

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

## Dissertação de Mestrado

**Avaliação dos Efeitos da Compensação Série sobre os  
Transitórios Eletromagnéticos em Linhas de Transmissão**

Alyson Henrique Pereira Sobrinho

Campina Grande - Paraíba - Brasil

© Alyson Henrique Pereira Sobrinho, Dezembro de 2013

Alyson Henrique Pereira Sobrinho

# Avaliação dos Efeitos da Compensação Série sobre os Transitórios Eletromagnéticos em Linhas de Transmissão

*Dissertação de mestrado apresentada à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento da Energia

Benemar Alencar de Souza, D.Sc.

Orientador

Flavio Bezerra Costa, D.Sc.

Orientador

Campina Grande - Paraíba - Brasil

Dezembro de 2013

## AGRADECIMENTOS

Agradeço e glorifico a Deus, primeiramente, pela sua infinita bondade e misericórdia em todos os momentos de minha vida. Sem Ele, eu não seria capaz de superar os obstáculos que encontrei e que ainda hei de encontrar pela frente.

Aos professores orientadores, Dr. Benemar Alencar de Souza e Dr. Flavio Bezerra Costa, pela valiosa contribuição na minha orientação e pelas oportunidades de aprendizado na minha vida acadêmica.

Aos meus pais, Zélia Maria e Francisco Canindé, pelo sacrifício a fim de me propiciar as melhores condições possíveis e pelo exemplo de vida; à minha irmã Elialda Alves e ao meu cunhado Vicente José por me garantirem, durante muitos anos, condições para que eu pudesse seguir em frente nos meus objetivos; aos meus demais irmãos e membros da família sou eternamente grato por tudo.

A Liliane Azevedo pela valiosa companhia e constante incentivo.

Agradeço aos estimados e nobres professores da UFRN e da UFCG pela dedicação e responsabilidade no desenvolvimento de suas atividades e pela valiosa contribuição nos últimos anos.

Aos amigos da UFRN: André Melo, Rodrigo Lopes, Kledir Câmara, Tales Wiriton, Julian Laurentino, Márcio Dilermano e Marcus Vinícius pela amizade construída durante todo o período da graduação.

Aos amigos do Grupo de Sistemas Elétricos da UFCG: Felipe Lopes, Célio Anésio, João Campos, Huilman Sanca Sanca e Francisco Souza pela amizade conquistada nesse período e pelas contribuições, nem que tenham sido em simples conversas, mas que foram de grande importância para a execução desse trabalho.

Para os demais que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho, fica aqui o meu muito obrigado!

*Alyson Henrique Pereira Sobrinho*

## RESUMO

A compensação série em linhas de transmissão influencia no desempenho dos dispositivos de proteção que se baseiam na estimação dos fasores fundamentais das tensões e correntes. Porém, a influência da compensação série sobre o conteúdo de alta frequência desses sinais quando da ocorrência de uma falta necessita de melhor avaliação. Portanto, este trabalho tem como objetivo avaliar os efeitos do emprego da compensação série fixa, assim como avaliar os efeitos dos parâmetros de falta (ângulo de incidência, resistência e localização de falta), em relação aos transitórios induzidos por faltas em linhas de transmissão. A investigação desses efeitos pode auxiliar o desenvolvimento e aplicação de métodos de diagnóstico de faltas baseados na teoria das ondas viajantes para linhas de transmissão com compensação série. A quantificação dos transitórios de falta foi realizada por meio das energias dos coeficientes *wavelet* das tensões e correntes. Os diferentes cenários de falta requeridos para essa análise foram obtidos por meio de simulações. Como forma de complementar os resultados obtidos, dois métodos de localização de faltas foram implementados: um baseado na estimação dos fasores fundamentais de tensão e corrente e outro baseado na teoria das ondas viajantes, usando a transformada *wavelet*. Ambos os métodos requerem dados de dois terminais da linha e foram avaliados para linhas sem e com compensação série. Uma análise de sensibilidade em relação aos parâmetros que mais afetam esses métodos, tais como o grau de compensação e os parâmetros de falta, também foi realizada, bem como uma análise comparativa entre os seus desempenhos.

**Palavras-chave:** Compensação série em linhas de transmissão; transitórios induzidos por faltas; energia dos coeficientes *wavelets*; localização de faltas.

## ABSTRACT

Series compensation on transmission lines affects the performance of protective devices based on estimation of fundamental phasors of voltages and currents. However, the influence of series compensation on high frequency content of these signals when a fault occurs needs a thorough investigation. Then, this dissertation aims to assess the effects of fixed series compensation employment, as well as the effects of fault parameters (fault inception angle, resistance, and location), in function of fault-induced transients on transmission lines. The investigation of these effects may help the development and application of travelling waves-based fault diagnosis methods for series compensated transmission lines. The quantification of fault-induced transients is performed by means of the wavelet coefficient energies for both voltages and currents. The different fault scenarios required by this analysis were obtained by means of fault simulations. In order to complement the achieved results, two fault location methods were implemented: one based on fundamental frequency estimation and another based on travelling waves theory, by using the wavelet transform. Both these methods require data registered in both terminals of the line and were assessed for non-compensated and series compensated lines. A sensitivity analysis of the parameters that more affect in these methods, such as compensation degree and fault parameters, were also performed, as well as a comparative analysis between their performances.

**Keywords:** Series compensation on transmission lines; fault-induced transients; wavelet coefficient energy; fault location.

# SUMÁRIO

<b>Lista de Figuras</b>	x
<b>Lista de Tabelas</b>	xiv
<b>Lista de Símbolos</b>	xvi
<b>Lista de Siglas</b>	xviii
<b>Capítulo 1– Introdução</b>	1
1.1 Motivação . . . . .	3
1.2 Objetivos . . . . .	4
1.3 Contribuições da Dissertação . . . . .	5
1.4 Metodologia . . . . .	5
1.5 Estrutura da Dissertação . . . . .	6
<b>Capítulo 2– Fundamentos da Compensação Série em Linhas de Transmissão</b>	7
2.1 Introdução . . . . .	7
2.2 Compensação Série Fixa em Linhas de Transmissão . . . . .	8
2.2.1 Considerações Gerais . . . . .	8
2.2.2 Grau de Compensação . . . . .	9
2.2.3 O Sistema de Proteção da Compensação Série Fixa . . . . .	10

2.2.4	Considerações sobre o Fluxo de Potência para a Compensação Série . . . .	11
2.2.5	Efeito da Localização da Compensação Série Fixa na Linha de Transmissão	14
2.3	Resumo do Capítulo . . . . .	15
<b>Capítulo 3– Fundamentos da Transformada <i>Wavelet</i></b>		<b>16</b>
3.1	Introdução . . . . .	16
3.2	A Transformada <i>Wavelet</i> Contínua . . . . .	16
3.3	A Transformada <i>Wavelet</i> Discreta . . . . .	18
3.3.1	O Algoritmo de Mallat para a TWD . . . . .	19
3.3.2	Algoritmo Piramidal para Cálculo da TWD . . . . .	20
3.3.3	Algoritmo Piramidal para Cálculo da TWDR . . . . .	22
3.4	Energia dos Coeficientes <i>Wavelet</i> . . . . .	25
3.5	Resumo do Capítulo . . . . .	26
<b>Capítulo 4– Revisão Bibliográfica</b>		<b>27</b>
4.1	Diagnóstico Automático de Faltas em Linhas de Transmissão . . . . .	27
4.2	Localização de Faltas em Linhas de Transmissão . . . . .	31
4.2.1	Métodos baseados na Frequência Fundamental . . . . .	31
4.2.2	Métodos baseados na Teoria das Ondas Viajantes . . . . .	35
4.3	Resumo da Revisão Bibliográfica . . . . .	37
<b>Capítulo 5– Efeito dos Parâmetros de Falta nos Transitórios</b>		<b>40</b>
5.1	Modelo do Sistema de Transmissão para Simulação de Faltas . . . . .	40
5.2	Efeito do Ângulo de Incidência de Falta nos Transitórios . . . . .	43
5.2.1	Faltas Monofásicas . . . . .	44
5.2.2	Faltas Bifásicas . . . . .	48
5.2.3	Faltas Bifásicas para a Terra . . . . .	50

5.2.4	Faltas Trifásicas . . . . .	53
5.3	Efeito da Resistência de Falta nos Transitórios . . . . .	55
5.4	Efeito da Distância de Falta nos Transitórios . . . . .	59
5.5	Efeito do Grau de Compensação Série nos Transitórios . . . . .	62
5.6	Efeito das Escalas <i>Wavelet</i> nos Transitórios . . . . .	67
5.7	Resumo do Capítulo . . . . .	69
<b>Capítulo 6– Métodos de Localização de Faltas</b>		<b>70</b>
6.1	Método baseado na Frequência Fundamental . . . . .	70
6.1.1	Estimação dos Fasores Fundamentais . . . . .	70
6.1.2	Método de Girgis <i>et al.</i> (1992) . . . . .	72
6.2	Método baseado na Teoria das Ondas Viajantes . . . . .	74
6.2.1	Fundamentos da Teoria das Ondas Viajantes . . . . .	74
6.2.1.1	Reflexões e Refrações de Ondas Viajantes . . . . .	75
6.2.1.2	Localização de Faltas . . . . .	76
6.2.2	Método de Costa & Souza (2011) . . . . .	77
6.3	Resumo do Capítulo . . . . .	78
<b>Capítulo 7– Avaliação dos Métodos de Localização de Faltas</b>		<b>79</b>
7.1	Erros na Localização de Faltas . . . . .	79
7.1.1	Erro Absoluto . . . . .	79
7.1.2	Erro Relativo . . . . .	79
7.1.3	Erro Admissível . . . . .	80
7.2	Cenários de Faltas . . . . .	80
7.3	Modelos dos Transformadores de Instrumento . . . . .	82
7.4	Análise de Sensibilidade dos Métodos de Localização de Falta . . . . .	83



7.4.1	Efeito da Distância de Falta . . . . .	83
7.4.2	Efeito do Ângulo de Incidência de Falta . . . . .	84
7.4.3	Efeito da Resistência de Falta . . . . .	85
7.4.4	Efeito do Tipo de Falta . . . . .	86
7.4.5	Efeito do Grau de Compensação Série . . . . .	87
7.4.6	Efeito da Frequência de Amostragem . . . . .	89
7.4.7	Efeito da Saturação do Transformador de Corrente . . . . .	89
7.4.8	Resumo da Análise de Sensibilidade . . . . .	91
7.5	Resumo do Capítulo . . . . .	92
<b>Capítulo 8– Conclusões e Perspectivas de Continuação</b>		<b>93</b>
8.1	Conclusões . . . . .	93
8.2	Trabalhos Futuros . . . . .	95
<b>Referências Bibliográficas</b>		<b>96</b>

## LISTA DE FIGURAS

2.1	Diagrama elétrico simplificado da compensação série fixa. . . . .	11
2.2	Sistema de transmissão de energia elétrica simplificado. . . . .	12
2.3	Sistema de transmissão de energia elétrica simplificado com a presença da compensação série no meio da linha. . . . .	12
2.4	Efeito do grau de compensação na capacidade de transferência de potência em uma linha de transmissão. . . . .	13
3.1	<i>Wavelet</i> mãe alinhada com o sinal. . . . .	17
3.2	Operação contínua de deslocamento. . . . .	18
3.3	Operação contínua de dilatação. . . . .	18
3.4	Decomposição em três estágios da TWD. . . . .	20
3.5	Exemplo de aplicação da TWDR na primeira escala: (a) sinal sintético; (b) coeficientes <i>wavelet</i> ; (c) coeficientes escala. . . . .	24
3.6	Exemplo de cálculo da energia dos coeficientes <i>wavelet</i> da TWDR: (a) sinal sintético; (b) coeficientes <i>wavelet</i> ; (c) energia dos coeficientes <i>wavelet</i> . . . . .	26
5.1	Modelo do sistema de transmissão simplificado sem uso da compensação série. . . . .	40
5.2	Modelo do sistema de transmissão simplificado com emprego da compensação série. . . . .	41
5.3	Esquema para aplicação das faltas. . . . .	42
5.4	Ilustração para definição do ângulo de incidência de falta. . . . .	43
5.5	Ilustração do cálculo da energia dos coeficientes <i>wavelet</i> : (a) tensão; (b) coeficiente <i>wavelet</i> . . . . .	44

- 5.6 Energias dos coeficientes *wavelet* das tensões na barra 1, em faltas monofásicas, em linhas sem e com compensação versus ângulo de incidência de falta: (a) faltas AT; (b) faltas BT; (c) faltas CT. . . . . 45
- 5.7 Energias dos coeficientes *wavelet* das correntes na barra 1, em faltas monofásicas, em linhas sem e com compensação versus ângulo de incidência de falta: (a) faltas AT; (b) faltas BT; (c) faltas CT. . . . . 46
- 5.8 Energias dos coeficientes *wavelet* das tensões na barra 1, em faltas bifásicas, em linhas sem e com compensação versus ângulo de incidência de falta: (a) faltas AB; (b) faltas BC; (c) faltas CA. . . . . 48
- 5.9 Energias dos coeficientes *wavelet* das correntes na barra 1, em faltas bifásicas, em linhas sem e com compensação versus ângulo de incidência de falta: (a) faltas AB; (b) faltas BC; (c) faltas CA. . . . . 49
- 5.10 Energias dos coeficientes *wavelet* das tensões na barra 1, em faltas bifásicas para a terra, em linhas sem e com compensação versus ângulo de incidência de falta: (a) faltas ABT; (b) faltas BCT; (c) faltas CAT. . . . . 51
- 5.11 Energias dos coeficientes *wavelet* das correntes na barra 1, em faltas bifásicas para a terra, em linhas sem e com compensação versus ângulo de incidência de falta: (a) faltas ABT; (b) faltas BCT; (c) faltas CAT. . . . . 51
- 5.12 Energias dos coeficientes *wavelet* das tensões e correntes na barra 1, para faltas trifásicas, versus ângulo de incidência de falta: (a) linha não compensada; (b) linha com compensação série. . . . . 53
- 5.13 Energias dos coeficientes *wavelet* das tensões e correntes da barra 1, para faltas AT, versus resistência de falta: (a) linha não compensada; (b) linha com compensação série. . . . . 55
- 5.14 Energias dos coeficientes *wavelet* das tensões e correntes da barra 1, para faltas AB, versus resistência de falta: (a) linha não compensada; (b) linha com compensação série. . . . . 57
- 5.15 Energias dos coeficientes *wavelet* das tensões e correntes da barra 1, para faltas ABC, versus resistência de falta: (a) linha não compensada; (b) linha com compensação série. . . . . 58

5.16	Energias dos coeficientes <i>wavelet</i> obtidas na barra 1 para faltas AT versus distância de falta para: (a) tensões e correntes na linha não compensada; (b) tensões e correntes na linha com compensação série. . . . .	60
5.17	Correntes na fase A para faltas aplicadas em diferentes distâncias do terminal de monitoramento. . . . .	61
5.18	Circuito monofásico simplificado com linha modelada por parâmetros concentrados em seções PI. . . . .	61
5.19	Energia dos coeficientes <i>wavelet</i> versus distância de falta para linha monofásica modelada por parâmetros concentrados. . . . .	62
5.20	Energias dos coeficientes <i>wavelet</i> obtidas na barra 1, para faltas AT, versus grau de compensação série: (a) tensões; (b) correntes. . . . .	63
5.21	Energias dos coeficientes <i>wavelet</i> obtidas na barra 1, para faltas AB, versus grau de compensação série: (a) tensões; (b) correntes. . . . .	63
5.22	Energias dos coeficientes <i>wavelet</i> obtidas na barra 1, para faltas ABT, versus grau de compensação série: (a) tensões; (b) correntes. . . . .	64
5.23	Energias dos coeficientes <i>wavelet</i> obtidas na barra 1, para faltas ABC, versus grau de compensação série: (a) tensões; (b) correntes. . . . .	64
5.24	Diferentes localizações da compensação série: (a) em uma extremidade da linha; (b) dividida nas duas extremidades da linha; (c) no meio da linha. . . . .	65
5.25	Energias dos coeficientes <i>wavelet</i> para tensões e correntes no sistema de transmissão monofásico para diferentes locais da compensação série: (a) em uma extremidade da linha; (b) dividida nas duas extremidades da linha; (c) no meio da linha. . . . .	66
5.26	Resposta em frequência dos filtros escala e <i>wavelet</i> para a <i>wavelet</i> mãe db(4): (a) primeira escala; (b) segunda escala; (c) terceira escala. . . . .	68
5.27	Efeito da escala <i>wavelet</i> nas energias dos coeficientes <i>wavelet</i> para faltas AT variando-se o ângulo de incidência de falta: (a) primeira escala; (b) segunda escala; (c) terceira escala. . . . .	68

5.28	Efeito da escala <i>wavelet</i> nas energias dos coeficientes <i>wavelet</i> para faltas AT variando-se a resistência de falta: (a) primeira escala; (b) segunda escala; (c) terceira escala. . . . .	69
6.1	Esquema de linha de transmissão com dados nos dois barramentos. . . . .	72
6.2	Diagrama Lattice representando reflexões e refrações das ondas viajantes em uma linha de transmissão. . . . .	76
6.3	Exemplo de aplicação do método de localização de Costa & Souza (2011). . . . .	78
7.1	Sistema de transmissão simplificado de 230 kV. . . . .	81
7.2	Modelo do circuito equivalente do TC. . . . .	82
7.3	Modelo do circuito equivalente do TPC. . . . .	83
7.4	Análise da influência da distância de falta no método de localização de falta: (a) Girgis <i>et al.</i> (1992); (b) Costa & Souza (2011). . . . .	84
7.5	Análise da influência do ângulo de incidência de falta no método de localização de falta: (a) Girgis <i>et al.</i> (1992); (b) Costa & Souza (2011). . . . .	85
7.6	Análise da influência da resistência de falta no método de localização de falta: (a) Girgis <i>et al.</i> (1992); (b) Costa & Souza (2011). . . . .	86
7.7	Análise da influência do tipo de falta no método de localização de falta: (a) Girgis <i>et al.</i> (1992); (b) Costa & Souza (2011). . . . .	87
7.8	Análise da influência do grau de compensação série no método de localização de falta: (a) Girgis <i>et al.</i> (1992); (b) Costa & Souza (2011). . . . .	88
7.9	Análise da influência da frequência de amostragem no método de localização de falta: (a) Girgis <i>et al.</i> (1992); (b) Costa & Souza (2011). . . . .	89
7.10	Correntes nos secundários do TC: (a) não saturado ; (b) saturado. . . . .	90
7.11	Análise da influência do grau de compensação série para dados monitorados em TC saturado e TPC no método de localização de falta: (a) Girgis <i>et al.</i> (1992); (b) Costa & Souza (2011). . . . .	91

## LISTA DE TABELAS

3.1	Número de amostras e espectro de frequência a partir da aplicação de três estágios da TWD sobre um sinal original. . . . .	20
4.1	Resumo da revisão bibliográfica referente ao diagnóstico de faltas. . . . .	38
4.2	Resumo da revisão bibliográfica referente à localização de faltas. . . . .	38
4.3	Características associadas aos principais tipos de localizadores de faltas. . . . .	39
5.1	Dados das fontes do sistema de 500 kV. . . . .	41
5.2	Dados da linha de transmissão do sistema de 500 kV. . . . .	41
5.3	Bases de dados para o caso de linha de transmissão sem compensação. . . . .	41
5.4	Bases de dados para o caso de linha de transmissão com compensação série. . . . .	42
5.5	Valores dos resistores para aplicação dos diversos tipos de falta. . . . .	42
5.6	Resultado da análise de regressão de $\dot{\mathcal{E}} = f(\theta_f)$ para faltas AT em linhas sem e com compensação série. . . . .	46
5.7	Resultado da análise de regressão de $\dot{\mathcal{E}} = f(\theta_f)$ para faltas AB em linhas sem e com compensação série. . . . .	49
5.8	Resultado da análise de regressão de $\dot{\mathcal{E}} = f(\theta_f)$ para faltas ABT em linhas sem e com compensação série. . . . .	52
5.9	Resultado da análise de regressão de $\dot{\mathcal{E}} = f(\theta_f)$ para faltas ABC em linhas sem e com compensação série. . . . .	54
5.10	Resultado da análise de regressão de $\dot{\mathcal{E}} = f(r_f)$ para faltas AT em linhas sem e com compensação série. . . . .	56
5.11	Resultado da análise de regressão de $\dot{\mathcal{E}} = f(r_f)$ para faltas AB em linhas sem e com compensação série. . . . .	58

5.12 Resultado da análise de regressão de  $\dot{\mathcal{E}} = f(r_f)$  para faltas ABC em linhas sem e com compensação série. . . . . 59

7.1 Resumo da análise de sensibilidade dos métodos de localização de faltas. . . . . 92

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a$  - Fator de escala.

$A_j$  - Matriz circulante formada pelos coeficientes dos filtros escala da TWD na escala  $j$ .

$\tilde{A}_j$  - Matriz circulante formada pelos coeficientes dos filtros escala da TWDR na escala  $j$ .

$b$  - Fator de deslocamento.

$B_j$  - Matriz circulante formada pelos coeficientes dos filtros *wavelets* da TWD na escala  $j$ .

$\tilde{B}_j$  - Matriz circulante formada pelos coeficientes dos filtros *wavelets* da TWDR na escala  $j$ .

$\text{db}(n)$  - *Wavelet* mãe Daubechies com  $n$  coeficientes nos filtros escala e *wavelet*.

$c$  - Velocidade de propagação da luz no vácuo.

$d_{est}$  - Distância estimada por um método localizador de faltas.

$d_f$  - Distância entre o local de ocorrência de uma falta e o terminal de monitoramento (distância de falta).

$d_{real}$  - Distância real de falta.

$\Delta k$  - Número de amostras em um ciclo da frequência fundamental.

$\Delta\theta$  - Ângulo de defasagem relativo ao tempo de trânsito das ondas viajantes do local da falta até o terminal de monitoramento.

$EA$  - Erro absoluto.

$E_{ad}$  - Erro admissível.

$ER$  - Erro relativo.

$\dot{\mathcal{E}}_j(k)$  - Energia janelada dos coeficientes *wavelet* na escala  $j$ .

$f$  - Frequência fundamental.

$F(a, b)$  - Transformada *Wavelet* Contínua para escala  $a$  e deslocamento  $b$ .

$F(m, n)$  - Transformada *Wavelet* Discreta para escala  $m$  e deslocamento  $n$ .

$f_s$  - Frequência de amostragem.

$g$  - Filtro passa-baixa da TWD.

$\tilde{g}$  - Filtro passa-baixa da TWDR.

$h$  - Filtro passa-alta da TWD.



$\tilde{h}$  - Filtro passa-alta da TWDR.

$i_A, i_B, i_C, i_N$  - Correntes de fase e de neutro no terminal de monitoramento.

$j$  -  $j$ -ésima escala.

$J_{max}$  - Número máximo de decomposições (escalas) de um sinal.

$k$  - Grau de compensação série.

$k_1$  - Amostra relacionada ao instante de falta no terminal de monitoramento.

$k_f$  - Amostra relacionada ao instante de falta no local da falta.

$k_i$  - Amostra relacionada ao período transitório  $i$ , identificada nas tensões e correntes de fase.

$k_t$  - Número total de amostras de um sinal.

$L$  - Número de coeficientes dos filtros escala e *wavelet*.

$nA$  - Número de amostras por ciclo de um sinal.

$P_{12}$  - Potência ativa que flui da barra 1 para a barra 2.

$P_{12comp}$  - Potência ativa que flui da barra 1 para a barra 2 para o caso de linha compensada.

$\psi_{a,b}$  - *Wavelet* mãe.

$Q_{12}$  - Potência reativa que flui da barra 1 para a barra 2.

$Q_{12comp}$  - Potência reativa que flui da barra 1 para a barra 2 para o caso de linha compensada.

$r_f$  - Resistência de falta.

$s_j(k)$  - Coeficientes escala na escala  $j$ .

$s_0(k)$  - Sinal original.

$\theta_f$  - Ângulo de incidência de falta.

$\theta_{12}$  - Diferença angular entre as tensões nas barras 1 e 2.

$U_n$  - Amplitude da componente harmônica  $n$ .

$v_A, v_B, v_C, v_N$  - Tensões de fase e de neutro no terminal de monitoramento.

$v_{ABf}, v_{BCf}, v_{CAf}$  - Tensões de linha no local da falta.

$x(k)$  - Sinal discreto.

$X_C$  - Reatância capacitiva do capacitor série.

$X_L$  - Reatância indutiva série da linha de transmissão.

$x_{rp}$  - Parcela de regime permanente de um sinal.

$x_t$  - Parcela de regime transitório de um sinal.

$w_j(k)$  - Coeficientes *wavelet* na escala  $j$ .

$\omega$  - Frequência angular fundamental.

## LISTA DE SIGLAS

**ATP** *Alternative Transient Program.*

**CS** Compensação/Capacitor Série.

**FACTS** *Flexible AC Transmission Systems* - Sistemas Flexíveis de Transmissão em Corrente Alternada.

**Falta AB** Falta entre as fases A e B.

**Falta ABC** Falta entre as fases A, B e C.

**Falta ABT** Falta entre as fases A e B e a terra.

**Falta AT** Falta entre a fase A e a terra.

**FPA** Filtro Passa-Alta.

**FPB** Filtro Passa-Baixa.

**GPS** *Global Positioning System.*

**Matlab** Matrix laboratory.

**MOV** *Metal Oxide Varistor.*

**QEE** Qualidade da Energia Elétrica.

**RDP** Registrador Digital de Perturbação.

**RNA** Rede Neural Artificial.

**RPROP** *Resilient Propagation*

**RTDS** *Real Time Digital Simulator* - Simulador digital em tempo real.

**TC** Transformador de Corrente.

**TPC** Transformador de Potencial Capacitivo.

**TDF** Transformada Discreta de Fourier.

**Tdq0** Transformada de Park.

**TF** Transformada Fourier.

**TOV** Teoria das Ondas Viajantes.

**TW** Transformada *Wavelet*

**TWC** Transformada *Wavelet* Contínua.

**TWD** Transformada *Wavelet* Discreta.

**TWDR** Transformada *Wavelet* Discreta Redundante.

# INTRODUÇÃO

Atualmente, a energia elétrica constitui um bem imprescindível para o desenvolvimento de uma nação. Dessa forma, a continuidade no seu fornecimento é importante, principalmente em se tratando de clientes industriais, os quais exigem muitas vezes que máquinas elétricas funcionem de forma ininterrupta em uma cadeia de produção. Porém, diversos distúrbios de natureza eletromagnética, nos quais se destacam as faltas, podem ser responsáveis por interrupções no fornecimento da energia elétrica, o que acarreta em enormes prejuízos sob as esferas econômica e social.

Devido à grande expansão e complexidade dos sistemas elétricos de potência, torna-se cada vez mais importante o desenvolvimento de relés de proteção mais rápidos e eficientes. A proteção de sistemas elétricos é fundamental para a preservação dos equipamentos e para a garantia da confiabilidade na operação do sistema, de forma que haja continuidade no fornecimento de energia elétrica. Um sistema de proteção eficiente e confiável deve detectar as faltas e isolar a parte defeituosa do sistema, mantendo intacta a parte restante.

As faltas em sistemas elétricos são consideradas como condições de anormalidade de operação, caracterizadas por desligamentos não programados em quaisquer dos seus componentes. As linhas de transmissão são os componentes mais susceptíveis à ocorrência de faltas, dado sua vasta dimensão, complexidade funcional e exposição ao tempo. As descargas atmosféricas são as principais causas das faltas em linhas, sendo, em determinadas situações, responsáveis por cerca de 62% do número de ocorrências (CUNHA, 2010). As faltas podem ainda ser causadas por falhas no isolamento de condutores, efeitos de ventos e chuvas fortes, atos de vandalismo, entre outras causas.

Quando uma falta ocorre em uma linha de transmissão, a mudança abrupta na tensão no ponto de falta gera impulsos eletromagnéticos de altas frequências, chamados ondas viajantes, as quais se propagam ao longo da linha em ambas as direções a partir do ponto de falta e

em velocidades de propagação próximas à velocidade da luz. Como consequência, transitórios induzidos pela falta com componentes de baixa e de alta frequência surgem em cada terminal da linha.

Os transitórios de falta de alta frequência contêm informações importantes acerca do tipo, localização, direção e instante de incidência de uma falta. Portanto, a análise desses transitórios pode auxiliar métodos para proteção ultra rápida de linhas de transmissão, tais como algoritmos para detecção, classificação e localização de faltas em tempo real. Porém, é necessário verificar os efeitos dos parâmetros de falta, tais como tipo, ângulo de incidência, resistência e localização de falta, sobre as características dos transitórios (COSTA, 2010).

Além dos parâmetros de falta, a análise dos parâmetros do sistema elétrico no desempenho dos sistemas de proteção também é importante, em que se destaca a compensação série em linhas de transmissão, que apresenta diversas vantagens operacionais aos sistemas de transmissão de energia elétrica, tais como: aumento da capacidade de transferência de potência, aumento das estabilidades transitória e em regime permanente e redução de perdas de potência e de quedas de tensão. Como desvantagem, a compensação série em linhas de transmissão pode ser responsável por falhas em métodos de localização de faltas baseados nos fasores de frequência fundamental. Essa técnica de compensação reativa pode incluir oscilações de frequências sub-harmônicas (frequências inferiores a 60 Hz) no sistema e inversões de tensão e corrente, o que afeta a operação de unidades de proteção de distância e direcional (OLIVEIRA, 2007). Porém, com relação aos transitórios de falta, é preciso uma análise detalhada sobre os efeitos da compensação série.

Há outros parâmetros que influenciam de forma decisiva nos métodos de localização de faltas, a exemplo da saturação dos transformadores de corrente (TC), que afeta fortemente a precisa estimação de fasores fundamentais (e, assim, afeta o desempenho de métodos de localização convencionais), e da frequência de amostragem, a qual afeta métodos baseados no princípio das ondas viajantes.

A avaliação do comportamento dos transitórios de alta frequência oriundos de faltas, em relação aos diversos parâmetros de falta, ao grau de compensação série e a outros parâmetros, a exemplo da saturação dos transformadores de corrente (TC), que influenciam de forma decisiva os métodos de localização de faltas baseados na estimação dos fasores fundamentais, e da

frequência de amostragem, que afetam métodos baseados no princípio das ondas viajantes, é imprescindível para verificação da viabilidade de técnicas de detecção e localização de faltas baseadas nas componentes de altas frequências (ondas viajantes) para aplicação prática em relés de proteção de linhas com e sem compensação série.

## 1.1 MOTIVAÇÃO

A localização de faltas em linhas de transmissão realiza um papel importante nos serviços de transmissão de energia elétrica. Um método de localização de faltas preciso pode minimizar a duração de desligamentos causados por faltas permanentes, haja visto que o trabalho das equipes de manutenção é reduzido quando se tem uma boa estimativa do ponto de falta.

Nas últimas décadas, diversos algoritmos de localização de faltas em linhas de transmissão baseados nos conteúdos de alta frequência dos sinais de tensão e corrente foram propostos. Essas técnicas se apresentaram como boas alternativas às técnicas convencionais, que consistem basicamente na estimação de fasores fundamentais. Um bom método de localização de faltas necessita ser imune tanto quanto possível aos parâmetros de falta e aos parâmetros do sistema elétrico, dentre os quais se destacam as impedâncias de sequências das linhas, o grau de carregamento e o grau de compensação série, sendo este último um dos focos de análise deste trabalho.

O emprego da compensação série em linhas de transmissão, ao passo em que traz benefícios técnicos e econômicos ao sistema de transmissão, acarreta falhas na maioria dos localizadores de faltas que se baseiam na estimação das componentes de frequência fundamental, devido a variações que ocorrem nos perfis de tensões e correntes. Com isso, faz-se necessário um estudo acerca dos efeitos da compensação série sobre os transitórios de falta de alta frequência e os métodos de localização baseados nas ondas viajantes, a fim de se verificar se estes métodos se constituem como boas alternativas às técnicas convencionais para emprego em linhas compensadas.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral desta dissertação é avaliar a influência da compensação série em linhas de transmissão e dos parâmetros de falta, tais como tipo, ângulo de incidência, resistência e localização de falta, sobre o comportamento dos transitórios nas tensões e correntes quando da ocorrência de faltas. Além disso, objetiva-se também a verificação do efeito destes parâmetros no desempenho de métodos de proteção convencionais e baseado na teoria das ondas viajantes.

Os objetivos específicos são:

- Investigar os efeitos do ângulo de incidência de falta nos transitórios de falta para linhas de transmissão sem e com compensação série por meio da transformada *wavelet*;
- Investigar os efeitos da resistência de falta nos transitórios de falta para linhas de transmissão sem e com compensação série por meio da transformada *wavelet*;
- Investigar os efeitos da distância de falta nos transitórios de falta para linhas de transmissão sem e com compensação série por meio da transformada *wavelet*;
- Investigar os efeitos do tipo de falta nos transitórios de falta para linhas de transmissão sem e com compensação série por meio da transformada *wavelet*;
- Avaliar a influência do grau de compensação série da linha de transmissão sobre os transitórios de falta por meio da transformada *wavelet*;
- Implementar dois métodos de localização de faltas: um método convencional baseado na estimação das componentes de frequência fundamental e outro baseado na teoria das ondas viajantes, usando as *wavelets*;
- Realizar uma análise de sensibilidade desses algoritmos acerca dos parâmetros que influenciam nos seus desempenhos;
- Observar se os métodos de localização de faltas baseados nas altas frequências podem ser uma alternativa aos métodos convencionais em linhas de transmissão com compensação série.

### 1.3 CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO

A principal contribuição desta dissertação é o estudo realizado acerca dos efeitos dos parâmetros de falta e da compensação série sobre os transitórios de alta frequência e sobre os métodos de localização de faltas convencional e baseado nas ondas viajantes. Esse estudo de caráter comparativo pode ser um indicativo da viabilidade, ou não, de métodos baseados na ondas viajantes, mais especificamente usando as *wavelets*, visto que métodos convencionais costumam apresentar falhas quando a compensação série é empregada.

No que diz respeito à publicação de resultados preliminares desta dissertação, o seguinte artigo foi publicado:

- SOBRINHO, A. H. P.; COSTA, F. B.; SOUZA, B. A. The Effects of the Fault Inception Angle in Fault-Induced Transients on Non-Compensated and Series Compensated Transmission Lines. *International Conference on Power Systems Transients (IPST 2013)*, Vancouver, Canada, July 18-20, 2013.

### 1.4 METODOLOGIA

Inicialmente, uma revisão bibliográfica sobre os principais trabalhos relacionados com os temas predominantes desta dissertação foi realizada. O estudo da fundamentação teórica das *wavelets*, compensação série em linhas de transmissão, estimação fasorial e teoria das ondas viajantes também foi realizado.

Os resultados quantitativos da análise da influência dos parâmetros de falta e da compensação série sobre os transitórios eletromagnéticos quando da ocorrência de uma falta foram tomados por meio de simulações de faltas no simulador digital RTDS<sup>TM</sup> (*Real Time Digital Simulator*) para um sistema de transmissão simplificado de 500 kV, em que diversas bases de dados para os parâmetros de falta e para a compensação série foram geradas. O comportamento dos transitórios foi avaliado por meio de suas energias, que, por sua vez, foram extraídas por meio das energias dos coeficientes *wavelet* da Transformada *Wavelet* Discreta Redundante (TWDR), implementada no ambiente Matlab.



Para complementar alguns resultados apontados por essa análise, dois métodos de localização de faltas propostos na literatura e de características diferentes, um baseado na frequência fundamental e outro baseado na teoria das ondas viajantes, foram implementados de forma *offline* no Matlab. Esses métodos tiveram seus desempenhos avaliados por meio de variações nos parâmetros de falta, no grau de compensação série e na frequência de amostragem. Além disso, foi avaliado o efeito da saturação do transformador de corrente. Para avaliação dos métodos de localização de faltas implementados, um sistema de transmissão simplificado de 230 kV foi modelado e simulado no programa ATP (*Alternative Transient Program*).

## 1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação é organizada da seguinte forma:

- Nos Capítulos 2 e 3 são apresentadas fundamentações teóricas da compensação série em linhas de transmissão e da transformada *wavelet*, respectivamente;
- No Capítulo 4 é apresentada uma revisão bibliográfica contendo alguns dos principais trabalhos sobre temas importantes nesta dissertação, como transformada *wavelet* e localização de faltas;
- No Capítulo 5 são realizadas as análises dos efeitos dos parâmetros de falta e do grau de compensação série em relação aos transitórios induzidos por faltas em linhas de transmissão;
- No Capítulo 6 são apresentadas as fundamentações teóricas dos métodos de localização de faltas avaliados neste trabalho;
- No Capítulo 7 é realizada uma análise de sensibilidade dos métodos avaliados frente aos diversos parâmetros de falta, grau de compensação série, frequência de amostragem e saturação do TC;
- No Capítulo 8 são apresentadas as conclusões e perspectivas de continuação deste trabalho.

# FUNDAMENTOS DA COMPENSAÇÃO SÉRIE EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Neste capítulo são apresentados conceitos básicos acerca da compensação série fixa em linhas de transmissão. As principais vantagens e desvantagem desta técnica de compensação reativa são abordadas, principalmente no que diz respeito à proteção dos sistemas elétricos de potência.

## 2.1 INTRODUÇÃO

A necessidade da transmissão, em longa distância, de grandes blocos de potência por meio de linhas de transmissão tem crescido acentuadamente nos últimos anos. Além disso, a melhoria na qualidade e na eficiência em transmissão da energia elétrica tem sido uma questão bastante discutida nas últimas décadas. Nesse período, muitos estudos têm sido direcionados para essa área, com o objetivo de garantir sistemas elétricos cada vez mais confiáveis, eficientes e econômicos.

São muitos os fatores que interferem na Qualidade da Energia Elétrica (QEE), ou seja, que levam a discrepâncias nos sinais de tensão e corrente e na frequência da rede elétrica. Dentre esses, destacam-se:

- Faltas;
- Afundamentos de tensão;
- Transitórios originados por manobras de bancos de capacitores ou por energizações e desligamentos de linhas de transmissão;
- Distorção da onda de tensão (harmônicas, *notching* e ruídos);
- Desequilíbrio de tensões.

Para garantir aos sistemas de energia elétrica uma maior estabilidade, confiabilidade e economia, emprega-se atualmente a tecnologia FACTS (do inglês *Flexible AC Transmission Systems*, traduzido por Sistemas Flexíveis de Transmissão em Corrente Alternada), que são equipamentos baseados na Eletrônica de Potência para controle de fluxo de carga em rotas estabelecidas para as linhas. Dessa forma, consegue-se uma maior flexibilidade de controle dos sistemas elétricos, ou seja, tem-se uma maior capacidade de alteração rápida e contínua dos parâmetros que controlam a dinâmica de funcionamento do sistema elétrico, além de um aumento na capacidade de transmissão de potência nas linhas.

Com o emprego de sistemas sofisticados e com tecnologia de ponta, como os FACTS, realiza-se uma otimização da infraestrutura existente do sistema de transmissão, a fim de se transmitir potência em condições ótimas e com máxima qualidade e eficiência. A compensação reativa por meio de FACTS coloca o limite de estabilidade mais próximo da limitação térmica dos sistemas elétricos, explorando melhor sua capacidade sem a necessidade de construção de novas linhas.

## 2.2 COMPENSAÇÃO SÉRIE FIXA EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

### 2.2.1 Considerações Gerais

As grandes quedas de tensão em linhas de transmissão se devem, em grande parte, aos seus parâmetros série (resistência e reatância indutiva). A reatância indutiva é uma das responsáveis pelo ângulo de potência na linha e, assim, pela estabilidade transitória no sistema de transmissão. Além disso, a transmissão de potência ativa em uma linha de transmissão é limitada principalmente pela sua impedância série.

A compensação série fixa visa a redução da impedância da linha, ocasionando, dessa forma, um aumento na capacidade de transferência de potência para valores mais próximos da capacidade térmica dos condutores da linha. A compensação série oferece diversas vantagens para as redes de transmissão de energia elétrica, tais como (ANDERSON; FARMER, 1996):

- Melhoria na qualidade e eficiência de transmissão;
- Aumento da capacidade de transmissão de potência ativa, devido ao aumento do limite da estabilidade transitória;

- Redução dos custos de transmissão, devido à diminuição da necessidade de construção de novas linhas;
- Melhora no balanço de potência reativa;
- Redução das perdas elétricas;
- Repartição da carga ativa entre linhas em paralelo.

Por outro lado, a utilização da compensação série também traz algumas desvantagens, tais como (ANDERSON; FARMER, 1996):

- Impacto na proteção de distância convencional de linhas compensadas, devido à introdução de frequências sub-harmônicas que dificultam a obtenção dos fasores fundamentais de tensão e corrente;
- Impacto na proteção direcional de linhas de transmissão, devido à dificuldade da determinação da direção da corrente de falta, que pode apresentar ângulo capacitivo em linhas compensadas;
- Ressonância subsíncrona: introdução de oscilações de baixa frequência em ressonância com as oscilações dos rotores dos geradores, havendo possibilidade de ruptura dos eixos;
- Correntes de falta elevadas nas proximidades da instalação de bancos de capacitores;
- Problemas de auto-excitação de geradores.

A compensação série pode ser do tipo fixa (utilizada a partir de 1950) ou controlável (a partir de 1997) (ALTUVE *et al.*, 2009).

### 2.2.2 Grau de Compensação

O grau de compensação ( $k$ ) associado à compensação série fixa é definido como a razão entre as reatâncias capacitiva  $X_C$  e indutiva  $X_L$  de uma linha (KUMAR *et al.*, 1970), ou seja,

$$k = \frac{X_C}{X_L}, \quad (2.1)$$

em que  $X_C = \frac{1}{\omega C}$  e  $X_L = \omega L$ , sendo  $\omega = 2\pi f$ ,  $f = 60$  Hz,  $C$  o valor da capacitância série empregada e  $L$  o valor da indutância da linha a ser compensada.

Da Equação 2.1, pode-se relacionar o valor do grau de compensação com a frequência e com os valores de  $L$  e  $C$ , como segue:

$$k = \frac{1}{\omega^2 LC}. \quad (2.2)$$

Na prática, o valor do grau de compensação empregado está entre 30% e 70%. Essa limitação é devida a fatores como transitórios de chaveamento (sobretensões transitórias), ressonância subsíncrona e estabilidade subharmônica (OLIVEIRA, 2007). Valores de grau de compensação superiores a 70% podem ocasionar oscilações entre a rede elétrica e os eixos das máquinas em unidades geradoras. Como o grau de compensação apresenta uma relação inversamente proporcional com o valor requerido para o capacitor série (Equação 2.2), compensar menos que 30% da reatância indutiva da linha de transmissão pode ser considerado como uma opção economicamente inviável.

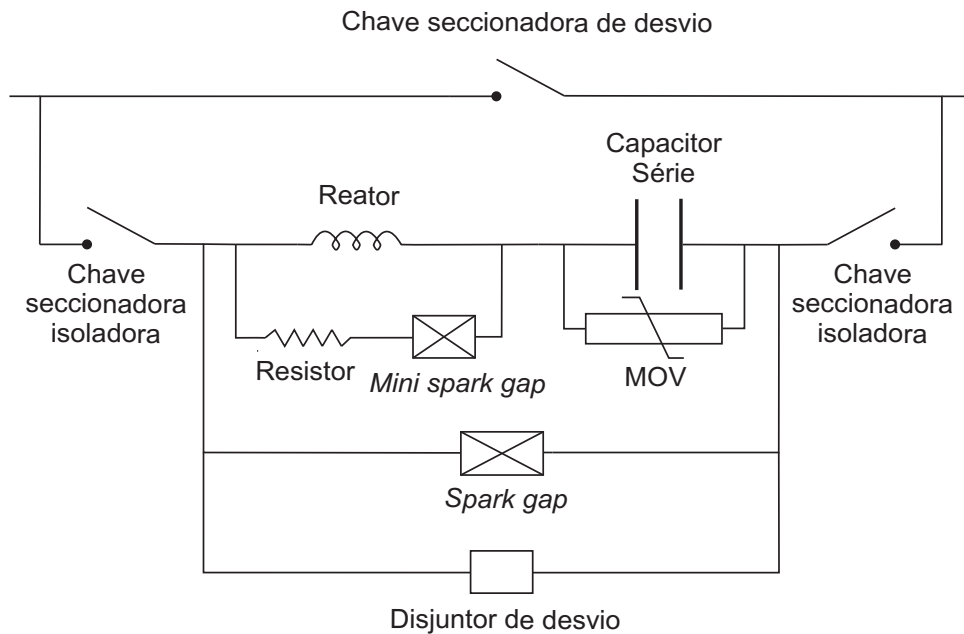
### 2.2.3 O Sistema de Proteção da Compensação Série Fixa

Para a utilização da compensação série fixa, é necessário um estudo detalhado acerca da proteção aos capacitores série quando da ocorrência de falhas nas linhas de transmissão ou, até mesmo, nos próprios capacitores. Para a proteção contra sobrecorrentes e sobretensões na compensação série, geralmente são empregados Varistores de Óxido Metálicos (MOV, do inglês *Metal Oxide Varistors*) (ALTUVE *et al.*, 2009). Os MOV têm a função de oferecer um caminho de menor resistência para a corrente elétrica quando a tensão no capacitor série atinge ou ultrapassa limiares (geralmente 2,3 vezes o valor nominal). A proteção por MOV apresenta um limite, relacionado à sua capacidade de absorção de energia, a qual pode ser responsável por elevações de temperatura no elemento não-linear.

Além dos MOV, centelhadores e disjuntores de desvio também são empregados para a proteção de capacitores série. Os centelhadores (ou *spark gaps*) são conjuntos de eletrodos de potência cuja função é a proteção dos MOV e dos capacitores série quando a energia absorvida pelos varistores ultrapassa a sua capacidade. Os disjuntores de desvio são dispositivos de

acionamento manual, ou automático, que visam desviar (função de *bypass*) a corrente elétrica de todos os dispositivos mencionados anteriormente (NEKOUBIN, 2011).

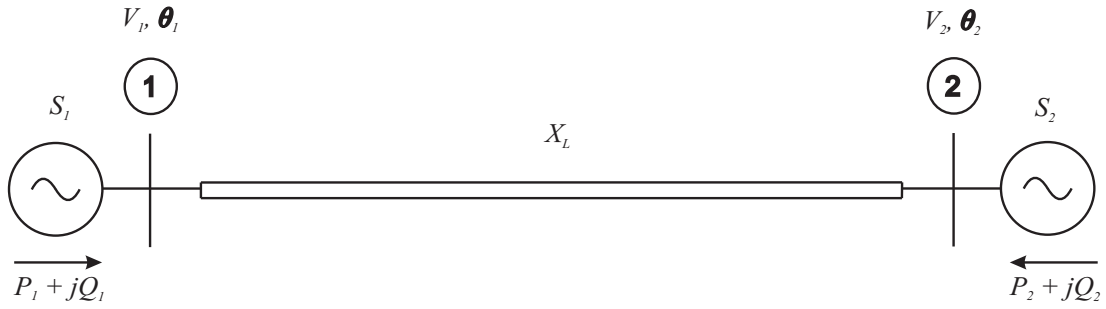
O arranjo dos capacitores série e MOV é disposto em série com um circuito de amortecimento, o qual é composto por um reator de núcleo de ar em paralelo com o arranjo série de um resistor de carbono e um pequeno centelhador (*mini spark gap*). Uma chave seccionadora de desvio e duas chaves seccionadoras de isolamento (para funções de manobra de retirada e colocação do capacitor série no sistema) compõem o sistema de proteção da compensação série fixa. Um diagrama elétrico geral e simplificado dos elementos da compensação série é apresentado na Figura 2.1.



**Figura 2.1.** Diagrama elétrico simplificado da compensação série fixa.

#### 2.2.4 Considerações sobre o Fluxo de Potência para a Compensação Série

Na Figura 2.2 é ilustrado um sistema de transmissão simplificado, composto por duas fontes ( $S_1$  e  $S_2$ ) e uma linha de transmissão com reatância série  $X_L$ . Para esse sistema, tem-se que as potências ativa e reativa transmitidas ao longo da linha são (STEVENSON JR.; GRAINGER, 1994):



**Figura 2.2.** Sistema de transmissão de energia elétrica simplificado.

$$P_{12} = \frac{V_1 V_2}{X_L} \text{sen}(\theta_{12}), \quad (2.3)$$

$$Q_{12} = \frac{V_1^2}{X_L} - \frac{V_1 V_2}{X_L} \text{cos}(\theta_{12}), \quad (2.4)$$

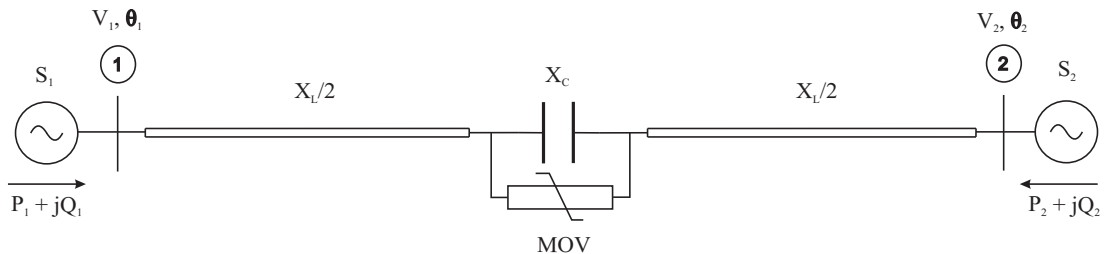
em que  $P_{12}$  e  $Q_{12}$  são, respectivamente, as potências ativa e reativa transmitidas da barra 1 para a barra 2 e  $\theta_{12} = \theta_1 - \theta_2$  é a diferença angular entre as tensões nessas barras.

Para o caso da inclusão da compensação série na linha, como ilustrado na Figura 2.3, as potências ativa e reativa transferidas ao longo desta são:

$$P_{12comp} = \frac{V_1 V_2}{X_L - X_C} \text{sen}(\theta_{12}), \quad (2.5)$$

$$Q_{12comp} = \frac{V_1^2}{X_L - X_C} - \frac{V_1 V_2}{X_L - X_C} \text{cos}(\theta_{12}), \quad (2.6)$$

em que  $P_{12comp}$  e  $Q_{12comp}$  são, respectivamente, as potências ativa e reativa transmitidas da barra 1 para a barra 2 para o caso da linha com compensação série e  $X_C$  é a reatância do capacitor série empregado.



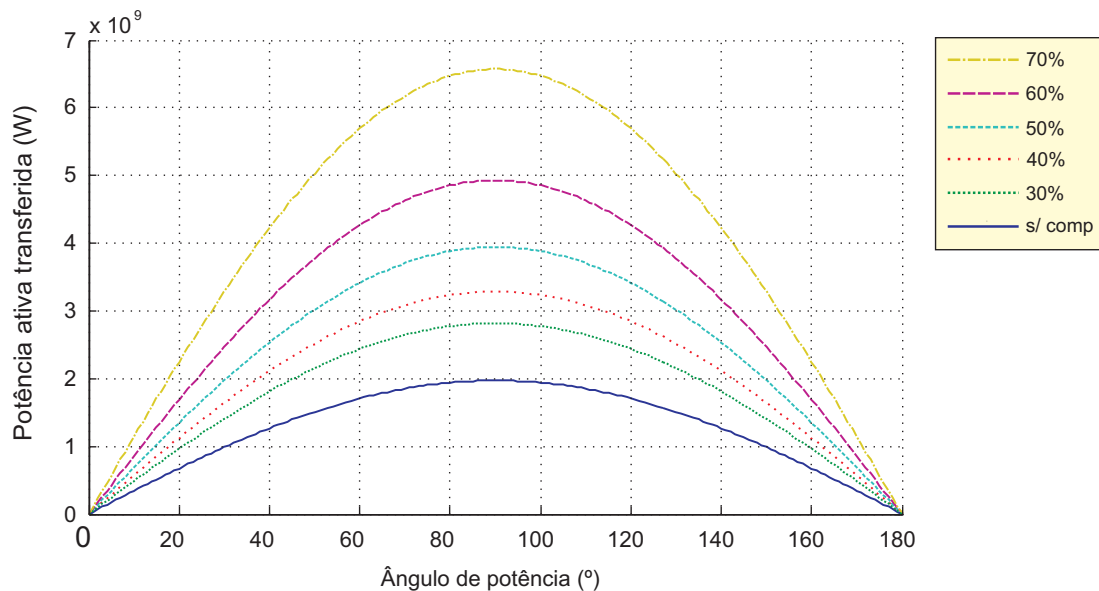
**Figura 2.3.** Sistema de transmissão de energia elétrica simplificado com a presença da compensação série no meio da linha.

As Equações 2.5 e 2.6 podem ser reescritas em função do grau de compensação  $k$  como:

$$P_{12comp} = \frac{V_1 V_2}{X_L(1-k)} \text{sen}(\theta_{12}), \quad (2.7)$$

$$Q_{12comp} = \frac{V_1^2}{X_L(1-k)} - \frac{V_1 V_2}{X_L(1-k)} \text{cos}(\theta_{12}). \quad (2.8)$$

Supondo-se que as tensões nas barras 1 e 2 sejam  $V_1 = V_2 = 500$  kV e que a reatância série da linha de transmissão seja  $X_L = 126,8 \Omega$ , as curvas de transferência de potência ativa em função do ângulo de potência ( $\theta_{12}$ ) para a linha não compensada (Equação 2.3) e para os graus de compensação série  $k = \{30\%, 40\%, 50\%, 60\% \text{ e } 70\%\}$  (Equação 2.7) são ilustradas na Figura 2.4.



**Figura 2.4.** Efeito do grau de compensação na capacidade de transferência de potência em uma linha de transmissão.

De acordo com a Figura 2.4, a linha sem compensação série é capaz de transferir, no máximo, cerca de 2 GW de potência ativa entre as barras 1 e 2, enquanto que, para um grau de compensação de 50%, por exemplo, essa capacidade é quase dobrada. Dessa forma, a compensação série atua na linha de transmissão de forma a reduzir a sua impedância aparente e, conseqüentemente, aumentar a capacidade de máxima transferência de potência à medida em que o grau de compensação aumenta.



### 2.2.5 Efeito da Localização da Compensação Série Fixa na Linha de Transmissão

A maneira como o banco de capacitores série está localizado na linha é um fator importante e que interfere diretamente em aspectos técnicos e econômicos do sistema elétrico de potência. A seguir, são brevemente descritas as principais configurações da compensação série e suas características mais relevantes:

- **Compensação série fixa em um dos terminais da linha:** esta é a configuração mais utilizada no sistema elétrico, sendo também a mais econômica, já que a estrutura da subestação pode ser aproveitada para a instalação desse tipo de compensação série.
- **Compensação série fixa no meio da linha:** para esta configuração, a inversão de corrente deixa de ocorrer. O fenômeno da inversão de tensão é raro e ocorre somente para graus de compensação acima de 50%. Porém, problemas de alcance, coordenação e transitórios no sistema serão incluídos. Esse tipo de configuração é, de longe, o mais caro, já que uma nova subestação deverá ser construída para receber as suas instalações. Além disso, os benefícios com a redução da possibilidade de ocorrência dos fenômenos de inversão de tensão e corrente devem ser contrabalanceados com o aumento da possibilidade da ocorrência dos demais fenômenos citados anteriormente em piores proporções.
- **Compensação série fixa dividida nos dois terminais da linha:** neste tipo de configuração, o grau de compensação total geralmente é menor que o utilizado para a compensação em um único ponto. Como consequência, a ocorrência de fenômenos de inversão de tensão e corrente e outros problemas é menos susceptível, reduzindo-se os problemas relacionados aos esquemas de proteção. Esse modelo de compensação série deve ser avaliado técnica e economicamente, pois apesar da redução dos problemas relacionados aos fenômenos anteriormente mencionados, o custo dessa configuração é maior quando comparado ao da instalação da compensação série em um único ponto.

### 2.3 RESUMO DO CAPÍTULO

Este capítulo apresentou uma breve descrição dos principais aspectos relacionados ao emprego da compensação série fixa em linhas de transmissão. Foi observado que, apesar das diversas vantagens, dentre as quais se destacam o aumento da capacidade de transferência de potência e da estabilidade transitória e em regime permanente, a compensação série traz alguns problemas para o correto funcionamento dos relés de proteção (baseados na frequência fundamental). Um simples exemplo numérico foi utilizado para ilustrar o emprego da compensação série e alguns aspectos relativos à sua localização na linha foram abordados.

## CAPÍTULO 3

# FUNDAMENTOS DA TRANSFORMADA *WAVELET*

Neste capítulo é apresentada uma fundamentação teórica sobre a transformada *wavelet* (TW), destacando-se suas versões contínua e discretas. A energia dos coeficientes *wavelet*, utilizada na análise dos transitórios nesta dissertação, é também abordada.

### 3.1 INTRODUÇÃO

A TW fornece uma análise de sinais nos domínios do tempo e da frequência, em escalas variáveis. Essa ferramenta foi introduzida por J. Morlet e teve sua base matemática formalizada pelo físico teórico Alex Grossmann. Ela surgiu para substituir, em diversas aplicações, a transformada de Fourier (TF), que não é tão eficaz e precisa na análise de sinais cujos conteúdos de frequência variam rapidamente ao longo do tempo (BRITO, 2001).

A TW é uma ferramenta matemática para decomposição de um sinal em diferentes bandas de frequência por um processo de escalonamento e deslocamento sobre uma função base, chamada *wavelet* mãe. Com relação às versões discretas, a transformada *wavelet* discreta (TWD) e a transformada *wavelet* discreta redundante (TWDR) são usadas em inúmeras aplicações de análise de distúrbios em sistemas elétricos de potência, sendo ambas comumente implementadas como bancos de filtros.

### 3.2 A TRANSFORMADA *WAVELET* CONTÍNUA

A transformada *wavelet* contínua (TWC) mapeia um sinal do domínio do tempo para o domínio do tempo-frequência. Dado um sinal contínuo no domínio do tempo  $f(t)$ , a TWC é definida como sendo:

$$F(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot \psi_{a,b}(t) dt, \quad (3.1)$$

em que  $\psi_{a,b}(t)$  é a *wavelet* mãe, função base definida como

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad (3.2)$$

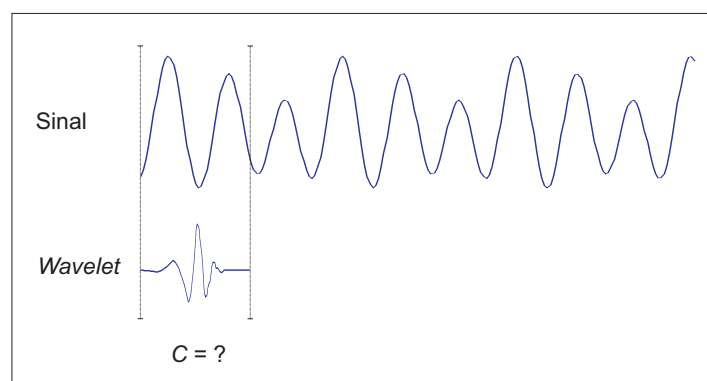
em que os parâmetros  $a$  e  $b$  representam variações em  $\Re$  para fatores de escala e de deslocamento, respectivamente. O fator  $\frac{1}{\sqrt{|a|}}$  é usado para efeito de normalização. Com isso, a TWC de  $f(t)$  se torna:

$$F(a, b) = \frac{1}{\sqrt{\|a\|}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt. \quad (3.3)$$

A Equação 3.3 indica que a TWC mapeia uma função unidimensional no domínio do tempo para uma outra função, que é bidimensional, a uma escala  $a$  e deslocamento  $b$ . A TWC é a integral, em todo o intervalo de definição, da função multiplicada pelas versões escalonadas e deslocadas da *wavelet* mãe (BRITO, 1996).

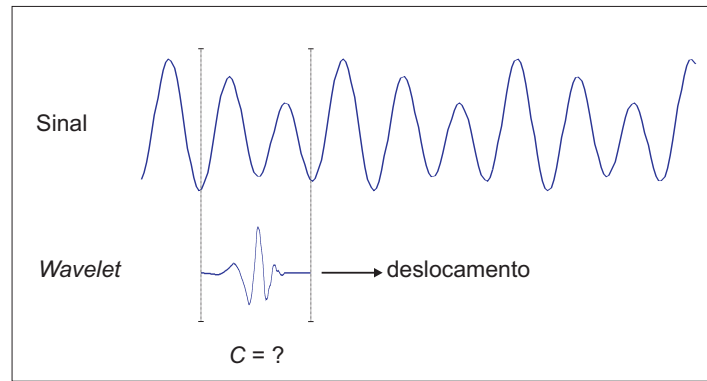
A seguir, é apresentado o procedimento para a obtenção dos coeficientes *wavelet* contínuos de um sinal, usando-se a *wavelet* mãe Daubechies 4, ou db(4).

- 1º Passo: Alinham-se os trechos iniciais do sinal analisado e da *wavelet* mãe escolhida, como apresentado na Figura 3.1;
- 2º Passo: Calcula-se o grau de correlação  $C$  entre as duas funções acima. O valor de  $C$  será tão maior quão mais similares forem essas funções;



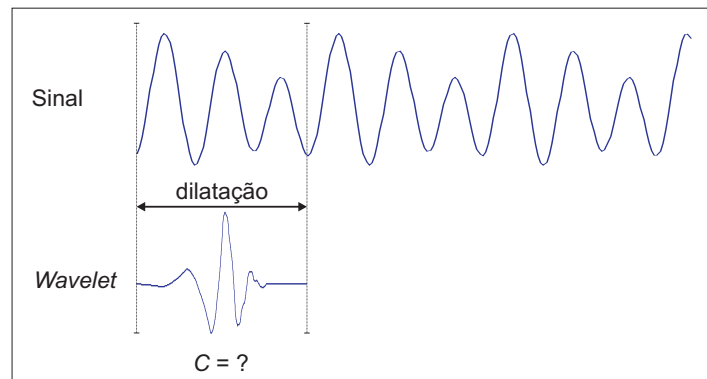
**Figura 3.1.** *Wavelet* mãe alinhada com o sinal.

- 3º Passo: Procedem-se o deslocamento para a direita da *wavelet* mãe em relação ao sinal analisado e repetem-se os passos 1 e 2 durante toda a definição deste sinal, tal como ilustrado na Figura 3.2;



**Figura 3.2.** Operação contínua de deslocamento.

- 4º Passo: Procede-se a operação de escala (dilatação) da *wavelet* mãe, como representado na Figura 3.3, e repetem-se os passos de 1 a 3 durante toda a definição do sinal analisado. Este passo é realizado para todas as escalas;



**Figura 3.3.** Operação contínua de dilatação.

Ao término desse procedimento, obtêm-se os coeficientes da TWC em diferentes escalas, produzidos por diferentes trechos do sinal analisado.

### 3.3 A TRANSFORMADA WAVELET DISCRETA

Embora a TWC seja de grande interesse teórico, a sua discretização é necessária para aplicações práticas em sistemas elétricos de potência (BRITO, 1996). Na TWD são discretizados os parâmetros de escala  $a$  e de translação  $b$ , os quais se tornam:

$$a = a_0^m, \quad (3.4)$$

$$b = na_0^m b_0, \quad (3.5)$$

com  $m$  e  $n \in \mathbb{Z}$ ,  $a_0 > 1$  e  $b_0 \neq 0$ . Portanto, a definição da TWD, de acordo com as Equações 3.3, 3.4 e 3.5, é

$$F(m, n) = \frac{1}{\sqrt{(\|a_0^m\|)}} \sum_n f(n) \psi \left( \frac{t - nb_0 a_0^m}{a_0^m} \right), \quad (3.6)$$

em que  $\psi$  é a *wavelet* mãe.

### 3.3.1 O Algoritmo de Mallat para a TWD

O algoritmo de Mallat é um método rápido e eficiente, baseado na análise multiresolução, para cálculo da TWD (MALLAT, 1989). A TWD, para cada escala, pode ser interpretada como um banco de filtros passa-baixas (FPB) e passa-altas (FPA), os quais possuem coeficientes  $g(k)$  e  $h(k)$ , respectivamente, que dependem da *wavelet* mãe utilizada. Os coeficientes escala ( $s_j(k)$ ) e *wavelet* ( $w_j(k)$ ), na escala  $j$ , são matematicamente definidos por (PERCIVAL; WALDEN, 2000):

$$s_j(k) = \sum_n g(n - 2k) s_{j-1}(n), \quad (3.7)$$

$$w_j(k) = \sum_n h(n - 2k) s_{j-1}(n). \quad (3.8)$$

O processo de subamostragem (redução pela metade no número de amostras dos sinais obtidos após filtragens) já está incorporado às Equações 3.7 e 3.8. Os coeficientes escala para uma escala  $j$  são obtidos pela convolução do FPB  $g$  com os coeficientes escala na escala  $j - 1$ , enquanto que os coeficientes *wavelet* são obtidos pela convolução do FPA  $h$  com os coeficientes escala na escala  $j - 1$ . Por exemplo, para a primeira escala ( $j = 1$ ), os coeficientes escala e *wavelet* são:

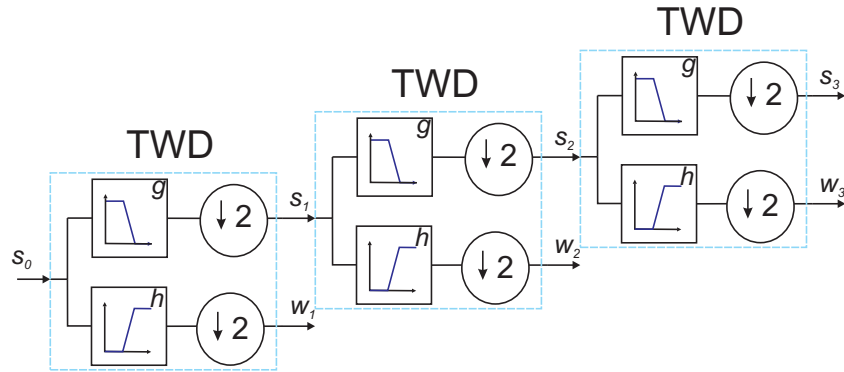
$$s_1(k) = \sum_n g(n - 2k) s_0(n), \quad (3.9)$$

$$w_1(k) = \sum_n h(n - 2k) s_0(n), \quad (3.10)$$

em que  $s_0$  representa as amostras do sinal original.

O procedimento realizado pelas Equações 3.9 e 3.10 pode ser repetido diversas vezes. Porém, como mencionado anteriormente, existe uma limitação na TWD, devido ao processo de subamostragem. O número de amostras do sinal original ( $k_t$ ) deve ser uma potência de  $2^J$  para que a TWD seja aplicada até a escala  $J$ . Para uma frequência de amostragem  $f_s$ , o espectro do

sinal original fica limitado a  $[0 - f_s/2]$ . Como cada escala da TWD divide ao meio o espectro do sinal de entrada no banco de filtros, em uma terceira escala, o espectro de frequência para os coeficientes escala limita-se a  $[0 - f_s/16]$ ; já para os coeficientes *wavelet*, o espectro fica limitado a  $[f_s/16 - f_s/8]$ . Esse esquema é representado na Figura 3.4, enquanto que os dados de número de amostras e espectro de frequência são mostrados na Tabela 3.1 para o sinal original e coeficientes escala e *wavelet* até a terceira escala. Os blocos com o símbolo  $\downarrow 2$  representam o processo de subamostragem por dois.



**Figura 3.4.** Decomposição em três estágios da TWD.

**Tabela 3.1.** Número de amostras e espectro de frequência a partir da aplicação de três estágios da TWD sobre um sinal original.

Sinal	Número de amostras	Espectro de frequência (Hz)
$s_0$	$k_t$	$[0 - f_s/2]$
$s_1$	$k_t/2$	$[0 - f_s/4]$
$w_1$	$k_t/2$	$[f_s/4 - f_s/2]$
$s_2$	$k_t/4$	$[0 - f_s/8]$
$w_2$	$k_t/4$	$[f_s/8 - f_s/4]$
$s_3$	$k_t/8$	$[0 - f_s/16]$
$w_3$	$k_t/8$	$[f_s/16 - f_s/8]$

O número máximo de decomposições  $J_{max}$  da TWD depende do número total de amostras do sinal original  $k_t$ , como segue:

$$k_t = 2^{J_{Max}-1}. \quad (3.11)$$

### 3.3.2 Algoritmo Piramidal para Cálculo da TWD

Devido ao processo de subamostragem, os coeficientes escala  $s_1$  e *wavelet*  $w_1$ , para a primeira escala, obtidos a partir de um sinal  $x$  com  $k_t$  amostras, possuem  $k_t/2$  amostras cada (ver

Tabela 3.1). Considerando-se filtros *wavelet* que possuam  $L$  coeficientes, o número mínimo de amostras do sinal original deve ser  $k_t \geq L$ . A *wavelet* mãe db(4) possui como coeficientes dos FPB e FPA(DAUBECHIES, 1992):

$$\{g(1), g(2), g(3), g(4)\} = \left\{ \frac{1 + \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, \frac{3 + \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, \frac{3 - \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, \frac{1 - \sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \right\}, \quad (3.12)$$

$$\{h(1), h(2), h(3), h(4)\} = \{g(4), -g(3), g(2), -g(1)\}. \quad (3.13)$$

Os coeficientes  $s_1$  e  $w_1$  calculados pelo algoritmo piramidal são:

$$s_1 = A_1 x, \quad (3.14)$$

$$w_1 = B_1 x, \quad (3.15)$$

em que  $A_1$  e  $B_1$  são matrizes de ordem  $(k_t/2) \times k_t$ .

De acordo com Percival & Walden (2000), as matrizes  $A_1$  e  $B_1$  para a *wavelet* mãe db(4) são

$$A_1 = \begin{bmatrix} g(3) & g(4) & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & g(1) & g(2) \\ g(1) & g(2) & g(3) & g(4) & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g(1) & g(2) & g(3) & g(4) & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & g(1) & g(2) & g(3) & g(4) \end{bmatrix}, \quad (3.16)$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} h(3) & h(4) & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & h(1) & h(2) \\ h(1) & h(2) & h(3) & h(4) & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & h(1) & h(2) & h(3) & h(4) & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & h(1) & h(2) & h(3) & h(4) \end{bmatrix}. \quad (3.17)$$

As matrizes  $A_1$  e  $B_1$  são matrizes circulantes, devido ao fato de serem formadas por deslocamentos circulares dos elementos na sua primeira linha. O processo de subamostragem é incorporado às matrizes pelos dois deslocamentos existentes de uma linha para outra. Portanto, as Equações 3.14 e 3.15 podem ser reescritas como:

$$s_1 = \begin{bmatrix} g(3) & g(4) & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & g(1) & g(2) \\ g(1) & g(2) & g(3) & g(4) & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g(1) & g(2) & g(3) & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & g(1) & g(2) & g(3) & g(4) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(1) \\ x(2) \\ x(3) \\ \vdots \\ x(k_t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_1(1) \\ s_1(2) \\ s_1(3) \\ \vdots \\ s_1(k_t/2) \end{bmatrix}, \quad (3.18)$$



$$w_1 = \begin{bmatrix} h(3) & h(4) & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & h(1) & h(2) \\ h(1) & h(2) & h(3) & h(4) & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & h(1) & h(2) & h(3) & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & h(1) & h(2) & h(3) & h(4) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(1) \\ x(2) \\ x(3) \\ \vdots \\ x(k_t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_1(1) \\ w_1(2) \\ w_1(3) \\ \vdots \\ w_1(k_t/2) \end{bmatrix}. \quad (3.19)$$

O algoritmo piramidal é inicialmente implementado a partir da criação das matrizes  $A_1$  e  $B_1$ , as quais dependem dos coeficientes dos FPB e FPA, respectivamente, para a *wavelet* mãe escolhida e do número de amostras do sinal analisado. Os coeficientes escala e *wavelet* são obtidos pela multiplicação dessas matrizes pelos vetores de amostras do sinal original, para a primeira escala, ou pelos coeficientes escala da escala  $j - 1$  para uma escala  $j$ .

### 3.3.3 Algoritmo Piramidal para Cálculo da TWDR

Ao contrário do que ocorre na TWD, o processo de subamostragem não está presente na TWDR (PERCIVAL; WALDEN, 2000). Isso indica que a TWDR é mais apropriada para algumas aplicações em sistemas elétricos de potência, principalmente na detecção de ondas viajantes quando da ocorrência de distúrbios em linhas de transmissão (COSTA, 2010) e na localização de faltas baseada nos conteúdos de alta frequência das tensões e correntes (COSTA; SOUZA, 2011).

Os coeficientes dos filtros escala  $\tilde{g}(l)$  e dos filtros *wavelet*  $\tilde{h}(l)$  da TWDR são obtidos a partir dos filtros escala  $g(l)$  e *wavelet*  $h(l)$  da TWD, como sendo (PERCIVAL; WALDEN, 2000):

$$\tilde{g}(l) = g(l)/\sqrt{2}, \quad (3.20)$$

$$\tilde{h}(l) = h(l)/\sqrt{2}. \quad (3.21)$$

Tomando-se como exemplo a *wavelet* mãe db(4), de acordo com as Equações 3.12 e 3.13, os coeficientes dos filtros escala e *wavelets* para a TWDR são

$$\{\tilde{g}(1), \tilde{g}(2), \tilde{g}(3), \tilde{g}(4)\} = \left\{ \frac{1 + \sqrt{3}}{8}, \frac{3 + \sqrt{3}}{8}, \frac{3 - \sqrt{3}}{8}, \frac{1 - \sqrt{3}}{8} \right\}, \quad (3.22)$$

$$\{\tilde{h}(1), \tilde{h}(2), \tilde{h}(3), \tilde{h}(4)\} = \{\tilde{g}(4), -\tilde{g}(3), \tilde{g}(2), -\tilde{g}(1)\}. \quad (3.23)$$

Dado um sinal  $x$  com  $k_t$  amostras, os coeficientes escala  $s_1$  e *wavelet*  $w_1$ , para a primeira escala da TWDR, são

$$s_1 = \tilde{A}_1 x, \quad (3.24)$$

$$w_1 = \tilde{B}_1 x, \quad (3.25)$$

em que  $\tilde{A}_1$  e  $\tilde{B}_1$  são matrizes de ordem  $k_t \times k_t$ , já que  $s_1$  e  $w_1$  têm  $k_t$  amostras.

As matrizes  $\tilde{A}_1$  e  $\tilde{B}_1$  para a *wavelet* mãe db(4) são da seguinte forma (PERCIVAL; WALDEN, 2000):

$$\tilde{A}_1 = \begin{bmatrix} \tilde{g}(4) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & \tilde{g}(1) & \tilde{g}(2) & \tilde{g}(3) \\ \tilde{g}(3) & \tilde{g}(4) & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \tilde{g}(1) & \tilde{g}(2) \\ \tilde{g}(2) & \tilde{g}(3) & \tilde{g}(4) & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \tilde{g}(1) \\ \tilde{g}(1) & \tilde{g}(2) & \tilde{g}(3) & \tilde{g}(4) & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & \tilde{g}(1) & \tilde{g}(2) & \tilde{g}(3) & \tilde{g}(4) \end{bmatrix}, \quad (3.26)$$

$$\tilde{B}_1 = \begin{bmatrix} \tilde{h}(4) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & \tilde{h}(1) & \tilde{h}(2) & \tilde{h}(3) \\ \tilde{h}(3) & \tilde{h}(4) & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \tilde{h}(1) & \tilde{h}(2) \\ \tilde{h}(2) & \tilde{h}(3) & \tilde{h}(4) & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \tilde{h}(1) \\ \tilde{h}(1) & \tilde{h}(2) & \tilde{h}(3) & \tilde{h}(4) & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & \tilde{h}(1) & \tilde{h}(2) & \tilde{h}(3) & \tilde{h}(4) \end{bmatrix}. \quad (3.27)$$

Portanto, as Equações 3.24 e 3.25 podem ser reescritas como:

$$s_1 = \begin{bmatrix} \tilde{g}(4) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & \tilde{g}(1) & \tilde{g}(2) & \tilde{g}(3) \\ \tilde{g}(3) & \tilde{g}(4) & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \tilde{g}(1) & \tilde{g}(2) \\ \tilde{g}(2) & \tilde{g}(3) & \tilde{g}(4) & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \tilde{g}(1) \\ \tilde{g}(1) & \tilde{g}(2) & \tilde{g}(3) & \tilde{g}(4) & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & \tilde{g}(1) & \tilde{g}(2) & \tilde{g}(3) & \tilde{g}(4) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(1) \\ x(2) \\ x(3) \\ x(4) \\ \vdots \\ x(k_t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_1(1) \\ s_1(2) \\ s_1(3) \\ s_1(4) \\ \vdots \\ s_1(k_t) \end{bmatrix}, \quad (3.28)$$

$$w_1 = \begin{bmatrix} \tilde{h}(4) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & \tilde{h}(1) & \tilde{h}(2) & \tilde{h}(3) \\ \tilde{h}(3) & \tilde{h}(4) & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \tilde{h}(1) & \tilde{h}(2) \\ \tilde{h}(2) & \tilde{h}(3) & \tilde{h}(4) & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \tilde{h}(1) \\ \tilde{h}(1) & \tilde{h}(2) & \tilde{h}(3) & \tilde{h}(4) & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & \tilde{h}(1) & \tilde{h}(2) & \tilde{h}(3) & \tilde{h}(4) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(1) \\ x(2) \\ x(3) \\ x(4) \\ \vdots \\ x(k_t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_1(1) \\ w_1(2) \\ w_1(3) \\ w_1(4) \\ \vdots \\ w_1(k_t) \end{bmatrix}. \quad (3.29)$$

Para exemplo de aplicação da TWDR, considere um sinal sintético senoidal  $x$  de 1792 amostras em 14 ciclos, composto por uma componente fundamental, componentes harmônicas de terceira, quinta e sétima ordens e transitórios incluídos entre o quinto e o nono ciclos, similar

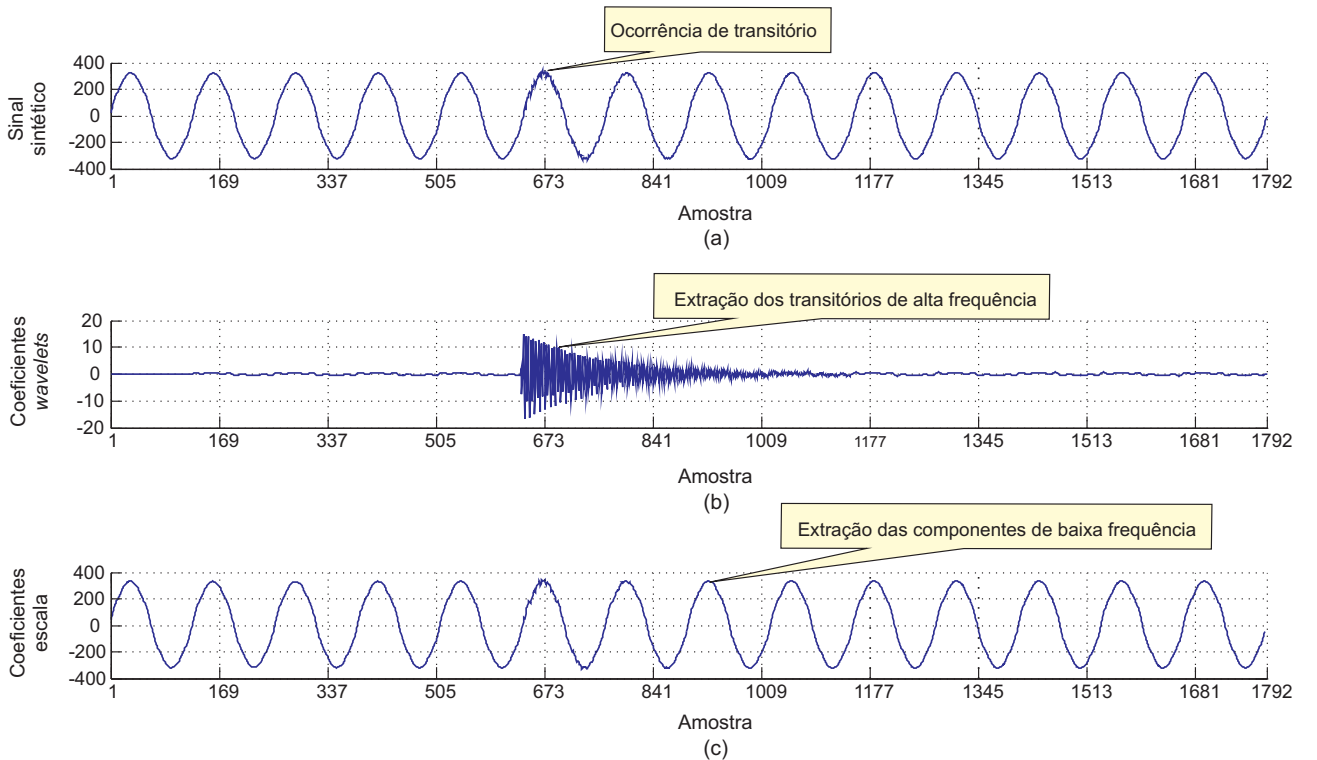
ao sinal sintético com transitórios proposto por (BOLLEN; GU, 2006). As parcelas de regime permanente  $x_{rp}$  e de regime transitório  $x_t$  são, respectivamente:

$$x_{rp}(n) = U_1\sqrt{2}\text{sen}(\omega n/f_s) + U_3\sqrt{2}\text{sen}(3\omega n/f_s) + U_5\sqrt{2}\text{sen}(5\omega n/f_s) + U_7\sqrt{2}\text{sen}(7\omega n/f_s), \quad (3.30)$$

$$\begin{aligned} x_t(n) = & 10\text{sen}(\theta\pi/180)\sqrt{2}\cos(2\pi 960n/f_s)e^{(-n/nA)} - \\ & 15\text{sen}(\theta\pi/180)\sqrt{2}\cos(2\pi 1920n/f_s)e^{(-n/nA)}, \end{aligned} \quad (3.31)$$

em que  $\{U_1; U_3; U_5; U_7\} = \{230; 5, 75; 6, 9; 3, 45\}$  são as amplitudes da componente fundamental e das harmônicas;  $\omega = 2\pi f$ ,  $f = 60$  Hz;  $\theta = 90^\circ$ ;  $f_s = 7680$  Hz é a frequência de amostragem;  $nA = 128$  é o número de amostras por ciclo do sinal.

A aplicação da TWDR no sinal sintético analisado, para a primeira escala, gera coeficientes escala e *wavelet* com o mesmo número de amostras do sinal de entrada, visto que não ocorre processo de subamostragem. O resultado é apresentado na Figura 3.5.



**Figura 3.5.** Exemplo de aplicação da TWDR na primeira escala: (a) sinal sintético; (b) coeficientes *wavelet*; (c) coeficientes escala.

De acordo com a Figura 3.5, a TWDR apresenta grande sensibilidade às componentes de alta frequência do sinal analisado, visto que os coeficientes *wavelet* apresentam valores mais relevantes no período de regime transitório do sinal. Essa característica torna a TWDR forte candidata ao uso em análise de faltas em sistemas elétricos de potência (COSTA *et al.*, 2012).

### 3.4 ENERGIA DOS COEFICIENTES WAVELET

De acordo com o Teorema de Parseval, a energia de um sinal  $x$  pode ser decomposta em termos da energia dos coeficientes *wavelet* nas escalas  $j = \{1, 2, \dots, J\}$  e da energia dos coeficientes escala na escala  $J$  da TWDR, considerando-se  $J \leq J_{Max}$ , como segue (BURRUS *et al.*, 1998; PERCIVAL; WALDEN, 2000):

$$\sum_{k=1}^{k_t} |x(k)|^2 = \sum_{k=1}^{k_t} |s_J(k)|^2 + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^{k_t} |w_j(k)|^2, \quad (3.32)$$

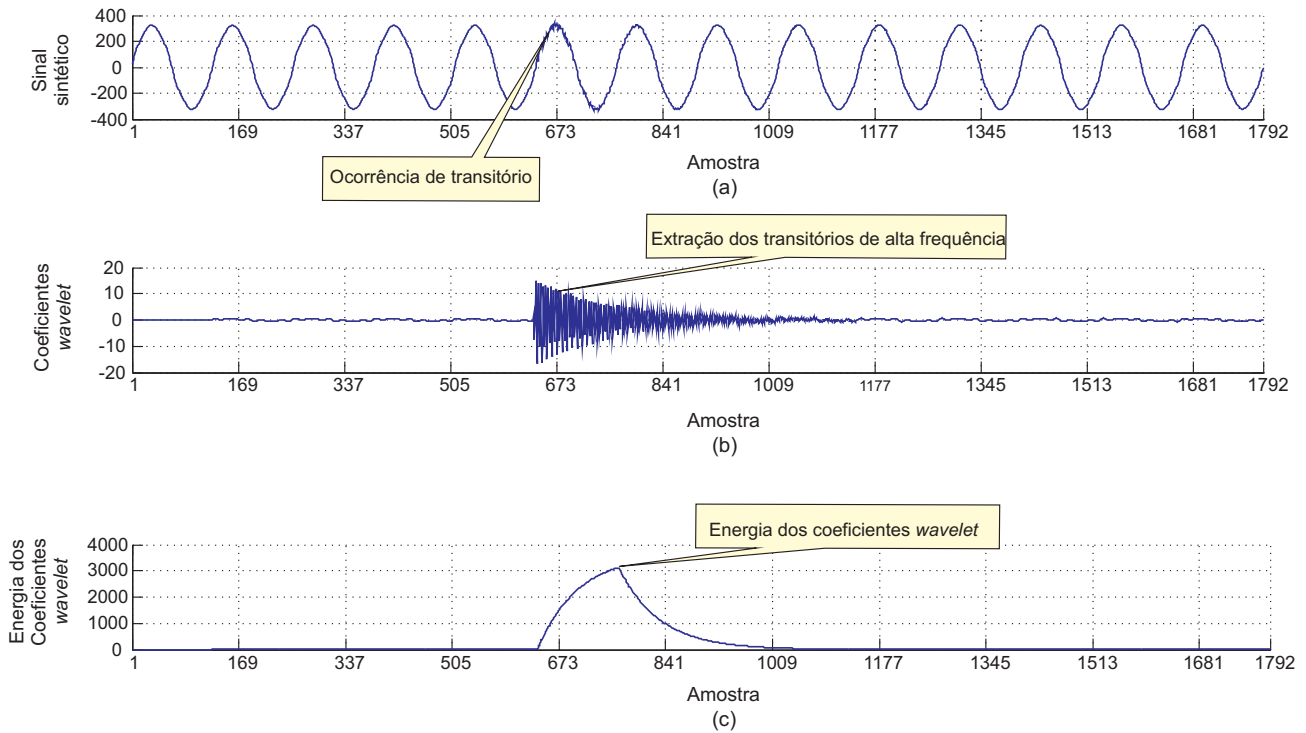
em que  $s_J$  são os coeficientes escala na escala  $J$ ;  $w_j$  são os coeficientes *wavelet* na escala  $j \leq J$ ;  $\sum_{k=1}^{k_t} |s_J(k)|^2$  é a energia dos coeficientes escala na escala  $J$ ;  $\sum_{k=1}^{k_t} |w_j(k)|^2$  é a energia dos coeficientes *wavelet* na escala  $j$ ;  $\sum_{k=1}^{k_t} |x(k)|^2$  é a energia espectral do sinal original;  $k_t$  é o número total de amostras do sinal.

Utilizando-se uma janela deslizante em um ciclo de amostras, a energia dos coeficientes *wavelet* ( $\dot{\mathcal{E}}$ ) da TWDR, calculada na amostra  $k_i \leq k_t$ , na primeira escala, é definida como (COSTA *et al.*, 2012):

$$\dot{\mathcal{E}} = \sum_{k=k_i-\Delta k+1}^{k_i} |w(k)|^2, \quad (3.33)$$

em que  $\Delta k = f_s/f$  é a quantidade de amostras equivalente a um ciclo da frequência fundamental  $f$ ;  $f_s$  é a frequência de amostragem.

Na Figura 3.6 é apresentada a energia dos coeficientes *wavelet* do sinal sintético da Figura 3.5(a). A energia dos coeficientes *wavelet* apresenta valores mais relevantes no período transitório do sinal analisado, característica que pode colocar essa ferramenta dentre as mais adequadas para a tarefa da classificação de faltas em linhas de transmissão (COSTA *et al.*, 2012). Como a energia espectral de um sinal é proporcional à energia dos coeficientes *wavelet*, então o comportamento da energia dos transitórios nos sinais de tensão e corrente pode ser obtida pelo comportamento da energia dos coeficientes *wavelet* nestes sinais (COSTA *et al.*, 2012).



**Figura 3.6.** Exemplo de cálculo da energia dos coeficientes *wavelet* da TWDR: (a) sinal sintético; (b) coeficientes *wavelet*; (c) energia dos coeficientes *wavelet*.

### 3.5 RESUMO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi apresentada a fundamenta o teórica da TWC, TWD e TWDR. Para o propósito de aplica es práticas, a TWD e a TWDR são empregadas, sendo esta última a mais apropriada para aplica es de detec o de faltas em tempo real, devido   inexistência do processo de subamostragem. Foram apresentados os algoritmos piramidais para cada uma das versões discretas da TW utilizando-se a *wavelet* mãe  $db(4)$ , que   uma das *wavelets* mais adequadas para aplica es em transi rios oriundos de distúrbios em sistemas elétricos de potência. Foi apresentado também o conceito de energia dos coeficientes *wavelet*, o qual   bastante importante para se obter uma análise quantitativa acerca da severidade dos transi rios e, dessa forma, poder ser empregado em métodos de diagnóstico de faltas baseados na TW.

# REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentado um levantamento bibliográfico dos principais trabalhos relacionados com os temas predominantes desta dissertação: diagnóstico automático de faltas via TW e localização de faltas em linhas de transmissão.

### 4.1 DIAGNÓSTICO AUTOMÁTICO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

O uso da TW tem sido bastante difundido em aplicações relacionadas ao diagnóstico de diversos distúrbios em sistemas elétricos de potência. Com relação à detecção e classificação de faltas e de distúrbios da QEE, diversos métodos têm sido apresentados no decorrer dos anos e alguns dos principais são abordados a seguir.

Poisson *et al.* (1998) utilizaram a TWC para detectar afundamentos de tensão e transitórios oscilatórios. Os valores de pico dos coeficientes *wavelet* em altas frequências foram utilizados para detectar mudanças bruscas nos sinais de tensão. A detecção dos distúrbios foi realizada comparando-se os picos com valores pré-definidos no regime permanente. A distinção entre afundamento de tensão e transitório é baseada na duração e no número de picos excedendo um certo limiar. Os resultados obtidos na detecção foram comparados com métodos clássicos. O número total de registros com afundamentos de tensão não foi especificado, mas 518 registros dessa natureza foram devidamente detectados. Em 55% dos casos, obteve-se um erro de 20 ms (1 ciclo a 50 Hz) durante a etapa de localização no tempo. Um total de 1200 registros reais com transitórios foram testados e 892 registros foram diagnosticados corretamente. A metodologia delineada por Poisson *et al.* (1998) se destaca pela utilização de dados reais com diversas taxas de amostragem. No entanto, a TWC é uma técnica redundante e requer um tempo de processamento superior a TWD, o que limita suas aplicações práticas em tempo real.

Kim & Aggarwal (2001) propuseram um método para detecção de faltas em linhas de transmissão baseado no somatório dos valores absolutos dos coeficientes *wavelet* da primeira escala da TWD para as correntes. Os valores dos somatórios são tomados para cada janela de dados e a falta é detectada quando o valor, em uma janela, para uma determinada corrente, ultrapassar um limiar previamente estabelecido. Além disso, os valores dos módulos janelados podem indicar quais as fases das correntes estão envolvidas na falta, podendo desempenhar a função de classificação da falta. As *wavelets* mãe db(4) e db(6) foram indicadas como sendo as mais apropriadas para as implementações abordadas.

Chanda *et al.* (2004) apresentaram um algoritmo para detecção e classificação de faltas baseado na TWD, em que os valores máximos dos coeficientes *wavelet* são tomados como referência para comparação. A faixa de frequência das correntes de falta analisada está compreendida entre a segunda e a terceira harmônicas (100 e 150 Hz para uma frequência fundamental de 50 Hz). Isso faz com que, para uma taxa de amostragem de 12500 amostras/s, os coeficientes *wavelet* tenham que ser obtidos na sexta escala. A necessidade de uma grande quantidade de estágios da TWD pode representar uma limitação para aplicação do método em tempo real. Os autores afirmaram que o algoritmo proposto é imune aos efeitos de ângulo de incidência, resistência e localização de falta. Porém, os coeficientes *wavelet* são afetados por baixas frequências, o que implica em baixa resolução de tempo, podendo haver atrasos na detecção dos distúrbios em tempo real. A *wavelet* mãe empregada foi a db(8).

Silva (2005) propôs um algoritmo para análise de faltas em linhas de transmissão baseado na TWD em conjunto com as Redes Neurais Artificiais (RNAs). A energia janelada dos coeficientes *wavelet* das correntes de fase, na primeira escala, é utilizada para a detecção da falta. Os instantes inicial e final da falta são obtidos por meio dos coeficientes *wavelet* das correntes, também na primeira escala. A etapa de classificação da falta é baseada no uso de uma RNA do tipo *perceptron* de múltiplas camadas, cujas entradas são as amostras de tensão e corrente após a incidência da falta. O algoritmo de treinamento utilizado foi o RPROP (*Resilient Propagation*). O método proposto foi avaliado com registros oscilográficos reais e simulados e bons resultados foram obtidos. Além das faltas, registros com afundamentos de tensão e transitórios ocasionados por manobras de chaveamento também foram utilizados na avaliação do método de detecção de faltas.

Costa (2006) propôs um método baseado na TWD para detecção, delimitação da duração e classificação de faltas em linhas de transmissão. A detecção da falta foi realizada com base na análise da energia janelada dos coeficientes *wavelet* das correntes de fase, na primeira escala. A determinação da duração da falta foi baseada na análise dos coeficientes *wavelet* das correntes de fase e de neutro. A classificação da falta foi realizada com base na análise da energia concentrada dos coeficientes *wavelet* das correntes de fase e neutro durante o instante de falta. Mais de uma escala *wavelet* é necessária para as etapas de delimitação da duração e classificação da falta, sendo os coeficientes *wavelet* tomados de forma a contemplar a quinta harmônica (300 Hz para uma frequência fundamental de 60 Hz), o que se caracteriza como a principal desvantagem do algoritmo, visto que o uso de várias escalas *wavelet* representa maior atraso no tempo de detecção em aplicações em tempo real. O método foi avaliado com registros simulados e com registros reais capturados por registradores digitais de perturbação (RDP) em diversas linhas do sistema de transmissão da Chesf.

Salim *et al.* (2008) propuseram um método para detecção, classificação e localização de faltas em sistemas de distribuição. Para as etapas de detecção e classificação, as energias dos coeficientes *wavelet* da TWDR foram utilizadas de forma a contemplar a faixa de frequência de 750 a 1000 Hz, o que requer o processamento de mais de uma escala da TWDR. O instante de incidência da falta é obtido por meio dos coeficientes *wavelet*. A etapa de localização da falta utiliza os fasores de tensão e corrente para cálculo da impedância de falta e o seu equacionamento muda de acordo com o tipo de falta, o que pode representar uma desvantagem em relação à maioria dos métodos convencionais de localização. O método proposto também utiliza RNA para identificar o ramo em que a falta ocorreu. A avaliação do método foi feita com dados simulados no programa ATP.

Costa (2010) propôs um método de diagnóstico de distúrbios transitórios baseado na análise em tempo real da energia dos coeficientes *wavelet*, utilizando a TWD e a TWDR das tensões e correntes em sistemas elétricos de potência. O método é capaz de detectar e classificar distúrbios da QEE e faltas em linhas de transmissão e foi avaliado, em tempo real, no simulador RTDS<sup>TM</sup>, considerando dois modelos de sistemas elétricos em várias situações de distúrbios. A versão *offline* do algoritmo proposto também foi avaliada com mais de dois mil registros oscilográficos reais, capturados por registradores digitais de perturbação instalados no sistema de transmissão



da Chesf, apresentando bons resultados.

Al-Kababjie *et al.* (2012) descreveram uma metodologia para detecção e classificação de faltas baseada nas *wavelets*. A proposta do método é utilizar a componente dc da corrente de falta para obter seu instante de incidência e as fases envolvidas na falta. A *wavelet* mãe Haar é utilizada no método na sétima escala, de forma a extrair as informações referentes à componente contínua da corrente, a qual é nula no regime permanente do sistema elétrico e apresenta uma mudança brusca no momento de ocorrência da falta. Variáveis de detecção para cada corrente de fase são usadas para a classificação da falta. Como desvantagens do algoritmo proposto, tem-se a necessidade de múltiplas escalas da transformada *wavelet* e o fato de que a componente dc da corrente pode não existir para ângulos de incidência de falta particulares (COSTA *et al.*, 2009).

Saravanababu *et al.* (2013) propuseram um método para proteção de linhas de transmissão baseado na TWD. Por meio do conteúdo de alta frequência das correntes, obtidos por meio dos coeficientes *wavelet* da db(6), pode-se detectar, classificar e localizar a falta. A transformação de Karrenbaur é utilizada na etapa de classificação da falta, em que a matriz pode ser implementada apenas por somadores, de forma a anular o efeito do acoplamento mútuo entre fases. Porém, como desvantagem dessa metodologia, destacam-se as diferentes caracterizações para faltas que envolvem ou não a terra. Na etapa da localização da falta, sinais de corrente sob falta de dois terminais da linha são utilizados.

Costa (2013) apresentou uma nova metodologia baseada na TWD e na TWDR para detecção em tempo real de faltas em linhas de transmissão, em que a energia dos coeficientes *wavelet* leva em conta o efeito de borda nas janelas deslizantes. Dessa forma, as limitações referentes aos transitórios sobrearmortecidos (faltas AT com ângulo de incidência igual a zero, por exemplo) e à dependência da *wavelet* mãe escolhida deixam de existir. O autor também sugere que a metodologia pode ser estendida para a implementação de um relé digital para o diagnóstico completo de faltas, não ficando restrito apenas à função de detecção de faltas.

## 4.2 LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

A revisão bibliográfica sobre localização de faltas em linhas de transmissão é dividida em duas categorias nesta dissertação: métodos baseados na frequência fundamental e métodos baseados na teoria das ondas viajantes.

### 4.2.1 Métodos baseados na Frequência Fundamental

A maior parte dos métodos convencionais de localização de faltas, que se baseiam na estimação da componente fundamental de frequência, consiste na determinação da impedância aparente entre o terminal de monitoramento e o local da falta. Esses algoritmos são subdivididos em métodos que utilizam dados de um ou múltiplos terminais da linha de transmissão.

Os métodos baseados na frequência fundamental que utilizam dados de apenas um terminal da linha geralmente são mais facilmente implementados. Porém, estes métodos são susceptíveis a erros devido a alguns fatores, como por exemplo, contribuição de outros alimentadores e variações na resistência e no tipo de falta, o qual geralmente precisa ser determinado previamente, dada a sua influência no equacionamento que precisa ser aplicado para a determinação do ponto de falta.

Takagi *et al.* (1981) utilizou a Transformada Discreta de Fourier para extrair os fasores na frequência fundamental de tensões e correntes medidos em um único terminal de uma linha de transmissão, no qual a teoria da superposição é aplicada para separar o sistema de transmissão sob falta em duas redes derivadas: uma de pré-falta e outra de falta isolada. Utilizando-se das equações de quadripolo para uma linha de transmissão, os vetores da tensão e da corrente na falta podem ser estimados a partir dos vetores de tensão e corrente de pré-falta no terminal local. Então, uma equação que relaciona a distância de falta em uma linha simples em função dos vetores de tensão e corrente para as redes de pré-falta e de falta isolada é proposta. Por se tratar de uma equação não-linear, uma solução iterativa é necessária, como por exemplo, a técnica de Newton-Raphson. Resultados satisfatórios para esse método foram obtidos apenas quando as perdas na linha foram desprezadas.

Takagi *et al.* (1982a) incrementou à pesquisa realizada por Takagi *et al.* (1981) e propôs o uso da Transformada de Laplace no equacionamento da distância de falta, em substituição ao uso da Transformada Discreta de Fourier. As equações de quadripolo e a teoria da superposição permaneceram no método, assim como a necessidade de uma solução iterativa para a equação não-linear da distância de falta. A Transformada de Laplace possibilitou um maior desempenho no cálculo das relações entre os fasores de corrente na rede de falta isolada. A precisão do algoritmo está condicionada à existência de uma alta relação de curto-circuito no sistema, não apresentando garantia de bom desempenho para o caso de uma baixa relação de curto-circuito. Por requerer a realização de um processo iterativo para cálculo do ponto de falta, os algoritmos propostos por Takagi *et al.* (1981) e Takagi *et al.* (1982a) são considerados complexos e lentos. Por este motivo, os autores propõem a utilização de um microprocessador para realizar os procedimentos matemáticos. Apesar de ser considerado como um dos algoritmos de localização de faltas mais tradicionais, os métodos são bastante sensíveis tanto aos parâmetros de falta quanto aos parâmetros de sistema elétrico analisado.

Takagi *et al.* (1982b) propuseram correções aos métodos apresentados em Takagi *et al.* (1981) e Takagi *et al.* (1982a) no que se refere aos erros causados por fluxo de carga, resistência de falta e arranjos não-simétricos (efeitos de indutância mútua) nas linhas de transmissão. Além disso, consideradas algumas aproximações, o equacionamento da distância de falta é agora obtida de forma direta, dispensando a necessidade de cálculos iterativos.

Johns & Jamali (1990) descreveram uma técnica para localização de faltas que envolve o monitoramento e estimação fasorial dos sinais de tensão e corrente em ambos os terminais da linha, sendo requeridos, também, os parâmetros de sequência positiva dos condutores. O equacionamento da distância de falta é baseado na teoria dos quadripolos e em equações hiperbólicas. O método proposto independe do tipo e da resistência de falta e não exige qualquer informação acerca das impedâncias de fonte. Foram obtidos bons resultados, inclusive para o caso de linhas não transpostas. Porém, o método é bastante sensível à configuração do sistema elétrico analisado. Dessa forma, para linhas com compensação série, o desempenho dessa técnica pode ser comprometido de forma a fornecer estimativas do ponto de falta com erros consideráveis.

Girgis *et al.* (1992) propuseram um algoritmo para localização de faltas em linhas de transmissão baseado na estimação dos fasores fundamentais de tensão e corrente, podendo estes sinais serem tomados em dois ou três terminais da linha. O método proposto pode ser aplicado de forma direta para o caso de dados sincronizados ou de forma iterativa para o caso de dados não sincronizados. O equacionamento do local de falta é independente do tipo de falta. Porém, assim como o método de Johns & Jamali (1990), trata-se de um algoritmo bastante sensível à configuração do sistema de transmissão analisado, sendo, portanto, bastante influenciado pelo emprego da compensação série. As maiores taxas de erros foram obtidas para dados não sincronizados, atingindo o patamar de 2%; por outro lado, com medidas sincronizadas, os erros médios foram da ordem de 0,5%.

Ranjbar *et al.* (1992) propuseram um algoritmo para localização de faltas em linhas de transmissão modeladas por parâmetros distribuídos, levando-se em conta o efeito da capacitância da linha. O método proposto consiste no cálculo sucessivo da tensão ao longo da linha, sendo a localização da falta estimada quando a tensão apresenta seu valor mínimo em comparação a medidas tomadas em vários pontos da linha de transmissão. A quantificação da tensão é realizada por meio de uma função  $G(x)$ , que é proporcional à integral da tensão sobre um intervalo de tempo limitado e que é calculada por meio das equações telegráficas. Sendo  $D_x$  a distância entre dois pontos de medição consecutivos, o maior erro obtido foi menor do que  $D_x/2$ . O método é capaz de localizar a falta, mesmo que esta ocorra com ângulo de incidência igual a zero.

Sadeh *et al.* (1999) deram um enfoque no problema da localização de falta como sendo um problema de otimização. Um equivalente de Thevenin para a linha sob falta é utilizado para que os dados requeridos para a determinação da distância de falta sejam calculadas. Como principal vantagem, o método proposto mostrou-se independente da filtragem da componente de corrente contínua e dos harmônicos de altas ordens presentes quando da ocorrência de uma falta. Como resultados, uma precisão satisfatória na localização de todos os tipos de faltas foi obtida, não havendo influência de parâmetros como ângulo de incidência e resistência de falta.

Gopalakrishnan *et al.* (2000), Chen *et al.* (2001) e Ha *et al.* (2003) propuseram a localização de faltas utilizando a distribuição da tensão ao longo da linha. A distância de falta é determinada com base em comportamentos esperados para a tensão. Por exemplo, a tensão é nula para faltas que envolvem a terra sem resistência de falta ou apresenta valor bem menor, se comparado à tensão em outros pontos da linha, para o caso de faltas que não envolvam a terra ou que apresentem algum valor de resistência de falta. Apesar de ser imune aos diversos parâmetros de falta, esses métodos exigem altos recursos de *hardware* e processamento para a resolução das equações diferenciais que regem o comportamento da tensão em linhas de transmissão.

Radojevic *et al.* (2009) apresentaram um algoritmo para localização de faltas que não requer os parâmetros da linha (impedâncias de sequências e comprimento) como entrada, utilizando-se apenas os fasores de tensão e corrente dos dois terminais da linha, extraídos por meio da transformada rápida de Fourier. A sincronização dos dados é realizada via GPS (*Global Positioning System*), o que pode ser uma fonte de erro na estimativa do ponto de ocorrência da falta. Em uma bateria inicial de testes, faltas monofásicas foram avaliadas e o método se mostrou independente da resistência de falta. Quanto ao efeito da compensação série, esta pode influenciar no desempenho do algoritmo, haja visto que podem ocorrer mudanças nos perfis de tensão e corrente.

Vieira *et al.* (2013a) desenvolveram um método de localização de faltas baseado na formulação apresentada por Radojevic *et al.* (2009), porém, com a inclusão de novos elementos para solucionar o problema da sensibilidade ao sincronismo entre os dados. Os resultados apresentados pelo método destacam a precisão das soluções para diferentes defasagens de sincronismo entre os terminais. Alguns casos reais de falta também foram avaliados, obtendo-se baixos percentuais de erros. Desse modo, o método proposto une a vantagem de não depender dos parâmetros da linha com a tolerância a diferenças no sincronismo. Porém, por utilizar componentes simétricas, o algoritmo é mais indicado para linhas transpostas. Visando superar essa limitação, Vieira *et al.* (2013b) propuseram uma solução para linhas não transpostas e com dados não sincronizados a partir da representação fasorial de suas componentes.

#### 4.2.2 Métodos baseados na Teoria das Ondas Viajantes

Os métodos de localização de faltas fundamentados na teoria das ondas viajantes se baseiam na obtenção dos instantes de chegada das primeiras ondas viajantes no(s) terminal(is) de monitoramento. Com a informação da velocidade de propagação dessas ondas na linha, pode-se estimar o ponto de ocorrência da falta.

Magnago & Abur (1998) propuseram um método de localização de faltas em linhas de transmissão por meio da análise de transitórios pela teoria das ondas viajantes, mais especificamente com o uso da transformada *wavelet*. Os sinais de tensão e corrente são tratados no domínio modal e, após isso, são levados para o domínio do tempo-frequência. Os coeficientes *wavelets* nas duas primeiras escalas são usados no algoritmo. Esses coeficientes do sinal no modo aéreo são utilizados para a localização da falta, enquanto que os do modo terra são utilizados para identificar as faltas que envolvem a terra e a metade da linha a qual essas faltas se encontram. O método mostrou-se independente da resistência de falta. Além disso, o método pode ser adequado para aplicação em linhas com compensação série e pode utilizar os dados provenientes de um ou dos dois terminais da linha. Para o caso do uso dos dados de dois terminais, o método é mais simples, porém, é necessário comunicação e sincronização desses dados, o que geralmente é realizado por meio de GPS. A precisão do método é proporcional à frequência de amostragem utilizada para a obtenção das tensões e correntes, sendo essa a principal limitação encontrada.

Abur & Magnano (2000) incrementaram recursos ao método proposto por Magnago & Abur (1998). No novo método, a diferença de tempo entre os modos aéreo e terra é utilizada para a localização de faltas aterradas. Dados provenientes de apenas um terminal da linha são requeridos e o novo algoritmo mostrou-se imune a resistência de falta, presença da compensação série e efeito do acoplamento mútuo. A frequência de amostragem é o fator limitante na precisão da localização da falta.

Kim *et al.* (2001) propuseram um método de localização de faltas baseado na transformada *wavelet* e que utiliza dados de dois terminais da linha de transmissão, os quais são sincronizados via GPS. Depois da obtenção das informações do conteúdo de alta frequência desses sinais, essas amostras são levadas a um servidor central, a partir de onde é calculada a distância de falta. O algoritmo foi testado para dados experimentais e resultados satisfatórios que confirmaram sua

viabilidade foram obtidos.

Chanda *et al.* (2003) aliaram o uso de interpolação cúbica ao uso da transformada *wavelet* para implementar um método de localização de faltas com base na teoria das ondas viajantes. Esse método utiliza os dados de correntes obtidos em ambos os terminais de uma linha. Foi constatado que o algoritmo, depois de excessivas simulações, obteve uma elevada precisão e mostrou-se independente do ângulo de incidência, resistência e localização de falta. Estudos mais recentes indicam que os coeficientes *wavelet* em uma faixa de frequência influenciada apenas pelos transitórios não são capazes de detectar faltas nos casos em que os transitórios são amortecidos, a exemplo de uma falta AT com ângulo de incidência igual a zero (COSTA *et al.*, 2012).

Costa & Souza (2011) propuseram um método para detecção e localização em tempo real de faltas em linhas de transmissão usando a transformada *wavelet*. Um estudo comparativo quanto às eficiências da TWD e da TWDR é realizado, apontando esta última como sendo a mais apropriada para o objetivo do algoritmo, devido à inexistência do processo de subamostragem. A partir do instante de incidência de uma falta em uma linha de transmissão, as amostras de tensão ou corrente relativas aos instantes de chegada das primeiras ondas viajantes aos dois terminais da linha são obtidas pela análise dos coeficientes *wavelet*. No período de regime permanente do sistema de transmissão, os coeficientes *wavelet* apresentam distribuição de probabilidade Gaussiana, em que a média ( $\bar{w}$ ) e o desvio padrão ( $\sigma$ ) dos coeficientes *wavelet* são calculados e limites são definidos como  $[\bar{w} - 4\sigma, \bar{w} + 4\sigma]$ . As amostras necessárias ao cálculo da distância de falta são tomadas quando os coeficientes *wavelet* ultrapassam esse intervalo. Foram obtidos bons resultados para simulações realizadas no simulador em tempo real RTDS<sup>TM</sup>.

Metello (2012) propôs um algoritmo para localização de faltas similar ao método de Costa & Souza (2011), porém, com a aplicação da Transformada Modal nas tensões e correntes. Os desempenhos da TWD e da TWDR foram comparados, constatando-se, também, uma melhor eficiência por parte da segunda metodologia. Diversas *wavelets* mãe da família Daubechies tiveram seus desempenhos avaliados em função de diferentes taxas de amostragem dos sinais trifásicos, demonstrando a dependência do método a esses parâmetros. Como limitação do método, está a necessidade de se considerar linhas transpostas e simétricas para a aplicação da Transformada Modal.

Lopes *et al.* (2013) propuseram o uso da Transformada de Park (Tdq0) para a localização de faltas. Essa técnica surgiu como uma alternativa ao difundido uso das *wavelets* para a detecção dos transitórios induzidos por faltas. O método apresentado requer dados de dois terminais da linha. A identificação dos instantes de chegada das ondas viajantes em cada terminal é realizada por meio do cálculo das energias dos coeficientes de diferença ( $c_{dif}$ ), os quais são obtidos das tensões de eixo direto ( $v_d$ ) em ambos os terminais de monitoramento. Os autores destacam algumas vantagens e desvantagens da Tdq0 em relação a TWD e a TWDR. Sob o ponto de vista da detecção dos transitórios, a Tdq0 apresenta uma implementação mais simples do que as TWD, haja visto que não são necessários *buffers* para armazenamento de amostras passadas. Já para o caso em que a classificação de faltas é necessária, o uso da Tdq0 é limitado, pois a obtenção das fases sob falta por meio das componentes de eixo direto é inviável. O método de localização de faltas proposto tem apresentado bons resultados quando comparado a alguns algoritmos tradicionais, observando-se a influência de parâmetros de falta e do sistema elétrico, além dos efeitos da compensação série das linhas de transmissão.

### 4.3 RESUMO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os resumos da revisão bibliográfica realizada para os métodos de detecção, classificação e estimação dos instantes inicial e final (duração) de faltas via transformada *wavelet* e para os métodos localização de faltas em linhas de transmissão são apresentados nas Tabelas 4.1 e 4.2, respectivamente. As referências para o diagnóstico de faltas estão dispostas em ordem cronológica, destacando-se a técnica empregada, o objetivo do método (detecção, classificação ou determinação da duração de falta) e o sinal analisado (Tensão  $V$  ou corrente  $I$ ). As referências para localização de faltas também estão separadas pelo número de terminais avaliados da linha (NT), pela técnica empregada, que pode ser distribuição de tensão (DT), fasores, teoria das ondas viajantes (TOV) ou por uso de técnicas de otimização, pelo sinal avaliado e pela consideração ou não do emprego da compensação série (CS).

Com base na revisão de literatura para os métodos de localização de faltas em linhas de transmissão, os métodos de maior destaque são os que se baseiam na estimação dos fasores fundamentais e os que se utilizam da teoria das ondas viajantes. Na Tabela 4.3 estão resumidas algumas características importantes relacionadas a esses tipos de algoritmos.



De acordo com a Tabela 4.3, os métodos baseados na frequência fundamental apresentam desempenho comprometido pelo emprego da compensação série. Por outro lado, mesmo requerendo altas taxas de amostragem e sendo afetados por transitórios amortecidos, os métodos baseados nas ondas viajantes podem apresentar forte potencial para emprego em linhas compensadas.

**Tabela 4.1.** Resumo da revisão bibliográfica referente ao diagnóstico de faltas.

Referência	Técnica	Objetivo			Sinais	
		Deteção	Duração	Classificação	V	I
Poisson <i>et al.</i> (1998)	TWC	✓	–	–	✓	–
Kim & Aggarwal (2001)	TWD	✓	–	–	–	✓
Chanda <i>et al.</i> (2004)	TWD	✓	–	✓	–	✓
Silva (2005)	TWD + RNA	✓	✓	✓	✓	✓
Costa (2006)	TWD	✓	✓	✓	–	✓
Salim <i>et al.</i> (2008)	TWDR + RNA	✓	✓	✓	✓	✓
Costa (2010)	TWD + TWDR	✓	–	✓	✓	✓
Al-Kababjie <i>et al.</i> (2012)	TWD	✓	–	✓	–	✓
Saravanababu <i>et al.</i> (2013)	TWD	✓	–	✓	–	✓
Costa (2013)	TWD + TWDR	✓	–	–	✓	✓

**Tabela 4.2.** Resumo da revisão bibliográfica referente à localização de faltas.

Referência	NT		DT	Técnica			Sinais		
	1	2		Fasores	TOV	Otim.	V	I	CS
Takagi <i>et al.</i> (1981)	✓	–	–	✓	–	–	✓	✓	–
Takagi <i>et al.</i> (1982a)	✓	–	–	✓	–	–	✓	✓	–
Johns & Jamali (1990)	–	✓	–	✓	–	–	✓	✓	–
Girgis <i>et al.</i> (1992)	–	✓	–	✓	–	–	✓	✓	–
Ranjbar <i>et al.</i> (1992)	✓	–	✓	–	–	–	✓	–	–
Sadeh <i>et al.</i> (1999)	–	✓	–	–	–	✓	✓	✓	–
Gopalakrishnan <i>et al.</i> (2000)	✓	–	✓	–	–	–	✓	–	–
Chen <i>et al.</i> (2001)	✓	–	✓	–	–	–	✓	–	–
Ha <i>et al.</i> (2003)	✓	–	✓	–	–	–	✓	–	–
Radojevic <i>et al.</i> (2009)	–	✓	–	✓	–	–	✓	✓	–
Vieira <i>et al.</i> (2013a)	–	✓	–	✓	–	–	✓	✓	–
Vieira <i>et al.</i> (2013b)	–	✓	–	✓	–	–	✓	✓	–
Magnago & Abur (1998)	✓	✓	–	–	✓	–	✓	✓	✓
Abur & Magnano (2000)	✓	–	–	–	✓	–	✓	✓	✓
Kim <i>et al.</i> (2001)	–	✓	–	–	✓	–	✓	✓	–
Chanda <i>et al.</i> (2003)	–	✓	–	–	✓	✓	–	✓	–
Costa & Souza (2011)	–	✓	–	–	✓	–	✓	✓	–
Metello (2012)	–	✓	–	–	✓	–	✓	✓	–
Lopes <i>et al.</i> (2013)	–	✓	–	–	✓	–	✓	–	✓

**Tabela 4.3.** Características associadas aos principais tipos de localizadores de faltas.

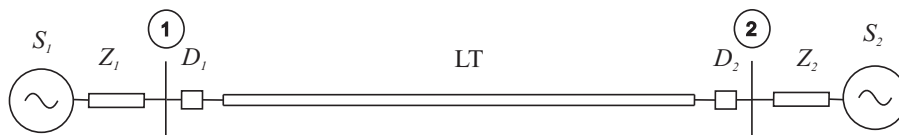
Característica	Tipo de método	
	Estimação de fasores	Ondas viajantes
Afetado pela compensação	✓	–
Dependente de alta frequência de amostragem	–	✓
Afetado por transitórios amortecidos	–	✓
Afetado pela componente dc	✓	–
Algoritmos de um ou dois terminais da linha	✓	✓

## EFEITO DOS PARÂMETROS DE FALTA NOS TRANSITÓRIOS

Os efeitos do ângulo de incidência, da resistência e da localização de falta, assim como do grau de compensação série nos transitórios induzidos por falta em linhas de transmissão são avaliados neste capítulo. Os resultados dessa análise são obtidos por meio de dados simulados no simulador digital RTDS<sup>TM</sup>.

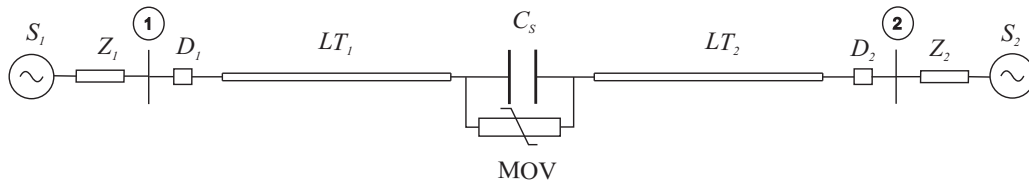
### 5.1 MODELO DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO PARA SIMULAÇÃO DE FALTAS

Na Figura 5.1 é ilustrado o modelo para simulação de faltas em uma linha sem compensação série. O sistema de transmissão, similar ao utilizado por Costa (2010), foi modelado utilizando-se o RTDS<sup>TM</sup> e é composto por uma linha de transmissão de 500 kV/400 km, dois disjuntores ( $D_1$  e  $D_2$ ) e duas fontes ( $S_1$  e  $S_2$ ) com suas respectivas impedâncias equivalentes ( $Z_1$  e  $Z_2$ ). Os parâmetros do sistema elétrico são apresentados nas Tabelas 5.1 e 5.2. As tensões e correntes obtidas das simulações no RTDS<sup>TM</sup> são sinais discretos com passo de amostragem  $\Delta t = 50 \mu s$ , o que equivale uma frequência de amostragem  $f_s = 20$  kHz.



**Figura 5.1.** Modelo do sistema de transmissão simplificado sem uso da compensação série.

Para avaliar os efeitos dos parâmetros de falta nos transitórios para uma linha com compensação série, um esquema de compensação série ( $C_S$ ) foi incluído no meio da linha do sistema apresentado na Figura 5.1, resultando em dois trechos de linha ( $LT_1$  e  $LT_2$ ), com 200 km cada (Figura 5.2).



**Figura 5.2.** Modelo do sistema de transmissão simplificado com emprego da compensação série.

**Tabela 5.1.** Dados das fontes do sistema de 500 kV.

Fonte	Tensão (kV)	Fase (°)	Sequência	Impedância Equivalente ( $\Omega$ )
$S_1$	500	0	Positiva	$0,9681 + j28,513 = 28,53 \angle 88,05^\circ$
			Zero	$1,1268 + j20,838 = 20,87 \angle 86,90^\circ$
$S_2$	495	10	Positiva	$0,9681 + j28,513 = 28,53 \angle 88,05^\circ$
			Zero	$1,1268 + j20,838 = 20,87 \angle 86,90^\circ$

**Tabela 5.2.** Dados da linha de transmissão do sistema de 500 kV.

Sequência	Resistência ( $\Omega/\text{km}$ )	Reatância ( $\Omega/\text{km}$ )	Admitância ( $\mu\Omega^{-1}/\text{km}$ )
Positiva	0,0333	0,3170	5,2033
Zero	0,3996	0,9921	3,0839

Bases de dados foram criadas para avaliação dos efeitos de ângulo de incidência ( $\theta$ ), resistência ( $r$ ) e localização de falta ( $d$ ) e do grau de compensação ( $k$ ). Nas Tabelas 5.3 e 5.4 resumam-se as bases de dados para os casos de linha sem e com compensação série, respectivamente.

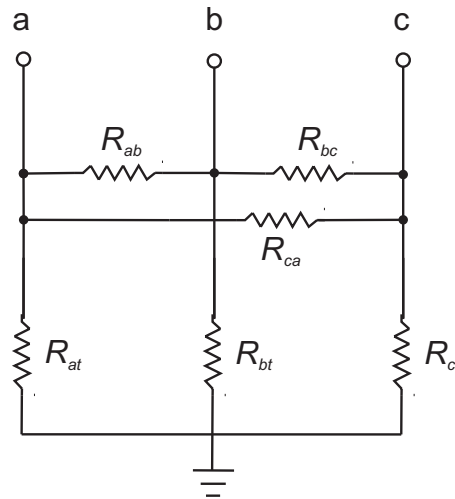
**Tabela 5.3.** Bases de dados para o caso de linha de transmissão sem compensação.

	Base 1	Base 2	Base 3
	$0 \leq \theta \leq 180^\circ$	$\theta = 90^\circ$	$\theta = 90^\circ$
Parâmetros	$r = 10 \Omega$	$0 \leq r \leq 100 \Omega$	$r = 10 \Omega$
	$d = 100 \text{ km}$	$d = 100 \text{ km}$	$15 \leq d \leq 385 \text{ km}$
	Todas as faltas	AT, AB, ABT e ABC	AT, AB, ABT e ABC
Quantidade	1810	404	1484
<b>Total = 3698</b>			

**Tabela 5.4.** Bases de dados para o caso de linha de transmissão com compensação série.

	Base 4	Base 5	Base 6	Base 7
	$0 \leq \theta \leq 180^\circ$	$\theta = 90^\circ$	$\theta = 90^\circ$	$\theta = 90^\circ$
	$r = 10 \Omega$	$0 \leq r \leq 100 \Omega$	$r = 10 \Omega$	$r = 10 \Omega$
Parâmetros	$d = 100 \text{ km}$	$d = 100 \text{ km}$	$15 \leq d \leq 385 \text{ km}$	$d = 100 \text{ km}$
	$k = 40\%$	$k = 40\%$	$k = 40\%$	$30\% \leq k \leq 70\%$
	Todas as faltas	AT, AB, ABT e ABC	AT, AB, ABT e ABC	AT, AB, ABT e ABC
Quantidade	1810	404	1484	164
<b>Total = 3862</b>				

Na Figura 5.3 é apresentado o esquema do RTDS<sup>TM</sup> com as resistências para configuração do tipo de falta que se deseja simular, cujo procedimento para a simulação dos diversos tipos de falta é resumido na Tabela 5.5. Por exemplo, para uma falta AT, tem-se  $R_{at} = r$ , enquanto que as demais resistências apresentam valores elevados, emulando uma situação em aberto.



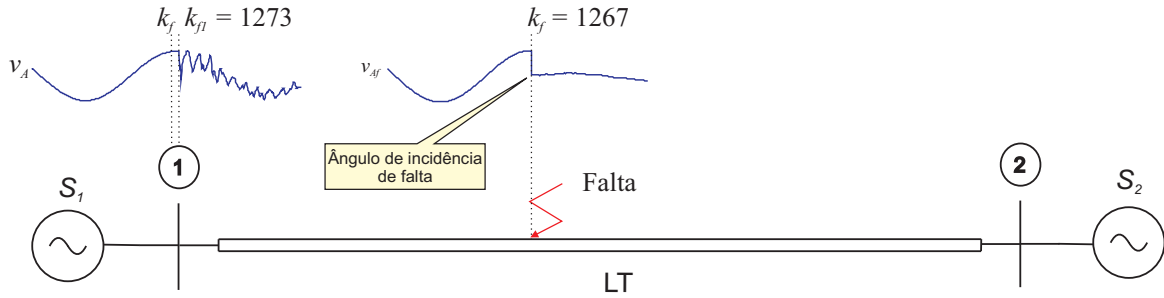
**Figura 5.3.** Esquema para aplicação das faltas.

**Tabela 5.5.** Valores dos resistores para aplicação dos diversos tipos de falta.

Tipo de Falta	$R_{at}$	$R_{bt}$	$R_{ct}$	$R_{ab}$	$R_{bc}$	$R_{ca}$
AT	$r$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$
BT	$\infty$	$r$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$
CT	$\infty$	$\infty$	$r$	$\infty$	$\infty$	$\infty$
AB	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$r$	$\infty$	$\infty$
BC	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$r$	$\infty$
CA	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$r$
ABT	$2r$	$2r$	$\infty$	$0$	$\infty$	$\infty$
BCT	$\infty$	$2r$	$2r$	$\infty$	$0$	$\infty$
CAT	$2r$	$\infty$	$2r$	$\infty$	$\infty$	$0$
ABC	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$r$	$r$	$r$

## 5.2 EFEITO DO ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DE FALTA NOS TRANSITÓRIOS

O ângulo de incidência é definido como o ângulo da tensão na fase A, tomada no local da falta ( $v_{Af}$ ) e no instante de sua ocorrência, tal como apresentado na Figura 5.4. No local da falta, a amostra relacionada ao instante de incidência da falta é  $k_f$ , que corresponde ao ângulo de fase  $\theta_f$  da tensão  $v_{Af}$ . Porém, devido ao tempo de trânsito das ondas viajantes do local da falta até a barra 1, os transitórios na barra 1 são iniciados na amostra  $k_{f1}$ , em que  $k_{f1} > k_f$ . No exemplo da Figura 5.4, os instantes de amostragem de  $v_A$  e  $v_{Af}$  estão sincronizados e tem-se um atraso de seis amostras ( $k_f = 1267$  e  $k_{f1} = 1273$ ) para que a falta possa ser detectada na barra 1, levando-se em conta a chegada das primeiras ondas viajantes. Na amostra  $k_{f1}$ , o ângulo de fase da tensão na barra 1 ( $v_A$ ) é  $\theta_1$ .



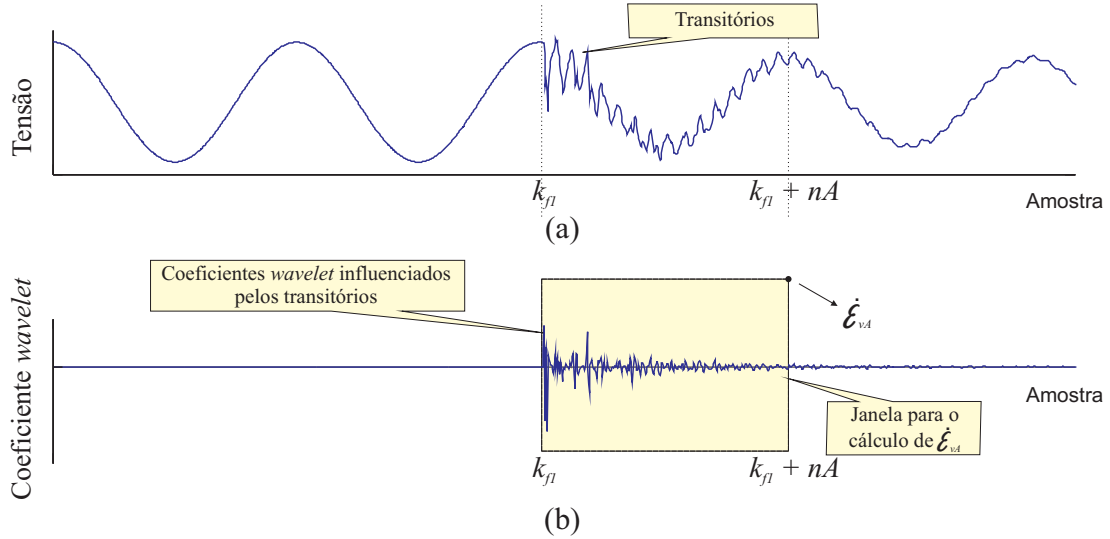
**Figura 5.4.** Ilustração para definição do ângulo de incidência de falta.

A energia dos transitórios de falta é proporcional à energia dos coeficientes *wavelet* para sinais com taxa de amostragem alta, cujos coeficientes *wavelet* sejam sensíveis apenas aos transitórios (COSTA *et al.*, 2012). Portanto, o comportamento dos transitórios de falta em relação ao ângulo de incidência de falta para linhas não compensada e com compensação série pode ser verificado por meio das energias dos coeficientes *wavelet* das tensões e correntes ( $\dot{\mathcal{E}}_{v_a}^F$ ,  $\dot{\mathcal{E}}_{v_b}^F$ ,  $\dot{\mathcal{E}}_{v_c}^F$ ,  $\dot{\mathcal{E}}_{i_n}^F$ ,  $\dot{\mathcal{E}}_{i_a}^F$ ,  $\dot{\mathcal{E}}_{i_b}^F$ ,  $\dot{\mathcal{E}}_{i_c}^F$  e  $\dot{\mathcal{E}}_{i_n}^F$ ), para  $f_s = 20$  kHz, em que  $F$  pode ser qualquer tipo de falta (AT, BT, CT, AB, BC, CA, ABT, BCT, CAT ou ABC). Esta notação será estendida para as análises dos demais parâmetros de falta.

A energia dos coeficientes *wavelet* é calculada em um ciclo a partir do instante de incidência da falta, período em que se pode extrair as informações mais importantes dos transitórios, como segue:

$$\dot{\mathcal{E}} = \sum_{k=k_{f1}}^{k_{f1}+nA-1} |w(k)|^2. \quad (5.1)$$

Na Figura 5.5 é ilustrado um exemplo para o cálculo da energia dos coeficientes *wavelet* da tensão  $v_A$ , conforme a Equação 5.1. A energia  $\dot{\mathcal{E}}_{v_A}$  é calculada levando-se em consideração apenas os coeficientes *wavelet*  $w_{v_A}$  dentro da janela fixa de um ciclo, entre  $k_{f1}$  e  $k_{f1} + nA$ , em que  $nA = f_s/f$  é o número de amostras por ciclo da frequência fundamental.



**Figura 5.5.** Ilustração do cálculo da energia dos coeficientes *wavelet*: (a) tensão; (b) coeficiente *wavelet*.

### 5.2.1 Falta Monofásicas

Considerando-se um sistema de transmissão trifásico e balanceado, as tensões de fase no local da falta, quando da sua incidência, são da forma (COSTA *et al.*, 2012)

$$v_f(\theta_f) = V \text{sen}(\theta_f + \delta), \quad (5.2)$$

em que  $v_f$  é a tensão em qualquer das fases ( $v_{Af}$ ,  $v_{Bf}$  ou  $v_{Cf}$ ),  $V$  é a amplitude da tensão,  $\theta_f$  é o ângulo de incidência e  $\delta = \{\delta_A, \delta_B \text{ ou } \delta_C\}$  é o ângulo relacionado ao defasamento das fases, que corresponde a  $0^\circ$ ,  $-120^\circ$  e  $120^\circ$  para as fases A, B e C, respectivamente, para sequência positiva.

Para faltas AT, os transitórios são mais severos quando a tensão  $v_{Af}$  no instante da falta passa pelo seu valor máximo (ROBERTSON *et al.*, 1996). Portanto, para o caso de faltas monofásicas, de acordo com a Equação 5.2, os transitórios apresentam maior intensidade quando (COSTA *et al.*, 2012)

$$\theta_f = 90^\circ - \delta \pm n180^\circ, \quad (5.3)$$

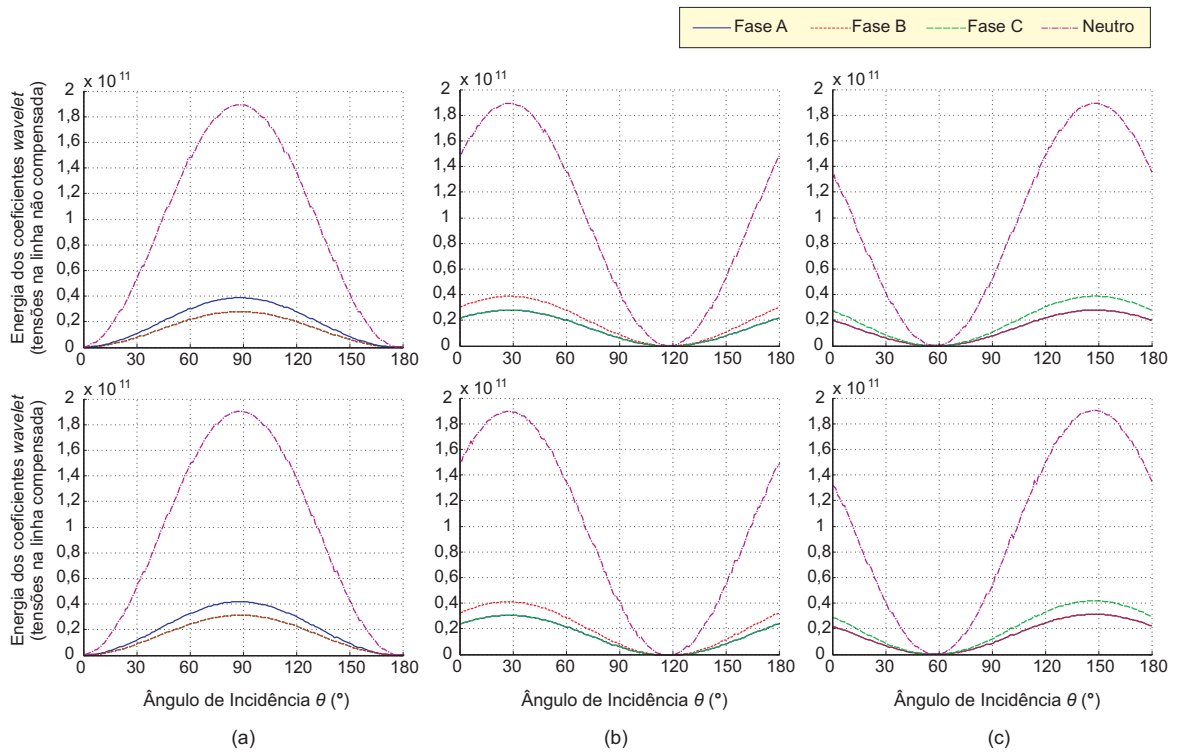
com  $n = \{0, 1, 2, \dots\}$ . Portanto, para faltas do tipo AT, BT e CT, os transitórios devem apresentar intensidade máxima quando  $\theta_f = 90^\circ, 30^\circ$  e  $150^\circ$ , respectivamente.

Na Figura 5.6 são apresentadas as curvas da energia dos coeficientes *wavelet* das tensões em função do ângulo de incidência de falta para faltas monofásicas (AT, BT e CT), considerando-se os casos de linha não compensada e com compensação série. Na Figura 5.7 são apresentados os resultados desta mesma análise quando aplicada aos sinais de corrente.

Por meio do uso de análise de regressão, foi verificado que as energias dos coeficientes *wavelet* ( $\dot{\mathcal{E}}$ ) são função do ângulo de incidência de falta, como segue (COSTA *et al.*, 2012):

$$\dot{\mathcal{E}}(\theta_f) = E_1 \text{sen}^2(\theta_f + \delta), \quad (5.4)$$

para todas as tensões e correntes, em que  $E_1$  é a amplitude da energia e  $\delta = \{0, -120^\circ, \text{ e } 120^\circ\}$  para faltas AT, BT e CT, respectivamente.

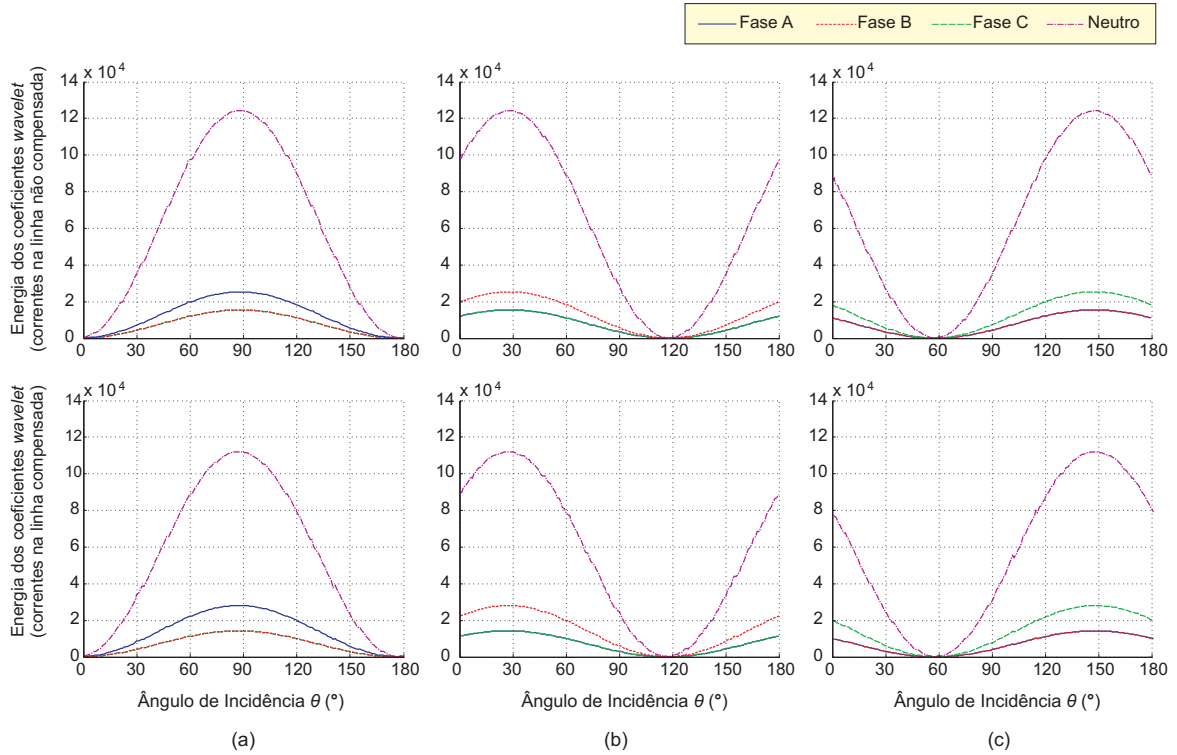


**Figura 5.6.** Energias dos coeficientes *wavelet* das tensões na barra 1, em faltas monofásicas, em linhas sem e com compensação versus ângulo de incidência de falta: (a) faltas AT; (b) faltas BT; (c) faltas CT.

Na Tabela 5.6 são apresentados os resultados da análise de regressão para todos os casos de faltas AT das Figuras 5.6(a) e 5.7(a), que consiste nas equações aproximadas para as energias dos coeficientes *wavelet* das tensões e correntes em cada fase e no neutro, para os casos de linha



compensada e não compensada. As equações foram estimadas pelo *toolbox cftool* do programa Matlab, sendo obtido um coeficiente de correlação  $R^2 \approx 0,9998$ .



**Figura 5.7.** Energias dos coeficientes *wavelet* das correntes na barra 1, em faltas monofásicas, em linhas sem e com compensação versus ângulo de incidência de falta: (a) faltas AT; (b) faltas BT; (c) faltas CT.

**Tabela 5.6.** Resultado da análise de regressão de  $\dot{\mathcal{E}} = f(\theta_f)$  para faltas AT em linhas sem e com compensação série.

Sinal	Linha sem compensação	Linha com compensação série
$v_a$	$\dot{\mathcal{E}}_{v_a}^{AT} = 0,38 \cdot 10^{11} \text{sen}^2(\theta_f + 1,89^\circ)$	$\dot{\mathcal{E}}_{v_a}^{AT} = 0,41 \cdot 10^{11} \text{sen}^2(\theta_f + 2,61^\circ)$
$v_b$	$\dot{\mathcal{E}}_{v_b}^{AT} = 0,27 \cdot 10^{11} \text{sen}^2(\theta_f + 1,89^\circ)$	$\dot{\mathcal{E}}_{v_b}^{AT} = 0,31 \cdot 10^{11} \text{sen}^2(\theta_f + 2,21^\circ)$
$v_c$	$\dot{\mathcal{E}}_{v_c}^{AT} = 0,27 \cdot 10^{11} \text{sen}^2(\theta_f + 1,89^\circ)$	$\dot{\mathcal{E}}_{v_c}^{AT} = 0,31 \cdot 10^{11} \text{sen}^2(\theta_f + 2,21^\circ)$
$v_n$	$\dot{\mathcal{E}}_{v_n}^{AT} = 1,89 \cdot 10^{11} \text{sen}^2(\theta_f + 1,89^\circ)$	$\dot{\mathcal{E}}_{v_n}^{AT} = 1,90 \cdot 10^{11} \text{sen}^2(\theta_f + 2,30^\circ)$
$i_a$	$\dot{\mathcal{E}}_{i_a}^{AT} = 2,52 \cdot 10^4 \text{sen}^2(\theta_f + 1,91^\circ)$	$\dot{\mathcal{E}}_{i_a}^{AT} = 2,79 \cdot 10^4 \text{sen}^2(\theta_f + 2,47^\circ)$
$i_b$	$\dot{\mathcal{E}}_{i_b}^{AT} = 1,54 \cdot 10^4 \text{sen}^2(\theta_f + 1,89^\circ)$	$\dot{\mathcal{E}}_{i_b}^{AT} = 1,42 \cdot 10^4 \text{sen}^2(\theta_f + 2,75^\circ)$
$i_c$	$\dot{\mathcal{E}}_{i_c}^{AT} = 1,54 \cdot 10^4 \text{sen}^2(\theta_f + 1,89^\circ)$	$\dot{\mathcal{E}}_{i_c}^{AT} = 1,42 \cdot 10^4 \text{sen}^2(\theta_f + 2,75^\circ)$
$i_n$	$\dot{\mathcal{E}}_{i_n}^{AT} = 12,39 \cdot 10^4 \text{sen}^2(\theta_f + 1,89^\circ)$	$\dot{\mathcal{E}}_{i_n}^{AT} = 11,16 \cdot 10^4 \text{sen}^2(\theta_f + 2,51^\circ)$

De acordo com as Figuras 5.6 e 5.7, as energias dos coeficientes *wavelet* (energias dos transitórios de falta) para tensões e correntes em faltas monofásicas apresentam as seguintes características:

1. As energias dos transitórios de falta são função seno quadrado do ângulo de incidência de falta (Equação 5.4);
2. Os valores de pico de energia (relacionados aos transitórios mais intensos) correspondem ao máximo valor de tensão na fase sob falta. Portanto, para as faltas AT, BT e CT, os transitórios são mais severos quando  $\theta_f = 90^\circ, 30^\circ$  e  $150^\circ$ , respectivamente;
3. Há ângulos de incidência de falta para os quais as energias dos coeficientes *wavelet* são quase nulas (ausência de transitórios):  $\theta_f = 0, 120^\circ$  e  $60^\circ$  para faltas AT, BT e CT, respectivamente. Portanto, algoritmos baseados na teoria das ondas viajantes para detecção de faltas poderão vir a falhar para esses ângulos de incidência particulares. No entanto, de acordo com Short (2004), a probabilidade de ocorrência de uma falta no mínimo da tensão é praticamente nula para o caso de perda de isolamento;
4. Devido aos efeitos do acoplamento eletromagnético mútuo entre as fases, sinais de tensão e corrente em fases sãs são também afetados por transitórios de falta. Porém, como esperado, as energias relacionadas aos transitórios em fases sob falta são bem maiores do que para o caso de fases sãs. Portanto, a análise baseada nos transitórios pode ser adequadamente usada na classificação de faltas monofásicas;
5. Os transitórios de falta são detectados na amostra relacionada ao ângulo  $\theta_f + \Delta\theta$  no terminal de monitoramento, sendo  $\Delta\theta$  o ângulo correspondente ao tempo de trânsito das ondas viajantes do local da falta até a barra 1. Porém, a energia dos transitórios é função de  $\theta_f + \delta$  (vide Equação 5.4), em que  $\delta$  depende do tipo de falta. Portanto, identificando-se o ângulo  $\Delta\theta$ , é possível que a falta seja localizada usando-se apenas informações de um terminal da linha de transmissão;
6. O comportamento geral das energias dos coeficientes *wavelet* não foi alterado com a inclusão da compensação série. Os transitórios apenas se mostraram um pouco mais intensos para esses casos. Portanto, a compensação série não deve afetar métodos de detecção de faltas baseados nas ondas viajantes.

Com exceção das análises para linha com compensação série, as conclusões apresentadas também foram verificadas por Costa *et al.* (2012).

### 5.2.2 Falta Bifásicas

Considerando-se um sistema de transmissão trifásico e balanceado, as tensões de linha no local da falta ( $v_{ABf}$ ,  $v_{BCf}$  e  $v_{CAf}$ ), no instante de ocorrência da falta, são da forma:

$$v_{ABf} = \sqrt{3}V \text{sen}(\theta_f + \delta_A + 30^\circ) = \sqrt{3}V \text{sen}(\theta_f + \delta_{AB}), \quad (5.5)$$

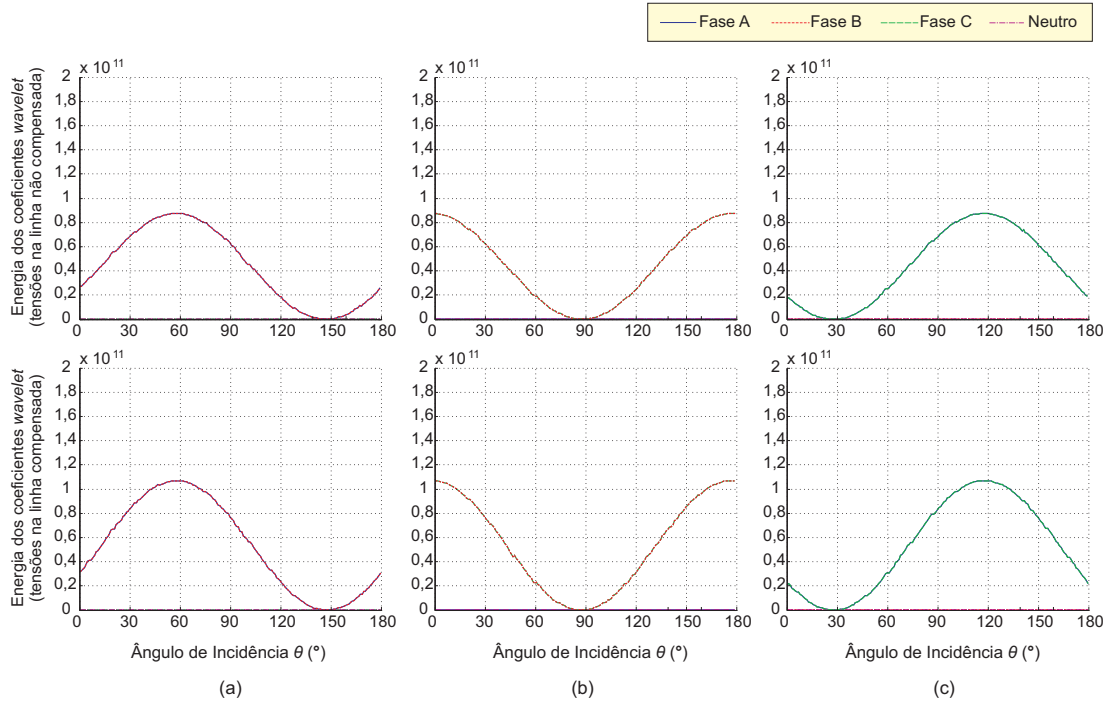
$$v_{BCf} = \sqrt{3}V \text{sen}(\theta_f + \delta_B + 30^\circ) = \sqrt{3}V \text{sen}(\theta_f + \delta_{BC}), \quad (5.6)$$

$$v_{CAf} = \sqrt{3}V \text{sen}(\theta_f + \delta_C + 30^\circ) = \sqrt{3}V \text{sen}(\theta_f + \delta_{CA}), \quad (5.7)$$

sendo  $\{\delta_{AB}, \delta_{BC}, \delta_{CA}\} = \{\delta_A + 30^\circ, \delta_B + 30^\circ, \delta_C + 30^\circ\} = \{30^\circ, -90^\circ, 150^\circ\}$ .

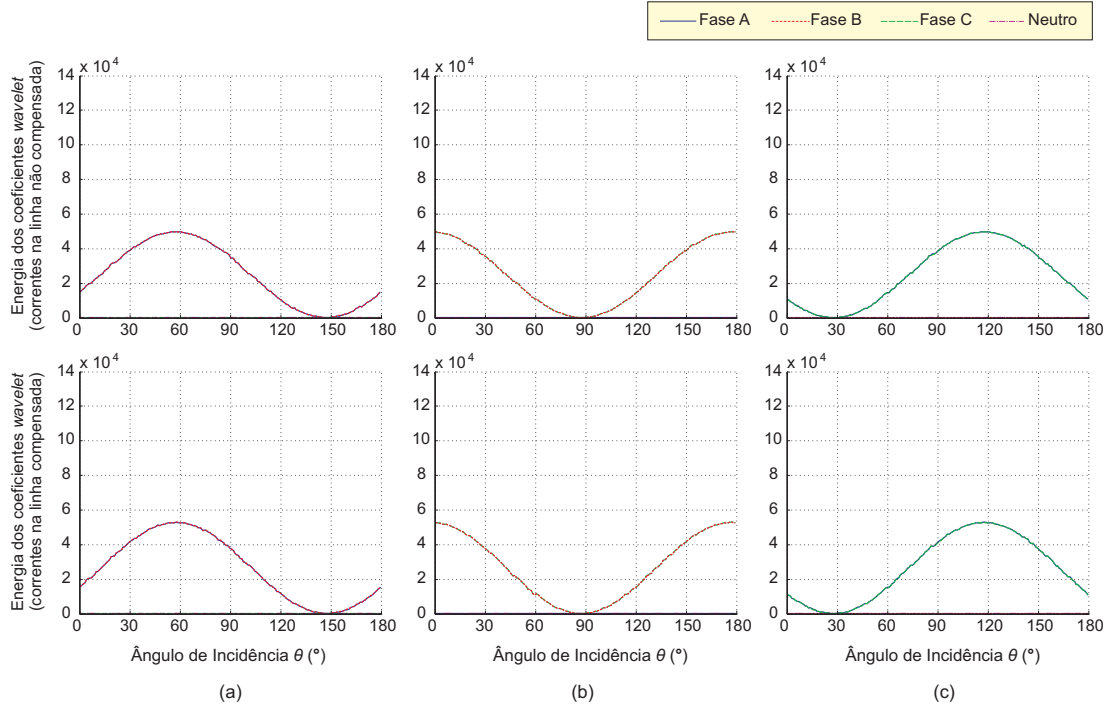
Como para o caso das faltas monofásicas, os transitórios de falta mais severos ocorrem quando a tensão sob falta passa pelo seu valor máximo. Portanto, para uma falta AB, por exemplo, os transitórios serão máximos quando  $\theta_f + \delta_{AB} = 90^\circ \Rightarrow \theta_f = 60^\circ$ . Para os casos das faltas BC e CA, os transitórios máximos ocorrerão quando  $\theta_f = 0^\circ$  e  $120^\circ$ , respectivamente.

Na Figura 5.8 são apresentadas as curvas da energia dos coeficientes *wavelet* das tensões em função do ângulo de incidência de falta para faltas bifásicas (AB, BC e CA), considerando-se os casos de linha não compensada e com compensação série. Na Figura 5.9 são apresentados os resultados desta mesma análise quando aplicada aos sinais de corrente.



**Figura 5.8.** Energias dos coeficientes *wavelet* das tensões na barra 1, em faltas bifásicas, em linhas sem e com compensação versus ângulo de incidência de falta: (a) faltas AB; (b) faltas BC; (c) faltas CA.

Uma análise de regressão foi realizada para todos os casos de faltas AB expressos nas Figuras 5.8(a) e 5.9(a), cujos resultados foram organizados na Tabela 5.7. As equações foram estimadas pelo *toolbox cftool* do programa Matlab, sendo obtido um coeficiente de correlação  $R^2 \approx 0,9998$ .



**Figura 5.9.** Energias dos coeficientes *wavelet* das correntes na barra 1, em faltas bifásicas, em linhas sem e com compensação versus ângulo de incidência de falta: (a) faltas AB; (b) faltas BC; (c) faltas CA.

**Tabela 5.7.** Resultado da análise de regressão de  $\dot{\mathcal{E}} = f(\theta_f)$  para faltas AB em linhas sem e com compensação série.

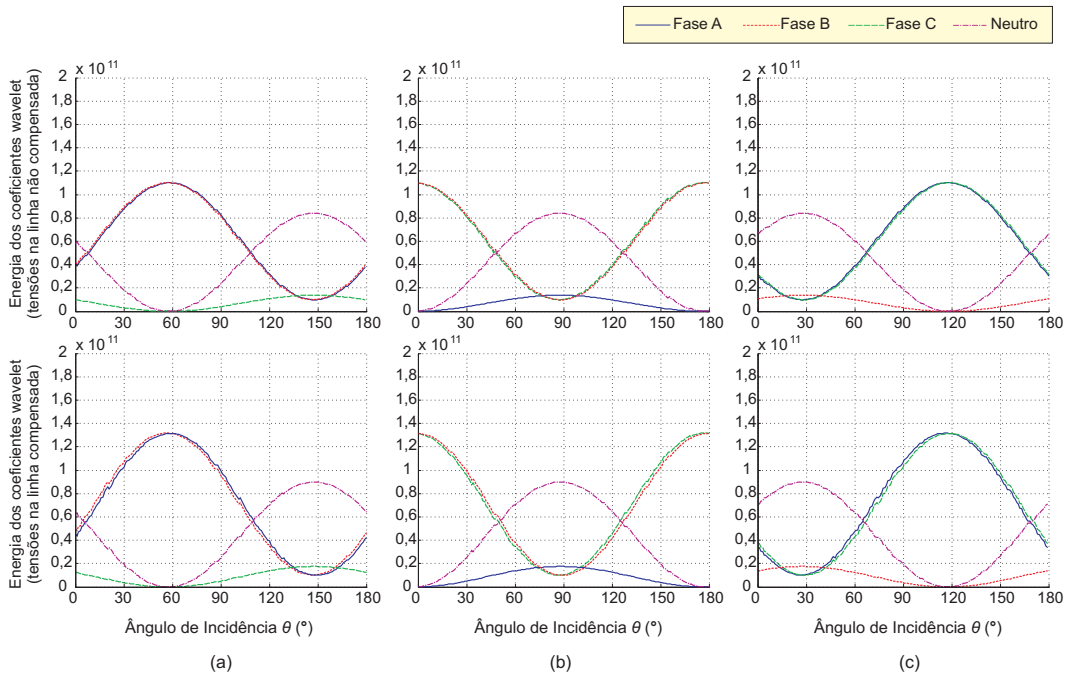
Sinal	Linha sem compensação	Linha com compensação série
$v_a$	$\dot{\mathcal{E}}_{v_a}^{AB} = 0,872 \cdot 10^{11} \text{sen}^2(\theta_f + 32, 21^\circ)$	$\dot{\mathcal{E}}_{v_a}^{AB} = 1,06 \cdot 10^{11} \text{sen}^2(\theta_f + 31, 99^\circ)$
$v_b$	$\dot{\mathcal{E}}_{v_b}^{AB} = 0,87 \cdot 10^{11} \text{sen}^2(\theta_f + 32, 21^\circ)$	$\dot{\mathcal{E}}_{v_b}^{AB} = 1,06 \cdot 10^{11} \text{sen}^2(\theta_f + 31, 99^\circ)$
$v_c$	$\dot{\mathcal{E}}_{v_c}^{AB} \approx 0$	$\dot{\mathcal{E}}_{v_c}^{AB} \approx 0$
$v_n$	$\dot{\mathcal{E}}_{v_n}^{AB} \approx 0$	$\dot{\mathcal{E}}_{v_n}^{AB} \approx 0$
$i_a$	$\dot{\mathcal{E}}_{i_a}^{AB} = 4,93 \cdot 10^4 \text{sen}^2(\theta_f + 32, 22^\circ)$	$\dot{\mathcal{E}}_{i_a}^{AB} = 5,25 \cdot 10^4 \text{sen}^2(\theta_f + 32, 13^\circ)$
$i_b$	$\dot{\mathcal{E}}_{i_b}^{AB} = 4,93 \cdot 10^4 \text{sen}^2(\theta_f + 32, 22^\circ)$	$\dot{\mathcal{E}}_{i_b}^{AB} = 5,25 \cdot 10^4 \text{sen}^2(\theta_f + 32, 13^\circ)$
$i_c$	$\dot{\mathcal{E}}_{i_c}^{AB} \approx 0$	$\dot{\mathcal{E}}_{i_c}^{AB} \approx 0$
$i_n$	$\dot{\mathcal{E}}_{i_n}^{AB} \approx 0$	$\dot{\mathcal{E}}_{i_n}^{AB} \approx 0$

De acordo com as Figuras 5.8 e 5.9, as energias dos coeficientes *wavelet* (energia dos transitórios) para tensões e correntes em faltas bifásicas apresentam as seguintes características:

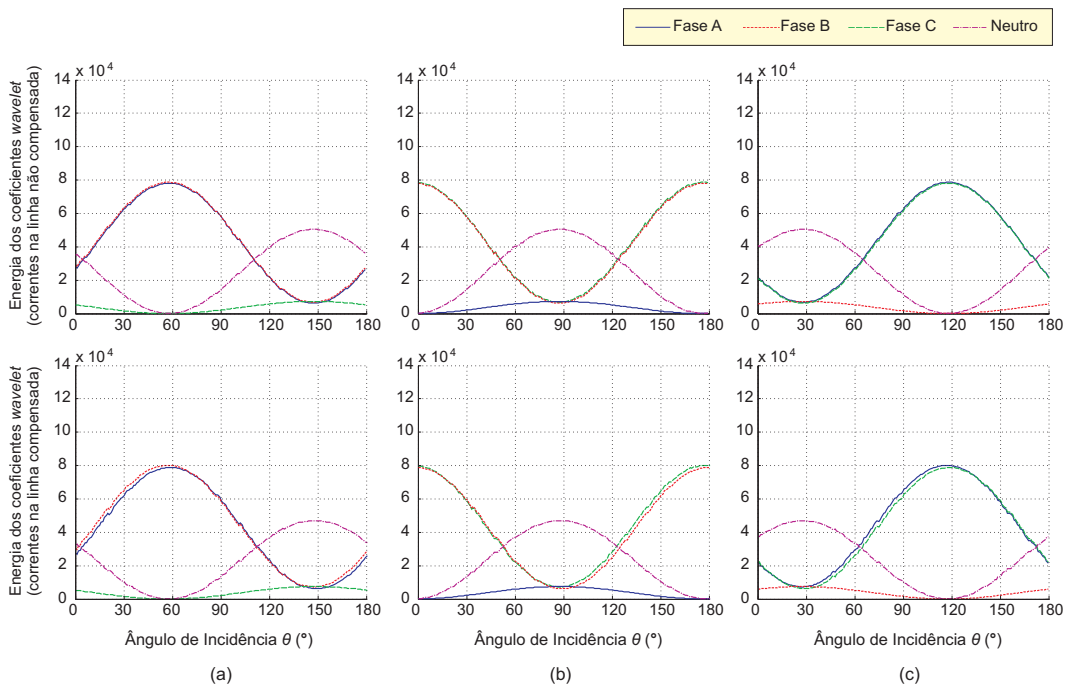
1. As energias dos transitórios são função seno quadrado do ângulo de incidência de falta (Equação 5.4);
2. Uma vez que a amplitude da tensão de linha é maior do que a da tensão de fase, faltas bifásicas geram energias dos transitórios de falta mais intensas do que para o caso de faltas monofásicas;
3. Para as faltas AB, BC e CA, os transitórios são mais severos quando  $\theta_f = 60^\circ, 0^\circ$  e  $120^\circ$ , respectivamente;
4. As energias dos coeficientes *wavelet* são quase nulas quando o ângulo de incidência é  $\theta_f = 150^\circ, 90^\circ$  e  $30^\circ$  para faltas AB, BC e CA, respectivamente. Portanto, algoritmos baseados na teoria das ondas viajantes para detecção de faltas poderão falhar para esses valores de ângulos de incidência;
5. Devido aos efeitos do acoplamento mútuo entre fases, ambas as fases sob falta induzem transitórios na fase sã e no neutro, com amplitudes equivalentes, porém com diferentes polaridades (COSTA *et al.*, 2012). Isso significa que as energias dos coeficientes *wavelet* para a fase sã e para o neutro são quase nulas. Então, a proposta de classificação de faltas pode ser realizada com uso das energias dos transitórios;
6. O comportamento geral das energias dos coeficientes *wavelet* não mudou com a inclusão da compensação série. No entanto, apenas um pequeno aumento nas intensidades dos transitórios foi constatado. Portanto, a compensação série não deve afetar métodos de detecção e classificação de faltas baseados nos conteúdos de alta frequência das tensões e correntes.

### 5.2.3 Faltas Bifásicas para a Terra

Na Figura 5.10 são apresentadas as curvas da energia dos coeficientes *wavelet* das tensões em função do ângulo de incidência de falta para faltas bifásicas para a terra (ABT, BCT e CAT), considerando-se os casos de linha não compensada e com compensação série. Na Figura 5.11 são apresentados os resultados desta mesma análise quando aplicada às correntes.



**Figura 5.10.** Energias dos coeficientes *wavelet* das tensões na barra 1, em faltas bifásicas para a terra, em linhas sem e com compensação versus ângulo de incidência de falta: (a) faltas ABT; (b) faltas BCT; (c) faltas CAT.



**Figura 5.11.** Energias dos coeficientes *wavelet* das correntes na barra 1, em faltas bifásicas para a terra, em linhas sem e com compensação versus ângulo de incidência de falta: (a) faltas ABT; (b) faltas BCT; (c) faltas CAT.

Uma análise de regressão foi realizada para todos os casos de faltas ABT das Figuras 5.10(a) e 5.11(a), cujos resultados foram organizados na Tabela 5.8. As equações foram estimadas pelo

*toolbox cftool* do programa Matlab, no qual foi obtido um coeficiente de correlação  $R^2 \approx 0,9998$ .

**Tabela 5.8.** Resultado da análise de regressão de  $\dot{\mathcal{E}} = f(\theta_f)$  para faltas ABT em linhas sem e com compensação série.

Sinal	Linha sem compensação	Linha com compensação série
$v_a$	$\dot{\mathcal{E}}_{v_a}^{ABT} = 1, 10.10^{11} \text{sen}^2(\theta_f + 31, 42^\circ)$	$\dot{\mathcal{E}}_{v_a}^{ABT} = 1, 22.10^{11} \text{sen}^2(\theta_f + 31, 21^\circ)$
$v_b$	$\dot{\mathcal{E}}_{v_b}^{ABT} = 1, 10.10^{11} \text{sen}^2(\theta_f + 32, 43^\circ)$	$\dot{\mathcal{E}}_{v_b}^{ABT} = 1, 22.10^{11} \text{sen}^2(\theta_f + 33, 29^\circ)$
$v_c$	$\dot{\mathcal{E}}_{v_c}^{ABT} = 0, 13.10^{11} \text{sen}^2(\theta_f - 58, 08^\circ)$	$\dot{\mathcal{E}}_{v_c}^{ABT} = 0, 17.10^{11} \text{sen}^2(\theta_f - 57, 65^\circ)$
$v_n$	$\dot{\mathcal{E}}_{v_n}^{ABT} = 0, 84.10^{11} \text{sen}^2(\theta_f - 58, 08^\circ)$	$\dot{\mathcal{E}}_{v_n}^{ABT} = 0, 90.10^{11} \text{sen}^2(\theta_f - 57, 65^\circ)$
$i_a$	$\dot{\mathcal{E}}_{i_a}^{ABT} = 7, 19.10^4 \text{sen}^2(\theta_f + 31, 79^\circ)$	$\dot{\mathcal{E}}_{i_a}^{ABT} = 7, 28.10^4 \text{sen}^2(\theta_f + 31, 38^\circ)$
$i_b$	$\dot{\mathcal{E}}_{i_b}^{ABT} = 7, 19.10^4 \text{sen}^2(\theta_f + 32, 05^\circ)$	$\dot{\mathcal{E}}_{i_b}^{ABT} = 7, 29.10^4 \text{sen}^2(\theta_f + 33, 10^\circ)$
$i_c$	$\dot{\mathcal{E}}_{i_c}^{ABT} = 0, 73.10^4 \text{sen}^2(\theta_f - 58, 08^\circ)$	$\dot{\mathcal{E}}_{i_c}^{ABT} = 0, 75.10^4 \text{sen}^2(\theta_f - 57, 13^\circ)$
$i_n$	$\dot{\mathcal{E}}_{i_n}^{ABT} = 5, 03.10^4 \text{sen}^2(\theta_f - 58, 08^\circ)$	$\dot{\mathcal{E}}_{i_n}^{ABT} = 4, 70.10^4 \text{sen}^2(\theta_f - 57, 13^\circ)$

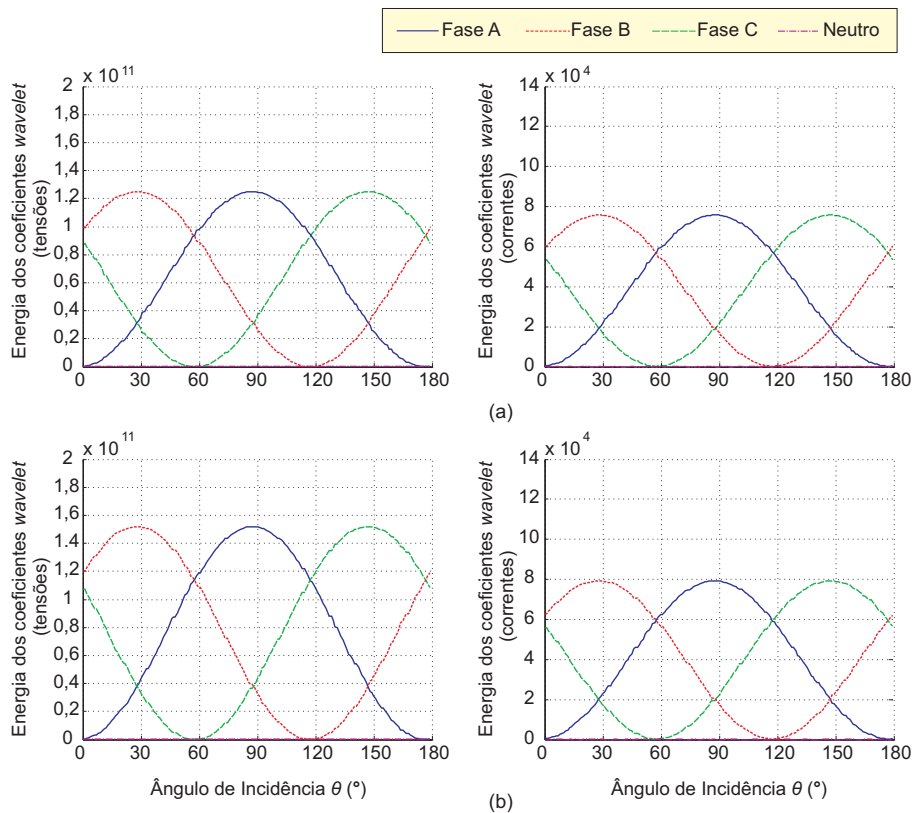
De acordo com as Figuras 5.10 e 5.11, as energias dos coeficientes *wavelet* para tensões e correntes para faltas bifásicas para a terra apresentam as seguintes características:

1. As energias dos coeficientes *wavelet* são função seno quadrado do ângulo de incidência de falta (Equação 5.4);
2. Faltas bifásicas para a terra induzem transitórios para todos os ângulos de incidência possíveis e a falta pode sempre ser detectada por meio da análise das ondas viajantes ou transitórios;
3. Considerando-se a mesma resistência de falta, localização de falta e condição de carregamento do sistema, os valores máximos de energia dos coeficientes *wavelet* são maiores para faltas bifásicas para a terra do que para faltas monofásicas e bifásicas (vide Figuras 5.6, 5.8 e 5.10). Portanto, os transitórios induzidos por faltas bifásicas para a terra são mais intensos do que para faltas monofásicas e bifásicas;
4. Há ângulos de incidência de falta nos quais os transitórios de faltas bifásicas para a terra apresentam as mesmas características dos transitórios de faltas bifásicas. Por exemplo, de acordo com a Figura 5.10(a), quando  $\theta_f = 60^\circ$ ,  $\dot{\mathcal{E}}_{v_a}^{ABT} \approx \dot{\mathcal{E}}_{v_b}^{ABT} \neq 0$  e  $\dot{\mathcal{E}}_{v_c}^{ABT} \approx \dot{\mathcal{E}}_{v_n}^{ABT} \approx 0$ , o que é característico de uma falta bifásica. Então, métodos de classificação de faltas baseado na análise de transitórios poderão falhar em alguns casos específicos de ângulo de incidência de falta;

5. A compensação série da linha de transmissão não deve afetar métodos de detecção de faltas baseados nas ondas viajantes, uma vez que as características das energias dos transitórios são as mesmas para os casos de linha com ou sem compensação.

### 5.2.4 Faltas Trifásicas

Na Figura 5.12 são apresentadas as formas de onda da energia dos coeficientes *wavelet* em função do ângulo de incidência de falta, para faltas trifásicas, considerando os casos de linha não compensada e com compensação série. Uma análise de regressão foi realizada para todos os casos de faltas trifásicas, cujos resultados foram organizados na Tabela 5.9. As equações foram estimadas pelo *toolbox cftool* do programa Matlab, em que foi obtido um coeficiente de correlação  $R^2 \approx 0,9998$ .



**Figura 5.12.** Energias dos coeficientes *wavelet* das tensões e correntes na barra 1, para faltas trifásicas, versus ângulo de incidência de falta: (a) linha não compensada; (b) linha com compensação série.



**Tabela 5.9.** Resultado da análise de regressão de  $\dot{\mathcal{E}} = f(\theta_f)$  para faltas ABC em linhas sem e com compensação série.

Sinal	Linha sem compensação	Linha com compensação série
$v_a$	$\dot{\mathcal{E}}_{v_a}^{ABC} = 1,25 \cdot 10^{11} \text{sen}^2(\theta_f + 1,95^\circ)$	$\dot{\mathcal{E}}_{v_a}^{ABC} = 1,52 \cdot 10^{11} \text{sen}^2(\theta_f + 1,90^\circ)$
$v_b$	$\dot{\mathcal{E}}_{v_b}^{ABC} = 1,25 \cdot 10^{11} \text{sen}^2(\theta_f + 61,90^\circ)$	$\dot{\mathcal{E}}_{v_b}^{ABC} = 1,52 \cdot 10^{11} \text{sen}^2(\theta_f + 61,86^\circ)$
$v_c$	$\dot{\mathcal{E}}_{v_c}^{ABC} = 1,25 \cdot 10^{11} \text{sen}^2(\theta_f - 58,04^\circ)$	$\dot{\mathcal{E}}_{v_c}^{ABC} = 1,52 \cdot 10^{11} \text{sen}^2(\theta_f - 58,09^\circ)$
$v_n$	$\dot{\mathcal{E}}_{v_n}^{ABC} \approx 0$	$\dot{\mathcal{E}}_{v_n}^{ABC} \approx 0$
$i_a$	$\dot{\mathcal{E}}_{i_a}^{ABC} = 7,55 \cdot 10^4 \text{sen}^2(\theta_f + 1,95^\circ)$	$\dot{\mathcal{E}}_{i_a}^{ABC} = 7,88 \cdot 10^4 \text{sen}^2(\theta_f + 2,00^\circ)$
$i_b$	$\dot{\mathcal{E}}_{i_b}^{ABC} = 7,55 \cdot 10^4 \text{sen}^2(\theta_f + 61,90^\circ)$	$\dot{\mathcal{E}}_{i_b}^{ABC} = 7,88 \cdot 10^4 \text{sen}^2(\theta_f + 61,96^\circ)$
$i_c$	$\dot{\mathcal{E}}_{i_c}^{ABC} = 7,55 \cdot 10^4 \text{sen}^2(\theta_f - 58,04^\circ)$	$\dot{\mathcal{E}}_{i_c}^{ABC} = 7,88 \cdot 10^4 \text{sen}^2(\theta_f - 57,98^\circ)$
$i_n$	$\dot{\mathcal{E}}_{i_n}^{ABC} \approx 0$	$\dot{\mathcal{E}}_{i_n}^{ABC} \approx 0$

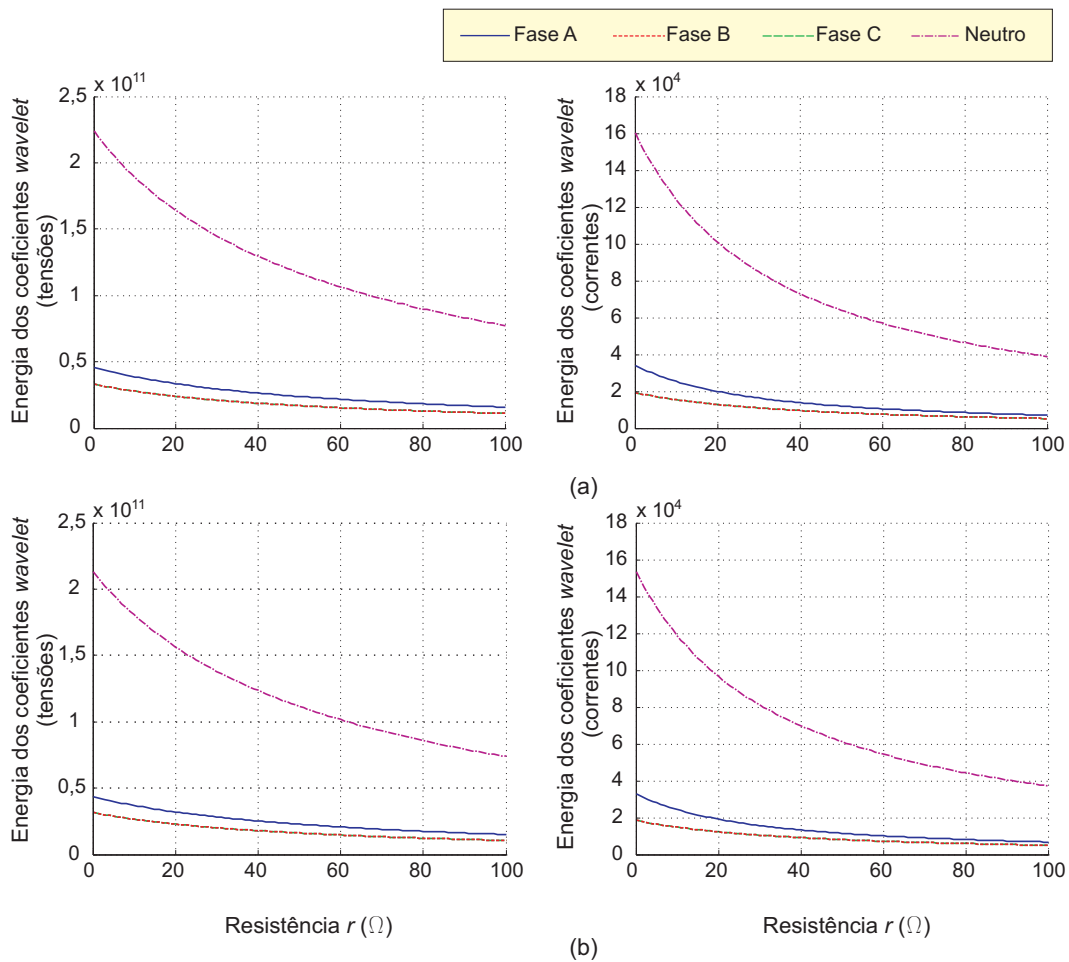
De acordo com a Figura 5.12, as energias dos coeficientes *wavelet* (energia dos transitórios) para tensões e correntes para faltas trifásicas apresentam as seguintes características:

1. As energias dos transitórios são função seno quadrado do ângulo de incidência de falta (Equação 5.4);
2. As energias dos transitórios para tensões e correntes são defasadas de  $60^\circ$ ;
3. Para os ângulos de incidência  $\theta_f = 0^\circ, 60^\circ$  e  $120^\circ$ , os transitórios de faltas ABC apresentam características similares aos transitórios de faltas BC, AB e AC, respectivamente. Por exemplo, quando  $\theta_f = 60^\circ$ ,  $\dot{\mathcal{E}}_{v_a}^{ABC} \approx \dot{\mathcal{E}}_{v_b}^{ABC} \gg 0$  e  $\dot{\mathcal{E}}_{v_c}^{ABC} \approx \dot{\mathcal{E}}_{v_n}^{ABC} \approx 0$ , o que caracteriza uma falta AB. Portanto, uma falta trifásica pode ser classificada como bifásica usando-se métodos de classificação baseados na teoria das ondas viajantes;
4. Para os ângulos de incidência  $\theta_f = 30^\circ, 90^\circ$  e  $150^\circ$ , os transitórios de faltas ABC apresentam características similares aos transitórios de faltas BT, AT e CT, respectivamente. Por exemplo, quando  $\theta_f = 90^\circ$ ,  $\dot{\mathcal{E}}_{v_a}^{ABC} \gg (\dot{\mathcal{E}}_{v_b}^{ABC} \approx \dot{\mathcal{E}}_{v_c}^{ABC})$ , o que caracteriza uma falta AT. Portanto, uma falta trifásica, em ângulos de incidência específicos, pode ser classificada como monofásica usando-se métodos de classificação baseados na teoria das ondas viajantes;
5. A compensação série da linha de transmissão não deve afetar métodos de detecção de faltas baseados nas ondas viajantes, uma vez que as características das energias dos coeficientes *wavelet* são as mesmas para os casos com ou sem compensação.

### 5.3 EFEITO DA RESISTÊNCIA DE FALTA NOS TRANSITÓRIOS

As energias dos coeficientes *wavelet* das tensões e correntes da barra 1 em função da resistência de falta foram utilizadas para avaliar o efeito da resistência de falta nos transitórios para linhas não compensada e com compensação série, de acordo com a base 2 da Tabela 5.3 e com a base 5 da Tabela 5.4.

Na Figura 5.13 são ilustradas as energias  $\dot{\mathcal{E}}_{v_A}^{AT}(r_f)$ ,  $\dot{\mathcal{E}}_{v_B}^{AT}(r_f)$ ,  $\dot{\mathcal{E}}_{v_C}^{AT}(r_f)$ ,  $\dot{\mathcal{E}}_{v_N}^{AT}(r_f)$ ,  $\dot{\mathcal{E}}_{i_A}^{AT}(r_f)$ ,  $\dot{\mathcal{E}}_{i_B}^{AT}(r_f)$ ,  $\dot{\mathcal{E}}_{i_C}^{AT}(r_f)$  e  $\dot{\mathcal{E}}_{i_N}^{AT}(r_f)$ , para faltas AT, referentes aos coeficientes *wavelet* das tensões e correntes no primeiro ciclo com transitórios de falta, para faltas simuladas em linhas sem e com compensação série. Uma análise de regressão foi realizada para todas as faltas AT, cujas equações obtidas das energias dos coeficientes *wavelet* das tensões e correntes em cada fase e no neutro, considerando-se as linhas sem e com compensação série, são apresentadas na Tabela 5.10.



**Figura 5.13.** Energias dos coeficientes *wavelet* das tensões e correntes da barra 1, para faltas AT, versus resistência de falta: (a) linha não compensada; (b) linha com compensação série.

**Tabela 5.10.** Resultado da análise de regressão de  $\dot{\mathcal{E}} = f(r_f)$  para faltas AT em linhas sem e com compensação série.

Sinal	Linha sem compensação	Linha com compensação série
$v_a^*$	$\dot{\mathcal{E}}_{v_a}^{AT} = 1,42e^{-0,0413r_f} + 3,14e^{-0,0070r_f}$	$\dot{\mathcal{E}}_{v_a}^{AT} = 1,35e^{-0,0413r_f} + 3,01e^{-0,0070r_f}$
$v_b^*$	$\dot{\mathcal{E}}_{v_b}^{AT} = 1,10e^{-0,0398r_f} + 2,20e^{-0,0070r_f}$	$\dot{\mathcal{E}}_{v_b}^{AT} = 1,05e^{-0,0400r_f} + 2,10e^{-0,0070r_f}$
$v_c^*$	$\dot{\mathcal{E}}_{v_c}^{AT} = 1,10e^{-0,0398r_f} + 2,20e^{-0,0070r_f}$	$\dot{\mathcal{E}}_{v_c}^{AT} = 1,05e^{-0,0400r_f} + 2,10e^{-0,0070r_f}$
$v_n^*$	$\dot{\mathcal{E}}_{v_n}^{AT} = 7,07e^{-0,0407r_f} + 15,26e^{-0,0070r_f}$	$\dot{\mathcal{E}}_{v_n}^{AT} = 6,71e^{-0,0408r_f} + 14,60e^{-0,0070r_f}$
$i_a^+$	$\dot{\mathcal{E}}_{i_a}^{AT} = 1,67e^{-0,0556r_f} + 1,73e^{-0,0092r_f}$	$\dot{\mathcal{E}}_{i_a}^{AT} = 1,60e^{-0,0554r_f} + 1,66e^{-0,0092r_f}$
$i_b^+$	$\dot{\mathcal{E}}_{i_b}^{AT} = 0,78e^{-0,0459r_f} + 1,14e^{-0,0080r_f}$	$\dot{\mathcal{E}}_{i_b}^{AT} = 0,75e^{-0,0460r_f} + 1,09e^{-0,0080r_f}$
$i_c^+$	$\dot{\mathcal{E}}_{i_c}^{AT} = 0,78e^{-0,0459r_f} + 1,14e^{-0,0080r_f}$	$\dot{\mathcal{E}}_{i_c}^{AT} = 0,75e^{-0,0460r_f} + 1,09e^{-0,0080r_f}$
$i_n^+$	$\dot{\mathcal{E}}_{i_n}^{AT} = 6,97e^{-0,0509r_f} + 8,99e^{-0,0080r_f}$	$\dot{\mathcal{E}}_{i_n}^{AT} = 6,67e^{-0,0509r_f} + 8,61e^{-0,0080r_f}$

\* As amplitudes das exponenciais devem ser multiplicadas por  $10^{10}$ .

+ As amplitudes das exponenciais devem ser multiplicadas por  $10^4$ .

De acordo com Costa (2010), para um sistema de transmissão simplificado com uma fonte e uma carga nas extremidades da linha de transmissão, a energia dos coeficientes *wavelet* se relaciona com a resistência de falta como segue:

$$\dot{\mathcal{E}}(r_f) = E_1 e^{-ar_f}. \quad (5.8)$$

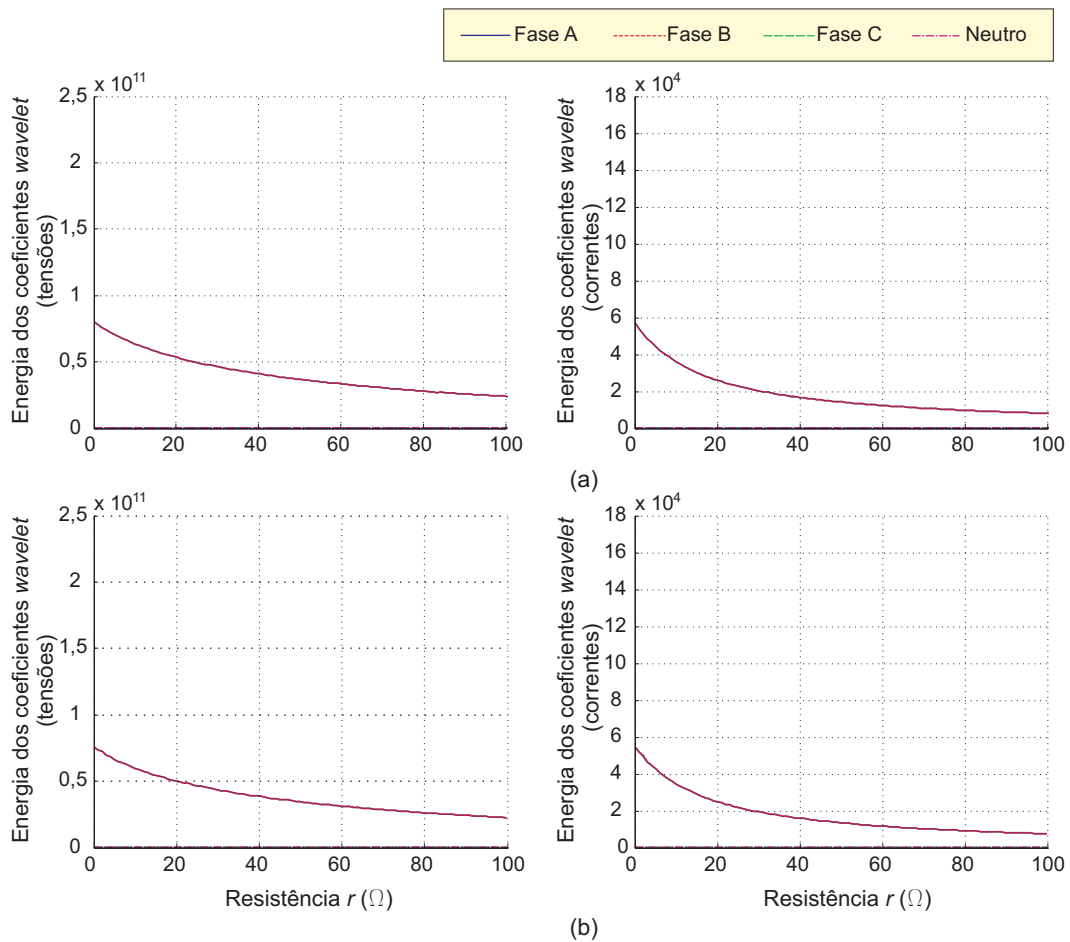
Para o sistema de transmissão com um equivalente composto por uma fonte e uma impedância em cada terminal da linha, a energia dos coeficientes *wavelet* em função da resistência de falta é dada por:

$$\dot{\mathcal{E}}(r_f) = E_1 e^{-ar_f} + E_2 e^{-br_f}, \quad (5.9)$$

sendo obtido um coeficiente de correlação  $R^2 \approx 1,0000$ .

Na Figura 5.14 são ilustradas as energias  $\dot{\mathcal{E}}_{v_A}^{AB}(r_f)$ ,  $\dot{\mathcal{E}}_{v_B}^{AB}(r_f)$ ,  $\dot{\mathcal{E}}_{v_C}^{AB}(r_f)$ ,  $\dot{\mathcal{E}}_{v_N}^{AB}(r_f)$ ,  $\dot{\mathcal{E}}_{i_A}^{AB}(r_f)$ ,  $\dot{\mathcal{E}}_{i_B}^{AB}(r_f)$ ,  $\dot{\mathcal{E}}_{i_C}^{AB}(r_f)$  e  $\dot{\mathcal{E}}_{i_N}^{AB}(r_f)$ , para faltas AB, referentes aos coeficientes *wavelet* das tensões e correntes no primeiro ciclo com transitórios de falta, para os casos de faltas em linhas sem e com compensação série. Uma análise de regressão foi realizada para todas as faltas AB, cujas equações obtidas das energias dos coeficientes *wavelet* das tensões e correntes em cada fase e no neutro, considerando-se as linhas sem e com compensação série, são apresentadas na Tabela 5.11. Todas as equações foram obtidas com  $R^2 \approx 1,0000$ .

Na Figura 5.15 são ilustradas as energias  $\dot{\mathcal{E}}_{v_A}^{ABC}(r_f)$ ,  $\dot{\mathcal{E}}_{v_B}^{ABC}(r_f)$ ,  $\dot{\mathcal{E}}_{v_C}^{ABC}(r_f)$ ,  $\dot{\mathcal{E}}_{v_N}^{ABC}(r_f)$ ,  $\dot{\mathcal{E}}_{i_A}^{ABC}(r_f)$ ,  $\dot{\mathcal{E}}_{i_B}^{ABC}(r_f)$ ,  $\dot{\mathcal{E}}_{i_C}^{ABC}(r_f)$  e  $\dot{\mathcal{E}}_{i_N}^{ABC}(r_f)$ , para faltas trifásicas, referentes aos coeficientes *wavelet* das tensões e correntes no primeiro ciclo com transitórios de falta, para faltas simuladas em linhas sem e com compensação série. Uma análise de regressão foi realizada para todas as faltas ABC, cujas equações obtidas das energias dos coeficientes *wavelet* das tensões e correntes em cada fase e no neutro, considerando-se as linhas sem e com compensação série, são apresentadas na Tabela 5.12. Todas as equações foram obtidas com  $R^2 \approx 1,0000$ .



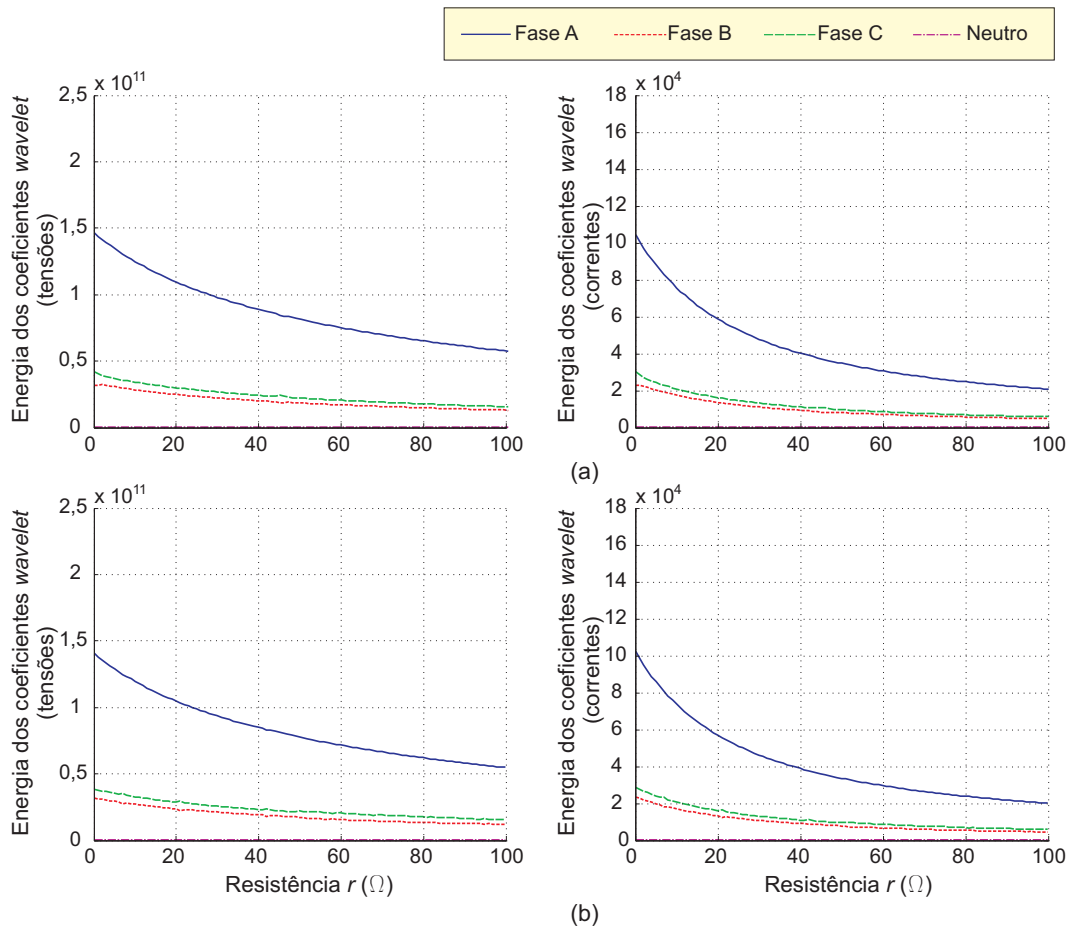
**Figura 5.14.** Energias dos coeficientes *wavelet* das tensões e correntes da barra 1, para faltas AB, versus resistência de falta: (a) linha não compensada; (b) linha com compensação série.

**Tabela 5.11.** Resultado da análise de regressão de  $\dot{\mathcal{E}} = f(r_f)$  para faltas AB em linhas sem e com compensação série.

Sinal	Linha sem compensação	Linha com compensação série
$v_a^*$	$\dot{\mathcal{E}}_{v_a}^{AB} = 2,76e^{-0,0563r_f} + 5,19e^{-0,0078r_f}$	$\dot{\mathcal{E}}_{v_a}^{AB} = 2,63e^{-0,0565r_f} + 4,88e^{-0,0078r_f}$
$v_b^*$	$\dot{\mathcal{E}}_{v_b}^{AB} = 2,76e^{-0,0563r_f} + 5,19e^{-0,0078r_f}$	$\dot{\mathcal{E}}_{v_b}^{AB} = 2,63e^{-0,0565r_f} + 4,88e^{-0,0078r_f}$
$v_c^*$	$\dot{\mathcal{E}}_{v_c}^{AB} \approx 0$	$\dot{\mathcal{E}}_{v_c}^{AB} \approx 0$
$v_n^*$	$\dot{\mathcal{E}}_{v_n}^{AB} \approx 0$	$\dot{\mathcal{E}}_{v_n}^{AB} \approx 0$
$i_a^+$	$\dot{\mathcal{E}}_{i_a}^{AB} = 3,26e^{-0,0781r_f} + 2,39e^{-0,0112r_f}$	$\dot{\mathcal{E}}_{i_a}^{AB} = 3,15e^{-0,0777r_f} + 2,28e^{-0,0112r_f}$
$i_b^+$	$\dot{\mathcal{E}}_{i_b}^{AB} = 3,26e^{-0,0781r_f} + 2,39e^{-0,0112r_f}$	$\dot{\mathcal{E}}_{i_b}^{AB} = 3,15e^{-0,0778r_f} + 2,28e^{-0,0112r_f}$
$i_c^+$	$\dot{\mathcal{E}}_{i_c}^{AB} \approx 0$	$\dot{\mathcal{E}}_{i_c}^{AB} \approx 0$
$i_n^+$	$\dot{\mathcal{E}}_{i_n}^{AB} \approx 0$	$\dot{\mathcal{E}}_{i_n}^{AB} \approx 0$

\* As amplitudes das exponenciais devem ser multiplicadas por  $10^{10}$ .

+ As amplitudes das exponenciais devem ser multiplicadas por  $10^4$ .



**Figura 5.15.** Energias dos coeficientes *wavelet* das tensões e correntes da barra 1, para faltas ABC, versus resistência de falta: (a) linha não compensada; (b) linha com compensação série.

**Tabela 5.12.** Resultado da análise de regressão de  $\dot{\mathcal{E}} = f(r_f)$  para faltas ABC em linhas sem e com compensação série.

Sinal	Linha sem compensação	Linha com compensação série
$v_a^*$	$\dot{\mathcal{E}}_{v_a}^{ABC} = 4,34e^{-0,0434r_f} + 10,28e^{-0,0059r_f}$	$\dot{\mathcal{E}}_{v_a}^{ABC} = 4,19e^{-0,0436r_f} + 9,83e^{-0,0059r_f}$
$v_b^*$	$\dot{\mathcal{E}}_{v_b}^{ABC} = 1,26e^{-0,0325r_f} + 2,02e^{-0,0046r_f}$	$\dot{\mathcal{E}}_{v_b}^{ABC} = 1,40e^{-0,0293r_f} + 1,75e^{-0,0045r_f}$
$v_c^*$	$\dot{\mathcal{E}}_{v_c}^{ABC} = 1,01e^{-0,0575r_f} + 3,05e^{-0,0067r_f}$	$\dot{\mathcal{E}}_{v_c}^{ABC} = 1,05e^{-0,0526r_f} + 2,83e^{-0,0059r_f}$
$v_n^*$	$\dot{\mathcal{E}}_{v_n}^{ABC} \approx 0$	$\dot{\mathcal{E}}_{v_n}^{ABC} \approx 0$
$i_a^+$	$\dot{\mathcal{E}}_{i_a}^{ABC} = 5,444e^{-0,0576r_f} + 4,958e^{-0,0089r_f}$	$\dot{\mathcal{E}}_{i_a}^{ABC} = 5,347e^{-0,0586r_f} + 4,839e^{-0,009r_f}$
$i_b^+$	$\dot{\mathcal{E}}_{i_b}^{ABC} = 1,333e^{-0,0508r_f} + 1,028e^{-0,0077r_f}$	$\dot{\mathcal{E}}_{i_b}^{ABC} = 1,224e^{-0,0561r_f} + 1,118e^{-0,0093r_f}$
$i_c^+$	$\dot{\mathcal{E}}_{i_c}^{ABC} = 1,421e^{-0,0655r_f} + 1,505e^{-0,0098r_f}$	$\dot{\mathcal{E}}_{i_c}^{ABC} = 1,495e^{-0,0589r_f} + 1,369e^{-0,0085r_f}$
$i_n^+$	$\dot{\mathcal{E}}_{i_n}^{ABC} \approx 0$	$\dot{\mathcal{E}}_{i_n}^{ABC} \approx 0$

\* As amplitudes das exponenciais devem ser multiplicadas por  $10^{10}$ .

+ As amplitudes das exponenciais devem ser multiplicadas por  $10^4$ .

Com os dados apresentados nas Figuras 5.13, 5.14 e 5.15 e nas Tabelas 5.10, 5.11 e 5.12, as energias dos transitórios decaem exponencialmente à medida em que a resistência de falta aumenta (COSTA, 2010). Com isso, métodos de diagnóstico de faltas baseado nas ondas viajantes são afetados por faltas com resistência elevada.

A inclusão da compensação série não afeta o comportamento geral das energias dos coeficientes *wavelet* (energias dos transitórios de alta frequência) em relação à resistência de falta, o que indica que métodos de diagnóstico de faltas baseado nas ondas viajantes também não devem ser afetados.

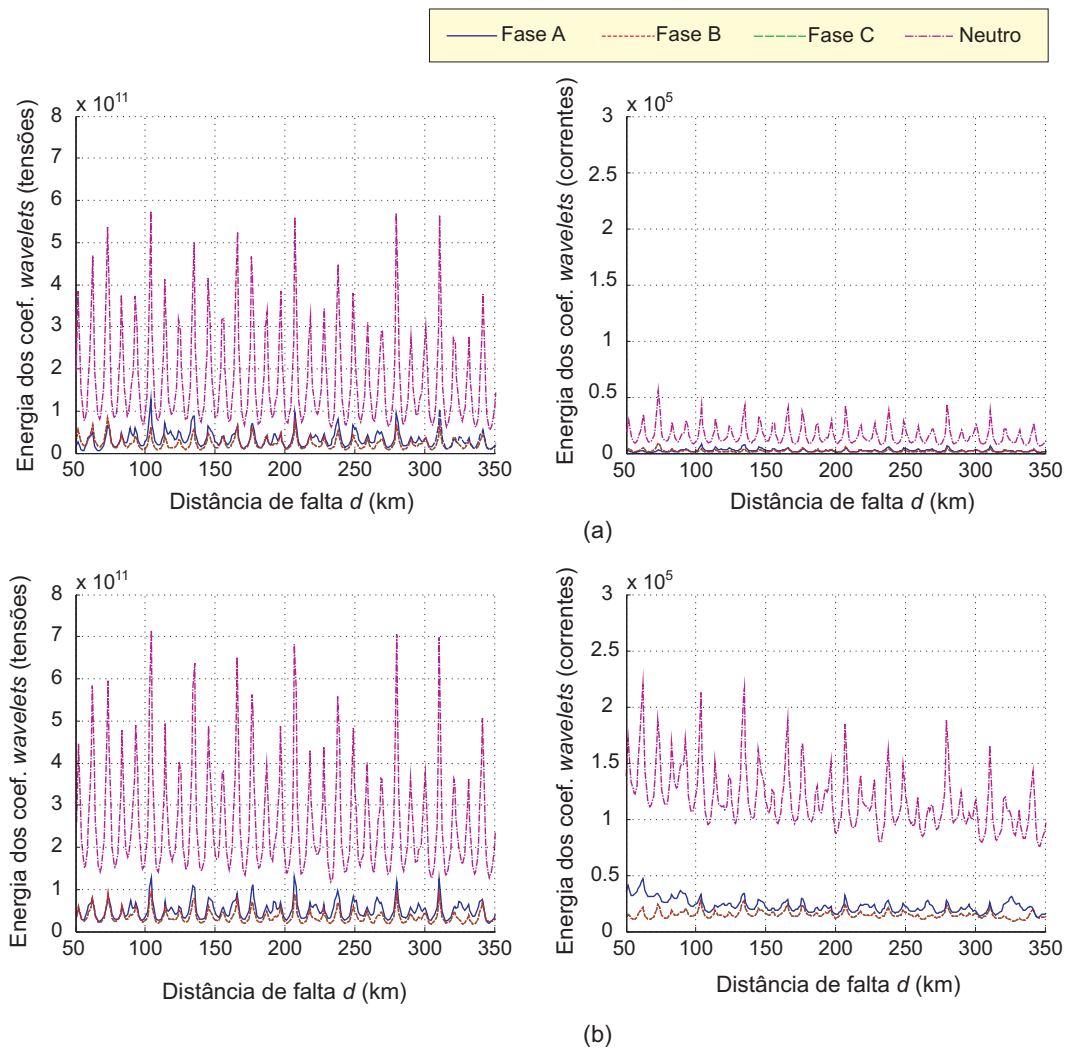
## 5.4 EFEITO DA DISTÂNCIA DE FALTA NOS TRANSITÓRIOS

Na Figura 5.16 apresentam-se as energias dos coeficientes *wavelet* das tensões e correntes em função da localização de falta, referentes a faltas AT, considerando-se os casos de ausência e presença da compensação série na linha de transmissão. Diferentemente dos resultados obtidos para ângulo de incidência e resistência de falta, as energias dos coeficientes *wavelet* como função da distância de falta não puderam ser utilizadas para extração do comportamento dos transitórios de faltas em função da distância, pois:

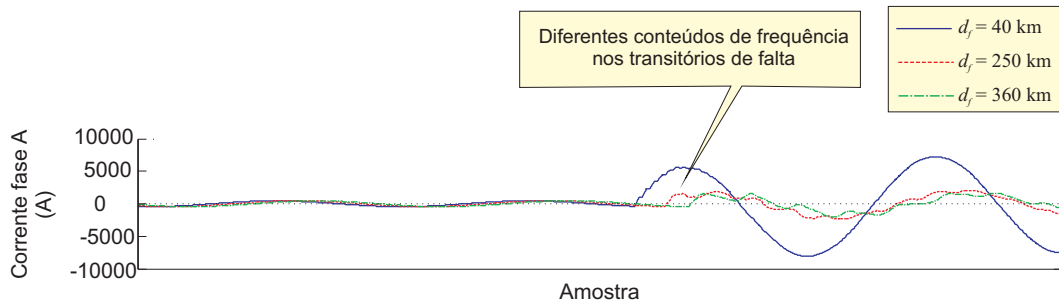
- O conteúdo de frequência dos transitórios varia com a distância. Por exemplo, faltas próximas ao terminal monitorado apresentam transitórios de alta frequência, enquanto que faltas longe do terminal monitorado apresentam conteúdo de frequência menor. Por exem-

plo, na Figura 5.17 são apresentadas as correntes na fase A, para faltas AT, nas distâncias  $d_f = \{40, 250, 360\}$  km na linha de transmissão do sistema elétrico da Figura 5.1;

- Como o conteúdo de frequência varia com a distância e os coeficientes *wavelet* são calculados em uma faixa fixa de frequência, então o efeito da mudança do conteúdo de frequência dos transitórios interfere na análise do comportamento da energia dos transitórios, em um espectro fixo, em função da distância de falta;
- O efeito do ângulo de incidência também interferiu na análise, visto que, ao variar a distância de falta, não foi possível aplicar as faltas com ângulo de incidência de  $90^\circ$  e a mesma distância angular da primeira amostra com falta.

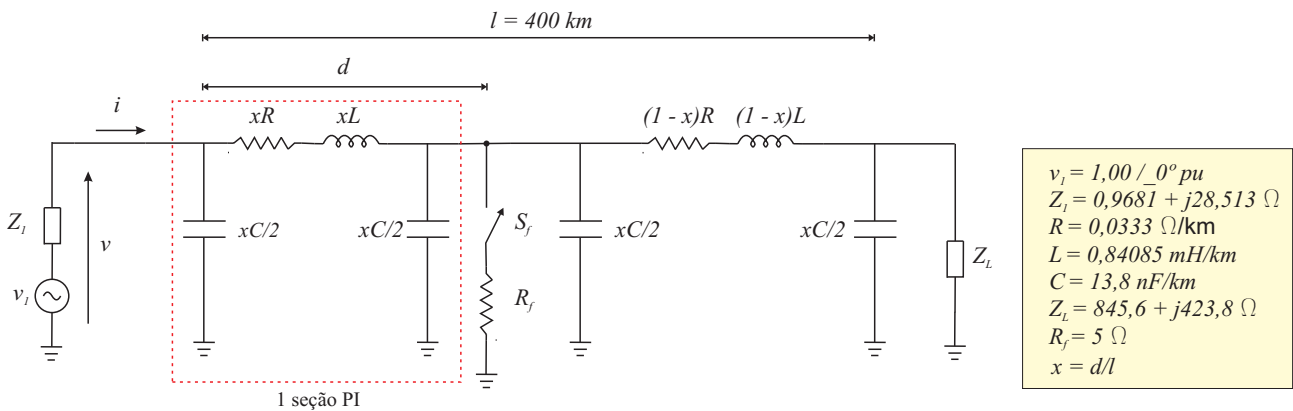


**Figura 5.16.** Energias dos coeficientes *wavelet* obtidas na barra 1 para faltas AT versus distância de falta para: (a) tensões e correntes na linha não compensada; (b) tensões e correntes na linha com compensação série.



**Figura 5.17.** Correntes na fase A para falhas aplicadas em diferentes distâncias do terminal de monitoramento.

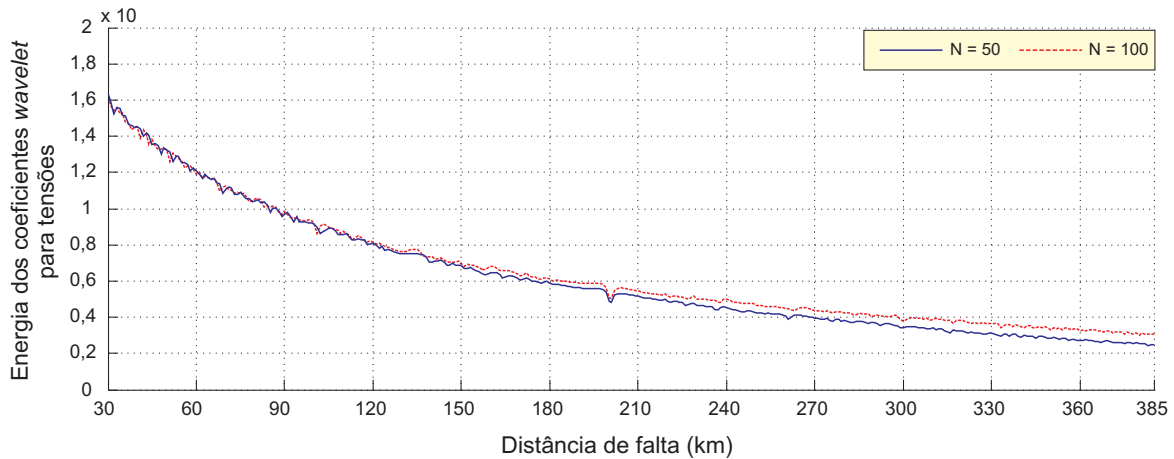
Para neutralizar os efeitos do ângulo de incidência de falta, um modelo monofásico mais simplificado da linha foi utilizado. Na Figura 5.18 é ilustrado o circuito, o qual representa um sistema de transmissão simplificado de 500 kV, composto por uma fonte e sua impedância equivalente, uma linha de transmissão modelada por parâmetros concentrados e uma carga. Foram simuladas falhas no programa Simulink/Matlab, variando-se a percentagem de distância  $x$  e levando-se em conta o uso de  $N = \{50, 100\}$  seções PI. A variação de  $x$  se deu de forma a realizar uma simulação de falta para cada quilômetro de linha.



**Figura 5.18.** Circuito monofásico simplificado com linha modelada por parâmetros concentrados em seções PI.

Os sinais de tensão  $v$  oriundos das simulações foram submetidos ao uso da TWDR para cálculo das energias dos coeficientes *wavelet* em um ciclo a partir da incidência da falta para cada simulação. Dessa forma, foram obtidas as formas de onda de energia dos coeficientes *wavelet* versus distância de falta para cada linha de  $N = \{50, 100\}$  seções PI, cujos resultados estão ilustrados na Figura 5.19.





**Figura 5.19.** Energia dos coeficientes *wavelet* versus distância de falta para linha monofásica modelada por parâmetros concentrados.

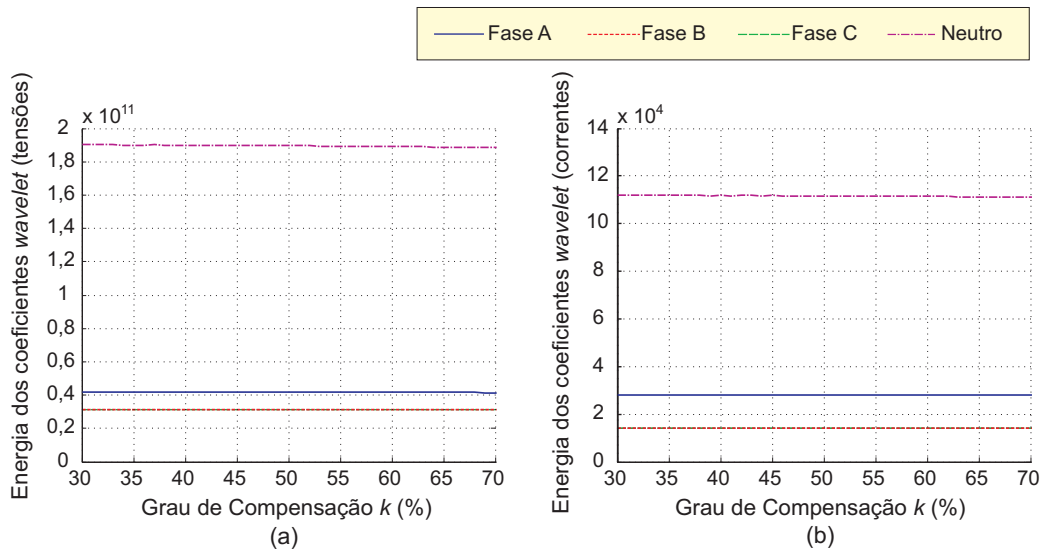
Apesar da interferência de outros parâmetros, a exemplo do ângulo de incidência de falta e da variação do conteúdo de frequência, é possível identificar um leve decaimento da energia dos transitórios com o aumento da distância de falta, visto que a resistência da linha é levemente aumentada entre o ponto de monitoramento e o local da falta. Este comportamento também está presente na Figura 5.16.

## 5.5 EFEITO DO GRAU DE COMPENSAÇÃO SÉRIE NOS TRANSITÓRIOS

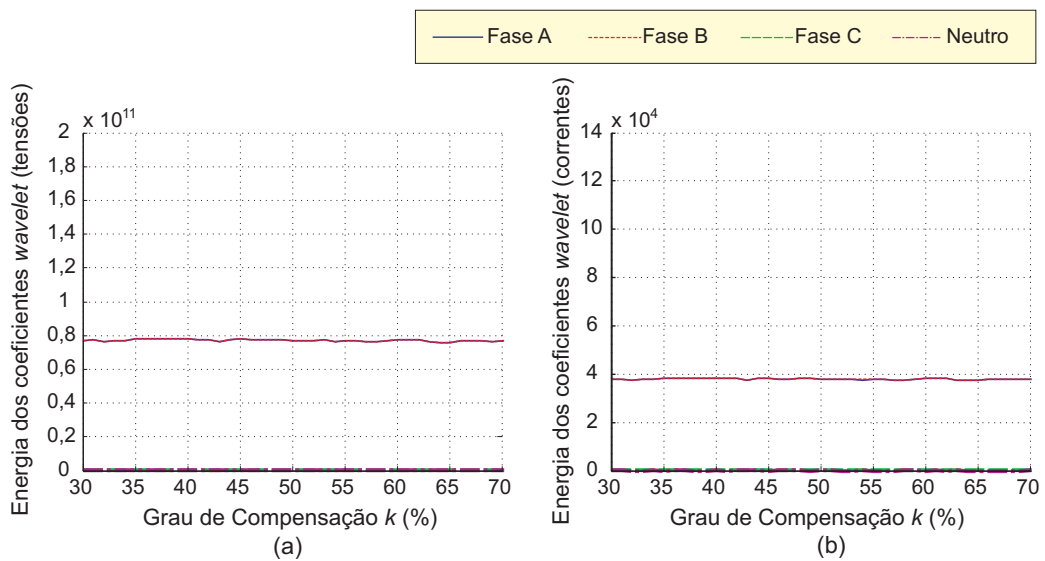
Para avaliar o efeito do grau de compensação série nos transitórios induzidos por faltas, foram simuladas no RTDS<sup>TM</sup> faltas a 100 km da barra 1, com resistência  $10 \Omega$ , ângulo de incidência  $90^\circ$  e capacitores série localizados no meio da linha de transmissão com grau de compensação variando de 30 a 70%, conforme a base 7 da Tabela 5.4.

Nas Figuras 5.20, 5.21, 5.22 e 5.23 são apresentadas a relação entre as energias dos coeficientes *wavelet* e os diferentes graus de compensação empregados para faltas AT, AB, ABT e ABC, respectivamente. Os graus de compensação série na faixa de 30 a 70% praticamente não influenciam nas características dos transitórios de faltas para todos os tipos de falta, visto que as energias dos transitórios se mantiveram praticamente constante com o grau de compensação. Com isso, infere-se que métodos de detecção e classificação de faltas baseados nos transitórios não devem sofrer influência da compensação série. Isso pode ser um indicativo de que o diagnóstico de faltas por meio da teoria das ondas viajantes pode apresentar funcionalidade adequada

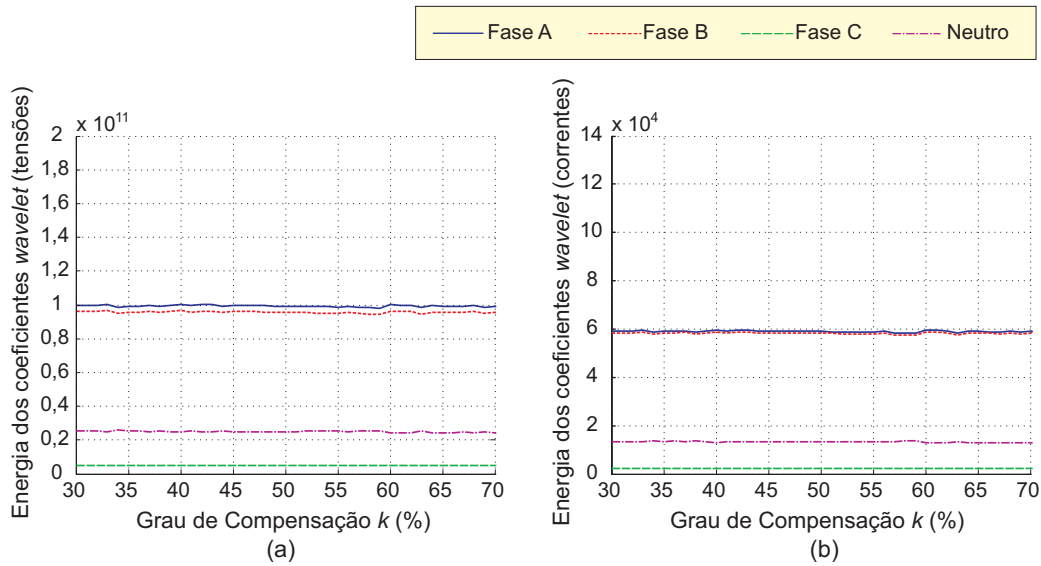
tanto para linhas sem compensação, quanto para linhas com compensação série.



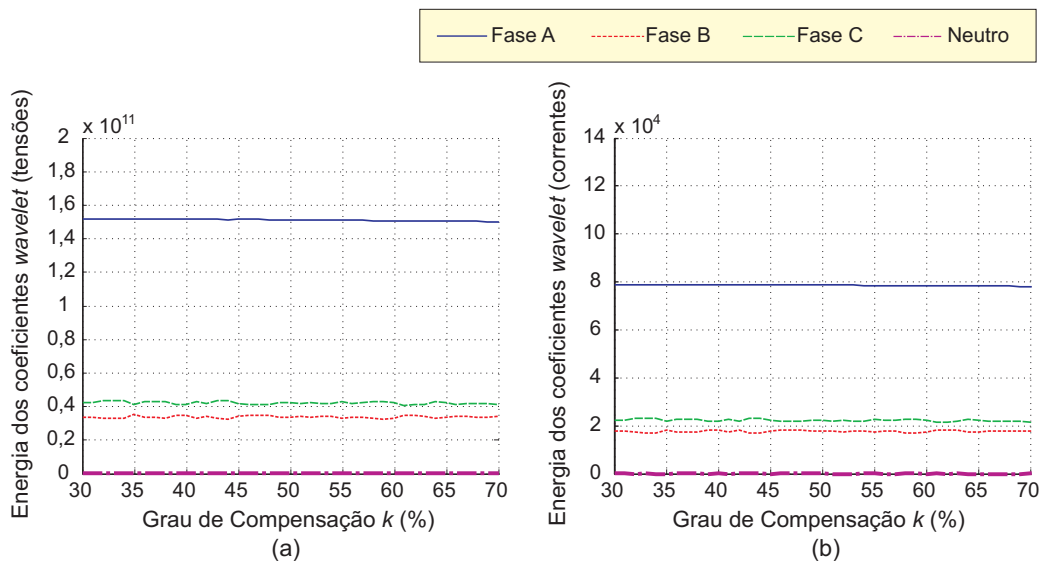
**Figura 5.20.** Energias dos coeficientes *wavelet* obtidas na barra 1, para faltas AT, versus grau de compensação série: (a) tensões; (b) correntes.



**Figura 5.21.** Energias dos coeficientes *wavelet* obtidas na barra 1, para faltas AB, versus grau de compensação série: (a) tensões; (b) correntes.



**Figura 5.22.** Energias dos coeficientes *wavelet* obtidas na barra 1, para faltas ABT, versus grau de compensação série: (a) tensões; (b) correntes.

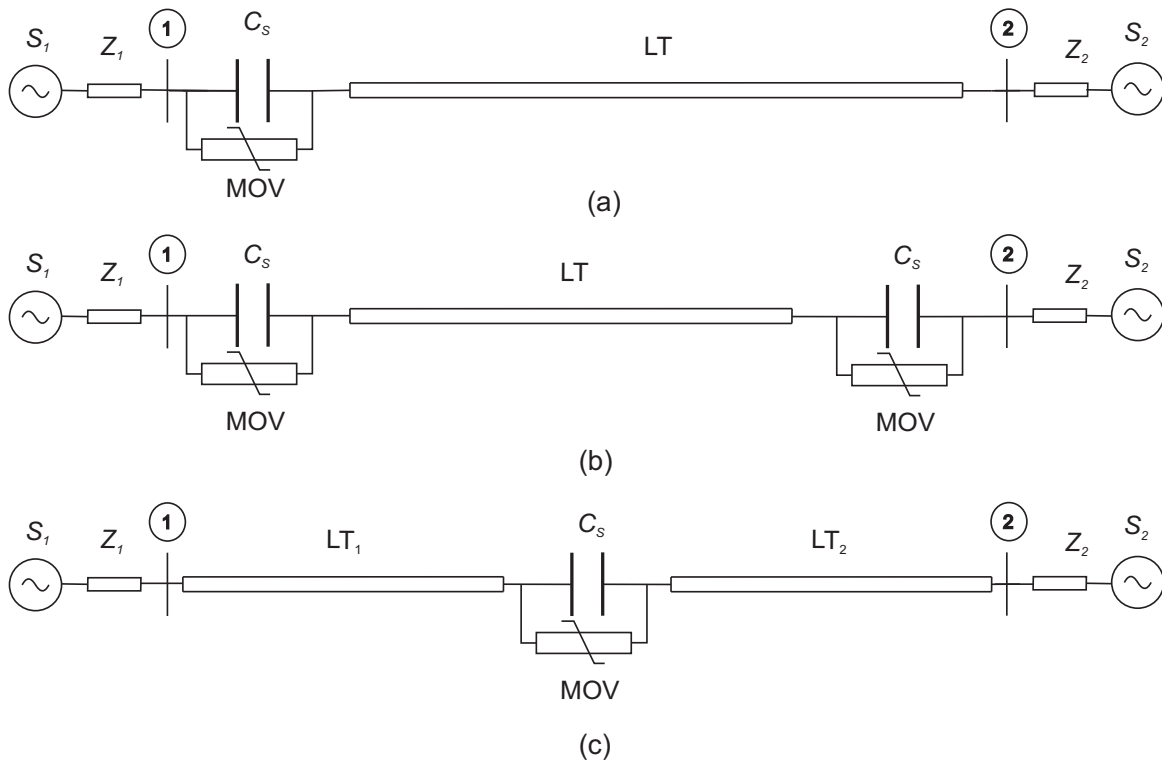


**Figura 5.23.** Energias dos coeficientes *wavelet* obtidas na barra 1, para faltas ABC, versus grau de compensação série: (a) tensões; (b) correntes.

Como discutido no Capítulo 2, a localização dos capacitores série na linha de transmissão é um ponto importante no emprego da compensação série, que resulta em vantagens e desvantagens sob os pontos de vista técnico e econômico. Visando estender essa análise para a avaliação dos efeitos da localização da compensação série, faltas foram simuladas variando-se o grau de compensação para os casos de compensação série concentrada em uma extremidade, dividida nos dois terminais e no meio da linha (Figura 5.24). As simulações foram realizadas no programa Simulink/Matlab, em que um equivalente monofásico do sistema de transmissão

de 500 kV apresentado na Seção 5.1 foi modelado.

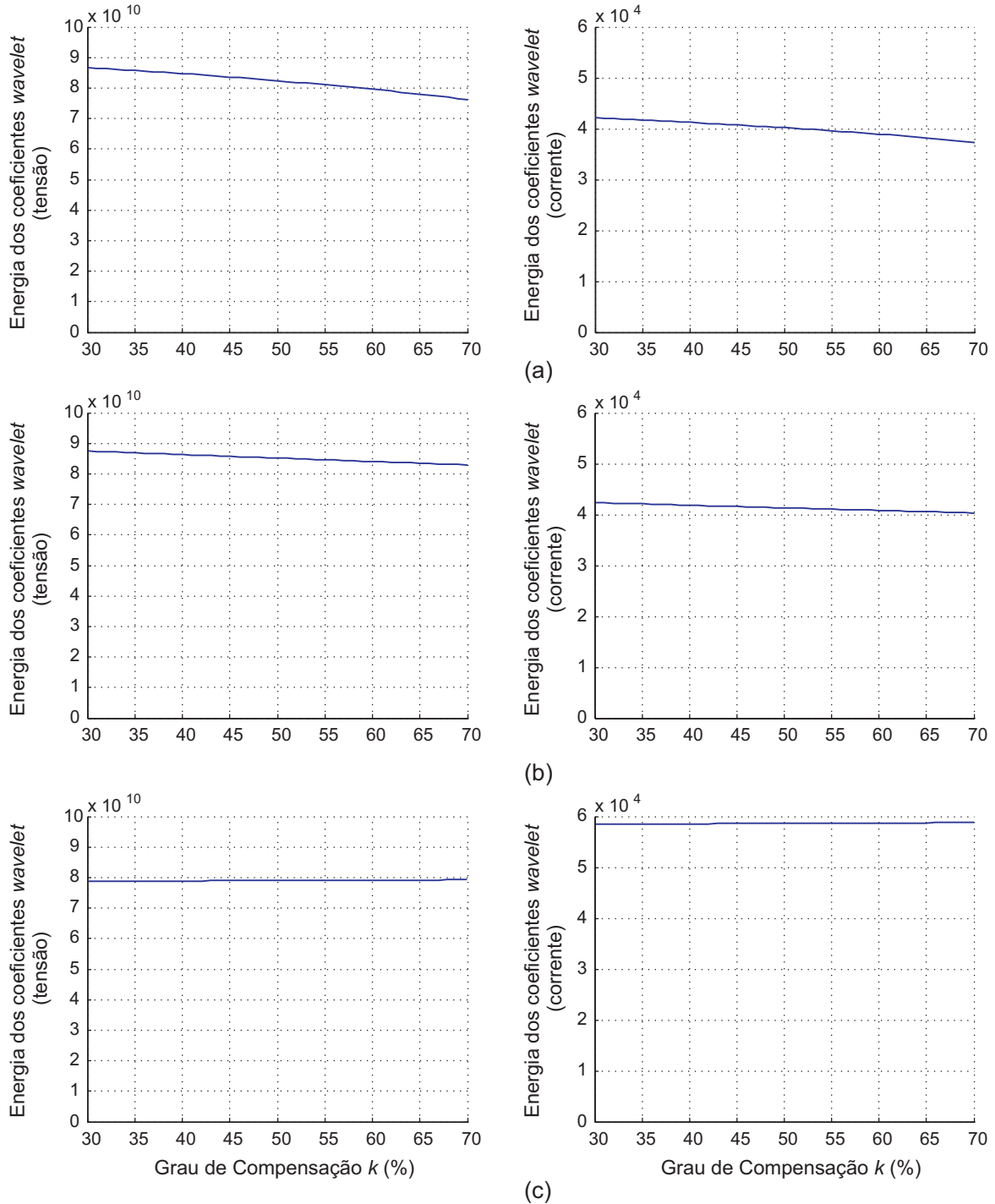
Uma resistência de falta de  $5 \Omega$  e um ângulo de incidência de  $90^\circ$  foram considerados nas simulações. Quanto ao ponto de aplicação das faltas, estas foram simuladas na metade da linha de transmissão ( $d_f = 200$  km) para os casos de compensação em uma e em ambas as extremidades da linha e em  $d_f = 100$  km para o caso de compensação no meio da linha. Os valores do grau de compensação utilizados estão na faixa de 30 a 70%, variando-se de um em um. As energias dos coeficientes *wavelet* da TWDR em um ciclo dos transitórios foram obtidas para os sinais de tensão e corrente medidos na barra 1. Os resultados obtidos relacionam as energias dos coeficientes *wavelet* com o grau de compensação, ilustrados na Figura 5.25.



**Figura 5.24.** Diferentes localizações da compensação série: (a) em uma extremidade da linha; (b) dividida nas duas extremidades da linha; (c) no meio da linha.

Para o caso da compensação série aplicada no meio da linha de transmissão (Figura 5.25(c)), o comportamento dos transitórios foi consoante ao encontrado para o caso trifásico abordado na Figura 5.20. Para os casos da compensação série aplicada em uma e em ambas as extremidades da linha, tem-se um sutil decaimento das energias dos coeficientes *wavelet* à medida em que se aumenta o grau de compensação série (Figuras 5.25(a) e 5.25(b)). Para essas duas últimas formas de compensação série, o comportamento geral dos transitórios para um sistema trifásico

teria características equivalentes ao caso obtido para a compensação no meio da linha. Portanto, a aplicação da compensação série em uma ou em ambas as extremidades da linha não deve afetar métodos de diagnóstico de faltas baseados na teoria das ondas viajantes.



**Figura 5.25.** Energias dos coeficientes *wavelet* para tensões e correntes no sistema de transmissão monofásico para diferentes locais da compensação série: (a) em uma extremidade da linha; (b) dividida nas duas extremidades da linha; (c) no meio da linha.

## 5.6 EFEITO DAS ESCALAS *WAVELET* NOS TRANSITÓRIOS

De acordo com o Critério de Nyquist, para que não haja sobreposição de espectros, um sinal com frequência de amostragem  $f_s$  apresenta um espectro de frequência na faixa de 0 a  $f_s/2$  (LATHI, 2007). Portanto, para a frequência de amostragem de 20 kHz, utilizada nas simulações no RTDS<sup>TM</sup>, as tensões e correntes apresentam componentes de frequência de, no máximo, 10 kHz. Na primeira escala da TWDR, idealmente, os filtros escala extraem as componentes de 0 a 5 kHz, enquanto que os filtros *wavelet* extraem as componentes de frequência de 5 a 10 kHz. Na segunda e terceira escalas, os filtros *wavelet* extraem as componentes de frequência nas faixas de 2,5 a 5 kHz e 1,25 a 2,5 kHz, respectivamente. Por não se tratar de filtros ideais, os filtros passa-alta são afetados pelas baixas frequências e os filtros passa-baixa são afetados pelas altas frequências, como pode ser observado na Figura 5.26, na qual é apresentada a resposta em frequência, na faixa de 0 a 10000 Hz, dos filtros escala e *wavelet* para a *wavelet* mãe db(4), nas três primeiras escalas.

Nas Figuras 5.27 e 5.28 é apresentado o comportamento da energia dos coeficientes *wavelet* perante as três primeiras escalas *wavelet* em função do ângulo de incidência e da resistência de falta, respectivamente.

De acordo com as Figuras 5.27 e 5.28, tem-se que:

1. As energias dos coeficientes *wavelet* apresentaram o mesmo comportamento geral nas três primeiras escalas, o que indica que a energia dos transitórios apresenta um comportamento único em uma ampla faixa de frequência;
2. A energias dos coeficientes *wavelet* apresentam maior intensidade na primeira escala. Portanto, para  $f_s = 20$  kHz, a energia dos transitórios na faixa de mais alta frequência é mais adequada para a detecção de faltas, já que é garantida uma maior resolução no tempo de detecção, melhorando a estimação da localização de faltas, como discutido no próximo capítulo. Além do mais, a implementação de apenas um estágio da TWDR significa um menor esforço computacional requerido.

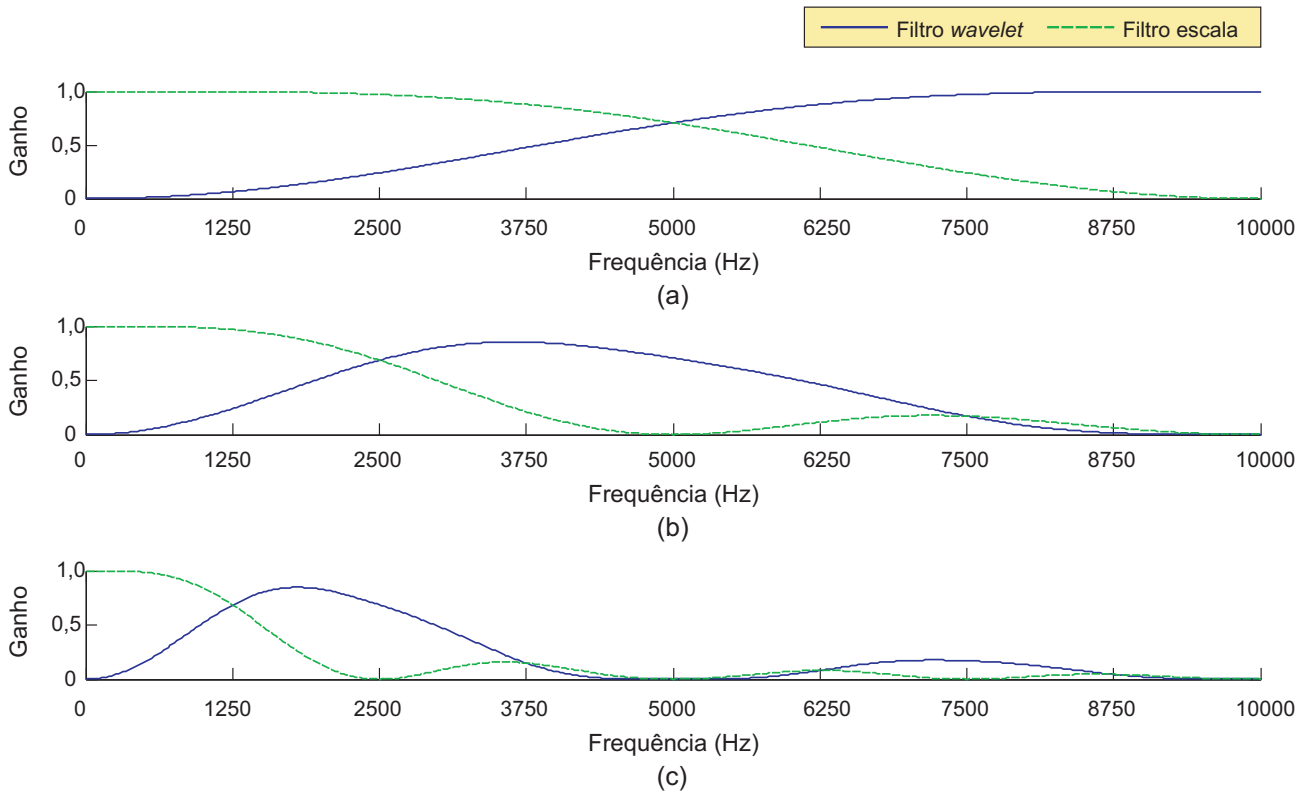


Figura 5.26. Resposta em frequência dos filtros escala e *wavelet* para a *wavelet* mãe db(4): (a) primeira escala; (b) segunda escala; (c) terceira escala.

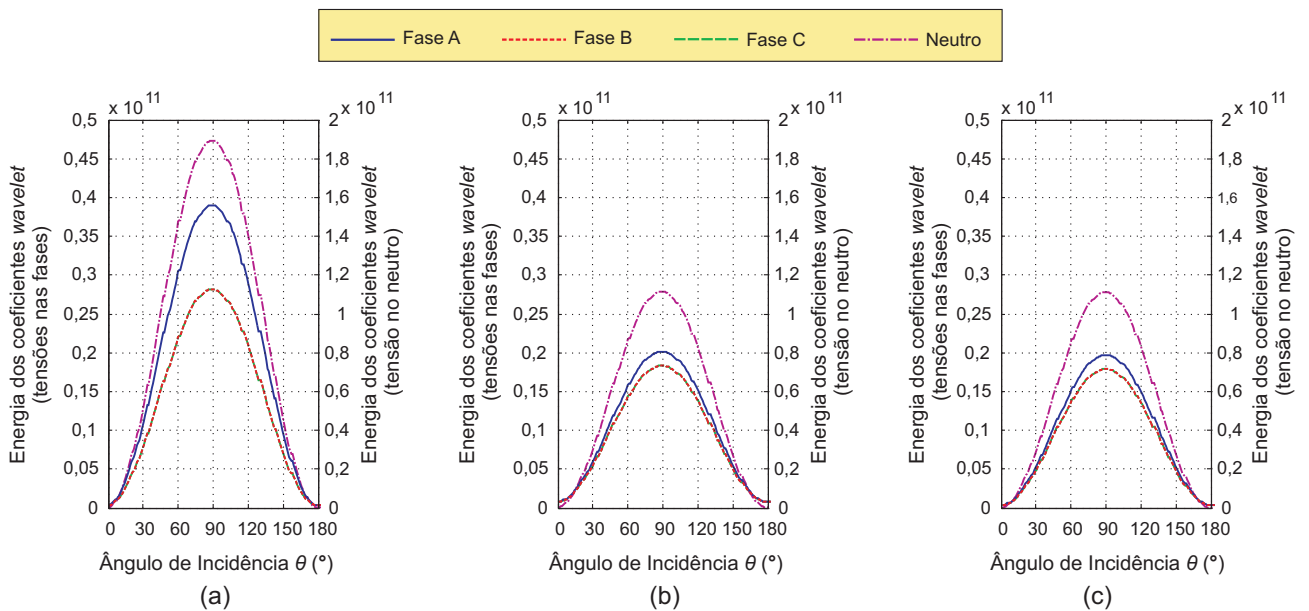
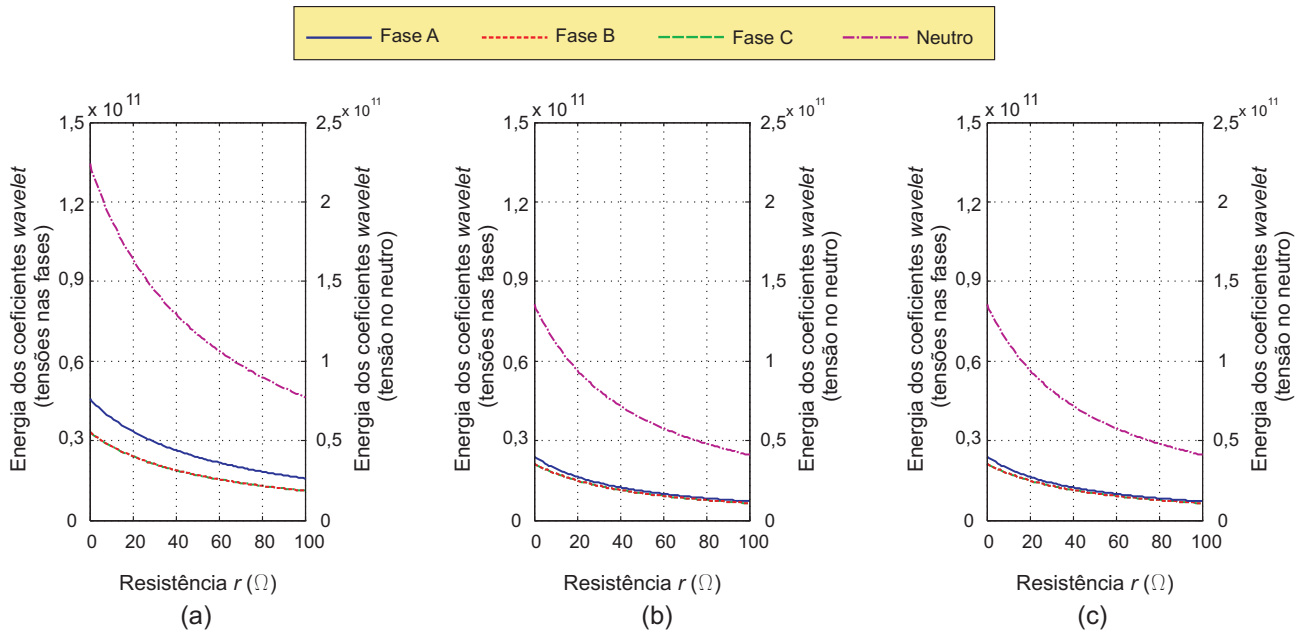


Figura 5.27. Efeito da escala *wavelet* nas energias dos coeficientes *wavelet* para faltas AT variando-se o ângulo de incidência de falta: (a) primeira escala; (b) segunda escala; (c) terceira escala.



**Figura 5.28.** Efeito da escala *wavelet* nas energias dos coeficientes *wavelet* para faltas AT variando-se a resistência de falta: (a) primeira escala; (b) segunda escala; (c) terceira escala.

## 5.7 RESUMO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi apresentado o comportamento das energias dos transitórios de falta (quantificadas pelas energias dos coeficientes *wavelet*) em função do ângulo de incidência, da resistência e da localização de falta, bem como do grau de compensação série da linha de transmissão. Além disso, uma análise em várias faixas de frequência, por meio das escalas *wavelet*, também foi feita neste capítulo. Os resultados foram obtidos por meio de dados simulados no simulador digital RTDS<sup>TM</sup> e no programa Simulink/Matlab. Por meio de análise de regressão realizada sobre os dados simulados, equações da energia dos transitórios em função de alguns parâmetros de falta foram obtidas.



## MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS

Neste capítulo é apresentada uma fundamentação teórica básica acerca da estimação dos fasores fundamentais pelo método de Fourier e da teoria das ondas viajantes, bem como os fundamentos de métodos de localização de faltas que usam estes princípios.

### 6.1 MÉTODO BASEADO NA FREQUÊNCIA FUNDAMENTAL

#### 6.1.1 Estimação dos Fasores Fundamentais

A obtenção dos fasores fundamentais dos sinais de tensão e corrente constitui etapa importante do processo de localização de faltas em linhas de transmissão baseado na componente de frequência fundamental. A transformada discreta de Fourier (TDF) é a técnica mais utilizada para a aplicação na proteção de distância em sistemas de transmissão de energia elétrica (PHADKE; THORP, 2009).

O método de Fourier de um ciclo é um dos algoritmos mais comumente utilizados para a obtenção das componentes de frequência fundamental das tensões e correntes e foi pioneiramente usado por Ramamoorthy (1972) e Phadke *et al.* (1977).

Um sinal periódico  $x(t)$  pode ser expresso na série de Fourier por (LATHI, 2007)

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(2\pi nft) + b_n \sin(2\pi nft)], \quad (6.1)$$

em que  $f$  é a frequência fundamental,  $n = \{1, 2, 3, \dots\}$  é a ordem da componente harmônica e  $a_0$ ,  $a_n$  e  $b_n$  são os coeficientes da série de Fourier, os quais são determinados como:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_T x(t) dt, \quad (6.2)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_T x(t) \cos(n\omega t) dt, \quad (6.3)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_T x(t) \text{sen}(n\omega t) dt, \quad (6.4)$$

em que  $T$  é o período do sinal  $x(t)$  e  $\omega = 2\pi f$  é a frequência angular fundamental.

O mesmo sinal pode ser escrito segundo a forma compacta da série de Fourier como sendo

$$x(t) = c_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [c_n \cos(2\pi n f t + \theta_n)], \quad (6.5)$$

em que  $c_0$ ,  $c_n$  e  $\theta_n$  são relacionados com os coeficientes da série de Fourier por

$$c_0 = a_0, \quad (6.6)$$

$$c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}, \quad (6.7)$$

$$\theta_n = \text{tg}^{-1} \left( -\frac{b_n}{a_n} \right). \quad (6.8)$$

O algoritmo de Fourier de um ciclo consiste na extração da componente de frequência fundamental do sinal  $x(t)$  a partir do produto da janela de um ciclo de amostras deste sinal com as funções seno e cosseno. Portanto, as Equações 6.3 e 6.4 são reescritas como:

$$Y_{real} = \frac{2}{T} \int_t^{t+T} x(t) \cos(n\omega t) dt, \quad (6.9)$$

$$Y_{imag} = \frac{2}{T} \int_t^{t+T} x(t) \text{sen}(n\omega t) dt, \quad (6.10)$$

em que  $Y_{real}$  e  $Y_{imag}$  são, respectivamente, as partes real e imaginária do fasor.

Considerando-se que o sinal  $x(t)$  apresenta  $\Delta k = f_s/f$  amostras por ciclo, as integrais das Equações 6.9 e 6.10 são apresentadas em termos de somatórios (JOHNS; SALMAN, 1995):

$$Y_{real} = \frac{2}{\Delta k} \sum_{k=0}^{k-\Delta k-1} x(k) \cos \left( \frac{2\pi k}{\Delta k} \right), \quad (6.11)$$

$$Y_{imag} = \frac{2}{\Delta k} \sum_{k=0}^{k-\Delta k-1} x(k) \text{sen} \left( \frac{2\pi k}{\Delta k} \right), \quad (6.12)$$

que consistem em um processo de filtragem por meio de filtros seno e cosseno, que podem ser expressos como:

$$Y_{real} = \frac{2}{\Delta k} \sum_{k=0}^{k-\Delta k-1} x(k) h_c(k), \quad (6.13)$$

$$Y_{imag} = \frac{2}{\Delta k} \sum_{k=0}^{\Delta k-1} x(k) h_s(k), \quad (6.14)$$

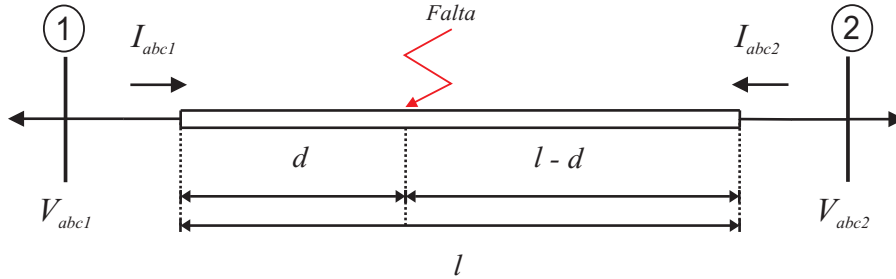
em que  $h_c$  e  $h_s$  são os coeficientes dos filtros seno e cosseno, respectivamente, representados por:

$$h_c = \left[ 1 \quad \cos\left(n\frac{2\pi}{\Delta k}\right) \quad \cos\left(n\frac{4\pi}{\Delta k}\right) \quad \dots \quad \cos\left(n\frac{2\pi(\Delta k-1)}{\Delta k}\right) \right], \quad (6.15)$$

$$h_s = \left[ 0 \quad \sin\left(n\frac{2\pi}{\Delta k}\right) \quad \sin\left(n\frac{4\pi}{\Delta k}\right) \quad \dots \quad \sin\left(n\frac{2\pi(\Delta k-1)}{\Delta k}\right) \right]. \quad (6.16)$$

### 6.1.2 Método de Girgis *et al.* (1992)

Na Figura 6.1 apresenta-se um sistema de transmissão simplificado, em que as tensões e correntes em ambos os terminais da linha são monitorados. As correntes são consideradas no sentido entrando na linha. A falta ocorre a uma distância  $d$  da barra 1.



**Figura 6.1.** Esquema de linha de transmissão com dados nos dois barramentos.

O algoritmo proposto por Girgis *et al.* (1992) para localização de faltas em linhas de transmissão é baseado nos fasores fundamentais de tensão e corrente em ambos os terminais. No local da falta, as tensões ( $V_{Fabc}$ ) podem ser expressas em função dos dados monitorados nos terminais, da distância de ocorrência da falta ( $d$ ), do comprimento da linha ( $l$ ) e da matriz de impedância série da linha por unidade de comprimento ( $Z_{abc}$ ), ou seja,

$$V_{Fabc} = V_{abc1} - dZ_{abc}I_{abc1}, \quad (6.17)$$

$$V_{Fabc} = V_{abc2} - (l - d)Z_{abc}I_{abc2}, \quad (6.18)$$

em que:

- $V_{abc1}$  e  $V_{abc2}$  são os fasores de tensão trifásica nos terminais 1 e 2, respectivamente;
- $I_{abc1}$  e  $I_{abc2}$  são os fasores de corrente trifásica nos terminais 1 e 2, respectivamente.

Combinando-se as Equações 6.17 e 6.18, obtem-se:

$$V_{abc1} - V_{abc2} + lZ_{abc}I_{abc2} = dZ_{abc}(I_{abc1} + I_{abc2}). \quad (6.19)$$

A matriz impedância série por unidade de comprimento é obtida com base nos parâmetros da linha de transmissão analisada e é composta por elementos de impedância própria e mútua, organizados da seguinte forma:

$$Z_{abc} = \begin{bmatrix} Z_P & Z_M & Z_M \\ Z_M & Z_P & Z_M \\ Z_M & Z_M & Z_P \end{bmatrix}, \quad (6.20)$$

em que  $Z_P$  e  $Z_M$  são, respectivamente, as impedância própria e mútua, as quais são obtidas das impedâncias de sequência positiva ( $Z_1$ ) e zero ( $Z_0$ ) da linha de transmissão como (TLEIS, 2008):

$$Z_M = \frac{Z_0 - Z_1}{3}, \quad (6.21)$$

$$Z_P = \frac{Z_0 + 2Z_1}{3}. \quad (6.22)$$

A Equação 6.19 pode ser representada de forma mais compacta como

$$\begin{bmatrix} Y_a \\ Y_b \\ Y_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_a \\ M_b \\ M_c \end{bmatrix} d \quad (6.23)$$

ou

$$Y = Md, \quad (6.24)$$

em que

$$Y_j = V_{j1} - V_{j2} + l \sum_{i=a,b,c} Z_{ji}I_{i2}, \quad (6.25)$$

$$M_j = \sum_{i=a,b,c} Z_{ji}(I_{i1} + I_{i2}), \quad (6.26)$$

com  $j = a, b, c$ .

Obtendo-se os vetores coluna  $Y$  e  $M$ , os quais dependem dos dados monitorados e dos parâmetros do sistema de transmissão, é possível o cálculo da distância de falta em relação à barra 1 por meio do método dos mínimos quadrados, a qual é expressa por

$$d = (M^+M)^{-1}M^+Y, \quad (6.27)$$

sendo  $M^+$  a transposta conjugada da matriz  $M$ .

O valor de  $d$  obtido é um número complexo e a estimativa do ponto de falta é tomada como a parte real desse número, sendo a parte imaginária muito pequena e, assim, considerada desprezível.

## 6.2 MÉTODO BASEADO NA TEORIA DAS ONDAS VIAJANTES

### 6.2.1 Fundamentos da Teoria das Ondas Viajantes

Quando uma falta ocorre em uma linha de transmissão, a mudança abrupta na tensão no ponto de falta gera impulsos eletromagnéticos de alta frequência chamados ondas viajantes, as quais se propagam ao longo da linha em ambas as direções a partir do ponto de falta e na velocidade de propagação da linha, próxima à velocidade da luz. Portanto, os efeitos de uma falta só irão ser sentidos em um terminal da linha após o tempo necessário de propagação das ondas viajantes.

A teoria das ondas viajantes permite a definição dos coeficientes de reflexão e refração da onda em descontinuidades, de sua velocidade de propagação e da impedância de surto da linha de transmissão (ZANETTA Jr., 2003). Ao se propagarem na linha, as ondas viajantes são atenuadas, principalmente, por componentes resistivas e por correntes de fuga, podendo também apresentar distorções em suas formas de onda (NAIDU, 1985). Um detalhamento quanto à fundamentação matemática para a teoria das ondas viajantes pode ser consultada em (BEWLEY, 1963).

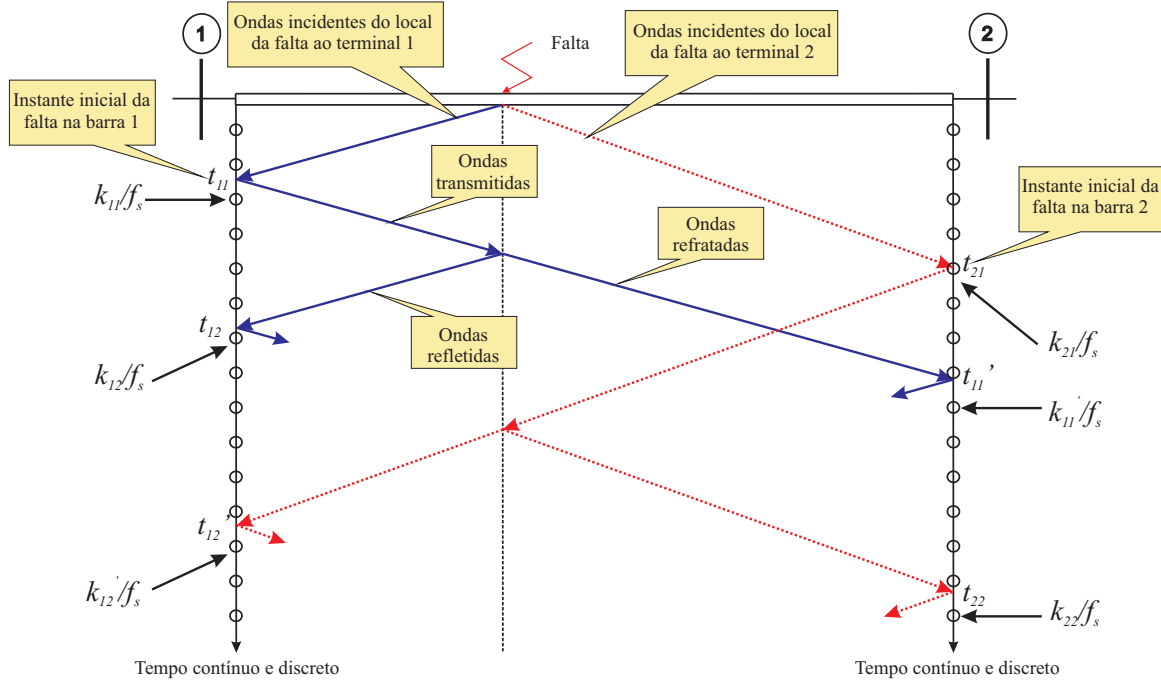
Para uma representação adequada do comportamento dos transitórios nas ondas eletromagnéticas em uma linha de transmissão, é necessária a adoção do modelo por parâmetros distribuídos no comprimento da linha. Este modelo pode apresentar parâmetros constantes ou variáveis em função da frequência (ARAÚJO; NEVES, 2005). Apesar do modelo por parâmetros constantes na frequência não se mostrar adequado para determinadas faixas de frequência dos transitórios (MARTI, 1982), este pode ser empregado satisfatoriamente na maioria dos estudos de transitórios eletromagnéticos em sistemas elétricos de potência (LEUVEN EMTP CENTER, 1987).

### 6.2.1.1 Reflexões e Refrações de Ondas Viajantes

Quando uma onda viajante encontra uma descontinuidade em uma linha de transmissão, na qual existe uma mudança abrupta das constantes do circuito, como por exemplo, no local de uma falta, uma parte dessa onda é refletida, enquanto que a outra parte é transmitida para outras sessões do circuito. A onda que chega no ponto de falta é chamada de onda incidente e as duas ondas oriundas desse ponto são chamadas de ondas refletidas e refratadas. Tais ondas são formadas no ponto de descontinuidade, de acordo com as leis de Kirchhoff, e satisfazem as equações diferenciais das linhas de transmissão, também sendo condizentes com os princípios de conservação de energia (BEWLEY, 1963).

Uma forma ilustrativa para o estudo da teoria das ondas viajantes em qualquer ponto da linha de transmissão é o diagrama Lattice, proposto por L. V. Bewley em 1933. Essa representação está baseada em um diagrama espaço-tempo e indica a posição e a direção de cada onda viajante, seja ela incidente, refletida ou refratada em qualquer instante de tempo. Esse diagrama facilita o cálculo da forma das ondas refletidas e refratadas e também mostra uma visão completa do histórico de cada onda. Conhecendo-se as funções de atenuação e distorção, tais efeitos podem ser incluídos no diagrama (NAIDU, 1985).

À medida em que cada onda atinge uma descontinuidade, ondas refletidas e refratadas são geradas naquele ponto. Na Figura 6.2 é ilustrado um diagrama Lattice para ondas viajantes em uma linha de transmissão quando da ocorrência de uma falta. A partir do ponto de descontinuidade (local da falta), duas frentes de onda são geradas e se propagam nas direções de ambos os terminais da linha. Tomando como exemplo o terminal 1, as primeiras ondas viajantes chegam nesse terminal no tempo  $t_{11}$  e são refletidas até o local da falta. Nesse ponto, parte das ondas viajantes é refletida na direção do terminal 1, chegando no tempo  $t_{12}$  e outra parte é refratada na direção do terminal 2, chegando no tempo  $t'_{11}$ . Um raciocínio análogo pode ser usado para o terminal 2.



**Figura 6.2.** Diagrama Lattice representando reflexões e refrações das ondas viajantes em uma linha de transmissão.

### 6.2.1.2 Localização de Faltas

Os métodos de localização de faltas baseados nas ondas viajantes se caracterizam pela identificação dos instantes de chegadas das ondas nos locais de monitoramento. Esses métodos podem utilizar informações de um ou múltiplos terminais na linha. Os algoritmos que se utilizam de dados apenas do terminal local necessitam dos instantes  $k_{11}/f_s$  e  $k_{12}/f_s$  para estimar a localização da falta, enquanto que os métodos de dois terminais, por exemplo, utilizam os instantes  $k_{11}/f_s$  e  $k_{21}/f_s$ , além da comunicação entre os terminais para o cálculo da distância de falta.

A frequência de amostragem é fator imprescindível para a precisão desses métodos. Como exemplo, de acordo com a Figura 6.2, as primeiras ondas viajantes incidentes no terminal 1 da linha, no tempo  $t_{11}$ , e só serão computadas pelo método de localização no instante  $k_{11}/f_s$ , o qual será tão próximo do instante  $t_{11}$  quanto maior seja a frequência de amostragem.

### 6.2.2 Método de Costa & Souza (2011)

Dentre os diversos métodos de localização de faltas que se utilizam da teoria das ondas viajantes, optou-se pela implementação do método de Costa & Souza (2011), o qual se baseia na obtenção dos instantes de chegada das primeiras ondas viajantes em todas as tensões e correntes de fase em ambos os terminais de uma linha de transmissão por meio dos coeficientes *wavelet* da TWD ou TWDR, sendo o desempenho da TWDR melhor avaliado em relação a TWD, por não apresentar subamostragem dos coeficientes *wavelet*.

No período de regime permanente, comprovou-se que os coeficientes *wavelet* apresentam função de distribuição de probabilidade Gaussiana, com média ( $\bar{w}$ ) e desvio padrão ( $\sigma$ ), nos quais foram definidos os limiares  $[\bar{w} - 4\sigma, \bar{w} + 4\sigma]$ . Portanto, caso o valor de um coeficiente *wavelet* ultrapasse esses limiares, a falta é detectada e são obtidos os instantes  $k_{fi}$  e  $k_{fj}$  nas barras  $i$  e  $j$ , respectivamente.

Após a identificação dos instantes  $k_{fi}$  e  $k_{fj}$ , e comunicação dos detectores de falta nas barras  $i$  e  $j$ , a distância de falta é estimada por

$$d_{ij} = \frac{l - \Delta t(k_{fj} - k_{fi})v}{2}, \quad (6.28)$$

em que  $d_{ij}$  é a distância de falta vista pela barra  $i$ , usando informação da barra  $j$ ,  $l$  é o comprimento da linha de transmissão,  $\Delta t$  é o passo de amostragem e  $v$  é a velocidade de propagação das ondas viajantes na linha, tomada como 98% da velocidade da luz.

Como exemplo, considerando-se uma falta a 72 km da barra 1 de uma linha de transmissão de 180 km, representada na Figura 6.3, os sinais de tensão na fase A em ambos os terminais da linha são tomados para obtenção dos instantes de chegada das primeiras ondas viajantes em cada terminal por meio dos coeficientes *wavelet* da TWDR. A falta é detectada na amostra  $k_{f1} = 1286$  para o terminal 1 e na amostra  $k_{f2} = 1288$  para o terminal 2. Considerando-se que as ondas se propagam na linha a uma velocidade de  $0,98 \times 300000 \text{ km/s} = 294000 \text{ km/s}$ , com frequência de amostragem dos sinais igual a 15360 Hz ( $\Delta t = 65,1 \mu\text{s}$ ), a estimativa de localização da falta, de acordo com a Equação 6.29 é

$$d_{12} = \frac{180 - 65,1 \times 10^{-6}(1288 - 1286)294000}{2} \approx 70,8606 \text{ km}, \quad (6.29)$$



o que representa um erro relativo de 0,63%. Em se tratando de um método baseado nas ondas viajantes, o desempenho do método seria melhor para uma taxa de amostragem maior.

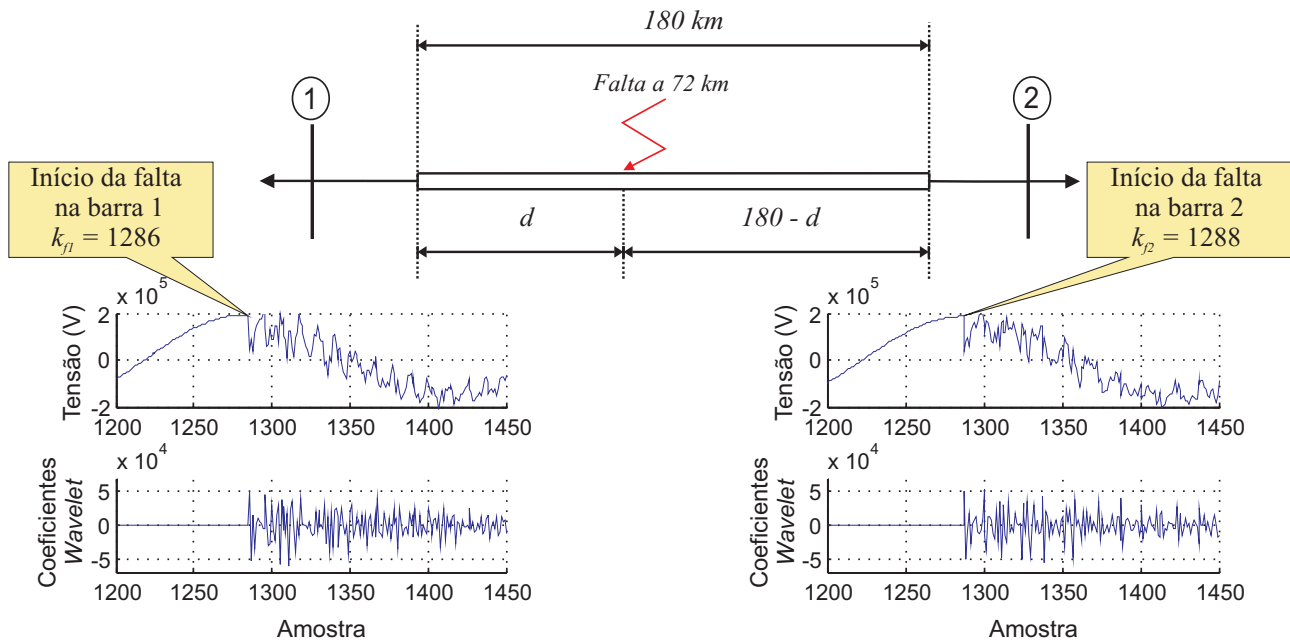


Figura 6.3. Exemplo de aplicação do método de localização de Costa & Souza (2011).

### 6.3 RESUMO DO CAPÍTULO

Os fundamentos da estimação de fasores pelo algoritmo de Fourier e a ideia básica da teoria das ondas viajantes foram abordados neste capítulo. Além disso, os métodos de localização de faltas proposto por Girgis *et al.* (1992) e por Costa & Souza (2011) também foram apresentados.

# AVALIAÇÃO DOS MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS

Neste capítulo, os desempenhos dos métodos de localização de falta propostos por Girgis *et al.* (1992) (baseado na frequência fundamental) e Costa & Souza (2011) (baseado na teoria das ondas viajantes) são avaliados frente a variações nos diversos parâmetros de falta e grau de compensação série. Nas análises de sensibilidade dos métodos de localização de faltas, parâmetros adicionais também são avaliados, a exemplo do efeito da saturação do transformador de corrente e da influência da frequência de amostragem na localização de faltas.

## 7.1 ERROS NA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS

### 7.1.1 Erro Absoluto

O erro absoluto ( $EA$ ) é definido como o módulo da diferença entre a distância real de falta ( $d_{real}$ ) e a distância estimada pelo método de localização ( $d_{est}$ ), ou seja,

$$EA = |d_{real} - d_{est}|, \quad (7.1)$$

em que todas as grandezas são dadas em km.

### 7.1.2 Erro Relativo

O erro relativo ( $ER$ ) é usado para análise comparativa entre as precisões de diferentes métodos de localização de faltas, sendo definido como a razão entre o erro absoluto e o comprimento da linha de transmissão ( $l$ ), como segue:

$$ER = \frac{|d_{real} - d_{est}|}{l} 100, \quad (7.2)$$

sendo  $ER$  expresso em percentagem.

### 7.1.3 Erro Admissível

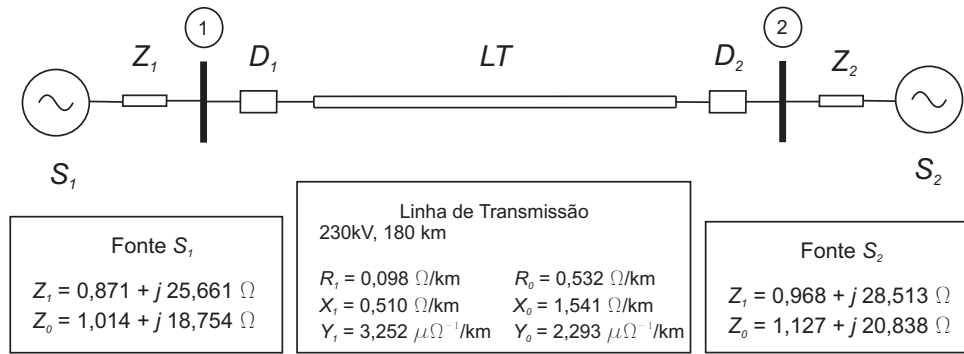
Os métodos de localização de faltas baseados na teoria das ondas viajantes são extremamente dependentes da frequência de amostragem utilizada nos conversores A/D dos equipamentos de medição. O erro admissível ( $E_{ad}$ ), em módulo, para a localização de falta é proporcional à metade do período de amostragem  $\Delta t$  (RTDS TECHNOLOGIES INC., 2008), como segue:

$$E_{ad} = \frac{\Delta t \cdot c}{2} = \frac{c}{2f_s}, \quad (7.3)$$

em que  $c$  é a velocidade de propagação da luz no vácuo ( $\approx 300000\text{km/s}$ ). Por exemplo, para uma frequência de amostragem de 15360 Hz, o que equivale a um passo de amostragem  $\Delta t = 65,10 \mu\text{s}$ , o erro máximo admissível é igual a 9,76 km, o que, para uma linha de 180 km de comprimento, equivale a um erro admissível de 5,42%. Portanto, erros de estimativa de localização inferiores a esse erro admissível são tomados como sendo satisfatórios.

## 7.2 CENÁRIOS DE FALTAS

Para a avaliação dos métodos de localização de faltas implementados nesta dissertação, diversos cenários de falta foram simulados no programa ATP para um sistema de transmissão simplificado de 230 kV, similar ao utilizado por Costa (2006), cuja representação esquemática e parâmetros são apresentados na Figura 7.1. As simulações foram realizadas a uma frequência de amostragem de 215,053 kHz, sendo as tensões e correntes depois reamostradas em uma frequência de 15360 Hz.



**Figura 7.1.** Sistema de transmissão simplificado de 230 kV.

Para a avaliação da influência da localização, ângulo de incidência, resistência e tipo de falta, assim como do grau de compensação série sobre os desempenhos dos métodos de localização de faltas implementados, diversos cenários de faltas foram criados, nos quais foram aplicadas faltas a cada 9 km, nas distâncias  $d_f = \{18, 27, 36, \dots, 153, 162\}$  km. Para todas essas distâncias de falta, as seguintes bases de dados foram simuladas:

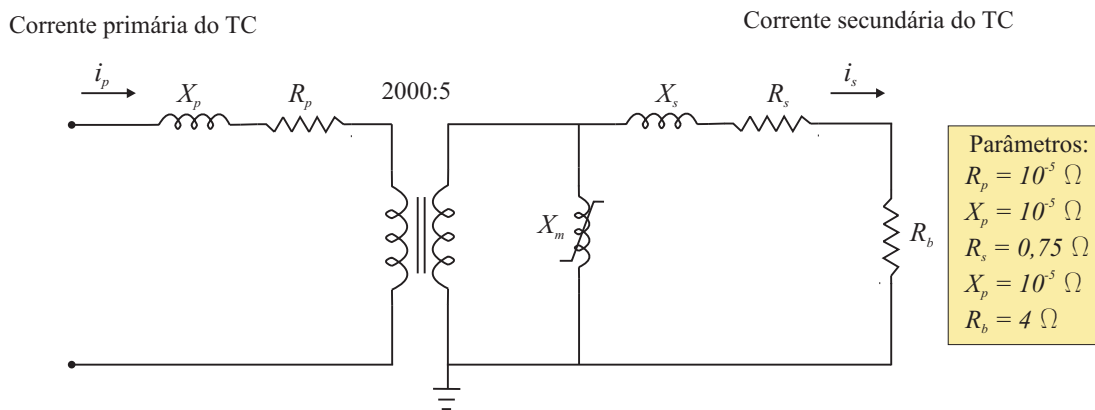
1. **Ângulo de incidência de falta:** Foram avaliados os ângulos  $\theta_f = \{10^\circ, 40^\circ, 60^\circ, 90^\circ\}$  para faltas do tipo AT, com resistência de falta de  $10 \Omega$  e sem compensação série.
2. **Resistência de falta:** Foram avaliadas as resistências  $r_f = \{1, 5, 10, 50, 100\} \Omega$  para faltas do tipo AT, com ângulo de incidência de  $90^\circ$  e sem compensação série.
3. **Tipo de falta:** Foram avaliadas as faltas do tipo AT, AB, ABT e ABC, com resistência de  $10 \Omega$ , ângulo de incidência de  $90^\circ$  e sem compensação série.
4. **Grau de compensação:** Foram avaliadas faltas AT em linha sem compensação série e com graus de compensação  $k = \{30, 40, 50, 60, 70\}\%$ , com resistência de  $10 \Omega$  e ângulo de incidência de  $90^\circ$ .
5. **Frequência de amostragem:** Foram avaliadas faltas AT em linha sem compensação série com frequências de amostragem  $f_s = \{5160, 15360, 30720, 107520\}$  Hz, com resistência de  $10 \Omega$  e ângulo de incidência de  $90^\circ$ .
6. **Saturação do TC:** Foram simuladas faltas similares às da base de dados do grau de compensação, porém, com o TC saturado.

### 7.3 MODELOS DOS TRANSFORMADORES DE INSTRUMENTO

A função dos transformadores de corrente (TC) e dos transformadores de potencial capacitivo (TPC) é transformar correntes e tensões do sistema elétrico para valores compatíveis aos relés e dispositivos de monitoramento, garantindo isolamento galvânica entre o sistema elétrico e os dispositivos conectados no secundário dos transformadores (PHADKE, 2008).

Inicialmente, o TC e o TPC devem reproduzir cópias fiéis das correntes e tensões, respectivamente, em seus enrolamentos secundários. Porém, condições de transitórios e saturação causadas por faltas podem comprometer o desempenho desses transformadores, afetando também a função dos relés de proteção e localizadores de faltas.

Para a avaliação dos desempenhos dos métodos de localização de faltas estudados nesta dissertação, o TC e o TPC propostos pelo IEEE (IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE, 2004) foram incluídos nas barras do sistema de transmissão da Figura 7.1. Na Figura 7.2 é representado o modelo do TC, bem como os seus parâmetros de circuito, enquanto que na Figura 7.3 é representado o modelo do TPC e os valores dos seus parâmetros.



**Figura 7.2.** Modelo do circuito equivalente do TC.

Para o estudo proposto nesta dissertação, os transformadores de instrumento foram considerados como estando posicionados logo à jusante das barras 1 e 2 do sistema de transmissão da Figura 7.1, ou seja, à montante do esquema de compensação série localizado na extremidade da linha próxima à barra 1.

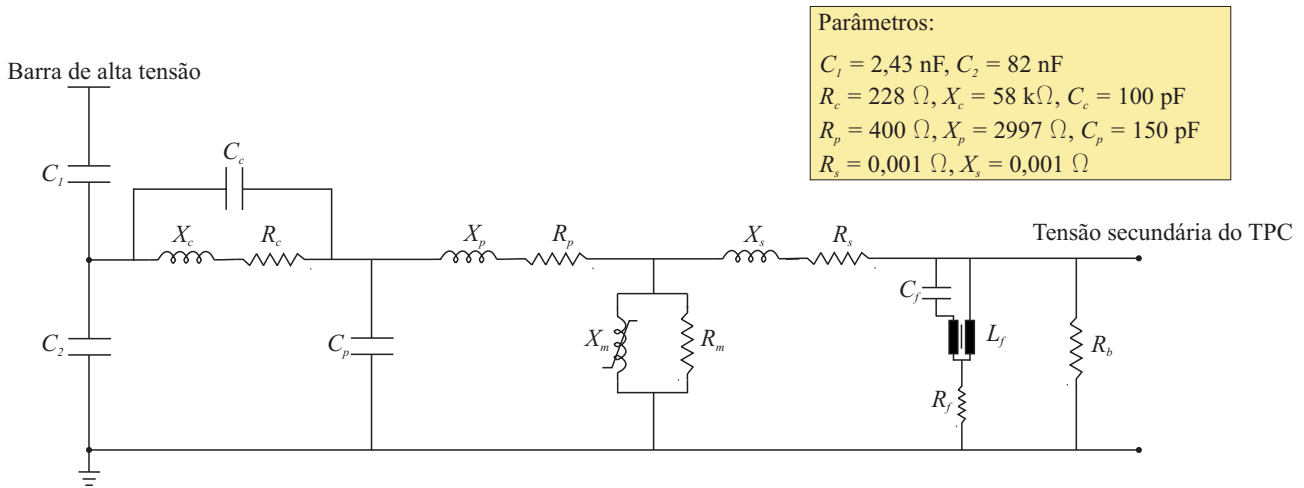


Figura 7.3. Modelo do circuito equivalente do TPC.

## 7.4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTA

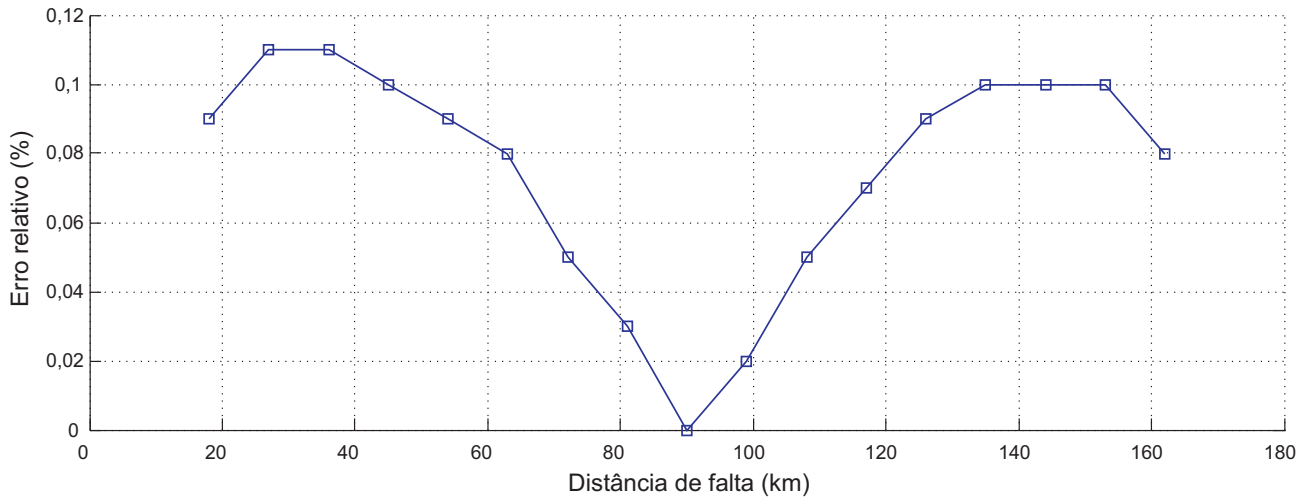
Nesta seção, os métodos de localização de faltas de Girgis *et al.* (1992), baseado na frequência fundamental, e Costa & Souza (2011), baseado nas ondas viajantes, são avaliados frente a variações nos parâmetros de falta e no grau de compensação série, bem como aos efeitos de diferentes frequências de amostragem e saturação do TC.

### 7.4.1 Efeito da Distância de Falta

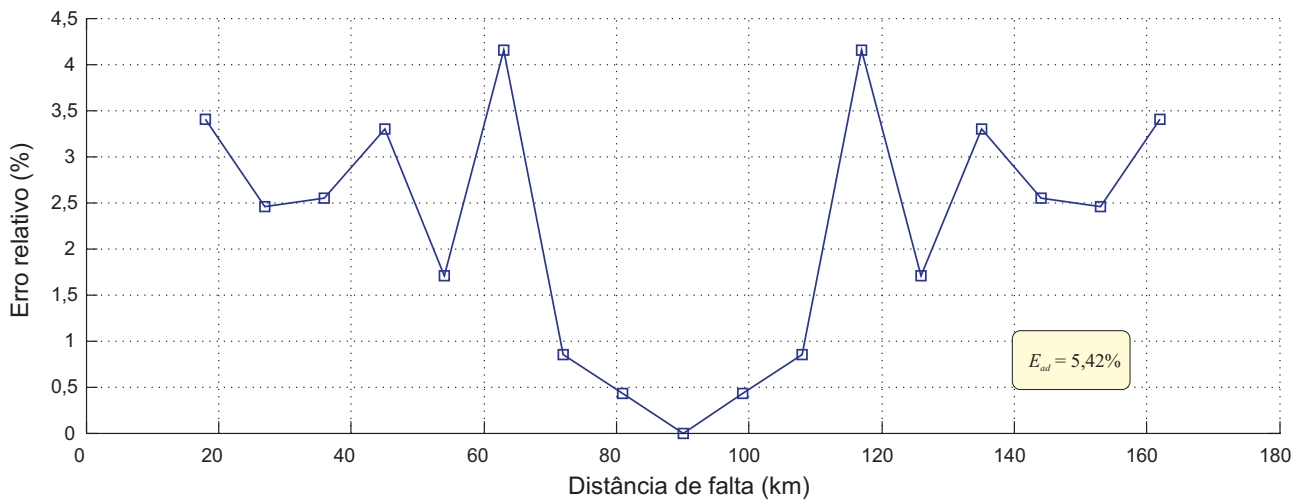
Na Figura 7.4 são apresentados os desempenhos dos métodos avaliados para faltas AT com distância de falta  $d_f = \{18, 27, 36, \dots, 153, 162\}$  km, com ângulo de incidência  $90^\circ$ , com resistência de falta de  $10 \ \Omega$  e ausência de compensação série. Ambos os métodos apresentaram melhor desempenho para faltas localizadas no meio da linha de transmissão e erros mais relevantes para faltas próximas às extremidades da linha.

A ideia do estudo apresentado neste capítulo não é a mera comparação dos erros relativos de localização de faltas obtidos pelos dois métodos, e sim, a avaliação do comportamento de cada método em função do parâmetro avaliado. Para que houvesse uma comparação dos erros relativos obtidos entre os dois métodos, o método de Costa & Souza (2011) necessitaria de uma maior frequência de amostragem. Por exemplo, para que o desempenho do algoritmo de Costa & Souza (2011) estivesse próximo ao obtido pelo método de Girgis *et al.* (1992), seria necessária

uma frequência de amostragem de aproximadamente 757,5 kHz.



(a)



(b)

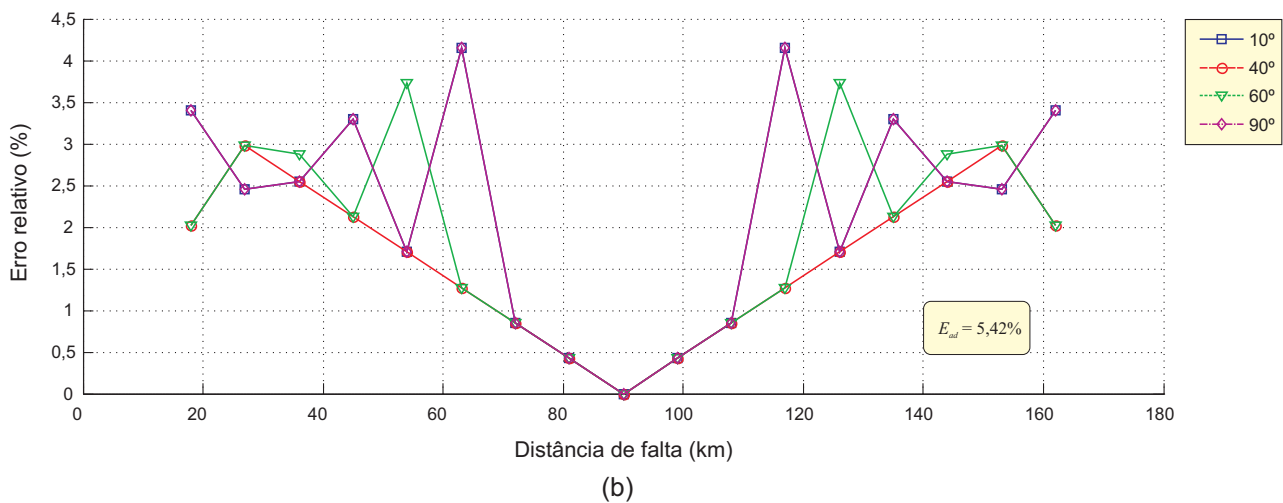
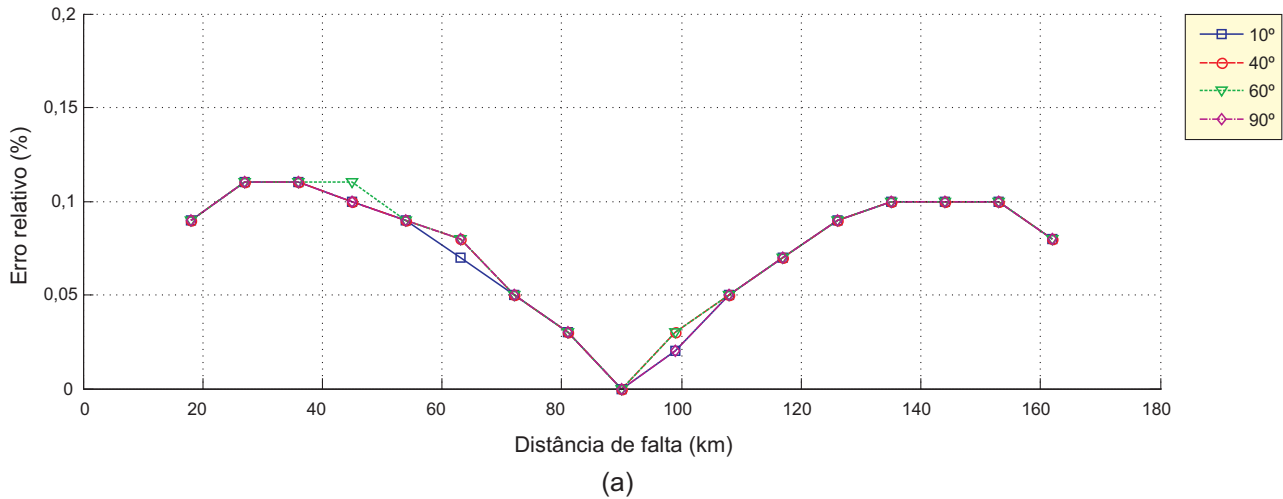
**Figura 7.4.** Análise da influência da distância de falta no método de localização de falta: (a) Girgis *et al.* (1992); (b) Costa & Souza (2011).

### 7.4.2 Efeito do Ângulo de Incidência de Falta

Na Figura 7.5 são apresentados os desempenhos dos métodos avaliados para faltas AT com ângulos de incidência de falta  $\theta_f = \{10^\circ, 40^\circ, 60^\circ, 90^\circ\}$ , em diversos locais de falta, com resistência de  $10 \Omega$  e ausência de compensação série.

De acordo com a Figura 7.5, o método de Girgis *et al.* (1992) se mostrou praticamente insensível a variações no ângulo de incidência de falta, enquanto que o método de Costa & Souza (2011) tem seu desempenho influenciado por este parâmetro, haja visto que ele influi diretamente na intensidade dos transitórios, fator que afeta diretamente na detecção das primeiras

ondas viajantes. Como visto no Capítulo 5, os transitórios em faltas AT são mais amortecidos quando o ângulo de incidência de falta tende a 0 ou 180°, o que pode aumentar o erro de localização para estes ângulos. No entanto, os erros obtidos são aceitáveis em comparação com o erro admissível para a frequência de amostragem de 15360 Hz.



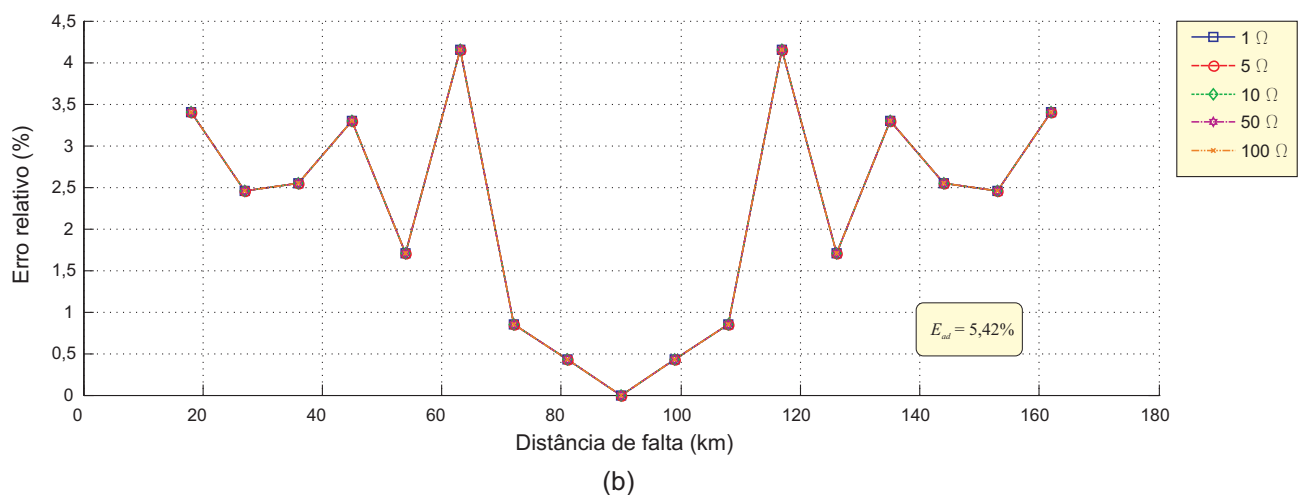
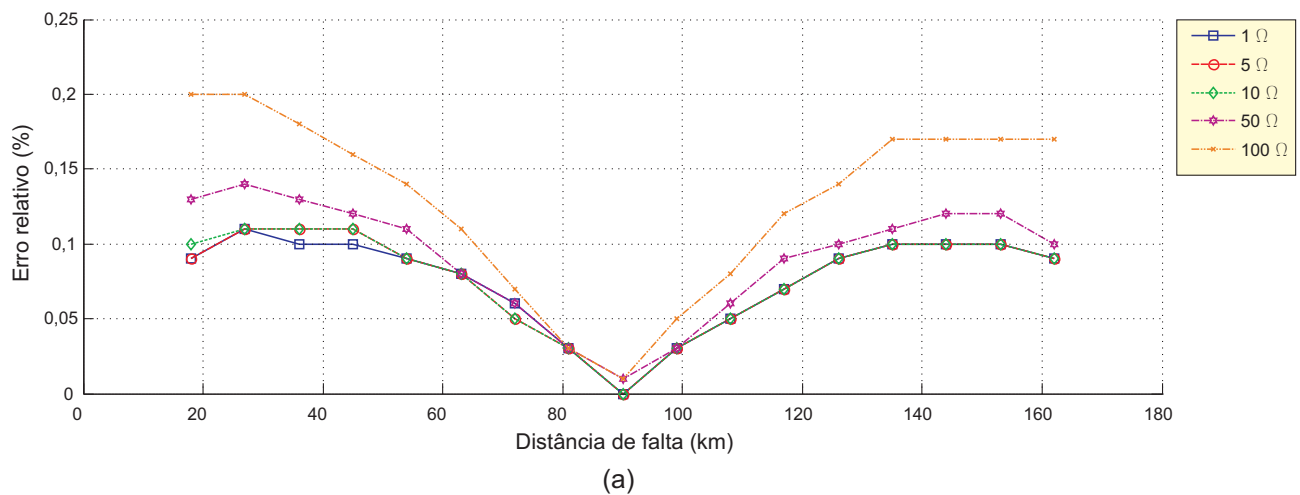
**Figura 7.5.** Análise da influência do ângulo de incidência de falta no método de localização de falta: (a) Girgis *et al.* (1992); (b) Costa & Souza (2011).

### 7.4.3 Efeito da Resistência de Falta

Na Figura 7.6 são apresentados os desempenhos dos métodos de localização de faltas para faltas AT com diferentes valores de resistência de falta  $r_f = \{1, 5, 10, 50, 100\} \Omega$ , com ângulo de incidência de 90° e ausência de compensação série. De acordo com a Figura 7.6, por se tratar de métodos de dois terminais, os métodos de Girgis *et al.* (1992) e Costa & Souza (2011) não são afetados de forma relevante por variações na resistência de falta. Porém, para resistências bem



maiores do que as avaliadas neste trabalho, o método de Costa & Souza (2011) possivelmente poderá apresentar falhas, haja visto que os transitórios tenderão a ser mais amortecidos.



**Figura 7.6.** Análise da influência da resistência de falta no método de localização de falta: (a) Girgis *et al.* (1992); (b) Costa & Souza (2011).

#### 7.4.4 Efeito do Tipo de Falta

Na Figura 7.7 são apresentados os desempenhos dos métodos avaliados para faltas do tipo AT, AB, ABT e ABC, com resistência de  $10 \Omega$ , ângulo de incidência de  $90^\circ$  e ausência de compensação série. O método de Girgis *et al.* (1992) apresentou melhor desempenho para faltas monofásicas e bifásicas para a terra, enquanto que o método de Costa & Souza (2011) apresentou-se praticamente imune ao tipo de falta.

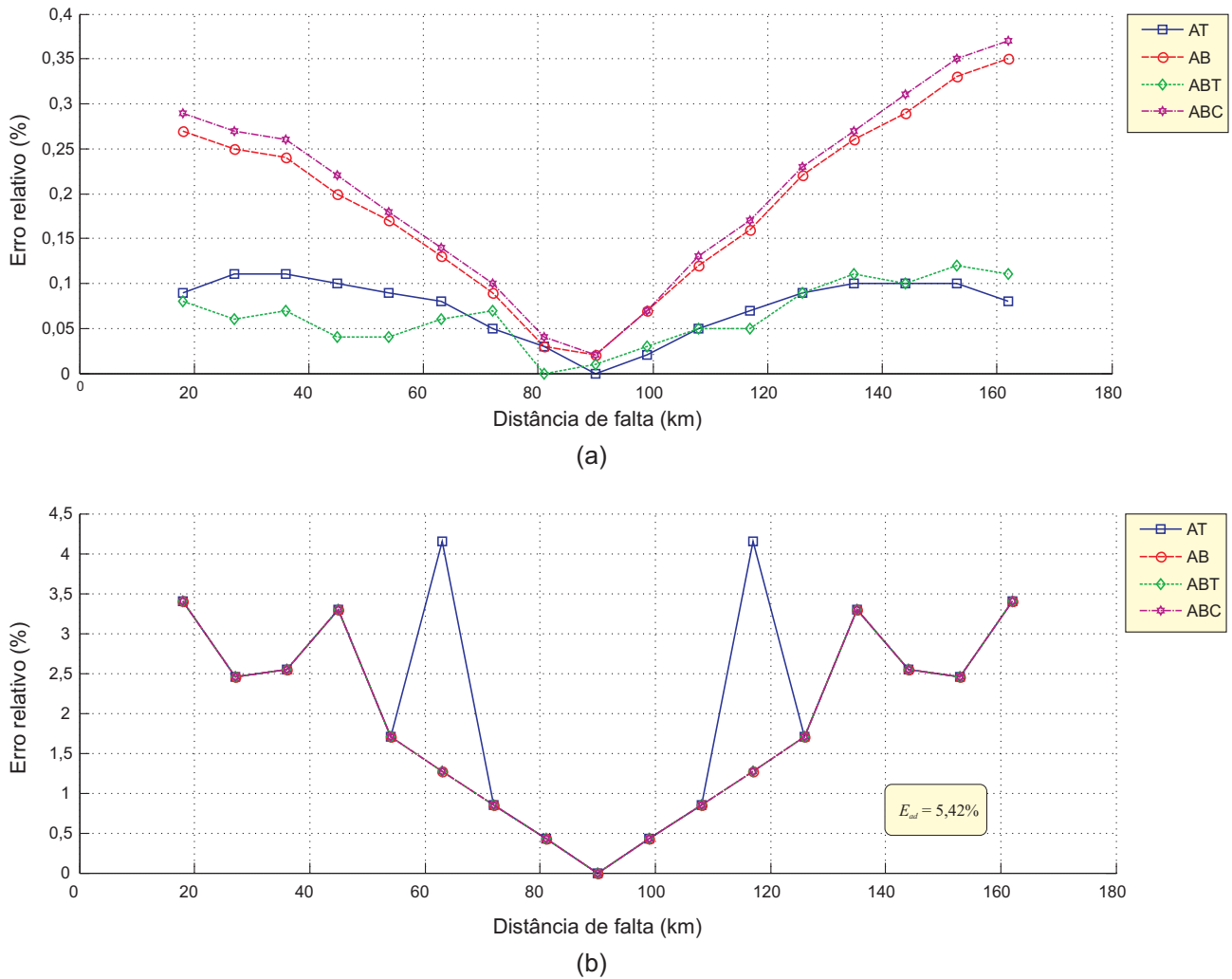


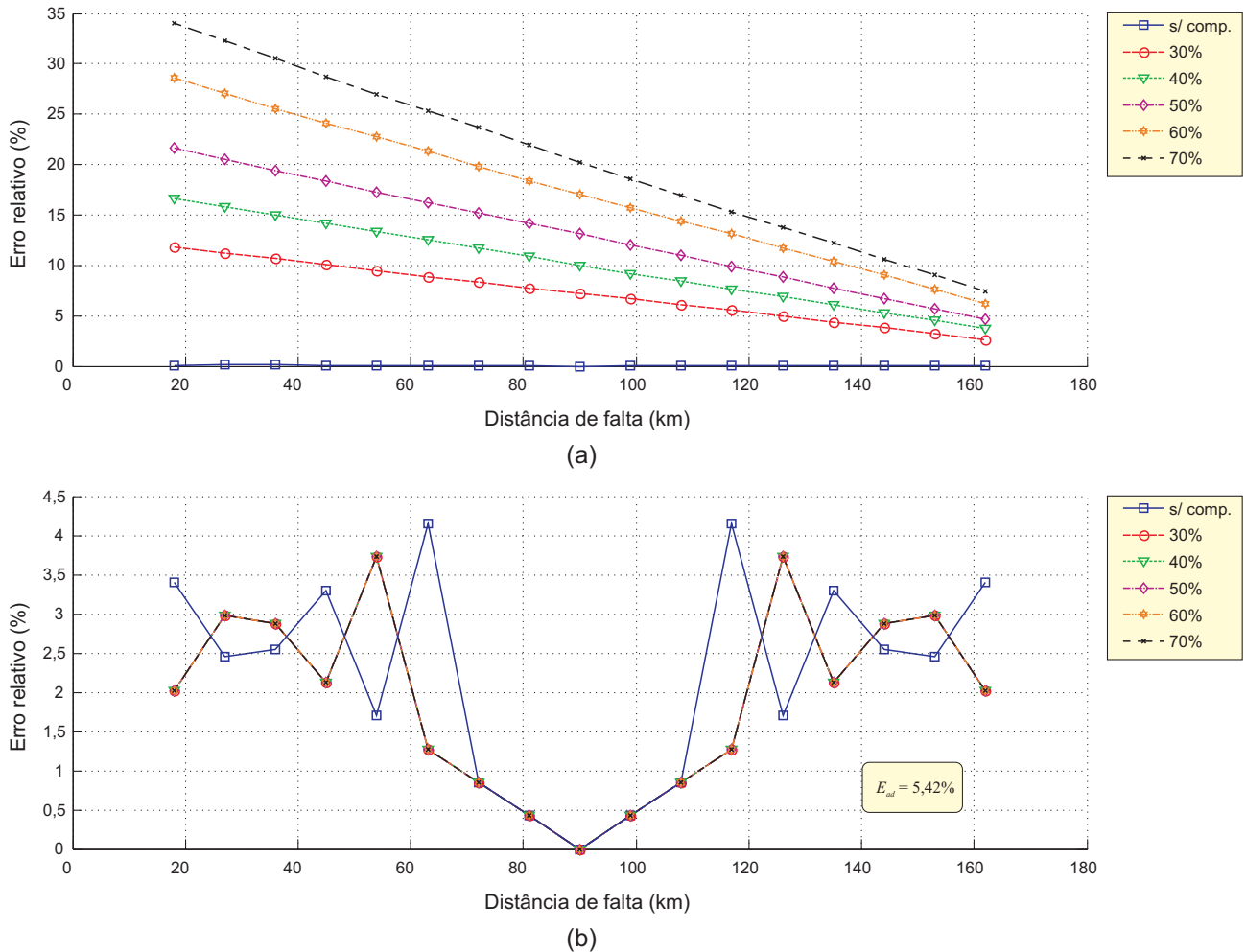
Figura 7.7. Análise da influência do tipo de falta no método de localização de falta: (a) Girgis *et al.* (1992); (b) Costa & Souza (2011).

### 7.4.5 Efeito do Grau de Compensação Série

Na Figura 7.8 são apresentados os desempenhos dos métodos avaliados para faltas AT com ausência de compensação série e graus de compensação  $k = \{30, 40, 50, 60, 70\}\%$ , resistência de  $10 \Omega$  e ângulo de incidência de  $90^\circ$ . Foi considerada a instalação dos capacitores série concentrada em um único terminal da linha de transmissão (próximo à barra 1).

Como foi abordado no Capítulo 2, a compensação série é uma grande fonte de erros para métodos de localização de faltas baseados na estimação de fasores fundamentais, dadas as alterações de perfil de tensões e correntes que esta técnica de compensação reativa ocasiona. De acordo com a Figura 7.8, o método de Girgis *et al.* (1992) teve seu desempenho fortemente afetado pela compensação série, principalmente para faltas mais próximas aos bancos de capa-

citores. À medida em que o grau de compensação aumenta, os erros de localização aumentam. O método de Costa & Souza (2011) não teve seu desempenho afetado de forma relevante pela inclusão da compensação série e pelos diferentes graus de compensação.



**Figura 7.8.** Análise da influência do grau de compensação série no método de localização de falta: (a) Girgis *et al.* (1992); (b) Costa & Souza (2011).

Os métodos de localização de faltas em linhas de transmissão que se baseiam na teoria das ondas viajantes apresentam melhor aplicabilidade e confiabilidade para sistemas de transmissão com emprego da compensação série (LOPES *et al.*, 2011). De modo contrário, os métodos convencionais são fortemente afetados por esta técnica de compensação reativa, haja visto que são provocadas alterações da impedância aparente da linha, no caso de se considerar os transformadores de instrumento posicionados à montante do banco de capacitores.

7.4.6 Efeito da Frequência de Amostragem

Na Figura 7.9 são apresentados os desempenhos dos métodos avaliados para as frequências de amostragem  $f_s = \{5160, 15360, 30720, 107520\}$  Hz, para faltas AT, resistência de  $10 \Omega$  e ângulo de incidência de  $90^\circ$ . O método de Girgis *et al.* (1992) é praticamente independente da taxa de amostragem considerada, enquanto que o método de Costa & Souza (2011) é extremamente dependente da frequência de amostragem, a qual influi diretamente na obtenção precisa das amostras de ocorrência da falta e, assim, na sua precisa localização.

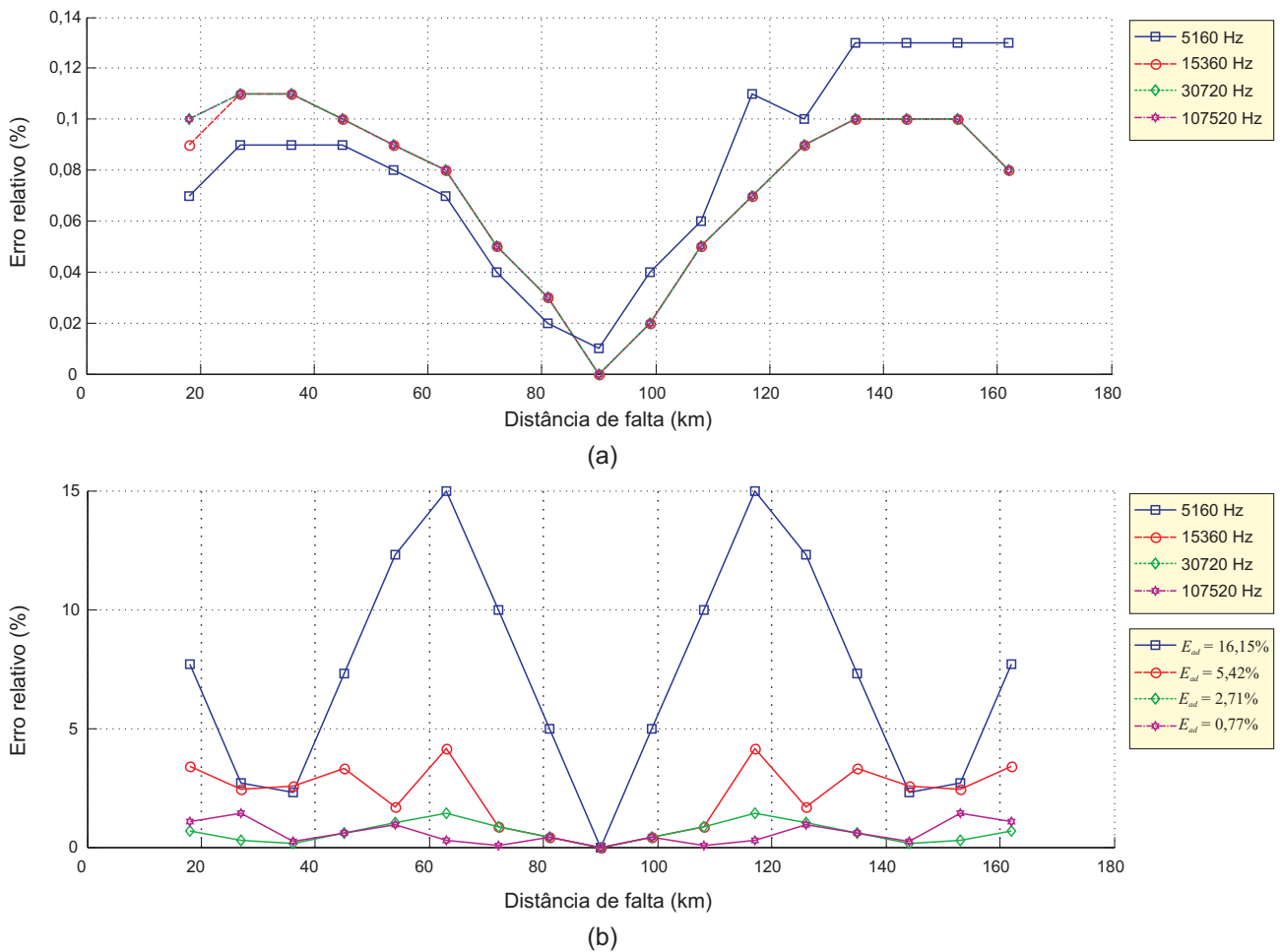


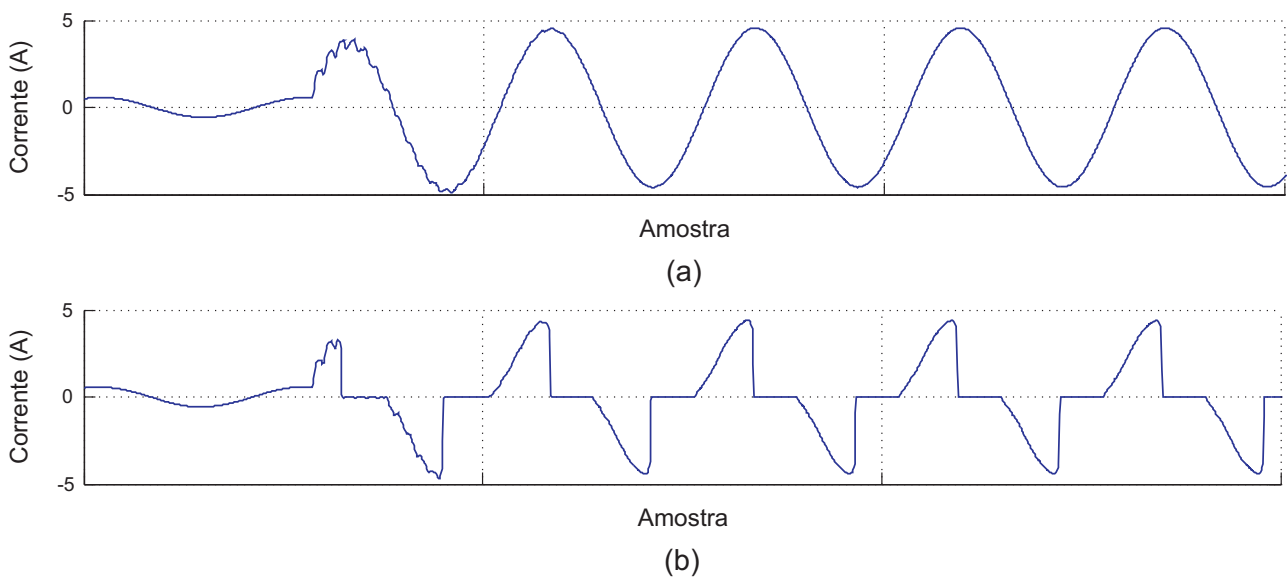
Figura 7.9. Análise da influência da frequência de amostragem no método de localização de falta: (a) Girgis *et al.* (1992); (b) Costa & Souza (2011).

7.4.7 Efeito da Saturação do Transformador de Corrente

A saturação do TC compromete sua função de reproduzir com fidelidade as correntes do sistema elétrico, sendo, dessa forma, responsável por disfunção dos relés de proteção e locali-

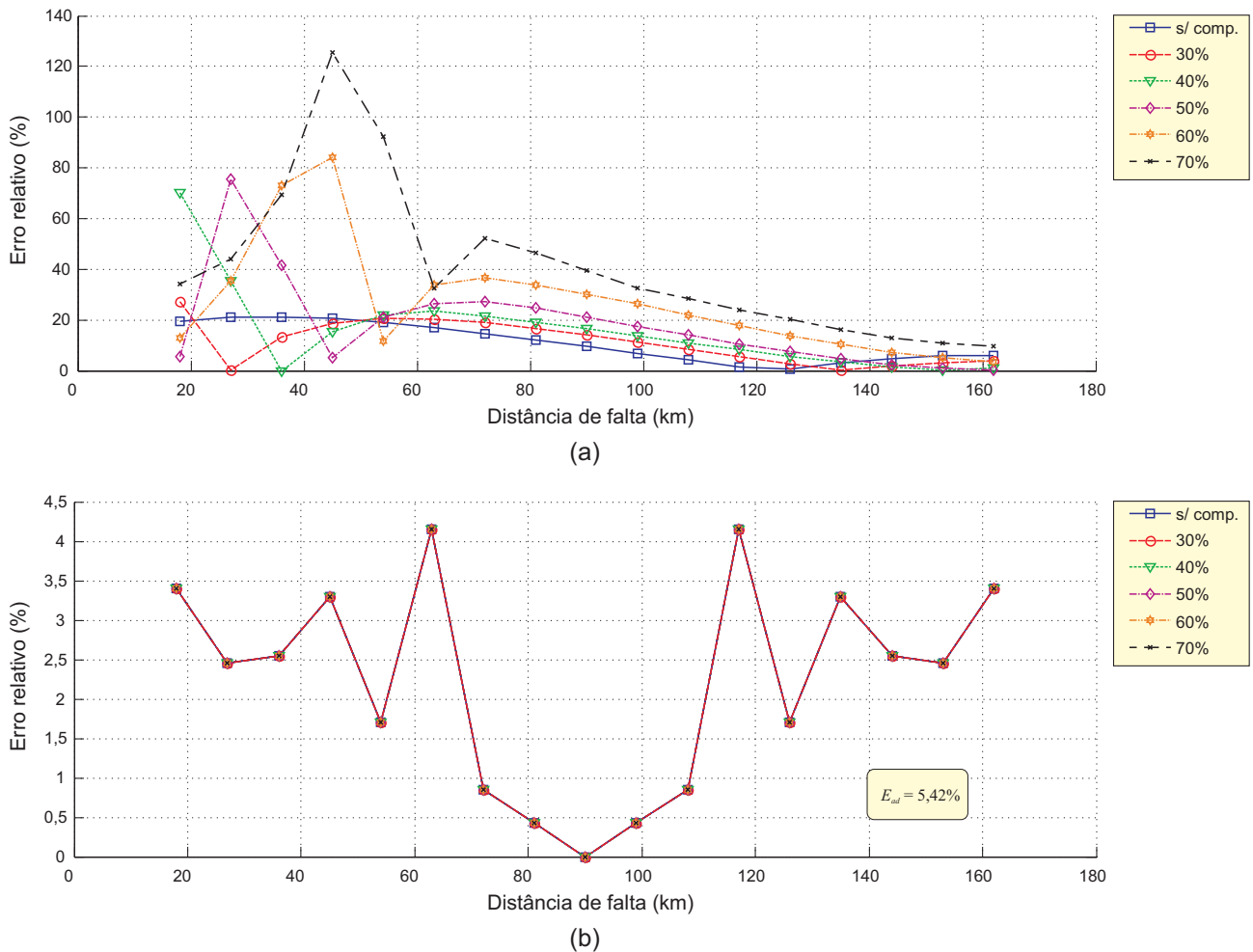
zadores de faltas. Na Figura 7.10 são representadas as correntes secundárias da fase A do TC sem e com saturação para uma condição de falta AT, com ângulo de incidência  $90^\circ$ , resistência de  $10 \Omega$  e aplicada a 90 km da barra 1 do sistema de transmissão da Figura 7.1. A condição de saturação distorce o sinal de corrente, o que poderá implicar em erros de estimação fasorial para os métodos de localização baseados na frequência fundamental.

Na Figura 7.11, os desempenhos dos métodos de Girgis *et al.* (1992) e Costa & Souza (2011) são avaliados para faltas AT com ausência de compensação série e graus de compensação de 30%, 40%, 50%, 60% e 70%, resistência de  $10\Omega$ , ângulo de incidência de  $90^\circ$  e TC saturado.



**Figura 7.10.** Correntes nos secundários do TC: (a) não saturado ; (b) saturado.

Como esperado, o método de Girgis *et al.* (1992) foi fortemente afetado pela saturação do TC, enquanto que o método de Costa & Souza (2011), o qual já se apresentou praticamente imune ao grau de compensação série, mostrou-se bastante robusto ao efeito da saturação do TC, haja visto que depende apenas da correta obtenção das amostras referentes ao instante inicial da falta em cada terminal da linha.



**Figura 7.11.** Análise da influência do grau de compensação série para dados monitorados em TC saturado e TPC no método de localização de falta: (a) Girgis *et al.* (1992); (b) Costa & Souza (2011).

#### 7.4.8 Resumo da Análise de Sensibilidade

Os resultados da análise de sensibilidade dos métodos de localização de Girgis *et al.* (1992) e Costa & Souza (2011) realizada nesta seção são sumarizados na Tabela 7.1. Trata-se de dois métodos de localização de características completamente distintas e que apresentam vantagens e desvantagens particulares com respeito aos parâmetros avaliados. O método de Girgis *et al.* (1992) é bastante robusto a variações nos parâmetros de falta e não necessita de altas frequências de amostragem, porém, tem seu desempenho bastante influenciado pelo emprego da compensação série (para os transformadores de instrumento posicionados à montante do banco de capacitores série) e pela saturação do TC. No que concerne ao algoritmo de Costa & Souza (2011), este apresenta-se bastante robusto à compensação série (tanto à montante quanto à jusante do banco de capacitores série) e à saturação do TC, porém, sua maior limitação se

deve à forte dependência de altas taxas de amostragem.

**Tabela 7.1.** Resumo da análise de sensibilidade dos métodos de localização de faltas.

Parâmetro	Método de Localização	
	Girgis <i>et al.</i> (1992)	Costa & Souza (2011)
$d_f$	Melhor desempenho no meio da linha	Melhor desempenho no meio da linha
$\theta_f$	Praticamente imune	Influenciado para ângulos específicos nos quais não se tem transitórios
$r_f$	Pouco afetado	Pouco afetado**
Tipo	Melhor para faltas que envolvem a terra	Praticamente imune
$k$	Fortemente influenciado	Praticamente imune
$f_s$	Praticamente independente	Extremamente dependente
STC*	Fortemente influenciado	Praticamente imune

\* Saturação do TC.

\*\* Pouco afetado para a faixa de resistência de falta considerada nesta dissertação.

## 7.5 RESUMO DO CAPÍTULO

Este capítulo apresentou o desempenho dos métodos de localização de faltas de Girgis *et al.* (1992) (baseado na frequência fundamental) e Costa & Souza (2011) (baseado na teoria das ondas viajantes) frente a variações nos parâmetros de falta, no grau de compensação série fixa, frequência de amostragem e saturação do TC. O método baseado nas ondas viajantes se mostrou bastante robusto para linha de transmissão compensada, independente do grau de compensação série, e saturação do TC, apresentando falhas apenas nos casos em que os transitórios são amortecidos. Além disso, o desempenho do algoritmo é bastante dependente da frequência de amostragem utilizada. O método baseado na extração das componentes fundamentais não é afetado por parâmetros como ângulo de incidência e resistência de falta, bem como frequência de amostragem. Porém, este método não se mostrou adequado para linhas de transmissão com compensação série e para o caso de saturação do TC. O posicionamento dos transformadores de instrumento à jusante do banco de capacitores série, para o caso de compensação em uma extremidade da linha, pode apresentar menor influência no desempenho do método de localização de faltas convencional.

# CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DE CONTINUAÇÃO

## 8.1 CONCLUSÕES

Nesta dissertação, o comportamento e a intensidade dos transitórios de falta em relação aos parâmetros de falta (ângulo de incidência, resistência e localização de falta) e ao grau de compensação série foram avaliados por meio das energias dos coeficientes *wavelet*. O desempenho de um método convencional de localização de faltas, baseado na extração das componentes fundamentais, e de um método baseado na teoria das ondas viajantes também foi avaliado frente aos parâmetros de falta, grau de compensação, frequência de amostragem e saturação do transformador de corrente.

As energias dos transitórios foram inicialmente avaliadas em função do ângulo de incidência de falta, em uma faixa de 0 a 180°, para todos os tipos de falta e para o caso de linhas de transmissão sem e com compensação série no meio da linha. A energia dos transitórios é função seno quadrado do ângulo de incidência de falta, tendo seu comportamento geral independente do uso da compensação série nas faixas de frequência avaliadas. Há ângulos de incidência específicos, para cada tipo de falta, nos quais os transitórios são bastante amortecidos, o que pode comprometer o funcionamento de métodos de detecção e classificação de faltas baseados na teoria das ondas viajantes.

Com relação à resistência de falta, avaliada em uma faixa de 0 a 100  $\Omega$ , constatou-se que as energias dos transitórios apresentam comportamento de decaimento exponencial com o aumento da resistência, independente da inclusão, ou não, da compensação série na linha de transmissão. Porém, para valores muito elevados de resistência, os transitórios tenderão a ser mais amortecidos, o que também pode vir a afetar métodos de detecção e classificação de faltas baseados nos transitórios de faltas.



No que concerne à influência da distância de falta nos transitórios, foi possível identificar um leve decaimento da energia dos transitórios com o aumento da distância de falta, visto que a resistência da linha é levemente aumentada entre o ponto de monitoramento e o local da falta.

Para a avaliação da influência do grau de compensação série sobre as energias dos transitórios, foram consideradas três formas de compensação série: concentrada em um terminal da linha, dividida em dois terminais da linha e concentrada no meio da linha. Para as duas primeiras formas, foi obtido um ligeiro decaimento da intensidade dos transitórios à medida em que se aumenta o grau de compensação, em uma faixa de 30 a 70%. Já para o caso da compensação série concentrada no meio da linha de transmissão, as energias dos transitórios foram praticamente independentes do grau de compensação série utilizado.

O comportamento dos transitórios em função dos parâmetros de falta foi avaliado em uma ampla faixa de frequência pela utilização das diversas escalas *wavelet*, em que se observou que a característica dos transitórios foi a mesma para toda a faixa de frequência avaliada.

Concluída a análise da influência dos parâmetros de falta e do grau de compensação série sobre os transitórios de falta, os desempenhos dos métodos de localização de faltas de Girgis *et al.* (1992) (baseado na estimação de fasores fundamentais) e de Costa & Souza (2011) (baseado na teoria das ondas viajantes) foram analisados frente a variações nos parâmetros de falta e no grau de compensação série fixa, além do efeito da frequência de amostragem e saturação do transformador de corrente.

Em relação aos parâmetros de falta, ambos os métodos de localização de faltas apresentaram considerável robustez, com a ressalva de que o método de Costa & Souza (2011) é bastante dependente do ângulo de incidência de falta, haja visto que este parâmetro influi diretamente na intensidade dos transitórios eletromagnéticos.

Quanto ao efeito do grau de compensação série, o método de Girgis *et al.* (1992) mostrou-se bastante afetado pelo fato de ser sensível à configuração do sistema de transmissão analisado, caso os transformadores de instrumento estejam posicionados à montante do banco de capacitores de compensação. Por outro lado, o método de Costa & Souza (2011) mostrou-se robusto ao emprego da compensação série. Isso pode ser um indicativo de que métodos baseados na teoria das ondas viajantes podem ser opções interessantes para contornar as limitações que a compensação série causa aos métodos convencionais. Com isso, as vantagens que esse tipo

de compensação reativa oferece poderiam ser melhor exploradas sem a preocupação com a disfunção no sistema de proteção baseado em técnicas convencionais.

No que concerne ao efeito da frequência de amostragem, o método de Girgis *et al.* (1992) é praticamente independente deste parâmetro, enquanto que o método de Costa & Souza (2011) tem seu desempenho condicionado a uma alta taxa de amostragem, a qual influi diretamente na obtenção precisa das amostras de ocorrência da falta e, assim, na sua precisa localização.

No que diz respeito à saturação do transformador de corrente, o método de Girgis *et al.* (1992) apresentou-se fortemente afetado por este efeito, enquanto que o método de Costa & Souza (2011) mostrou-se bastante robusto, haja visto que depende apenas da correta obtenção das amostras nas quais a falta é detectada em cada terminal de monitoramento da linha.

## 8.2 TRABALHOS FUTUROS

Como continuação dos estudos realizados para a elaboração desta dissertação, sugere-se as seguintes propostas de trabalhos futuros:

- Uma vez conhecido o comportamento dos transitórios de falta em função dos parâmetros, a próxima etapa consiste na extração dos parâmetros de falta das energias dos transitórios por meio das energias dos coeficientes *wavelet*;
- Utilizar as informações dos parâmetros de falta para melhorar a localização de faltas de métodos baseados em ondas viajantes com taxas de amostragem da ordem de poucos kHz;
- Implementação de um relé digital usando o princípio das ondas viajantes, baseado nas *wavelets*;

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABUR, A.; MAGNANO, F. H. Use of time delays between modal components in wavelet based fault location. *ELSEVIER Electrical Power and Energy Systems*, v. 22, 2000.
- AL-KABABJIE, M.; AL-DURZI, F.; AL-NUAIMI, N. A fault detection and classification using new distance relay. In: *Renewable Energies and Vehicular Technology (REJET), 2012 First International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 237–243.
- ALTUVE, H.; MOONEY, J.; ALEXANDER, G. Advances in series-compensated line protection. In: *Protective Relay Engineers, 2009 62nd Annual Conference for*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 263–275.
- ANDERSON, P.; FARMER, R. G. *Series Compensation of Power Systems*. [S.l.: s.n.], 1996.
- ARAÚJO, A. E. A.; NEVES, W. L. A. *Cálculo de Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Energia*. Belo Horizonte, MG: Editora UFMG, 2005.
- BEWLEY, L. V. *Travelling Waves on Transmission Systems*. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1963.
- BOLLEN, M. H. J.; GU, I. Y. H. *Signal Processing of Power Quality Disturbances*. New York, USA: IEEE, 2006.
- BRITO, N. S. D. *Teoria Wavelet e sua Aplicação em Sistemas de Energia Elétrica*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 1996.
- BRITO, N. S. D. *Teoria das Wavelets - Estudo e Aplicação na Análise de Transitórios em Sistemas de Potência*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, Paraíba, 2001.
- BURRUS, C. S.; RAMESH, A. G.; GUO, H. *Introduction to Wavelets and Wavelet Transforms*. New Jersey, USA: Prentice Hall, 1998.

- CHANDA, D.; KISHORE, N. K.; SINHA, A. K. A wavelet multiresolution analysis for location of faults on transmission lines. *Electric Power & Energy Systems*, v. 25, 2003.
- CHANDA, D.; KISHORE, N. K.; SINHA, A. K. Application of wavelet multiresolution analysis for identification and classification of faults on transmission lines. *Electric Power System Research*, p. 323–333, Nov. 2004.
- CHEN, Z.; LUO, C.; SU, J.; WU, X. A fault location algorithm for transmission line based on distributed parameter. In: *Developments in Power System Protection, 2001, Seventh International Conference on (IEE)*. [S.l.: s.n.], 2001. p. 411–413. ISSN 0537-9989.
- COSTA, F. *Fault-Induced Transient Detection Based on Real-Time Analysis of the Wavelet Coefficient Energy*. 2013. 1-1 p.
- COSTA, F. B. *Detecção e Classificação de Falhas em Linhas de Transmissão Baseadas na Transformada Wavelet*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, 2006.
- COSTA, F. B. *Uma Técnica de Diagnóstico em Tempo Real de Distúrbios Transitórios Baseada na Transformada Wavelet para Uso em Registradores Digitais de Perturbação*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, 2010.
- COSTA, F. B.; SOUZA, B. A. Fault-induced transient analysis for real-time fault detection and location in transmission lines. *International Conference on Power Systems Transients (IPST)*, Delft, Netherlands, 2011.
- 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, 2012.
- COSTA, F. B.; SOUZA, B. A.; BRITO, N. S. D.; SANTOS, W. C. Fault resistance, location and inception angle effects on dc offset of the fault currents. *CBQEEb*, 2009.
- CUNHA, L. V. *Desempenho de Linhas de Transmissão frente a Descargas Atmosféricas: Influência do Efeito Corona na Ruptura a Meio de Vão*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2010.

- DAUBECHIES, I. *Ten Lectures on Wavelets*. Philadelphia, USA: CBMS-NSF Regional Conference Series, SIAM, 1992.
- GIRGIS, A. A.; HART, D. G.; PETERSON, W. L. A new fault location technique for two and three-terminal lines. *IEEE Transaction on Power Delivery*, v. 7, n. 1, 1992.
- GOPALAKRISHNAN, A.; KEZUNOVIC, M.; MCKENNA, S. M.; HAMAI, D. M. Fault location using the distributed parameter transmission line model. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, v. 15, n. 4, p. 1169–1174, 2000. ISSN 0885-8977.
- HA, H. xu; BAO-HUI, Z.; LV, Z. lai. A novel principle of single-ended fault location technique for ehv transmission lines. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, v. 18, n. 4, p. 1147–1151, 2003. ISSN 0885-8977.
- IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE. *EMTP Reference Models for Transmission Line Relay Testing*. New York, USA, 2004.
- JOHNS, A. T.; JAMALI, S. Accurate fault location technique for power transmission lines. *IEE Proceedings*, v. 137, n. 6, p. 395–402, 1990.
- JOHNS, A. T.; SALMAN, S. K. Digital protection for power systems. *IEE Power Series*, 1995.
- KIM, C. H.; AGGARWAL, R. Wavelet transform in power systems: Part 2 - examples of application to actual power system transients. *IEE Power Engineering Journal*, p. 193–202, Aug 2001.
- KIM, G.-T.; KIM, H.-S.; CHOI, H.-Y. Wavelet transform based power transmission line fault location using gps for accurate time synchronization. In: *Industrial Electronics Society, 2001. IECON '01. The 27th Annual Conference of the IEEE*. [S.l.: s.n.], 2001. v. 1, p. 495–499 vol.1.
- KUMAR, B. S. A.; PARTHASARATHY, K.; PRABHAKARA, F. S.; KHINCHA, H. P. Effectiveness of series capacitors in long distance transmission lines. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-89, n. 5/6, p. 941–951, may/jun 1970.
- LATHI, B. P. *Sinais e Sistemas Lineares*. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil: Bookman, 2007.

- LEUVEN EMTP CENTER. *ATP - Alternative Transient Program: Rule book*. Herverlee, Belgium, 1987.
- LOPES, F.; FERNANDES, D.; NEVES, W. A traveling-wave detection method based on park's transformation for fault locators. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, v. 28, n. 3, p. 1626–1634, 2013. ISSN 0885-8977.
- LOPES, F. V.; FERNANDES Jr., D.; NEVES, W. L. A. Fault location on transmission lines based on travelling waves. *International Conference on Power Systems Transients (IPST)*, Delft, Netherlands, 2011.
- MAGNAGO, F.; ABUR, A. Fault location using wavelets. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, v. 13, n. 4, p. 1475 –1480, oct 1998. ISSN 0885-8977.
- MALLAT, S. G. A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1989.
- MARTI, J. R. Accurate modeling of frequency dependent transmission lines in eletromagnetic transient simulations. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1982.
- METELLO, E. *Transformada Wavelet Aplicada à Localização de Faltas por Ondas Viajantes*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, 2012.
- NAIDU, S. R. *Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência*. [S.l.]: Ed. Grafset - Co-edição: Eletrobrás/Univesidade Federal da Paraíba, 1985.
- NEKOUBIN, A. Simulation of series compensated transmission lines protected with mov. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, v. 58, 2011.
- OLIVEIRA, A. L. P. de. *Avaliação do Comportamento da Proteção de Distância em Linhas de Transmissão com Compensação Série Fixa através da Simulação Digital em Tempo Real*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Minas Gerais, 2007.
- PERCIVAL, D. B.; WALDEN, A. T. *Wavelet Methods for Time Series Analysis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.

- PHADKE, A.; IBRAHIM, M.; HLIBKA, T. Fundamental basis for distance relaying with symmetrical components. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 96, n. 2, p. 635–646, mar 1977.
- PHADKE, A. G.; THORP, J. S. *Computer Relaying for Power System*. West Sussex, England: Research Studies Press Limited and John Wiley & Sons, 2009.
- PHADKE, S. H. H. A. G. *Power System Relaying*. West Sussex, England: Research Studies Press Limited and John Wiley & Sons, 2008.
- POISSON, O.; RIOUAL, P.; MEUNIER, M. Detection and measurement of power quality disturbances using wavelet transform. *International Conference on Harmonics and Quality of Power*, p. 1125–1130, Oct 1998.
- RADOJEVIC, Z. M.; KIM, C. H.; POPOV, M.; PRESTON, G.; TERZIJA, V. New approach for fault location on transmission lines not requiring line parameters. *International Conference on Power Systems Transients (IPST)*, Kyoto, Japan, 2009.
- RAMAMOORTY, M. Application of digital computers to power system protection. *J. Inst. Eng. India*, v. 52, 1972.
- RANJBAR, A. M.; SHIRANI, A. R.; FATHI, A. F. A new approach for fault location problem on power lines. *IEEE Transmission on Power Delivery*, v. 7, n. 1, p. 146–151, jan 1992.
- ROBERTSON, D. C.; CAMPS, O. I.; GISH, W. B. Wavelets and eletromagnetic power system transients. *IEEE Transaction on Power Delivery*, v. 11, n. 2, p. 1050–1058, Abr 1996.
- RTDS TECHNOLOGIES INC. *Real Time Digital Simulator Tutorial Manual: Rscad version*. Winnipeg, Manitoba, Canada, 2008.
- SADEH, J.; RANJBAR, A. M.; HADJSAID, N. New method for fault location in power transmission lines using one terminal data. *International Conference on Electric Power Engineering*, 1999.
- SALIM, R.; OLIVEIRA, K. de; FILOMENA, A.; RESENER, M.; BRETAS, A. Hybrid fault diagnosis scheme implementation for power distribution systems automation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 23, n. 4, p. 1846–1856, Oct. 2008. ISSN 0885-8977.

- SARAVANABABU, K.; BALAKRISHNAN, P.; SATHIYASEKAR, K. Transmission line faults detection, classification, and location using discrete wavelet transform. In: *Power, Energy and Control (ICPEC), 2013 International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 233–238.
- SHORT, T. A. *Electric Power Distribution Hand Book*. [S.l.]: CRC Press LLC, 2004.
- SILVA, K. M. *Diagnóstico de Falhas em Linhas de Transmissão Baseado em Redes Neurais Artificiais e Transformada Wavelet*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2005.
- STEVENSON JR., W. D.; GRAINGER, J. J. *Power System Analysis*. New York, USA: McGraw-Hill, 1994.
- TAKAGI, T.; YAMAKOSHI, Y.; BABA, J.; UEMURA, K.; SAKAGUCHI, T. A new algorithm of an accurate fault location for ehv/uhv transmission lines: Part i - fourier transformation method. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-100, n. 3, p. 1316–1322, mar 1981.
- TAKAGI, T.; YAMAKOSHI, Y.; BABA, J.; UEMURA, K.; SAKAGUCHI, T. A new algorithm of an accurate fault location for ehv/uhv transmission lines: Part ii - laplace transform method. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-101, n. 3, p. 564–573, mar 1982a.
- TAKAGI, T.; YAMAKOSHI, Y.; YAMAURA, M.; KONDOW, R.; MATSUSHIMA, T. Development of a new type fault locator using the one-terminal voltage and current data. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-101, n. 8, p. 2892–2898, aug 1982b.
- TLEIS, N. *Power Systems Modelling and Fault Analysis: Theory and Practice*. USA: Newnes, 2008.
- VIEIRA, D. A. G.; OLIVEIRA, D. B.; LISBOA, A. C. A closed form solution for transmission line fault location without the need of terminal synchronization or line parameters. *IEEE Transaction on Power Delivery*, 2013a.



VIEIRA, D. A. G.; OLIVEIRA, D. B.; LISBOA, A. C. A closed form solution for untransposed transmission lines fault location with non-synchronized terminals. *IEEE Transaction on Power Delivery*, 2013b.

ZANETTA Jr., L. C. *Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência*. São Paulo/SP: EDUSP - Editora da Universidade de São Paulo, 2003.