



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E
DE COMPUTAÇÃO



Proteção de Linhas de Transmissão de Corrente Alternada Baseada em Ondas Viajantes Utilizando Um Terminal

Rafael Lucas da Silva França

Orientador: Prof. Dr. Flavio Bezerra Costa

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação da UFRN (área de concentração: Automação e Sistemas) como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Número de Ordem do PPgEEC: M513
Natal, RN, 18 de dezembro de 2017

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação da Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Franca, Rafael Lucas da Silva.

Proteção de Linhas de Transmissão de Corrente Alternada Baseada em Ondas Viajantes Utilizando Um Terminal / Rafael Lucas da Silva França. - 2018. 92f. : il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Natal, 2018.

Orientador: Dr. Flavio Bezerra Costa.

1. Proteção de Linhas de Transmissão - Dissertação. 2. Ondas Viajantes - Dissertação. 3. Onda Viajantes Modais - Dissertação. 4. Proteção com Um Terminal - Dissertação. I. Costa, Flavio Bezerra. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 621.3

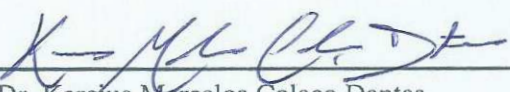
Proteção de Linhas de Transmissão de Corrente Alternada Baseada em Ondas Viajantes Utilizando Um Terminal

Rafael Lucas da Silva França

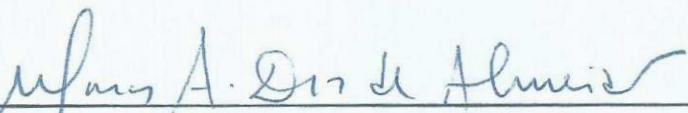
Dissertação de Mestrado aprovada em 18 de dezembro de 2017 pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:



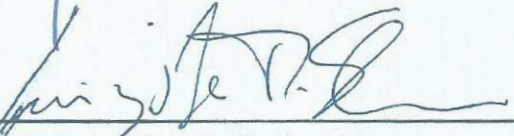
Prof. Dr. Flavio Bezerra Costa (Orientador) UFRN



Prof. Dr. Karcus Marcelos Colaço Dantas UFCG



Prof. Dr. Marcos Antônio Dias de Almeida UFRN



Prof. Dr. Luiz Felipe de Queiroz Silveira UFRN

*A Deus, aos meus pais Sérgio
Augusto Nascimento de França e
Eliene Francisca da Silva França,
aos meus irmãos Sérgio Augusto
Nascimento de França Júnior e
Raiane Caroline da Silva França e à
minha esposa e companheira Letícia
de Souza Amaral.*

Agradecimentos

Ao meu orientador, professor Flavio Bezerra Costa, pela inigualável dedicação.

Ao meu tio, Professor Elialdo Chibério da Silva, a quem tenho como referência, pelas orientações ao longo da vida.

Aos amigos e colegas de trabalho do ProRedes, mas principalmente, Mônica Maria Leal, Francisco Canindé da Silva Júnior, Rodrigo Prado de Medeiros, João Tiago Loureiro Sousa Campos, Daniel Marques da Silva, Jessika Fonseca Fernandes, Frankelene Pinheiro de Souza e Marcos Sergio Rodrigues Leal, pelas importantes contribuições ao longo deste trabalho.

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo suporte financeiro.

À minha família, em especial aos meus pais, meus irmãos e minha esposa pelo apoio incondicional durante esta jornada.

Resumo

Neste trabalho, os princípios da proteção de ondas viajantes são investigados e dois métodos de proteção de linhas de transmissão baseados em ondas viajantes utilizando um terminal são propostos. O primeiro método é dependente da primeira reflexão da onda viajante, enquanto que o segundo é baseado nas detecções das ondas modais e não necessita das reflexões das ondas, entretanto, é válido apenas para faltas envolvendo a terra. O efeito da frequência de amostragem na proteção é equacionado, efeito esse, até então, ainda não investigado para métodos de um terminal. Em contraponto às altas frequências de amostragem normalmente adotadas em métodos baseados em um terminal, procedimentos para a determinação da mínima frequência de amostragem são definidos. Além disso, problemas clássicos inerentes à proteção baseada em ondas viajantes, como a ocorrência de faltas próximas aos terminais da linha e a estimação da velocidade das ondas, são detalhadamente equacionados e soluções a tais problemas são apresentadas. Os métodos foram avaliados por meio de simulações computacionais e os resultados demonstram que possuem tempo de atuação muito abaixo dos métodos convencionais. Demonstram também que o método baseado nas reflexões das ondas, apesar dos bons resultados obtidos, pode apresentar dificuldades para sua aplicação, uma vez que depende da correta detecção da onda refletida na falta, enquanto que o método baseado em ondas modais é confiável, mas aplicável apenas às faltas que envolvem a terra.

Palavras-chave: Proteção de Linhas de Transmissão, Ondas Viajantes, Onda Viajantes Modais, Proteção com Um Terminal.

Abstract

In this work, the traveling wave protection principles are investigated and two one-terminal transmission line protection method based on traveling waves are proposed. The first method is dependent of the first wave reflection, whereas the second one is based on modal waves detections and does not require wave reflections, however, is valid only to earth-faults. The effect of the sampling frequency on the protection is considered, what until then has not yet been investigated for one-terminal methods. In contrast to the high sampling frequencies normally adopted in one-terminal-based methods, procedures for determining the minimum sampling frequency are defined. In addition, classical problems inherent to protection based on traveling waves, such as the occurrence of faults near the line terminals and the estimation of the waves velocity, are detailed equated and solutions to such problems are presented. The methods were evaluated by means of computational simulations and the results show that they have an operation time far below the conventional methods. They also demonstrate that the method based on the wave reflections, despite the good results obtained, can present difficulties for its application, since it depends on the correct detection of the wave reflected in the fault point, since the method based on modal waves is reliable, but applicable only to earth-faults.

Keywords: Line Transmission Protection, Traveling Waves, Modal Traveling Waves, One-Terminal Protection.

Sumário

Sumário	i
Lista de Figuras	iv
Lista de Tabelas	vi
Lista de Símbolos	vii
Lista de Abreviaturas e Siglas	x
1 Introdução	1
1.1 Motivação	4
1.2 Objetivos	5
1.3 Contribuições	6
1.4 Organização do Trabalho	6
2 Estado da Arte	8
2.1 Métodos Baseados em Ondas Viajantes Utilizando um Terminal	8
2.2 Métodos Baseados em Ondas Viajantes Utilizando dois Terminais	12
2.3 Resumo do Estado da Arte	16
2.4 Síntese do Capítulo	18
3 Teoria Básica das Ondas Viajantes	19
3.1 Equações da Linha de Transmissão	19
3.2 Propagação de Ondas em Descontinuidades	21
3.2.1 Reflexões e Refrações das Ondas	21
3.3 Componentes Modais	24
3.4 Síntese do Capítulo	24
4 Proteção de Linhas de Transmissão Baseada nas Reflexões das Ondas Viajantes Utilizando um Terminal	26
4.1 Ondas Viajantes Utilizando um Terminal	26

4.2	Ondas Viajantes em uma Linha Simples	27
4.3	Inclusão de Linhas Adjacentes	30
4.4	Domínio de Tempo Discreto para uma Linha Simples	34
4.4.1	As Zonas Protegida, Desprotegida e de Incerteza	37
4.4.2	Efeito da Estimação da Velocidade da Onda Viajante	40
4.5	Método Proposto	42
4.6	Síntese do Capítulo	42
5	Proteção de Linhas de Transmissão Proposta Baseada em Ondas Viajantes	
	Modais Utilizando um Terminal	44
5.1	Visão Geral do Esquema de Proteção	44
5.2	Direcionalidade de Falta	45
5.3	Domínio de Tempo Contínuo	46
5.4	Domínio de Tempo Discreto	47
5.4.1	As Zonas Protegida, Desprotegida e de Incerteza	49
5.4.2	O Efeito dos Erros nas Zonas	50
5.4.3	O Efeito da Estimação da Velocidade da Onda Viajante	52
5.5	Alcance da Proteção em Função de uma Frequência Mínima de Amostragem	53
5.6	Síntese do Capítulo	56
6	Resultados	57
6.1	Sistema Elétrico Utilizado	57
6.2	Configuração de Falta	57
6.3	Resultados Relativos à Proteção Baseada na Reflexão	59
6.3.1	Mínima Frequência de Amostragem	59
6.3.2	Desempenho do Método	61
6.4	Resultados Relativos à Proteção Modal	63
6.4.1	Frequência Mínima de Amostragem	63
6.4.2	Desempenho do Método para Parâmetros Ideais	64
6.4.3	Desempenho do Método com Variações na Frequência de Amostragem	65
6.4.4	Desempenho do Método Considerando Erros na Estimação Inicial da Velocidade	67
6.5	Síntese do Capítulo	69
7	Conclusões e Trabalhos Futuros	70
7.1	Trabalhos Futuros	71

Lista de Figuras

3.1	Diagrama de Lattice das ondas viajantes para uma falta.	21
4.1	Ideia geral do comportamento das ondas viajantes vistas a partir de um terminal.	27
4.2	Diagrama de <i>Lattice</i> das ondas viajantes para uma falta na primeira metade da linha de transmissão.	28
4.3	Diagrama de Lattice das ondas viajantes para uma falta na segunda metade da linha de transmissão.	28
4.4	Diagrama de Lattice das ondas viajantes para uma falta na barra remota. .	30
4.5	Diagrama de Lattice das ondas viajantes para falta em uma linha adjacente à esquerda da linha protegida.	31
4.6	Diagrama de Lattice das ondas viajantes para falta em uma linha adjacente à direita da linha protegida.	32
4.7	Diagrama de Lattice das ondas viajantes para falta em uma linha adjacente à direita da linha protegida, sendo a linha à esquerda menor do que a linha protegida.	33
4.8	Diagrama de Lattice das ondas viajantes para falta na linha protegida, sendo a linha à esquerda menor do que a linha protegida.	33
4.9	Diagrama de Lattice das ondas viajantes vistas a partir de um terminal, considerando o efeito da frequência de amostragem.	34
4.10	Velocidade estimada maior do que a velocidade real das ondas viajantes para uma falta interna.	41
4.11	Velocidade estimada menor do que a velocidade real das ondas viajantes para uma falta externa.	41
5.1	Instantes discretos de detecção das componentes modais da frente de onda.	45
5.2	Erro na estimação da velocidade da onda viajante.	52
6.1	Sistema de transmissão de 500 kV.	58

6.2	Estimação das zonas protegida e de incerteza em função do comprimento da linha para frequências específicas: a) zona protegida; b) zona protegida + de incerteza.	60
6.3	Estimação das zonas protegida e de incerteza em função da frequência de amostragem para determinados comprimentos de linha: a) zona protegida; b) zona protegida + de incerteza.	61
6.4	Atuação da proteção para uma linha de 200 km e $f_S = 6$ kHz.	62
6.5	Atuação da proteção para uma linha de 200 km e $f_S = 15$ kHz.	63
6.6	Frequência mínima de amostragem em função de $P_{lmax} - P_l$	64
6.7	Tempo de atuação da proteção em função da distância de falta, para $f_S = 81,1$ kHz.	65
6.8	Tempo de atuação da proteção em função da distância de falta, para $f_S = 30$ kHz.	66
6.9	Tempo de atuação da proteção em função da distância de falta, para $f_S = 200$ kHz.	66
6.10	Atuação da proteção em função da distância de falta, para $f_S = 74$ kHz e um erro negativo de 2,5% na estimação da velocidade da onda de modo terra.	67
6.11	Atuação da proteção em função da distância de falta, para $f_S = 90$ kHz e um erro positivo de 2,5% na estimação da velocidade da onda de modo terra.	68
6.12	Atuação da proteção em função da distância de falta, para $f_S = 60$ kHz e um erro negativo de 10% na estimação da velocidade da onda de modo terra.	69

Lista de Tabelas

1.1	Trabalhos de Congressos.	6
2.1	Resumo do estado da arte para os métodos de um terminal.	16
2.2	Resumo do estado da arte para os métodos de dois terminais.	17

Lista de Símbolos

α	Constante de atenuação da linha de transmissão
β	Constante de fase da linha de transmissão
c	Velocidade de propagação da luz
C	Capacitância por unidade de comprimento
d_F	Distância de falta
d_x	Constante de comprimento
Δd	Distância propagada pelas ondas viajantes em um tempo de amostragem ($1/f_s$)
ε_A	Erro associado ao instante discreto da primeira frente da onda modal alfa a se chocar com a barra local
ε_F	Erro associado ao instante discreto de incidência de falta
ε_{FA}	Erro total relativo ao instante de chegada da onda de modo alfa
ε_{FZ}	Erro total relativo ao instante de chegada da onda de modo terra
ε_T	Erro total devido aos instantes discretos de chegada das ondas modais na barra local
ε_Z	Erro associado ao instante discreto da primeira frente da onda modal terra a se chocar com a barra local
f_s	Frequência de chaveamento do relé
G	Condutância por unidade de comprimento
γ	Constante de propagação da linha de transmissão
$\Gamma_{r1(I)}$	Coefficiente de reflexão da onda de corrente i_{r1}
$\Gamma_{r1(V)}$	Coefficiente de reflexão da onda de tensão v_{r1}
$\Gamma_{r2(I)}$	Coefficiente de reflexão da onda de corrente i_{r2}
$\Gamma_{r2(V)}$	Coefficiente de reflexão da onda de tensão v_{r2}
$\Gamma_{t1(I)}$	Coefficiente de refração da onda de corrente i_{t1}
$\Gamma_{t1(V)}$	Coefficiente de refração da onda de tensão v_{t1}
$\Gamma_{t2(I)}$	Coefficiente de refração da onda de corrente i_{t2}
$\Gamma_{t2(V)}$	Coefficiente de refração da onda de tensão v_{t2}

i	Sinal de corrente
i_{r1}	Onda viajante no sinal de corrente refletida na barra 1
i_{r2}	Onda viajante no sinal de corrente refletida no ponto de falta
i_{t1}	Onda viajante no sinal de corrente refratada na barra 1
i_{t2}	Onda viajante no sinal de corrente refratada no ponto de falta
i_1	Onda viajante no sinal de corrente
j	Percentual de superestimação da velocidade da onda de modo terra
k_A	Amostra de chegada do onda viajante de modo alfa na barra L
k_F	Número da amostra referente ao tempo de incidência de falta
k_Z	Amostra de chegada do onda viajante de modo terra na barra L
L	Indutância por unidade de comprimento
l	Comprimento total da linha de transmissão
l_A	Comprimento da linha externa A
m	Fator multiplicativo dependente das velocidades reais das ondas viajantes modais
m'	Fator multiplicativo corrigido para um erro na estimação da velocidade da onda de modo terra
P_l	Percentagem da linha em que a proteção terá alcance
P_{lmax}	Percentagem teórica máxima da linha em que a proteção terá alcance
R	Resistência por unidade de comprimento
R_f	Resistência de falta
t_A	Instante de chegada da onda viajante modal alfa na barra L
t_F	Instante de incidência de falta
t_{F1}	Tempo de chegada da primeira frente de onda
t_{F2}	Tempo de chegada da segunda frente de onda
t_{F3}	Tempo de chegada da terceira frente de onda
t_Z	Instante de chegada da onda viajante modal terra na barra L
t_1^2	Instante de chegada da primeira onda viajante a se chocar na barra 2
τ	Tempo de transito da onda viajante por toda a linha de transmissão
τ_A	Diferença de tempo entre o instante de incidência de falta (t_F) e o instante de chegada da onda viajante modal alfa na barra L
τ_{F1}	Tempo de propagação da primeira frente de onda
τ_{F2}	Tempo de propagação da segunda frente de onda
τ_Z	Diferença de tempo entre o instante de incidência de falta (t_F) e o instante de chegada da onda viajante modal zero na barra L

τ_1	Tempo de propagação da onda viajante ao longo da linha 1
τ_2	Tempo de propagação da onda viajante ao longo da linha 2
u	Sinal de tensão
v	Velocidade real das ondas viajantes
v_A	Velocidade da onda viajante de modo aéreo
u_f	Tensão instantânea no ponto de falta no instante da falta
v_T	Velocidade estimada das ondas viajantes
u_{r1}	Onda viajante no sinal de tensão refletida na barra 1
u_{r2}	Onda viajante no sinal de tensão refletida no ponto de falta
u_{s1}	Primeira onda viajante no sinal de tensão medida pelo relé
u_{t1}	Onda viajante no sinal de tensão refratada na barra 1
u_{t2}	Onda viajante no sinal de tensão refratada no ponto de falta
v_Z	Velocidade da onda viajante de modo terra
u_1	Onda viajante no sinal de tensão
ZD	Zona desprotegida
ZI	Zona de incerteza
ZP	Zona protegida
Z_0	Impedância característica da linha de transmissão
Z_1	Impedância característica da linha de transmissão 1
Z_2	Impedância característica da linha de transmissão 2

Lista de Abreviaturas e Siglas

CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CCVT	<i>Coupling Capacitor Voltage Transformer</i>
CT	<i>Current Transformer</i>
ProRedes	Laboratório de Processamento de Sinais e Redes Elétricas Inteligentes
RTDS	Real Time Digital Power System Simulator
UFRN	Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Capítulo 1

Introdução

A linha de transmissão é um componente fundamental ao sistema elétrico de potência, uma vez que é responsável por transmitir energia das plantas geradoras aos centros de carga. Portanto, uma rápida interrupção de falta no sistema de transmissão é crucial para a redução de danos ao sistema elétrico de potência, incrementando sua estabilidade e aumentando sua capacidade de transmissão de energia (GLOVER et al., 2012), o que tem motivado diversos estudos no sentido de desenvolver esquemas de proteção rápidos e confiáveis (SCHWEITZER et al., 2015).

Esquemas tradicionais de proteção de linhas de transmissão, como a proteção de distância, são baseados em estimação fasorial. Essas técnicas apresentam uma série de limitações que restringem sua capacidade para uma rápida operação (SCHWEITZER et al., 2015), dentre elas, a necessidade de uma janela de observação de um ciclo de onda do sinal fundamental para uma precisa estimação. Dessa forma, informações contidas nos transitórios de falta são descartadas. Segundo Schweitzer et al. (2015), relés de proteção operam tipicamente entre um e um ciclo e meio, já o tempo de interrupção de corrente pelo disjuntor é de um ciclo e meio a três ciclos, resultando em um tempo médio de interrupção de falta de três a quatro ciclos. Dessa forma, o tempo de atuação das técnicas tradicionais representam de 25 a 50% do tempo total para a interrupção da falta. Apesar de, em condições específicas, métodos tradicionais atuarem em até um quarto de ciclo, considerações de limite de estabilidade devem ser feitas assumindo-se tempos conservadores de atuação da proteção (SCHWEITZER et al., 2015). Eastvedt (1976) demonstrou que, para uma linha de transmissão específica, uma redução de um ciclo no tempo de interrupção de falta incrementou a capacidade de transferência de potência em 250 MW, ou seja, 15 MW por milissegundo, deixando claro, portanto, a relevância de métodos de proteção cada vez mais rápidos. Em outras palavras, cada milissegundo ganho pode significar a definição de um alimentador diferente para a linha, ou uma carga de outra ordem de grandeza a ser alimentada no sistema de distribuição. Ademais, a margem possível de ganho de tempo para a atuação do método de proteção é significativa, considerando o

tempo de atuação de métodos tradicionais que, para 60 Hz, variam de 16,67 a 25 ms.

Quando uma falta ocorre em uma linha de transmissão de corrente alternada, transitórios eletromagnéticos de alta frequência ocorrem nos sinais de tensão e corrente, propagando-se a partir do ponto de falta e em sentidos contrários, como ondas viajantes, em direção aos terminais da linha a uma determinada velocidade. Quando uma frente de onda chega a um terminal de linha, parcela da onda viajante sofre uma reflexão e viaja de volta em direção ao ponto de falta, já a porção restante sofre refração e viaja ao longo da linha adjacente, se houver, em direção ao próximo terminal de linha. A polaridade das ondas viajantes depende da posição da falta em relação ao ponto de medição (CHEN et al., 2003). A completa teoria das ondas viajantes pode ser encontrada em Central Station Engineers of the Westinghouse Electric Corp. (1964).

O primeiro trabalho relacionado a transitórios em uma linha a parâmetros distribuídos investigou a distorção de um sinal em um cabo trans-atlântico de telefone em 1854 (KELVIN, 1884). Na década de 1920 e 1930, diversos trabalhos investigaram o comportamento das ondas viajantes em linhas de transmissão (BUSH, 1923; DOWELL, 1931; BEWLEY, 1931). Uma teoria geral baseada em um método gráfico foi proposta por Allievi (1902) e aplicado no campo da engenharia hidráulica, o que foi uma aplicação direta do conceito de ondas viajantes. Baseando-se em Allievi (1902), um modelo matemático de solução de equações parciais diferenciais hiperbólicas para a análise de ondas transitórias foi proposto por Schnyder (1929) e Bergeron (1935) com o objetivo de tratar, inicialmente, fenômenos transitórios em sistemas hidráulicos e, em seguida, foi aplicado a fenômenos transitórios elétricos. Essa solução de análise de transitórios é conhecida como método de Bergeron ou método de Schnyder-Bergeron. Importantes trabalhos na década de 1960 propuseram a análise de transitórios no sistema elétrico de transmissão baseada no método de Bergeron por meio de computadores digitais (FREY; ALTHAMMER, 1961; ARLETT; MURRAY-SHELLEY, 1965; BRANIN, 1967). Baseando-se no método de Bergeron, Dommel (1969) propôs um algoritmo generalizado capaz de resolver transitórios em qualquer rede com parâmetros distribuídos, o que foi fundamental para o desenvolvimento da análise das ondas viajantes no sistema elétrico de transmissão. Essas técnicas computacionais são generalizadamente chamadas de método do domínio do tempo ou técnica das ondas viajantes.

Os primeiros artigos a analisarem os princípios da proteção baseada em ondas viajantes foram publicados na década de 1970 (TAGAGI et al., 1977; DOMMEL; MICHELS, 1978; CHAMIA; LIBERMAN, 1978; JOHNS, 1980). Esses trabalhos investigaram principalmente a direcionalidade da falta a partir da polaridade dos sinais de tensão e corrente medidos nos dois terminais da linha de transmissão e eram capazes de detectar faltas internas à linha, mas demandavam um sistema de comunicação entre os terminais. Crossley e

McLaren (1983) foram os primeiros a publicar uma técnica de proteção de linhas de transmissão baseada em ondas viajantes utilizando apenas um terminal, sem a necessidade de um sistema de comunicação, seguidos por publicações de técnicas semelhantes (CHRISTOPOULOS et al., 1988; SHEHAB-ELDIN; MCLAREN, 1988). Além da amplitude e polaridade das ondas viajantes, essas técnicas de proteção utilizando um terminal necessitavam dos instantes de chegada, no terminal de medição, da primeira frente de onda e sua reflexão no ponto de falta, contudo, ainda hoje, não há uma solução confiável para a detecção da correta onda refletida no ponto de falta utilizando informações de apenas um terminal. A aplicação desses trabalhos era limitada devido a problemas de confiabilidade. Com o avanço das técnicas de processamento digital de sinais e o desenvolvimento de equipamentos de medição com maior capacidade de *hardware*, a partir dos anos 2000 diversos trabalhos no campo das ondas viajantes foram publicados, no entanto, inicialmente, os esforços foram voltados para a localização de faltas de linhas de transmissão, e, mais recentemente, as atenções têm se voltado para o desenvolvimento de técnicas de proteção.

A proteção de linhas de transmissão baseada em ondas viajantes pode se tornar a mais rápida e se divide, de forma mais genérica, em esquemas de um ou dois terminais. Alguns esquemas de um ou dois terminais propõem a proteção direcional de linhas de transmissão, já outros são capazes de proteger a linha de transmissão de faltas internas a ela. A proteção por ondas viajantes normalmente utiliza os tempos de chegada da primeira ou mais frentes de onda em um ou dois terminais. Também é comum a utilização da informação da polaridade das ondas. Naturalmente, todos esses métodos apresentam queda de efetividade quando as faltas ocorrem na passagem da tensão pelo zero (COSTA et al., 2012) e alta impedância de falta, situações que amenizam bastante os transitórios eletromagnéticos gerados pela falta.

Os esquemas de proteção de linhas de transmissão baseados em ondas viajantes que utilizam dois terminais são de mais fácil implementação e é comum utilizarem apenas as informações extraídas da primeira frente de onda em cada terminal, o que facilita sua implementação prática, uma vez que a primeira frente de onda é de mais fácil detecção. Contudo, esses métodos necessitam de um sistema de comunicação entre os dois relés e, normalmente, um esquema de sincronização entre eles, o que encarece o sistema de proteção. O uso dessas técnicas é limitado devido a problemas práticos de sincronização de dados via GPS, que têm sido extensivamente reportados, como a possibilidade de perda do sinal de referência de tempo (IZYKOWSKI et al., 2010) e a não instalação de fontes comuns de referência de tempo em todas as subestações (YU, 2010). Além disso, o sistema de comunicação introduz maior atraso à proteção, já que o tempo de processamento dos dispositivos de comunicação e o tempo de trânsito dos dados pelo canal de comuni-

cação são expressivos frente ao tempo total médio para a geração do disparo pelos relés (COSTA et al., 2017).

Esquemas de proteção de linhas de transmissão baseados em ondas viajantes que utilizam apenas um terminal possuem o diferencial de não necessitarem de um sistema de comunicação, tampouco de sincronização, proporcionando esquemas de proteção mais baratos e mais rápidos, uma vez que eliminam o atraso referente ao sistema de comunicação. Esses métodos enfrentam a dificuldade adicional de detectar corretamente a onda viajante refletida no ponto de falta, distinguindo-a das que podem ser provenientes de uma reflexão ocorrida no ponto de falta, no terminal remoto da linha protegida, ou no terminal de uma linha adjacente. A correta detecção da onda viajante refletida no ponto de falta é um problema que ainda vem sendo investigado pela comunidade científica.

Algumas técnicas utilizam informação das ondas viajantes modais, possibilitando extrair dados adicionais da falta. Magnago e Abur (1998), em um método de localização de dois terminais, utilizaram as ondas modais para diferenciar faltas envolvendo terra das faltas entre fases. Posteriormente, também a partir de dois terminais, Abur e Magnago (2000) utilizaram os instantes de chegada das ondas modais para localizar o ponto de falta para uma falta envolvendo a terra. Lopes et al. (2015) propuseram uma técnica de dois terminais baseada em ondas modais capaz de localizar faltas que envolvem a terra sem a necessidade de informações de qualquer parâmetro da linha ou das estimações das velocidades das ondas. Apesar de a maioria desses métodos se limitarem a faltas que envolvem a terra, como essas representam a maioria das faltas no sistema de potência (SAHA et al., 2010), tais técnicas apresentam grande relevância.

O efeito da frequência de amostragem pode apresentar influência significativa no método de proteção baseado em ondas viajantes, tal como exposto por Costa et al. (2017) para métodos de dois terminais. No entanto, esse efeito não vem sendo avaliado em técnicas de proteção utilizando um terminal. Nesse sentido, é necessário avaliar de forma mais aprofundada a influência da frequência de amostragem e equacionar seus efeitos na detecção do tempo de chegada das frentes de onda do sinal de corrente, para que seja possível desenvolver um esquema de proteção de linhas de transmissão utilizando um terminal de modo efetivo.

1.1 Motivação

Alguns aspectos contribuíram de forma motivacional ao desenvolvimento deste trabalho. Primeiramente, a diminuição do tempo de atuação do esquema de proteção se coloca como maior motivação, uma vez que resulta em menor risco aos componentes do sistema

e maior capacidade de transmissão de potência pela linha de transmissão, sem necessidade de investimentos estruturais. Em segundo lugar, percebeu-se a necessidade em se analisar o efeito da frequência de amostragem na proteção, já que essa possui influência sobre a confiabilidade do método. Coloca-se como terceiro aspecto motivacional ao desenvolvimento deste trabalho a possibilidade de redução dos custos de fabricação do relé por meio da diminuição da frequência de amostragem necessária para a correta atuação da proteção. Apesar de parte da investigação deste trabalho se restringir a um método de proteção válido apenas para faltas envolvendo a terra, acrescenta-se como motivação ao seu desenvolvimento a informação de que faltas envolvendo a terra representam a maioria das faltas no sistema elétrico de potência.

Além da motivação impulsionada pela necessidade crescente de proteções cada vez mais rápidas e confiáveis de linhas de transmissão, somou-se também às motivações para o desenvolvimento deste trabalho as contribuições que o grupo de pesquisa do laboratório ProRedes/UFRN, em parcerias com outros centros de pesquisa nacionais e internacionais, tem feito com relação ao estudo de transitórios eletromagnéticos no desenvolvimento de técnicas rápidas de proteção. Por exemplo, recentemente, o grupo propôs um método de proteção de linhas de transmissão baseado em ondas viajantes utilizando dois terminais (COSTA et al., 2017), que tem servido como motivação para o desenvolvimento deste trabalho.

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um método de proteção de linhas de transmissão em corrente alternada baseado em ondas viajantes utilizando um terminal, levando-se em consideração os efeitos da frequência de amostragem.

Os objetivos específicos são:

- desenvolvimento do modelo matemático da proteção baseada em ondas viajantes utilizando um terminal a partir das informações dos instantes de chegada da primeira e segunda frentes de onda, independente se a segunda frente de onda é proveniente do ponto de falta ou do terminal remoto;
- desenvolvimento do modelo matemático da proteção baseada em ondas viajantes utilizando um terminal a partir das informações dos instantes de chegada das ondas modais da primeira frente de onda, para faltas envolvendo a terra;
- análise da influência da frequência de amostragem do relé na efetividade da proteção;
- definição das zonas de proteção;

- obtenção de um algoritmo de proteção considerando os erros associados aos parâmetros da linha de transmissão;
- a partir da análise do efeito da frequência de amostragem, mostrar que a proteção de linhas de transmissão baseada em ondas viajantes é capaz de atuar com frequências de amostragem abaixo dos métodos mais atuais.
- obtenção de um modelo matemático capaz de determinar a mínima frequência de amostragem em função do comprimento da linha para que a proteção com um terminal atue corretamente e de acordo com a tecnologia atual;
- apontar os problemas decorrentes da correta detecção da onda viajante refletida no ponto de falta, questão ainda sem solução confiável.

1.3 Contribuições

As principais contribuições são:

- obtenção de um algoritmo de proteção de linhas de transmissão CA (corrente alternada) baseado em ondas viajantes utilizando um terminal;
- obtenção de um algoritmo de proteção que contemple os efeitos dos parâmetros da linha de transmissão, em termos de zonas de proteção;
- obtenção de um método de proteção capaz de atuar corretamente com frequências de amostragem abaixo das frequências normalmente adotadas nos métodos mais atuais de proteção de linha de transmissão CA baseados em ondas viajantes.

O trabalho até então já desenvolvido rendeu uma publicação em anais de congresso, conforme especificado na Tabela 1.1.

Tabela 1.1: Trabalhos de Congressos.

Evento/Periódico	Título	Autores
Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica (CBQEE)	The Impact of Two-Terminal Traveling Wave-Based Transmission Line Protection in the Distribution Power System Voltage Sag	R. L. S. França, F. B. Costa, F. C. Silva Júnior e D. M. Silva

1.4 Organização do Trabalho

Esta dissertação de mestrado está organizada em 7 capítulos:

- Capítulo 1: Apresenta-se uma introdução e a contextualização referente à problemática da proteção de linhas de transmissão utilizando ondas viajantes;
- Capítulo 2: Apresenta-se o estado da arte referente às principais técnicas de proteção e localização de faltas em linhas de transmissão baseadas em ondas viajantes utilizando um e dois terminais.
- Capítulo 3: Apresenta-se a teoria básica de ondas viajantes por meio das equações de modelagem da linha de transmissão monofásica e as equações de propagação das ondas viajantes.
- Capítulo 4: Apresenta-se o método proposto de proteção de linhas de transmissão baseado na primeira reflexão da onda viajante utilizando um terminal.
- Capítulo 5: Apresenta-se o método proposto de proteção de linhas de transmissão baseado em ondas viajantes modais válido para faltas envolvendo a terra.
- Capítulo 6: Apresentam-se os resultados das avaliações computacionais dos dois métodos propostos.
- Capítulo 7: Apresentam-se as conclusões acerca dos métodos propostos nessa dissertação, assim como propostas para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Estado da Arte

Neste capítulo é apresentado o levantamento do estado da arte de ondas viajantes, enfatizando-se estudos de localização de faltas e proteção em linhas de transmissão utilizando um e dois terminais.

2.1 Métodos Baseados em Ondas Viajantes Utilizando um Terminal

O primeiro artigo a propor uma técnica de proteção de linhas de transmissão baseada em ondas viajantes utilizando um terminal foi publicado por Crossley e McLaren (1983). A técnica se baseia na ideia de proteção de distância e utiliza as polaridades dos sinais de tensão das primeiras duas ondas viajantes a alcançarem o ponto de medição, em um dos terminais da linha, para determinar a direcionalidade da falta. O instante de chegada das ondas viajantes refletidas subsequentes no sinal de tensão são utilizados para calcular a distância da falta e decidir se ela ocorreu na linha protegida. A identificação da correta onda refletida do ponto de falta é obtida por um método de correlação entre a primeira frente de onda e as demais ondas refletidas, a partir do princípio de que a forma da primeira frente de onda é semelhante à forma da frente de onda de sua respectiva reflexão no ponto de falta. O método depende da correta definição da velocidade da onda e pode apresentar fragilidades com relação à medição do sinal de tensão, normalmente realizada por CCVTs (*Coupling Capacitor Voltage Transformer*), que possuem limitação na resposta em frequência. Posteriormente, melhorias ao esquema foram feitas por Rajendra e McLaren (1985). Ambos os trabalhos, por serem pioneiros, não apresentaram resultados suficientes que comprovassem boa atuação da proteção para diversas situações de falta.

Um dos primeiros artigos a investigar de forma mais completa a proteção de linhas de transmissão baseada em ondas viajantes e utilizando um terminal foi publicado por Christopoulos et al. (1988). O esquema proposto utiliza informações das duas primeiras

frentes de onda dos sinais de tensão e corrente a alcançarem o terminal monitorado da linha. A partir das polaridades da primeira frente de onda nos sinais de tensão e corrente, o esquema detecta a direcionalidade da falta em relação à barra em que o relé está instalado. A distância da falta em relação à barra em que se encontra o relé é calculada a partir dos instantes de chegada da primeira frente de onda proveniente do ponto de falta e de sua respectiva reflexão proveniente novamente do ponto de falta. A técnica utiliza as equações de reflexão das ondas viajantes para identificar a correta onda refletida no ponto de falta e assim determinar com precisão a sua distância, mas, para isso, necessita do prévio conhecimento da impedância característica, que depende dos parâmetros elétricos da linha de transmissão, nem sempre determinados com precisão, na prática, e fonte de erro para o esquema de proteção. Como a técnica utiliza o valor da amplitude das ondas viajantes no sinal de tensão, a resposta em frequência do transdutor de tensão se torna um limitante ao método. O método foi avaliado por meio de simulações computacionais a uma taxa de 25 kHz.

Shehab-Eldin e McLaren (1988) realizaram um estudo mais aprofundado, a partir da técnica desenvolvida por Crossley e McLaren (1983), com relação à proteção de linhas utilizando a correlação entre ondas viajantes. Shehab-Eldin e McLaren (1988) argumentam que o tamanho da janela de amostras utilizada na função de correlação entre as ondas viajantes é um fator problemático pois, quanto maior a janela, menor a habilidade de se distinguir a onda viajante refletida do ponto de falta de uma onda viajante refletida de uma discontinuidade. Por outro lado, quanto menor a janela, maiores as chances de mau operação devido a transitórios não provenientes de falta. Dessa forma, o trabalho propõe uma correlação composta, que se trata da adição entre as saídas da correlação entre as ondas viajantes com uma janela curta e outra correlação com uma janela longa. O método foi avaliado a partir de simulações computacionais com frequência de amostragem de 14,25 kHz. A técnica de correlação proposta tem como saída um sinal de grande componente CC (corrente contínua) quando uma falta interna ocorrer muito próxima ao relé, de forma que a técnica de proteção é capaz de identificar faltas internas muito próximas à barra de monitoramento. A saída da função de correlação apresenta baixa amplitude para faltas de baixo ângulo de incidência, o que é remediado por um fator de correção aplicado ao sinal de correlação em função do ângulo de incidência de falta, que pode ser calculado. O trabalho não avaliou a influência da degradação da onda pelo transdutor, o que poderia potencialmente inviabilizar o método.

O estudo publicado por Magnago e Abur (1998) foi um dos primeiros a aplicar a transformada *wavelet* em sistemas elétricos de potência. O trabalho propôs um método de localização de faltas de um e dois terminais. A técnica utiliza os instantes de chegada da primeira frente de onda de modo aéreo do sinal de tensão, em cada terminal da linha,

para localizar faltas internas, partindo da premissa de que os dados em cada terminal estão sincronizados. O método é capaz de localizar faltas internas utilizando apenas um terminal e, para tanto, propõe a substituição da técnica de correlação pela transformada *wavelet* das ondas modais de tensão com o objetivo de detectar corretamente a onda refletida no ponto de falta. O método diferencia faltas que envolvem a terra das demais faltas por meio da análise dos coeficientes *wavelet* de segunda escala de modo terra do sinal de tensão, de forma que, caso as amplitudes desses coeficientes estejam abaixo de um limiar, a falta é tida como não envolvendo a terra. Para uma falta que não envolva a terra, os coeficientes *wavelet* de primeira escala da onda de modo aéreo do sinal de tensão refletida no terminal remoto da linha possuem amplitudes insignificantes frente aos coeficientes da onda refletida no ponto de falta. Dessa forma, não haveria problema em distinguir a correta onda refletida no ponto de falta. Já para faltas envolvendo terra, os coeficientes *wavelet* de primeira escala da onda de modo terra do sinal de tensão possuem amplitude insignificante para faltas na metade da linha mais próxima da barra remota, sendo possível identificar se a falta está na primeira ou segunda metade da linha. Contudo, como é atualmente bem conhecido, as amplitudes dos coeficientes *wavelet* das ondas refletidas em qualquer ponto de singularidade dependem fortemente dos parâmetros da linha protegida e das linhas adjacentes, resistência de falta e possíveis impedâncias instaladas nos terminais, assim como do ângulo de incidência de falta, de forma que o método apresentado terá eficácia apenas para determinados sistemas. Os resultados foram obtidos a uma frequência de amostragem de 100 kHz e o método se mostrou adequado, mesmo na presença de linhas mutuamente acopladas - que alteram fortemente as velocidades das ondas de modo terra - uma vez que os instantes de chegada dessas ondas não são utilizados pelo método. Compensações capacitivas série na linha de transmissão também não afetam o método, já que a impedância capacitiva é insignificante a altas frequências.

Um método de localização de faltas utilizando um terminal baseado em ondas viajantes foi proposto por Abur e Magnago (2000). O método utiliza os instantes de chegada das ondas modais aérea e terra da primeira frente de onda do sinal de corrente a atingir o terminal de medição para realizar uma pré localização de falta, de forma que, em um primeiro momento, a falta envolvendo a terra é localizada apenas como estando na primeira ou segunda metade da linha de transmissão. Em seguida, o instante de chegada da segunda frente de onda de modo aéreo é utilizado para localizar a falta de forma mais precisa. No caso de faltas que não envolvem a terra, o método irá sempre localizar a falta como estando na primeira metade da linha, já que não é capaz de distinguir a onda refletida no ponto de falta da onda refletida no terminal remoto da linha. Demonstrou-se também como o método pode ser aplicado para linhas acopladas. A técnica é dependente da correta estimativa da velocidade das ondas viajantes. Os resultados foram obtidos para

uma frequência de amostragem de aproximadamente 303 kHz e a técnica se mostrou não ser afetada por compensação série capacitiva. O trabalho analisou também a possibilidade de distinguir faltas na barra de chaveamentos por meio da energia *wavelet*.

Um método de proteção direcional de linhas de transmissão é desenvolvido por Chen et al. (2003). O trabalho utiliza *modulus maxima* aplicado à transformada *wavelet* para a detecção das ondas viajantes. As polaridades da primeira frente de onda nos sinais de tensão e corrente são utilizadas para determinar se a falta ocorreu antes ou após o ponto de medição. Chen et al. (2003) demonstram que o efeito do ruído pode ser amenizado com a filtragem do sinal em mais de uma escala da transformada *wavelet*. O método de extração da polaridade da onda viajante no sinal de tensão se mostra eficiente mesmo com a utilização de CCVT na medição. O método apresenta robustez mesmo com a presença de ruído, mas fragilidade na detecção de ondas viajantes para faltas com ângulo de incidência próximo a zero, o que pode inviabilizar a proteção para faltas fase-terra.

Thomas et al. (2004) propuseram um método de localização de faltas utilizando apenas um terminal a partir da aplicação da transformada *wavelet*, se colocando como ferramenta de pré-localização para métodos baseados na cros-correlação. O método aplica a transformada *wavelet* em várias escalas ao sinal de corrente, visando proporcionar um sinal com clara detecção das ondas viajantes. O problema da distinção da correta onda viajante refletida no ponto de falta não é resolvido pelo método, mas esse é capaz de identificar duas possíveis localizações da falta, mais próxima da barra local ou mais próxima da barra remota. Como a cros-correlação necessita da informação do local da falta para definir o tamanho da janela de correlação, a técnica contribui em indicar dois locais possíveis de falta, facilitando assim na definição do tamanho da janela de correlação. Contudo, o método indicará, no mínimo, dois locais possíveis de falta, não sendo possível especificar com precisão o tamanho ideal da janela de correlação, além disso, no trabalho, não foi previsto a possibilidade de uma onda viajante refletir em um terminal de uma linha adjacente e atingir o terminal de medição antes das duas reflexões desejadas: no ponto de falta e no terminal remoto da linha analisada. Os resultados foram colhidos em um sistema real de transmissão da Inglaterra, a uma frequência de amostragem de 1,25 MHz.

Uma análise do comportamento da variação dos parâmetros modais da linha em função da frequência do sinal foi feita por Lin et al. (2012). Sendo concluído que quanto maior a frequência do sinal, maior sua velocidade de propagação e menor sua magnitude. Demonstrou-se que as ondas viajantes sofrem atenuação à medida que se propagam, logo, as componentes de maior frequência que compõem a onda viajante tornam-se indetectáveis mais rapidamente que as componentes de menor frequência, dada a sua baixa potência. Dessa forma, o trabalho conclui que as frentes de onda detectadas são referentes a sinais de frequência e velocidade diferentes umas das outras. Com isso, propôs-se um

modelo para detectar a maior componente de frequência detectável em cada frente de onda viajante, possibilitando o cálculo mais preciso da velocidade da onda a cada nova reflexão. Os resultados demonstram que o método apresenta melhor desempenho que o método tradicional de localização de faltas por ondas viajantes com um terminal, além de não sofrer influência da resistência, ângulo de incidência, distância e tipo de falta. O método utiliza as polaridades dos coeficientes *wavelet* das ondas viajantes para identificar se a falta ocorreu na primeira ou segunda metade da linha. Contudo, a polaridade das ondas viajantes varia de acordo com os parâmetros do sistema, de forma que sistemas diferentes poderão apresentar padrões diferentes de polaridade das ondas. Ademais, a eficácia do método é dependente do cálculo correto da frequência do sinal, o que poderia ser afetado na presença do ruído, possibilidade que não foi investigada neste trabalho.

2.2 Métodos Baseados em Ondas Viajantes Utilizando dois Terminais

Um dos primeiros artigos a explorar a proteção de linhas de transmissão utilizando ondas viajantes foi publicado por Chamia e Liberman (1978). O artigo propôs um método de proteção utilizando dois terminais. Investigou-se o comportamento da polaridade das ondas viajantes em cada terminal da linha de transmissão protegida nos sinais de tensão e corrente levando-se em consideração o sinal de tensão pré-falta e sua localização - interna ou externa à linha protegida. Demonstrou-se que as polaridades das ondas viajantes do sinal de corrente se comportam de forma diferente se comparadas às polaridades do sinal de tensão. Além disso, demonstrou-se que as polaridades das ondas viajantes medida em um determinado terminal dependem da posição da falta em relação ao terminal, que pode ser anterior ou posterior ao terminal. O artigo constatou também que a polaridade da onda viajante depende da polaridade do sinal de tensão imediatamente antes da falta, de forma que, invertendo-se a polaridade da tensão pré-falta, inverte-se também as polaridade das ondas viajantes nos sinais de tensão e corrente medidas em ambos os terminais. O método proposto é capaz de detectar falta interna, falta externa e sua direcionalidade. O método foi avaliado inicialmente a partir de simulações computacionais. O artigo apresenta também o projeto de um relé baseado em ondas viajantes e avalia o método a partir de testes experimentais utilizando o relé desenvolvido e um sistema real de comunicação entre os dois terminais. No entanto, o método proposto limita-se à baixa resposta em frequência dos componentes de medição e aos métodos de processamento de sinais disponíveis na época, ainda incipientes.

Um método de proteção direcional utilizando dois terminais foi proposto por Johns

(1980). O método detecta a direcionalidade da falta em cada terminal da linha protegida e, após haver comunicação entre os dois relés, uma falta interna pode ser detectada. A direcionalidade da falta é detectada a partir de um equacionamento cujas variáveis são os dados de amplitude da primeira frente de onda nos sinais de tensão e corrente e o valor da impedância característica da linha protegida. Como a impedância característica é um valor que deve ser estimado a partir dos dados físicos da linha de transmissão, essa é a primeira fonte de erro do método. Os dados de amplitude das ondas de tensão e corrente dependem de medições dos transdutores, logo, caso o transdutor não apresente uma resposta em alta frequência fidedigna, como é o caso do CCVT, o método poderá apresentar mau operação, já que as amplitudes dos sinais de alta frequência sofrerão distorção.

Liu et al. (2012) propuseram um método de localização de faltas envolvendo a terra baseado em ondas viajantes modais utilizando múltiplos pontos de medição, sendo dois o valor mínimo. A partir da diferença entre os instante de chegada da onda de modo aéreo e de modo terra em cada ponto de medição distribuído ao longo da linha, o método é capaz de estimar um ponto médio de localização de falta, de acordo com as velocidades estimadas das ondas viajantes. Demonstrou-se que a velocidade da onda viajante de modo terra varia de acordo com o ponto de falta. Para contornar tal problema, propõe modelar o sistema computacionalmente e simular diversos pontos de falta ao longo da linha com o objetivo de estimar a velocidade da onda viajante de modo terra em função da distância de falta. Os resultados foram colhidos por meio de simulações computacionais a uma frequência de amostragem de 10 MHz e demonstraram bom desempenho do método mesmo a baixos valores de ângulo de incidência de falta e altos valores de resistência de falta. Apesar de o método não necessitar de sincronismo, demanda diversos pontos de medição e um sistema de comunicação que compreenda todos eles, o que poderia inviabilizar sua implementação. Além disso, a eficácia do método em campo depende da fidedignidade do sistema real modelado computacionalmente.

Um método de localização de faltas utilizando dois terminais sem a necessidade de sincronização de dados é proposta por Lopes et al. (2015). O método proposto, apesar de necessitar que haja comunicação entre os dois terminais da linha, dispensa a sincronização de dados entre os relés, ou seja, os terminais da linha não precisam estar a um mesmo referencial de tempo. O artigo investiga a latência no processamento e envio de dados entre os terminais e, com isso, dispensa a necessidade em se ter o tempo de chegada da onda em cada terminal, mas sim a diferença entre os tempos de chegada da primeira frente de onda em cada terminal, possibilitando assim a localização de uma falta interna à linha de transmissão. O método foi avaliado por meio de um simulador em tempo real (RTDS) a uma frequência de 20 kHz. A técnica é capaz de localizar faltas em situações de transmissão de dados com baixa ou, em menor precisão, alta variação de latência.

Schweitzer et al. (2016) implementaram em um sistema real um método de localização baseado nos instantes de chegada das ondas viajantes nos dois terminais da linha. O método utiliza uma técnica conhecida como *differentiator-smoother*, que tem sido aplicada na localização de faltas a partir de 1985, e filtra distorções no sinal que poderiam interferir na detecção da falta, seguida por uma estimação do instante de chegada da onda viajante a partir de um processo de interpolação. Para implementação do método em campo, a velocidade da onda viajante foi estimada com base no tempo de propagação da onda de um terminal a outro, gerada a partir da energização de um terminal. Os dados foram colhidos a uma frequência de amostragem de 1,5 MHz e os resultados de campo demonstraram bom desempenho do método frente a técnicas tradicionais de localização. No entanto, a técnica utilizada na detecção dos instantes de chegada das frentes de onda pode apresentar atrasos superiores aos de técnicas já amplamente implementadas para o mesmo fim - como a *wavelet db4*, capaz de detectar a frente de onda na primeira amostra (COSTA et al., 2010) - uma vez que necessita de algumas amostras para realizar o processo de interpolação.

Uma implementação prática de uma proteção direcional de linhas de transmissão baseada em ondas viajantes foi desenvolvida e aplicada por Dong et al. (2016). A direcionalidade da falta é identificada por meio da comparação entre as polaridades do *modulus maxima* da primeira frente de onda no sinal de tensão com a do sinal de corrente. O trabalho avalia a influência das características do CCVT e do CT (*Current Transformer*) na medição das ondas viajantes e conclui que o CT realiza corretamente a medição da polaridade da onda para altas frequências e que o CCVT transfere adequadamente a tensão para frequências entre 10 Hz e 2 kHz. Utilizando dois terminais, o método é capaz de detectar falta interna. Um protótipo foi avaliado por meio de testes laboratoriais e em um sistema real de transmissão de 750 kV. A proteção atuou corretamente para frequência de amostragem de 500 e 20 kHz para os sinais de corrente e tensão, respectivamente. O método não foi apropriadamente avaliado para faltas próximas à barra, situação crítica para métodos de proteção baseados em ondas viajantes e que poderia acarretar em uma atuação incorreta da proteção.

Lopes (2016) desenvolveu um método de localização de faltas envolvendo a terra em linhas de transmissão baseado em ondas viajantes modais. O método utiliza os instantes de chegada das componentes modais aérea e terra da primeira frente de onda do sinal de corrente em cada terminal da linha. A partir da razão entre a diferença de tempo dos instantes de chegada das ondas modais em cada terminal, o trabalho equaciona o percentual da linha em que a falta ocorreu, sem a necessidade de informações dos parâmetros da linha e da velocidade da onda viajantes. Dessa forma, o método não necessita de qualquer informação de parametrização, assim como o relé dispensa pré-configuração. Os resul-

tados foram obtidos a uma frequência de amostragem de 100 kHz e demonstraram que a técnica não é influenciada por erros na estimação da velocidade, de sincronismo de dados ou de parâmetros da linha. Contudo, assim como ocorre para todos os métodos baseados em ondas viajantes, o método proposto apresenta suscetibilidade a erros para linhas não homogêneas, isso é, quando a linha apresenta variação em seus parâmetros elétricos ao longo de sua extensão.

Recentemente, Costa et al. (2017) propuseram um método inovador de proteção de linhas de transmissão baseado em ondas viajantes utilizando dois terminais em que o efeito da frequência de amostragem foi avaliado. Propôs-se um método capaz de detectar faltas internas à linha e sua direcionalidade caso a falta tenha ocorrido externa à linha, a partir dos instantes de chegada das primeiras frentes de onda do sinal de corrente nos dois terminais da linha. O método proposto quebrou o paradigma de que a proteção baseada em ondas viajantes necessita de uma frequência de amostragem muito alta, normalmente na ordem de centenas de kHz, e apresentou bons resultados a uma frequência de 20 kHz. O método não é capaz de proteger integralmente a linha e a área protegida é inversamente proporcional à frequência de amostragem do relé. Além disso, o método é independente dos parâmetros da linha e dispensa a necessidade da estimação da velocidade da onda. Contudo, o método é dependente de um sistema de sincronização entre os relés.

Um método de proteção diferencial de linhas de transmissão baseado em ondas viajantes foi proposto por Tang et al. (2017). A partir do princípio da superposição, utilizou-se o conceito de ondas viajantes equivalentes, que são ocasionadas pela componente CC da repentina tensão que surge no ponto de falta logo após a falta. O método aplica *modulus maxima* à transformada *wavelet Dyadic* dos sinais de corrente em cada relé, localizados nos dois terminais da linha. Os dados de amplitudes e instantes do *modulus maxima* em cada relé são enviados ao relé oposto, que utiliza essas informações para a reconstrução das ondas viajantes equivalentes. Como apenas algumas amostras de pico do sinal de *modulus maxima* são necessárias, a quantidade de dados transmitidos entre os relés é baixa. Cada relé tem então disponível o sinal das ondas viajantes equivalentes referente ao terminal em que está instalado e o sinal das ondas viajantes equivalentes reconstruído do terminal oposto. Com isso, aplica-se uma equação diferencial entre os dois sinais, considerando o defasamento do sinal ao longo da linha, para que haja, ou não, a atuação da proteção. Os resultados foram colhidos com simulações a 250 kHz. O método é dependente da acurácia da sincronização entre os dados dos dois relés.

Namdari e Salehi (2017) propuseram um método de proteção de linhas de transmissão utilizando dois terminais e aplicando matemática morfológica. Os autores propõem um novo filtro utilizando matemática morfológica capaz de detectar as ondas viajantes e suas polaridades com precisão. O artigo propõe um método de proteção capaz de identificar se

a falta foi interna ou externa à linha protegida, além de sua direcionalidade, a partir das informações de tempo de chegada da primeira frente de onda do sinal de corrente e de sua polaridade em cada um dos dois terminais da linha protegida. O método de detecção se mostrou mais eficiente se comparado à transformada *wavelet* e o método de proteção se manteve eficiente mesmo com alta impedância de falta e baixo ângulo de incidência de falta, fatores que influenciam negativamente a detecção de ondas viajantes. No entanto, o método de proteção é dependente da estimação de velocidade da onda, que normalmente é realizada a partir dos parâmetros da linha, e a frequência de chaveamento do relé foi de 1 MHz, valor muito alto se comparado aos métodos tradicionais.

2.3 Resumo do Estado da Arte

Nas Tabelas 2.1 e 2.2 resume-se o estado da arte dos métodos de proteção e localização investigados nesta dissertação, em ordem cronológica, indicando-se o número de terminais utilizado pelo método, seu objetivo quanto a proteção ou localização, o valor da frequência de amostragem, se necessita dos parâmetros da linha, de uma prévia estimação da velocidade das ondas viajantes, da medição da polaridade das ondas viajantes, das ondas viajantes modais e, no caso dos métodos de dois terminais, de sincronização de dados entre os dois terminais.

Tabela 2.1: Resumo do estado da arte para os métodos de um terminal.

Referência	Objetivo	Freq. kHz	Par. da Linha	Vel. das Ondas	Pol. das Ondas	Ondas Modais
Crossley e McLaren (1983)	Proteção	-	-	✓	-	-
Rajendra e McLaren (1985)	Proteção	-	-	✓	-	-
Christopoulos et al. (1988)	Proteção	25	✓	✓	✓	-
Shehab-Eldin e McLaren (1988)	Proteção	14,25	-	✓	-	-
Magnago e Abur (1998)	Localização	100	-	✓	-	✓
Abur e Magnago (2000)	Localização	303	-	✓	-	✓
Chen et al. (2003)	Proteção D.	100	-	-	✓	-
Thomas et al. (2004)	Localização	$1,25 \cdot 10^3$	-	✓	-	-
Lin et al. (2012)	Localização	10^3	✓	-	✓	-

D. - Direcional; Freq. - Frequência; Par. - Parâmetros; Vel. - Velocidade; Pol. - Polaridade.

Tabela 2.2: Resumo do estado da arte para os métodos de dois terminais.

Referência	Objetivo	Freq. kHz	Par. da Linha	Vel. das Ondas	Sinc.	Pol. das Ondas	Ondas Modais
Chamia e Liberman (1978)	Proteção	-	-	-	-	✓	-
Johns (1980)	Proteção	-	✓	-	-	✓	-
Magnago e Abur (1998)	Localização	100	-	✓	✓	-	✓
Liu et al. (2012)	Localização	10 ³	✓	✓	-	-	✓
Lopes et al. (2015)	Localização	20	-	✓	-	-	-
Schweitzer et al. (2016)	Localização	1,5.10 ³	-	✓	✓	-	-
Dong et al. (2016)	Proteção	500	✓	-	-	✓	-
Lopes (2016)	Localização	100	-	-	-	-	✓
Costa et al. (2017)	Proteção	4	-	-	✓	-	-
Tang et al. (2017)	Proteção	250	-	✓	✓	✓	-
Namdari e Salehi (2017)	Proteção	10 ³	✓	✓	✓	-	-

Freq. - Frequência; Par. - Parâmetros; Vel. - Velocidade; Sinc. Sincronismo; Pol. - Polaridade.

Conforme a Tabela 2.1, são poucos os métodos baseados em ondas viajantes desenvolvidos nos últimos anos que utilizam apenas um terminal, sendo o último método de proteção desenvolvido em 1988 (SHEHAB-ELDIN; MCLAREN, 1988). A principal razão para isso é a grande dificuldade em se detectar corretamente a onda viajante refletida no ponto de falta, problema ainda em análise pela comunidade científica. Alguns métodos (MAGNAGO; ABUR, 1998; ABUR; MAGNAGO, 2000; THOMAS et al., 2004; LIN et al., 2012) se baseiam em técnicas de detecção da correta onda refletida no ponto de falta, mas que não podem ser aplicados a qualquer sistema, sendo restritos a determinadas condições. A partir da Tabela 2.2, percebe-se que os trabalhos mais recentes de localização e proteção de linhas de transmissão baseados em ondas viajantes utilizam, em sua maioria, medições em dois terminais. Além disso, verifica-se que apenas um trabalho (COSTA et al., 2017) analisou o efeito da frequência de amostragem na eficácia do método, determinando parâmetros claros para a escolha da mínima frequência de amostragem, evitando as altas frequências recorrentes em métodos baseados em ondas viajantes, a mesma análise nunca foi feita em qualquer método que utilize apenas um terminal. Alguns trabalhos utilizaram a onda viajante de modo terra com o objetivo de extrair informações adicionais das condições de falta, mas nenhum deles explorou tal fenômeno aplicado à proteção de linhas de transmissão. Dessa forma, destaca-se a necessidade de se investigar o efeito da frequência de amostragem em um método de proteção de linhas de transmissão baseado em ondas viajantes que utilize apenas um terminal, além de aliar informações da onda de modo terra com o objetivo de evitar a necessidade em se detectar a correta onda viajante

refletida no ponto de falta.

Diversos trabalhos dedicaram-se a desenvolver métodos de detecção de transitórios de alta frequência (COSTA et al., 2010; LOPES et al., 2013; COSTA, 2014; NAMDARI; SALEHI, 2017), que possuem aplicação direta para proteção em ondas viajantes. Portanto, esta dissertação se limita ao desenvolvimento do método de proteção de linhas de transmissão baseado em ondas viajantes, sem o objetivo de desenvolver uma técnica de detecção dessas, restringindo-se à utilização das técnicas já desenvolvidas.

2.4 Síntese do Capítulo

Neste capítulo foi apresentado o estado da arte dos métodos de proteção de linhas de transmissão e localização de faltas baseados em ondas viajantes com um e dois terminais. Foram apresentados artigos históricos da proteção baseada em ondas viajantes e os artigos mais relevantes publicados recentemente.

Capítulo 3

Teoria Básica das Ondas Viajantes

Neste capítulo será apresentado o princípio da teoria da propagação de ondas viajantes em linhas de transmissão monofásicas, destacando o equacionamento básico do modelo da linha de transmissão, assim como as equações de propagação de ondas em descontinuidades.

3.1 Equações da Linha de Transmissão

Conforme apresentado por Araújo e Neves (2005), para uma dada linha de transmissão com indutância L , capacitância C , resistência R e condutância G , todos por unidade de comprimento, tem-se que as equações da linha de transmissão no domínio do tempo são dadas por:

$$-\frac{\partial u(x,t)}{\partial x} = Ri(x,t) + L\frac{\partial i(x,t)}{\partial t}, \quad (3.1)$$

$$-\frac{\partial i(x,t)}{\partial x} = Gu(x,t) + C\frac{\partial u(x,t)}{\partial t}, \quad (3.2)$$

em que $u(x,t)$ e $i(x,t)$ são a tensão e corrente na linha no instante t e na posição x . No domínio da frequência, as equações da linha de transmissão se tornam

$$-\frac{\partial U(x,s)}{\partial x} = (R + sL)I(x,s), \quad (3.3)$$

$$-\frac{\partial I(x,s)}{\partial x} = (G + sC)U(x,s), \quad (3.4)$$

em que $U(x,s)$ e $I(x,s)$ são, respectivamente, as transformadas de Laplace de $u(x,t)$ e $i(x,t)$.

A partir das equações da linha de transmissão, chega-se às equações de onda, dadas por:

$$\frac{\partial^2 U(x,s)}{\partial x^2} = \gamma^2 U(x,s), \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial^2 I(x, s)}{\partial x^2} = \gamma^2 I(x, s), \quad (3.6)$$

em que γ é a constante de propagação da linha de transmissão, dada por

$$\gamma = \sqrt{(R + sL)(G + sC)} = \alpha + j\beta, \quad (3.7)$$

que consiste em uma parte real (α), chamada de constante de atenuação da linha, e outra imaginária (β), chamada de constante de fase da linha.

A solução geral das equações de onda (3.5) e (3.6) resulta em:

$$U(x, s) = U_0^+ e^{-\gamma x} + U_0^- e^{\gamma x}, \quad (3.8)$$

$$I(x, s) = I_0^+ e^{-\gamma x} + I_0^- e^{\gamma x}, \quad (3.9)$$

em que o termo $e^{-\gamma x}$ representa a propagação de onda na direção positiva de x e o termo $e^{\gamma x}$ representa a propagação de onda na direção negativa de x .

A partir da solução geral para as equações de onda, tem-se que:

$$\frac{U_0^+}{I_0^+} = -\frac{U_0^-}{I_0^-} = Z_0, \quad (3.10)$$

em que Z_0 é a impedância característica da linha de transmissão, dada por:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{(R + sL)}{(G + sC)}}. \quad (3.11)$$

Dessa forma, a equação (3.9) pode ser reescrita como:

$$I(x, s) = \frac{U_0^+}{Z_0} e^{-\gamma x} - \frac{U_0^-}{Z_0} e^{\gamma x}. \quad (3.12)$$

Considerando uma linha de transmissão sem perdas ($R = G = 0$), tem-se que $\gamma = s\sqrt{LC}$ e $Z_0 = \sqrt{L/C}$, de forma que as equações (3.8) e (3.12) passam a ser

$$U(x, s) = U_0^+ e^{-\frac{s}{u}x} + U_0^- e^{\frac{s}{u}x}, \quad (3.13)$$

$$I(x, s) = \frac{U_0^+}{Z_0} e^{-\frac{s}{u}x} - \frac{U_0^-}{Z_0} e^{\frac{s}{u}x}, \quad (3.14)$$

em que u é a velocidade de propagação da onda, dada por

$$u = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (3.15)$$

3.2 Propagação de Ondas em Descontinuidades

Na Figura 3.1 está ilustrado um sistema contendo duas linhas de transmissão, linha 1 e linha 2, com impedâncias características distintas ($Z_1 \neq Z_2$), com um relé instalado entre as duas linhas. Tem-se uma falta na linha 1 e a ocorrência das ondas viajantes, com algumas de suas respectivas reflexões e refrações nos pontos de descontinuidade representadas no diagrama de Lattice. No diagrama de Lattice, também está ilustrado o instante de chegada da primeira onda a se chocar na barra 2 e é representado por t_1^2 , assim como alguns dos demais instantes de chegada em todas as barras, com seus respectivos índices. Os tempos totais de propagação de uma onda viajante ao longo de cada uma das linhas 1 e 2 são, respectivamente, τ_1 e τ_2 .

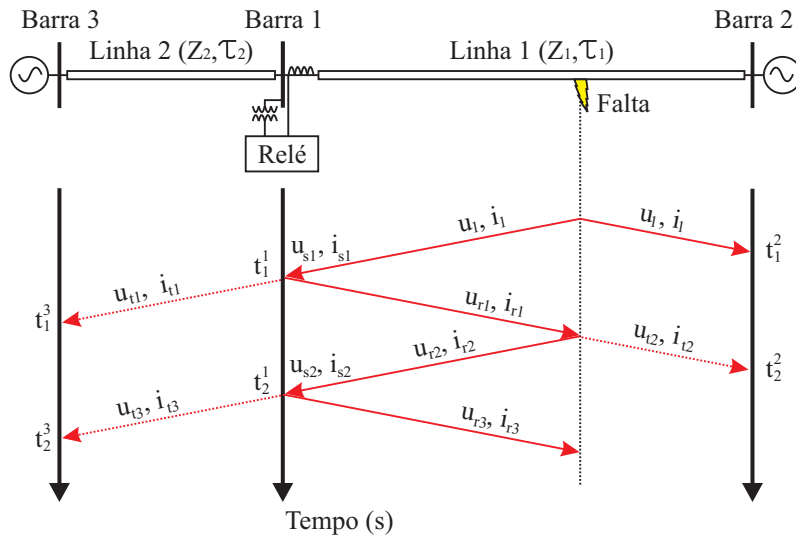


Figura 3.1: Diagrama de Lattice das ondas viajantes para uma falta.

3.2.1 Reflexões e Refrações das Ondas

Na ocorrência de uma falta na linha 1, ondas viajantes nas tensões e correntes (u_1 e i_1) são geradas e se propagam em ambas as direções da linha, a partir do ponto de falta. Conforme apresentado por Christopoulos et al. (1988), as amplitudes dessas ondas são dadas por

$$u_1 = -\frac{Z_1}{Z_1 + 2R_f} u_f, \quad (3.16)$$

$$i_1 = -\frac{u_1}{Z_1} = \frac{1}{Z_1 + 2R_f} u_f, \quad (3.17)$$

em que R_f é a resistência de falta, u_f é a tensão instantânea no ponto de falta no instante da falta e Z_1 é a impedância característica da linha 1.

Ondas viajantes nos sinais de tensão e corrente u_1 e i_1 se propagam em direção à linha 2 e, ao se chocarem na barra 1, sofrem reflexão (u_{r1} e i_{r1}) e refração (u_{t1} e i_{t1}). As ondas refletidas se propagam de volta em direção ao ponto de falta e as ondas refratadas seguem ao longo da linha 2. Conforme demonstrado por Bewley (1931), as ondas refletidas são dadas por:

$$u_{r1} = \Gamma_{r1(U)} u_1, \quad (3.18)$$

$$i_{r1} = \Gamma_{r1(I)} i_1, \quad (3.19)$$

em que $\Gamma_{r1(U)}$ é o coeficiente de reflexão da onda de tensão, dado por:

$$\Gamma_{r1(U)} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, \quad (3.20)$$

e $\Gamma_{r1(I)}$ é o coeficiente de reflexão da onda de corrente, dado por:

$$\Gamma_{r1(I)} = -\Gamma_{r1(U)} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}, \quad (3.21)$$

ao passo que as ondas refratadas são dadas por:

$$u_{t1} = \Gamma_{t1(U)} u_1, \quad (3.22)$$

$$i_{t1} = \Gamma_{t1(I)} i_1, \quad (3.23)$$

em que $\Gamma_{t1(U)}$ é o coeficiente de refração da onda de tensão, dado por:

$$\Gamma_{t1(U)} = 1 + \Gamma_{r1(U)} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}, \quad (3.24)$$

e $\Gamma_{t1(I)}$ é o coeficiente de refração da onda de corrente, dado por:

$$\Gamma_{t1(I)} = 1 + \Gamma_{r1(I)} = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2}. \quad (3.25)$$

As ondas refletidas na barra 1 (u_{r1} e i_{r1}) se propagam de volta em direção ao ponto de falta. Ao se chocarem com o ponto de descontinuidade da falta, novas ondas refletidas (u_{r2} e i_{r2}) e refratadas (u_{t2} e i_{t2}) surgirão. As ondas de tensão refletida e refratada no ponto de falta são dadas por:

$$u_{r2} = \Gamma_{r2(U)} u_{r1}, \quad (3.26)$$

$$u_{t2} = \Gamma_{t2(U)} u_{r1}, \quad (3.27)$$

em que $\Gamma_{r2(U)}$ é o coeficiente de reflexão da onda de tensão, dado por:

$$\Gamma_{r2(U)} = \frac{\frac{Z_1 R_f}{Z_1 + R_f} - Z_1}{\frac{Z_1 R_f}{Z_1 + R_f} + Z_1}, \quad (3.28)$$

e $\Gamma_{t2(U)}$ é o coeficiente de refração da onda de tensão, dado por:

$$\Gamma_{t2(2)} = \frac{2 \frac{Z_1 R_f}{Z_1 + R_f}}{\frac{Z_1 R_f}{Z_1 + R_f} + Z_1}. \quad (3.29)$$

As ondas de corrente refletida no ponto de falta e refratada no ponto de falta ao longo do restante da linha são dadas por:

$$i_{r2} = \Gamma_{r2(I)} i_{r1}, \quad (3.30)$$

$$i_{t2} = \Gamma_{t2(I)} i_{r1}, \quad (3.31)$$

em que $\Gamma_{r2(I)}$ é o coeficiente de reflexão da onda de corrente, dado por:

$$\Gamma_{r2(I)} = -\Gamma_{r2(U)} = \frac{Z_1 - \frac{Z_1 R_f}{Z_1 + R_f}}{Z_1 + \frac{Z_1 R_f}{Z_1 + R_f}}, \quad (3.32)$$

e $\Gamma_{t2(I)}$ é o coeficiente de refração da onda de corrente que se propagará em direção ao restante da linha, dado por:

$$\Gamma_{t2(I)} = \frac{2R_f}{Z_1 + 2R_f}. \quad (3.33)$$

De acordo com Christopoulos et al. (1988), um relé instalado na barra 1 não é capaz de realizar a medição das ondas incidentes (u_1 e i_1) e das ondas refletidas (u_{r1} e i_{r1}) simultaneamente. Como o relé é normalmente instalado a poucos metros da barra, quando uma onda viajante alcança o relé, a uma velocidade próxima a da luz, sua reflexão ocorre logo em seguida. Dessa forma, quando uma onda viajante se choca com a barra, ao haver uma amostragem realizada pelo relé, o sinal colhido da onda viajante será a soma entre a onda incidente e a onda refletida na barra. As equações das ondas viajantes medidas pelo relé são dadas por:

$$u_{s1} = u_1 + u_{r1} = u_1(1 + \Gamma_{r1(U)}) = \frac{2Z_2 u_1}{Z_2 + Z_1}, \quad (3.34)$$

$$i_{s1} = i_1 + i_{r1} = i_1(1 + \Gamma_{r1(I)}) = \frac{-2u_1}{Z_2 + Z_1}. \quad (3.35)$$

3.3 Componentes Modais

No estudo de ondas viajantes em linhas de transmissão, é importante analisar os sinais de tensão e corrente considerando o acoplamento eletromagnético entre as fases. Dessa forma, para o estudo das ondas viajantes, é aconselhável que os sinais de tensão e corrente medidos em componentes de fase sejam transformados em componentes modais independentes. A transformada de Clarke (DUESTERHOEFT et al., 1951) pode ser empregada para tal fim. A matriz adotada para a transformada de Clarke foi a mesma publicada por Namdari e Salehi (2017), como segue:

$$\begin{bmatrix} u_0 \\ u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \sqrt{2} & \frac{-1}{\sqrt{2}} & \frac{-1}{\sqrt{2}} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} & \frac{-\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix}, \quad (3.36)$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \sqrt{2} & \frac{-1}{\sqrt{2}} & \frac{-1}{\sqrt{2}} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} & \frac{-\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix}, \quad (3.37)$$

em que u_A , u_B , u_C , i_A , i_B e i_C são os sinais de tensão e corrente no domínio de fase; u_0 , u_α , u_β , i_0 , i_α e i_β são os sinais de tensão e corrente em componentes modais terra, alfa e beta, respectivamente. Dessa forma, cada componente modal se comporta como um sinal de circuito monofásico. Neste trabalho, as ondas viajantes serão sempre analisadas nos sinais de modo alfa ou modo terra.

3.4 Síntese do Capítulo

Apresentou-se neste capítulo a fundamentação teórica das ondas viajantes as equações do modelo da linha de transmissão monofásica foram demonstradas, a partir das equações da linha até a dedução da impedância característica e a velocidade de onda viajante para uma linha sem perdas.

Também foram apresentadas as equações de propagação das ondas viajantes. Foram demonstradas as equações de reflexão e refração das ondas para um ponto de descontinuidade entre duas linhas e para um ponto de falta. Apresentou-se também as equações das ondas vistas por um relé instalado entre duas linhas de transmissão. Por fim, realizou-se uma breve discussão a respeito das ondas viajantes modais.

A análise simplificada apresentada neste capítulo é suficiente para o entendimento dos métodos propostos nesta dissertação, sendo possível encontrar a teoria mais detalhadas das ondas viajantes em Zanetta Júnior (2003).

Capítulo 4

Proteção de Linhas de Transmissão Baseada nas Reflexões das Ondas Viajantes Utilizando um Terminal

Neste capítulo será apresentado o método proposto de proteção de linhas de transmissão baseado nas reflexões das ondas viajantes utilizando um terminal, mas ainda dependente de uma correta detecção da onda refletida no ponto de falta. Apresenta-se também os principais problemas identificados para a correta detecção da onda viajante refletida no ponto de falta, questão ainda sob investigação pela comunidade científica.

4.1 Ondas Viajantes Utilizando um Terminal

Na Figura 4.1 ilustra-se o comportamento geral das ondas viajantes vistas de um terminal. Quando uma falta ocorre na linha, ondas viajantes se propagam em direção aos terminais da linha e, ao alcançarem os terminais, sofrem reflexão e refração. As ondas refletidas se propagam em direção ao ponto de falta, já as ondas refratadas, se propagam em direção ao terminal da linha adjacente. Novas reflexões e refrações ocorrem com as ondas viajantes ao se chocarem com o ponto de falta ou com outros terminais de linha. O relé conectado em um dos terminais da linha protegida detecta as ondas viajantes que se chocam ao terminal e, com isso, extrai as informações necessárias para identificar se uma falta interna ocorreu na linha protegida. A detecção de falta interna, como detalhado nas seções seguintes, pode ser realizada a partir das informações dos instantes de chegada das ondas viajantes.

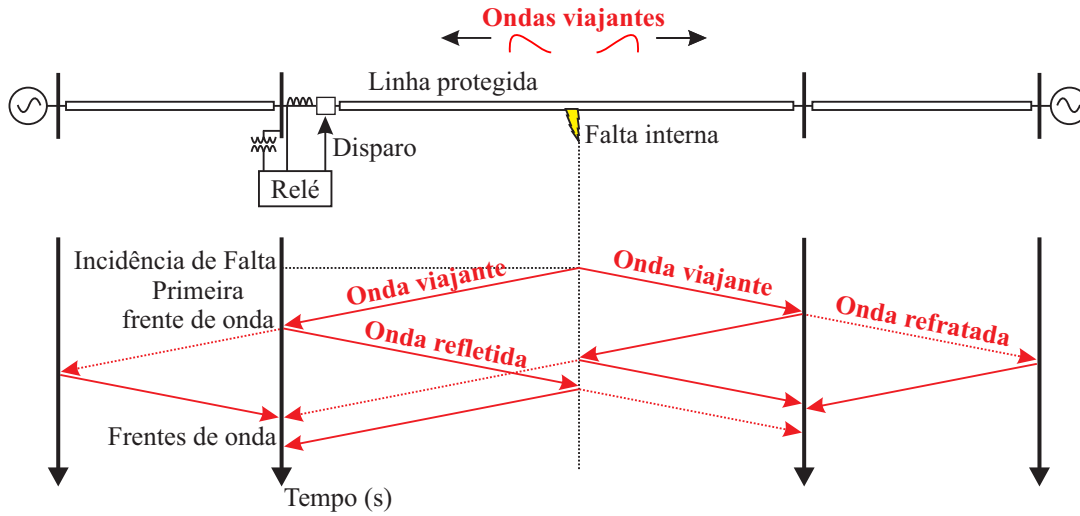


Figura 4.1: Ideia geral do comportamento das ondas viajantes vistas a partir de um terminal.

4.2 Ondas Viajantes em uma Linha Simples

Considerando uma linha simples (sem linhas adjacentes) e o tempo de incidência de falta t_F para uma falta com distância d_F da barra local igual a um valor d_x , para uma falta na primeira metade da linha ($d_F < l/2$), conforme ilustrado na Figura 4.2. Portanto, a segunda frente de onda sempre será proveniente de uma reflexão no ponto de falta, logo os tempos de propagação da primeira e segunda frentes de onda são dados respectivamente por

$$\tau_{F1} = t_{F1} - t_F = \frac{t_{F2} - t_{F1}}{2} = \frac{d_F}{v}, \quad (4.1)$$

$$\tau_{F2} = t_{F2} - t_F = (t_{F2} - t_{F1}) \frac{3}{2} = \frac{3d_F}{v}, \quad (4.2)$$

em que v é a velocidade da onda viajante; t_{F1} e t_{F2} os tempos de chegada da primeira e segunda frente de onda, respectivamente, no terminal local.

Com relação a uma falta na segunda metade da linha, mas agora a uma distância d_x da barra remota, de forma que a distância de falta à barra local seja $d_F = l - d_x$, conforme ilustrado na Figura 4.3, a segunda frente de onda sempre será proveniente de uma reflexão na barra remota. Então os tempos de propagação da primeira e segunda frentes de onda são dados respectivamente por

$$\tau_{F1} = t_{F1} - t_F = \frac{l}{v} - \frac{t_{F2} - t_{F1}}{2} = \frac{d_F}{v}, \quad (4.3)$$

$$\tau_{F2} = t_{F2} - t_F = \frac{l}{v} + \frac{t_{F2} - t_{F1}}{2} = \frac{2l - d_F}{v}. \quad (4.4)$$

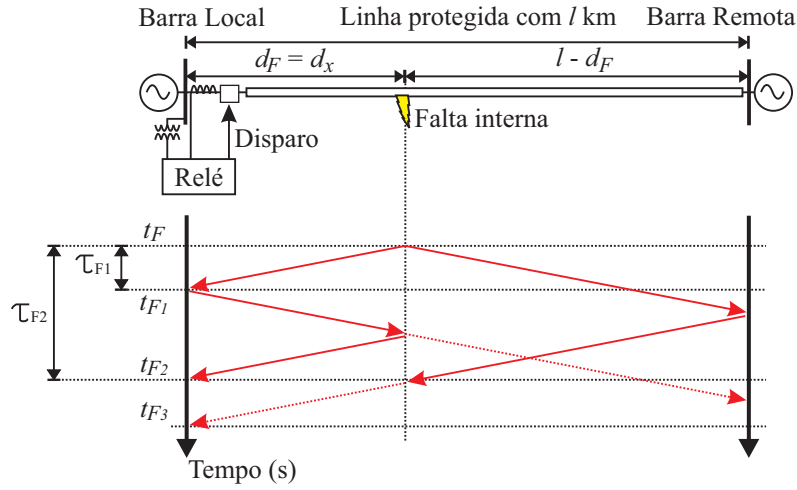


Figura 4.2: Diagrama de *Lattice* das ondas viajantes para uma falta na primeira metade da linha de transmissão.

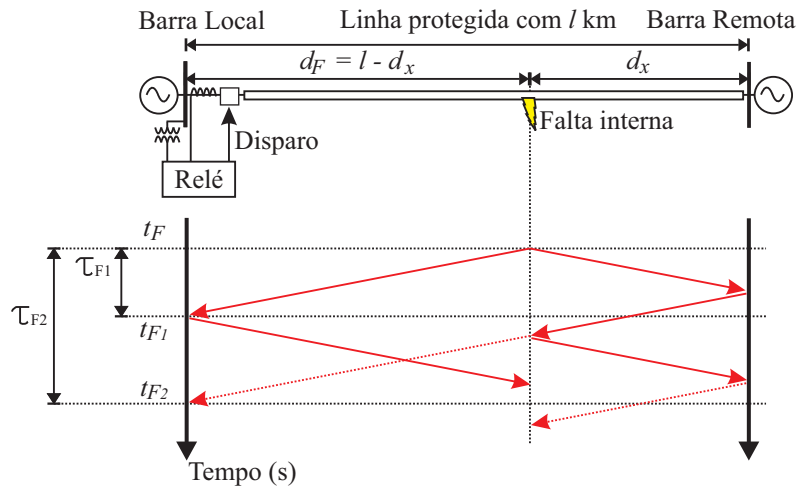


Figura 4.3: Diagrama de *Lattice* das ondas viajantes para uma falta na segunda metade da linha de transmissão.

De acordo com a equação (4.1), a distância entre a barra local e uma falta ocorrida na primeira metade da linha é dada por

$$d_F = d_x = (t_{F1} - t_F)v = \frac{(t_{F2} - t_{F1})v}{2}, \quad (4.5)$$

enquanto que, de acordo com a equação (4.3), a distância entre a barra local e uma falta ocorrida na segunda metade da linha é dada por

$$d_F = l - d_x = (t_{F1} - t_F)v = l - \frac{(t_{F2} - t_{F1})v}{2}. \quad (4.6)$$

A partir das equações (4.5) e (4.6), obtém-se que, para duas faltas distintas, uma na primeira metade da linha, a uma distância d_x da barra local, e outra na segunda metade, distanciada a um mesmo valor d_x , mas agora da barra remota, a diferença entre os tempos de chegada da primeira e segunda frente de onda ($t_{F2} - t_{F1}$) são iguais. Portanto, a princípio, não seria possível identificar se uma falta ocorreu na primeira ou na segunda metade da linha de transmissão apenas a partir dos instantes de chegada das ondas viajantes.

O tempo de propagação da onda viajante através de toda a linha de transmissão com comprimento l (tempo de trânsito) é dado por

$$\tau = \frac{l}{v}. \quad (4.7)$$

Para faltas na primeira metade da linha, a diferença entre os tempos de chegada da primeira e segunda frentes de onda na barra local é menor do que um tempo de trânsito, já que o tempo de chegada da segunda frente de onda é devido à onda refletida no ponto de falta (Figura 4.2). Com relação às faltas na segunda metade da linha, a diferença entre os tempos de chegada da primeira e segunda frentes de onda na barra local é também menor do que um tempo de trânsito, já que o tempo de chegada da segunda frente de onda é devido à onda refletida no terminal remoto da linha (Figura 4.3). A máxima diferença entre os tempos de chegada das duas primeiras frentes de onda ocorre para uma falta no meio da linha. Portanto, faltas internas são detectadas se

$$t_{F2} - t_{F1} \leq \frac{l}{v}. \quad (4.8)$$

Quando uma falta ocorre exatamente na barra remota (falta externa), conforme ilustrado na Figura 4.4, a primeira frente de onda chegará à barra local após um tempo de trânsito τ e será refletida de volta em direção à barra remota, momento em que sofrerá nova reflexão e se propagará novamente em direção à barra local. Portanto, a diferença entre os tempos de chegada da primeira e segunda frente de onda devido a uma falta na barra remota é dada por

$$t_{F2} - t_{F1} = \frac{2l}{v}. \quad (4.9)$$

Para uma falta ocorrente exatamente na barra local, a diferença de tempo entre a primeira e segunda frentes de onda também é dada pela equação (4.9).

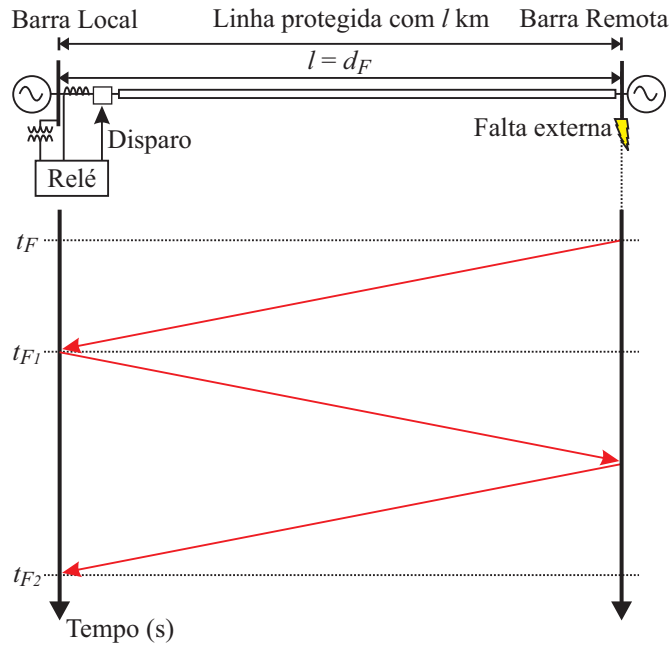


Figura 4.4: Diagrama de Lattice das ondas viajantes para uma falta na barra remota.

De acordo com as equações (4.8) e (4.9), a diferença entre os instantes de chegada das duas primeiras frentes de onda nunca ocorrerá na região $l/v < t_{F2} - t_{F1} < (2l)/v$. Dessa forma, é possível adotar um limiar para detecção de falta interna sem que haja prejuízo ao método de proteção - considerando apenas o domínio do tempo contínuo. Com isso, propõe-se que uma falta interna é detectada se

$$t_{F2} - t_{F1} \leq q \frac{l}{v}, \quad (4.10)$$

em que q é um limiar para garantir que uma falta interna seja corretamente diferenciada de uma falta externa, atendendo a

$$\left(\frac{l}{v} \right) \leq \left(\frac{ql}{v} \right) < \left(\frac{2l}{v} \right), \quad (4.11)$$

em que $1 \leq q < 2$.

4.3 Inclusão de Linhas Adjacentes

O esquema de proteção precisa ser capaz de distinguir entre faltas internas e externas, de forma a não ocasionar um falso disparo na ocorrência de uma falta externa à linha protegida. No esquema de proteção de dois terminais, apenas a primeira frente de onda

em cada terminal é utilizada, de forma que não há o risco do relé fazer a detecção de uma onda viajante não desejada ao esquema de proteção. No esquema de proteção utilizando um terminal, porém, é necessário mais do que a primeira frente de onda viajante para a correta atuação da proteção. Dessa forma, a detecção correta de várias frentes de onda é um problema crucial a ser resolvido por métodos de proteção que utilizam apenas um terminal.

Na Figura 4.5 ilustra-se uma falta externa ocorrente na linha adjacente à esquerda da linha protegida, linha externa A com comprimento l_A , a uma distância $d_x < l$ da barra local da linha protegida. Nessa configuração de falta, a diferença de tempo entre os instantes de chegada das duas primeiras frentes de onda é menor do que duas vezes o tempo de trânsito de uma onda viajante na linha de transmissão ($t_{F2} - t_{F1} = (2l)/v$), de forma que a equação (4.9) não é respeitada. Ou seja, no caso apresentado, uma falta externa seria identificada como interna, levando a uma má operação da proteção.

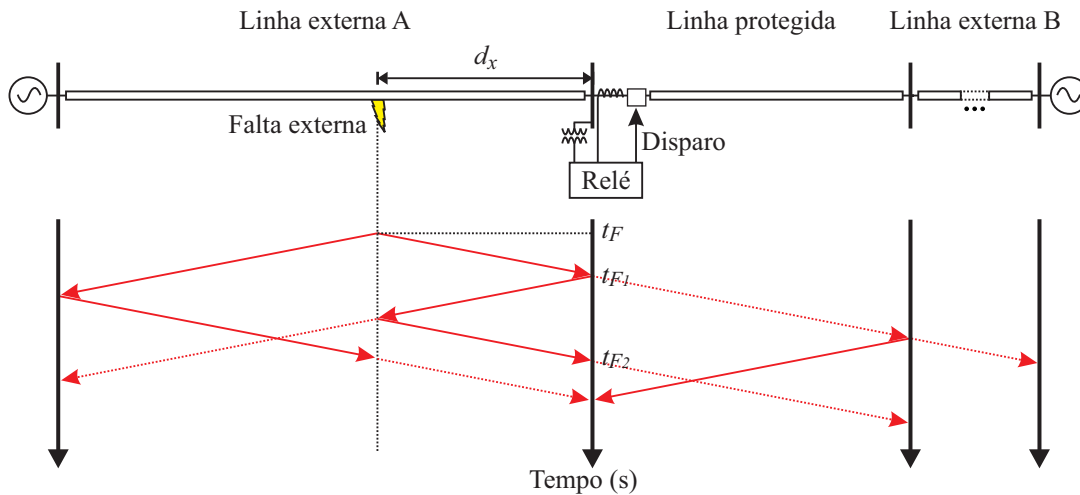


Figura 4.5: Diagrama de Lattice das ondas viajantes para falta em uma linha adjacente à esquerda da linha protegida.

O mesmo ocorre para uma falta externa ocorrente na linha adjacente à direita da linha protegida, linha externa B com comprimento l_B , a uma distância $d_x < l$ da barra remota da linha protegida (Figura 4.6). Portanto, a diferença entre os instantes de chegada das duas primeiras frentes de onda viajante pode ser igual para, pelo menos, quatro cenários diferentes de falta: falta interna a uma distância $d_x < l/2$ da barra local da linha protegida (Figura 4.2); falta interna a uma distância $d_x < l/2$ da barra remota da linha protegida (Figura 4.2); falta externa a uma distância $d_x < l$ da barra local da linha protegida (Figura 4.5); falta externa a uma distância $d_x < l$ da barra remota da linha protegida (Figura 4.6). Conclui-se, então, que qualquer esquema de proteção de linhas de transmissão baseado

unicamente em instantes de chegada das ondas viajantes utilizando um terminal, na existência de linhas adjacentes, precisa distinguir tais situações de falta, de forma a evitar que faltas externas sejam confundidas com internas. Uma solução para o problema seria a correta detecção da onda refletida no ponto de falta.

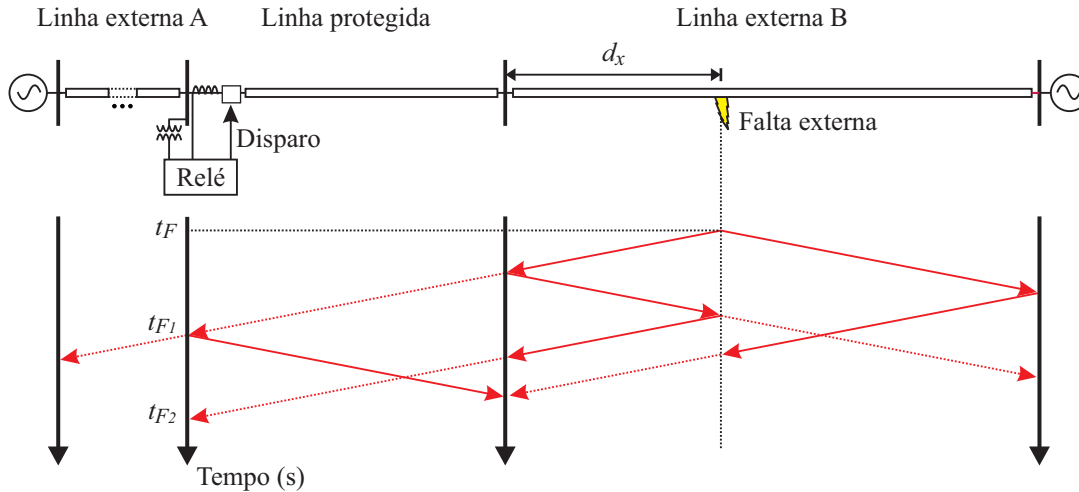


Figura 4.6: Diagrama de Lattice das ondas viajantes para falta em uma linha adjacente à direita da linha protegida.

Conforme ilustra-se na Figura 4.7, outra situação possível que poderia acarretar na má operação da proteção ocorre quando, para uma falta na linha externa B, a linha externa A possui comprimento menor do que a linha protegida ($l_A < l$). Para essa configuração, o instante t_{F2} seria relativo a uma onda viajante refletida no terminal da linha externa A, enquanto que a onda refletida na barra remota da linha protegida se chocaria com a barra local apenas no instante t_{F3} , o que poderia sensibilizar a proteção, mesmo sendo uma falta externa.

Uma situação semelhante à anterior está ilustrada na Figura 4.8, em que uma falta interna ocorre, mas a uma distância d_F maior do que o comprimento l da linha externa à esquerda. Nessa configuração, a segunda onda viajante a se chocar com a barra local é proveniente de uma reflexão na barra da linha externa à esquerda, o que, apesar de não sensibilizar incorretamente a proteção, poderia gerar erros ao método de localização baseado em ondas viajantes.

Diversos trabalhos propuseram técnicas com o objetivo de detectar a correta onda refletida no ponto de falta. Correlação foi a primeira estratégia aplicada ao problema (CROSSLEY; MCLAREN, 1983), mas, conforme mencionado por Magnago e Abur (1998), a ferramenta é dependente da correta definição do tamanho da janela de correlação, a qual depende da localização da falta, o que, a princípio, é uma informação desconhecida.

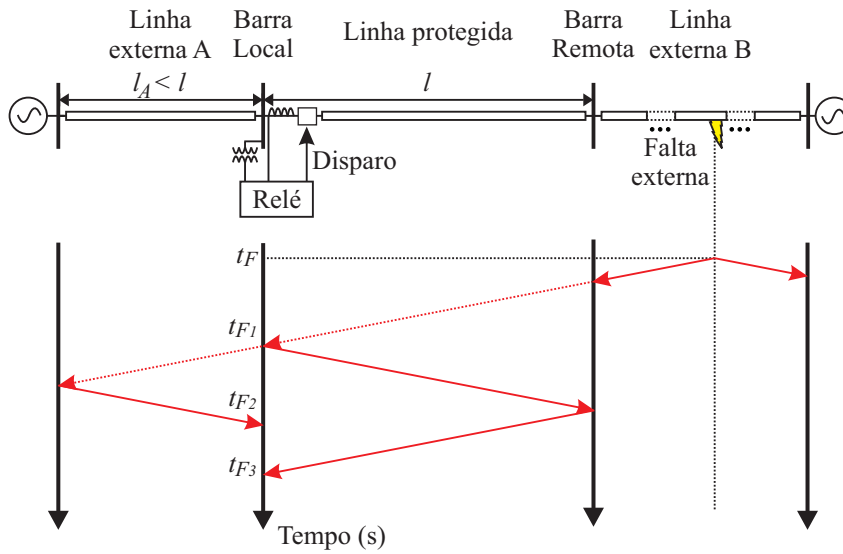


Figura 4.7: Diagrama de Lattice das ondas viajantes para falta em uma linha adjacente à direita da linha protegida, sendo a linha à esquerda menor do que a linha protegida.

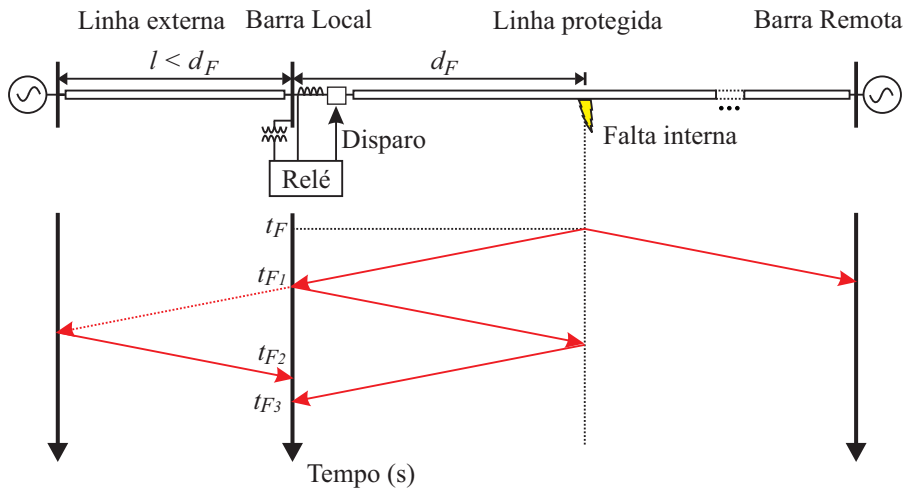


Figura 4.8: Diagrama de Lattice das ondas viajantes para falta na linha protegida, sendo a linha à esquerda menor do que a linha protegida.

Com o objetivo de amenizar o problema da definição do tamanho da janela de correlação, Shehab-Eldin e McLaren (1988) propuseram um método que combina tamanhos curto e longo da janela. Christopoulos et al. (1988) propuseram um método baseado na amplitude das ondas viajantes para detectar a onda viajante refletida no ponto de falta. Contudo, o método é dependente da correta estimação dos parâmetros da linha. As polaridades das ondas viajantes também foram investigadas na tentativa de solucionar o problema (DONG et al., 1999; KALE et al., 2012). Entretanto, as polaridades das ondas viajantes refletidas

nos pontos de singularidade dependem dos parâmetros da linha sob análise, das linhas adjacentes e da resistência de falta, de forma que as polaridades das ondas após reflexões variam de acordo com o sistema analisado e as condições de falta. Portanto, a correta detecção da onda viajante refletida no ponto de falta é um problema que ainda vem sendo investigado pela comunidade científica e não possui solução suficientemente robusta para qualquer sistema.

4.4 Domínio de Tempo Discreto para uma Linha Simples

Para aplicação em relés de proteção, os sinais de tensão e corrente são discretizados. Portanto, o efeito da frequência de amostragem precisa ser considerado. Costa et al. (2017) investigou tal efeito para um método de proteção utilizando dois terminais. No entanto, até então, para métodos de um terminal, esse efeito ainda não foi investigado.

Na Figura 4.9 estão ilustrados os instantes de tempo de chegada das ondas viajantes no terminal local, devido a uma falta distanciada de d_F da barra L em uma linha de l km de comprimento. Os instantes discretos das frentes de onda, devido ao efeito da frequência de amostragem, também são ilustrados.

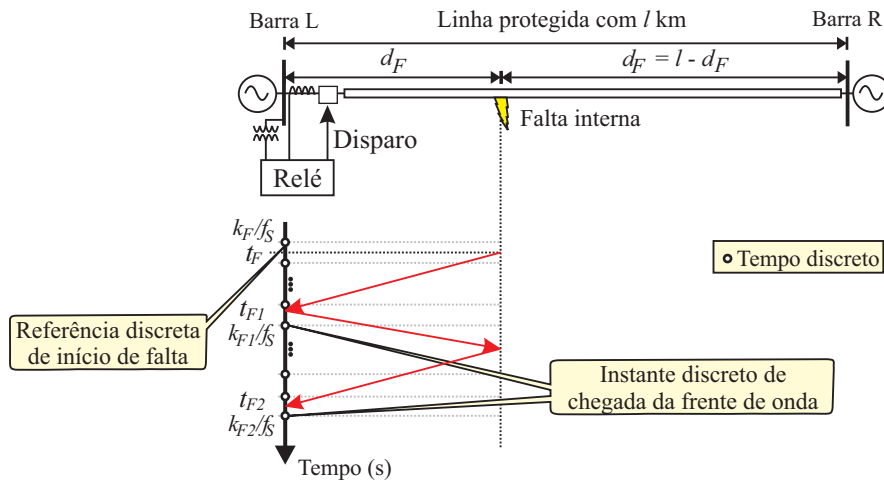


Figura 4.9: Diagrama de Lattice das ondas viajantes vistas a partir de um terminal, considerando o efeito da frequência de amostragem.

Considerando o efeito da frequência de amostragem, o primeiro e segundo instantes de tempo de chegada de frente de onda t_{F1} e t_{F2} , assim como o instante de incidência de falta t_F , todos no domínio de tempo contínuo, devem ser convertidos aos seus respectivos instantes de tempo discretos, que podem ser detectados com alta precisão por diversos métodos digitais de filtragem de alta frequência (COSTA et al., 2010; COSTA,

2014; NAMDARI; SALEHI, 2017). Neste trabalho, portanto, assume-se que os instantes discretos de detecção das frentes de onda são conhecidos e nenhum método de detecção será investigado. Os instantes no domínio de tempo discreto são dados por:

$$\frac{k_F}{f_s} = \frac{\lfloor t_F f_s \rfloor}{f_s} \Rightarrow t_F - \frac{1}{f_s} < \frac{k_F}{f_s} \leq t_F, \quad (4.12)$$

$$\frac{k_{F1}}{f_s} = \frac{\lfloor t_{F1} f_s \rfloor}{f_s} + \frac{1}{f_s} \Rightarrow t_{F1} < \frac{k_{F1}}{f_s} \leq t_{F1} + \frac{1}{f_s}, \quad (4.13)$$

$$\frac{k_{F2}}{f_s} = \frac{\lfloor t_{F2} f_s \rfloor}{f_s} + \frac{1}{f_s} \Rightarrow t_{F2} < \frac{k_{F2}}{f_s} \leq t_{F2} + \frac{1}{f_s}, \quad (4.14)$$

em que k_F é a amostra de referência e representa o instante discreto de incidência de falta; k_{F1} e k_{F2} são as amostras em que a primeira e segunda frentes de onda são detectadas pelo relé; $\lfloor \cdot \rfloor$ é a operação *floor*, que retorna o mínimo valor inteiro do argumento; f_s é a frequência de amostragem.

Devido ao processo de amostragem, as variáveis no domínio de tempo discreto apresentam erros com relação aos corretos valores no domínio de tempo contínuo. De acordo com as equações (4.12)-(4.14), os erros associados ao instante de incidência de falta (ϵ_F) e instantes de chegada da primeira e segunda frentes de onda (ϵ_{F1} e ϵ_{F2}) são dados por:

$$\epsilon_F = t_F - \frac{k_F}{f_s} \Rightarrow 0 \leq \epsilon_F < \frac{1}{f_s}. \quad (4.15)$$

$$\epsilon_{F1} = \frac{k_{F1}}{f_s} - t_{F1} \Rightarrow 0 \leq \epsilon_{F1} < \frac{1}{f_s}, \quad (4.16)$$

$$\epsilon_{F2} = \frac{k_{F2}}{f_s} - t_{F2} \Rightarrow 0 \leq \epsilon_{F2} < \frac{1}{f_s}. \quad (4.17)$$

A diferença entre os instantes discretos de chegada da segunda e da primeira frentes de onda é dada por

$$\frac{k_{F2}}{f_s} - \frac{k_{F1}}{f_s} = (t_{F2} + \epsilon_{F2}) - (t_{F1} + \epsilon_{F1}) = (t_{F2} - t_{F1}) + (\epsilon_{F2} - \epsilon_{F1}), \quad (4.18)$$

o que possibilita o cálculo de um erro total associado à diferença entre os instantes discretos

$$\epsilon_T = (\epsilon_{F2} - \epsilon_{F1}) = \frac{k_{F2} - k_{F1}}{f_s} - (t_{F2} - t_{F1}), \quad (4.19)$$

em que $-1/f_s < \epsilon_T < 1/f_s$, uma vez que $0 \leq \epsilon_{F1} < 1/f_s$ e $0 \leq \epsilon_{F2} < 1/f_s$.

A partir das equações (4.8) e (4.19), uma falta será detectada como interna quando

$$\frac{k_{F2} - k_{F1}}{f_s} + (\epsilon_{F1} - \epsilon_{F2}) \leq \frac{l}{v} \Rightarrow \frac{k_{F2} - k_{F1}}{f_s} - \epsilon_T \leq \frac{l}{v} \Rightarrow k_{F2} - k_{F1} \leq \left(\frac{l}{v} + \epsilon_T \right) f_s. \quad (4.20)$$

Considerando o limite superior do erro total, a inequação (4.20) se torna

$$k_{F2} - k_{F1} < \left(\frac{l f_s}{v} + 1 \right), \quad (4.21)$$

já considerando o limite inferior, a inequação (4.20) se torna

$$k_{F2} - k_{F1} < \left(\frac{l f_s}{v} - 1 \right). \quad (4.22)$$

Visto que $k_{F2} \geq k_{F1}$ e $(k_{F2} - k_{F1}) \in \mathbb{N}$, então, a partir das equações (4.21) e (4.22), uma falta interna será detectada quando

$$k_{F2} - k_{F1} \leq \left\lfloor \frac{l f_s}{v} \right\rfloor + 1. \quad (4.23)$$

Das equações (4.9) e (4.19), uma falta externa será detectada quando

$$\frac{k_{F2} - k_{F1}}{f_s} + (\epsilon_{F1} - \epsilon_{F2}) = \frac{2l}{v} \Rightarrow \frac{k_{F2} - k_{F1}}{f_s} - \epsilon_T = \frac{2l}{v} \Rightarrow k_{F2} - k_{F1} = \left(\frac{2l}{v} + \epsilon_T \right) f_s. \quad (4.24)$$

Portanto, considerando os limites superior e inferior do erro total, uma falta externa será detectada quando

$$\left(\frac{2l f_s}{v} - 1 \right) < k_{F2} - k_{F1} < \left(\frac{2l f_s}{v} + 1 \right). \quad (4.25)$$

Uma vez que $k_{F2} \geq k_{F1}$ e $(k_{F2} - k_{F1}) \in \mathbb{N}$, a inequação (4.25) se torna

$$\left\lfloor \frac{2l f_s}{v} \right\rfloor \leq k_{F2} - k_{F1} \leq \left\lfloor \frac{2l f_s}{v} \right\rfloor + 1. \quad (4.26)$$

De acordo com as equações (4.23) e (4.26), para garantir uma correta distinção entre faltas internas e externas, um limiar (p) para a detecção de faltas internas pode ser adotado, como segue

$$\left\lfloor \frac{l f_s}{v} \right\rfloor + 1 \leq \left\lfloor \frac{p l f_s}{v} \right\rfloor < \left\lfloor \frac{2l f_s}{v} \right\rfloor, \quad (4.27)$$

em que $1 \leq p < 2$. Portanto, a inequação (4.27) é a análoga discreta da inequação (4.11).

4.4.1 As Zonas Protegida, Desprotegida e de Incerteza

No processo de amostragem, toma-se como verdade que o relé não tem capacidade de identificar múltiplas frentes de ondas chegando entre duas amostras consecutivas. De fato, se a primeira e a segunda frentes de onda alcançarem o terminal local no mesmo período de amostragem, o relé as identificará como sendo apenas uma frente de onda. Portanto, quando

$$k_{F2} - k_{F1} \leq 1, \quad (4.28)$$

não é possível garantir que apenas duas frentes de onda chegaram à barra local, pois poderá ter ocorrido a chegada de múltiplas frentes de onda na barra local antes da amostra k_{F1} e entre as amostras k_{F1} e k_{F2} , que poderiam ter ocorrido devido a um chaveamento em um dos terminais da linha.

Em termos dos instantes de chegada das ondas, a inequação (4.28) se torna

$$\frac{k_{F2}}{f_s} - \frac{k_{F1}}{f_s} \leq \frac{1}{f_s} \Rightarrow (t_{F2} + \epsilon_{F2}) - (t_{F1} + \epsilon_{F1}) \leq \frac{1}{f_s} \Rightarrow (t_{F2} - t_{F1}) + \epsilon_T \leq \frac{1}{f_s}. \quad (4.29)$$

De forma a garantir que um chaveamento no terminal da linha não seja confundido com uma falta interna, é necessário que, para uma falta interna ser detectada, a primeira e segunda frentes de onda devem alcançar o terminal local em amostras não consecutivas, como segue

$$k_{F2} - k_{F1} \geq 2. \quad (4.30)$$

Em termos dos instantes de chegada das ondas viajantes, a inequação (4.30) se torna

$$\frac{k_{F2}}{f_s} - \frac{k_{F1}}{f_s} \geq \frac{2}{f_s} \Rightarrow (t_{F2} + \epsilon_{F2}) - (t_{F1} + \epsilon_{F1}) \geq \frac{2}{f_s} \Rightarrow (t_{F2} - t_{F1}) + \epsilon_T \geq \frac{2}{f_s}. \quad (4.31)$$

Devido à limitação dada pela inequação (4.30), sempre que a inequação (4.28) for verdadeira, a falta deverá ser detectada como externa, o que significa que haverá uma zona desprotegida no terminal local e outra, de mesmo comprimento, no terminal remoto.

Manobras nos terminais da linha, como energização de transformadores, chaveamento de banco de capacitores, ou chaveamento de cargas, podem resultar em múltiplas frentes de onda chegando no terminal local dentro de um mesmo período de amostragem, de forma que o relé detectará frentes de onda em amostras consecutivas. Uma falta muito próxima dos terminais da linha também resultará em detecções das frentes de onda em amostras consecutivas pelo relé. Portanto, as zonas desprotegidas definidas são importantes de forma a evitar sensibilizações indesejadas da proteção. Sendo assim, fica evidente a necessidade de um esquema de proteção de *backup* para detectar faltas próximas aos

terminais da linha.

De acordo com a inequação (4.31), e considerando que $-1/f_s < \varepsilon_T < 1/f_s$, o limite para a diferença entre os instantes de chegada das duas primeiras frentes de onda, no domínio de tempo contínuo, em que uma falta interna poderá ser detectada como interna, sensibilizando a proteção, é dada por

$$(t_{F2} - t_{F1}) > \frac{1}{f_s}, \quad (4.32)$$

o que significa que uma falta será detectada como externa sempre que

$$(t_{F2} - t_{F1}) \leq \frac{1}{f_s}, \quad (4.33)$$

ou seja, a falta terá ocorrido em uma zona desprotegida.

De acordo com a inequação (4.29), e considerando que $-1/f_s < \varepsilon_T < 1/f_s$, o limite para a diferença entre os instantes de chegada das duas primeiras frentes de onda, no domínio de tempo contínuo, em que uma falta interna poderá ser detectada como externa, não sensibilizando a proteção, é dada por

$$(t_{F2} - t_{F1}) < \frac{2}{f_s}, \quad (4.34)$$

o que significa que, para que uma falta interna seja seguramente detectada como interna, tem-se que

$$(t_{F2} - t_{F1}) \geq \frac{2}{f_s}, \quad (4.35)$$

que definirá que uma falta terá ocorrido na zona protegida.

De acordo com as inequações (4.32)-(4.35), existe uma zona de incerteza onde uma falta poderá ser detectada como interna ou externa, a depender do valor do erro total (ε_T). Portanto, a falta terá ocorrido na zona de incerteza se

$$\frac{1}{f_s} < t_{F2} - t_{F1} < \frac{2}{f_s}. \quad (4.36)$$

De acordo com a inequação (4.33), o limite da zona desprotegida ocorre quando

$$t_{F2} - t_{F1} = \frac{1}{f_s}. \quad (4.37)$$

Sabendo que a distância percorrida pela onda viajante em um período de amostragem

$(1/f_s)$ é dado por

$$\Delta d = \frac{v}{f_s}, \quad (4.38)$$

então, de acordo com as equações (4.37) e (4.38), o comprimento das zonas desprotegidas em cada terminal da linha é dado por

$$\frac{\Delta d}{2} = \frac{v}{2f_s}, \quad (4.39)$$

já que a onda viajante precisa percorrer a distância entre o ponto de falta e o terminal da linha duas vezes em um período de amostragem. Dessa forma, o comprimento total da zona desprotegida é dado por

$$ZD = 2 \frac{\Delta d}{2} = \Delta d = \frac{v}{f_s}. \quad (4.40)$$

O início da zona protegida, de acordo com a inequação (4.35), ocorre quando

$$t_{F2} - t_{F1} = \frac{2}{f_s}. \quad (4.41)$$

Dessa forma, a zona protegida se inicia em

$$\Delta d = \frac{v}{f_s}, \quad (4.42)$$

e seu comprimento é dado por

$$ZP = l - 2\Delta d = l - \frac{2v}{f_s}. \quad (4.43)$$

Percebe-se, então, a existência de duas zonas posicionadas entre o fim de cada zona desprotegida no terminal da linha e o início da zona protegida. O comprimento de cada uma das zonas de incerteza em cada terminal da linha é dado por

$$\frac{l - (l - 2\Delta d) - 2\frac{\Delta d}{2}}{2} = \frac{\Delta d}{2} = \frac{v}{2f_s}. \quad (4.44)$$

Consequentemente, o comprimento total da zona de incerteza na linha de transmissão é dado por

$$ZI = 2 \frac{\Delta d}{2} = \Delta d = \frac{v}{f_s}, \quad (4.45)$$

Em resumo, de acordo com as equações (4.39)-(4.40) e (4.42)-(4.45), faltas na região $\Delta d \leq d_F \leq l - \Delta d$ são sempre detectadas como internas, enquanto que faltas nas regiões

$0 \leq d_F \leq \frac{\Delta d}{2}$ e $l - \frac{\Delta d}{2} \leq d_F \leq l$ são sempre detectadas como externas. Além disso, para as regiões $\frac{\Delta d}{2} < d_F < \Delta d$ e $l - \Delta d < d_F < l - \frac{\Delta d}{2}$, as faltas podem ser detectadas como internas ou externas, a depender do erro total (ϵ_T).

De forma percentual, com relação ao comprimento total da linha l , as zonas dadas pelas equações (4.40), (4.43) e (4.45) podem ser dadas, respectivamente, por

$$ZD(\%) = \frac{2\frac{\Delta d}{2}}{l} 100\% = \frac{\Delta d}{l} 100\% = \frac{v}{lf_s} 100\%. \quad (4.46)$$

$$ZP(\%) = \frac{l - 2\Delta d}{l} 100\% = \left(1 - \frac{2v}{lf_s}\right) 100\%, \quad (4.47)$$

$$ZI(\%) = \frac{2\frac{\Delta d}{2}}{l} 100\% = \frac{\Delta d}{l} 100\% = \frac{v}{lf_s} 100\%. \quad (4.48)$$

4.4.2 Efeito da Estimação da Velocidade da Onda Viajante

Um problema significativo para esquemas de proteção baseados em ondas viajantes se refere ao erro na estimação da velocidade das ondas viajantes, que depende dos parâmetros da linha de transmissão, que, por sua vez, são estimados com eventuais erros em um sistema real, de forma que o valor exato da velocidade real das ondas viajantes é desconhecido. Dessa forma, a inequação de detecção de faltas internas, em tempo discreto, a partir da inequação (4.27), passa a ser

$$\left\lfloor \frac{lf_s}{v_T} \right\rfloor + 1 \leq \left\lfloor \frac{plf_s}{v_T} \right\rfloor < \left\lfloor \frac{2lf_s}{v_T} \right\rfloor, \quad (4.49)$$

sendo v_T a velocidade estimada da onda viajante.

O erro na estimação da velocidade das ondas viajantes aumenta a possibilidade de erro de atuação no esquema de proteção. Por exemplo, na Figura 4.10 a velocidade estimada das ondas viajantes é maior do que a velocidade real ($v_T > v$). Com isso, a diferença entre as amostras de detecção das frentes de onda ($k_{F2} - k_{F1}$) é maior do que a parcela a esquerda da inequação (4.49), de forma que a proteção não será sensibilizada, a depender do valor de p , mesmo a falta tendo ocorrido na zona protegida (ZP) da linha de transmissão.

De forma semelhante, uma falta externa pode ser detectada como interna caso a velocidade estimada das ondas viajantes seja menor do que a velocidade real ($v_T < v$). Na Figura 4.11 está ilustrada uma falta externa em que a diferença entre as amostras de detecção das frentes de onda ($k_{F2} - k_{F1}$) é menor do que a parcela à direita da inequação (4.49), ou seja, devido ao erro de estimação da velocidade das ondas viajantes a proteção

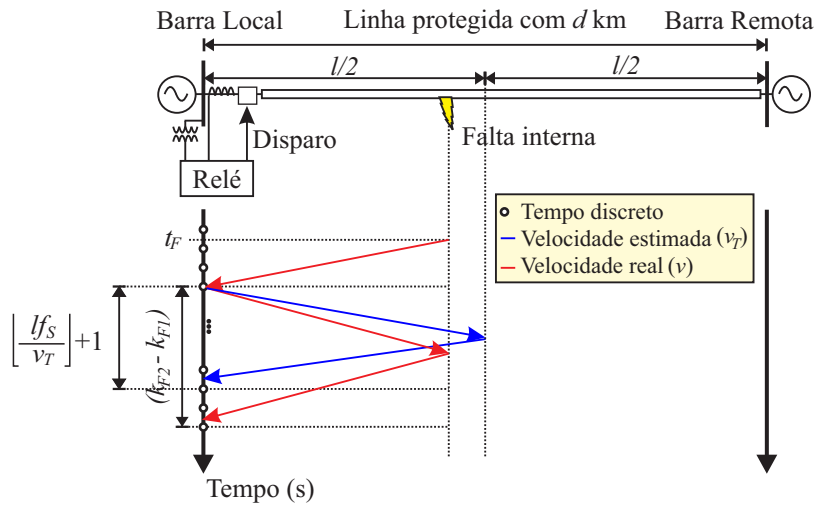


Figura 4.10: Velocidade estimada maior do que a velocidade real das ondas viajantes para uma falha interna.

poderia atuar, a depender do valor de p .

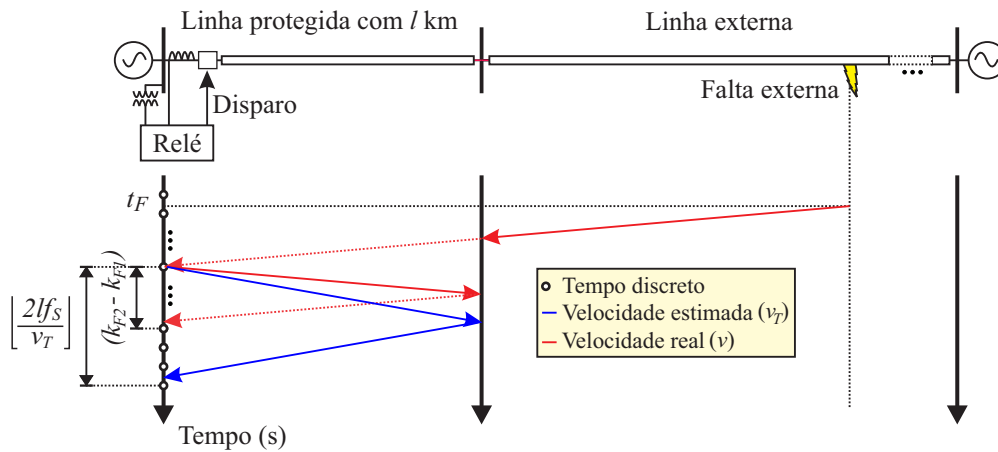


Figura 4.11: Velocidade estimada menor do que a velocidade real das ondas viajantes para uma falha externa.

É válido, para qualquer método de proteção, que um falso gatilho de atuação da proteção deve ser sempre evitado, i.e., é preferível que uma falha interna seja considerada como externa a uma falha externa ser erroneamente detectada como interna. Portanto, conforme discutido, seria mais válido que a estimação da velocidade da onda viajante fosse maior do que a velocidade real, mas nunca menor, de forma que uma falha externa nunca seja detectada como interna, em detrimento ao comprimento da zona protegida e aumento da desprotegida. Apesar de o valor exato da velocidade da onda ser desconhecido, sabe-se

que, para linhas de transmissão de corrente alternada, a velocidade da componente alfa da onda viajante é de aproximadamente 98% do valor da velocidade da luz (c) (ZIMATH et al., 2010), nunca maior. Portanto, ao estimar a velocidade da onda viajante de modo alfa como sendo igual à velocidade da luz, garante-se que o valor estimado será sempre maior do que o real.

4.5 Método Proposto

De acordo com o que foi exposto, é uma boa estratégia estimar a velocidade da onda sempre igual à velocidade da luz, embora seja aceitável estimar uma velocidade mais próxima da real. Ao estimar a velocidade da onda igual à velocidade da luz, não há a necessidade em se conhecer os parâmetros elétricos da linha, normalmente utilizados para se estimar a velocidade da onda. Além disso, constatou-se, por meio de simulações, que, na inequação (4.49), um bom valor prático para p é 1,7, já que resultou em bom desempenho do método em diferenciar faltas internas de externas. Portanto, para uma linha simples, uma falta interna será detectada se

$$k_{f2} - k_{f1} \leq \left\lfloor \frac{1,7l f_s}{c} \right\rfloor, \quad (4.50)$$

Uma falta externa, i.e., em um dos terminais da linha, será detectada se

$$k_{f2} - k_{f1} > \left\lfloor \frac{1,7l f_s}{c} \right\rfloor, \quad (4.51)$$

e, de acordo com a inequação (4.28), se

$$k_{f2} - k_{f1} \leq 1. \quad (4.52)$$

4.6 Síntese do Capítulo

Neste capítulo apresentou-se uma discussão sobre as reflexões das ondas viajantes, nos pontos de singularidade, vistas a partir de um terminal. Foram apresentadas as principais dificuldades identificadas para a correta detecção da onda refletida no ponto de falta. Um método de proteção discretizada de linhas de transmissão utilizando apenas um terminal, mas dependente de uma técnica de detecção da correta reflexão da onda no ponto de falta, foi proposto. O método é independente dos parâmetros elétricos da linha e da estimação da velocidade da onda viajante. Além de levar em consideração os efeitos da

frequência de amostragem.

Capítulo 5

Proteção de Linhas de Transmissão Proposta Baseada em Ondas Viajantes Modais Utilizando um Terminal

Neste capítulo, propõe-se um método de proteção de linhas de transmissão baseado em ondas viajantes modais, utilizando um terminal. O método desenvolvido necessita apenas da primeira frente de onda, evitando assim a problemática da correta detecção da onda refletida no ponto de falta, entretanto, é válido apenas para faltas envolvendo a terra e é dependente de um gatilho de proteção direcional de falta.

5.1 Visão Geral do Esquema de Proteção

Na Figura 5.1 ilustra-se, em um diagrama de Lattice, os instantes discretos de chegada das componentes modais alfa e zero da primeira frente de onda, induzida por uma falta envolvendo a terra, a uma distância d_F da barra L e $l - d_F$ da barra R , para uma linha de comprimento l . O instante de incidência de falta, no nocal de falta, é representado por t_F . Considerando que a onda viajante de modo aéreo é mais rápida do que a de modo terra ($v_A > v_Z$) (LIU et al., 2012), essa irá alcançar a barra local antes que aquela, como ilustrado na Figura 5.1.

O relé, posicionado na barra L , amostra os sinais de corrente a uma frequência fixa de amostragem f_s , portanto, os instantes de chegada das frentes de onda modais no domínio de tempo contínuo (t_A e t_Z) são desconhecidos e substituídos pelos respectivos instantes discretos (k_A/f_s e k_Z/f_s). Os instantes discretos de chegada das frentes de onda no terminal monitorado podem ser detectados com alta precisão por diversos métodos digitais de filtragem de alta frequência (COSTA et al., 2010; COSTA, 2014; NAMDARI; SALEHI, 2017). Neste trabalho, portanto, assume-se que os instantes discretos de detecção das frentes de onda são conhecidos e nenhum método de detecção será investigado.

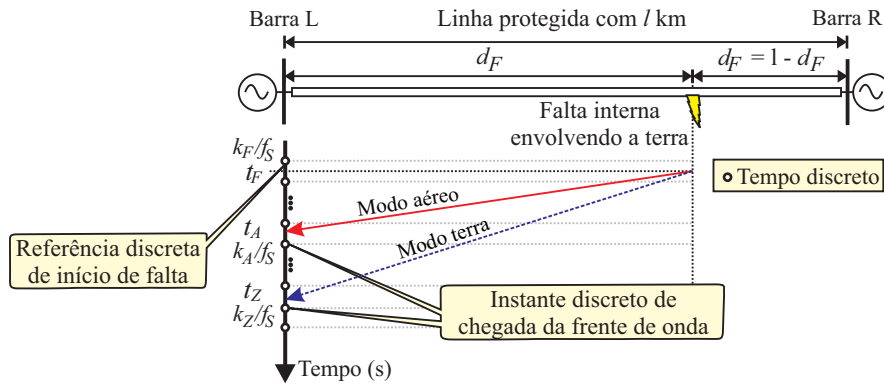


Figura 5.1: Instantes discretos de detecção das componentes modais da frente de onda.

5.2 Direcionalidade de Falta

A direcionalidade da falta tem sido investigada já a partir dos primeiros trabalhos publicados de métodos de proteção de linhas de transmissão baseados em ondas viajantes. Chamia e Liberman (1978) propuseram um método de proteção capaz de detectar a direcionalidade da falta a partir das polaridades da primeira frente de onda dos sinais de tensão e corrente. Demonstrou-se que, quando a falta ocorre à frente do ponto de medição, as polaridades das ondas de tensão e corrente são opostas, já quando a falta está posicionada em sentido oposto, as polaridades são iguais, como segue

$$\Delta v \Delta i < 0 \quad \text{Falta à frente,} \quad (5.1)$$

$$\Delta v \Delta i > 0 \quad \text{Falta reversa,} \quad (5.2)$$

em que, Δv é a polaridade da onda no sinal de tensão; Δi é a polaridade da onda no sinal de corrente.

Um grande limitante para a aplicação prática desse método é a comum utilização do CCVT como equipamento de medição do sinal de tensão para sistemas acima de 69 kV. O CCVT possui pobre resposta em frequência para sinais de alta frequência, como as ondas viajantes, de forma que, a princípio, inviabilizaria a aplicação do método de proteção direcional baseado em ondas viajantes para altas frequências de amostragem. Uma solução possível para o problema seria a utilização de transdutores óticos, pois possuem excelente resposta em frequência. No entanto, tais medidores ainda não são comuns nos sistemas elétricos de potência, ainda menos nos brasileiros, e possuem custo ainda elevado quando comparados aos tradicionais CCVTs.

Chen et al. (2003) desenvolveram um método de proteção direcional baseado nas polaridades das ondas viajantes dos sinais de tensão e corrente utilizando transformada *wa-*

velet. Os autores investigaram a influência do CCVT na medição dos transitórios de alta frequência e evidenciaram que, apesar de o CCVT apresentar erros na medição dos instantes de chegada das ondas viajantes, suas polaridades eram mantidas, mesmo a uma frequência de amostragem de 100 kHz. Dong et al. (2005) também investigaram a influência do uso do CCVT na medição das ondas viajantes e concluíram ser possível detectar a polaridade da primeira frente de onda utilizando transformada *wavelet* e uma frequência de amostragem de 400 kHz, no entanto, para as frentes de onda seguintes, não seria possível realizar tal detecção de forma confiável.

Tais métodos de um terminal não são capazes de diferenciar faltas internas de externas quando possuem mesma direcionalidade. Dessa forma, esses métodos de proteção direcional baseados em ondas viajantes devem ser utilizados como habilitadores da atuação do método de proteção baseado em ondas modais aqui proposto.

5.3 Domínio de Tempo Contínuo

As diferenças de tempo entre o instante de incidência de falta t_F e os instantes de chegada das ondas viajantes modais na barra L (t_A e t_Z) dependem das velocidades das ondas modais e da distância entre o ponto de falta e a barra L, como segue:

$$\tau_A(d_F) = t_A - t_F = \frac{d_F}{v_A}, \quad (5.3)$$

$$\tau_Z(d_F) = t_Z - t_F = \frac{d_F}{v_Z}, \quad (5.4)$$

ao subtrair as equações, tem-se

$$\tau_Z(d_F) - \tau_A(d_F) = t_Z - t_A = \frac{d_F}{v_Z} - \frac{d_F}{v_A} = m d_F, \quad (5.5)$$

em que

$$m = \left(\frac{v_A - v_Z}{v_A v_Z} \right). \quad (5.6)$$

De forma semelhante, quando uma falta ocorre na barra R, se tratando de uma falta externa, a subtração entre as diferenças será dada por

$$\tau_Z(l) - \tau_A(l) = t_Z - t_A = m l. \quad (5.7)$$

Portanto, uma falta interna será detectada se

$$t_Z(d_F) - t_A(d_F) < m l, \quad (5.8)$$

enquanto que uma falta externa será detectada se

$$t_Z(d_F) - t_A(d_F) \geq ml. \quad (5.9)$$

5.4 Domínio de Tempo Discreto

Devido ao processo de amostragem, o instante de incidência de falta t_F e os instantes de chegada das ondas modais na barra L (t_A e t_Z) são desconhecidos. Portanto, esses instantes precisam ser convertidos para o domínio de tempo discreto. O instante discreto de incidência de falta k_F/f_S , que passa a ser o instante de referência, é dado por

$$\frac{k_F}{f_S} = \frac{\lfloor t_F f_S \rfloor}{f_S} \Rightarrow t_F - \frac{1}{f_S} < \frac{k_F}{f_S} \leq t_F, \quad (5.10)$$

enquanto que os instantes discretos de chegada das frentes de onda modais são dados por

$$\frac{k_A}{f_S} = \frac{\lfloor t_A f_S \rfloor}{f_S} + \frac{1}{f_S} \Rightarrow t_A < \frac{k_A}{f_S} \leq t_A + \frac{1}{f_S}, \quad (5.11)$$

$$\frac{k_Z}{f_S} = \frac{\lfloor t_Z f_S \rfloor}{f_S} + \frac{1}{f_S} \Rightarrow t_Z < \frac{k_Z}{f_S} \leq t_Z + \frac{1}{f_S}. \quad (5.12)$$

O erro associado ao instante discreto de incidência de falta é dado por

$$\varepsilon_F = t_F - \frac{k_F}{f_S} \Rightarrow 0 \leq \varepsilon_F < \frac{1}{f_S}, \quad (5.13)$$

já os erros associados aos instantes discretos das primeiras frentes de onda modais a se chocarem com a barra local são dados por:

$$\varepsilon_A = \frac{k_A}{f_S} - t_A \Rightarrow 0 \leq \varepsilon_A < \frac{1}{f_S}, \quad (5.14)$$

$$\varepsilon_Z = \frac{k_Z}{f_S} - t_Z \Rightarrow 0 \leq \varepsilon_Z < \frac{1}{f_S}. \quad (5.15)$$

Os erros totais (ε_{FA} e ε_{FZ}) são assumidos como sendo a soma entre os erros relacionados aos instantes discretos em que as ondas modais atingem a barra local (ε_A e ε_Z) e o erro associado ao instante discreto de incidência de falta (ε_F), dados por:

$$\varepsilon_{FA} = \varepsilon_A + \varepsilon_F = \frac{k_A - k_F}{f_S} - (t_A - t_F) \Rightarrow 0 \leq \varepsilon_{FA} < \frac{2}{f_S}, \quad (5.16)$$

$$\varepsilon_{FZ} = \varepsilon_Z + \varepsilon_F = \frac{k_Z - k_F}{f_S} - (t_Z - t_F) \Rightarrow 0 \leq \varepsilon_{FZ} < \frac{2}{f_S}. \quad (5.17)$$

Os tempos gastos pelas ondas viajantes modais para cruzarem a linha de transmissão do ponto de falta à barra local, tomando como referência o instante discreto de incidência de falta, são dados por

$$t_A - t_F = \left(\frac{k_A}{f_S} - \varepsilon_A \right) - \left(\varepsilon_F - \frac{k_F}{f_S} \right) = \frac{k_A - k_F}{f_S} - (\varepsilon_A + \varepsilon_F) = \frac{k_A - k_F}{f_S} - \varepsilon_{FA}, \quad (5.18)$$

$$t_Z - t_F = \left(\frac{k_Z}{f_S} - \varepsilon_Z \right) - \left(\varepsilon_F - \frac{k_F}{f_S} \right) = \frac{k_Z - k_F}{f_S} - (\varepsilon_Z + \varepsilon_F) = \frac{k_Z - k_F}{f_S} - \varepsilon_{FZ}. \quad (5.19)$$

A partir das equações (5.3), (5.4), (5.18) e (5.19), para uma falta na barra remota, a quantidade de amostras entre o instante discreto de incidência de falta e o instante discreto de chegada da onda no terminal local, para cada componente modal, é dado por

$$\frac{l}{v_A} = \frac{k_A - k_F}{f_S} - \varepsilon_{FA} \Rightarrow k_A - k_F = \left(\frac{l}{v_A} + \varepsilon_{FA} \right) f_S, \quad (5.20)$$

$$\frac{l}{v_Z} = \frac{k_Z - k_F}{f_S} - \varepsilon_{FZ} \Rightarrow k_Z - k_F = \left(\frac{l}{v_Z} + \varepsilon_{FZ} \right) f_S, \quad (5.21)$$

portanto

$$\begin{aligned} (k_Z - k_F) - (k_A - k_F) &= \left(\frac{l}{v_Z} + \varepsilon_Z + \varepsilon_F \right) f_S - \left(\frac{l}{v_A} + \varepsilon_A + \varepsilon_F \right) f_S \Rightarrow \\ &\Rightarrow k_Z - k_A = l f_S \left(\frac{v_A - v_Z}{v_A v_Z} \right) + (\varepsilon_Z - \varepsilon_A) f_S. \end{aligned} \quad (5.22)$$

Sabendo que $0 \leq \varepsilon_A < 1/f_S$ e $0 \leq \varepsilon_Z < 1/f_S$ o limite inferior da equação (5.22) é

$$k_Z - k_A > l f_S m - 1, \quad (5.23)$$

ao passo que o limite superior é

$$k_Z - k_A < l f_S m + 1. \quad (5.24)$$

Sendo assim, para garantir que uma falta interna nunca seja confundida com uma externa, a detecção de falta interna ocorrerá quando

$$k_Z - k_A \leq l f_S m - 1. \quad (5.25)$$

Levando em consideração que $(k_Z - k_A) \in \mathbb{N}$, as inequações (5.23)-(5.25) se tornam,

respectivamente:

$$k_Z - k_A \geq \lfloor l f_{sm} \rfloor, \quad (5.26)$$

$$k_Z - k_A \leq \lfloor l f_{sm} \rfloor + 1, \quad (5.27)$$

$$k_Z - k_A < \lfloor l f_{sm} \rfloor. \quad (5.28)$$

5.4.1 As Zonas Protegida, Desprotegida e de Incerteza

É necessário garantir que a diferença entre as amostras correspondentes aos instantes discretos de chegada das ondas modais da primeira frente de onda ($k_Z - k_A$), para uma falta interna, seja sempre menor do que a diferença para uma falta na barra remota, de forma a evitar uma má operação da proteção. Portanto, é necessário identificar a máxima distância de falta interna em que a máxima diferença entre as amostras seja sempre menor que a mínima diferença de amostras para uma falta na barra remota. Considerando que os erros são desconhecidos e levando em consideração os seus limites, a partir das inequações (5.23)-(5.25), a máxima distância de falta em que todas as faltas serão detectadas como internas é dada por

$$d_F f_{sm} + 1 \leq l f_{sm} - 1 \Rightarrow d_F \leq \frac{l f_{sm} - 2}{f_{sm}} \Rightarrow d_F \leq l - \frac{2}{f_{sm}}. \quad (5.29)$$

Da mesma forma, existe uma distância de falta em que a mínima diferença de amostras seja sempre igual ou maior do que a mínima diferença de amostras para uma falta na barra remota, i.e., a distância de falta a partir da qual todas as faltas serão sempre detectadas como externas, e é dada por

$$d_F f_{sm} - 1 \geq l f_{sm} - 1 \Rightarrow d_F \geq l, \quad (5.30)$$

o que significa que, considerando que os erros podem assumir quaisquer valores entre seus limites inferior e superior, uma falta a partir da barra R, com distância l da barra L, em diante será sempre detectada como externa.

A zona protegida, onde todas as faltas serão detectadas como internas, é dada por

$$0 \leq ZP \leq l - \frac{2}{f_{sm}}, \quad (5.31)$$

enquanto que a zona de incerteza, onde as faltas podem ser detectadas como internas ou

externas a depender dos erros, que são valores desconhecidos, é dada por

$$l - \frac{2}{f_{sm}} < ZI < l, \quad (5.32)$$

consequentemente, a zona desprotegida é apenas um ponto na linha, distanciado de l da barra local, i.e., um ponto na barra R.

Percentualmente

$$ZP(\%) = \left(\frac{\max(ZP)}{l} \right) 100\% = \left(1 - \frac{2}{lf_{sm}} \right) 100\%, \quad (5.33)$$

$$ZI(\%) = \left(\frac{l - \max(ZP)}{l} \right) 100\% = \left(\frac{2}{lf_{sm}} \right) 100\%. \quad (5.34)$$

5.4.2 O Efeito dos Erros nas Zonas

De acordo com as equações (5.3) e (5.4) e as inequações (5.14) e (5.15), para uma falta na barra R, o erro total dado pela diferença entre os erros da primeira frente de onda das ondas modais é dado por

$$\begin{aligned} \epsilon_T = \epsilon_Z - \epsilon_A &= \left(\frac{k_Z}{f_S} - \frac{l}{v_Z} + t_F \right) - \left(\frac{k_A}{f_S} - \frac{l}{v_A} + t_F \right) = \\ &= \frac{k_Z - k_A}{f_S} + \frac{l}{v_A} - \frac{l}{v_Z} = \frac{k_Z - k_A}{f_S} - ml, \end{aligned} \quad (5.35)$$

em que $k_Z - k_A$ pode assumir dois valores diferentes, dados pelas inequações (5.26) e (5.27). Consequentemente, o mínimo valor para o erro total, para uma falta na barra remota, é dado por

$$\min(\epsilon_T) = \frac{\lfloor lf_{sm} \rfloor}{f_S} - ml, \quad (5.36)$$

enquanto que o máximo valor é dado por

$$\max(\epsilon_T) = \frac{\lfloor lf_{sm} \rfloor + 1}{f_S} - ml. \quad (5.37)$$

As equações (5.29) e (5.30) foram desenvolvidas considerando que o erro total (ϵ_T) assume quaisquer valores entre $-1/f_S$ e $1/f_S$. No entanto, as equações (5.36) e (5.37) possibilitam uma análise mais precisa, uma vez que estabelece que o erro total para uma falta na barra remota pode assumir apenas dois valores possível, que não são necessariamente iguais a $-1/f_S$ ou $1/f_S$.

A partir das equações (5.22), (5.36) e (5.37), os limites das zonas podem ser mais pre-

cisamente calculados reescrevendo as inequações (5.29) e (5.30) respectivamente como

$$d_F f_S m + (\epsilon_Z(d_F) - \epsilon_A(d_F)) f_S \leq l f_S m + \min(\epsilon_T(l)) f_S - 1 \Rightarrow d_F \leq l + \frac{\min(\epsilon_T(l)) f_S - 1}{f_S m}, \quad (5.38)$$

$$d_F \leq l + \frac{\max(\epsilon_T(l)) f_S - 1}{f_S m}. \quad (5.39)$$

Portanto, a zona protegida é mais precisamente dada por

$$0 \leq ZP \leq l + \frac{\min(\epsilon_T(l)) f_S - 1}{f_S m}, \quad (5.40)$$

da mesma forma, o comprimento da zona desprotegida é dado por

$$l + \frac{\max(\epsilon_T(l)) f_S - 1}{f_S m} < ZD \leq l, \quad (5.41)$$

consequentemente, a zona de incerteza depende do erro de incidência de falta ϵ_F , e seu comprimento é dado por

$$\frac{\min(\epsilon_T(l)) f_S - 1}{f_S m} < ZI \leq l + \frac{\max(\epsilon_T(l)) f_S - 1}{f_S m}. \quad (5.42)$$

Percentualmente:

$$ZP(\%) = \left(\frac{\max(ZP)}{l} \right) 100\% = \left(1 + \frac{\min(\epsilon_T(l)) f_S - 1}{l f_S m} \right) 100\%, \quad (5.43)$$

$$ZD(\%) = \left(\frac{l - \max(ZD)}{l} \right) 100\% = - \left(\frac{\max(\epsilon_T(l)) f_S - 1}{l f_S m} \right) 100\%, \quad (5.44)$$

$$\begin{aligned} ZI(\%) &= \left(\frac{\min(ZD) - \max(ZP)}{l} \right) 100\% = \\ &= \left(\frac{\left(l + \frac{\max(\epsilon_T(l)) f_S - 1}{f_S m} \right) - \left(l + \frac{\min(\epsilon_T(l)) f_S - 1}{f_S m} \right)}{l} \right) 100\% = \\ &= \left(\frac{\max(\epsilon_T) f_S - \min(\epsilon_T) f_S}{l f_S m} \right) 100\% = \left(\frac{\max(\epsilon_T) - \min(\epsilon_T)}{l m} \right) 100\% = \\ &= \left(\frac{\left(\frac{\lfloor l f_S m \rfloor + 1}{f_S} - m l \right) - \left(\frac{\lfloor l f_S m \rfloor}{f_S} - m l \right)}{m l} \right) 100\% = \left(\frac{1}{l f_S m} \right) 100\%. \end{aligned} \quad (5.45)$$

5.4.3 O Efeito da Estimação da Velocidade da Onda Viajante

A real velocidade da onda viajante é um valor desconhecido, sendo necessária sua estimação. Uma vez que a confiabilidade da proteção depende da correta estimação da velocidade da onda viajante, então um erro na estimação da velocidade da onda pode acarretar na má operação da proteção. Ilustra-se, na Figura 5.2, os instantes discretos de chegada das ondas viajantes modais na barra local. As ondas viajantes representadas por linhas reproduzem as ondas cujas estimações de velocidade correspondem aos valores reais, ao passo que as ondas representadas pelas áreas sombreadas reproduzem as ondas cujas velocidades estimadas diferem do valor correto.

Conforme a Figura 5.2, quando a velocidade estimada da onda viajante é maior do que o valor real, o instante discreto esperado para a chegada da onda é menor do que o instante discreto correto de chegada da onda viajante, que de fato irá ocorrer no sistema. O oposto ocorre quando a velocidade estimada é menor que a real. Portanto, se a velocidade estimada da onda viajante de modo alfa for maior do que o valor real e a velocidade estimada da onda viajante de modo terra for menor do que a real, então o valor esperado de $(k_Z - k_A)/f_S$ pode ser maior do que o valor aquisitado pelo relé, situação em que o relé irá interpretar que a falta ocorreu a uma distância da barra local menor que a distância real. Essa situação pode permitir que o valor estimado de $(k_Z - k_A)/f_S$ para uma falta na barra remota seja maior do que o valor real. Portanto, caso esse cenário ocorra, uma falta na barra remota será sempre detectada como interna, assim como algumas faltas mais distantes da barra remota também o serão.

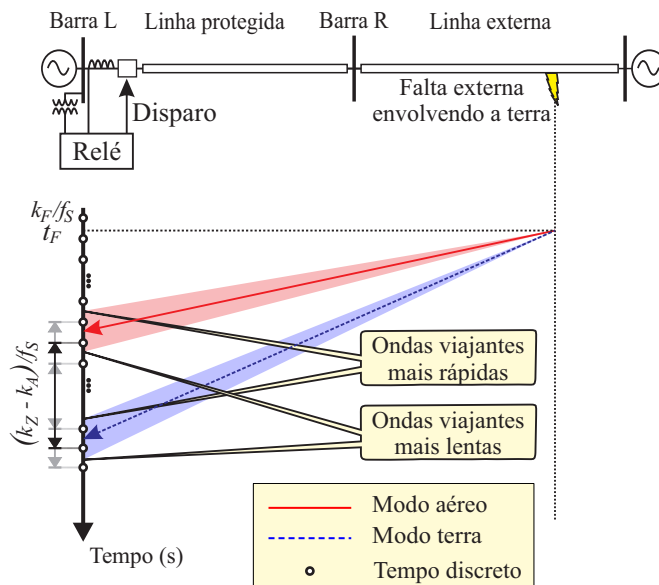


Figura 5.2: Erro na estimação da velocidade da onda viajante.

De acordo com o que foi supra discutido, quando a estimação de velocidade das ondas viajantes modais proporciona um valor esperado para $(k_Z - k_A)/f_S$ maior do que o real, poderá existir algumas faltas externas detectadas como internas, situação que deverá ser sempre evitada. Sendo assim, de forma a evitar que faltas externas sejam detectadas como internas, a estimação de velocidade das viajantes modais precisam proporcionar um valor para $(k_Z - k_A)/f_S$ sempre menor do que o valor real. Ainda analisando a Figura 5.2, conclui-se que ao estimar a velocidade da onda viajante de modo terra maior do que o valor real, as chances de uma falta externa ser detectada como interna decairão, enquanto que ao estimar a velocidade da onda viajante de modo alfa maior do que o valor real, as chances dessa má operação da proteção serão incrementadas. Como a velocidade da onda viajante de modo alfa, para linhas de transmissão de corrente alternada, é de aproximadamente 98% do valor da velocidade da luz (ZIMATH et al., 2010), nunca maior - possibilitando que uma sobrestimação da velocidade da onda de modo alfa tenha sempre uma margem pequena - e considerando que a velocidade da onda viajante de modo terra varia bastante (JIAN et al., 1999), então uma boa consideração prática é sobrestimar a velocidade da onda viajante de modo terra em $j\%$ do valor inicialmente estimado, o que é recomendável neste trabalho. Essa consideração evitará falsos gatilhos da proteção, contudo, diminuirá a zona protegida e aumentará a zona desprotegida. Dessa forma, ao seguir tal recomendação, a inequação (5.28) de detecção de falta interna passa a ser

$$k_Z - k_A < \lfloor l f_S m' \rfloor, \quad (5.46)$$

em que

$$m' = \frac{v_A - (\frac{j}{100} + 1)v_Z}{(\frac{j}{100} + 1)v_A v_Z}. \quad (5.47)$$

5.5 Alcance da Proteção em Função de uma Frequência Mínima de Amostragem

É possível definir uma frequência mínima de amostragem de forma a garantir que o método proteja a linha até uma determinada porcentagem de sua extensão (P_l). A partir da equação (5.43), tem-se que

$$\begin{aligned} P_l &= \left(1 + \frac{\min(\epsilon_T) f_S - 1}{l f_S m}\right) 100 \Rightarrow \left(\frac{P_l}{100} - 1\right) l f_S m = \min(\epsilon_T) f_S - 1 \Rightarrow \\ &\Rightarrow f_S \left(\min(\epsilon_T) - \left(\frac{P_l}{100} - 1\right) l m\right) = 1 \Rightarrow f_S = \frac{100}{100 \min(\epsilon_T) - (P_l - 100) l m}. \end{aligned} \quad (5.48)$$

Apesar da equação (5.48) definir um valor exato da frequência de amostragem em que a proteção irá atuar corretamente até $P_l\%$ da linha de transmissão, sua solução não é trivial, uma vez que $\min(\varepsilon_T)$ é dependente de f_S . Além disso, o cálculo exato de $\min(\varepsilon_T)$ depende da correta estimação das velocidades das ondas, e pequenos erros em sua estimação poderiam resultar em grandes erros no cálculo da frequência de amostragem, o que seria um problema prático para o método. Contudo, é possível calcular um valor para a frequência mínima de amostragem que assegure que mais de $P_l\%$ da linha seja sempre protegida. A partir da equação (5.34), é possível extrapolar o valor da frequência mínima de amostragem, uma vez que sua formulação considera que o erro total (ε_T) assume quaisquer valores entre $-1/f_S$ e $1/f_S$. Dessa forma, tem-se que

$$P_l = \left(1 - \frac{2}{lf_{Sm}}\right) 100 \Rightarrow \frac{lf_{Sm}}{2} = \frac{100}{100 - P_l} \Rightarrow f_S = \frac{200}{(100 - P_l)lm}. \quad (5.49)$$

Conforme discutido no subcapítulo 5.4.3, uma consideração prática para incrementar a confiabilidade do método é sobrestimar a velocidade da onda de modo terra em $j\%$, o que deve aumentar a confiabilidade do método em detrimento do comprimento da zona protegida. Apesar disso, ainda é possível calcular qual o novo percentual do comprimento mínimo da linha que a proteção será capaz de proteger, para tanto, deve-se observar que a máxima distância de falta que estará na nova zona protegida, menor do que a original, deverá apresentar diferença máxima entre as amostras de detecção das ondas modais menor do que a diferença mínima esperada para uma falta na barra, considerando o valor sobrestimado da onda de modo terra. A partir da inequação (5.29), tem-se que

$$d_F f_{Sm} + 1 \leq lf_{Sm}' - 1 \Rightarrow d_F f_{Sm} \leq d_F f_{Sm}' - 2 \Rightarrow d_F \leq l \frac{m'}{m} - \frac{2}{f_{Sm}}, \quad (5.50)$$

em que, quando f_S tende a infinito, a máxima distância de falta em que o método sempre detectará como falta interna é dada por

$$d_F = l \frac{m'}{m}, \quad (5.51)$$

de forma que a distância de falta dada pela inequação (5.50) nunca poderá ser maior do que a dada pela equação (5.51).

Em valores percentuais, o alcance da proteção em função da frequência de amostragem, a partir da inequação (5.50), é dado por

$$P_l \leq \left(\frac{m'}{m} - \frac{2}{lf_{Sm}}\right) 100(\%), \quad (5.52)$$

ao passo que a máxima distância possível de falta dentro da zona protegida, considerando uma frequência de amostragem infinita, a partir da equação (5.51), é dada por

$$P_{lmax} = \left(\frac{m'}{m} \right) 100(\%). \quad (5.53)$$

O valor do alcance da proteção dado pela inequação (5.51) é, na verdade, menor do que o valor exato, uma vez que foi calculado levando-se em consideração que o erro total para uma falta no terminal remoto assumi quaisquer valores entre seus limites inferior e superior ($1/f_S < \varepsilon_T < 1/f_S$), o que não é necessariamente verdade, conforme discutido no subcapítulo 5.4.2.

A partir da equação (5.53), é possível calcular o valor de m' em função do máximo alcance teórico da proteção, como segue

$$m' = \left(\frac{m P_{lmax}}{100} \right). \quad (5.54)$$

A partir da equação (5.54) e da inequação (5.52), é possível calcular uma frequência mínima de amostragem que garanta que, no mínimo, $P_l\%$ da linha de transmissão estará sob o alcance da proteção, considerando que $P_l < P_{lmax}$, como segue

$$\begin{aligned} P_l \geq \left(\frac{\frac{m P_{lmax}}{100}}{m} - \frac{2}{l f_S m} \right) 100(\%) &\Rightarrow \frac{2}{l f_S m} \geq \frac{P_{lmax} - P_l}{100} \Rightarrow \\ &\Rightarrow l f_S m \geq \frac{200}{P_{lmax} - P_l} \Rightarrow f_S \geq \frac{200}{(P_{lmax} - P_l) l m}. \end{aligned} \quad (5.55)$$

Conforme a equação (5.55), é possível definir uma frequência de amostragem em que, no mínimo, $P_l\%$ da linha seja protegida, mesmo com uma sobrestimação da velocidade da onda de modo terra com o objetivo de tornar a proteção menos propícia à incorreta atuação para faltas externas devido a um erro na estimação inicial das velocidades das ondas. De fato, a partir da inequação (5.55), conclui-se que margens maiores de erro na estimação das velocidades das ondas podem ser consideradas sem que haja prejuízo à zona de proteção da linha de transmissão, uma vez que a frequência mínima de amostragem seja respeitada para a linha em específico e as estimativas iniciais das velocidades das ondas estejam corretas. Dessa forma, evidencia-se que, quanto maior a frequência de amostragem disponível, maior também será a tolerância de erro na estimação das velocidades das ondas modais.

Ressalta-se que as definições dadas pelas inequações (5.52) e (5.55) e pelas equações (5.53) e (5.54) partem do princípio de que as estimativas iniciais das velocidades das

ondas viajantes estão corretas. Estimções iniciais incorretas resultarão em imprecisões nos valores calculados para P_{lmax} , P_l e o valor mínimo para f_s . Contudo, ao se sobrestimar o valor da velocidade da onda de modo terra em relação ao valor inicialmente estimado, conforme discutido no subcapítulo 5.4.3, diminuem-se as chances de faltas externas serem detectadas como internas devido aos erros nas estimções iniciais das velocidades.

5.6 Síntese do Capítulo

Neste capítulo foi proposto um esquema de proteção discretizada de linhas de transmissão baseado em ondas viajantes modais utilizando apenas um terminal. O esquema é válido apenas para faltas envolvendo a terra e foi desenvolvido de forma a evitar a detecção de faltas externas como internas mesmo para certos erros nas estimções das velocidades das ondas modais, desde que uma frequência mínima de amostragem seja respeitada.

Capítulo 6

Resultados

Neste capítulo, será apresentado o sistema de transmissão em que os resultados foram colhidos. Avaliações dos dois métodos propostos com relação às zonas de proteção, mínima frequência de amostragem e tempo de atuação também serão apresentadas.

6.1 Sistema Elétrico Utilizado

Apresenta-se na Figura 6.1 o sistema elétrico utilizado. O sistema contém três linhas de transmissão e está a um nível de tensão base de 500 kV. Há duas configurações de linhas de transmissão, a de tipo 1 e a de tipo 2. A linha de transmissão do tipo 1 foi modelada com base em uma linha de transmissão real do sistema elétrico de potência brasileiro cujos parâmetros são os mesmos publicados por Costa et al. (2017), já a linha do tipo 2 foi modelada com base em uma linha de transmissão real de um sistema da China, cujos dados geométricos se referem ao primeiro tipo de linha descrito por Pathirana et al. (2003). As linhas foram modeladas a partir de parâmetros distribuídos (linhas longas), possibilitando um estudo mais realista das ondas viajantes. Todas as linhas possuem 200 km. Os sinais foram medidos por um relé na barra 2 com o objetivo de proteger a linha entre as barras 2 e 3.

6.2 Configuração de Falta

Os métodos baseados em ondas viajantes apresentados neste trabalho são dependentes de uma precisa detecção dos instantes de chegada das ondas viajantes. Contudo, a avaliação de desempenho de um método de detecção está além do escopo deste trabalho. Dessa forma, os casos críticos de detecção das ondas viajantes, como alta resistência de falta e baixo ângulo de incidência de falta, não foram analisados, possibilitando avaliar exclusivamente o desempenho dos algoritmos de proteção. O detector utilizado foi a

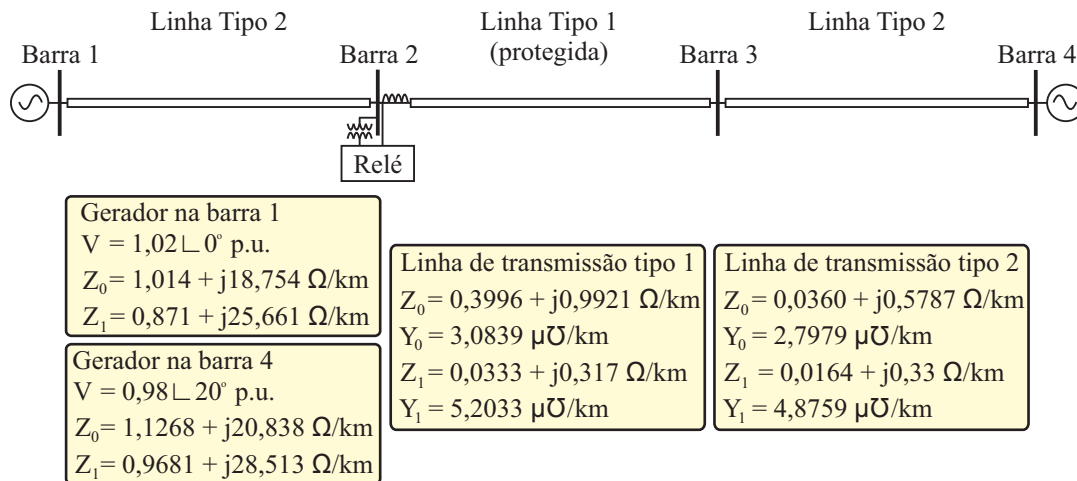


Figura 6.1: Sistema de transmissão de 500 kV.

transformada *wavelet* redundante (COSTA et al., 2010), cuja *wavelet* mãe foi a Daubechies 4, conforme sugerido no mesmo artigo.

As simulações foram realizadas com passo de integração dez vezes maior do que o passo de amostragem. Todas as faltas foram do tipo fase A à terra, a resistência de falta foi fixada em 10Ω e o ângulo de incidência de falta em 90° com relação à tensão da fase A, proporcionando maior incidência de transitórios eletromagnéticos. A transformada de Clarke foi aplicada aos sinais de tensão e corrente, de forma que as ondas viajantes foram detectadas sempre nos sinais de modo alfa ou modo terra.

Todas as avaliações foram realizadas com faltas aplicadas nos terminais da linha e em seu interior, a partir de 5 km da barra local até 195 km, com passo de 5 km, salvos os casos em que, devido ao passo de integração adotado, a plataforma de simulação exigiu que as faltas fossem aplicadas a distâncias maiores dos terminais da linha protegida. As faltas foram aplicadas com instante de incidência t_F assumindo valores aleatórios entre k_F/f_s e $k_F/f_s + 1$ com passo de $(k_F/f_s)/10$ (Figura 5.1), ou seja, o erro de incidência de falta (ϵ_F) assumindo valores aleatórios entre 0 e $0,9/f_s$ com passo de $0,1/f_s$.

Na computação do tempo de atuação de ambos os métodos para a detecção de faltas internas, somou-se o tempo relativo a um período de amostragem, que é tempo mais do que suficiente para o processamento digital do relé e envio do sinal de gatilho para o disjuntor.

6.3 Resultados Relativos à Proteção Baseada na Reflexão

Devido à limitação do método com relação à correta detecção da onda refletida no ponto de falta, todas as faltas nessa seção foram realizadas no interior da linha protegida e em seus terminais.

6.3.1 Mínima Frequência de Amostragem

Das equações (4.46)-(4.48) têm-se as porcentagens das zonas protegida, de incerteza e desprotegida da linha de transmissão em função da frequência de amostragem, do comprimento da linha e da velocidade da onda. Na Figura 6.2(a) está ilustrada a variação da zona protegida em função do comprimento da linha para diferentes frequências de amostragem, enquanto que na Figura 6.2(b) ilustra-se o mesmo parâmetro, mas somado à zona de incerteza. Quanto maior a frequência de amostragem, maiores são as porcentagens dessas zonas. Conforme a Figura 6.2(a), adotando-se 20 kHz de frequência de amostragem, a zona protegida equivalerá a 80% do comprimento da linha para linhas a partir de 150 km, valor tradicionalmente adotado para a proteção de distância. Enquanto que, caso o objetivo seja o de alcançar tal porcentagem ao somar a zona protegida com a de incerteza, para 20 kHz, esse é alcançado para linhas a partir de 75 km. Praticamente 100% da linha pode ser protegida para comprimentos maiores do que 50 km ao se adotar uma frequência de amostragem de 1 MHz. Por outro lado, ao se adotar 2 kHz, não é possível garantir uma zona protegida de 80% para linhas menores que 500 km.

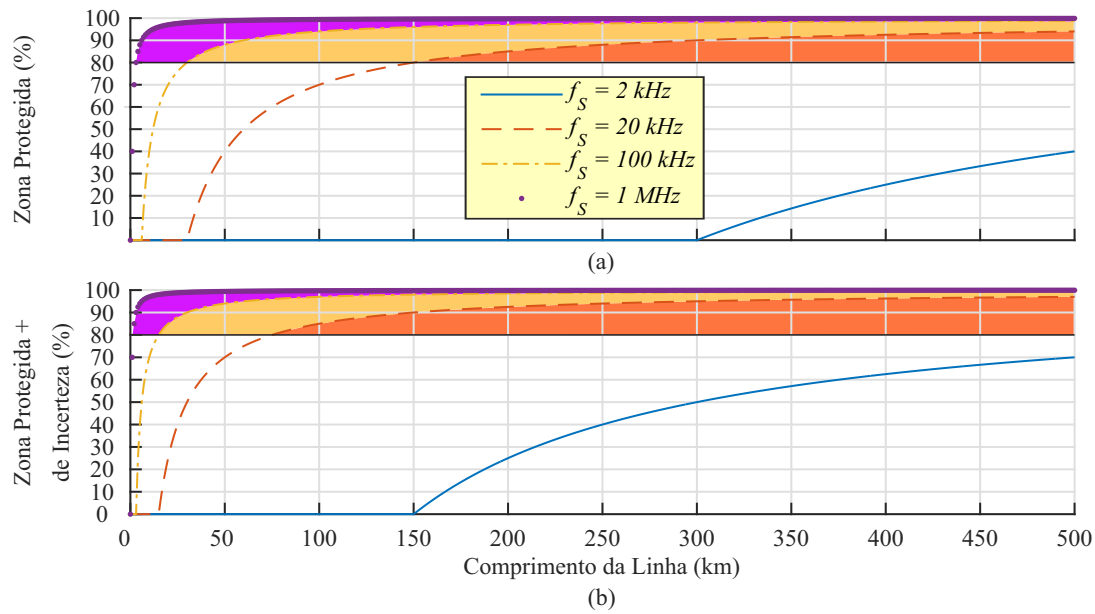


Figura 6.2: Estimação das zonas protegida e de incerteza em função do comprimento da linha para frequências específicas: a) zona protegida; b) zona protegida + de incerteza.

A partir das equações (4.46)-(4.48) é também possível traçar a relação entre a frequência de amostragem e a zona de proteção para determinados comprimentos de linha. Tal relação está ilustrada na Figura 6.3(a) para comprimentos de linha de 50, 200 e 500 km. Na Figura 6.3(b), a mesma relação é representada, mas com a soma entre a zona protegida e a de incerteza. Quanto maior o comprimento da linha, menor a frequência de amostragem necessária para garantir determinadas porcentagens das zonas. Nota-se que para linhas maiores do que 50 km, a zona protegida de 80% é garantida para uma frequência de 60 kHz, ao passo que, caso o objetivo seja de que a zona protegida somada à de incerteza atinja essa porcentagem, a frequência cai a 30 kHz para linhas maiores do que 50 km. Já para uma linha de 200 km, que será mais detalhadamente analisada mais à frente, uma zona protegida de 80% é garantida com uma frequência de amostragem de 15 kHz.

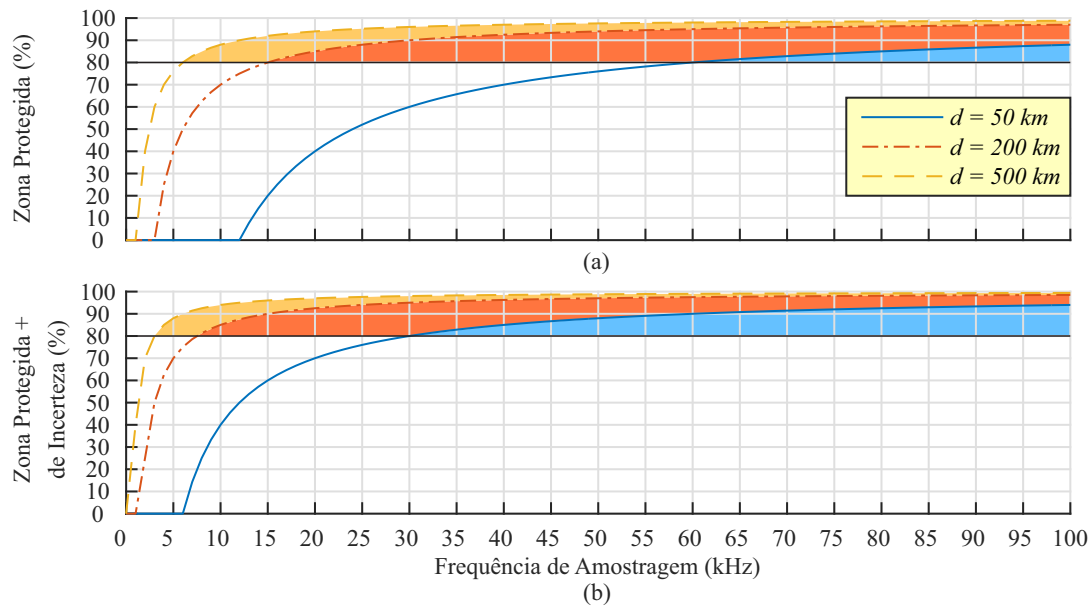


Figura 6.3: Estimação das zonas protegida e de incerteza em função da frequência de amostragem para determinados comprimentos de linha: a) zona protegida; b) zona protegida + de incerteza.

Assim como em Costa et al. (2017) para métodos de dois terminais, este trabalho quebra o paradigma de altas frequências de amostragem para métodos de um terminal caso o objetivo seja proteger uma porcentagem da linha de transmissão. Para se ter uma proteção mais ampla, taxas mais elevadas serão exigidas.

6.3.2 Desempenho do Método

Na Figura 6.4 ilustra-se o desempenho do método para uma frequência de 6 kHz e um comprimento de linha de 200 km. Adotando-se essa frequência de amostragem, a zona protegida da linha é de 50%, as zonas desprotegidas em cada terminal da linha compõem, cada uma, 12,5% da linha, assim como as zonas de incerteza. Conforme previsto matematicamente, nenhuma falta foi detectada como interna nas zonas desprotegidas, enquanto que todas as faltas na zona protegida foram detectadas, assim como algumas nas zonas de incerteza. Portanto, o método apresentou 100% de acerto. O tempo máximo de atuação foi de 1,2 ms e médio de 1,01 ms, muito abaixo do tempo médio de atuação para proteções tradicionais de distância, que atuam após um ciclo de onda do sinal fundamental, que, para 60 Hz, é de 16,67 ms, ou, para casos específicos, como faltas próximas ao terminal local da linha, 8 ms. Já o método de proteção discreta baseado em ondas viajantes de dois terminais proposto por Costa et al. (2017) apresentou tempo de atuação máximo

de 2,85 ms para 4 kHz e 2,5 ms para 20 kHz, ou seja, mais do que o dobro do tempo necessário para o método aqui proposto, evidenciando assim o potencial de métodos de um terminal para uma rápida atuação.

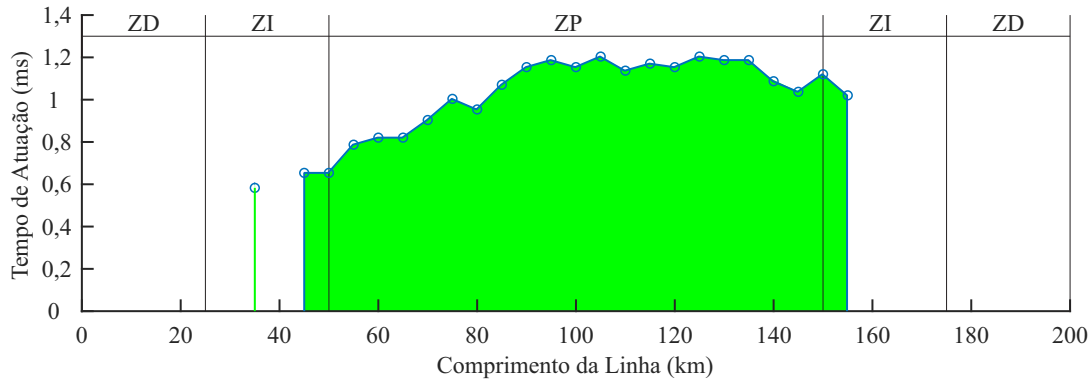


Figura 6.4: Atuação da proteção para uma linha de 200 km e $f_s = 6$ kHz.

Na Figura 6.5, apresenta-se o desempenho do método para uma frequência de amostragem de 15 kHz, que é a frequência a partir da qual 80% da linha de 200 km estará dentro da zona protegida. A proteção atuou corretamente para as faltas dentro da zona de proteção e não foi sensibilizada para nenhuma falta na zona desprotegida ou nos terminais da linha protegida, ou seja, taxa de acerto da proteção em 100%. O tempo máximo de atuação foi de 1,11 ms e médio de 0,806 ms, demonstrando que o tempo de atuação do método é inversamente proporcional ao valor da frequência de amostragem.

Uma taxa de frequência de amostragem de 15360 Hz é comercialmente viável para relés e garante que, pelo menos 80% de uma linha de transmissão de até 200 km seja protegida de forma muito rápida, independente de seus parâmetros elétricos. As faltas muito próximas dos terminais da linha ficariam a cargo das proteções tradicionais, que são eficientes para faltas próximas.

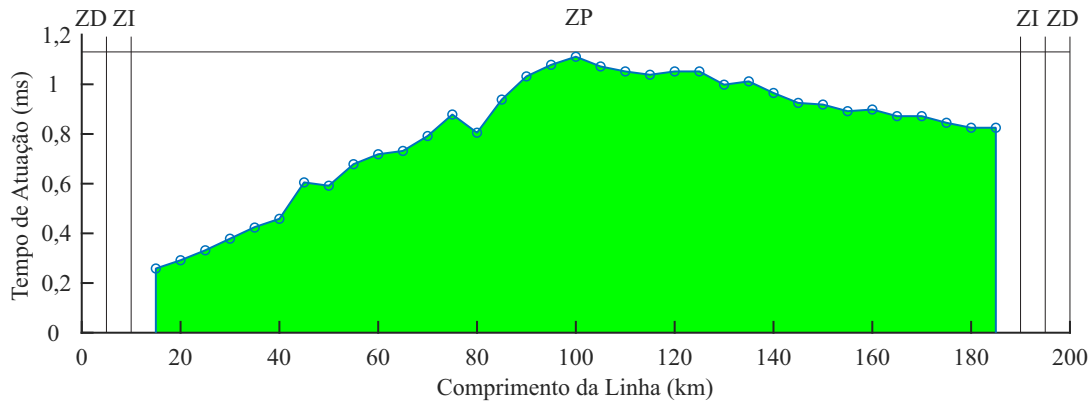


Figura 6.5: Atuação da proteção para uma linha de 200 km e $f_S = 15$ kHz.

Apesar de o método aqui proposto, baseado apenas nos instantes de chegada das ondas viajantes, não ser suficiente para proteger sistemas com linhas adjacentes, informação direcional de falta completaria o método, tornando-o aplicável para qualquer sistema.

6.4 Resultados Relativos à Proteção Modal

Na avaliação do método, não foram aplicadas faltas na linha adjacente à esquerda do terminal local da linha protegida, uma vez que a direcionalidade dessas faltas é oposta à de faltas aplicadas na linha protegida. Sendo assim, a direcionalidade dessas faltas seria detectada por métodos baseados em ondas viajantes já publicados, cabendo ao método aqui proposto distinguir entre faltas internas e externas de mesma direcionalidade.

6.4.1 Frequência Mínima de Amostragem

Conforme demonstrado na inequação (5.55), a frequência mínima de amostragem, para uma determinada linha de transmissão, depende de seu comprimento, das porcentagens desejadas para os alcances mínimo (P_l) e máximo (P_{lmax}) da proteção e das velocidades das ondas viajantes. Na Figura 6.6 apresenta-se, para a linha protegida ilustrada na Figura 6.1, a frequência mínima de amostragem do relé em função da diferença entre o ponto de alcance máximo desejado para a proteção, que é o ponto a partir do qual todas as faltas devem ser detectadas como externas, e o ponto mínimo desejado, que é o ponto limite na linha em que todas as faltas devem ser detectadas como internas. Quanto menor o valor dessa diferença, maior a frequência mínima de amostragem. Além disso, para diferenças maiores do que 10, a frequência mínima de amostragem fica abaixo de 100 kHz.

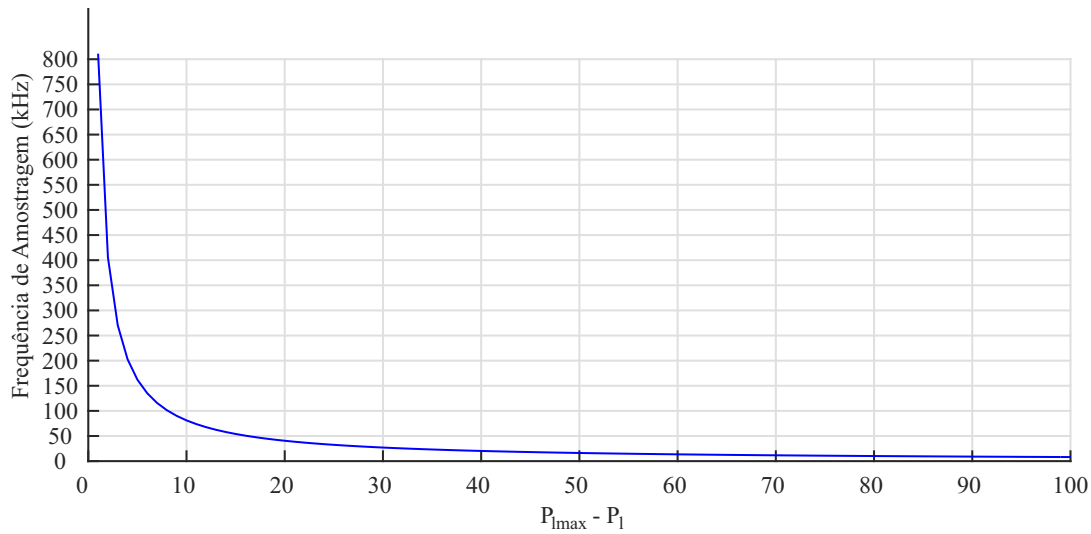


Figura 6.6: Frequência mínima de amostragem em função de $P_{lmax} - P_l$.

6.4.2 Desempenho do Método para Parâmetros Ideais

Na Figura 6.7 apresenta-se o tempo de atuação da proteção em função da distância de falta para faltas aplicadas na linha protegida. O alcance mínimo projetado para a proteção foi de 80% da linha, ou seja, 160 km, e o alcance máximo foi de 90%, que representa 180 km. A região compreendida entre 160 e 180 km é de incerteza. Dessa forma, a frequência mínima dada pela inequação (5.55) foi calculada em 81.1 kHz, frequência essa adotada nas simulações. De acordo com as equações (5.47) e (5.54), $P_{lmax} = 90\%$ equivale a sobrestimar a velocidade da onda de modo terra em, aproximadamente, 2,7% do valor originalmente estimado. Nessa situação, a velocidade da onda de modo terra poderia ser subestimada em, aproximadamente, 2,6% do valor real sem que uma falta externa fosse detectada como interna.

A partir da Figura 6.7, todas as faltas dentro do alcance mínimo desejado para a proteção foram corretamente detectadas, assim como duas faltas dentro da zona de incerteza. Todas as faltas aplicadas na zona desprotegida, após 180 km, foram detectadas como externas. Como a proteção deve detectar se a falta foi interna ou externa após o instante de chegada da onda de modo terra, o tempo de atuação da proteção é bastante dependente da velocidade dessa onda, além disso, maior será quanto maior for a distância de falta em relação ao terminal local. O tempo máximo de atuação da proteção foi de 0,761 ms e médio de 0,376 ms, o que demonstra um desempenho satisfatório do método com relação ao seu tempo de atuação quando comparado com métodos tradicionais ou mesmo com métodos baseados em ondas viajantes de dois terminais. Diversas faltas externas foram aplicadas

na linha adjacente à linha protegida, mas nenhuma delas sensibilizou a proteção.

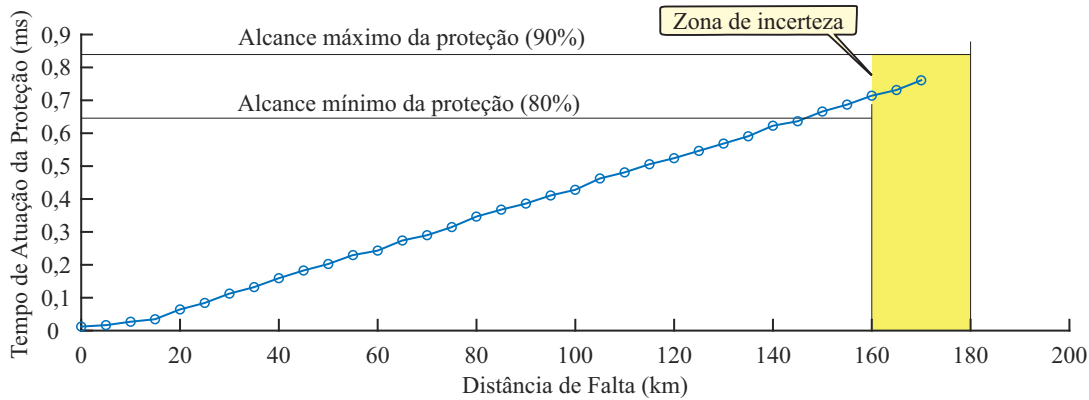


Figura 6.7: Tempo de atuação da proteção em função da distância de falta, para $f_s = 81,1$ kHz.

Conforme discutido no subcapítulo 5.5, a frequência mínima dada pela inequação (5.55) é maior do que a real, uma vez que considera que o erro total (ε_T) pode assumir quaisquer valores entre $-1/f_s$ e $1/f_s$, o que não é necessariamente verdade, mas é uma consideração que precisa ser feita por questões práticas de aplicação do método. Além disso, a definição de um alcance máximo da proteção (P_{lmax}), apesar de incrementar a confiabilidade do método com relação à detecção de faltas externas, exige frequência de amostragem maior, quanto menor for o alcance máximo da proteção.

6.4.3 Desempenho do Método com Variações na Frequência de Amostragem

Na Figura 6.8 ilustra-se o desempenho do método para uma frequência de 30 kHz, abaixo dos 81,1 kHz exigidos para que, no mínimo, 80% da linha esteja na zona protegida. As faltas foram aplicadas entre 120 e 200 km, com passo de 5 km. Para a frequência de amostragem adotada, a inequação (5.55) garante um alcance mínimo da proteção de 63%. De fato, todas as faltas abaixo de 145 km foram corretamente detectadas, enquanto que todas acima de 150 km foram detectadas como externas, o que evidencia que frequências de amostragem abaixo do valor mínimo calculado não garantem que as faltas internas serão corretamente detectadas dentro da zona de alcance desejada para a proteção, que no caso era de 80%. Apesar disso, nenhuma falta além do alcance máximo projetado para a proteção (180 km) foi detectada como interna. Não se têm alterações relevantes nos tempos de atuação da proteção.

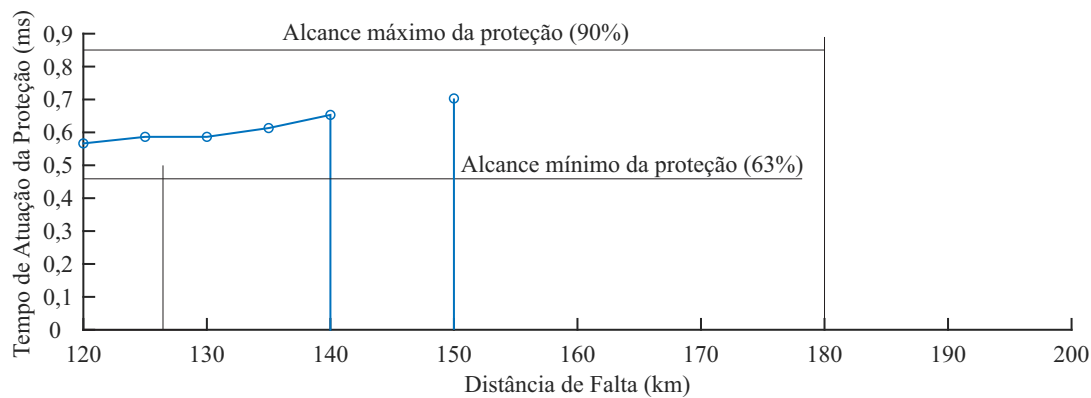


Figura 6.8: Tempo de atuação da proteção em função da distância de falta, para $f_s = 30$ kHz.

Na Figura 6.9 ilustram-se os resultados simulados para uma frequência de amostragem de 200 kHz. Para esse valor de frequência de amostragem, o alcance mínimo calculado para a proteção é de 86% do comprimento da linha, caso as velocidades estimadas das ondas viajantes estejam corretas. O aumento da frequência de amostragem não levou a uma alteração relevante no tempo de atuação da proteção, assim como não aumentou seu alcance máximo, como já era esperado, o que poderia levar à sua sensibilização para faltas externas.

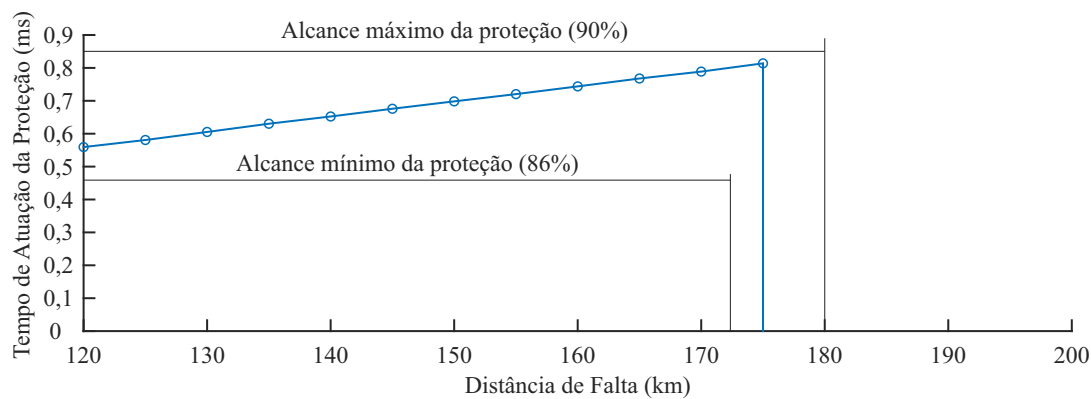


Figura 6.9: Tempo de atuação da proteção em função da distância de falta, para $f_s = 200$ kHz.

6.4.4 Desempenho do Método Considerando Erros na Estimação Inicial da Velocidade

Na Figura 6.10 apresenta-se a atuação da proteção quando há uma subestimação da velocidade da onda viajante de modo terra. Na linha protegida, a velocidade real da onda de modo aéreo é de $0,9785c$, a de modo terra é de $0,7184c$. A velocidade da onda de modo terra foi subestimada em 2,5% de seu valor real, ou seja, a estimativa foi de $0,7005c$. Esse valor se encontra muito próximo do limite da margem da erro para uma subestimação da velocidade da onda de modo terra, que é de, no mínimo, aproximadamente 2,6%, sem que uma falta externa seja detectada como interna. De acordo com a inequação (5.55), para os valores estimados das velocidades das ondas modais, a frequência mínima que garante 80% da linha dentro do alcance mínimo da proteção e, a partir de 90% de seu comprimento, que todas as faltas sejam detectadas como externas, é de 74 kHz, frequência essa adotada nos resultados apresentados na Figura 6.10.

De acordo com a Figura 6.10, todas as faltas aplicadas abaixo de 190 km foram detectadas como internas, enquanto que todas as demais foram detectadas como externas. Nenhuma falta aplicada na linha adjacente foi detectada como interna. O limite do alcance máximo estipulado para a atuação da proteção (180 km) foi extrapolado, o que é uma consequência da subestimação da velocidade da onda de modo terra. Apesar dessa extrapolação, o procedimento de sobrestimar a velocidade da onda de modo terra em, aproximadamente, 2,7% de seu valor originalmente estimado, sobrestimação essa que ocorre ao se considerar $P_{lmax} = 90\%$, conforme demonstrado pelas equações (5.47), (5.53) e (5.54), garantiu que todas as faltas internas detectadas estivessem estritamente no interior da linha protegida.

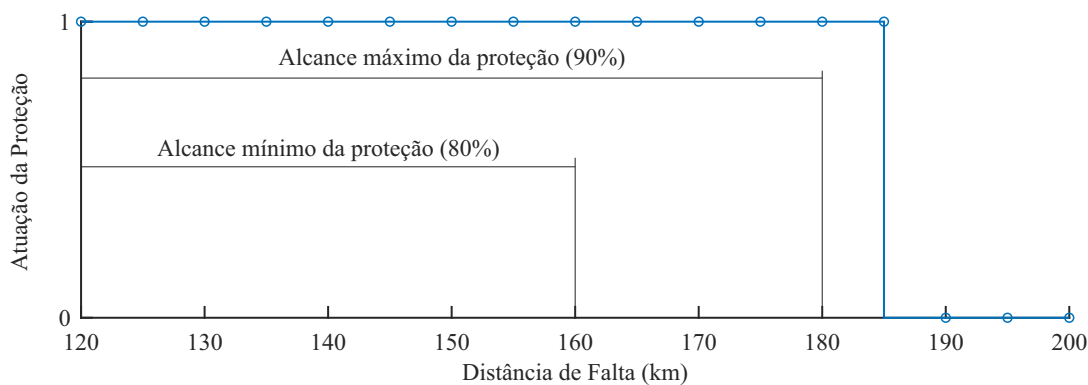


Figura 6.10: Atuação da proteção em função da distância de falta, para $f_s = 74$ kHz e um erro negativo de 2,5% na estimativa da velocidade da onda de modo terra.

Na Figura 6.11 ilustra-se a atuação da proteção quando a velocidade inicialmente estimada para a onda de modo terra é sobrestimada em 2,5%, ou seja, a estimção foi de $0,7364c$. A frequência mínima de amostragem que garantiria 80% da linha dentro do alcance mínimo da proteção seria de 90 kHz, caso as estimções iniciais das velocidades estivessem corretas. Conforme os resultados obtidos, uma falta em 155 km, abaixo do alcance mínimo desejado para a proteção, que é de 160 km, foi detectada como externa e nenhuma falta além do alcance máximo desejado para a proteção, que é de 180 km, foi detectada como interna. Fica assim evidente que a sobrestimação da velocidade da onda de modo terra, apesar de diminuir as chances de uma falta externa ser detectada como interna, diminui a zona de proteção da linha e aumenta a zona desprotegida.

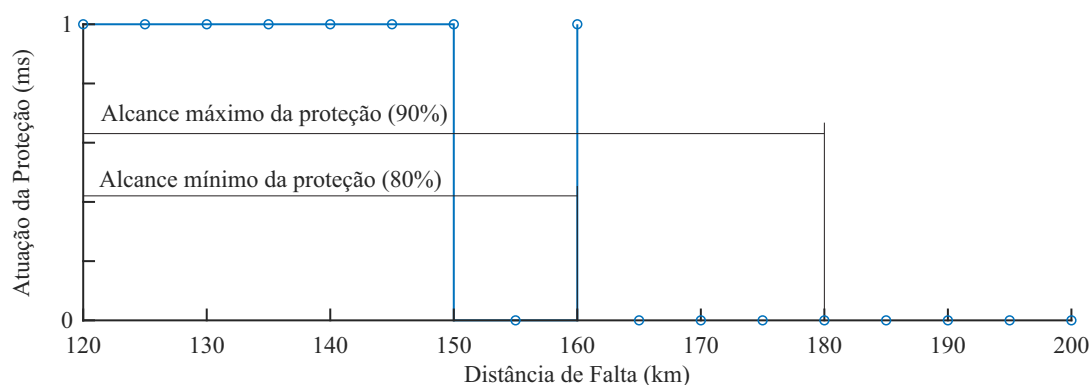


Figura 6.11: Atuação da proteção em função da distância de falta, para $f_s = 90$ kHz e um erro positivo de 2,5% na estimção da velocidade da onda de modo terra.

Na Figura 6.12 ilustra-se a atuação da proteção para uma situação crítica de falta para o método, que é uma subestimação da velocidade da onda de modo terra muito acima da margem de erro projetada, que no caso foi de, aproximadamente, 2,6%. O erro na subestimação foi de 10%, ou seja, a estimção foi de $0,6466c$, e a frequência mínima calculada para alcance mínimo da proteção em 80%, caso as estimções das velocidades das ondas estejam corretas, foi de 60 kHz, frequência essa adotada nas simulações. Como se esperava, todas as faltas no interior da linha protegida foram detectadas como internas, assim como a falta na barra remota. Diversas faltas aplicadas na linha externa adjacente também foram detectadas como internas, o que deixa claro que uma subestimação acentuada da velocidade da onda de modo terra inviabiliza a aplicação do método de proteção. Tal problema poderia ser contornado caso o alcance máximo da proteção fosse menor.

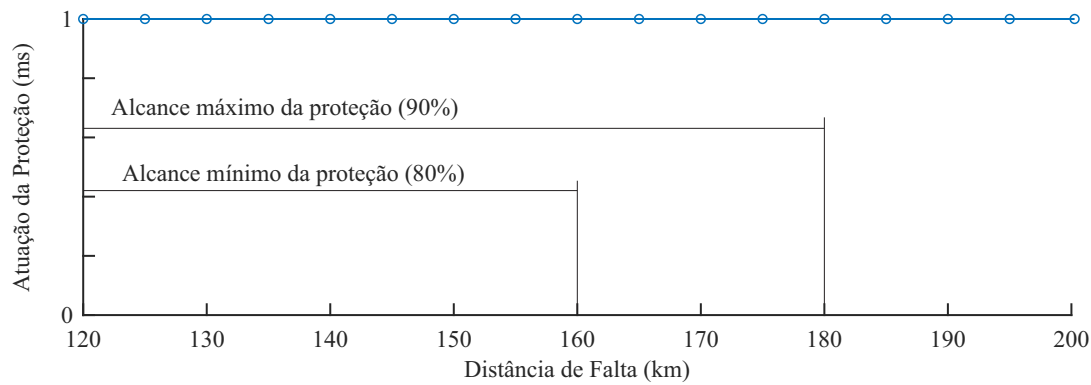


Figura 6.12: Atuação da proteção em função da distância de falta, para $f_S = 60$ kHz e um erro negativo de 10% na estimação da velocidade da onda de modo terra.

6.5 Síntese do Capítulo

Neste capítulo, os dois métodos propostos foram avaliados por meio de simulações computacionais. Para o método baseado na primeira reflexão da onda, a proteção obteve 100% de acerto para a zona protegida definida pela frequência de amostragem adotada, independente dos parâmetros elétricos da linha. Com relação ao método baseado nas ondas modais, a proteção obteve 100% de acerto quando a frequência mínima de amostragem foi respeitada e as velocidades das ondas viajantes foram corretamente estimadas. Havendo erro nas estimações das velocidades, dentro de uma margem, o método foi ainda capaz de proteger uma porcentagem da linha, sem gerar falsos gatilhos de falta. No entanto, demonstrou limitação quando essa margem não é respeitada, tal qual ocorre para métodos tradicionais quando os parâmetros da linha são erroneamente estimados. Os tempos obtidos de atuação dos dois métodos foram muito abaixo daqueles apresentados por métodos tradicionais, e também apresentaram bom desempenho se comparados aos métodos de dois terminais baseados em ondas viajantes.

Capítulo 7

Conclusões e Trabalhos Futuros

Esta dissertação apresentou o estado da arte de métodos de proteção de linhas de transmissão e localização de faltas baseados em ondas viajantes, seus princípios, características e problematizações. Dois métodos de proteção de linhas de transmissão baseados em ondas viajantes utilizando um terminal foram propostos. O primeiro é baseado nos instantes de chegada das duas primeiras ondas viajantes do sinal de corrente, mas é dependente da correta detecção da onda refletida no ponto de falta, o que pode dificultar a aplicação prática do método, uma vez que uma solução definitiva para tal problema ainda está sob investigação pela comunidade científica. Apesar disso, acrescentar informação de direcionalidade de falta a partir de dois terminais - passando a ser um método híbrido, de um e dois terminais - possibilitará sua aplicação para qualquer sistema. O segundo método é baseado apenas nos instantes de chegada das ondas viajantes modais da primeira frente de onda do sinal de corrente, ou seja, não requer a detecção das ondas refletidas, mas também utiliza a primeira frente de onda do sinal de tensão para definir a direcionalidade da falta e se aplica apenas às faltas que envolvem a terra.

A investigação do efeito da frequência de amostragem possibilitou a quantificação das zonas protegida e desprotegida da linha em função da frequência de amostragem, o que é uma contribuição relevante uma vez que métodos baseados em ondas viajantes normalmente relatam dificuldade de operação para faltas próximas aos terminais. Possibilitou também a definição de parâmetros para a escolha da mínima frequência de amostragem, em contraponto à utilização de altas frequências tradicionalmente utilizadas e sem parâmetros claros para a sua escolha.

O método baseado em reflexão é independente dos parâmetros elétricos da linha e não necessita de uma estimativa da velocidade da onda viajante. Já o método baseado em ondas modais, apesar de necessitar das estimativas das velocidades das ondas, possibilita uma margem de erro nas estimativas das velocidades sem que uma falta externa seja detectada como interna. No entanto, quanto maior a margem de erro desejada, menor será a zona protegida da linha. Dessa forma, fica a critério do engenheiro de proteção

estabelecer tal relação.

Os resultados demonstram que os métodos propostos possuem tempo de atuação abaixo daqueles apresentados por métodos baseados em ondas viajantes utilizando dois terminais, e ainda mais baixos quando comparados aos métodos tradicionais de proteção de linhas de transmissão, o que representa uma importante contribuição, uma vez que proporciona maior estabilidade do sistema elétrico e diminui os riscos de danos aos seus componentes.

7.1 Trabalhos Futuros

A partir do que foi desenvolvido nesta dissertação, propõe-se as seguintes tarefas a serem desenvolvidas em trabalhos futuros:

1. Avaliação do efeito da frequência de amostragem para a determinação de parâmetros exatos para a definição de um limiar de detecção para a proteção baseada na primeira reflexão da onda viajante.
2. Investigação do efeito de uma frequência mínima de amostragem que garanta atuação correta da proteção quando se é desejada uma zona de proteção muito abaixo de 80% da linha para a proteção baseada na primeira reflexão da onda viajante.
3. Inclusão da informação de direcionalidade de falta a partir de dois terminais e avaliação do desempenho de um método híbrido baseado em um e dois terminais, utilizando-se da detecção do instante de chegada da primeira onda refletida a alcançar o terminal de medição.
4. Investigação de um equacionamento para a definição de uma margem de erro aceitável sem que uma falta externa seja detectada como interna no método de proteção baseado em ondas modais.
5. Investigação de uma solução para a correta detecção da onda viajante refletida no ponto de falta.
6. Investigação do efeito da frequência de amostragem nos métodos de localização de faltas de um e dois terminais baseados em ondas viajantes.
7. Investigação do desempenho de métodos híbridos, baseados em um e dois terminais, em técnicas de localização e proteção, levando em consideração o efeito da frequência de amostragem.
8. Investigação da utilização de informações das ondas viajantes modais em métodos de localização e proteção que utilizam dois terminais, levando em consideração o efeito da frequência de amostragem.

Referências Bibliográficas

ABUR, A.; MAGNAGO, F. H. Use of time delays between modal components in wavelet based fault location. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 22, n. 6, p. 397–403, 2000.

ALLIEVI, L. Teoria generale del moto perturbato dell'acqua nei tubi in pressione. In: *Annali della Societa degli Ingegneri ed Architetto Italiani*. [S.l.: s.n.], 1902. (English translation, E. E. Halmos, 1925. Theory of water hammer, American Society of Mechanical Engineering).

ARAÚJO, A. E. A. de; NEVES, W. L. A. *Cálculo de Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Energia*. Belo Horizonte: UFMG, 2005.

ARLETT, P. L.; MURRAY-SHELLEY, R. An improved method for the calculation of transients on transmission lines using a digital computer. In: *Proc. Power Industry Computer Applications Conf.* [S.l.: s.n.], 1965. p. 195–211. Sponsored by the IEEE Power Group.

BERGERON, L. Etude des variations de regime dans les conduits d'eau: Solution graphique generale. *Rev. Generale de L'hydraulique*, v. 1, p. 12, 1935.

BEWLEY, L. V. Traveling waves on transmission systems. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, v. 50, n. 2, p. 532–550, 1931.

BRANIN, F. H. Transient analysis of lossless transmission lines. *Proceedings of the IEEE*, v. 55, n. 11, p. 2012–2013, 1967.

BUSH, V. Transmission line transients. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, XLII, p. 878–893, 1923.

Central Station Engineers of the Westinghouse Electric Corp. *Electrical Transmission and Distribution Reference Book*. USA: [s.n.], 1964.

CHAMIA, M.; LIBERMAN, S. Ultra high speed relay for ehv/uhv transmission lines – development, design and application. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-97, n. 6, p. 2104–2116, 1978.

CHEN, W.; MALIK, O. P.; YIN, X.; CHEN, D.; ZHANG, Z. Study of wavelet-based ultra high speed directional transmission line protection. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 18, n. 4, p. 1134–1139, 2003.

CHRISTOPOULOS, C.; THOMASE, D. W. P.; WRIGHT, A. Scheme, based on travelling-waves, for the protection of major transmission lines. *IEE Proceedings C - Generation, Transmission and Distribution*, v. 135, n. 1, p. 63–73, Jan 1988. ISSN 0143-7046.

COSTA, F. B. Boundary wavelet coefficients for real-time detection of transients induced by faults and power-quality disturbances. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 29, n. 6, p. 2674–2687, 2014.

COSTA, F. B.; MONTI, A.; LOPES, F. V.; SILVA, K. M.; JAMBORSALAMATI, P.; SADU, A. Two-terminal traveling-wave-based transmission-line protection. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 32, n. 3, p. 1382–1393, 2017.

COSTA, F. B.; SOUZA, B. A.; BRITO, N. S. D. Real-time detection of fault-induced transients in transmission lines. *Electronics Letters*, v. 46, n. 11, p. 753–755, 2010.

COSTA, F. B.; SOUZA, B. A.; BRITO, N. S. D. Effects of the fault inception angle in fault-induced transients. *IET Generation, Transmission Distribution*, v. 6, n. 5, p. 463–471, May 2012.

CROSSLEY, P. A.; MCLAREN, P. G. Distance protection based on traveling waves. *IEEE Power Engineering Review*, PER-3, n. 9, p. 30–31, 1983.

DOMMEL, H. W. Digital computer solution of electromagnetic transients in single-and multiphase networks. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-88, n. 4, p. 388–399, 1969.

DOMMEL, H. W.; MICHELS, J. M. High speed relaying using traveling wave transient analysis. In: *IEEE Power Eng. Soc. Winter Meeting*. New York: [s.n.], 1978.

DONG, X.; LUO, S.; SHI, S.; WANG, B.; WANG, S.; REN, L.; XU, F. Implementation and application of practical traveling-wave-based directional protection in uhv transmission lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 31, n. 1, p. 294–302, 2016.

DONG, X.; SU, B.; WANG, Q. Study on the voltage traveling wave wavefront detection for cvt. In: *2005 IEEE/PES Transmission Distribution Conference Exposition: Asia and Pacific*. [S.l.: s.n.], 2005. p. 1–6.

DONG, X. Z.; GE, Y. Z.; XU, B. Y. Research of fault location based on current travelling waves. *Proc. CSEE*, v. 19, n. 4, p. 76–80, 1999.

DOWELL, J. C. Attenuation and successive reflections of traveling waves. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, v. 50, n. 2, p. 551–557, 1931.

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

- EASTVEDT, R. B. The need for ultra-fast fault clearing. In: *Third Annual Western Protective Relay Conference*. Spokane, EUA: [s.n.], 1976.
- FREY, W.; ALTHAMMER, P. The calculation of electromagnetic transients on lines by means of a digital computer. *Brown Boveri Rev.*, v. 48, n. 5/6, p. 344–355, 1961.
- GLOVER, J. D.; SARMA, M. S.; OVERBYE, T. J. *Power System Analysis and Design*. 5. ed. [S.l.: s.n.], 2012.
- IZYKOWSKI, J.; ROSOŁOWSKI, E.; BALCEREK, P.; FULCZYK, M.; SAHA, M. Accurate noniterative fault location algorithm utilizing two-end unsynchronized measurements. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 25, n. 1, p. 72–80, 2010.
- JIAN, Q.; XIANGXUN, C.; JIANCHAO, Z. Study on dispersion of travelling wave in transmission line. In: *Proceedings of the CSEE*. [S.l.: s.n.], 1999. v. 19, n. 9, p. 28–30.
- JOHNS, A. T. New ultra-high-speed directional comparison technique for the protection of e.h.v. transmission lines. *IEE Proceedings C - Generation, Transmission and Distribution*, v. 127, n. 4, p. 228–239, 1980.
- KALE, V.; BHIDE, S.; BEDEKAR, P. Fault location estimation based on wavelet analysis of traveling waves. In: *2012 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1–5.
- KELVIN, L. *Collected mathematical and physical papers*, v. 2, p. 71–72, 1884.
- LIN, S.; HE, Z.; LI, X.; QIAN, Q. Travelling wave time-frequency characteristic-based fault location method for transmission lines. *IET Generation, Transmission & Distribution*, v. 6, n. 8, p. 764–772, 2012.
- LIU, Y.; SHENG, G.; HE, Z.; JIANG, X. A traveling wave fault location method for earth faults based on mode propagation time delays of multimeasuring points. *Przeglad Elektrotech.*, v. 2012, p. 254–258, 2012.
- LOPES, F. V. Settings-free traveling-wave-based earth fault location using unsynchronized two-terminal data. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 31, n. 5, p. 2296–2298, 2016.
- LOPES, F. V.; FERNANDES, D.; NEVES, W. L. A. A traveling-wave detection method based on park's transformation for fault locators. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 28, n. 3, p. 1626–1634, 2013.
- LOPES, F. V.; SILVA, K. M.; COSTA, F. B.; NEVES, W. L. A.; FERNANDES, D. Real-time traveling-wave-based fault location using two-terminal unsynchronized data. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 30, n. 3, p. 1067–1076, 2015.
- MAGNAGO, F. H.; ABUR, A. Fault location using wavelets. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 13, n. 4, p. 1475–1480, 1998.

- NAMDARI, F.; SALEHI, M. High-speed protection scheme based on initial current traveling wave for transmission lines employing mathematical morphology. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 32, n. 1, p. 246–253, 2017.
- PATHIRANA, V.; DIRKS, E.; MCLAREN, P. G. Using impedance measurement to improve the reliability of traveling-wave distance protection. In: *2003 IEEE Power Engineering Society General Meeting (IEEE Cat. No.03CH37491)*. [S.l.: s.n.], 2003. v. 3, p. 1879 Vol. 3.
- RAJENDRA, S.; MCLAREN, P. G. Travelling-wave techniques applied to the protection of teed circuits: Multi-phase/multi-circuit system. *IEEE Power Engineering Review*, PER-5, n. 12, p. 49–50, 1985.
- SAHA, M. M.; IZYKOWSKI, J.; ROSOLOWSKI, E. *Fault Location on Power Networks*. New York, USA: Springer, 2010.
- SCHNYDER, O. Druckstosse in pumpensteigleitungen. *Schweiz. Bauzeitungen*, v. 94, n. 2, p. 22–23, 1929.
- SCHWEITZER, E.; KASZTENNY, B.; GUZMAN, A.; SKENDZIC, V.; MYNAM, M. Speed of line protection - can we break free of phasor limitations? In: *68th Annual Conference for Protective Relay Engineers*. [S.l.: s.n.], 2015.
- SCHWEITZER, E. O.; GUZMAN, A.; MYNAM, M. V.; SKENDZIC, V.; KASZTENNY, B.; MARX, S. Protective relays with traveling wave technology revolutionize fault locating. *IEEE Power and Energy Magazine*, v. 14, n. 2, p. 114–120, 2016.
- SCHWEITZER, E. O.; KASZTENNY, B.; MYNAM, M. V. Performance of time-domain line protection elements on real-world faults. In: *42nd Annual Western Protective Relay Conference*. [S.l.: s.n.], 2015.
- SHEHAB-ELDIN, E. H.; MCLAREN, P. G. Travelling wave distance protection-problem areas and solutions. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 3, n. 3, p. 894–902, 1988.
- TAGAGI, T.; BABA, J.; UEMURA, K.; SAKAGUCHI, T. Fault protection based on travelling wave theory, part 1: Theory. In: *IEEE Power Eng. Soc. Summer Meeting*. [S.l.: s.n.], 1977.
- TANG, L.; DONG, X.; LUO, S.; SHI, S.; WANG, B. A new differential protection of transmission line based on equivalent travelling wave. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 32, n. 3, p. 1359–1369, 2017.
- THOMAS, D. W. P.; CHRISTOPOULOS, C.; TANG, Y.; GALE, P.; STOKOE, J. Single ended travelling wave fault location scheme based on wavelet analysis. In: *2004 Eighth IEE International Conference on Developments in Power System Protection*. [S.l.: s.n.], 2004. v. 1, p. 196–199 Vol.1.
- YU, C.-S. An unsynchronized measurements correction method for two-terminal fault-location problems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 25, n. 3, p. 1325–1333, 2010.

Zanetta Júnior, L. C. *Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência*. [S.l.]: Editora da Universidade de São Paulo, 2003.

ZIMATH, S. L.; RAMOS, M. A. F.; FILHO, J. E. S. Comparison of impedance and travelling wave fault location using real faults. In: *IEEE PES T D 2010*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–5.