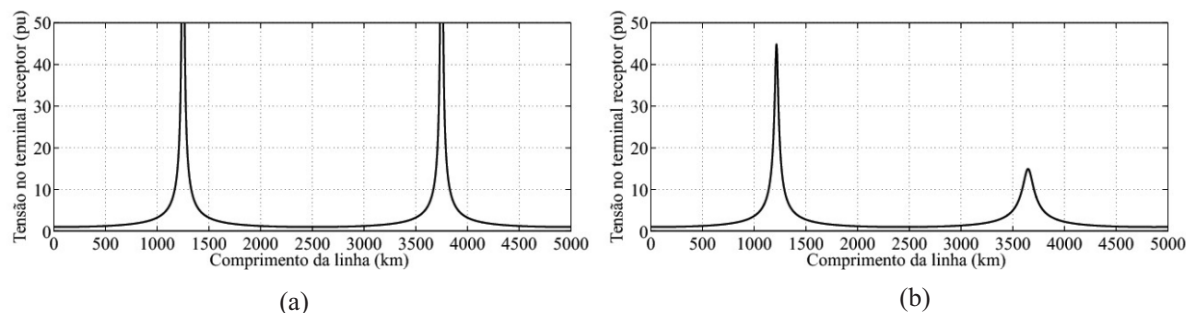
tem-se que:

$$\frac{V_R}{V_S} = \left| \frac{1}{\cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \frac{\lambda}{2}\right)} \right| = 1, \quad (3.11)$$

o que indica que não há a ocorrência de efeito Ferranti em linhas com meio comprimento de onda, tornando desnecessário o uso de compensação reativa shunt (PORTELA; ALVIM, 2007).

Fazendo uma varredura de  $l$ , de zero a 5000 km, em (3.9), observa-se o comportamento da tensão no terminal receptor para diferentes comprimentos de linha. O resultado pode ser observado na Figura 3.2a, para uma linha sem perdas, e na Figura 3.2b, para uma linha com perdas. Pelas imagens vê-se que para um comprimento em torno de 2500 km o valor de tensão no terminal receptor é praticamente o mesmo encontrado no terminal emissor enquanto que para  $l = \lambda/4$  e  $l = 3\lambda/4$  há a ocorrência de ressonâncias (KÜSEL *et al.*, 2012b).

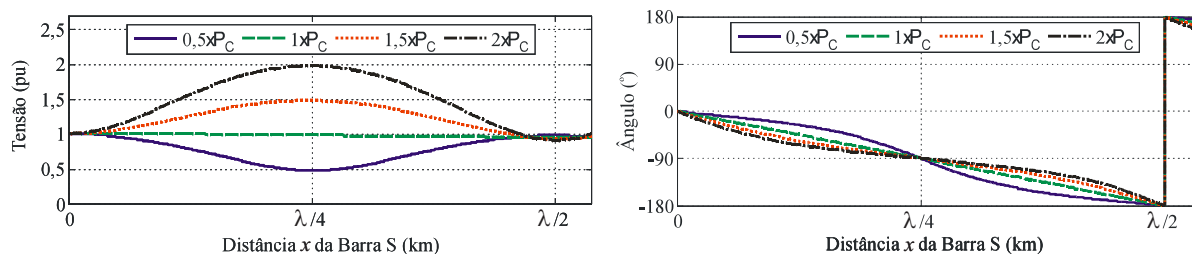




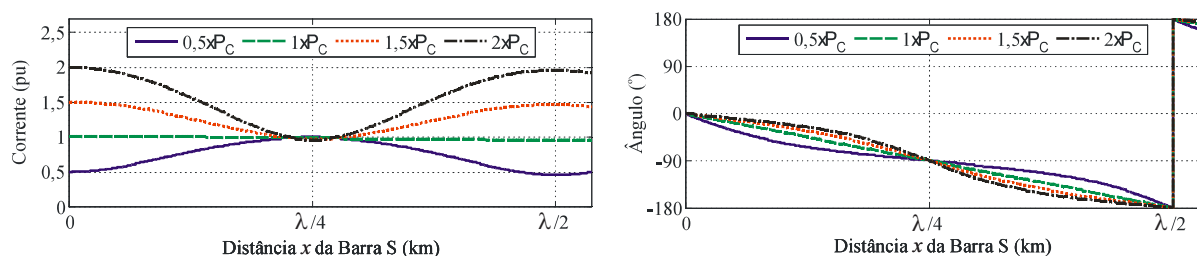
**Figura 3.2.** Tensão no terminal receptor quando em aberto e tensão igual a 1 pu no terminal emissor para (a) linha sem perdas; (b) linha com perdas (KÜSEL *et al.*, 2012a).

### 3.2.2 Características de tensão e corrente ao longo da linha para diferentes condições de carregamento

Com o intuito de avaliar o perfil da corrente e tensão ao longo da linha para diferentes níveis de carregamento, é utilizado o quadripolo que considera o modelo  $\pi$ -exato da linha, como mostrado em (3.5). Fazendo uma análise dos perfis dessas grandezas ao longo da linha para diferentes condições de carregamento, com fator de potência unitário e adotando-se a potência característica ( $P_C$ ) da linha como potência base, obtêm-se as seguintes curvas:



**Figura 3.3.** Perfil do módulo e do ângulo de tensão para diferentes níveis de carregamento com fator de potência unitário (LOPES *et al.*, 2013).



**Figura 3.4.** Perfil do módulo e do ângulo de corrente para diferentes níveis de carregamento com fator de potência unitário (LOPES *et al.*, 2013).

Primeiramente é possível observar que se a linha ocasionalmente operar transmitindo potência maior que sua  $P_C$ , haverá o risco de que ocorra sobretensões e sobrecorrentes severas em

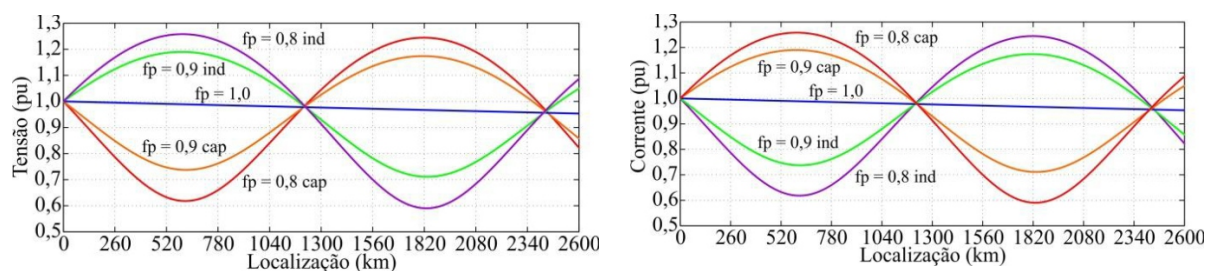
regime permanente em boa parte de sua extensão, fato que deve ser levado em consideração nos estudos de caracterização do isolamento e dimensionamento de equipamentos desse tipo de linha de transmissão. Além disso, observa-se também que aproximadamente na metade do comprimento da linha há uma particularidade, pois nesse ponto a tensão depende unicamente da corrente no terminal receptor enquanto que a corrente depende somente da tensão no mesmo terminal. Essa peculiaridade pode ser explicada pelo fato de que em meio comprimento de onda, para uma linha sem perdas,  $x = \frac{\lambda}{4}$  e  $\beta x = \frac{\pi}{2}$ , o que reduz (3.8) a:

$$\left| V \left( \frac{\lambda}{4} \right) \right| = |Z_C I_R|, \quad (3.12)$$

$$\left| I \left( \frac{\lambda}{4} \right) \right| = \left| \frac{V_R}{Z_C} \right|. \quad (3.13)$$

Pelas Figuras 3.3 e 3.4 pode ser visto que os ângulos das fases são iguais a  $0^\circ$ ,  $-90^\circ$  e  $-180^\circ$  nos pontos 0,  $\lambda/4$  e  $\lambda/2$ , respectivamente, independentemente do nível de carregamento. Sendo assim, têm-se que as polaridades dos fasores de tensão e corrente medidos no terminal receptor, podem se tornar invertidas em relação àquelas observadas em linhas de tamanho convencional, o que compromete a aplicação de técnicas baseadas na análise de fasores fundamentais em linhas  $\lambda/2^+$ , mesmo quando considerados os efeitos shunt capacitivos (LOPES *et al.*, 2016).

Outra análise que pode ser feita consiste na observação dos perfis de tensão e corrente ao longo da linha baseados na variação do fator de potência, mantendo sempre o módulo da potência transmitida igual à potência característica do sistema.



**Figura 3.5.** Perfil de tensão e de corrente ao longo de uma linha de 2600 km para carregamento igual a potência característica e diferentes valores de fator de potência (KÜSEL *et al.*, 2012a).

Nas figuras, estão representados os valores de tensão e corrente ao longo da linha para um fator de potência variando de 0,8 capacitivo e 0,8 indutivo. Nota-se mais uma vez que correntes e tensões têm perfis atípicos, visto que variam bastante ao longo da linha (KÜSEL *et al.*, 2012a), o que dificulta sobremaneira a aplicação de funções tradicionais de monitoramento do sistema.

### 3.3 FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Por definição, falta é o termo que se utiliza para denotar um afastamento accidental das condições normais de operação de um sistema elétrico de potência (SAHA *et al.*, 2010). Dessa forma, um curto-circuito ou um condutor interrompido constituem uma situação de falta (KINDERMANN, 2005). Dentre as causas mais comuns que ocasionam as faltas, destacam-se falhas de isolamento, que ocorrem por conta da degradação dos isoladores, podendo esta ser natural ou por atos de vandalismo, e o contato direto entre condutores, o qual pode ser ocasionado pela natureza, como por exemplo, a queda de um galho em uma linha ou adversidades das mais variadas formas que podem ocasionar o desligamento não-programado do sistema (SAHA *et al.*, 2010).

Uma falta altera de forma significativa o ponto de operação de sistemas elétricos de potência, ocasionando variações nos valores de tensão e corrente. As faltas em sistemas de transmissão podem ser classificadas dependendo do número de fases envolvidas no distúrbio e da existência ou não do contato de condutores com a terra (GLOVER *et al.*, 2011):

- Curto-circuito monofásico, ou curto para a terra (fase-terra, FT);
- Curto-circuito bifásico, sem contato de terra (fase-fase, FF);
- Curto-circuito bifásico, com contato de terra (fase-fase-terra, FFT);
- Curto-circuito trifásico, ou simétrico (fase-fase-fase, FFF).

Quando há a ocorrência de uma situação de falta em um sistema, há conseqüentemente a geração de transitórios nos sinais de corrente e tensão. Além disso, durante o distúrbio, esses sinais estabilizam em condições diferentes das normais, atingindo valores que dependem das características do curto-circuito (LOPES, 2014).

Portanto, é de grande importância a avaliação do comportamento das grandezas elétricas do sistema elétrico de potência tanto durante quanto após a ocorrência de faltas, pois, a forma como essas grandezas variam podem permitir a estimação do local do defeito, resistência de falta e ainda o tipo de falta (SAHA *et al.*, 2010). Sendo assim, com base nesses tipos de estimativas, torna-se possível elaborar técnicas para diagnóstico de distúrbios, a exemplos dos métodos de localização de faltas e algoritmos de proteção.

### 3.3.1 Faltas em Linhas $\lambda/2^+$

Sabe-se que o comportamento das grandezas elétricas em uma linha  $\lambda/2^+$  é diferente do observado em uma linha com comprimento típico. Frente a isto, em Küsel *et al.* (2012b), foram realizadas simulações a fim de se estudar o comportamento das grandezas em uma linha  $\lambda/2^+$  durante uma falta. Para isso, simulou-se uma linha com 12 condutores por fase e dois cabos para-raios, possibilitando a transmissão de até 8 GW por 2600 km na tensão nominal de 1000 kV (KÜSEL *et al.*, 2012b). Além disso, na intenção de retratar um sistema real, foram inseridos equivalentes de Thévenin nos terminais da linha, os quais representam os sistemas elétricos conectados em torno da linha em estudo. O diagrama unifilar do sistema pode ser visto na Figura 3.6 e os parâmetros eletromagnéticos da linha para uma tensão nominal de 1000 kV podem ser encontrados na Tabela 3.1.



**Figura 3.6.** Diagrama unifilar do sistema elétrico analisado (KÜSEL *et al.*, 2012b).

**Tabela 3.1.** Parâmetros do sistema.

Linha de Transmissão						
L (km)	Sequência Zero			Sequência Positiva		
	$R_0$ ( $\Omega/\text{km}$ )	$X_0$ ( $\Omega/\text{km}$ )	$Y_0$ ( $\mu\text{S}/\text{km}$ )	$R_1$ ( $\Omega/\text{km}$ )	$X_1$ ( $\Omega/\text{km}$ )	$Y_1$ ( $\mu\text{S}/\text{km}$ )
2600	0,2856	$j1,2374$	$j3,4873$	0,0048	$j0,1689$	$j9,8727$
Impedâncias Equivalentes						
Fonte	Sequência Zero ( $\Omega$ )			Sequência Positiva ( $\Omega$ )		
F1	$0,2062 + j14,434$			$0,2062 + j14,434$		
F2	$1,4443 + j28,868$			$1,1547 + j28,868$		
Parâmetros Eletromagnéticos da Linha de Transmissão						
$\gamma$ ( $\text{mm}^{-1}$ )	$0,018 - j1,291$					
$Z_C$ ( $\Omega$ )	$130,81 + j1,858$					
$P_C$ (MVA)	7.643,90					
$v$ (km/s)	291.913,71					
$\lambda$ (km)	4865,23					
$\lambda/2$ (km)	2432,61					
2600 km (graus elétricos)	192,4					

Foram simulados curtos-circuitos francos monofásicos, bifásicos e trifásicos ao longo de toda a linha e avaliaram os sinais das tensões e correntes medidas na Barra 1 a partir da configuração do sistema apresentadas. Como resultado obteve-se que, para faltas monofásicas, após os 200 km da linha, o módulo da corrente varia pouco para defeitos ao longo da linha, assim como o módulo da tensão. Para os outros tipos de falta, observou-se que o comportamento das tensões e correntes foram bastante semelhantes para as fases envolvidas no defeito. Vale destacar que o módulo da corrente vista pela Barra 1 foi menor que a própria corrente de carga, para faltas em grande parte da extensão da linha caracterizando o comportamento atípico da linha  $\lambda/2^+$  (KÜSEL *et al.*, 2012b).

### 3.4 IMPACTO DAS CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS DE LINHAS $\lambda/2^+$ SOBRE ALGORITMOS DE MONITORAÇÃO

#### 3.4.1 Localização de Faltas

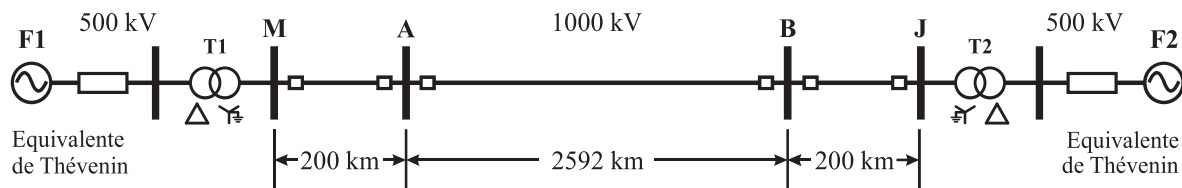
Como visto, os curtos-circuitos em linhas de transmissão, que podem ser provocados por diversos motivos, podem causar a indisponibilidade do serviço de fornecimento de energia em determinada região por algum tempo, o que gera prejuízos consideráveis para a concessionária responsável pela região. Na tentativa de aumentar suas receitas, as concessionárias têm investido no desenvolvimento de dispositivos para a localização de faltas, o que vem resultando na diminuição do tempo de reparo das linhas e conseqüentemente em uma melhora da qualidade dos serviços prestados.

Existem vários grupos nos quais os algoritmos de localização de faltas são classificados, dentre os quais se destacam: métodos baseados em componentes fundamentais e métodos baseados na teoria das ondas viajantes (SAHA *et al.*, 2010). Os métodos baseados em componentes fundamentais são, atualmente, os mais utilizados nas concessionárias, visto que ao mesmo tempo que são simples, são também suficientemente precisos, além de demandar um baixo esforço computacional. Métodos como esses se baseiam no cálculo dos fasores fundamentais do sistema elétrico de potência, o que viabiliza a avaliação das variações de módulo e fase das tensões e/ou correntes durante um curto-circuito (LOPES, 2014).

Considerando ainda métodos baseados em componentes fundamentais, existem entre eles os baseados em modelos de linha a parâmetro concentrados, que são utilizados na representação de linhas curtas e que desprezam a capacitância em derivação em sua formulação (LOPES, 2014). Para linhas muito longas, esses métodos não são viáveis, visto que, à medida que o comprimento da linha aumenta, o erro na localização da falta passa a ser significativo. Dessa forma, sabe-se que existem também os métodos baseados no modelo de linhas a parâmetros distribuídos, que levam em conta a capacitância em derivação da linha, e que são mais precisos na localização de defeitos em linhas longas. Apesar de serem utilizados em linhas longas, que não passam de algumas centenas de quilômetros, esses métodos não funcionam muito bem em linhas  $\lambda/2^+$ , exceto de procedimentos de correção de erros conforme reportado em (LOPES *et al.*, 2014)

Os métodos baseados em ondas viajantes são considerados mais precisos, porém, necessitam de altas taxas de amostragem para a análise correta dos sinais transitórios de curto-circuito, o que requer configurações de hardware mais caras e robustas (SCHWEITZER *et al.*, 2015). Os estudos recentes acerca de linhas  $\lambda/2^+$  consideram que os métodos baseados em ondas viajantes sejam os mais confiáveis para a detecção e localização de faltas em linhas  $\lambda/2^+$ , pois se baseiam em componentes de alta frequência com comprimento de onda reduzido e, conseqüentemente, não são completamente afetados pelo comportamento atípico dessas linhas para componentes fundamentais..

Como mostrado, as linhas de transmissão  $\lambda/2^+$  possuem características bastante diferentes daquelas observadas em linhas de tamanho convencional. Dessa forma, em (LOPES *et al.*, 2014) o desempenho de algoritmos de localização de defeitos em linhas desse tipo foi avaliado por meio da análise de resultados apresentados por cinco métodos convencionais de localização de defeitos, disponíveis na literatura e propostos por JOHNS & JAMALI (1990); GIRGIS *et al.* (1992); TZIOUVARAS *et al.* (2001); HE *et al.* (2011) e; PRESTON *et al.* (2011). Para o estudo foi considerada uma linha como a representada na Figura 3.7 e com os parâmetros descritos na Tabela 3.2. Vale a ressalva de que para as simulações e coletas dos resultados, foi utilizado o software ATP.



**Figura 3.7.** Diagrama unifilar do sistema elétrico analisado (LOPES *et al.*, 2014).

**Tabela 3.2.** Parâmetros do sistema.

<b>Linha de Transmissão</b>					
<i>Impedâncias e Admitâncias</i>					
Sequência Zero			Sequência Positiva		
$R_0$	$X_0$	$B_0$	$R_1$	$X_1$	$B_1$
( $\Omega/\text{km}$ )	( $\Omega/\text{km}$ )	( $\mu\text{S}/\text{km}$ )	( $\Omega/\text{km}$ )	( $\Omega/\text{km}$ )	( $\mu\text{S}/\text{km}$ )
0,3112	1,2547	3,6301	0,0054	0,1709	9,7331
<i>Parâmetros Eletromagnéticos</i>					
$\gamma(\text{km}^{-1} \times 10^3)$			0,0206 + $j$ 1,2897		
$Z_C(\Omega)$			132,51 – $j$ 2,11		
$P_C(\text{MVA})$			7.545,64		
$v(\text{km}/\text{s})$			292.339,2		
$\lambda(\text{km})$			4871,7		
$\lambda/2(\text{km})$			2435,9		
Comprimento elétrico ( $^\circ$ )			191,54		
<b>Sistema Elétrico</b>					
<i>Impedâncias Equivalentes das Fontes</i>					
Fonte	Sequência Zero ( $\Omega$ )		Sequência Positiva ( $\Omega$ )		
F1	1,682 + $j$ 9,076		0,164 + $j$ 6,734		
F2	2,970 + $j$ 15,000		0,563 + $j$ 11,746		
<i>Parâmetros dos Transformadores</i>					
Transformador	$X_T$ (%)	Tensão (kV)	Potência (MVA)		
$T_1$	12,0	500/1000	$5 \times 2000$		
$T_2$	12,0	500/1000	$5 \times 2000$		

Dos resultados obtidos, observou-se que dois dos métodos, que são baseados no modelo de linha com parâmetros distribuídos, apresentaram uma estimativa confiável para  $d \leq \lambda/4$ . A partir desse ponto os erros foram críticos, o que pode ser explicado pelo deslocamento angular nas grandezas elétrica que ocorre entre as barras local e remota a partir daí. Os outros três métodos, baseados no modelo de linha a parâmetros concentrados, apresentaram erros signifi-

cativos para quase todos os valores de  $d$ . Para esses métodos, conclui-se que os erros obtidos são provocados pelo comportamento atípico da linha e também pela influência da capacitância da linha, que é desprezada no modelo de parâmetros concentrados.

Em Küsel (2014) é avaliado um novo algoritmo proposto em Lopes *et al.* (2014) para a localização de defeitos em linhas  $\lambda/2^+$ . Esse algoritmo é baseado na análise de componentes simétricas durante um curto-circuito. Além disso é implementado por meio de rotinas inovadoras aplicadas em conjunto com uma formulação clássica de um dos métodos de localização de defeitos de dois terminais baseado no modelo de linhas com parâmetros distribuídos. Os resultados obtidos utilizando esse novo método proposto se mostraram satisfatórios, visto que os erros foram pequenos e, além disso, pôde-se constatar que o algoritmo não é significativamente influenciado pelo fluxo de carga da linha ou fator de potência, características de falta e esquemas de transposição de linha.

Dessa forma, tomando como base os cinco métodos, pôde-se dizer que a localização de faltas utilizando métodos tradicionais não funcionam adequadamente em linhas  $\lambda/2^+$ . Já o algoritmo proposto mostrou-se capaz de localizar faltas em linhas deste tipo. Porém, na literatura, ainda pouco se encontra a respeito do desempenho de técnicas aplicadas no domínio do tempo, como as baseadas na teoria das ondas viajantes, que são consideradas as mais precisas nesse tipo de operação.

Um dos poucos trabalhos que tratam da localização de faltas em linhas  $\lambda/2^+$  utilizando métodos baseados em ondas viajantes foi publicado recentemente por Lopes *et al.* (2016). Nesse trabalho os autores aplicaram um algoritmo de dois terminais baseado na teoria das ondas viajantes em uma linha com 2600 km de extensão a 60 Hz. Foram obtidos ótimos resultados, dos quais eles foram capazes de concluir que métodos desse tipo não são influenciados pelo comportamento atípico da linha  $\lambda/2^+$ , sendo capazes de estimar com precisão o local da falta, independentemente dos parâmetros da linha e das condições de operação da mesma.

### 3.4.2 Proteção de linhas $\lambda/2^+$

Dentre os diferentes tipos de proteção para linhas de transmissão de alta tensão, o mais empregado é a proteção de distância (ONS, 2011), que é baseada na medição indireta da



distância entre o relé e o local do defeito mediante o cálculo da impedância de sequência positiva do trecho da linha entre esses dois pontos. No caso da linha  $\lambda/2^+$ , a principal vantagem esperada da utilização desse tipo de proteção é em relação ao aumento da sensibilidade, tendo em vista que em muitos casos de curto-circuito, a corrente sofre variações muito pequenas ou mesmo é reduzida em relação ao pré-defeito. Por outro lado, a formulação da proteção de distância é baseada no modelo de linhas curtas - composto apenas por uma impedância série -, de forma que seu desempenho frente às grandezas de curto-circuito em uma linha com tal extensão é incerto (KÜSEL, 2014).

Tomando como base esses argumentos, em avaliações realizadas por Küsel (2014), ficou constatado que função de distância tradicional não é capaz de garantir segurança e confiabilidade à proteção de linhas de transmissão  $\lambda/2^+$ . Além disso, foi mostrado que as proteções de distância de linhas adjacentes também podem ser comprometidas pelo comportamento incomum das grandezas de tensão e corrente durante defeitos internos à linha  $\lambda/2^+$ , podendo causar atuações indevidas.

A inviabilidade da aplicação da proteção em distância em linhas  $\lambda/2^+$  é justificada pelo fato de que a mesma não é confiável, nem segura. Devido ao comportamento atípico das grandezas elétricas nesse tipo de linha, juntamente com a forma como a impedância é calculada, faltas internas em grande parte da extensão da linha são vistas como externas (ou mesmo reversas), de modo que não sensibilizam a proteção. Além disso, faltas na linha a jusante são vistas como internas e sensibilizam a proteção em primeira zona. (KÜSEL *et al.*, 2012a).

Uma forma de adequar a proteção em distâncias à linhas  $\lambda/2^+$  seria re-equacionando esse tipo de proteção, partindo da premissa que a linha é longa, e não curta, utilizando o modelo  $\pi$ -exato da linha. Em Lopes *et al.* (2015) um procedimento como este é realizado e testado, mostrando assim que talvez seja possível utilizar essa proteção não convencional em linhas  $\lambda/2^+$ , sendo que para a consolidação desse método, alguns ajustes deveriam ser analisados futuramente.

Em um outro trabalho, Fabián & Tavares (2015) propõem um algoritmo de proteção em distância para linhas com meio comprimento de onda corrigindo os erros notados ao se utilizar o método convencional. Para isso eles implementam uma forma alternativa para o cálculo das impedâncias aparentes e para o seletor de fase. Desse modo, um seletor de fase baseado em

grandezas incrementais foi proposto, e assim as fases afetadas pelas faltas foram adequadamente identificadas. Além disso, o comportamento de impedâncias passou a ser proporcional às distâncias das faltas, permitindo o uso de zonas de proteção. Esses resultados mostram que métodos de proteção em distância não convencionais podem ser aplicados em linhas  $\lambda/2^+$ , porém, a maior parte dos estudos acerca desse tema ainda estão em desenvolvimento.

Seguindo a mesma premissa, nesse cenário, o uso de técnicas de proteção baseadas em ondas viajantes se mostra interessante, e por isso a função TW87 aplicada à uma linha  $\lambda/2^+$  é investigada nesse trabalho.

## FUNDAMENTOS DA PROTEÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO BASEADA EM ONDAS VIAJANTES

Neste capítulo, apresentam-se os principais conceitos sobre a proteção de linhas de transmissão baseadas em ondas viajantes. É mostrado também uma descrição do elemento diferencial TW87, que foi utilizado na análise do sistema ao qual se refere este trabalho.

### 4.1 PROPAGAÇÃO DE ONDAS VIAJANTES EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Devido aos parâmetros distribuídos das linhas de transmissão, sabe-se que, após a ocorrência de qualquer evento que promova uma mudança abrupta da topologia do sistema ou após descargas atmosféricas, transitórios eletromagnéticos se propagam na forma de ondas viajantes ao longo da rede elétrica, incidindo sobre os terminais monitorados, onde parte destas ondas prossegue seu percurso de propagação e parte é refletida (SCHWEITZER *et al.*, 2014).

Para uma linha sem perdas e com dois condutores, as representações da tensão e da corrente como função da posição da onda ( $x$ ) e do tempo ( $t$ ) em um trecho de linha infinitesimal com comprimento  $\Delta x$ , no domínio do tempo, à medida que  $\Delta x$  se aproxima de zero são dadas por:

$$\frac{\partial v(x, t)}{\partial x} = -L \frac{\partial i(x, t)}{\partial t}, \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial i(x, t)}{\partial x} = -C \frac{\partial v(x, t)}{\partial t}. \quad (4.2)$$

O sinal negativo indica que as amplitudes diminuem à medida que  $x$  aumenta. Derivando (4.1) e (4.2) em relação ao tempo e posição, ao relacionar as expressões, obtemos as equações:

$$\frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial t^2}, \quad (4.3)$$

$$\frac{\partial^2 i(x, t)}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 i(x, t)}{\partial t^2}. \quad (4.4)$$

As soluções gerais para essas equações diferenciais parciais de segunda ordem, no domínio do tempo, incluindo ondas à frente  $[F(x - u \cdot t)]$  e reversas  $[f(x + u \cdot t)]$ , são dadas por:

$$v(x, t) = F(x - u \cdot t) + f(x + u \cdot t), \quad (4.5)$$

$$i(x, t) = \frac{1}{Z_S} [F(x - u \cdot t) - f(x + u \cdot t)]. \quad (4.6)$$

onde:

$Z_S = \sqrt{\frac{L}{C}}$  é a impedância de surto da linha.  
 $u = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  é a velocidade de propagação.

As técnicas de separação de ondas podem ser aplicadas para isolar a onda à frente e a onda reversa (SCHWEITZER *et al.*, 2014). Para a obtenção da onda à frente multiplica-se a (4.6) pela impedância de surto e adiciona-se este valor à (4.5). Esta onda depende de  $Z_S$ , mas é independente da impedância de terminação.

$$v(x, t) + Z_S \cdot i(x, t) = 2Z_S \cdot F(x - u \cdot t). \quad (4.7)$$

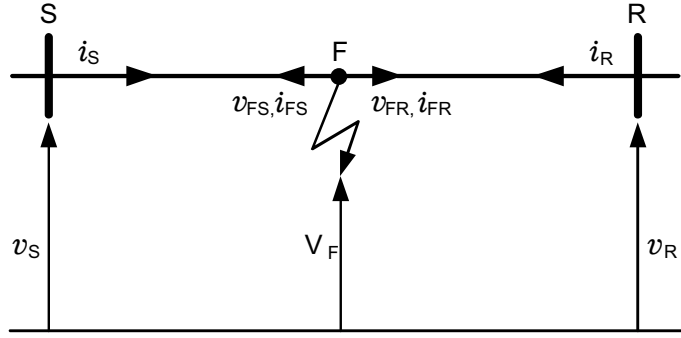
De forma semelhante, para isolar a onda reversa das grandezas medidas no terminal utiliza-se a seguinte expressão:

$$v(x, t) - Z_S \cdot i(x, t) = 2Z_S \cdot F(x + u \cdot t). \quad (4.8)$$

Considerando agora o circuito defeituoso presente na Figura 4.1, nota-se que as ondas da corrente de falta,  $i_{FS}$ , e da tensão de falta,  $v_{FS}$ , trafegam em direção ao terminal S. Assim, a onda incidente que trafega a partir do ponto da falta para o terminal S pode ser calculada da seguinte forma:

$$v_S(x, t + \tau_S) - Z_S \cdot i_S(x, t + \tau_S) = v_{FS}(x, t) + Z_S \cdot i_{FS}(x, t). \quad (4.9)$$

onde as correntes fluindo para a linha são consideradas positivas e  $\tau_S$  é o tempo que a onda leva para percorrer desde o ponto de falta até o terminal S.



**Figura 4.1.** Linha com defeito mostrando as ondas trafegando a partir da falta em direção aos terminais da linha (SCHWEITZER *et al.*, 2014).

## 4.2 ALGORITMOS DE PROTEÇÃO BASEADOS EM ONDAS VIAJANTES

### 4.2.1 Esquema Baseado na Análise da Amplitude da Onda Incidente

Assumindo que a tensão de pré-falta no ponto da falta é  $V_P \cdot \sin(\omega \cdot t + \Theta)$ , onde  $\omega$  é a frequência angular do sistema e  $\Theta$  é o ângulo de incidência da falta, o degrau de tensão decorrente da falta para um curto franco será dado por  $V_F(t) = -V_P \cdot \sin(\omega \cdot t + \Theta)$ . Assim, a onda incidente no terminal S é calculada usando (4.9) (SCHWEITZER *et al.*, 2014).

$$v_S(t + \tau_S) - Z_S \cdot i_S(t + \tau_S) = -2 \cdot V_P \cdot \sin(\omega \cdot t + \Theta). \quad (4.10)$$

A onda calculada por (4.10) é independente da terminação, mas depende do ângulo de incidência da falta. É possível tornar essa equação independente do ângulo de falta utilizando um fator de discriminação D, baseado nas equações que seguem.

Primeiro calcula-se a derivada no tempo da equação 4.10:

$$\frac{1}{\omega} \frac{d}{dt} [v_S(t + \tau_S) - Z_S \cdot i_S(t + \tau_S)] = -2 \cdot V_P \cdot \cos(\omega \cdot t + \Theta). \quad (4.11)$$

Feito isso, as equações 4.11 e 4.10 são elevadas ao quadrado:

$$[v_S(t + \tau_S) - Z_S \cdot i_S(t + \tau_S)]^2 = 4 \cdot V_P^2 \cdot \sin^2(\omega \cdot t + \Theta), \quad (4.12)$$

$$\left\{ \frac{1}{\omega} \frac{d}{dt} [v_S(t + \tau_S) - Z_S \cdot i_S(t + \tau_S)] \right\}^2 = 4 \cdot V_P^2 \cdot \cos^2(\omega \cdot t + \Theta). \quad (4.13)$$

Dessa forma, somando (4.12) e (4.13), é obtido o valor do discriminante D, que é independente de  $\Theta$ :

$$D = 4 \cdot V_P^2 = [v_S(t + \tau_S) - Z_S \cdot i_S(t + \tau_S)]^2 + \frac{1}{\omega^2} \left[ \frac{dv_S(t + \tau_S)}{dt} - Z_S \cdot \frac{di_S(t + \tau_S)}{dt} \right]^2. \quad (4.14)$$

Dado que o fator  $D$  é composto por ondas incidentes, ele assumirá valores elevados para faltas à frente e próximo de zero para faltas reversas. Um esquema de comparação baseado na comunicação entre os terminais pode ser usado para certificar-se que os valores de  $D$  são altos em ambos os terminais da linha e, em caso afirmativo, a linha é desligada. O método descrito opera com um canal de comunicação com largura de banda normalmente baixa, mas necessita de sinais de tensão de alta fidelidade, que geralmente não podem ser fornecidos pelos Transformadores de Potencial Capacitivos (TPCs) (SCHWEITZER *et al.*, 2014).

#### 4.2.2 Esquema Diferencial Baseado nas Ondas Viajantes Usando Tensões e Correntes

Em uma linha de transmissão, as ondas viajantes levam um determinado tempo para se propagar de um terminal para o outro, de modo que as variações de alta frequência verificadas nos sinais de tensão e corrente em uma extremidade não são instantaneamente percebidas no lado oposto (SCHWEITZER *et al.*, 2014). Desprezando as perdas e a atenuação do sinal, quando é realizada uma manobra de chaveamento no terminal local de uma linha de transmissão, por exemplo, é esperado que as mesmas ondas viajantes que surgem nesse terminal incidam sobre o terminal remoto após um determinado tempo. Esse tempo é conhecido como tempo de propagação da linha ( $\tau$ ), e depende do comprimento  $l$  da linha e da velocidade de propagação  $v_p$  das ondas viajantes, sendo assim calculado por  $\tau = l/v_p$  (LOPES *et al.*, 2016).

Esta observação pode ser transformada em um algoritmo de proteção diferencial usando as equações de Bergeron, que são as seguintes (SCHWEITZER *et al.*, 2014):

$$i_S(t - \tau) + \frac{1}{Z_C} \cdot v_S(t - \tau) = -i_R(t) + \frac{1}{Z_C} \cdot v_R(t), \quad (4.15)$$

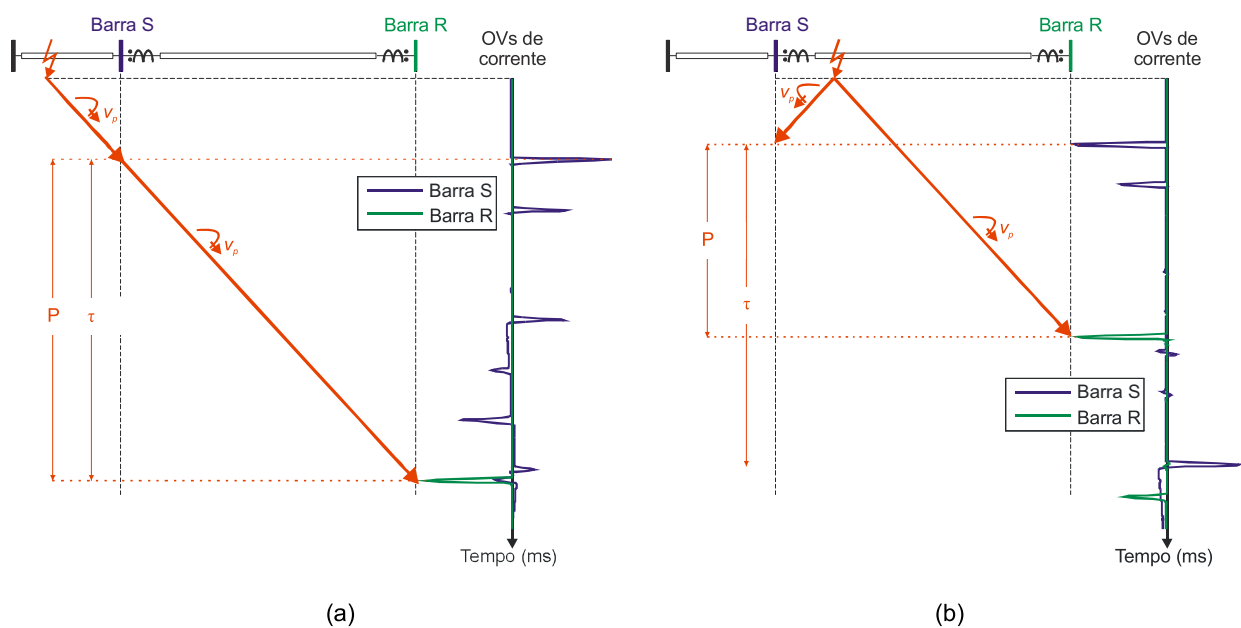
$$-i_S(t) + \frac{1}{Z_C} \cdot v_S(t) = -i_R(t - \tau) + \frac{1}{Z_C} \cdot v_R(t - \tau). \quad (4.16)$$

As equações (4.15) e (4.16) são equilibradas para faltas externas e eventos de chaveamento, e se tornam desequilibradas para faltas internas. Portanto, definem-se sinais diferenciais com base nessas equações que, quando diferentes de zero, podem ser usados na decisão do trip (SCHWEITZER *et al.*, 2014).

$$\epsilon_S = i_S(t - \tau) + i_R(t) + \frac{1}{Z_C} [v_S(t - \tau) - v_R(t)], \quad (4.17)$$

$$\epsilon_R = i_R(t - \tau) + i_S(t) + \frac{1}{Z_C} [v_R(t - \tau) - v_S(t)]. \quad (4.18)$$

Esse método constituído de um elemento diferencial baseado nas ondas viajantes incidentes foi originalmente introduzido por Takagi (TAKAGI *et al.*, 1997). Ele se baseia no fato de que para faltas externas a diferença de tempo entre as primeiras ondas incidentes nos terminais local e remoto será igual a um valor  $P$  e será igual a  $\tau$ . Já para faltas internas, como os trechos ao longo dos quais as ondas se propagam são menores que o comprimento  $l$ , o período entre os instantes de incidência das primeiras ondas viajantes detectadas nos terminais da linha será menor que o tempo de propagação da linha como mostra a Figura 4.2. Dessa forma, para seu funcionamento são requisitadas comunicações com alta largura de banda, alinhamento preciso dos tempos entre os terminais da linha e sinais de tensão de alta fidelidade para o cálculo das ondas incidentes antes da efetiva comparação entre os valores.



**Figura 4.2.** Ondas viajantes medidas nas barras local e remota: (a) Curto-circuito externo; (b) Curto-circuito interno. (LOPES *et al.*, 2016).

### 4.2.3 Esquema Diferencial Baseado nas Ondas Viajantes Usando Apenas Correntes

É possível eliminar a exigência dos sinais de tensão de alta fidelidade implementando um esquema diferencial de ondas viajantes baseado apenas em corrente, que basicamente compara as amplitudes das ondas de corrente medidas nos terminais (SCHWEITZER *et al.*, 2014). No caso de faltas externas, as amplitudes das ondas de corrente medidas não serão totalmente compatíveis entre os terminais da linha, não somente devido à atenuação da linha, mas também

devido aos efeitos da terminação da linha. O fato de isolar as ondas incidentes e refletidas torna a medição independente das impedâncias da terminação, permitindo a comparação das ondas viajantes entre os terminais da linha, mas ainda requisitando informações de tensão de alta fidelidade (SCHWEITZER *et al.*, 2014).

No entanto, as ondas de corrente medidas, que são as somas das ondas incidentes e refletidas, mantêm as informações de polaridade das ondas incidentes. Sendo assim, pode-se comparar as ondas de corrente medidas em ambos os terminais da linha, levado em consideração o atraso de propagação (SCHWEITZER *et al.*, 2014).

O algoritmo desse método, baseado apenas na corrente, segue as seguintes etapas: Primeiro assume-se uma falta interna e então são somadas as primeiras ondas viajantes de corrente que chegam nos terminais local e remoto, alinhadas devidamente no tempo, para o cálculo da grandeza de operação. O cálculo dessa grandeza de operação se dá por:

$$i_{OP(t)} = |i_{S(t)} + i_{R(t-P)}|, \quad (4.19)$$

onde P equivale ao deslocamento de tempo necessário para alinhar a primeira onda viajante de corrente recebida no terminal R com a primeira onda viajante de corrente recebida no terminal S. Essa equação é válida quando assume-se que a onda viajante chegou primeiro ao terminal R. Caso fosse considerado que a onda viajante chega primeiro ao terminal S, a equação para a corrente de operação assumiria a seguinte forma:

$$i_{OP(t)} = |i_{S(t-P)} + i_{R(t)}|. \quad (4.20)$$

Na sequência, uma das equações (4.19) ou (4.20) é executada, a depender de qual dos terminais detectou a onda viajante primeiro. Estas equações são executadas apenas uma vez, fornecendo um único valor para  $i_{OP}$ , que é aproximadamente igual à magnitude da onda viajante de corrente lançada a partir do local da falta. Para faltas internas, as duas ondas têm a mesma polaridade, fazendo com que  $i_{OP}$  assumia um valor alto. Caso essa grandeza seja significativa, efetua-se o passo seguinte para confirmar que a falta não é externa (SCHWEITZER *et al.*, 2014).

Na segunda etapa, assume-se uma falta externa e daí é calculada a onda viajante de corrente passante, reconhecendo que para faltas externas, a onda viajante de corrente que entrou em um terminal da linha sairá no outro terminal após o atraso de tempo de propagação, e da análise



dessas ondas deve-se obter uma grandeza de restrição com valor elevado (SCHWEITZER *et al.*, 2014).

A segunda etapa é formalizada utilizando as seguintes equações para as grandezas de restrição:

$$i_{RT1}(t) = |i_{S(t)} - i_{R(t-\tau)}|, \quad (4.21)$$

$$i_{RT2}(t) = |i_{R(t)} - i_{S(t-\tau)}|. \quad (4.22)$$

A equação (4.21) é executada apenas uma vez no ponto de tempo  $\tau$  após a primeira onda viajante chegar no terminal R. O mesmo ocorre para a equação (4.22), só que considerando a primeira onda chegando no terminal S. Para faltas externas, as corrente das ondas viajantes nos terminais S e R que entram e saem da linha têm polaridades opostas, resultando em valores elevados de  $i_{RT1}$  e  $i_{RT2}$ .

É possível combinar as duas correntes de restrição fazendo, por exemplo, a média entre os dois valores ou o utilizando o máximo valor entre as duas e assim se obtêm um valor único para esse parâmetro, identificado como  $i_{RT}$ . Por fim são comparadas as grandezas de operação e de restrição para a tomada de decisão de trip. O elemento opera se:

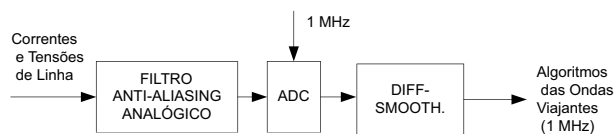
$$i_{OP} > k \cdot i_{RT}, \quad (4.23)$$

onde  $k$  é um fator de restrição.

Este esquema baseado apenas em corrente requer comunicações de alta velocidade e capacidade de alinhar os dados de ambos os terminais (SCHWEITZER *et al.*, 2014)

#### 4.2.4 Processamento e Aquisição dos Sinais

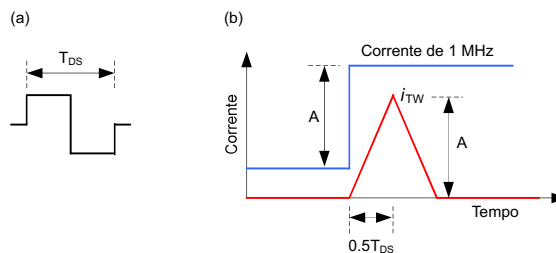
A aquisição dos sinais de um relé real com proteção baseada em ondas viajantes é representada pelo diagrama simplificado da Figura 4.3.



**Figura 4.3.** Diagrama simplificado de aquisição de dados para os algoritmos de proteção baseados em ondas viajantes (SCHWEITZER *et al.*, 2015).

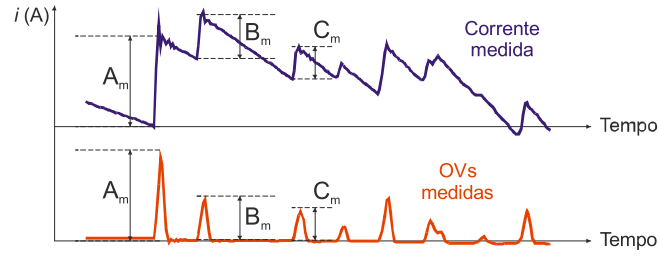
Assim como todas as aplicações baseadas na teoria das ondas viajantes, a função TW87 requer o uso de altas taxas de amostragem para fins de representar corretamente as altas frequências dos sinais monitorados (ANDERSON, 1999). Sendo assim, a amostragem das correntes e tensões da linha é efetuada a uma taxa de 1 MHz, que é uma taxa apropriada para a localização de falta e proteção baseadas em ondas viajantes. As amostras são alinhadas com uma entrada de tempo absoluto do relé para uso na análise do defeito e localização da falta. Aplica-se um filtro analógico passa-baixa para evitar o efeito de *aliasing* do sinal e é utilizado o filtro *differentiator-smoother* para extrair as ondas viajantes das correntes. Além desses, é utilizado também um conversor analógico-digital que gera uma representação digital a partir dos sinais de corrente analisados (SCHWEITZER *et al.*, 2015).

Na Figura 4.4a. está representada a janela de dados de tamanho  $T_{DS}$  do filtro *differentiator-smoother* e na Figura 4.4b. está ilustrada sua operação no que se refere à resposta a um degrau (forma de onda típica decorrente da incidência de ondas viajantes nos terminais monitorados).



**Figura 4.4.** Filtro Differentiator-Smoother: (a) Janela de dados; (b) Resposta a um degrau. (SCHWEITZER *et al.*, 2015).

A corrente é quase constante quando considerada ao longo de um período de algumas dezenas de microssegundos. O filtro *differentiator-smoother* responde a uma mudança na forma de degrau ideal com uma saída em forma de triângulo enquanto que para uma transição de rampa entre dois níveis a resposta é uma saída em forma de parábola (SCHWEITZER *et al.*, 2014). Referencia-se o tempo associado ao pico da saída como o tempo de chegada da onda viajante, incluindo um atraso constante na detecção do pico de metade do comprimento da janela do diferenciador. O ganho do filtro *differentiator-smoother* é selecionado de forma que o valor de pico na saída corresponda à magnitude da mudança de degrau na entrada. Dessa forma, os sinais de onda filtrados retêm informações sobre a magnitude e polaridade das ondas viajantes (SCHWEITZER *et al.*, 2015). Na Figura 4.5, apresenta-se um exemplo de aplicação do filtro *differentiator-smoother* a um sinal de corrente com transitórios de falta.



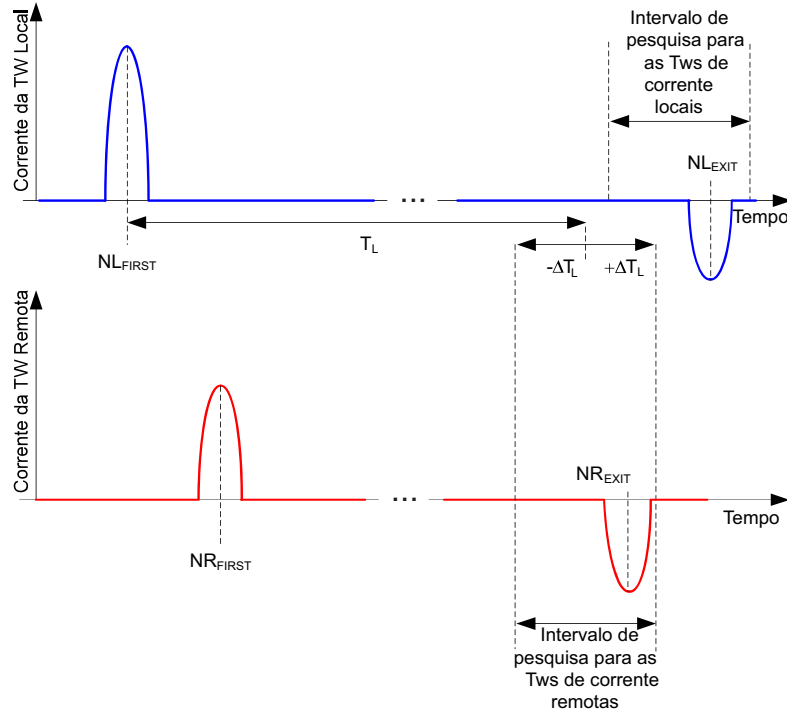
**Figura 4.5.** Extração das ondas viajantes por meio do filtro *differentiator-smoother*. (LOPES *et al.*, 2016).

### 4.3 ELEMENTO DIFERENCIAL POR ONDAS VIAJANTES (TW87)

O elemento diferencial TW87, basicamente, compara os tempos, polaridades e magnitudes das ondas viajantes de corrente em ambos os terminais da linha (LOPES *et al.*, 2016). A implementação deste princípio ocorre da seguinte forma. Primeiro são detectados os tempos, como índices de amostra das primeiras ondas viajantes incidentes nos terminais local e remoto. Estes índices são identificados como  $NL_{FIRST}$  e  $NR_{FIRST}$ , referentes ao terminal local e remoto, respectivamente.

No passo seguinte, conhecendo o índice  $NL_{FIRST}$ , é estabelecida uma janela de tempo para detectar a onda viajante de saída no terminal remoto. Da mesma forma, conhecendo o índice  $NR_{FIRST}$ , uma janela de procura é estabelecida para a detecção da onda viajante de saída no terminal local. Essas janelas são posicionadas no tempo de propagação da linha nominal dado um número de amostras,  $T_L$ , seguindo a primeira onda viajante. É necessário também a inclusão de uma margem de tempo na janela,  $\Delta T_L$ , para compensar o erro e a variabilidade do tempo de propagação (SCHWEITZER *et al.*, 2015).

Após isso, é verificado o registro de onda viajante dentro da janela e identificado o valor absoluto máximo neste intervalo de tempo. Os índices desses valores máximos identificados pelos relés local e remoto são rotulados como os índices de saída  $NL_{EXIT}$  e  $NR_{EXIT}$ , respectivamente.



**Figura 4.6.** Definição das ondas viajantes incidentes e de saída da linha monitorada para o elemento TW87 (SCHWEITZER *et al.*, 2015).

Identificados os quatro índices, utilizando  $M$  amostras em torno desses índices, sendo  $M$  da ordem de metade da janela do *differentiator-smoother* ( $M < 0.5 \cdot T_{DS}$ ), são calculadas as seguintes variáveis:

- Magnitudes das primeiras ondas viajantes de corrente:

$$IL = C \cdot \left| \sum_{k=-M}^{k=M} i_{TWL(NL_{FIRST}-k)} \right|, \quad (4.24)$$

$$IR = C \cdot \left| \sum_{k=-M}^{k=M} i_{TWR(NR_{FIRST}-k)} \right|. \quad (4.25)$$

onde  $C$  é o fator de escala que mantém o ganho unitário dos valores das magnitudes para uma onda viajante de degrau ideal.

- Corrente da onda viajante de operação:

$$I_{DIF} = C \cdot \left| \sum_{k=-M}^{k=M} (i_{TWL(NL_{FIRST}-k)} + i_{TWR(NR_{FIRST}-k)}) \right|. \quad (4.26)$$

- Corrente da onda viajante de restrição:

Caso  $NL_{FIRST} < NR_{FIRST}$ ,

$$I_{RST} = C \cdot \left| \sum_{k=-M}^{k=M} (i_{TWL(NL_{FIRST}-k)} - i_{TWR(NR_{EXIT}-k)}) \right|, \quad (4.27)$$

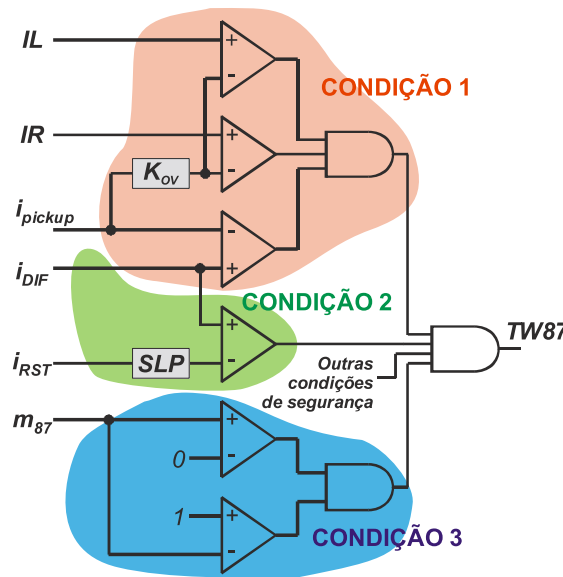
Ou, para  $NR_{FIRST} < NL_{FIRST}$ ,

$$I_{RST} = C \cdot \left| \sum_{k=-M}^{k=M} (i_{TWL(NR_{FIRST}-k)} - i_{TWR(NL_{EXIT}-k)}) \right|, \quad (4.28)$$

- Localização da falta:

$$m_{87} = 0,5 \cdot \left( 1 + \frac{NL_{FIRST} - NR_{FIRST}}{T_L} \right). \quad (4.29)$$

Após o cálculo das variáveis supracitadas, é aplicada a lógica de operação da TW87 conforme apresentado na Figura 4.7.



**Figura 4.7.** Lógica simplificada da função TW87 (LOPES *et al.*, 2016).

onde  $K_{OV}$  representa o limiar mínimo para a detecção das ondas viajantes,  $SLP$  é o *slope* da função e  $i_{pickup}$  a corrente de pickup.

São acionados três elementos TW87, um para cada fase. Qualquer tipo de falta vai excitar pelo menos dois condutores com ondas viajantes de corrente. Por segurança, todos os elementos de fase com correntes de operação, local e remota, maiores do que o correspondente nível de pickup devem declarar um condição de falta interna antes de que seja permitido que o TW87 ative sua saída. Além disso, sabe-se que qualquer mudança súbita na tensão em um ponto sobre a linha protegida gera ondas viajantes, sendo que essas variações incluem o chaveamento de reatores e capacitores série na linha ou uma descarga elétrica na blindagem dos cabos. Portanto, a lógica de TW87 requer condições de supervisão adicionais para segurança, a exemplo da supervisão por sobrecorrente (SCHWEITZER *et al.*, 2015). Neste trabalho, uma vez que

---

apenas faltas foram simuladas, a supervisão por sobrecorrente foi desabilitada, de modo a avaliar isoladamente a função TW87.

## APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo, apresentam-se as análises da atuação da proteção perante diversos cenários de faltas para dois tipos de sistemas. São avaliadas as variações dos parâmetros de falta e realizam-se análises dos ajustes da proteção TW87 na detecção das falhas para ambas as linhas de transmissão, a saber: linha com comprimento tradicional e linha  $\lambda/2+$ .

### 5.1 SISTEMAS ANALISADOS

Para a análise foram realizados testes em dois tipos de sistemas, onde ambos possuem a mesma estrutura do modelo da Figura 5.1, mudando apenas as dimensões e os parâmetros da linha. O primeiro tipo se trata de uma linha de transmissão de 500 kV/60 Hz com 200 km de comprimento. Nesse sistema, além da linha principal, existem ainda, uma linha a montante com 50 km entre a Fonte 1 e a Barra 1 e uma a jusante também com 50 km de extensão localizada entre a Barra 2 e Fonte 2. As fontes de tensão foram representadas por meio de suas respectivas tensões e impedâncias de Thévenin e foram configuradas de forma a simular valores de *Source Impedance Ratio* (SIR) de 0,1. A Tabela 5.1 contém as especificações dessa linha.

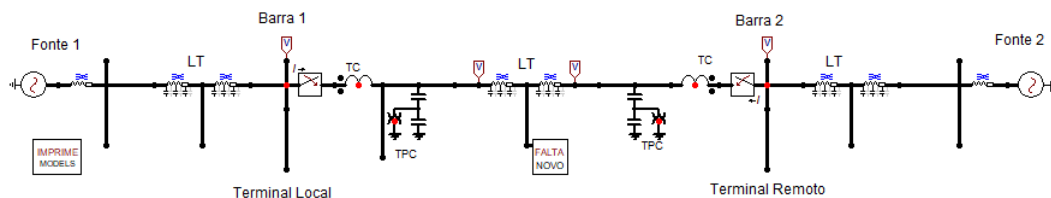


Figura 5.1. Modelo do sistema analisado.

É possível notar também que há elementos que modelam os transformadores de corrente (TCs) utilizados no sistema, cuja relação de transformação, nesse caso, é de 2000 – 5A. Em conjunto com os TPCs, tais dispositivos fornecem medições de corrente e tensão secundários, respectivamente, que serão utilizados na lógica de proteção do relé. Usando então um bloco de

falta composto por resistores e chaves controladas no tempo, tornou-se possível avaliar diferentes tipos de falta, com diferentes ângulos de incidência e resistência de falta.

**Tabela 5.1.** Dados da linha de transmissão de 500 kV modelada no ATP.

<b>Tensão nominal: 500 kV</b>					
<b>Comprimento da LT: 200 km</b>					
<b>Frequência nominal: 60 Hz</b>					
<b>Impedâncias e Admitâncias</b>					
<b>Sequência Zero</b>			<b>Sequência Positiva</b>		
$R_0(\Omega/km)$	$X_0(\Omega/km)$	$B_0(\mu S/km)$	$R_1(\Omega/km)$	$X_1(\Omega/km)$	$B_1(\mu S/km)$
0,4177	1,5238	2,8648	0,0346	0,3005	5,5106

O segundo sistema refere se a uma linha  $\lambda/2^+$ , cuja extensão é de 2600 km e tensão de 1000 kV/60 Hz. Nesse caso as linhas montante e justante possuem 200 km de comprimento cada. Assim como para a linha de 500 kV, as fontes foram configuradas de forma a simular uma SIR de 0,1. A Tabela 5.2 contém as especificações para essa linha.

**Tabela 5.2.** Dados da linha de transmissão de  $\lambda/2^+$  modelada no ATP.

<b>Tensão nominal: 1000 kV</b>					
<b>Comprimento da LT: 2600 km</b>					
<b>Frequência nominal: 60 Hz</b>					
<b>Impedâncias e Admitâncias</b>					
<b>Sequência Zero</b>			<b>Sequência Positiva</b>		
$R_0(\Omega/km)$	$X_0(\Omega/km)$	$B_0(\mu S/km)$	$R_1(\Omega/km)$	$X_1(\Omega/km)$	$B_1(\mu S/km)$
0,2856	1,2374	3,4873	0,0048	0,1689	9,8727

## 5.2 CASOS AVALIADOS

No intuito de se avaliar a proteção diferencial baseada em ondas viajantes em linhas  $\lambda/2^+$  foram propostos alguns cenários de falta para as linhas e diferentes ajustes para o elemento de proteção. Quanto às faltas, que foram simuladas via ATP, foram consideradas apenas faltas AT internas e externas, variando-se a distância de falta ' $d$ ' em relação à barra L, o ângulo de incidência ' $\Theta$ ' e a resistência de falta ' $R_f$ '. Vale ressaltar que o ângulo de incidência tem como referência a tensão da fase A do terminal local. Além dessas variáveis, foram consideradas aberturas angulares entre as fontes ' $\delta$ ' diferentes, indicando carregamentos leves e pesados.



Os casos avaliados estão descritos na Tabela 5.3. Vale destacar que a abertura angular entre as fontes de aproximadamente  $96^\circ$  (considerada para simular um elevado carregamento) é na verdade uma extrapolação, tendo em vista que um valor como este não seria factível.

**Tabela 5.3.** Casos de falta analisados

Casos de falta				
Caso	$d$	$\delta$	$R_f$	$\Theta$
Caso 1	0,05, 0,25, 0,5, 0,75, 0,95 p.u.	$\approx 16^\circ$	0, 50, ..., 950 e 1000 $\Omega$	$90^\circ$
Caso 2	0,05, 0,25, 0,5, 0,75, 0,95 p.u.	$\approx 96^\circ$	0, 50, ..., 950 e 1000 $\Omega$	$90^\circ$
Caso 3	0,05, 0,25, 0,5, 0,75, 0,95 p.u.	$\approx 16^\circ$	$\approx 0 \Omega$	0, 30, ..., 330 e $360^\circ$
Caso 4	0,05, 0,25, 0,5, 0,75, 0,95 p.u.	$\approx 96^\circ$	$\approx 0 \Omega$	0, 30, ..., 330 e $360^\circ$

Os casos foram avaliados tanto para a linha de 500 kV quanto para a linha  $\lambda/2^+$ . Dessa forma, foram simulados em torno de 700 cenários diferentes de faltas. A intenção é comparar o desempenho da função de proteção para os dois tipos de linha. Quanto aos ajustes do elemento diferencial TW87, com base na lógica de trip apresentado na Figura 4.7, foram considerados os apresentados na Tabela 5.4.

**Tabela 5.4.** Ajustes da TW87.

Ajustes TW87			
Parâmetros	$K_{OV}$	$SLP$	$i_{pickup}$
Ajuste 1	0,1	0,3	0,1
Ajuste 2	0,1	0,3	$0,02 \cdot i_{base}$
Ajuste 3	0,1	0,3	$0,05 \cdot i_{base}$
Ajuste 4	0,1	0,5	0,1
Ajuste 5	0,1	0,5	$0,02 \cdot i_{base}$
Ajuste 6	0,1	0,5	$0,05 \cdot i_{base}$
Ajuste 7	0,1	0,7	0,1
Ajuste 8	0,1	0,7	$0,02 \cdot i_{base}$
Ajuste 9	0,1	0,7	$0,05 \cdot i_{base}$

Considerando agora as especificações de cada tipo de linha, foram calculados os dois valores possíveis para a corrente de base. Para a linha de 500 kV a corrente base calculada foi de 1748 A, enquanto que para a linha  $\lambda/2^+$  o valor foi de 6242 A. Dessa forma, os valores reais dos parâmetros de ajuste da TW87, para cada tipo de linha foram:

**Tabela 5.5.** Valores reais dos ajustes da TW87.

Ajustes TW87						
Linha 500 kV				Linha $\lambda/2^+$		
Ajuste	$K_{OV}$	$SLP$	$i_{pickup}$	$K_{OV}$	$SLP$	$i_{pickup}$
Ajuste 1	0,1	0,3	0,1 A	0,1	0,3	0,1 A
Ajuste 2	0,1	0,3	34,96 A	0,1	0,3	124,85 A
Ajuste 3	0,1	0,3	87,41 A	0,1	0,3	312,13 A
Ajuste 4	0,1	0,5	0,1 A	0,1	0,5	0,1 A
Ajuste 5	0,1	0,5	34,96 A	0,1	0,5	124,85 A
Ajuste 6	0,1	0,5	87,41 A	0,1	0,5	312,13 A
Ajuste 7	0,1	0,7	0,1 A	0,1	0,7	0,1 A
Ajuste 8	0,1	0,7	34,96 A	0,1	0,7	124,85 A
Ajuste 9	0,1	0,7	87,41 A	0,1	0,7	312,13 A

Por fim, é válido relembrar as condições para atuação desta função, que pela Figura 4.7 são:

- Condição 1:

$$IL \text{ e } IR > i_{pickup} \cdot K_{OV} \quad (5.1)$$

- Condição 2:

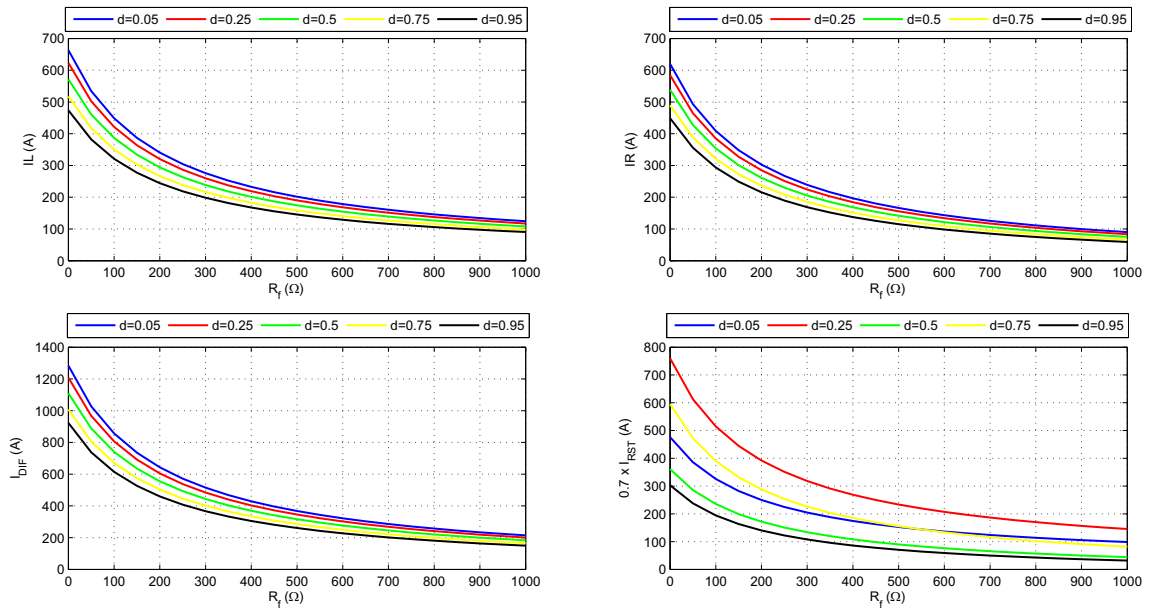
$$I_{DIF} > i_{pickup} \quad (5.2)$$

- Condição 3:

$$I_{DIF} > I_{RST} \cdot SLP \quad (5.3)$$

### 5.2.1 Caso 1

Para o Caso 1, considerando a linha de 500 kV, foram obtidas as representações presentes na Figura 5.2 para os sinais de entrada da função TW87 para diferentes valores de  $R_f$ . É válido ressaltar que o valor de  $\Theta$  igual a  $90^\circ$  foi escolhido como valor *default* tendo em vista que esse valor favorece a TW87.

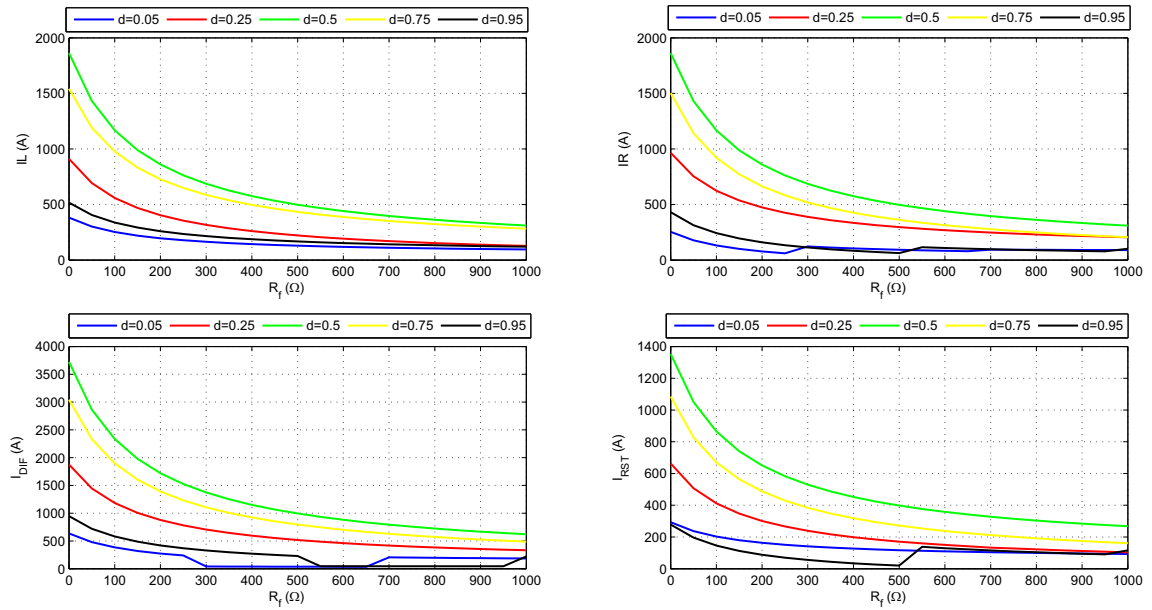


**Figura 5.2.** Variação das correntes em função da variação de  $R_f$  para a linha de 500 kV com  $\delta \approx 16^\circ$  e  $\Theta = 90^\circ$ .

Pelas imagens nota-se que quanto maior o valor de  $R_f$ , menor a magnitude das correntes IL e IR. Essa observação faz sentido visto que pela lei de Ohm, para uma mesma tensão, quanto maior o valor da resistência, menor será o valor da corrente. É possível perceber também que as magnitudes de IL e IR possuem relação inversamente proporcional com a distância da falta. Esse fato pode ser explicado pelas perdas da linha, sendo que, quanto maior a distância da falta, maior será o percurso que a onda viajante terá que percorrer, o que implica em uma atenuação do sinal.

Por meio dos gráficos da Figura 5.2 e das condições de atuação do relé é possível fazer uma análise de sensibilidade da função para o caso. O valor de SLP igual a 0,7, valor máximo simulado, foi selecionado para ilustrar que para os ajustes e sistema simulados a condição (5.3) tende a ser sempre satisfeita. Da mesma forma, como  $K_{OV}$  assume um valor pequeno, a condição (5.1) também é sempre satisfeita, para esse caso. Considerando os valores de  $i_{pickup}$  fornecidos pela Tabela 5.5 e com o auxílio da curva traçada para as magnitudes de  $I_{DIF}$ , observa-se que a condição (5.2) também foi satisfeita para todos os ajustes selecionados. Dessa forma, considerando as três condições descritas, diz-se que a função atuou devidamente para todas as ocasiões de faltas do Caso 1 para a linha de 500 kV.

Considerando agora a linha  $\lambda/2^+$ , foram obtidos os gráficos presentes na Figura 5.3 para os sinais da função.



**Figura 5.3.** Variação das correntes em função da variação de  $R_f$  para a linha  $\lambda/2^+$  com  $\delta \approx 16^\circ$  e  $\Theta = 90^\circ$

Pela imagem logo se percebe um comportamento das magnitudes das correntes nos terminais diferente da observada na linha de 500 kV. Para esse carregamento mais leve, na linha de 500 kV as magnitudes das correntes diminuíram de acordo com o aumento da distância do local da falta. Já na linha  $\lambda/2^+$ , os valores máximos das magnitudes foram observados para os casos onde a falta se localizava exatamente no meio da linha, ou seja, quando  $d = 0,5$  p.u., enquanto que os menores valores foram medidos para faltas próximas dos terminais.

Por conta disso, nesse caso, houveram alguns pontos de descontinuidade dos sinais. Nas curvas para  $I_R$ , com  $d$  igual 0,05 p.u. e 0,95 p.u. é possível observar pontos de mudança abrupta no valor de magnitude dessa corrente. Para explicar esse fenômeno plotaram-se os sinais de corrente filtrados pelo filtro *differentiator-smoother* nos terminais da linha, como representado nas Figuras 5.4 e 5.5. Essas representações são para os pontos onde houve um comportamento anômalo do sinal.

Pela Figura 5.3 observa-se que nesses pontos as magnitudes de corrente apresentaram valores baixos. Por conta disso, a modulação que é de 60 Hz, dificultou a aplicação dos limiares de detecção e isso fez com que a primeira onda viajante no terminal R não fosse identificada de forma correta, como mostram as Figuras 5.4 e 5.5. Além disso, foi observado que a partir desses valores de  $R_f$ , para os devidos valores de  $d$ , todos os outros casos também sofreram do mesmo problema. Como os sinais  $I_{DIF}$  e  $I_{RST}$  dependem diretamente do valor de  $I_R$ ,

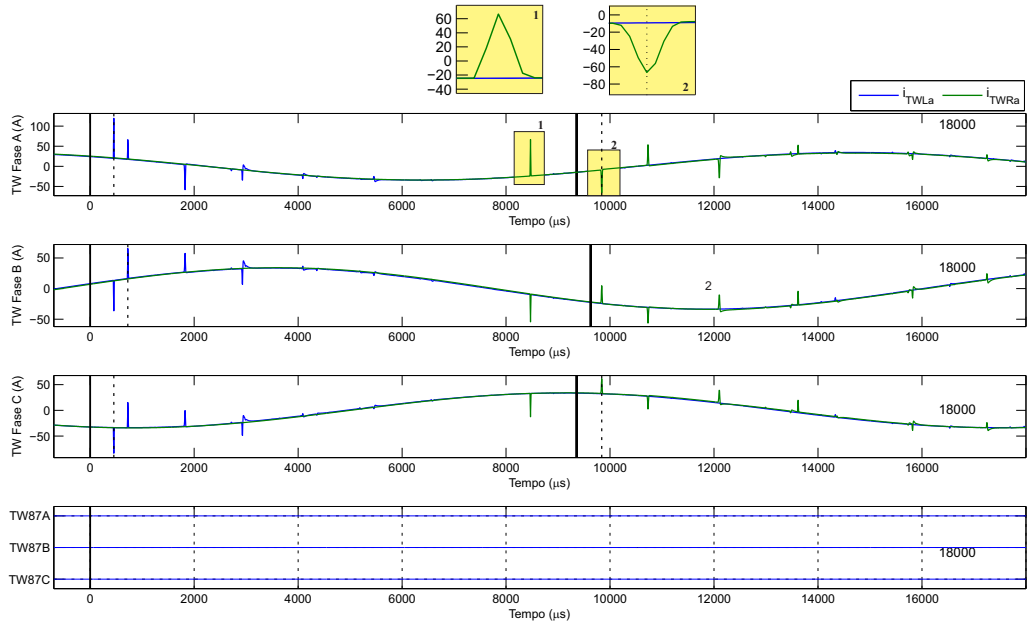


Figura 5.4. Caso 1 aplicado à linha  $\lambda/2^+$  com  $R_f = 350 \Omega$  e  $d = 0,05$  p.u.

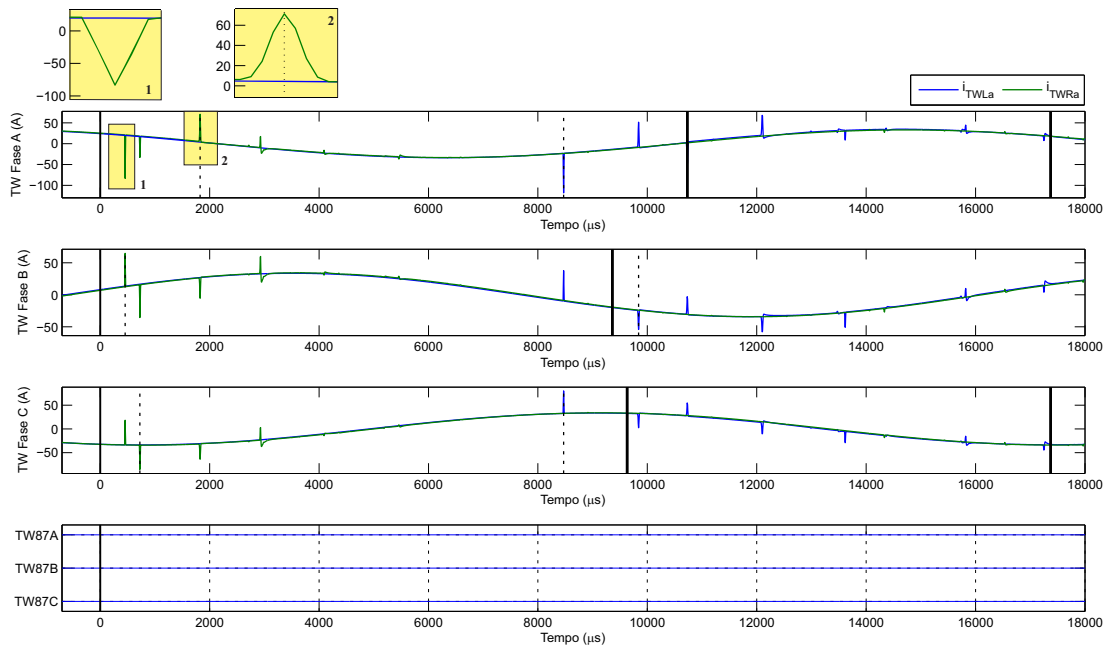


Figura 5.5. Caso 1 aplicado à linha  $\lambda/2^+$  com  $R_f = 550 \Omega$  e  $d = 0,95$  p.u.

como mostrado em (4.26), (4.27) e (4.28), eles também apresentaram em alguns pontos um comportamento irregular. Deve-se destacar que o filtro *differentiator-smoother*, apesar de ser de grande utilidade na análise de ondas viajantes, ele não remove completamente a frequência fundamental do sistema, a qual fica mais evidente em casos nos quais as frentes de onda de interesse ficam mais espaçadas no tempo, a exemplo do que ocorre na linha  $\lambda/2^+$ .

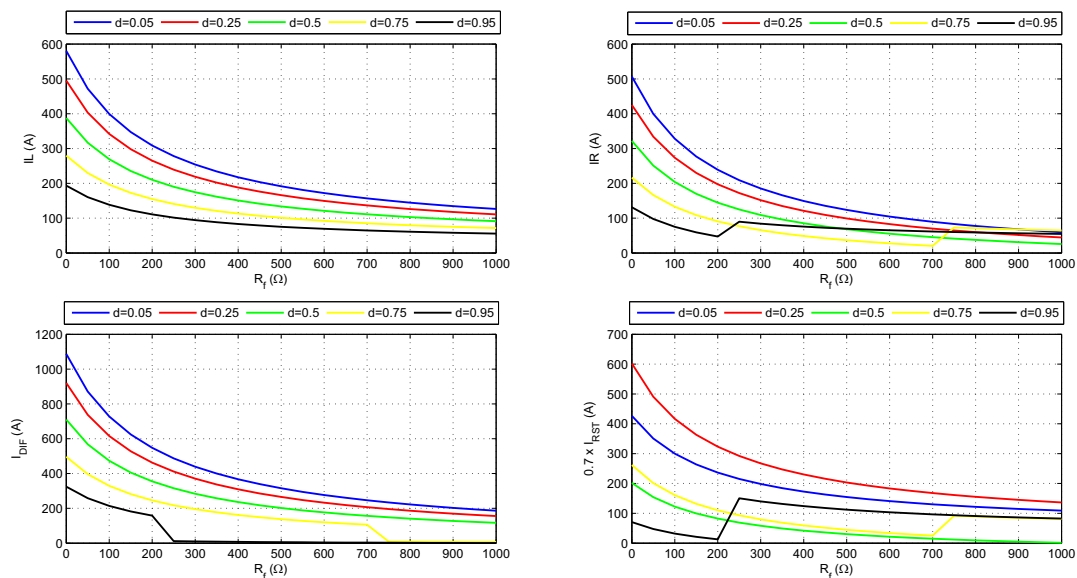
Por conta dessa atenuação do sinal e considerando as condições (5.2) e (5.3), foram identificados casos de falta em que o relé não atuou. Nos casos em que  $i_{pickup} \neq 0.1$ , para

$350 \Omega \leq R_f \leq 650 \Omega$  com  $d$  igual a 0,05 p.u. e  $R_f \geq 500 \Omega$  com  $d$  igual a 0,95 p.u., a função deveria atuar, porém não atuou. Além disso, para os ajustes em que  $i_{pickup} = 0.05 \cdot i_{base}$ , ou seja, os ajustes de menor sensibilidade, para  $d$  igual a 0,05 p.u. com  $R_f \geq 200 \Omega$  e  $d$  igual 0,95 p.u. com  $R_f \geq 350 \Omega$  o sistema de proteção também não atuou.

Quanto a condição de segurança que avalia a localização da falta,  $m_{87}$ , pelas simulações observou-se que a mesma apresentou estimativas precisas, mesmo nos casos em que houve falha na detecção dos índices  $NL_{FIRST}$  e  $NR_{FIRST}$ .

### 5.2.2 Caso 2

Para o Caso 2, no qual considera-se um carregamento elevado nas linhas, ao considerar a linha de 500 kV foram obtidos os resultados apresentados na Figura 5.6.

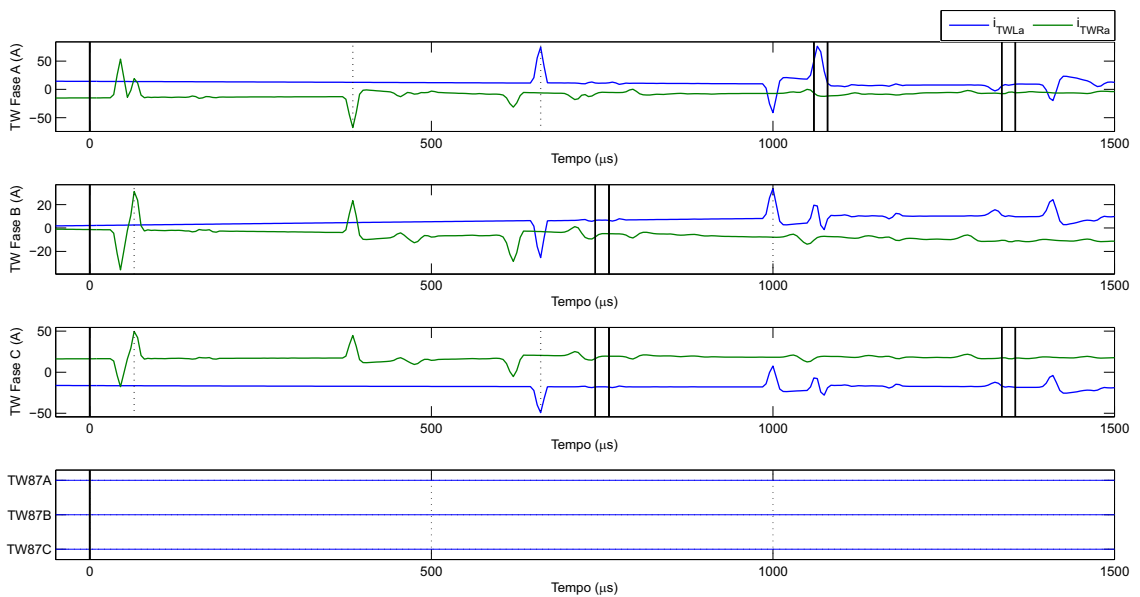


**Figura 5.6.** Variação das correntes em função da variação de  $R_f$  para a linha de 500 kV com  $\delta \approx 96^\circ$  e  $\Theta = 90^\circ$ .

O primeiro ponto a ser observado trata-se das variações das magnitudes das correntes em função da distância da falta. No caso em questão, essas variações (espaçamento entre as curvas) foram maiores do que as variações percebidas para essa mesma linha no Caso 1. A explicação para isso é o fato de que para um carregamento mais elevado a corrente do sistema aumenta e assim, conseqüentemente, a queda de tensão também aumenta proporcionalmente. Sendo assim, considerando que as ondas viajantes que surgem dependem da tensão no ponto de falta,

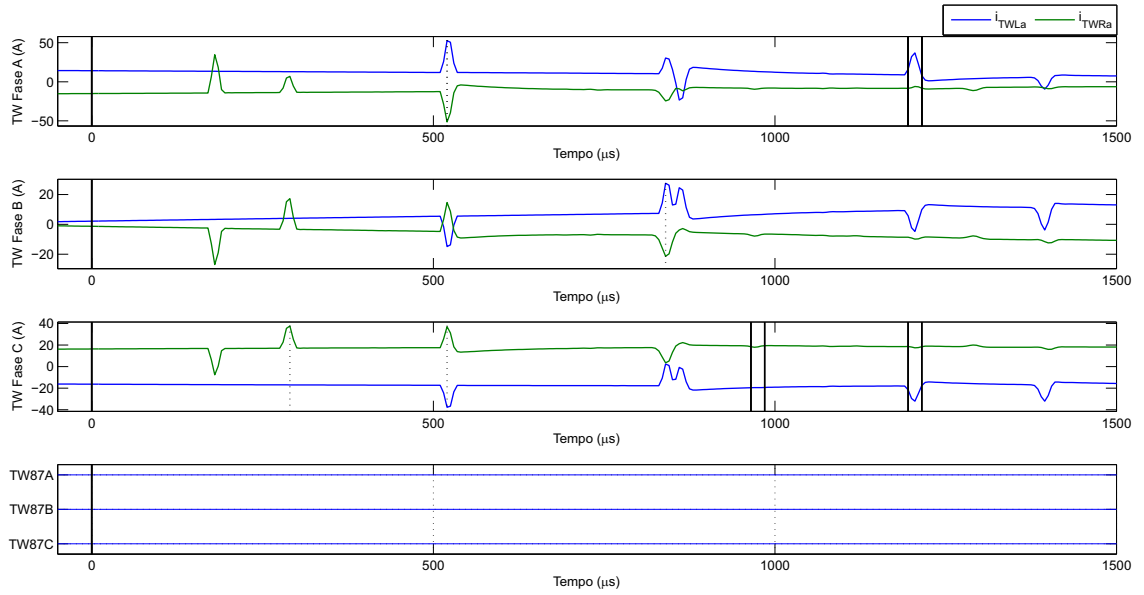
em uma condição de um carregamento mais elevado é natural que as variações das magnitudes sejam maiores, como mostra a Figura 5.6.

Além disso, é possível observar que as curvas apresentaram pontos de descontinuidade semelhantes ao Caso 1 aplicado à linha  $\lambda/2^+$ . Nas Figuras 5.7 e 5.8 apresentam-se os sinais captados pelos terminais nos pontos em que o sinal de IR apresentou mudanças consideráveis. O sinal apresentou valores baixos de magnitude para esses pontos e por isso sofreu com a atenuação por conta da presença da componente fundamental, dificultando a aplicação dos limiares de detecção, o que fez com que as primeiras ondas viajantes no terminal R fossem detectadas erroneamente. Além disso, as ondas aos quais foram atribuídos os índices  $NL_{FIRST}$  e  $NR_{FIRST}$  (ondas com índices destacados pela linha pontilhada) apresentaram polaridade invertida, o que explica o comportamento do sinal de  $I_{DIF}$ . Já para  $I_{RST}$ , que depende do índice  $NR_{FIRST}$  para posicionar a janela de procura responsável por encontrar o valor de magnitude da onda viajante de saída no terminal oposto, como não houve detecção correta da primeira onda incidente, o resto do procedimento ficou comprometido, como mostram as equações (4.27) e (4.28).



**Figura 5.7.** Caso 2 aplicado à linha de 500 kV com  $R_f = 250 \Omega$  e  $d=0,95 p.u.$

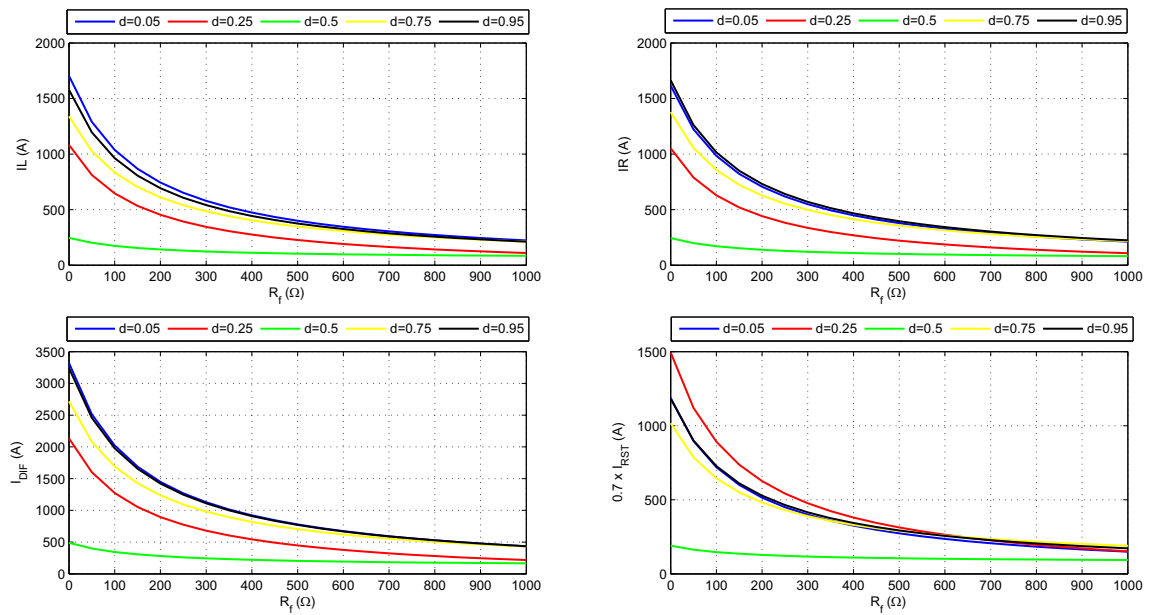
Desse modo, foi observado que para o carregamento mais pesado, quanto maior o valor de  $R_f$  para faltas mais distantes do terminal L, menores foram as magnitudes das correntes e mais o sinal sofreu distorção, o que fez com que o relé não atuasse para alguns casos de falta. Pela Figura 5.6 percebe-se também que a partir dos pontos representados nas Figuras 5.7 e 5.8, o



**Figura 5.8.** Caso 2 aplicado à linha de 500 kV com  $R_f = 750 \Omega$  e  $d=0,75$  p.u.

sinal sofreu desse efeito de atenuação até o valor máximo de  $R_f$  simulado. Sendo assim, para  $i_{pickup} \neq 0.1$  e considerando a condição (5.2), os casos de falta a partir desses valores de  $R_f$ , para as distâncias apresentadas nas Figuras 5.7 e 5.8, não foram detectados pela função.

Considerando agora o Caso 2 aplicado à linha  $\lambda/2^+$ , foram obtidas as curvas representadas na Fig. 5.9.



**Figura 5.9.** Variação das correntes em função da variação de  $R_f$  para a linha  $\lambda/2^+$  com  $\delta \approx 96^\circ$  e  $\Theta = 90^\circ$ .

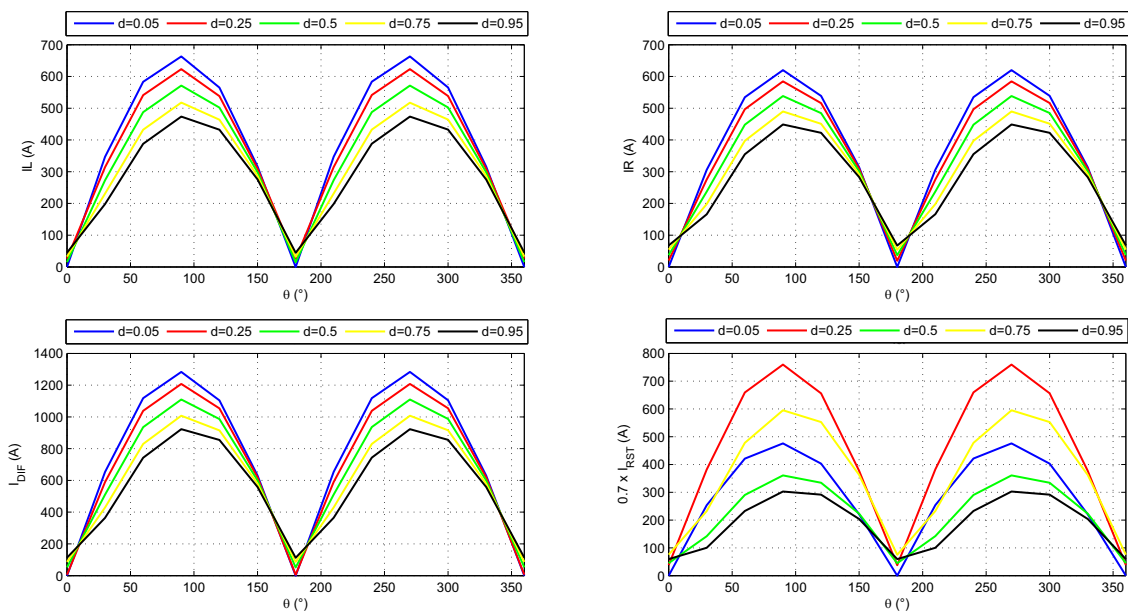
Percebe-se que nesse caso não houve influência da modulação em 60 Hz sobre o sinal filtrado.



Como esperado, para o carregamento mais pesado, as correntes detectadas pelos relés nos terminais apresentaram um comportamento onde, quanto mais próxima a falta do meio da linha, menores foram as magnitudes e maior foi a atenuação nos sinais das correntes, que apresentaram valores máximos para as faltas próximas aos terminais L e R. Esse comportamento destacado é o inverso do que foi observado para o Caso 1, pois, como dito para um carregamento mais elevado maior é a queda de tensão na linha. Por conta disso, principalmente para os ajustes onde  $i_{pickup} = 0.05 \cdot i_{base}$ , para faltas próximas ao meio da linha, ou seja,  $d = 0,5$  p.u., e valores altos de  $R_f$ , o relé não atuou.

### 5.2.3 Caso 3

Para o Caso 3 foram consideradas variações do ângulo de incidência da falta  $\Theta$  em sistemas com carregamento leve. Portanto, na Figura 5.10 estão presentes os resultados obtidos para a linha de 500 kV sob essas condições.

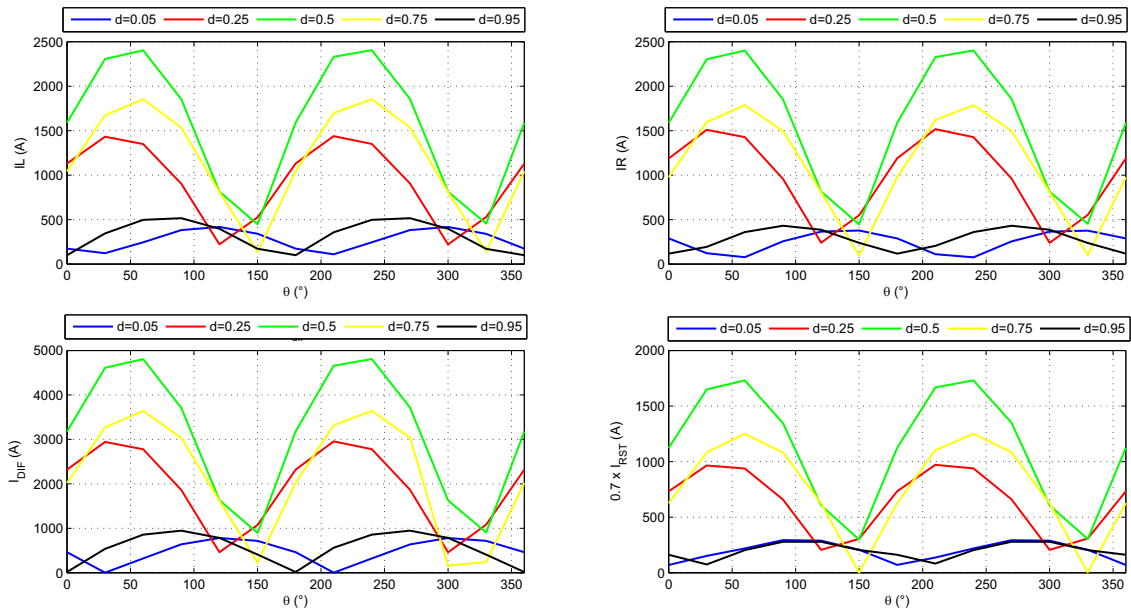


**Figura 5.10.** Variação das correntes em função da variação de  $\Theta$  para a linha de 500 kV com  $\delta \approx 16^\circ$  e  $R_f \approx 0 \Omega$ .

As curvas para as correntes  $I_L$  e  $I_R$  se comportaram como o esperado. Para ângulos de incidência próximos de  $0^\circ$  e  $180^\circ$  essas grandezas apresentaram valores mínimos, enquanto que para ângulos iguais a  $90^\circ$  e  $270^\circ$  apresentaram valores máximos. Além disso, quanto maior a distância da falta, menores as magnitudes dos sinais  $I_L$  e  $I_R$ . Desse modo, a função não foi

capaz de detectar a falha quando  $\Theta = 0^\circ$  e  $\Theta = 180^\circ$  para nenhum dos ajustes selecionados, pois, para esses ângulos as magnitudes de IR e IL foram baixos, o que leva a uma corrente  $I_{DIF}$  também baixa, não satisfazendo a condição de atuação (5.2). Para os outros valores de  $\Theta$  considerados a função atuou de forma correta.

Considerando a linha  $\lambda/2^+$ , os resultados obtidos para o presente caso estão representados na Figura 5.11.



**Figura 5.11.** Variação das correntes em função da variação de  $\Theta$  para a linha  $\lambda/2^+$  com  $\delta \approx 16^\circ$  e  $R_f \approx 0 \Omega$ .

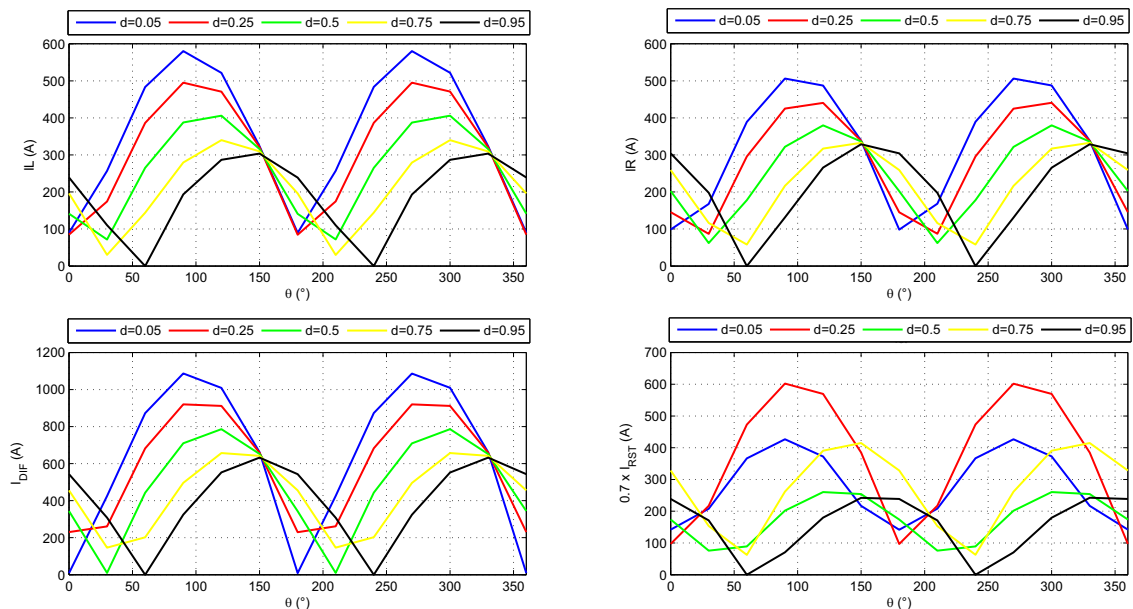
Para esse tipo de linha nota-se que houve um deslocamento das curvas quando comparadas com as obtidas para a linha de 500 kV. A explicação para isso está no fato de que o ângulo de incidência da falta tem como referência o terminal local. Dessa forma, como a linha possui maior extensão, a depender do local da falta, foram observados diferentes defasagens. Nota-se também que da mesma forma como no Caso 1, as maiores magnitudes foram medidas nas localidades próximas à metade do comprimento da linha. Sendo assim, dependendo do valor de  $d$ , dos ângulos correspondentes aos valores mínimos de magnitudes e dos ajustes da função, o relé não atuou.

Para os ajustes onde  $i_{pickup} = 0,1$  o relé atuou em quase todos os casos, com exceção de quando  $d = 0,05$  p.u. e  $\Theta = 30^\circ$  e  $d = 0,95$  p.u. e  $\Theta = 0^\circ$ . O principal motivo da não atuação para esses casos, além das baixas magnitudes das ondas viajantes, foram as detecções errôneas das primeiras ondas no terminal L devido aos efeitos da modulação em 60 Hz nos

sinais de saída do filtro *differentiator-smoother*. Além desses problemas, para os ajustes com  $i_{pickup} \neq 0, 1$ , considerando os valores de  $I_{DIF}$ , o relé não atuou para os casos onde foram obtidos os valores mínimos desse sinal.

#### 5.2.4 Caso 4

No Caso 4 foram analisadas as respostas das variações do ângulo de incidência da falta para um carregamento elevado. Para a linha de 500 kV foram obtidos os resultados representados na Figura 5.12.

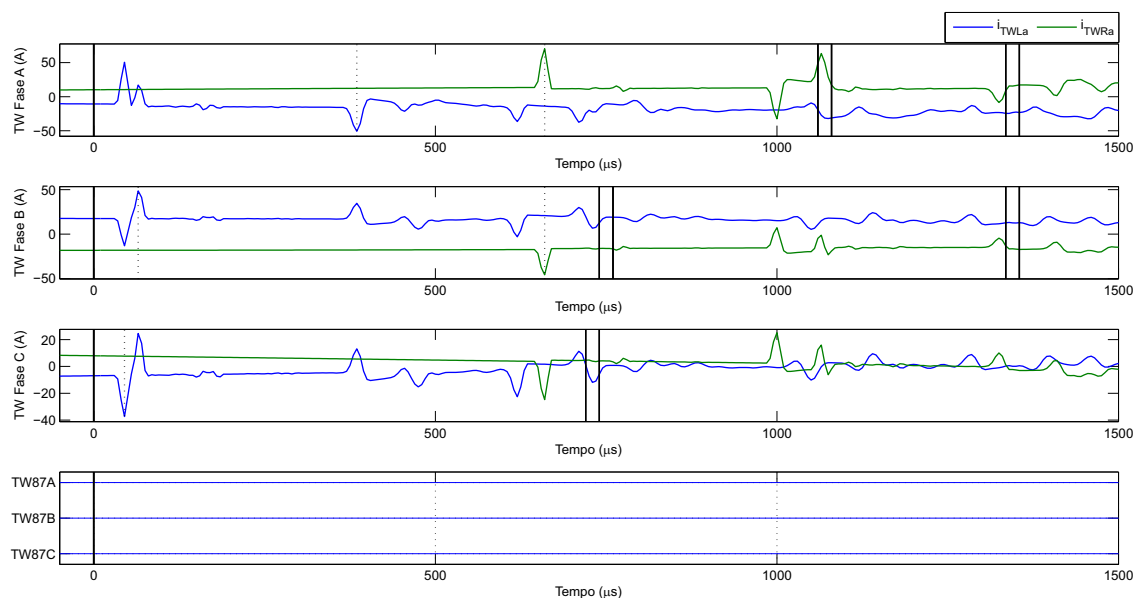


**Figura 5.12.** Variação das correntes em função da variação de  $\Theta$  para a linha de 500 kV com  $\delta \approx 96^\circ$  e  $R_f \approx 0 \Omega$ .

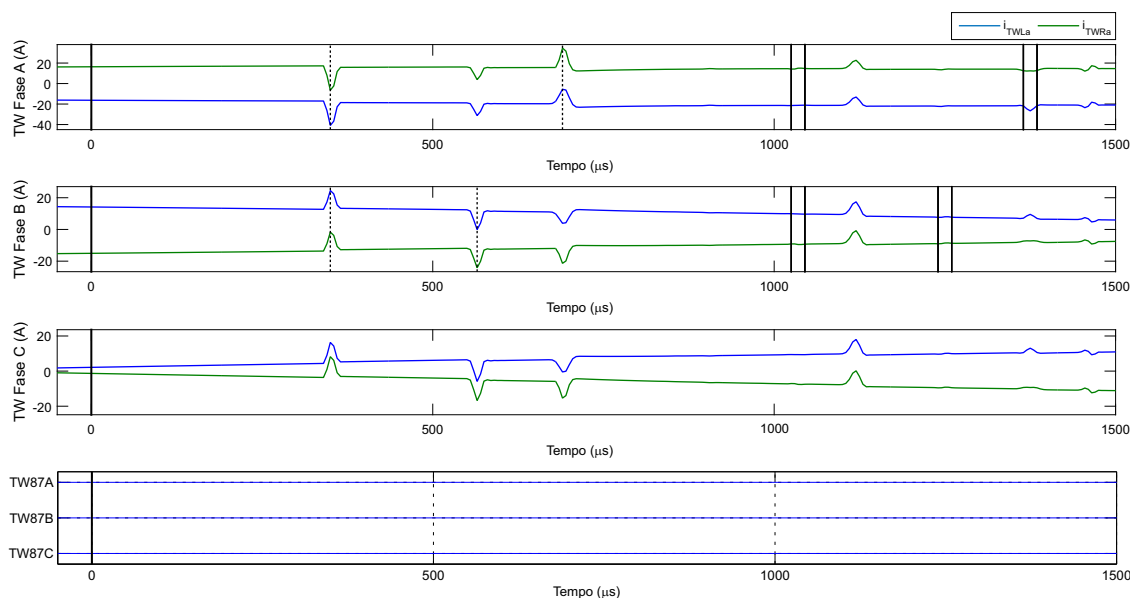
Para esse caso, apesar de os sinais apresentarem comportamento similar aos sinais do caso anterior, como o esperado, logo se percebe uma defasagem com relação aos obtidos para essa mesma linha no Caso 3. Essa defasagem é consequência de um carregamento mais elevado, pois, nesse caso, a queda de tensão na linha é maior e assim as tensões no final da linha diferem em muito das tensões na barra local. Assim, como os ângulos de incidência foram tomados com referência ao terminal local, curvas deslocadas foram obtidas.

Além disso, assim como para os outros casos, os pontos em que os sinais apresentaram menores valores de magnitude também foram os pontos onde os efeitos da atenuação foram mais evidentes. Esse fato pode ser observado nas curvas de  $I_{DIF}$ , onde os valores mínimos para

$d = 0,05; 0,5; 0,95$  p.u. só são consideravelmente menores dos observados para  $d = 0,25$  e  $0,95$  p.u. porque as primeiras ondas viajantes não foram detectadas corretamente, como mostram as Figuras 5.13 e 5.14.



**Figura 5.13.** Caso 4 aplicado à linha de 500 kV com  $\Theta = 180^\circ$  e  $d=0,05$  p.u.

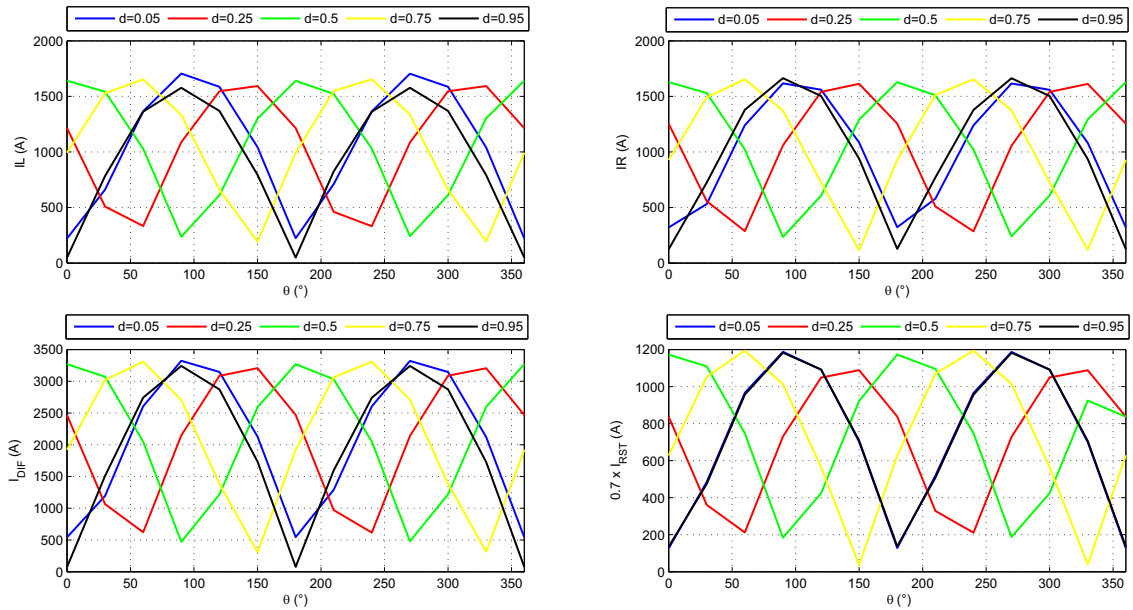


**Figura 5.14.** Caso 4 aplicado à linha de 500 kV com  $\Theta = 210^\circ$  e  $d=0,5$  p.u.

As imagens ilustram dois casos onde as ondas que foram identificadas pelo sistema como ondas correspondentes ao índice  $NL_{FIRST}$  e  $NR_{FIRST}$  possuíam polaridades invertidas, levando a um valor de  $I_{DIF}$  muito baixo impedindo que o relé atuasse. Percebe-se que as primeiras ondas que incidem sobre os terminais possuem polaridades iguais, porém, por conta da atenuação, os

índices  $NL_{FIRST}$  e  $NR_{FIRST}$ , identificados pelas linhas pontilhadas, são atribuídos em alguns casos à ondas subsequentes com polaridades invertidas e módulos de magnitudes maiores. Assim, para os ajustes onde  $i_{pickup} \neq 0, 1$ , considerando os valores mínimos registrados para  $I_{DIF}$  quando  $d = 0,05; 0,5; 0,95$  p.u. a função não atuou.

Quanto ao Caso 4 aplicado à linha  $\lambda/2^+$ , foram obtidos os seguintes resultados:



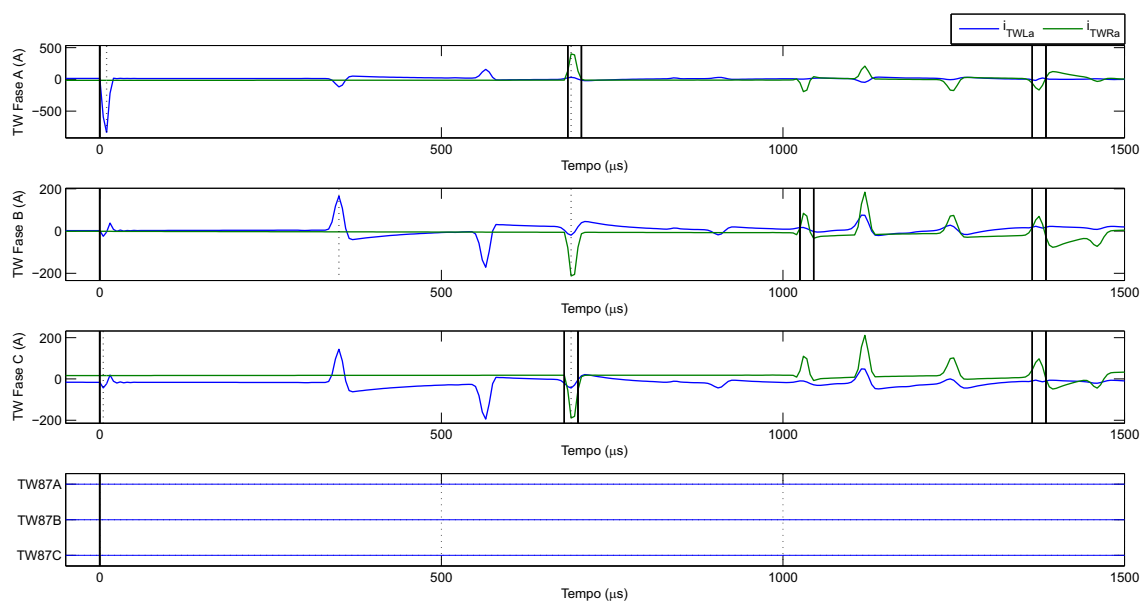
**Figura 5.15.** Variação das correntes em função da variação de  $\Theta$  para a linha  $\lambda/2^+$  com  $\delta \approx 96^{\circ}$  e  $R_f \approx 0 \Omega$ .

Como era de se esperar, para esse carregamento mais elevado, nota-se uma defasagem maior para os sinais quando comparados com os expostos no Caso 3. Além disso, percebe-se que as magnitudes apresentaram valores máximos menores, porém, variaram menos e assim não houveram pontos em que o sinal sofreu distorção severa por conta da atenuação, sendo que a função não atuou apenas para alguns casos em que devido ao ângulo de incidência da falta as magnitudes foram mínimas.

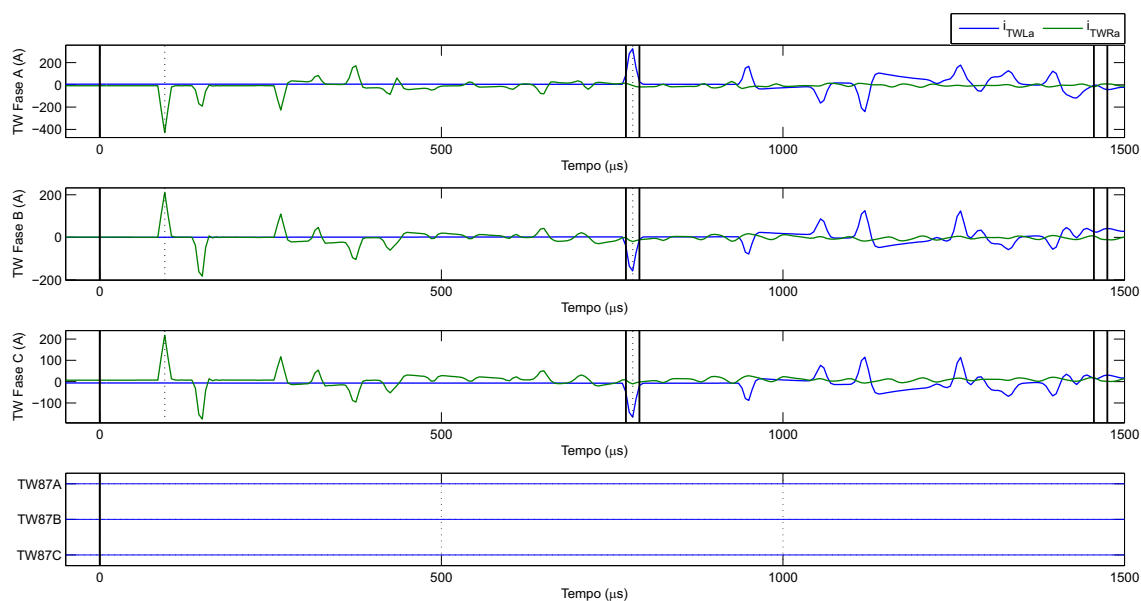
Sendo assim, apenas para quando  $i_{pickup} = 0,05 \cdot i_{base}$ , considerando os pontos em que  $I_{DIF}$  apresentou valor mínimo, o relé não atuou. Para todos os outros ajustes o relé atuou devidamente.

### 5.3 FALTAS EXTERNAS

Como visto, idealmente o relé da função TW87 não deve atuar pra nenhum tipo de falta externa. Sendo assim, com a finalidade de se comprovar essa afirmação foram simuladas também faltas externas para ambas as linhas. Para a linha de 500 kV foram simulados dois casos, uma com uma falta na linha a montante e outro na linha a jusante, representados pelas Figuras 5.16 e 5.17.



**Figura 5.16.** Não atuação para o caso de uma falta externa no lado montante da linha de 500 kV.

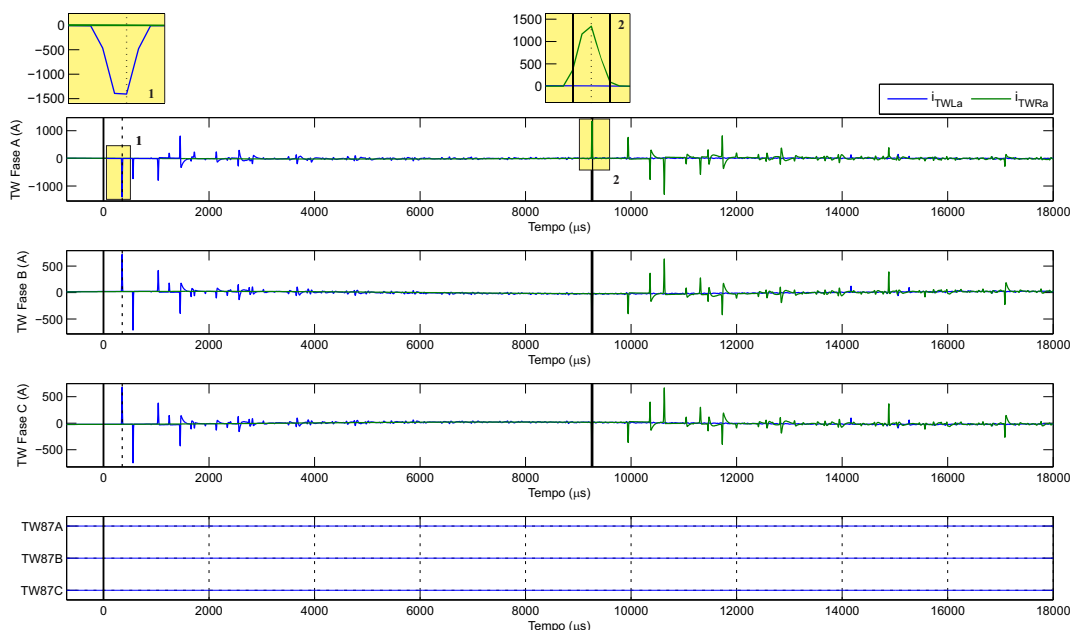


**Figura 5.17.** Não atuação para o caso de uma falta externa no lado jusante da linha de 500 kV.

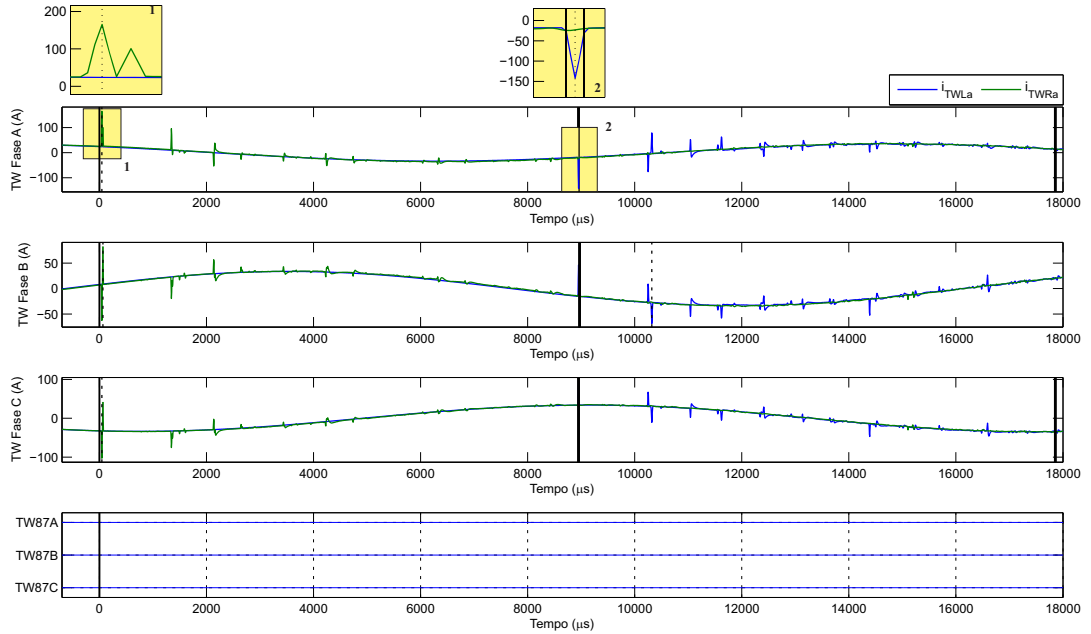
Para a falta na linha a montante foram considerados  $\Theta = 90^\circ$ ,  $\delta \approx 96^\circ$ ,  $R_f = 0 \Omega$  e  $d = 0,95$  p.u. Pelas imagens percebe-se que as primeiras ondas viajantes nos terminais L e R têm polaridades opostas, como era de se esperar. Como visto, as primeiras ondas viajantes incidentes detectadas pelos terminais são na verdade a mesma onda, só que a identificada em um terminal está atrasada pelo tempo de propagação da linha e atenuada pelas perdas em relação à identificada no outro terminal. Por esses motivos, de (4.27), o valor do sinal  $I_{RST}$  calculado foi muito alto. Já para o sinal  $I_{DIF}$ , de (4.26), o valor encontrado foi baixo, considerando que os sinais possuem polaridades inversas. Desse modo, levando em consideração a condição (5.3), a função TW87 não atuou para todos os ajustes selecionados, mesmo aqueles em que  $SLP$  igual a 0,3, que é o menor valor de restrição simulado.

Já para a falta externa a jusante foram considerados  $\Theta = 90^\circ$ ,  $\delta \approx 16^\circ$ ,  $R_f = 0 \Omega$  e  $d = 0,5$  p.u.. Do mesmo modo como o observado para a linha a montante,  $I_{DIF}$  apresentou um valor baixo enquanto  $I_{RST}$  apresentou um valor muito alto. Dessa forma para todos os ajustes da função testados, o relé não atuou para faltas desse tipo.

O processo feito para averiguação do comportamento da função diante de faltas externas foi repetido para a linha  $\lambda/2^+$ . Nas Figuras 5.18 e 5.19 estão as respostas do relé diante a esse tipo de falta, tanto na linha montante quanto na linha justante.



**Figura 5.18.** Não atuação para o caso de uma falta externa no lado montante da linha  $\lambda/2^+$ .



**Figura 5.19.** Não atuação para o caso de uma falta externa no lado jusante da linha  $\lambda/2^+$ .

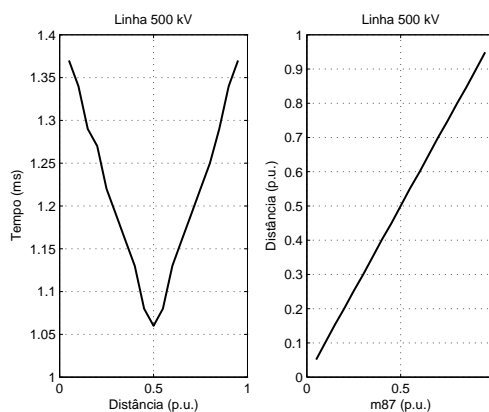
Nesse caso, para a falta na linha a montante, Figura 5.18, foram considerados  $\Theta = 90^\circ$ ,  $\delta \approx 96^\circ$ ,  $R_f = 0 \Omega$  e  $d = 0,5$  p.u. Já para a linha jusante  $\Theta = 90^\circ$ ,  $\delta \approx 16^\circ$ ,  $R_f = 0 \Omega$  e  $d = 0,055$  p.u.. Nota-se que o mesmo fenômeno observado para a linha de 500 kV ocorreu na linha  $\lambda/2^+$ . As primeiras ondas viajantes detectadas pelos terminais possuem polaridades inversas, valores de magnitude próximos e uma está atrasada pelo tempo de propagação da linha em relação à outra. Essas relações fazem com que os valores de  $I_{RST}$  sejam altos e os valores de  $I_{DIF}$  sejam baixos, condição que impede que o relé atue.

## 5.4 CARACTERÍSTICAS DA ATUAÇÃO

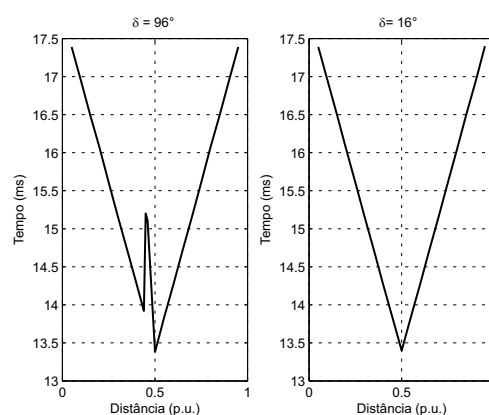
Para os casos onde a função atuou é importante analisar o tempo de atuação e a estimativa de localização da falta, representada pelo sinal m87. Nesse sentido, para os dois tipos de linha foram levantadas as curvas que relacionam o tempo com a distância da aplicação da falta e também a estimativa do local em função do real local da falta. Para isso foram selecionados valores que permitissem a melhor análise dos sinais, que são para  $\Theta = 90^\circ$  e  $R_f = 0 \Omega$  (falta franca). Vale destacar também que foi observado durante a aquisição de dados que para a linha de 500 kV esses resultados foram iguais independentemente do ângulo  $\delta$ , diferentemente da linha  $\lambda/2^+$ , por isso foram avaliados casos de atuação para os dois tipos de carregamentos



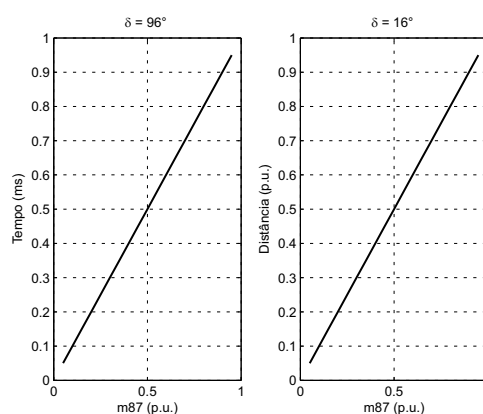
simulados para essa linha.



**Figura 5.20.** Relação entre distância e tempo de atuação e distância e estimativa de localização para a linha de 500 kV.



**Figura 5.21.** Relação entre distância e tempo de atuação considerando dois níveis de carregamento para a linha  $\lambda/2^+$ .

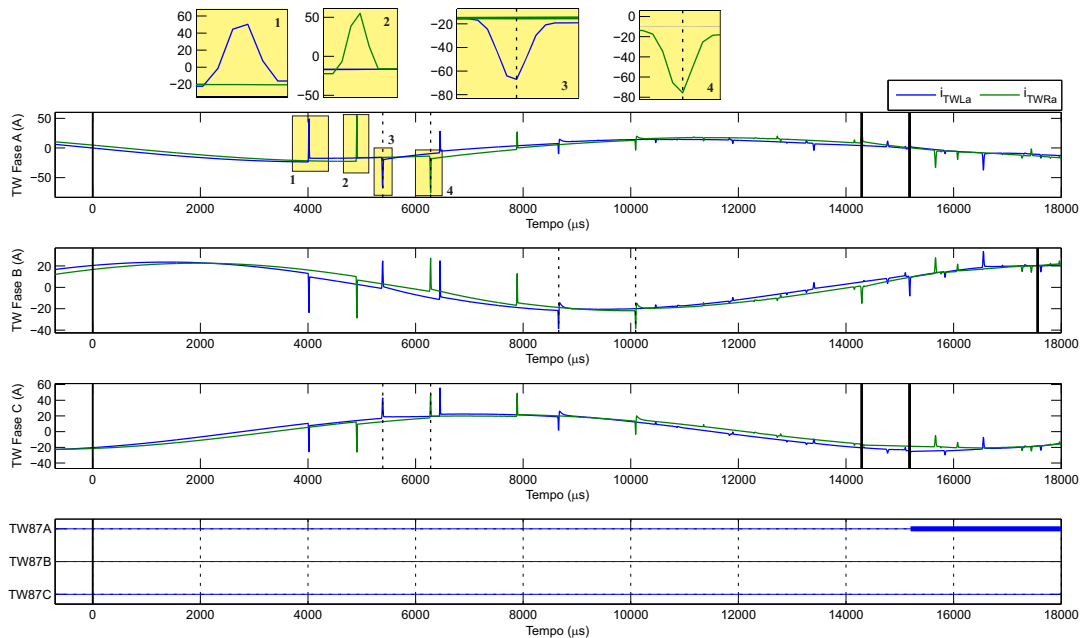


**Figura 5.22.** Relação entre distância e estimativa de localização para dois níveis de carregamento para a linha  $\lambda/2^+$ .

Pelas imagens percebe-se que, considerando a linha de 500 kV, quanto mais próxima do meio da linha a falta, menor o tempo de atuação do relé. A explicação para isso é que a função só toma a decisão de atuar ou não após a detecção de todos os índices e sinais. Assim, os índices

$NL_{FIRST}$  e  $NR_{FIRST}$  são os principais determinantes do tempo de atuação, pois, é a partir deles que todos os outros parâmetros são identificados e calculados. Portanto, para uma falta exatamente no meio da linha o tempo de detecção dos índices  $NL_{FIRST}$  e  $NR_{FIRST}$  será igual e nesse ponto o tempo de atuação será mínimo, como mostra a Figura 5.20. Para faltas mais próximas de um dos terminais o tempo de detecção de um dos índices será mínimo, dependendo de qual dos terminais a falta está mais próxima, porém, o tempo de detecção do outro índice será máximo, o que justifica um tempo maior para a atuação quando a falta se encontra mais próxima dos terminais.

Para a linha  $\lambda/2^+$ , considerando um  $\delta = 16^\circ$ , o comportamento da função foi o mesmo observado para a linha de 500 kV. Porém, para  $\delta = 96^\circ$  observa-se que há um ponto de descontinuidade quando  $d$  próximo de 0,45 p.u. Uma explicação plausível para esse fenômeno é que, como já mostrado neste trabalho, para um carregamento mais elevado as perdas na linha são maiores, assim, no caso da linha  $\lambda/2^+$  as magnitudes das ondas viajantes possuem valores mínimos para faltas próximas ao meio da linha. Na Figura 5.23 temos a representação de uma falta localizada exatamente no ponto 0,45 p.u. para  $\delta = 96^\circ$ .



**Figura 5.23.** Falta em  $d = 0,45$  p.u. e  $\delta = 96^\circ$  na linha  $\lambda/2^+$ .

Pela imagem nota-se que os valores de corrente foram baixos e por isso mais afetados pela modulação do sinal em 60 Hz. Foi visto também que para um nível de carregamento mais elevado as magnitudes dos sinais detectados para faltas no meio da linha eram mínimos, quando

comparado com os detectados em casos de faltas próximos aos terminais. Por esses motivos, nesse caso, a detecção da primeira onda viajante é atrasado em ambos os terminais, o que faz com que o tempo para a atuação seja maior. Nos quadros destacados na Figura 5.23, têm-se nos quadros 1 e 2 as reais primeiras ondas viajantes nos dois terminais, que não foram detectadas, enquanto que nos quadros 3 e 4 têm-se as ondas que foram detectadas como primeiras ondas viajantes incidentes e que possuem magnitudes maiores do que as destacadas nos quadros 1 e 2. Esse fato justifica um maior tempo para a atuação nesse ponto, os quais são na verdade decorrentes de uma detecção indevida das primeiras ondas viajantes. Em contrapartida, para  $\delta \approx 16^\circ$  os sinais possuem magnitudes maiores para faltas próximas ao centro da linha e para defeitos próximos aos terminais valores menores, mas não o suficiente para que a atenuação interferisse no tempo de atuação.

Em relação ao m87, pelas imagens, observa-se que independentemente do tipo de linha e do nível de carregamento a estimativa da localização do defeito se mostrou precisa para todos os casos. Deve-se ressaltar que, mesmo nos casos em que a detecção das primeiras ondas ocorreu de forma indevida, os erros inseridos no processo de detecção foram iguais em ambos os terminais da linha, resultando ainda em uma localização estimada correta.

# CONCLUSÃO E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho, avaliou-se a proteção diferencial baseada em ondas viajantes aplicada em linhas  $\lambda/2^+$ . Tendo em vista a importância da transmissão de energia a longas distâncias no país e no mundo e considerando que a transmissão AC em  $\lambda/2^+$  vem se mostrando como uma alternativa interessante em termos técnicos e econômicos, a avaliação de desempenho de um esquema de proteção baseado em ondas viajantes aplicado em linhas  $\lambda/2^+$  é ainda um tópico que se mostrava carente em seu estado da arte. Este trabalho mostrou que o elemento diferencial TW87, disponível no relé comercial da SEL T400L é aparentemente capaz de fornecer um esquema de proteção confiável e seguro para esse tipo de linha, a depender dos ajustes empregados, assim como para linhas de tamanho convencional, trazendo uma contribuição apreciável a este tema de pesquisa.

No Capítulo 2 foi realizado um levantamento acerca do estado da arte da transmissão de energia em linhas  $\lambda/2^+$  e também dos métodos de proteção baseados na teoria de ondas viajantes. Ambos os temas têm atraído o interesse de concessionárias nos últimos anos.

No Capítulo 3 foi realizada uma revisão sobre os principais conceitos referentes à transmissão de energia em  $\lambda/2^+$ . Foram apresentados os principais aspectos desse tipo de linha, uma análise do comportamento da mesma diante de faltas e por fim uma breve explanação sobre a proteção que já foi testada em linhas desse tipo. Mostrou-se que as tensões e correntes no terminal remoto da linha refletem as do terminal local em módulo e com defasagem de  $180^\circ$  para qualquer condição, que o módulo da tensão no meio da linha é proporcional ao carregamento e que a corrente no meio da linha é sempre igual àquela referente à sua potência característica. Além disso, mostrou-se que não há a ocorrência de efeito Ferranti e que a impedância série da linha  $\lambda/2^+$  é equivalente a de uma linha com poucos quilômetros, garantindo uma grande margem de estabilidade. Além disso, foi mostrado que os perfis de tensão e corrente variam muito ao longo

da linha a depender do carregamento. Notou-se também que o comportamento das grandezas de corrente e tensão diante de faltas para esse tipo de linha são diferentes dos percebidos em linhas convencionais.

Em seguida, no Capítulo 4, foram apresentados os principais fundamentos da proteção baseada em ondas viajantes. Foi realizado um estudo sobre a proteção no domínio do tempo com enfoque no esquema diferencial de ondas viajantes. Além disso, apresentou-se o método de operação do elemento diferencial por ondas viajantes (TW87). Do exposto, foi possível aprofundar o conhecimento na proteção baseada em ondas viajantes e também ver em detalhes como é feita a implantação de um esquema desse em um relé, como é feito com a TW87.

Por fim, no Capítulo 5 foram apresentados os cenários de faltas simulados nas linhas de tamanho convencional e  $\lambda/2^+$ . Nos casos de falta foram variados os parâmetros da falta a fim de se obter diferentes condições para a detecção da falha. Foram definidos também os diferentes ajustes da função TW87 para a análise de sensibilidade da mesma. Por fim foram feitas as análises dos resultados obtidos das simulações de detecção de faltas em ambas as linhas. Dos resultados, conclui-se que, as variáveis de falta exercem efeitos semelhantes em ambos os tipos de linha, sendo que as diferenças nos sinais são provocados pelos diferentes parâmetros e características das linhas.

Além disso, conclui-se também que, os ajustes da TW87 exercem influência direta nos seus limites de sensibilidade. Para ambas as linhas, os ajustes que resultam na TW87 mais sensível, a proteção atuou em praticamente todos os casos, mesmo em situações adversas de resistências de falta e carregamento. Por outro lado, para os ajustes que resultam na TW87 mais segura, verificou-se uma pequena redução de seus limites de sensibilidade. Ainda assim, é importante ressaltar que essa redução de sensibilidade não compromete o desempenho da TW87, a qual, para valores típicos de resistência de falta, ângulos de incidência e carregamento, foi capaz de atuar de forma confiável em ambos os sistemas. Com relação a TW87, pôde-se notar ainda que pequena é a influência do ajuste do parâmetro  $SLP$  na sensibilidade da proteção, sendo que o ajuste de  $i_{pickup}$  tem maior peso na variação da sensibilidade.

Dos resultados foi possível observar também que na maioria dos casos de não atuação nas duas linhas o principal motivo foi o mesmo, a atenuação dos sinais de corrente medidos nos terminais. Já os tempos de atuação e a estimativa da localização da falta se mostraram viáveis

e proporcionais ao tamanho da linha, com raras exceções para linha  $\lambda/2^+$ , onde, a depender dos parâmetros da linha e das condições da falta, o relé pode levar um tempo maior do que o observado em casos semelhantes para atuar.

Considerando apenas os casos simulados, a função TW87 se mostrou preliminarmente confiável e segura para a proteção de linhas  $\lambda/2^+$ . Assim, como continuação dos estudos realizados neste trabalho, são sugeridas as seguintes propostas de trabalhos futuros:

- Considerar faltas envolvendo mais de uma fase.
- Realização de simulações em massa onde é possível obter o máximo de cenários de faltas para a linha  $\lambda/2^+$ .
- Testar mais ajustes para a função.
- Avaliar outros métodos de proteção baseados em ondas viajantes na linha  $\lambda/2^+$ .
- Avaliar a utilização de filtros que removam completamente a componente fundamental.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSON, P. Power system protection. In: IEEE PRESS SERIES ON POWER ENGINEERING, WILEY INTERSCIENCE,. Piscataway, NJ - USA, 1999. Citado na página 33.
- BEWLEY, L. V. Traveling waves on transmission systems. transactions of the american institute of electrical engineers. In: . [S.l.: s.n.], 1931. Citado na página 8.
- COSTA, F. B.; SOUZA, B. A. Fault-induced transient analysis for real-time fault detection and location in transmission lines. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEMS TRANSIENTS. Delft, Netherlands, 2011. Citado na página 9.
- DIAS, R. F. da S. *Derivação ou injeção de energia em uma linha de transmissão de pouco mais de meio comprimento de onda por dispositivos de eletrônica de potência*. Dissertação (Tese de Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2008. Citado na página 12.
- DOMMEL, H. W.; MICHELS, J. High-speed relaying using traveling wave transient analysis. In: IEEE PES WINTER MEETING. New York, NY, 1978. Citado na página 8.
- FABIÁN, R. G.; TAVARES, M. C. *Distance Protection for Half Wavelength Transmission Lines*. [S.l.], 2015. Citado na página 24.
- FENG, Z.; JUN, L.; LI, Z.; ZHIHAO, Y. A new fault location method avoiding wave speed and based on traveling waves for ehv transmission line. In: THIRD INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRIC UTILITY DEREGULATION AND RESTRUCTURING AND POWER TECHNOLOGIES (DRPT 2008). [S.l.], 2008. Citado na página 9.
- GALE, P.; CROSSLEY, P.; BINGYIN, X.; YAOZHONG, G.; CORY, B.; BARKER, J. Fault location based on travelling waves. In: FIFTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON DEVELOPMENTS IN POWER SYSTEM PROTECTION. [S.l.], 1993. Citado na página 9.
- GIRGIS, A.; HART, D.; PETERSON, W. A new fault location technique for two- and three-terminal lines. In: IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY. [S.l.], 1992. Citado na página 21.
- GLOVER, J. D.; SARMA, M. S.; OVERBYE, T. J. *Power System Analysis and Design*. 5. ed. [S.l.]: CENGAGE Learning, 2011. Citado 4 vezes nas páginas 13, 14, 15, and 18.
- GOMES, L. C.; P., L. C.; TAVARES, M. C. Half-wavelength transmission lines for connecting power plants in amazon region to the brazilian system. 2013. Citado 2 vezes nas páginas 1 and 7.
- HE, Z.; MAI, R.; HE, W.; QIAN, Q. Phasor-measurement-unit-based transmission line fault location estimator under dynamic conditions. In: IET GENERATION, TRANSMISSION AND DISTRIBUTION. [S.l.], 2011. Citado na página 21.

- HUBERT, F.; GENT, M. R. Half-wavelength power transmission lines. In: . [S.l.: s.n.], 1965. p. 965–974. Citado 2 vezes nas páginas 2 and 5.
- ILICETO, F.; CINIEMI, E. Analysis of half-wave length transmission lines with simulation of corona losses. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 3, n. 4, Outubro 1988. Citado na página 6.
- JENSEN, R.; GALE, P. At last, locate faults by recording traveling waves. *Electrical World*, v. 210, n. 2, feb. 1996. Citado na página 3.
- JIAN, Q.; XIANGXUN, C.; JIANCHAO, Z. Travelling wave fault location of transmission line using wavelet transform. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEM TECHNOLOGY, 1998 (POWERCON'98). [S.l.], 1998. v. 1. Citado na página 9.
- JOHNS, A.; JAMALI, S. Accurate fault location technique for power transmission lines. In: IEEE PROCEEDINGS C GENERATION, TRANSMISSION AND DISTRIBUTION. [S.l.], 1990. Citado na página 21.
- KINDERMANN, G. *Proteção de Sistemas Elétricos de Potência*. 2. ed. Santa Catarina: Edição do Autor, 2005. v. 1. Citado na página 18.
- KÜSEL, B. F. *Proteção de Linhas de Transmissão com Pouco Mais de Meio Comprimento de Onda*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil, 2014. Citado 7 vezes nas páginas 1, 7, 12, 13, 14, 23, and 24.
- KÜSEL, B. F.; SILVA, K. M.; MOLAS, E. C. Pode a função de distância ser utilizada na proteção de linhas de transmissão com pouco mais de meio comprimento de onda. In: XI SEMINÁRIO TÉCNICO DE PROTEÇÃO E CONTROLE (STPC). [S.l.], 2012. Citado 6 vezes nas páginas iii, 2, 7, 16, 17, and 24.
- KÜSEL, B. F.; SILVA, K. M.; SORDI, M. A. D. Avaliação do desempenho da proteção de distância aplicada às linhas com pouco mais de meio comprimento de onda. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS (SBSE). [S.l.], 2012. Citado 4 vezes nas páginas iii, 15, 19, and 20.
- LOPES, F. V. *Localização de Falhas em Tempo Real Baseada na Teoria de Ondas Viajantes Usando Dados N/ ao Sincronizados de Dois Terminais*. 191 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, Brasil, mai. 2014. Citado 4 vezes nas páginas 9, 18, 20, and 21.
- LOPES, F. V.; KÜSEL, B. F.; SILVA, K. M. Proteção de distância não convencional aplicada às linhas de transmissão com pouco mais de meio comprimento de onda. In: XXII SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. [S.l.], 2013. Citado 4 vezes nas páginas iii, 3, 8, and 16.
- LOPES, F. V.; KÜSEL, B. F.; SILVA, K. M. Unconventional distance protection in half-wavelength transmission lines. In: IPST - INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEMS TRANSIENTS. [S.l.], 2015. Citado 2 vezes nas páginas 3 and 24.
- LOPES, F. V.; KÜSEL, B. F.; SILVA, K. M. Traveling wave-based fault location on half-wavelength transmission lines. In: IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS. [S.l.], 2016. v. 14, n. 1, p. 248–253. Citado 5 vezes nas páginas 2, 3, 8, 17, and 23.



- LOPES, F. V.; KÜSEL, B. F.; SILVA, K. M.; JR., D. F.; NEVES, W. Fault location on transmission lines little longer than half-wavelength. In: *ELECTRIC POWER SYSTEM RESEARCH*. [S.l.], 2014. p. 101–109. Citado 6 vezes nas páginas iii, 8, 9, 21, 22, and 23.
- LOPES, F. V.; SILVA, K. M.; JR., E. J. S. L.; OLIVEIRA, A. E. Análise de sensibilidade paramétrica da proteção diferencial de linhas baseada em ondas viajantes. In: *XIII SEMINÁRIO TÉCNICO DE PROTEÇÃO E CONTROLE*. [S.l.], 2016. Citado 7 vezes nas páginas iii, iv, 10, 29, 30, 34, and 36.
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. *ONS RE 3/109/2011 - Filosofias das Proteções das Linhas de Transmissão de Tensões Iguais e Superiores a 345 kV*. Brasil, 2011. Citado na página 23.
- PAVEL, C. O. Linhas de transmissão de meio comprimento de onda. In: . Balneário Camboriú-SC: [s.n.], 1981. Citado na página 6.
- PORTELA, C.; ALVIM, M. Soluções não convencionais em ca adequadas para transmissão a distância muito longa - uma alternativa para o sistema de transmissão da amazônia. *Transmissão de Energia Elétrica a Longa Distância*, Recife, PE, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 14 and 15.
- PORTELA, C.; JR., S. G. Non-conventional lines with high transmission capacity. In: *XV SNTPE NATIONAL SEMINAR OF PRODUCTION AND TRANSMISSION OF ELECTRIC ENERGY*. Foz do Iguaçu, Brasil, 1999. Citado na página 2.
- PRABHAKARA, F. S.; PARTHASARATHY, K.; RAO, H. N. R. Analysis of natural half-wavelength power transmission lines. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, n. 12, Dezembro 1969. Citado 2 vezes nas páginas 5 and 6.
- PRABHAKARA, F. S.; PARTHASARATHY, K.; RAO, H. N. R. Performance of tuned halfwave-length power transmission lines. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, n. 12, Dezembro 1969. Citado na página 6.
- PRESTON, G.; RADOJEVIC, Z.; KIM, C.; TERZIJA, V. New settings-free fault location algorithm based on synchronised sampling. In: *IET GENERATION, TRANSMISSION AND DISTRIBUTION*. [S.l.], 2011. Citado na página 21.
- SAHA, M. M.; IZYKOWSKI, J.; E.ROSOLOWSKI. *Fault Location on Power Networks*. London, U.K.: Springer, 2010. Citado 3 vezes nas páginas 1, 18, and 20.
- SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES. *SEL-T400L Time-Domain Line Protection*. USA, 2017. Citado na página 11.
- SCHWEITZER, I. E. O.; KASZTENNY, B.; GUZMA, A.; SKENDZIC, V.; MYNAM, M. V. Speed of line protection - can we break free of phasor limitations? In: *41nd ANNUAL WESTERN PROTECTIVE RELAY CONFERENCE*. Washington, USA, 2014. Citado 10 vezes nas páginas iii, 10, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, and 33.
- SCHWEITZER, I. 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*. Washington, USA, 2015. Citado 10 vezes nas páginas iii, iv, 3, 10, 21, 32, 33, 34, 35, and 36.

TAKAGI, T.; BARBAR, J.; KATSUHIKO, U.; SAKAGUCHI, T. Fault protection based on travelling wave theory, part i: Theory,. *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, Mexico, July 1997. Citado na página 30.

TZIOUVARAS, D.; ROBERTS, J.; BENMOUYAL, G. New multi-ended fault location design for two- or three-terminal lines. In: SEVENTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON (IEE) DEVELOPMENTS IN POWER SYSTEM PROTECTION. [S.l.], 2001. Citado na página 21.

VERSHKOV, V. A.; NAKHAPETYAN, K. T.; OL'SHEVSKIY, O. V. Complex testing of a half-wave tuned transmission in the 500 kv interconnection of the power grid of european u.s.s.r. *Elektrichestvo*, n. 8, 1968. Citado 2 vezes nas páginas 5 and 6.

WEDEPOHL, L. M.; MOHAMED, S. E. T. Apparent impedances of very long multiconductor transmission lines. In: PROCEEDINGS OF THE INSTITUTION OF ELECTRICAL ENGINEERS. [S.l.], 1970. Citado na página 7.

WOLF, A. A.; SCHERBATCHOV, O. V. On normal working conditions of compensated lines with half-wave characteristics. *Elektrichestvo*, v. 1, 1940. Citado na página 5.