



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

FRANCISCO CARLOS MOREIRA ABREU

**LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO UTILIZANDO
ONDAS VIAJANTES E TRANSFORMADA *WAVELET* SOB INFLUÊNCIA DE
RUÍDO BRANCO**

FORTALEZA

2015

FRANCISCO CARLOS MOREIRA ABREU

**LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO UTILIZANDO
ONDAS VIAJANTES E TRANSFORMADA WAVELET SOB INFLUÊNCIA DE
RUÍDO BRANCO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Otacílio da Mota Almeida.

FORTALEZA

2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca de Pós-Graduação em Engenharia - BPGE

-
- A145L Abreu, Francisco Carlos Moreira.
Localização de faltas em linhas de transmissão utilizando ondas viajantes e transformada *Wavelet* sob influência de ruído branco / Francisco Carlos Moreira Abreu. – 2015.
83 f. : il. color., enc. ; 30 cm.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Elétrica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2015.
Área de Concentração: Sistemas de Energia Elétrica.
Orientação: Prof. Dr. Otacílio da Mota Almeida.

1. Engenharia elétrica. 2. Simulação computacional. I. Título.

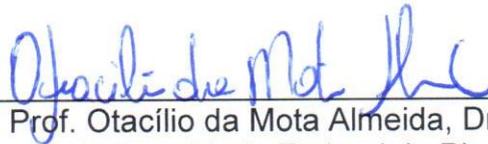
FRANCISCO CARLOS MOREIRA ABREU

LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO UTILIZANDO
ONDAS VIAJANTES E TRANSFORMADA WAVELET SOB
INFLUÊNCIA DE RUÍDO BRANCO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de Concentração: Sistema de Energia Elétrica.

Aprovada em: 25/06/2015

BANCA EXAMINADORA



Prof. Otacílio da Mota Almeida, Dr. (Orientador)
Universidade Federal do Piauí (UFPI)



Prof. Arthur Plínio de Souza Braga, Dr.
Universidade Federal do Ceará (DEE-UFC)



Prof. Luiz Henrique Silva Colado Barreto, Dr.
Universidade Federal do Ceará (DEE-UFC)



Prof. José Medeiros de Araújo Júnior, Dr.
Universidade Federal do Piauí (UFPI)

A Deus.

Aos meus pais, Maria Martins e José Francisco.

À minha esposa, Mariana Abreu.

Ao meu irmão, Franciel Abreu.

À minha irmã, Joelma Abreu.

Ao meu sobrinho, Kayo Levi.

AGRADECIMENTO

A Deus.

Aos meus pais, Maria Martins Oliveira Moreira Abreu e José Francisco Borges Abreu, pelo amor e dedicação.

À minha esposa, Mariana do Nascimento Lima Abreu, pelo amor e companheirismo.

À Faculdade Santo Agostinho, pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio e liberação das minhas atividades quando necessário.

Ao professor Dr. Otacílio da Mota Almeida, pela oportunidade e excelente orientação.

Aos professores participantes da banca examinadora Dr. Arthur Plínio de Souza Braga, Dr. Luiz Henrique Silva Colado Barreto e Dr. José Medeiros de Araújo Júnior pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Ao professor Msc. Aryfrance Rocha Almeida pela amizade e orientação na condução desse trabalho.

Ao Eng. Saulo Cunha Araújo de Souza pela amizade e parceria ao longo da pesquisa.

Aos colegas da turma de mestrado, pelas reflexões, críticas e sugestões recebidas.

“Seja você quem for, seja qual for a posição social que você tenha na vida, a mais alta ou a mais baixa, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega lá. ”

(Ayrton Senna da Silva)

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo implementar um método de localização de faltas em linhas de transmissão utilizando sinais de ondas viajantes e transformada *wavelet*. Para avaliar o desempenho do sistema desenvolvido, considerações sobre as diversas famílias de *wavelet* e a influência do ruído branco são investigadas. Para investigar o problema da localização de faltas com sinais de alta frequência utilizando a teoria das ondas viajantes, uma linha de 500kV do Sistema Eletrobrás - CHESF que interliga as subestações de Teresina II e Sobral III é simulada através do Software ATP (Alternative Transient Program). Na simulação, diferentes tipos de contingências são utilizados com sinais amostrados na frequência de 400kHz. Os sinais provenientes das simulações do ATP são processados através do algoritmo de localização de faltas fundamentado na determinação do tempo de viagem das ondas de tensão do ponto de falta aos terminais da linha. Para a determinação dos instantes de viagem das ondas utiliza-se a transformada *wavelet* com a análise multiresolução *wavelet* (AMR) em um nível de decomposição. Uma vez determinado os intervalos de reflexão das ondas, a distância da falta é estimada em função destes intervalos e da velocidade de propagação da onda na linha. Já o ruído branco é adicionado aos sinais de tensão com intuito de aproximar o sinal proveniente de simulações computacionais dos sinais encontrados em oscilografias reais. Os resultados alcançados demonstram que o algoritmo de localização apresentou Erro Médio Relativo Total (EMR_T) aceitável para Relação Sinal Ruído (Signal-to-Noise Ratio – SNR) a partir de 60dB. Destaque especial para a *wavelet* rbio 3.5 por apresentar os melhores resultados em todos os tipos de faltas considerados com SNR a partir de 60dB com EMR_T de 0,15%, representando um erro absoluto médio de 500m. Assim, os resultados alcançados demonstram uma otimização de performance em razão da escolha da *wavelet* mais adequada ao algoritmo e norteiam para uma aplicação prática do localizador de faltas.

Palavras-chave: Localização de Faltas, Ondas Viajantes, Transformada *Wavelet*.

ABSTRACT

This work aims to implement a method of fault location in transmission lines making use of traveling waves and wavelet transform. To evaluate the performance of the developed system, considerations on the several families of wavelet and the influence of the white noise are investigated. To observe the problem of fault location with high frequency signals making use of the theory of traveling waves, a 500kV line from the Eletrobras System – CHESF that links Teresina II and Sobral III sub-stations is simulated through ATP (Alternative Transient Program) software. In that simulation, different kinds of contingent are used with sample signs in 400 kHz. The signals that came from the ATP simulations were processed through the algorithm fault location based on the traveling time definition of the tension waves from the fault point on the line terminals. To determine the moment of the wave travels, it was used the wavelet transform with the wavelet multiresolution analysis (WMA) in a decomposition level. Since the Wave Reflection Intervals were defined, the fault distance was estimated taking into account those intervals and speed of propagation of the wave on the line. The white noise is added to the tension signs aiming to bring forward the sign from the computer simulations form the signs found in actual oscilographies. The results have shown that that the localization algorithm had Total Relative Average Error (EMRt) acceptable for the Signal-to-Noise Ratio (SNR) from 60dB. Special highlight must be made to the wavelet rbio 3.5 because it showed the best results in all kinds of faults considered with SNR from 60dB with 0.15% EMRt, which represents a 500m absolute average error. Thus, the results show a performance optimization regarding the wavelet that suits best to the algorithm and guides practical application of the fault locator.

Keywords: Fault location, Traveling waves, Wavelet transform.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 - Evolução do Número de Perturbações e do Impacto sobre o Atendimento às Cargas do SIN.....	17
Figura 2.1 - Circuito equivalente de um segmento de uma linha de transmissão com dois condutores.....	28
Figura 2.2 - Faltas entre fases na (a) primeira metade e (b) na segunda metade da linha.	31
Figura 2.3 - Faltas entre fase e terra na (a) primeira metade e (b) na segunda metade da linha.	31
Figura 2.4 - Sinal de 60 Hz com transitório.	35
Figura 2.5 - Espectro de frequências do sinal.....	35
Figura 2.6 - Análise local no tempo: o uso de janelas.....	36
Figura 2.7 - Transformada de Fourier de Curto Tempo.	36
Figura 2.8 - Transformada <i>Wavelet</i>	37
Figura 2.9 - Processo de filtragem ao nível mais básico.	39
Figura 2.10 - Processo de decomposição de um sinal em AMR.	39
Figura 2.11 - Família Wavelet Daubechies.	40
Figura 2.12 - Família Wavelet Symlets	41
Figura 2.13 - Família Wavelet Coiflets.	41
Figura 2.14 - Wavelets biorthogonal 2.4 (esquerda) e espectro de frequências (direita).	41
Figura 2.15 - Wavelet reverse biorthogonal 2.4 (esquerda) e espectro de frequências (direita).	42
Figura 2.16 - Registro oscilográfico real sem distúrbios: (a) tensões; (b) correntes.	42
Figura 2.17 - Registro oscilográfico sem distúrbios: (a) i_A sem a componente de frequência fundamental e harmônicas de ordem 2, 3, 4, 5 e 7; (b) histograma da frequência relativa dos ruídos de i_A	43
Figura 2.18 - Registro oscilográfico real de uma falta CT: (a) tensões; (b) correntes.	44
Figura 3.1 - Linha de Transmissão com dois terminais.....	46
Figura 3.2 - Parte das linhas de transmissão da rede de operação norte e nordeste do Brasil.	47
Figura 3.3 - Modelo de linha com torre em V Feixe Expandido Simétrico (VX – Simétrico) de 500 kV.	48
Figura 3.4 - Sistema de Transmissão modelado no software ATP.....	49
Figura 3.5 - Entrada de dados para o modelo AC3PH.	50
Figura 3.6 - Entrada de dados para o modelo LINESY_3.....	50

Figura 3.7 - Entrada de dados para o modelo RLCY3.	50
Figura 3.8 - Entrada de dados para o modelo LCC.	50
Figura 3.9 - Continuação janela de parametrização do modelo LCC.....	51
Figura 3.10 - Entrada de dados para o modelo TSWITCH.	51
Figura 3.11 - Símbolo do probe de tensão.....	51
Figura 3.12 - Fluxograma do algoritmo de localização de faltas.	52
Figura 3.13 - Forma de onda da tensão para uma falta fase-terra aplicada a 55km do terminal local. Sinal de falta original e sinal de falta mais ruído SNR 40 dB respectivamente.	54
Figura 3.14 - Aplicação da Transformada Wavelet em um sinal com descontinuidade proveniente de uma falta monofásica para o terminal local. 1- Falta monofásica; 2- Modo aéreo 1(M1) resultante da transformada de Clarke; 3- Nível 1 de detalhe wavelet através da Análise Multiresolução (AMR) do sinal M1; 4- Nível 1 de detalhes wavelet.	56
Figura 3.15 - Detecção das ondas viajantes, primeiros picos, nos terminais locais e remotos.	57
Figura 4.1 – Nível 1 de Detalhes da Análise Multiresolução (AMR) para uma falta fase A-terra a 55 km do terminal local, com resistência de falta de 150Ω , ângulo de incidência de 45° , wavelet mãe coif1 com ruído branco aditivo de SNR 80 dB.	60
Figura 4.2 - ERM_T alcançadas pelas wavelets para o tipo de falta FT com a adição de ruído branco com SNR 80dB.	62
Figura 4.3 - ERM_T alcançadas pelas wavelets para o tipo de falta FT com e sem adição de ruído branco.	63
Figura 4.4 - EMR_T alcançadas pelas wavelets para o tipo de falta FT com adição de ruído branco com SNR 60dB.	64
Figura 4.5 - EMR_T alcançadas pelas wavelets para o tipo de falta FFT com e sem adição de ruído branco.	65
Figura 4.6 - EMR_T alcançadas pelas wavelets para o tipo de falta FFT com adição de ruído branco com SNR 40dB.	66
Figura 4.7 - EMR_T alcançadas pelas wavelets para o tipo de falta FFF com e sem adição de ruído branco.	67
Figura 4.8 - EMR_T alcançadas pelas wavelets para o tipo de falta FFF com adição de ruído branco com SNR 20dB.	68
Figura 4.9 - EMR_T obtidos pelas wavelets bior3.5, bior3.7, bior3.9, rbio3.5 e rbio3.7 para sinais com ruído com SNRs de 70dB, 80dB, 90dB e 100dB em função das distâncias da ocorrência das faltas para o tipo FT.	69

Figura 4.10 - EMR_T em função da wavelet, do ruído branco e das resistências de falta 1Ω , 10Ω e 25Ω para faltas do tipo FFT.	70
Figura 4.11 - $EMRT$ em função da wavelet, do ruído branco e das resistências de falta 1Ω , 10Ω e 25Ω para faltas do tipo FFT.....	70
Figura 4.12 - Influência do ângulo de incidência na variação do EMR_T para faltas do tipo FT sob a influência do ruído branco. O EMR_T em função da wavelet, do ruído branco e do ângulo de incidência.	71
Figura 4.13 - Tempo médio de processamento das wavelets utilizadas na localização de faltas com e sem a influência do ruído branco para sinais de faltas do tipo FT.....	72
Figura 4.14 - Tempo médio de processamento das wavelets com adição de ruído branco com SNR de 80dB em sinais de faltas do Tipo FT.	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Quantitativo de faltas por setores de um SEP.	18
Tabela 4.1 - Wavelets utilizadas para localização de faltas.	58
Tabela 4.2 - Falta fase terra (A-terra) a 55km, wavelet coif1 com SNR 80 dB.	61
Tabela 4.3 - Falta tipo FT (fase A- Terra) com SNR 80 dB em função da distância real.	62
Tabela 4.4 - Wavelets que apresentaram os menores EMR_T para faltas do tipo FT sem e com a adição de ruído branco com SNR entre 60 dB a 100 dB.	63
Tabela 4.5 - Wavelets que apresentaram os menores EMR_T para faltas do tipo FFT sem e com a adição de ruído branco com SNR entre 40 dB a 100 dB.	65
Tabela 4.6 - Wavelets que apresentaram os menores EMR_T para faltas do tipo FFF sem e com a adição de ruído branco com SNR entre 20 dB a 100 dB.	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMR	Análise Multiresolução Wavelet
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ATP	Alternative Transient Program
ATPdraw	Interface Gráfica com o Software ATP
bior	Família de Wavevelt Biorthogonal
CHESF	Companhia Hidro Elétrica do São Francisco
coif	Família Wavevelt Coiflet
CPU	Central Processing Unit
CT	Falta Monofásica Envolvendo a Fase C e a Terra
db	Família Wavevelt Daubechies
DWT	Discrete Wavelet Transform
DPR	Desvio Padrão Relativo
EA	Erro Absoluto
ER	Erro Relativo
EMR	Erro Médio Relativo
EMR _T	Erro Médio Relativo Total
EMTP	Eletromagnetic Transient Program
FDC	Fator Distribuição de Corrente
FDC	Fator Distribuição de Corrente
FFF	Falta Trifásica Envolvendo as Fases A, B e C
FFT	Falta Bifásica Envolvendo as Fases A e B com a Terra
FT	Falta Monofásica Envolvendo a Fase A e com a Terra
FT	Transformada de Fourier
GPS	Global Positioning System
LCC	Line/Cable Constants program
LT	Linha de Transmissão
M0	Modo terra resultante da Transformada de Clarke
M1	Modo aéreo 1 resultante da Transformada de Clarke
M2	Modo aéreo 2 resultante da Transformada de Clarke
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PLC	Power Line Carrier
RAM	Random Access Memory

rbio	Família Wavevelt Reverse Biorthogonal
RDP	Registradores Digitais de Perturbações
SBT	Subestações de Energia Elétrica Sobral III do Sistema Eletrobrás - CHESF
SEP	Sistemas Elétricos de Potência
SIN	Sistema Interligado Nacional
SNR	Signal-to-Noise Ratio
STFT	Short-Time Fourier Transform
sym	Família Wavelet Symlet
TACS	Dispositivos de Controle de SEPs
TC	Transformador de Corrente
TNA	Transient Network Analyser
TP	Transformador de potencial
TPC	Transformadores de Potencial Capacitivo
TSD	Subestações de Energia Elétrica Teresina II do Sistema Eletrobrás - CHESF
TW	Transformada Wavelet
TWC	Transformada Wavelet Contínua

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
®	Marca Registrada
Ω	Ohms
V	Volts
Δx	Segmento do comprimento da LT
R	Resistência – modelo da LT
L	Indutância – modelo da LT
C	Capacitância – modelo da LT
t	Tempo
$\frac{\partial}{\partial t}$	Derivada em relação ao tempo
v	Tensão instantânea
i	Corrente instantânea
x	Comprimento – modelo LT
d	Distância entro o local da falta e terminal Local da LT.
t_{s1}	Tempo de propagação da primeira frente de onda originada no ponto de falta até o terminal local
t_{s2}	Tempo de propagação da primeira onda refletida no terminal remoto e refratada no ponto de falta
v	Velocidade de propagação da onda
l_t	Comprimento total da LT
t_d	Atraso entre os tempos de detecção das ondas viajantes nos dois terminais.
v_{m1}	Velocidade de propagação de modo aéreo 1
$F(\omega)$	Sinal no domínio da frequência.
$f(t)$	Sinal no domínio do tempo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	As Linhas de Transmissões e as Falhas nos Sistemas Elétricos de Potência.....	18
1.2	Estado da Arte	20
1.3	Objetivos.....	26
1.4	Contribuições	26
1.5	Organização da Dissertação	27
2	TRANSFORMADAS WAVELETS APLICADAS NO PROCESSAMENTO DOS SINAIS DE ONDAS VIAJANTES EM LINHAS DE TRANSMISSÃO.....	28
2.1	Localização de Faltas em LT Baseada em Ondas Viajantes	28
2.2	Localização de Faltas Utilizando Dados Provenientes de Um Terminal.....	31
2.2.1	<i>Localização de Faltas Utilizando Dados Provenientes de Dois Terminais.....</i>	<i>32</i>
2.2.2	<i>Ondas Viajantes e a Transformada Wavelet</i>	<i>33</i>
2.3	A Transformada Wavelet	33
2.3.1	<i>A Transformada de Fourier.....</i>	<i>34</i>
2.3.2	<i>A Transformada de Fourier de Tempo Curto</i>	<i>36</i>
2.3.3	<i>A Transformada Wavelet Contínua.....</i>	<i>37</i>
2.3.4	<i>Transformada Wavelet Discreta</i>	<i>38</i>
2.3.5	<i>Análise Multirresolução.....</i>	<i>38</i>
2.3.6	<i>Famílias Wavelets.....</i>	<i>40</i>
2.4	Ruídos em Faltas em Linha de Transmissão	42
2.5	Considerações Finais.....	45
3	LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO UTILIZANDO TRANSFORMADAS WAVELETS EM ONDAS VIAJANTES	46
3.1	O sistema Elétrico Protótipo	46
3.1.1	<i>Modelagem do Sistema Elétrico no Software ATP/EMTP.....</i>	<i>48</i>
3.1.2	<i>Variações nas Simulações das Condições de Faltas Aplicadas ao Sistema de Transmissão Analisado</i>	<i>51</i>
3.2	Algoritmo para Localização de Faltas.....	52
3.2.1	<i>Módulo de Aquisição dos Dados.....</i>	<i>53</i>
3.2.2	<i>Módulo para Geração de Ruído Branco.....</i>	<i>53</i>
3.2.3	<i>Módulo de Transformada Modal.....</i>	<i>54</i>
3.2.4	<i>Módulo de Transformada Wavelet (TW).....</i>	<i>55</i>
3.2.5	<i>Módulo de Localização da Falta.....</i>	<i>56</i>
3.3	Considerações Finais.....	57

4	RESULTADOS.....	58
4.1	Faltas Monofásicas - Tipo FT.....	60
4.2	Faltas Bifásicas Terra – Tipo FFT.....	64
4.3	Faltas Trifásicas – Tipo FFF.....	66
4.4	Influência da distância da Falta sobre a variação do EMRT.....	69
4.5	Influência da Resistência de Falta sobre o Erro Médio Relativo Total.....	69
4.6	Influência do Ângulo de Incidência sobre o Erro Médio Relativo Total.....	70
4.7	Famílias Wavelets e o Tempo Médio de Processamento.....	71
4.8	Considerações Finais.....	72
5	CONCLUSÕES.....	73
5.1	Sugestões de Trabalhos Futuros.....	74
	REFERÊNCIAS.....	76
	APENDICE A – FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA DE LOCALIZAÇÃO UTILIZANDO AS FUNÇÕES DO MATLAB.....	83

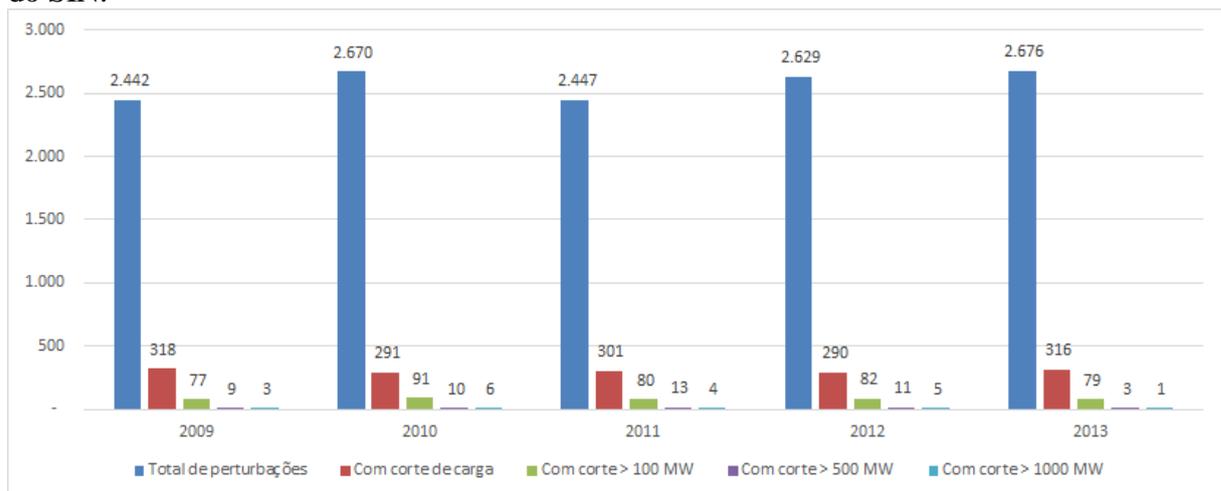
1 INTRODUÇÃO

O consumo de energia elétrica é um dos principais indicadores do desenvolvimento econômico e do nível de qualidade de vida de qualquer sociedade. O ritmo de atividades dos setores industrial, comercial e de serviço está diretamente relacionado com o suprimento de energia elétrica disponível que deve ser fornecida respeitando os requisitos de estabilidade e qualidade.

O transporte de energia elétrica é realizado por meio das linhas de transmissão (LTs) que, por serem de longas distâncias e em grande quantidade, tornam os Sistemas Elétricos de Potência (SEPs) mais susceptíveis à ocorrência de perturbações causadas, principalmente, por fenômenos naturais com destaque para as descargas atmosféricas (VISACRO, 2005).

O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), responsável por coordenar e supervisionar a operação centralizada do Sistema Interligado Nacional (SIN), informou que de 2009 a 2013 o número de perturbações com envolvimento da Rede Básica, instalações com tensão maior ou igual a 230 KV, oscilou, por ano, entre 2442 e 2676 como pode ser observado na Figura 1.1.

Figura 1.1 - Evolução do Número de Perturbações e do Impacto sobre o Atendimento às Cargas do SIN.



Fonte: (www.ons.org.br)

Dentre essas perturbações, destaque especial para as faltas em LT's por envolver grande quantidade de carga. Por exemplo, no dia 02 de fevereiro de 2014 uma falha em uma linha de transmissão de energia elétrica que liga o Norte ao Sudeste do país provocou falta de energia elétrica em todos os estados do Sudeste, Sul e Centro-Oeste, além do Tocantins, na

Região Norte. Ao menos onze estados tiveram o fornecimento de eletricidade comprometido, provocando a interrupção do fornecimento de energia elétrica de cerca de 5.000 MW.

Em 2013, uma queimada em uma fazenda no Piauí provocou um curto circuito que desligou todo o sistema de energia elétrica do Nordeste. Em algumas localidades, o “apagão” durou mais de quatro horas causando diversos problemas para a população desses estados.

Ao mesmo tempo, o mercado de energia elétrica evoluiu e passou a exigir índices mais rigorosos de continuidade dos serviços das concessionárias de energia elétrica. Indisponibilidades sérias causadas principalmente por defeito em equipamentos, por atraso na recomposição de LTs e/ou reincidências de alguns desses problemas fazem com que as concessionárias de energia elétrica percam credibilidade no mercado além de gerar grandes dispêndios financeiros por multas impostas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

1.1 As Linhas de Transmissões e as Falhas nos Sistemas Elétricos de Potência

Nos Sistemas Elétricos de Potência (SEPs), as faltas podem ocorrer nos diversos componentes, dentre os quais destacar-se as LTs como o elemento mais susceptível, especialmente se considerarmos suas dimensões físicas, complexidade funcional e o ambiente que se encontram, apresentando assim, maior dificuldade para manutenção e monitoramento. Como pode ser observado na Tabela 1.1, em meio à maioria das faltas provocadas por curtos circuitos em um Sistema Elétrico de Potência (SEP), cerca de 89% ocorrem em LT's.

Tabela 1.1 - Quantitativo de faltas por setores de um SEP.

Setor do sistema elétrico	Curto-circuito
Geração	6%
Subestação	5%
Transmissão	89%

Fonte: (KINDERMANN, 1997)

As falhas que ocorrem nas LTs são classificadas em dois grupos (DALLBELLO *et al*, 2007). O primeiro grupo é aquele que se relaciona às ocorrências de curtos-circuitos e é denominado faltas elétricas. Os curtos-circuitos podem ocorrer em consequência de queimadas na faixa de serviço da LT, de descargas atmosféricas, de rompimento e queda de cabos e/ou torres devido a condições climáticas desfavoráveis como, vento forte, etc.

O segundo grupo é aquele que engloba diversos tipos de defeitos que poderão também conduzir à ocorrência de uma falta com possível desligamento da linha de transmissão e são chamados defeitos. Como exemplos têm-se cadeia de isoladores com um ou mais isoladores defeituosos (perfuração interna; trinca) e cabo apresentando condutores parcialmente rompidos provocados por vibrações eólicas. Os defeitos mencionados anteriormente irão se manifestar através de efeitos térmicos, sonoros e eletromagnéticos. Estes estão sempre presentes nos demais (DALLBELLO *et al.*, 2007).

Em alguns trabalhos, os autores analisam os ruídos provocados por defeitos e/ou faltas em linhas de transmissão. Como exemplo, Dallbello *et al.* (2007, p.2) afirma que as equipes técnicas das companhias de energia elétrica têm percebido, ao longo dos anos, o aparecimento de algumas interferências na forma de ruídos em sinais de ondas portadoras em sistemas *Power Line Carrier* com certa correlação destes com defeitos nas linhas de transmissão que, com o tempo, poderão culminar em falhas. Mostrando assim, a importância de investigar a influência do ruído na localização de faltas.

Atualmente, pode ser encontrada na literatura uma vasta gama de técnicas que utilizam diferentes análises e conceitos para localizar o ponto de ocorrência de curtos-circuitos em LT, as quais são geralmente classificadas em quatro grupos principais (SAHA *et al.*, 2010): métodos baseados na análise de componentes de frequência fundamental (TAKAGI *et al.*, 1982b; JOHNS; JAMALI, 1990), métodos baseados na análise de componentes de alta frequência (FAYBISOVICH *et al.*, 2010; IURINIC *et al.*, 2013), métodos baseados em inteligência artificial (CHEN; MAUN, 2000; DAVOUDI *et al.*, 2012) e métodos baseados na teoria de ondas viajantes (ALMEIDA *et al.*, 2014; LOPES *et al.*, 2013a; GALE *et al.*, 1993).

Embora já sejam comercializados localizadores empregando ondas viajantes e a transformada *wavelet* obtendo precisões satisfatórias, os pesquisadores ainda não conseguem especificar qual seria a família *wavelet* e a ordem mais apropriada à correta detecção desses fenômenos transitórios para sinais de faltas com a presença de ruídos.

Dessa forma, este trabalho fará uso de famílias *wavelets* com diferentes ordens em um algoritmo de localização para determinar quais são as *wavelets* mais apropriadas para a determinação mais precisa dos locais das faltas. Para a implementação do sistema, utiliza-se o software *Alternative Transient Program* (ATP) para modelar a linha de transmissão em 500kV da Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF) pertencente ao sistema Eletrobrás que interliga as subestações de Teresina II a Sobral III (TSD-SBT).

1.2 Estado da Arte

Na literatura especializada, têm-se diferentes categorias em que podem ser classificados os trabalhos para localização de faltas em linhas de transmissão: métodos baseados em componentes fundamentais, métodos baseados na teoria das ondas viajantes, métodos baseados em componentes de alta frequência e métodos baseados em inteligência artificial.

Na atualidade, os algoritmos baseados na análise de componentes fundamentais (50 ou 60 Hz) são os mais utilizados pelas concessionárias de energia elétrica e mais difundidos na literatura, visto que são técnicas relativamente simples, que requerem baixas taxas de amostragem e, em geral, pouco esforço computacional. Dentre os algoritmos desse tipo, os métodos que utilizam um terminal foram os primeiros a surgir, cuja maior vantagem é a independência de canais de comunicação para troca de informações com terminais remotos, bem como não necessidade de sincronização dos dados (LOPES; FERNANDES JR; NEVES, 2014a).

Em Takagi *et al.* (1981) apresentaram um algoritmo de localização para linhas de extra e ultra-alta tensão baseado no uso de sinais de tensão e corrente apenas de um terminal, os quais são posteriormente filtrados através da técnica da transformada discreta de Fourier, a fim de obter uma medida dos fasores de tensão e corrente em regime permanente.

Continuando seus estudos, Takagi *et al.* (1982a) apresentaram uma outra possível solução para o problema de localização de faltas, baseado agora na transformada de Laplace. Este método também utiliza o princípio da superposição aplicado à análise do estado transitório de uma rede faltosa. A equação fundamental do localizador é não linear, portanto, se faz necessário o uso de uma técnica de solução iterativa como o método de Newton Raphson.

Em Takagi *et al.* (1982b) desenvolveram uma técnica aproximada de localização de faltas, na qual se calcula a reatância da linha faltosa, usando a representação dos fasores de tensão e corrente no terminal local da LT, juntamente com a teoria de quadripólos. Erros causados por vários fatores como: fluxo de carga, resistência de falta e disposição não simétrica da linha de transmissão foram amenizados por esta abordagem.

Estes métodos (Takagi *et al.*,1981; Takagi *et al.*,1982a; Takagi *et al.*,1982b) apresentaram bons resultados, mas foram desenvolvidos assumindo impedâncias de falta puramente resistivas, o que dependendo da natureza do distúrbio, pode consistir em uma fonte de erros. Além disso, o algoritmo é baseado na versão mais simples do modelo de LT a

parâmetros concentrados. Assim, o efeito capacitivo dos condutores não é considerado, o que ocasiona maiores erros nas localizações estimadas para faltas distantes do terminal monitorado.

Em Eriksson, Saha e Rockefeller, (1985) descreveram uma técnica de localização de faltas usando o Fator Distribuição de Corrente (FDC), na qual se determinam o ângulo da tensão no ponto de falta e a distância da falta. Esta técnica apresenta maiores benefícios se comparada ao método proposto por Takagi *et al.* (1982), uma vez que considera a influência introduzida pelo terminal remoto da linha, usando para isso, o modelo completo da rede. Além disso, valores representativos para a impedância da fonte são também armazenados, para compensar as variações nos ângulos das impedâncias e determinar uma correta descrição da rede. O cálculo da localização determina a impedância aparente da falta com uma compensação para a queda de tensão na resistência de falta, eliminando erros na medição convencional. Como a impedância da sequência positiva não depende da resistência do pé de torre e nem da resistência do solo, as componentes da corrente de sequência zero foram eliminadas e somente da corrente de sequência positiva e negativa foram usadas.

Saha *et al.* (2001) apresentaram um algoritmo de localização de faltas para linhas paralelas utilizando sinais de tensão e corrente provenientes de um terminal. O algoritmo faz uso de componentes simétricos. As correntes e tensões de fase em ambas as linhas, com falta e sem falta, são utilizadas pelo localizador. O algoritmo é capaz de localizar faltas quando da operação de ambas as linhas, não requerendo o conhecimento das impedâncias das fontes e o uso de sinais de pré-falta. A incerteza com respeito a impedância de sequência zero da linha é parcialmente limitada, pois a queda de tensão gerada pela falta ao longo da linha é determinada excluindo-se a componente de sequência zero.

Recentemente, outros algoritmos de um terminal foram propostos visando contornar as limitações acima relatadas. Em Salim *et al.* (2011), por exemplo, apresenta-se um algoritmo que considera o efeito capacitivo da LT. Embora idealizado originalmente para sistemas de distribuição, este algoritmo pode ser aplicado também em LT sem perda de confiabilidade. No entanto, no desenvolvimento matemático apresentado, também são consideradas impedâncias de falta puramente resistivas, o que, conforme mencionado anteriormente, pode consistir em uma fonte de erros.

Com a finalidade de melhorar a precisão dos algoritmos de localização de faltas em linhas de transmissão, muitos autores propõem o uso de dados obtidos em dois ou mais terminais da linha, usando medições sincronizadas ou não. Avaliando as técnicas disponíveis na literatura, percebe-se que os métodos de dois terminais se popularizaram mais rapidamente.

De fato, estes algoritmos demonstraram ser mais robustos do que os métodos de um terminal e menos onerosos quando comparados às técnicas multi-terminais.

Em 1981, um dos primeiros trabalhos que utiliza dados provenientes de dois terminais foi apresentado por Schweitzer e Jachinowhi (1981). Neste trabalho, os autores propuseram uma técnica usando corrente e tensão em regime permanente, provenientes dos dois terminais da linha. O método não requer valores para os parâmetros do sistema externo à linha de transmissão monitorada. A precisão pode ser limitada por alguns fatores, tais como: grau de fidelidade do modelo da linha usado na implementação, precisão com que os parâmetros da linha são determinados e pelos hardwares e softwares usados, o que inclui eficiência do método de filtragem para obtenção dos valores em regime permanente.

Sachdev e Agrwal (1985) propuseram uma técnica de localização de faltas não iterativa que é adequada para estimar localizações de faltas para terra. O método faz uso da impedância aparente local da linha, da corrente de sequência positiva medida localmente por relés e também, de dados correspondentes ao terminal remoto. A técnica foi testada para dados simulados de faltas fase-terra e fase-fase-terra. Os resultados indicaram que os erros de estimação são menores que 5% do comprimento da linha, exceto para uma porção da linha próxima do seu ponto médio, onde as contribuições das correntes de faltas dos dois terminais da linha são iguais. As medidas realizadas nos dois terminais não necessitam ser sincronizadas. O efeito da capacitância em paralelo é desprezado.

Em 1990, Johns e Jamali (1990) apresentaram um algoritmo de dois terminais bastante preciso para localização de faltas, o qual se baseia no modelo de LT a parâmetros distribuídos. Como variáveis de entrada, são utilizados os parâmetros de sequência positiva dos condutores e as medições sincronizadas de tensão e corrente nas extremidades da linha. Esta técnica serve até os dias atuais como base de outros algoritmos localizadores de faltas, no entanto, embora muito precisa, demonstra grande sensibilidade a imprecisões nos parâmetros de sequência positiva da LT.

Girgis *et al.* (1992) apresentaram novas expressões matemáticas para localização de faltas em LT monitoradas em dois ou três terminais, usando dados sincronizados e não sincronizados. O método é desenvolvido com base no modelo de LT a parâmetros concentrados para linhas curtas, desprezando-se, portanto, o efeito capacitivo das LT. A técnica foi testada por meio de simulações no *Eletromagnetic Transient Program* (EMTP) e os resultados mostraram a eficácia do método. Os maiores erros foram encontrados quando os dados não

eram sincronizados, atingindo o patamar de 2%. Por outro lado, com medidas sincronizadas, os erros foram em média 0,5%.

Em 2001, Tziouvaras *et al.* (2001) apresentaram técnicas de dois e três terminais, as quais funcionam a partir de dados sincronizados e não sincronizados. A técnica faz uso de componentes simétricas de sequência negativa, evitando problemas com fluxo de potência de pré-falta e com acoplamento mútuo de sequência zero entre fases. Por outro lado, o conhecimento dos parâmetros da LT e das fontes equivalentes conectadas nas extremidades da linha monitorada é requerido, o que limita a aplicação da técnica quando estes dados não se encontram disponíveis ou têm precisão duvidosa.

Visando minimizar a influência de imprecisões nos parâmetros da LT, várias técnicas foram propostas nos últimos anos para fins de localização de faltas sem requerer o conhecimento dos parâmetros do sistema, a exemplo dos algoritmos descritos em Radojevic *et al.* (2009), Preston *et al.* (2011), He *et al.* (2011) e Dawidowski *et al.* (2013).

Os métodos baseados em componentes de alta frequência se baseiam na extração de características do distúrbio por meio da análise espectral dos transitórios no período de falta ou logo após a eliminação desta. Outras abordagens deste tipo se baseiam na análise da frequência dominante dos sinais medidos nos terminais da LT após a injeção de pulsos elétricos nos condutores com defeito.

Em Faybisovich *et al.* (2010) são apresentados algoritmos de um e dois terminais baseados na identificação das frequências dominantes dos transitórios gerados pela isolação do distúrbio. Em Iurinic *et al.* (2013) é apresentado um algoritmo cuja formulação se baseia na identificação da frequência dominante dos transitórios durante o período de falta em apenas um terminal. Já em Shi *et al.* (2010) é proposto um algoritmo que utiliza a injeção de pulsos elétricos na linha sob análise após a isolação do defeito.

Dentre as potencialidades desses métodos, destaca-se a possibilidade do uso de registros não sincronizados. Porém, são técnicas mais caras, complexas, que necessitam de altas taxas de amostragem para representação confiável das altas frequências e, em geral, grande esforço computacional para a realização da análise espectral dos transitórios (LOPES, 2014b).

Com o objetivo de superar fontes de erro típicas dos métodos de localização de faltas descritos até então, vários algoritmos baseados em conceitos de inteligência artificial têm sido apresentados nos últimos anos. Estes algoritmos são também conhecidos como métodos baseados no conhecimento e são fundamentados, basicamente, no reconhecimento de padrões em registros oscilográficos de faltas.

Como exemplo de algoritmos deste tipo: em Chen e Maun (2000), Sadinezhad e Agelidis (2009) e Silva, Lima e Souza (2012), os quais se baseiam no uso de redes neurais artificiais; em Sadeh e Afradi (2009), o qual utiliza a lógica nebulosa (lógica fuzzy); e em EL-Naggar (2001) e Davoudi *et al.* (2012), os quais se baseiam em algoritmos genéticos.

Embora seja relatado na literatura um bom desempenho desses métodos, sabe-se que estes métodos são bastante dependentes das características do sistema monitorado e, portanto, requerem, em sua grande maioria, a atualização dos algoritmos, novos treinamentos, sempre que ocorrem alterações na configuração do SEP sob análise.

Já o método baseado na teoria de ondas viajantes utiliza sinais a altas frequências propagados através da LT denominadas de ondas viajantes geradas por transitórios advindos de modificações bruscas nos parâmetros da linha. Elas são um desafio aos métodos matemáticos tradicionais e modernos, pois além do desafio de separá-las dos ruídos, também é preciso obtê-las dos sistemas a altíssimas taxas amostrais. Tais ondas propagam-se a velocidades próximas a da luz, sendo suas magnitudes determináveis a partir da capacitância e da indutância da linha em questão.

Os algoritmos implementados usando sinais a altas frequências são fundamentados na teoria de ondas viajantes em linhas de transmissão e baseiam-se em equacionamentos envolvendo, geralmente, a determinação dos instantes de reflexão destas ondas nos terminais da linha (BEWLEY, 1963) e o valor da velocidade de propagação, através dos princípios da cinemática clássica ou de alguma variante disso.

O uso da teoria de ondas viajantes para fins de diagnóstico de distúrbios elétricos é antigo. Conforme mencionado em AIEE Committee Report (1955), os primeiros trabalhos que fundamentaram métodos deste tipo são da década de 1930, como o de Bewley (1931), o qual motivou inúmeras outras pesquisas nas décadas seguintes. No entanto, por necessitarem de altas taxas de amostragem para medição apropriada dos transitórios, estas técnicas se popularizaram apenas em anos recentes após o advento da tecnologia digital, que resultou no aumento das taxas de amostragem dos Registradores Digitais de Perturbações (RDP) e relés digitais.

A seguir estão algumas técnicas de processamento de sinais utilizadas na aplicação de ondas viajantes para localização de faltas em LTs aéreas.

Em Gale *et al.* (1993), os métodos baseados na teoria de ondas viajantes são classificados em grupos, dentre os quais as principais diferenças são relativas à utilização de ondas refletidas no ponto de falta, ao número de terminais monitorados e à utilização de pulsos elétricos para a localização do defeito. Gale *et al.* (1993) afirmam que, embora não necessitem

da sincronização de dados, métodos de um terminal são mais susceptíveis a erros, uma vez que dependem da detecção de ondas refletidas no ponto de falta, as quais em alguns casos, podem ser confundidas com ondas refletidas e/ou refratadas em outros pontos do SEP. Portanto, mesmo fazendo necessária a sincronização de dados, os métodos de dois terminais baseados nos transitórios de falta, ou seja, que não requerem o uso de pulsos elétricos, são referenciados como sendo os mais simples, robustos e menos susceptíveis a erros, pois necessitam apenas da detecção do instante de chegada das primeiras ondas eletromagnéticas aos terminais da LT.

Já os autores JIAN *et al.* (1998) apresentam um novo método de localização, com dados registrados em ambos os terminais, utilizando a Transformada *Wavelet* Contínua (TWC). São descritas duas técnicas para o cálculo da distância, levando-se em consideração o comprimento da linha. O novo método apresentou uma melhor precisão, em relação ao método convencional, além de ser independente da resistência de falta, posição da falta e características geográficas. A taxa de amostragem utilizada foi de 1 MHz.

Outro método utilizando a Transformada *Wavelet* para localização de faltas é mostrado em Silveira *et al.* (2001), no qual os coeficientes *wavelets* de detalhes são calculados a partir dos sinais de tensões e correntes normalizados. Os coeficientes são desacoplados, dado o pré-processamento dos sinais utilizando uma matriz de pesos modais, obtendo-se como saídas os correspondentes modos aéreos e o modo terra. Estas saídas são comparadas a limiares apropriados, detectando-se, em caso de falta, a primeira e a segunda frente de ondas com seus devidos instantes de ocorrência. Para o autor, este método apresentou maiores erros de localização de faltas para defeitos próximos ao terminal de registro dos sinais da linha, cerca de 2,8%.

Em Chanda *et al.* (2003) propuseram um método de localização baseado na análise multiresolução *wavelet* combinada com uma técnica de interpolação cúbica. Este método utiliza sinais de correntes obtidos em ambos os terminais da linha. Os resultados obtidos por meio de extensivas simulações demonstram que o método proposto apresenta uma elevada precisão, além de ser independente dos efeitos do ângulo de incidência, distância e resistência da falta.

Em Gilany *et al.* (2007) apresentaram um método de dois terminais capaz de localizar faltas sem requerer o conhecimento da velocidade de propagação das ondas viajantes. Porém, o algoritmo faz necessária a detecção de ondas viajantes refletidas no ponto de falta, o que o torna tão susceptível a erros quanto as técnicas de um terminal.

Em 2008, Feng *et al.* (2008) apresentaram um método de três terminais que suprime a utilização da velocidade de propagação no cálculo do local do defeito. Porém, embora

apresente essa vantagem, nota-se que a análise de registros oscilográficos provenientes de três pontos distintos do SEP pode tornar o procedimento de localização de faltas mais complexo e lento, visto que os RDP e relés digitais se encontram geralmente em subestações distantes entre si, dificultando a concentração das informações necessárias para a localização da falta. Além disso, para contornar o uso da velocidade de propagação, Feng *et al.* (2008) consideram velocidades de propagação iguais em todos os trechos das LT's monitoradas, o que consiste em uma fonte de erros.

Recentemente, algumas versões dos métodos de dois terminais têm sido analisadas para aplicações em tempo real, a exemplo da apresentada em Costa e Souza (2011), na qual a sincronização de dados é necessária, e em Lopes *et al.* (2013b), cuja formulação não requer a sincronização de dados.

1.3 Objetivos

Este trabalho tem por objetivo principal implementar um método de localização de faltas em linhas de transmissão utilizando sinais de ondas viajantes e transformada *wavelet*. Para avaliar o desempenho do sistema desenvolvido, considerações sobre as diversas famílias de *wavelet's* e a influência do ruído branco são investigadas.

Para solucionar o problema da localização de faltas em LTs com sinais de alta frequência utilizando a Teoria das ondas viajantes, uma linha de 500kV do Sistema Eletrobrás-Chesf foi simulada através do Software ATP. Esta linha interliga as subestações de Teresina II a Sobral III (TSD-SBT).

1.4 Contribuições

O desenvolvimento deste trabalho deu origem aos seguintes artigos:

ARYFRANCE R. ALMEIDA, FRANCISCO C. M. ABREU, OTACÍLIO R. ALMEIDA, JAYNNE P. SILVA, MARCOS H. S. SILVA (2014). Localização de Faltas em Sistemas de Transmissão de Alta Tensão a partir de Registros Oscilográficos Usando Análise de Componentes Independentes. *V Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos – SBSE 2014*.

SAULO C. A. SOUZA, ARYFRANCE R. ALMEIDA, ARTHUR P. S. BRAGA, OTACÍLIO R. ALMEIDA, FRANCISCO C. M. ABREU, JOSÉ S. A. JÚNIOR (2014). Localização de Faltas em Linhas de Transmissão Usando Redes Neurais Artificiais e Ondas Viajantes. *Anais do XX Congresso Brasileiro de Automática – CBA 2014. pp. 2716-2723. Belo Horizonte, MG.*

SAULO C. A. SOUZA, ARYFRANCE R. ALMEIDA, ARTHUR P. S. BRAGA, OTACÍLIO R. ALMEIDA, FRANCISCO C. M. ABREU (2014). Uso da Transformada de Stockwell e Ondas Viajantes na Localização de Faltas em Linhas de Transmissão. *Anais do XI IEEE/IAS International Conference on Industry Applications – INDUSCON 2014. Juiz de Fora, MG.*

1.5 Organização da Dissertação

O presente trabalho foi dividido em cinco capítulos. No capítulo dois, apresenta-se a teoria das ondas viajantes utilizada na localização de faltas em LTs e a teoria das Transformadas de Fourier, Gabor e *Wavelet*, enfatizando a superioridade da Transformada *Wavelet* no trato de sinais não-estacionário. Em seguida, no capítulo três, descrevem-se a modelagem do sistema elétrico protótipo no software ATP e o algoritmo de localização utilizando ondas viajantes e Transformada *Wavelet* sob influência do ruído branco implementado no software Matlab. Diversas simulações foram realizadas utilizando o algoritmo de localização com os resultados apresentados e discutidos no capítulo quatro. Já no capítulo cinco, mostra-se as conclusões proporcionadas pela dissertação, fazendo, ao final, sugestões para melhorias e trabalhos futuros.

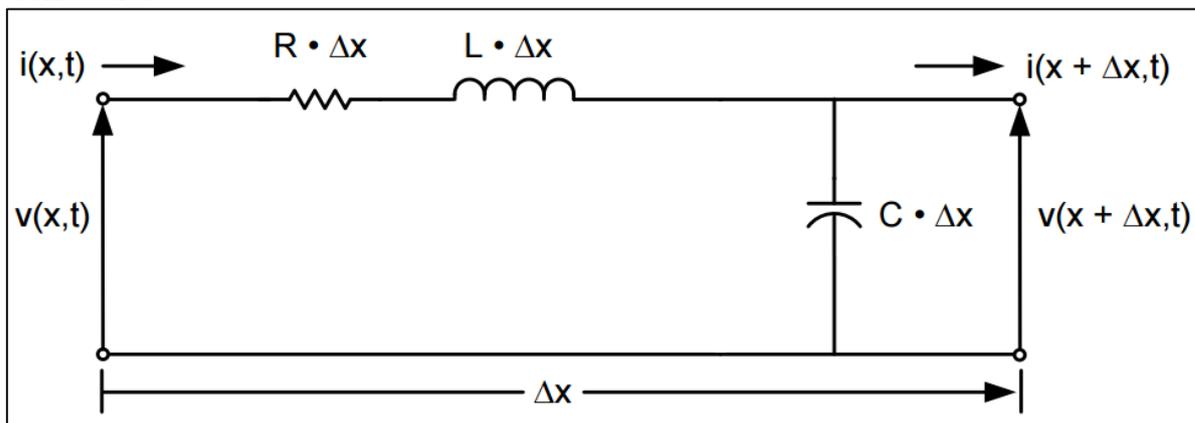
2 TRANSFORMADAS WAVELETS APLICADAS NO PROCESSAMENTO DOS SINAIS DE ONDAS VIAJANTES EM LINHAS DE TRANSMISSÃO.

Qualquer distúrbio em uma LT, tal como os provocados por descargas atmosféricas, curtos-circuitos, dá origem a ondas de tensão e corrente que se propagam a partir do ponto da ocorrência do distúrbio em direção aos terminais da LT. Na localização de faltas em LTs utilizando ondas viajantes, os tempos de propagação das referidas ondas entre o local da ocorrência e os terminais da linha são detectado pela Transformada *Wavelet* e utilizados para determinar a localização da falta.

2.1 Localização de Faltas em LT Baseada em Ondas Viajantes

Uma falta em uma linha de transmissão gera ondas de tensão que se propagam a partir da localização da falta para os terminais da linha com uma velocidade de propagação dependente da indutância e da capacitância da linha denominadas de ondas viajantes. A Figura 2.1 mostra o circuito equivalente de um segmento com comprimento Δx de uma linha de transmissão com dois condutores. O circuito inclui a resistência R , indutância L e a capacitância C da linha medidas em ‘por unidade’ do comprimento total da linha (GURU; HIZIROGLU, 1997).

Figura 2.1 - Circuito equivalente de um segmento de uma linha de transmissão com dois condutores.



Fonte: (GURU; HIZIROGLU, 1997).

Aplicando a lei de Kirchoff das tensões para o trecho em destaque da Figura 2.1 obtem-se

$$v(x,t) - v(x + \Delta x,t) = R \cdot \Delta x \cdot i(x,t) + L \cdot \Delta x \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} \quad (2.1)$$

Aplicando a lei de Kirchoff das correntes resulta em

$$i(x, t) - i(x + \Delta x, t) = C. \Delta x \frac{\partial v(x + \Delta x, t)}{\partial t} \quad (2.2)$$

Dividindo as Equações (2.1) e (2.2) pelo segmento de comprimento Δx , obtêm-se a taxa de variação da tensão e da corrente em função da variação da localização Δx . Se assumir que a mudança de localização Δx aproxima-se de zero, obtêm-se as derivadas de tensão e corrente com respeito a posição x dadas por

$$\frac{\partial v(x, t)}{\partial x} = -R. i(x, t) - L \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial i(x, t)}{\partial x} = -C \frac{\partial v(x, t)}{\partial t} \quad (2.4)$$

essas equações determinam a tensão e a corrente em função da localização (x) e do tempo (t) para uma linha de transmissão para dois condutores. O sinal negativo indica que as amplitudes das ondas decresce com o incremento de x .

Substituindo o operador Heaviside dado por

$$s = \frac{\partial}{\partial t} \quad (2.5)$$

nas Equações (2.3) e (2.4) para transformar essas equações do domínio do tempo para o domínio de Laplace, tem-se:

$$\frac{\partial v(x, s)}{\partial x} = -(R + s. L). i(x, s) \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial i(x, s)}{\partial x} = -s. C. v(x, s) \quad (2.7)$$

considerando as Equações (2.6) e (2.7), pode-se obter duas equações, uma que envolve apenas a tensão e a outra apenas a corrente, mas não ambos. Deriva-se as Equações (2.6) e (2.7) em relação a x resultando em

$$\frac{\partial^2 v(x, s)}{\partial x^2} = -(R + s. L). \frac{\partial i(x, s)}{\partial x} \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial^2 i(x, s)}{\partial x^2} = -s. C. \frac{\partial v(x, s)}{\partial x} \quad (2.9)$$

substituindo as Equações (2.6) e (2.7) em (2.8) e (2.9) resulta em

$$\frac{\partial^2 v(x, s)}{\partial x^2} = (R + s. L). (s. C). v(x, s) \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial^2 i(x, s)}{\partial x^2} = (R + s. L). (s. C). i(x, s) \quad (2.11)$$

Desprezando as perdas, supondo $R=0 \Omega$, reescrevendo as Equações (2.10) e (2.11):

$$\frac{\partial^2 v(x, s)}{\partial x^2} = s^2 LC v(x, s) \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial^2 i(x, s)}{\partial x^2} = s^2 LC \cdot i(x, s) \quad (2.13)$$

A solução geral da Equação (2.12) pode ser proposta da seguinte forma:

$$V(x, s) = V^+(0, s)e^{-\gamma(s)x} + V^-(0, s)e^{+\gamma(s)x} \quad (2.14)$$

$$I(x, s) = I^+(0, s)e^{-\gamma(s)x} + I^-(0, s)e^{+\gamma(s)x} \quad (2.15)$$

sendo

$$\gamma(s) = \sqrt{s^2 LC} = s\sqrt{LC} \quad (2.16)$$

Chamando a velocidade de propagação de:

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.17)$$

tem-se

$$\gamma(s) = \frac{s}{v} \quad (2.18)$$

Para obter a solução no tempo dessas equações, aplicamos a transformada inversa de Laplace nas Equações (2.14) e (2.15) resultando em

$$v(x, t) = v^+ \left(0, t - \frac{x}{v}\right) + v^- \left(0, t + \frac{x}{v}\right) \quad (2.19)$$

$$i(x, t) = i^+ \left(0, t - \frac{x}{v}\right) + i^- \left(0, t + \frac{x}{v}\right) \quad (2.20)$$

em que v^+ e i^+ são ondas que se propagam no sentido de x (x crescente, onda progressiva), sendo v^- e i^- ondas que se propagam no sentido negativo de x (x decrescente, onda regressiva).

Quando uma onda viajante atinge uma descontinuidade, ou seja, um ponto de transição no qual há uma súbita mudança nos parâmetros do circuito, tais como num terminal aberto ou em curto-circuito, junção de linhas de transmissão com características diferentes, etc, uma parte da onda é refletida de volta, e uma parte da onda é transmitida para a outra sessão do circuito. A onda que chega na descontinuidade é chamada de onda incidente e as duas ondas oriundas da descontinuidade são chamadas de ondas refletidas e refratadas (transmitida), respectivamente. Tais ondas de corrente e tensão formadas no ponto de transição seguem as leis de Kirchhoff. Elas satisfazem às equações diferenciais das linhas de transmissão, e são condizentes com os princípios de conservação de energia (BEWLEY, 1963).

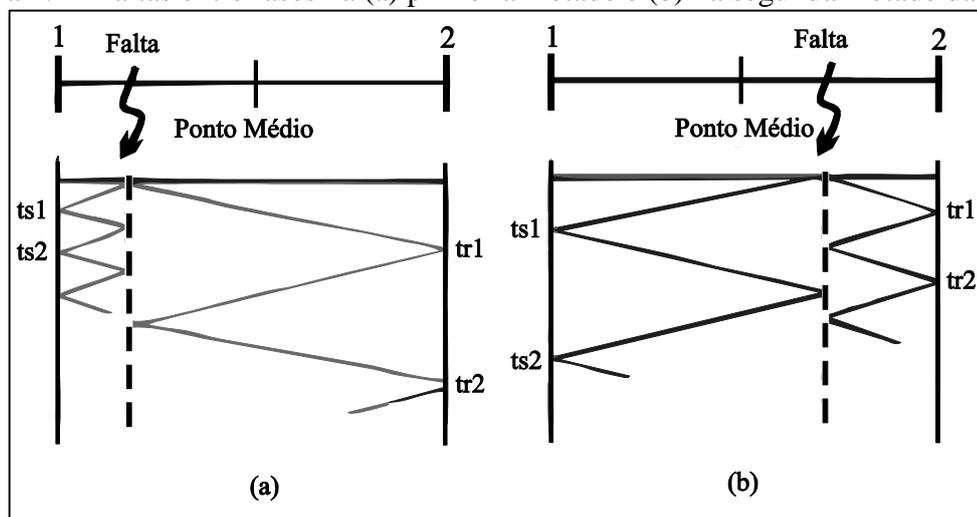
Determinando-se o intervalo de tempo dos sinais entre o ponto de falta e o terminal de referência ou terminais de referências, pode-se determinar a localização da falta.

Considerando o número e a posição de observação e aquisição dos dados durante a ocorrência de faltas, pode-se classificar os procedimentos de detecção de faltas em dois tipos: Localização usando um terminal e localização utilizando dois terminais.

2.2 Localização de Faltas Utilizando Dados Provenientes de Um Terminal

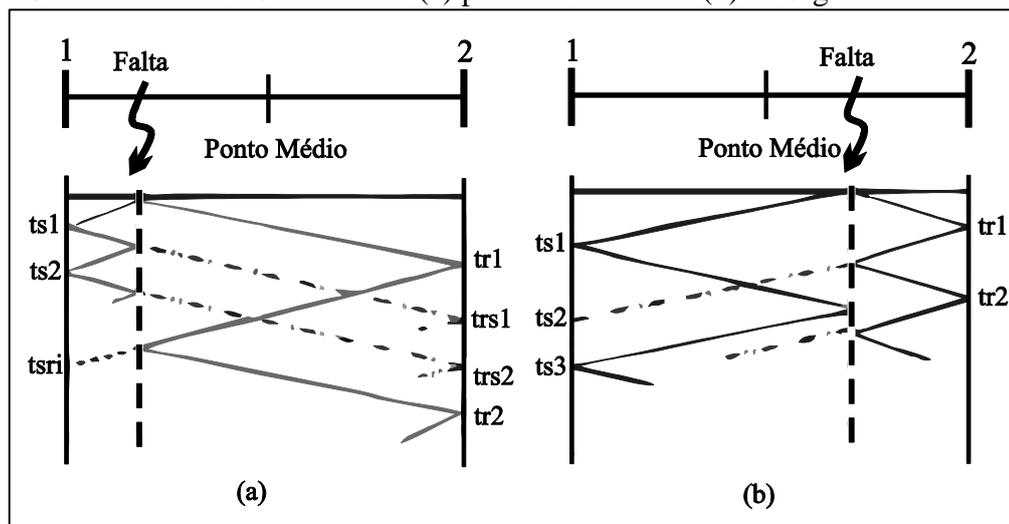
Essa técnica utiliza os sinais registrados apenas no terminal local da linha em análise. As Figuras 2.2 e 2.3 mostram os diagramas de Lattice das ondas para faltas entre fases e faltas entre fase e terra de uma linha de transmissão de dois terminais, respectivamente (NGU; RAMAR, 2011).

Figura 2.2 - Faltas entre fases na (a) primeira metade e (b) na segunda metade da linha.



Fonte: (Elaborada pelo autor.)

Figura 2.3 - Faltas entre fase e terra na (a) primeira metade e (b) na segunda metade da linha.



Fonte: (Elaborada pelo autor.)

Observa-se a partir das Figuras 2.2 e 2.3 que para o caso de falha não aterrada, a onda refletida a partir do terminal remoto não é observada no terminal de medição. Assim, para

faltas não aterradas a distância d entre o ponto de falta e terminal local pode ser determinada por:

$$d = \frac{v(t_{s2} - t_{s1})}{2} \quad (2.21)$$

sendo v é velocidade de propagação da onda (km/s), t_{s1} é o tempo de propagação da primeira frente de onda originada no ponto de falta até o terminal local (s); t_{s2} é o tempo de propagação considerando-se o tempo de retorno dessa primeira onda até o ponto de falta e desse ponto novamente ao terminal de origem (s) (NAIDU, 1985).

Para a falta fase e terra, a onda refletida a partir do terminal remoto pode ser observada no terminal local. Portanto, a Equação (2.21) é usado para as faltas na primeira metade da linha. Considerando que, para falta à terra na segunda metade da linha, a distância do ponto de falta ao terminal local pode ser determinada por:

$$d = l_t - \frac{v(t_{s2} - t_{s1})}{2} \quad (2.22)$$

em que v é velocidade de propagação da onda (km/s), t_{s1} é o tempo de propagação da primeira frente de onda originada no ponto de falta até o terminal local (s), t_{s2} é o tempo de propagação da primeira onda refletida no terminal remoto e refratada no ponto de falta (s) e l_t é o comprimento total da linha de transmissão (km).

2.2.1 *Localização de Faltas Utilizando Dados Provenientes de Dois Terminais*

A determinação da distância da falta utilizando sinais provenientes de dois terminais é baseada na detecção do primeiro instante de reflexão da onda em ambos os barramentos.

Considerando que t_{s1} é o tempo de propagação da primeira frente de onda originada no ponto de falta até o terminal local e t_{r1} é o tempo de propagação da primeira frente de onda originada no ponto de falta até o terminal remoto, pode-se calcular o atraso entre os tempos de detecção da falta nos dois terminais dado por:

$$t_d = t_{r1} - t_{s1} \quad (2.23)$$

Uma vez determinado t_d , a distância entre o ponto da falta e o terminal local é calculado pela seguinte equação:

$$d = \frac{l_t - v_{m1} \times t_d}{2} \quad (2.24)$$

sendo l_t o comprimento da LT (km), v_{m1} a velocidade de propagação da onda (km/s) e d a distância da falta em relação ao terminal local (km).

Observa-se que essa técnica é de fácil aplicação e não envolve muitos cálculos. Mas possui como desvantagens a necessidade de sincronização e transmissão dos dados entre os terminais da linha.

2.2.2 Ondas Viajantes e a Transformada Wavelet

Considerando a excelente capacidade da Transformada *Wavelet* (TW) em discriminar e identificar com precisão os instantes de descontinuidade sobre formas de ondas, a ferramenta mostra-se propícia a aplicação na localização de faltas sobre sistemas elétricos (SILVA, 2003). Tal localização é possível em virtude da TW mostrar os instantes de reflexão das ondas nos terminais através da análise em detalhes necessários para se estimar a distância do ponto de falta.

2.3 A Transformada Wavelet

“A partir da análise *wavelet* é possível ter a visualização tanto da floresta quanto de uma árvore” (Graps, 1995). Esta frase conduz a uma idéia inicial do poder da análise *wavelet*. Em outras palavras, é possível ter uma visão tanto global quanto localizada do que se deseja analisar. A Transformada *Wavelet* foi desenvolvida como alternativa à Transformada de Fourier de Tempo Curto (STFT) visando solucionar o problema de resolução, relacionada com o comportamento tempo-frequência de sinais. As *Wavelets* são o resultado de décadas de pesquisa na busca de funções mais apropriadas do que os senos e co-senos, para a análise de sinais (PARENTONI, 2006).

De fato, em sua breve história dentro do campo de processamento de sinais, a teoria da transformada *wavelet* tem se mostrado uma importante adição à coleção de ferramentas de tratamento de sinais (PARENTONI, 2006). Existe um grande leque de aplicações para esta técnica, dentre as quais destacam-se: telecomunicações, processamento de imagens, radar, visão computacional, dentre outras.

A evolução histórica que levou ao desenvolvimento da análise *wavelet* começou no século dezenove com as teorias de análise em frequência devidas a Joseph Fourier. Visando melhorar os resultados obtidos por Fourier, Denis Gabor, em 1946, desenvolveu a transformada de Fourier de tempo curto (OPPENHEIM, 1989), que procurava adaptar a resposta da transformada de Fourier perante sinais não estacionários. Essa teoria é reconhecida devido à sua versatilidade e seu rico conteúdo matemático.

A primeira menção da palavra *wavelet* foi encontrada no apêndice da tese de Alfred Haar, no ano de 1909 (GRAPS, 1995; MISITI, 2002). No entanto, o conceito de *wavelet* na abordagem teórica utilizada neste trabalho, foi proposto pela primeira vez em 1980 por Jean Morlet (MORLET, 1981,1983; GOUPILLAUD et al. 1984) e depois em 1981 por Alex Grossman ambos com suas pesquisas no campo da física quântica.

O desenvolvimento dos métodos da análise *wavelet*, utilizados neste trabalho, se deve principalmente a Yves Meyer e sua equipe de pesquisadores. Destes métodos, o principal algoritmo é datado em 1988, realizado por Stephane Mallat. Alguns anos depois, Ingrid Daubechies utilizou o trabalho de Stephane Mallat para desenvolver um conjunto de *wavelets* que são as *wavelets* mais utilizadas hoje em dia (Silva, 2003).

2.3.1 A Transformada de Fourier

A análise de Fourier é provavelmente a mais conhecida e utilizada dentre as técnicas de tratamento de sinais existentes. Ela pode ser interpretada como uma técnica matemática para a transformação de um sinal no domínio do tempo para o domínio da frequência (PARENTONI, 2006).

Matematicamente, a Transformada de Fourier (FT) de um sinal contínuo no tempo $f(t)$ é dada pela Equação (2.25).

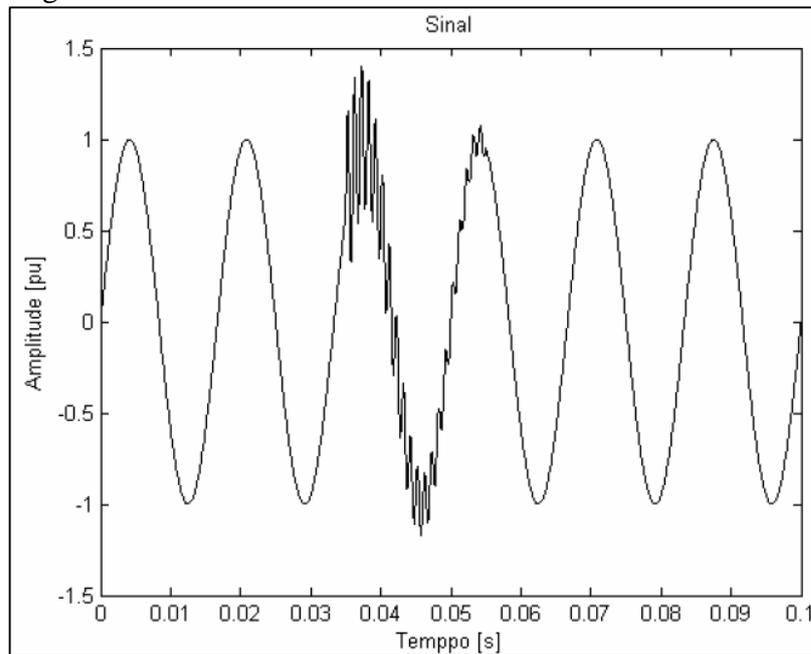
$$F(\omega) = \mathcal{F}[f(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \quad (2.25)$$

se a integral imprópria existir.

A função $F(\omega)$ representa a função $f(t)$ no domínio da frequência. Com relação ao resultado da operação matemática, pode-se observar que quando da transformação para o domínio da frequência, informações de tempo são perdidas. Consequentemente, olhando para os resultados da transformada de Fourier, é impossível dizer quando um evento particular ocorreu.

Por exemplo, considerando um sinal senoidal composto por duas frequências sendo uma componente fundamental de 60 [Hz] e um transitório amortecido na frequência de 1 kHz, conforme a conforme a Figura 2.4 (PARENTONI, 2006).

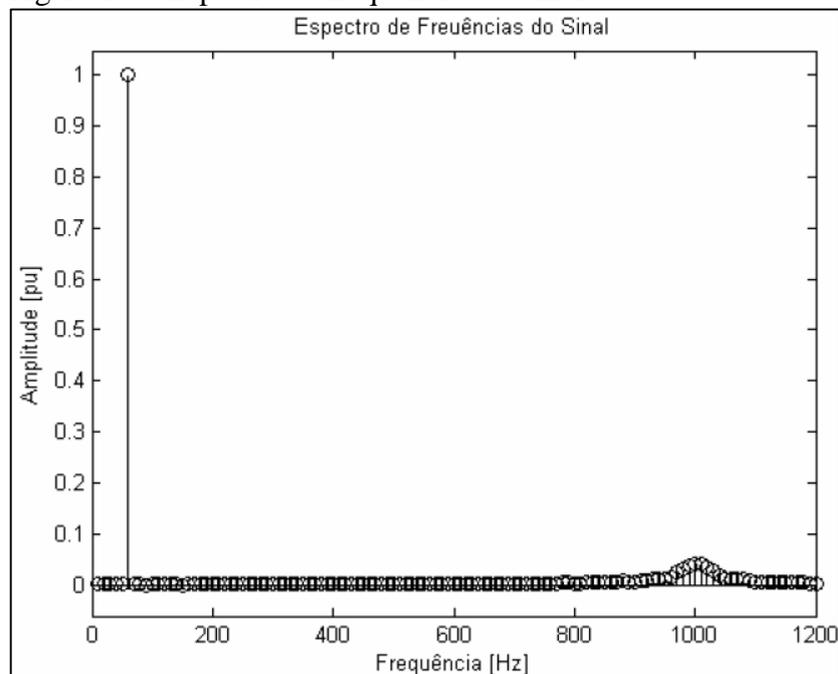
Figura 2.4 - Sinal de 60 Hz com transitório.



Fonte: (PARENTONI, 2006)

Aplicando-se, então, a transformada de Fourier para este sinal, tem-se como resultado o conteúdo espectral mostrado na Figura 2.5.

Figura 2.5 - Espectro de frequências do sinal.



Fonte: (PARENTONI, 2006)

Observa-se que existe um componente de amplitude 1 pu na frequência fundamental (60 Hz), bem como alterações no espectro por volta da frequência de 1 kHz. Analisando apenas o espectro de frequência pode-se erroneamente concluir que o sinal é

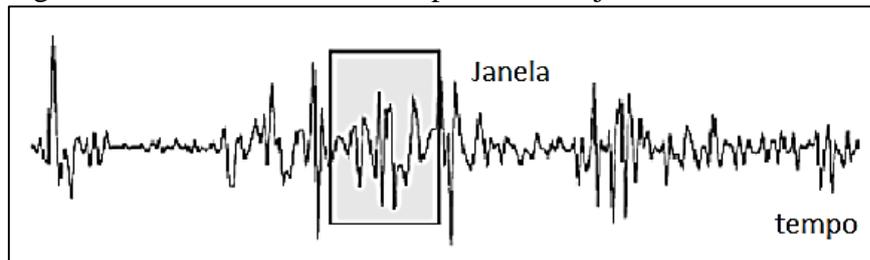
composto por um componente senoidal de 60 Hz em conjunto com outros componentes senoidais, por volta de 1 kHz, durante todo o intervalo de tempo.

2.3.2 A Transformada de Fourier de Tempo Curto

Como mencionado previamente, uma das grandes desvantagens da análise de Fourier provém do fato de a mesma apresentar apenas resolução na frequência e não no tempo. Isto significa que, embora capaz de determinar o conteúdo de frequência presentes em um sinal, não há noção de quando elas ocorrem.

Para superar esse problema, várias alternativas foram propostas. Dentre elas, a mais conhecida e utilizada é a Transformada de Fourier de Tempo Curto (Short-Time Fourier Transform - STFT). Sua idéia fundamental é introduzir um parâmetro de frequência local (local no tempo) como se a “transformada de Fourier Local” observasse o sinal através de uma curta “janela” dentro da qual o sinal permanece aproximadamente estacionário (OLIVEIRA, 2007) Figura 2.6.

Figura 2.6 - Análise local no tempo: o uso de janelas.



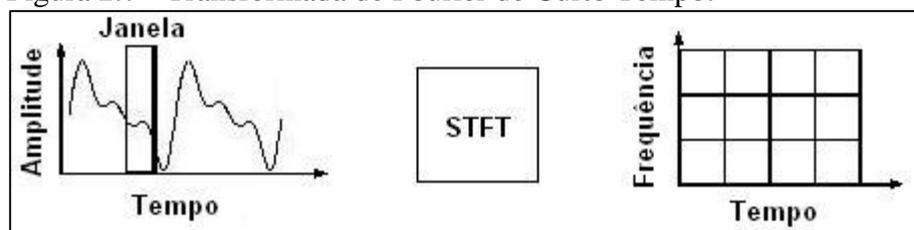
Fonte: (OLIVEIRA, 2007)

A transformada local observa $f(t)$ “através” de uma janela $W(t)$ centrada no instante de tempo t e de extensão “limitada”, antes do cálculo do espectro. Formalmente,

$$STFT(w, \tau) := \int_{-\infty}^{\infty} f(t) W^*(t - \tau) e^{-j\omega t} dt. \quad (2.26)$$

Observa-se então, que a STFT decompõe o sinal em uma função bidimensional de tempo e frequência. Esta característica é ilustrada pela Figura 2.7.

Figura 2.7 - Transformada de Fourier de Curto Tempo.



Fonte: (PARENTONI, 2006)

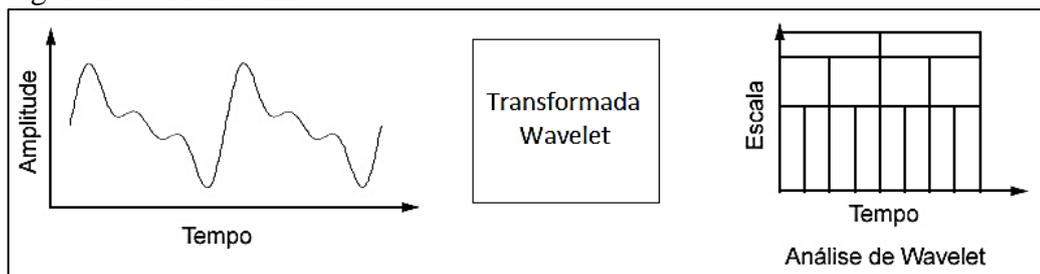
Com a STFT é possível obter uma relação de compromisso entre tempo e frequência, compondo simultaneamente informações sobre quais frequências ocorreram em cada intervalo de tempo. Todavia existe uma limitação de precisão que é determinada pelo tamanho da janela. De maneira prática, quanto menor a janela, mais precisas serão as informações de tempo, porém mais imprecisas serão as informações de frequência. Analogamente, quanto maior a janela, mais precisas são as informações de frequência, e menos as informações de tempo. Esse comportamento é compreendido pelo Princípio da Incerteza de Heisenberg (Wickerhauser, 1994).

Outra desvantagem desta técnica é que a partir do momento que se define o tamanho da janela, ela terá de ser a mesma para todas as frequências. Muitos sinais requerem uma técnica mais flexível, onde seja possível variar o tamanho da janela para determinar com melhor precisão na base tempo ou na base frequência.

2.3.3 A Transformada Wavelet Contínua

A análise de *Wavelet* representa o próximo passo lógico: uma técnica de janela deslizante com regiões de tamanhos variáveis. A análise de *Wavelet* permite o uso de longos intervalos de tempo, quando queremos maior precisão na informação de baixa-frequência, e pequenas regiões quando queremos informação de alta-frequência, Figura 2.8.

Figura 2.8 - Transformada *Wavelet*



Fonte: (Mendes, 2008)

A análise *wavelet* emprega uma função chamada *wavelet*-mãe que tem média zero e parte central oscilante, ou seja, decai para zero em ambos os lados de sua trajetória. Matematicamente, a Transformada *Wavelet* Contínua (TWC) de um dado sinal $x(t)$ em relação à *wavelet*-mãe $\psi(t)$ é definida pela Equação (2.27).

$$TWC(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (2.27)$$

em que a é a dilatação ou fator de escala, b é o fator de translação, e essas variáveis são contínuas (KIM e AGGARWAL, 2001).

A Equação (2.27) mostra que o sinal unidimensional original no domínio do tempo $x(t)$ é mapeado para uma nova função, em um espaço bidimensional, por meio de fatores de escala a e translação b pela TW.

2.3.4 Transformada Wavelet Discreta

Para o tratamento de um sinal discreto $s[k]$ é necessário realizar a “discretização” da transformada, a qual é conhecida por Transformada *Wavelet* Discreta (Discrete Wavelet Transform - DWT). O desenvolvimento dessa transformada é possível através da Equação (2.28).

$$DWT[m, n] = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_{k=-\infty}^{\infty} s[k] \psi \left[\frac{k - a_0^m n b_0}{a_0^m} \right] \quad (2.28)$$

onde $\psi[]$ é a *Wavelet* mãe e os parâmetros de escala e de translação a e b são funções de um parâmetro inteiro m , isto é, $a = a_0^m$ e $b = n b_0 a_0^m$, que permite uma expansão da família originada pela *Wavelet* mãe, gerando as *Wavelets* filhas.

2.3.5 Análise Multirresolução

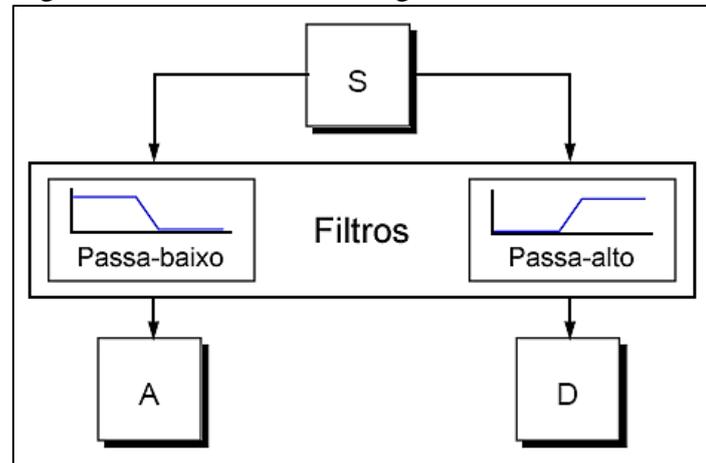
O processo de filtragem aqui descrito, apresenta uma forma de realização da técnica de Análise Multirresolução (AMR) (SILVA, 2003) de uma forma bastante prática. Este processo baseia-se na filtragem de um sinal a ser analisado através de bancos de filtros passa alta e passa baixa, fornecendo versões do sinal original relativas aos coeficientes de funções *Wavelets* e funções escala respectivamente.

Na análise *Wavelet*, utiliza-se técnicas denominadas de aproximações e detalhes. As aproximações são os componentes de baixa-frequência e escala-alta do sinal. Os detalhes são os componentes de alta-frequência e escala-baixa do sinal. O processo de filtragem, ao nível mais básico, é mostrado na Figura 2.9.

O algoritmo de decomposição de um sinal em análise multirresolução é ilustrado na Figura 2.10, o qual apresenta três níveis de decomposição. Os detalhes e aproximações do sinal

original S são obtidos por meio de bancos de filtros, os quais são formados por filtros passa-baixa (h_0) e passa-alta (h_1). Um filtro passa-baixa remove os componentes de altas frequências, enquanto o filtro passa alta separa o conteúdo de alta frequência no sinal sendo analisado (KIM; AGGARWAL, 2001).

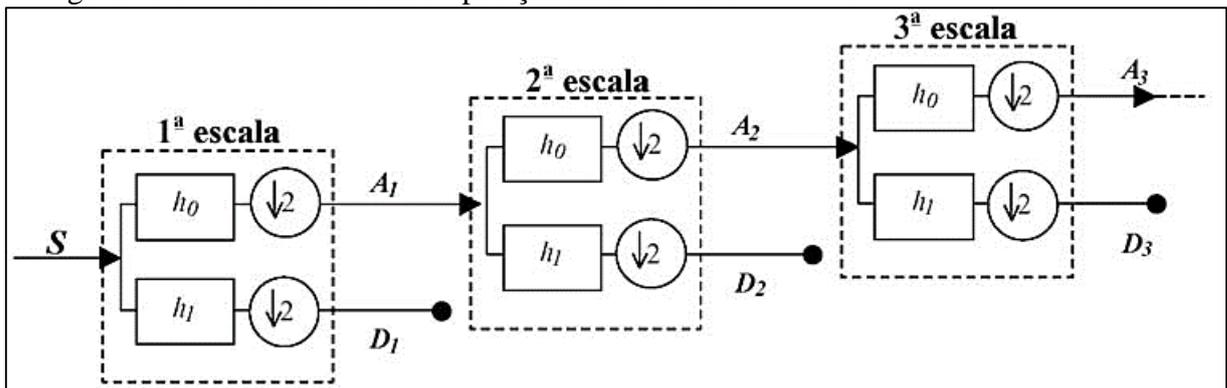
Figura 2.9 - Processo de filtragem ao nível mais básico.



Fonte: (MENDES, 2008)

Resumindo, a idéia básica da decomposição em múltiplos níveis, também conhecida como Análise Multiresolução (AMR) é dividir o espectro de um sinal em sub-bandas e então tratar individualmente cada uma das sub-bandas, considerando o propósito desejado.

Figura 2.10 - Processo de decomposição de um sinal em AMR.



Fonte: (VALINS,2005)

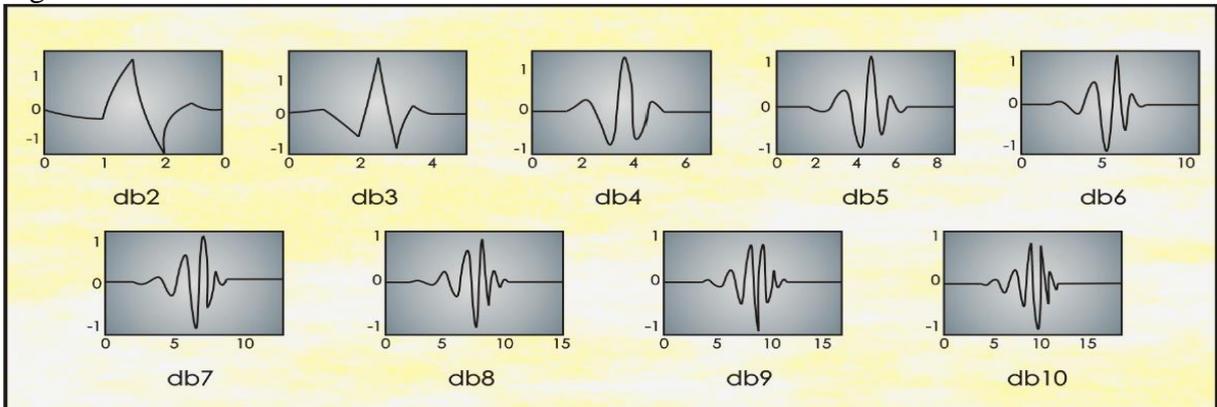
O número máximo de níveis de decomposição *wavelet* é determinado pelo comprimento do sinal, pela *wavelet* mãe selecionada e, pelo nível de detalhe exigido. Na prática, seleciona-se um número satisfatório de níveis baseado na natureza do sinal (KIM; AGGARWAL, 2001).

2.3.6 Famílias Wavelets

As famílias *wavelets* frequentemente usadas para processamento de sinais são as *wavelets* Daubechies (db), Coiflets (coif), Symlets (sym), Biorthogonal (bior) e Reverse Biorthogonal (rbio). Estas *wavelets* exibem diferentes atributos e critérios de desempenho quando utilizadas em aplicações específicas, tais como: detecção de transitórios, compressão de sinais e filtragem de ruído. Apesar de não existir um critério definido para a escolha das *wavelets*, a melhor escolha é uma *wavelet* que melhor caracteriza o fenômeno ou o problema a ser estudado (KIM; AGGARWAL, 2001).

A família de bases *wavelet* de Daubechies, leva o sobrenome de Ingrid Daubecheis, uma das mais importantes pesquisadoras no campo das *wavelets*. Ela descobriu as *wavelets* ortonormais com suporte compacto, o que tornou possível a análise discreta das *wavelets* (CÂNDIDO, 2008). O nome da família *wavelet* Daubechies é geralmente escrito por três caracteres como dbN, onde db é uma indicação de seu sobrenome (Daubecheis) e N é o número de sua ordem (Figura 2.11).

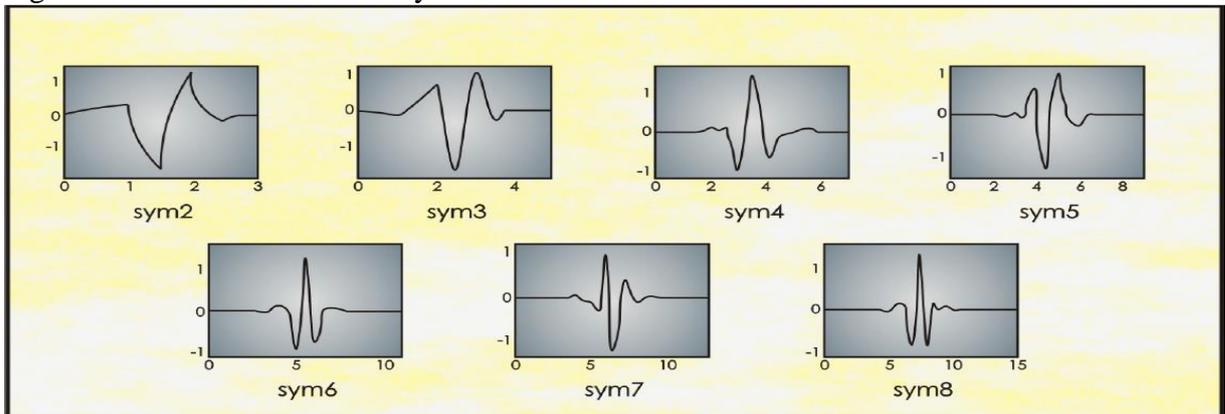
Figura 2.11 - Família *Wavelet* Daubechies.



Fonte: (CÂNDIDO, 2008)

As Symlets são *Wavelets* quase simétricas, propostas por Daubechies como uma modificação à família db. As propriedades das duas famílias de *Wavelets* são similares. A família *wavelet* Symlets é denominada por *SymN*, onde *Sym* é o nome e N é a ordem (Figura 2.12).

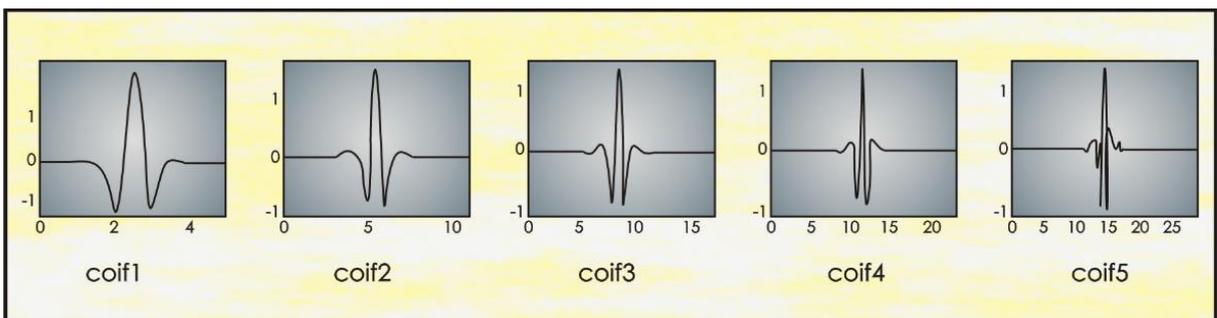
Figura 2.12 - Família *Wavelet Symlets*



Fonte: (CÂNDIDO, 2008)

A família *wavelet Coiflets* é denominada pelo nome *CoifN*, onde *Coif* descreve seu nome e *N* é o número de sua ordem. Alguns exemplos são apresentados na Figura 2.13.

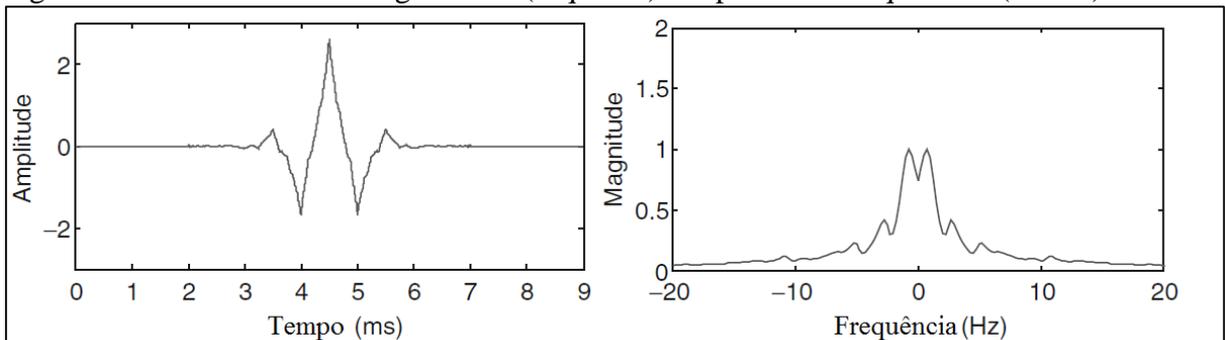
Figura 2.13 - Família *Wavelet Coiflets*.



Fonte: (CÂNDIDO, 2008)

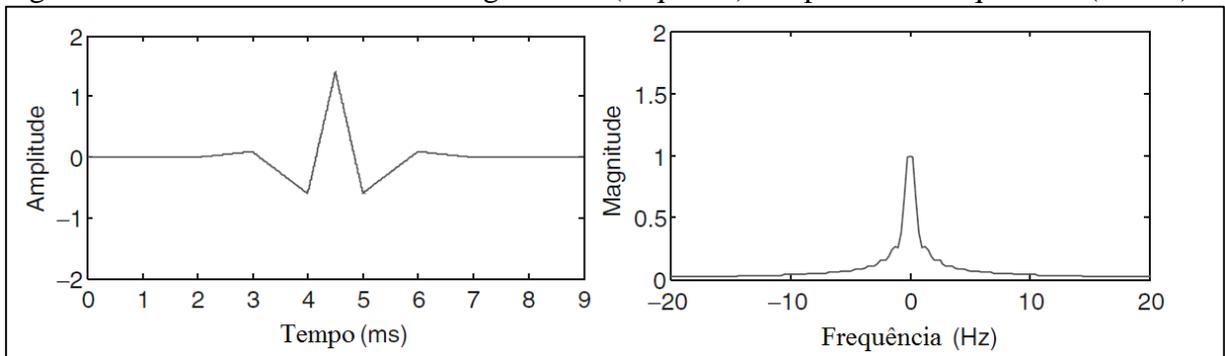
As famílias *wavelets* biorthogonal e reverse biorthogonal são biortogonais e simétricas (DAUBECHIES, 1992). A propriedade de simetria garante características de fase lineares. Estes tipos de *wavelets* podem ser construídas segundo o método de spline (COHEN *et al.* 1992). Nas Figuras 2.14 e 2.15 têm-se as formas de ondas e espectros de frequências para as *wavelets* biorthogonal 2.4 e reverse biorthogonal 2.4, respectivamente (GAO e YAN, 2011).

Figura 2.14 - *Wavelets* biorthogonal 2.4 (esquerda) e espectro de frequências (direita).



Fonte: (GAO e YAN, 2011)

Figura 2.15 - Wavelet reverse biorthogonal 2.4 (esquerda) e espectro de frequências (direita).



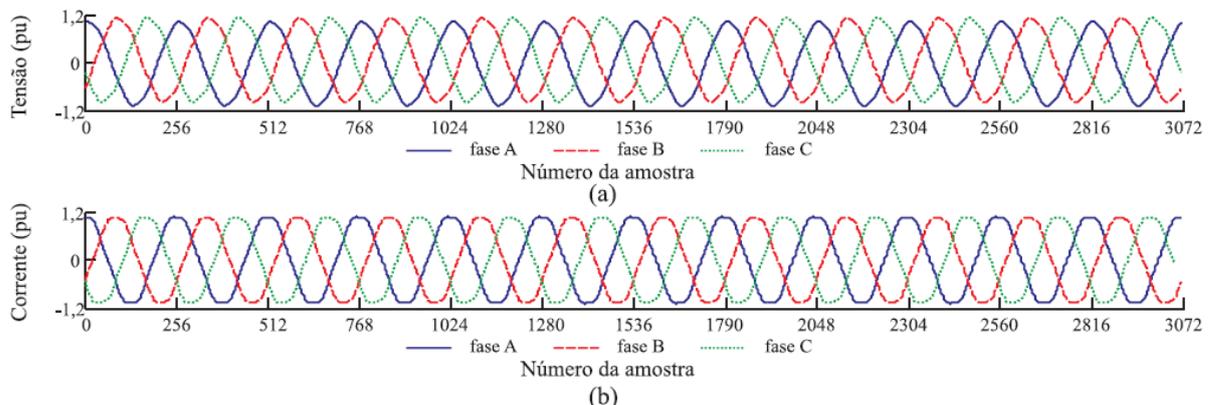
Fonte: (GAO e YAN, 2011)

2.4 Ruídos em Faltas em Linha de Transmissão

De modo geral, as tensões e correntes provenientes de registros oscilográficos reais, sem distúrbios transitórios, não são puramente senoidais, mas compostas por uma componente fundamental, somada a componentes harmônicas e ruídos com distribuição de probabilidade normal. Na Figura 2.16 são apresentadas as tensões e correntes de fase, em pu, de um registro real sem distúrbios transitórios, no qual se identificou a presença significativa das harmônicas de ordens 3, 4, 5, 6 e 7.

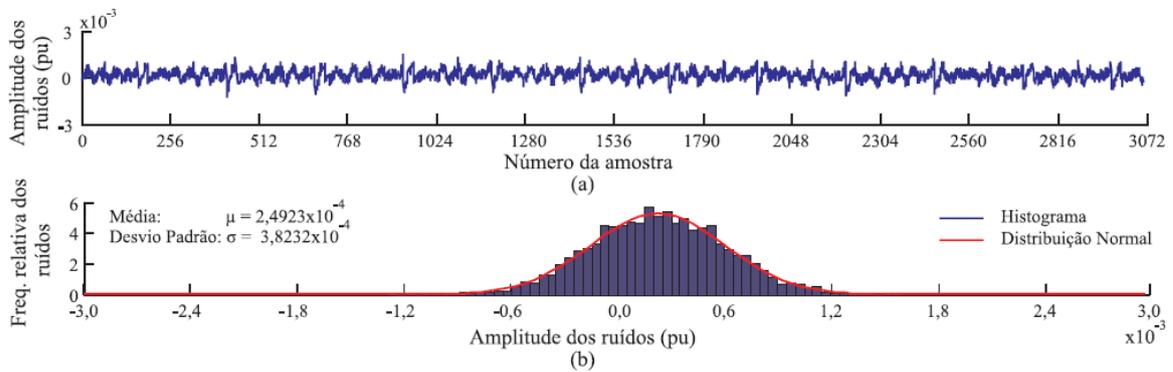
Na Figura 2.17 são apresentados os ruídos da corrente i_A , após a eliminação da componente fundamental e das componentes harmônicas de ordem 2, 3, 4, 5, 6 e 7, assim como o histograma da frequência relativa dos ruídos de i_A , destacando-se o valor médio (μ) e o desvio padrão (σ) dos ruídos. Observou-se que a curva da função densidade de probabilidade para uma variável aleatória com distribuição de probabilidade normal, com parâmetros μ e σ , apresenta forma similar ao histograma (COSTA, 2010).

Figura 2.16 - Registro oscilográfico real sem distúrbios: (a) tensões; (b) correntes.



Fonte: (COSTA, 2010)

Figura 2.17 - Registro oscilográfico sem distúrbios: (a) i_A sem a componente de frequência fundamental e harmônicas de ordem 2, 3, 4, 5 e 7; (b) histograma da frequência relativa dos ruídos de i_A .



Fonte: (COSTA, 2010)

Como pode ser observado acima, o ruído está presente em sistemas de medição reais mesmo sem a existência de distúrbios. Por exemplo, Araújo (2011) afirma que os sinais medidos nos extremos de LTs reais possuem SNR (Signal to Noise Ratio) maiores que 60 dB.

Já na ocorrência de uma falta observa-se a presença de transitórios de altas frequências, ondas viajantes, bem como ruídos como pode ser observado na Figura 2.18. Na Figura 2.18 são ilustradas as tensões e correntes de fase, em pu, de um registro oscilográfico real com uma falta do tipo AB.

De um modo geral, em uma situação de falta identificam-se três períodos distintos:

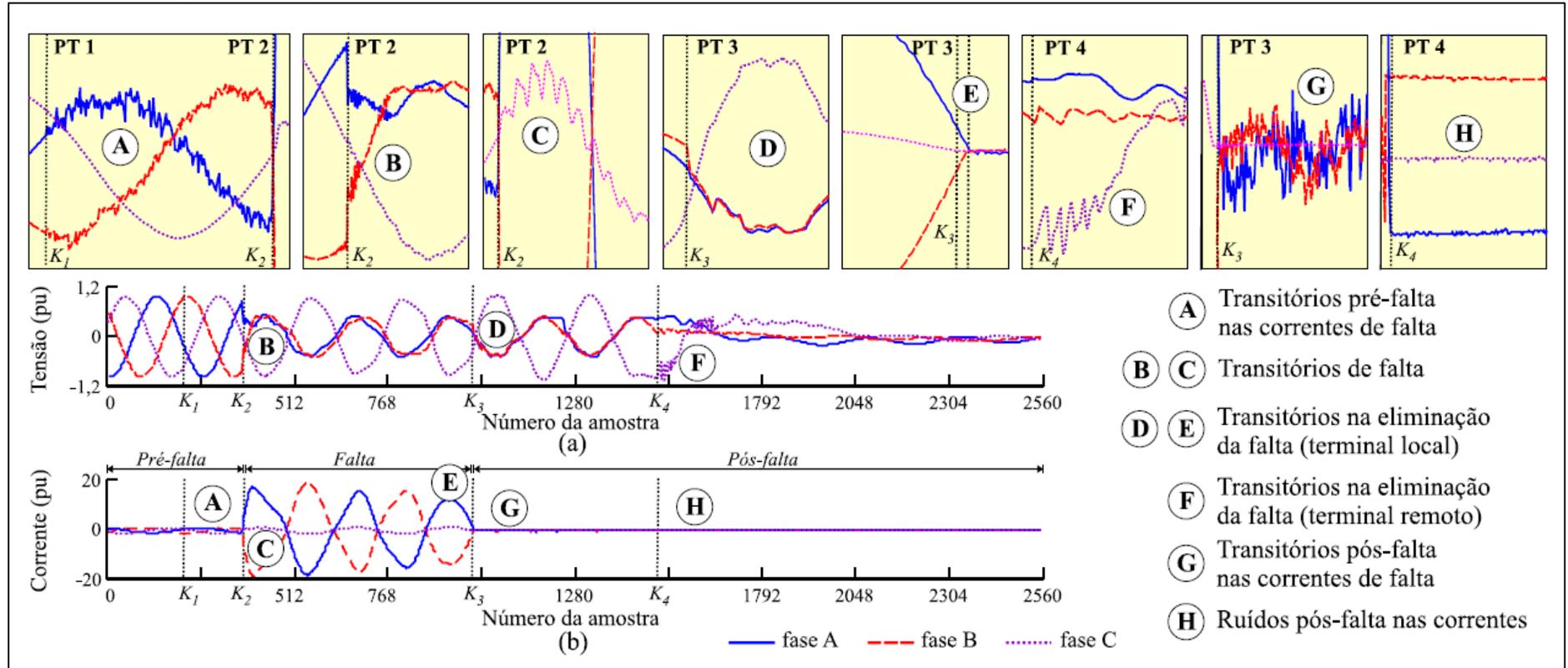
1. Período de pré-falta: compreende as amostras dos sinais referentes à situação de regime permanente do sistema elétrico, antes da ocorrência da falta.

2. Período de falta: corresponde ao período no qual o sistema encontra-se em uma situação de falta. Dependendo da natureza da falta e das condições elétricas do sistema, é comum o surgimento de um aumento nas correntes e um afundamento nas tensões das fases envolvidas na falta (BOLLEN, 2000).

3. Período de pós-falta: contém as amostras dos sinais após a atuação da proteção.

A transição entre os diversos períodos em uma falta se caracteriza pela incidência de transitórios nas tensões e/ou correntes. Estudo minucioso realizado nos registros oscilográficos reais revelou aspectos dos fenômenos transitórios dos distúrbios, dificilmente encontrados em simulações digitais, o que pode comprometer a aplicação prática de métodos de diagnóstico de faltas avaliados apenas com dados simulados. (COSTA *et al.*, 2010a):

Figura 2.18 - Registro oscilográfico real de uma falta CT: (a) tensões; (b) correntes.



Fonte: (COSTA, 2010)

2.5 Considerações Finais

Este capítulo apresentou uma breve base teórica sobre a propagação de ondas viajantes em linhas de transmissão e a sua utilização na identificação do local da ocorrência de uma falta, bem como a base teórica sobre a transformada *wavelet*, a qual será usada para enfatizar os instantes em que ondas viajantes refletem nos terminais da LT.

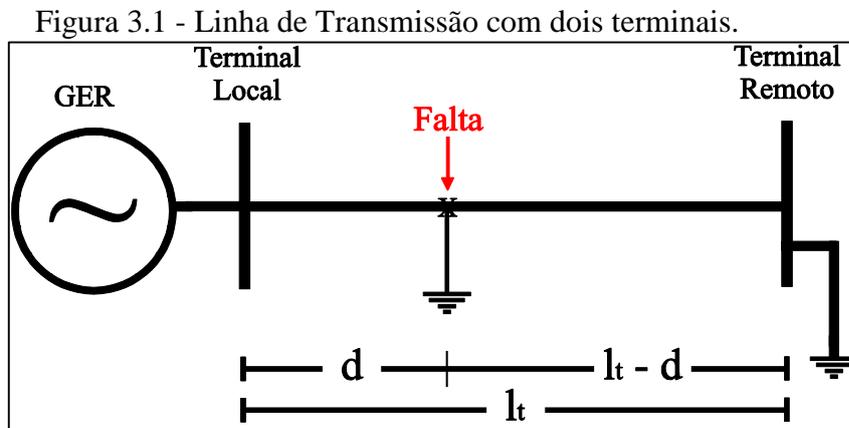
Por fim, o ruído presente em oscilografias reais foram apresentados, mostrando a importância da sua inclusão para aproximar a simulação de situações reais buscando assim avaliar quais são as *wavelets* classicamente utilizadas, e suas ordens, que apresentam melhores resultados na localização de faltas em situações reais.

3 LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO UTILIZANDO TRANSFORMADAS WAVELETS EM ONDAS VIAJANTES

Os métodos tradicionais para localização de faltas em linhas de transmissão que utilizam o conceito de impedância aparente apresentam limitações quanto à precisão (SACHDEV e AGRWAL, 1985; JOHNS E JAMALI, 1990; TZIOUVARAS *et al.*, 2001; SAHA *et al.*, 2001). Desta forma, métodos baseados na teoria de ondas viajantes com processamento de sinais através das transformadas *wavelets* vem sendo estudados pela comunidade científica (JIAN *et al.*, 1998; SILVEIRA *et al.*, 2001; CHANDA *et al.* 2003) e sua aplicabilidade viabilizada através de alguns fabricantes de equipamentos (FISCHER *et al.* 2012). Neste trabalho, a exemplo de outros (COSTA E SOUZA, 2011, LOPES *et al.* 2013b), utiliza-se a teoria das ondas viajantes para análise e localização das faltas em LT e acrescenta-se como contribuição um aprofundamento na análise dos métodos quando ruídos do tipo branco está presente nos sinais. Para as simulações e análises, um modelo da linha de 500KV da Chesf foi simulada utilizando o software ATP (Alternative Transient Program) no qual um número considerável de situações de faltas foi testado e validado.

3.1 O sistema Elétrico Protótipo

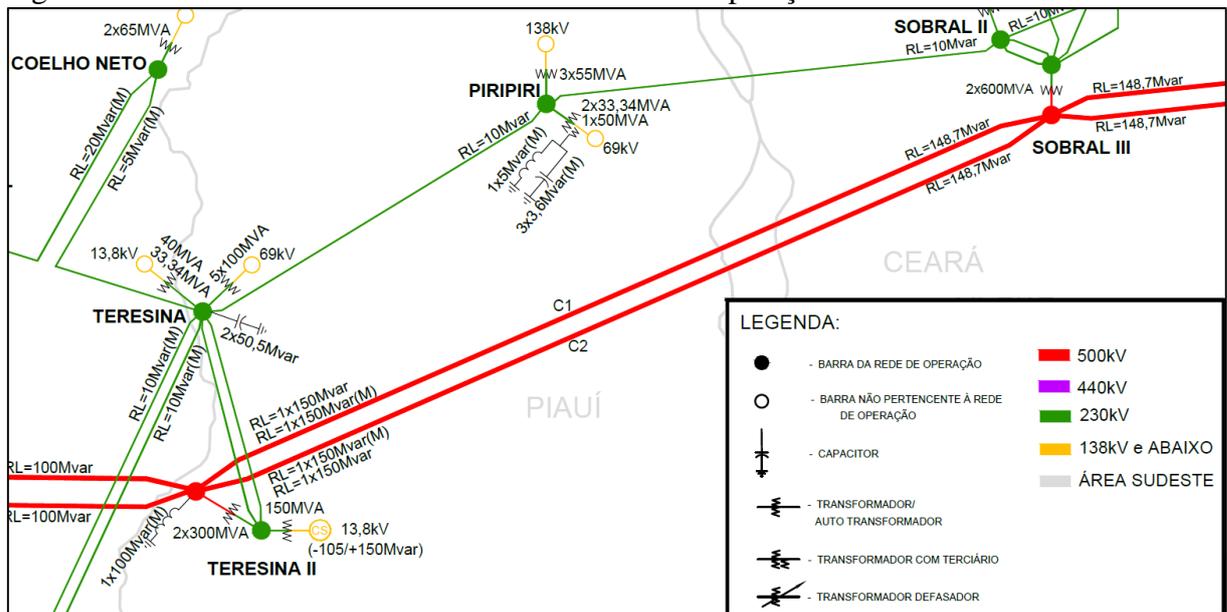
Para validação da abordagem proposta foi modelado um sistema elétrico protótipo formado por dois sistemas equivalentes denominados de Terminal Local e Terminal Remoto, interligados por uma linha de transmissão com tensão nominal de 500 kV e comprimento de 330 km, conforme apresentado na Figura 3.1.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O sistema equivalente Terminal Local foi modelado por uma fonte de tensão de módulo igual a 1 pu com ângulo de fase de 0° e o sistema equivalente Terminal Remoto foi modelado por uma carga com impedância igual a $Z=500 + j 3,7699 \Omega$. No intuito de tornar o processo de avaliação e validação mais confiável, foi considerada uma linha de transmissão real pertencentes ao SIN (Sistema Interligado Nacional) do sistema Eletrobras-Chesf que interliga as subestações de Teresina II a Sobral III (TSD-SBT) circuito 1 (Figura 3.2).

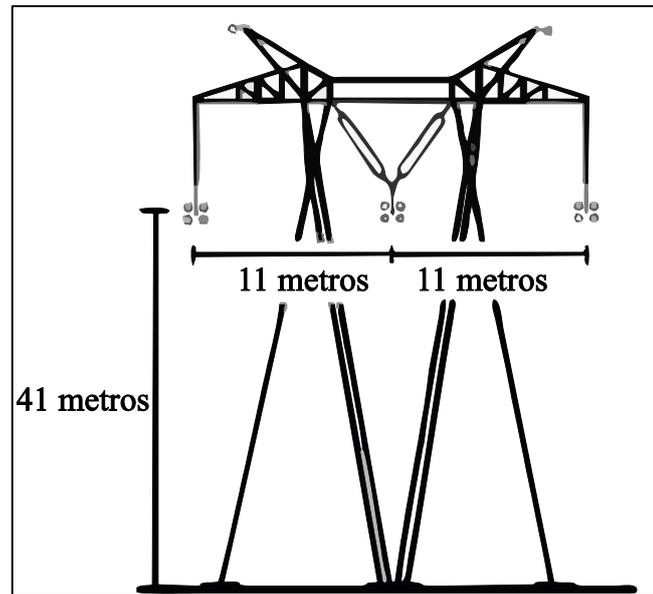
Figura 3.2 - Parte das linhas de transmissão da rede de operação norte e nordeste do Brasil.



Fonte: Operador Nacional do Sistema – ONS (www.ons.com.br).

Esta LT é constituída por torres estaiadas do tipo VX (Figura 3.3) com disposição horizontal de fases espaçadas de 11 m, com 4 sub-condutores 954 MCM RAIL, raio externo de 14,795 mm, raio interno de 3,7 mm e resistência em corrente contínua de 0,05995 Ω/km a 41 m de altura e flecha média a meio de vão de 13,43 m. A LT é protegida por dois cabos para-raios com condutores EHS 3/8” com raio externo 4,57 mm e resistência em corrente contínua de 4,307 Ω/km . A resistência de solo considerada foi de 1000 $\Omega.\text{m}$ (MACHADO *et al*, 2007).

Figura 3.3 - Modelo de linha com torre em V Feixe Expandido Simétrico (VX – Simétrico) de 500 kV.



Fonte: (MACHADO et al., 2007)

3.1.1 Modelagem do Sistema Elétrico no Software ATP/EMTP

O software ATP, baseado no EMTP (Eletromagnetic Transient Program), é comumente referenciado nas mais diversas pesquisas acerca de fenômenos de transitórios eletromagnéticos tais como: TAKAGI, 1981; GIRGIS et al., 1992; YU et al., 2001; EVRENOSOGLU et al., 2005; SILVA, 2005; VALINS, 2005; PARENTONI, 2006; ELHAFFAR, 2008; FENG et al., 2008; COSTA e SOUZA, 2011; LOPES, 2014.

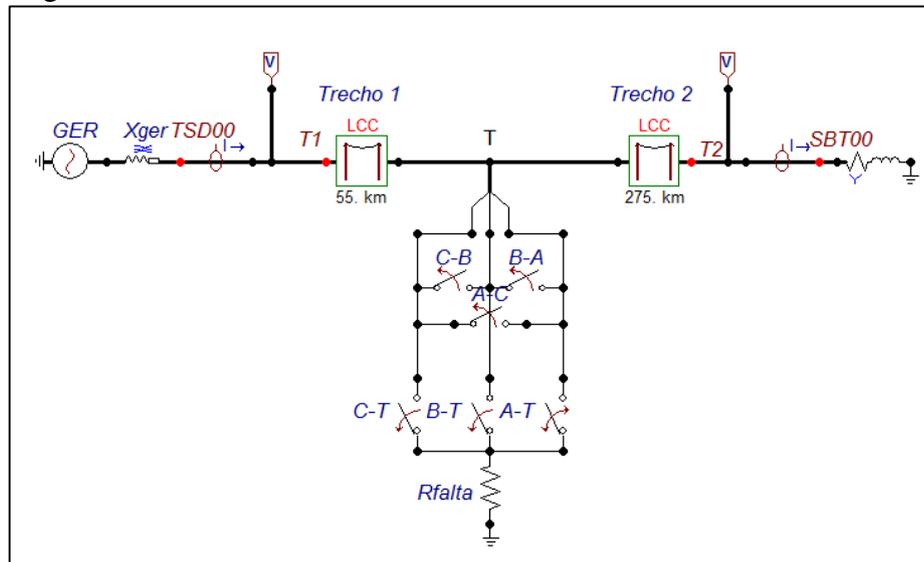
O software ATP é uma ferramenta para simulação digital utilizada por engenheiros e pesquisadores, permitindo a simulação de redes polifásicas com configuração arbitrária sob transitórios em uma ampla faixa de frequências. Sua interface com o usuário – ATPdraw – contém ampla capacidades de modelos para linhas de transmissão, cabos, disjuntores, cargas, conversores, dispositivos de proteção, elementos não-lineares e acoplamento eletromagnético. Em suma, mais de 65 componentes padrões, 25 TACS (dispositivos de controle de SEPs) e tantos outros que podem ser criados pelo usuário, compõem os principais dispositivos eletrônicos e equipamentos de potência, permitindo uma fácil entrada de dados e modelagem da topologia do sistema.

A modelagem do sistema elétrico foi desenvolvida no ambiente do pré-processador gráfico para Windows®, o ATPDraw 5.9, que possui recursos gráficos, permitindo a criação e

edição dos arquivos contendo a topologia do sistema, além de gerenciar a execução do programa principal, o qual calcula tensões nas barras, correntes trifásicas e potências ativa e aparente, e ainda é passível de plotá-las.

O sistema elétrico apresentado na Figura 3.1 foi modelado no software ATPDraw utilizando os parâmetros apresentados na seção 3.1 como pode ser observado na Figura 3.4. Na qual, o Trecho 1 está compreendido entre os pontos T1 e T e corresponde à distância da falta ao terminal local. O Trecho 2 está compreendido entre os pontos T e T2 e corresponde à distância entre o ponto de falta e o terminal remoto.

Figura 3.4 - Sistema de Transmissão modelado no software ATP.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Observa-se na Figura 3.4 que o sistema equivalente Terminal Local (T1) foi modelado utilizando uma fonte de tensão trifásica denominado de *GER* modelado como AC3PH e uma reatância síncrona denominada de *Xger* modelada LINESY_3 com as janelas de parametrização apresentadas nas Figuras 3.5 e 3.6 respectivamente.

Figura 3.5 - Entrada de dados para o modelo AC3PH.

DATA	UNIT	VALUE
Amplitude	Volt	707106.78
f	Hz	60
pha	Deg/Rad	0
A1		0
Tstart	s	-1
Tstop	s	1000

NODE	PHASE	NAME
AC3	ABC	X0003

Fonte: Elaborada pelo Autor.

Figura 3.6 - Entrada de dados para o modelo LINESY_3.

DATA	UNIT	VALUE
Ro	Ohm/m	0
Lo	mH/m	5.654866776
R+	Ohm/m	0
L+	mH/m	5.654866776

NODE	PHASE	NAME
IN1	ABC	X0003
OUT1	ABC	TSD00

Fonte: Elaborada pelo Autor.

Já o sistema equivalente Terminal Remoto (T2) foi modelado como carga trifásica equilibrada utilizando o componente RLCY3 com a janela de parametrização apresentada na Figura 3.7. A LT considerada transposta, a parâmetros distribuídos e pendentes da frequência foi modelada utilizando o componente Line/Cable Constants program (LCC), em que apenas os dados geométricos e materiais da linha/cabo têm que ser especificados, com as janelas de parametrização apresentadas nas Figuras 3.8 e 3.9.

Figura 3.7 - Entrada de dados para o modelo RLCY3.

DATA	UNIT	VALUE
R_1	Ohm	500
L_1	mH	10
C_1	µF	0
R_2	Ohm	500
L_2	mH	10
C_2	µF	0
R_3	Ohm	500
L_3	mH	10

NODE	PHASE	NAME
IN	ABC	SBT00
OUT	1	

Fonte: Elaborada pelo Autor

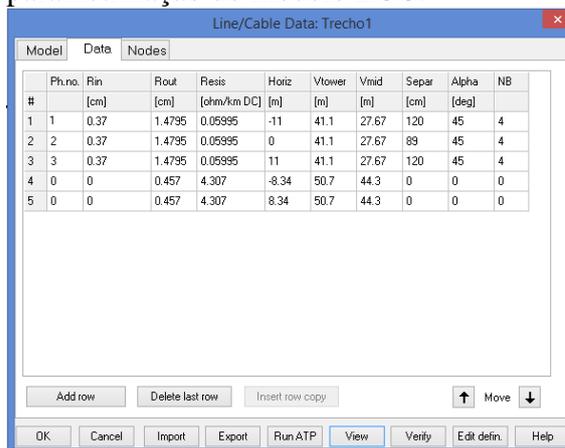
Figura 3.8 - Entrada de dados para o modelo LCC.

Fonte: Elaborada pelo Autor

A chave TSWITCH controla independentemente, para cada fase, a operação do momento de fechamento e abertura do circuito. No modelamento do SEP, é esta chave que submete LT aos diversos tipos de faltas: FFF (trifásica), FFT (bifásica à terra) e FT (fase-terra).

Além disso, pela determinação do momento de fechamento, T-cl, ela controla também o ângulo de incidência de cada uma das contingências aplicadas. A Figura 3.10 mostra sua janela de parametrização.

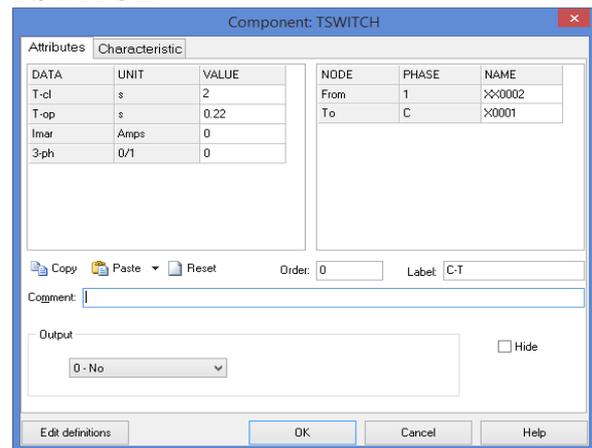
Figura 3.9 - Continuação janela de parametrização do modelo LCC.



#	Ph.no.	Rin [cm]	Rout [cm]	Resis [ohm/km DC]	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]	Separ [cm]	Alpha [deg]	NB
1	1	0.37	1.4795	0.059395	-11	41.1	27.67	120	45	4
2	2	0.37	1.4795	0.059395	0	41.1	27.67	89	45	4
3	3	0.37	1.4795	0.059395	11	41.1	27.67	120	45	4
4	0	0	0.457	4.307	-8.34	50.7	44.3	0	0	0
5	0	0	0.457	4.307	8.34	50.7	44.3	0	0	0

Fonte: Elaborada pelo Autor

Figura 3.10 - Entrada de dados para o modelo TSWITCH.



DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
T-cl	s	2	From	1	>>0002
T-op	s	0.22	To	C	>>0001
Imar	Amps	0			
3-ph	0/1	0			

Fonte: Elaborada pelo Autor

Os Transformadores de corrente (TCs) e os de potencial (TPs) não foram modelados e os probes trifásicos de tensão do simulador foram usados para aquisição dos sinais a serem processados no MATLAB. Sua simbologia é apresentada na Figura 3.11.

Figura 3.11 - Símbolo do probe de tensão.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

3.1.2 Variações nas Simulações das Condições de Falhas Aplicadas ao Sistema de Transmissão Analisado

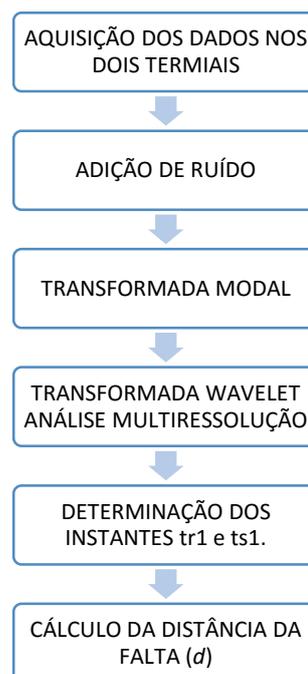
Os sinais faltosos foram obtidos utilizando-se o *software* ATP - *Alternative Transients Program*, levando-se em conta faltas dos tipos FT (fase A – terra), FFT (fases AB – terra) e FFF (fases ABC) nas distâncias, com relação ao terminal local, de 55km, 110km, 220km e 275km com os ângulos de incidências de 0°, 45° e 90° com resistências de faltas de 1Ω, 10Ω, 25Ω, 50Ω, 150Ω, e 200 Ω amostrados na frequência de 400kHz.

3.2 Algoritmo para Localização de Faltas

O algoritmo desenvolvido nesse trabalho é fundamentado na determinação do tempo de viagem das ondas de tensão do ponto de falta aos terminais da linha. Para a determinação dos instantes de viagem das ondas utiliza-se a Transformada *Wavelet* com a análise multiresolução *wavelet* (AMR) em um nível de decomposição. Uma vez determinado os intervalos de reflexão das ondas, a distância da falta pode ser estimada em função destes intervalos e da velocidade de propagação da onda na linha em questão. Já o ruído branco é adicionado aos sinais de tensão com intuito de aproximar o sinal proveniente de simulações computacionais dos sinais encontrados em oscilografias reais, na qual, conforme apresentado no capítulo 2, os ruídos estão presentes mesmos sem a ocorrência de faltas em LT e podem interferir na eficácia do localizador que utiliza a Transformada *Wavelet*.

A Figura 3.12 ilustra o fluxograma do algoritmo implementado para a localização de faltas em linhas de transmissão, o qual envolve diferentes estágios. O primeiro estágio do fluxograma corresponde ao processo de obtenção dos dados digitalizados de tensão e corrente registrados em dois terminais através de registradores digitais de alta frequência. Deve-se ressaltar que se faz necessário o sincronismo dos dados dos dois terminais e de um canal de comunicação dos dados entre o terminal remoto e o terminal local.

Figura 3.12 - Fluxograma do algoritmo de localização de faltas.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Como pode ser observado na Figura 3.12, as etapas que compõem o algoritmo para determinação da posição da falta são as seguintes: aquisição dos dados, adição do ruído branco, transformação modal, Transformada *Wavelet*, determinação dos tempos de reflexão e, por último, o cálculo da distância da falta.

3.2.1 Módulo de Aquisição dos Dados

Neste trabalho, os dados de entrada para o algoritmo de localização são os sinais das tensões de ambos os terminais, local e remoto, da linha de transmissão provenientes de faltas simuladas do sistema elétrico de potência protótipo modelado no ATP. Nos casos em que se utiliza dados reais, obtidos através de registradores digitais de sinais de alta frequência, torna-se necessário que haja um meio de comunicação entre os terminais para transferência dos dados, bem como um método para sincronização das medições nos mesmos.

O meio de comunicação para transferência dos dados entre os dois terminais não exige alta velocidade de comunicação, uma vez que o localizador opera *off-line*. A comunicação dos dados pode ser feita via rádio, satélite, modem ou microondas. Nos sistemas mais atuais, fibras óticas dispostas no interior de cabos guardas têm sido usados como meio de comunicação. As fibras garantem alta velocidade na transmissão assim como elevada imunidade eletromagnética. Com o uso do GPS (*Global Positioning System*), as medições digitais nos terminais opostos podem ser sincronizadas.

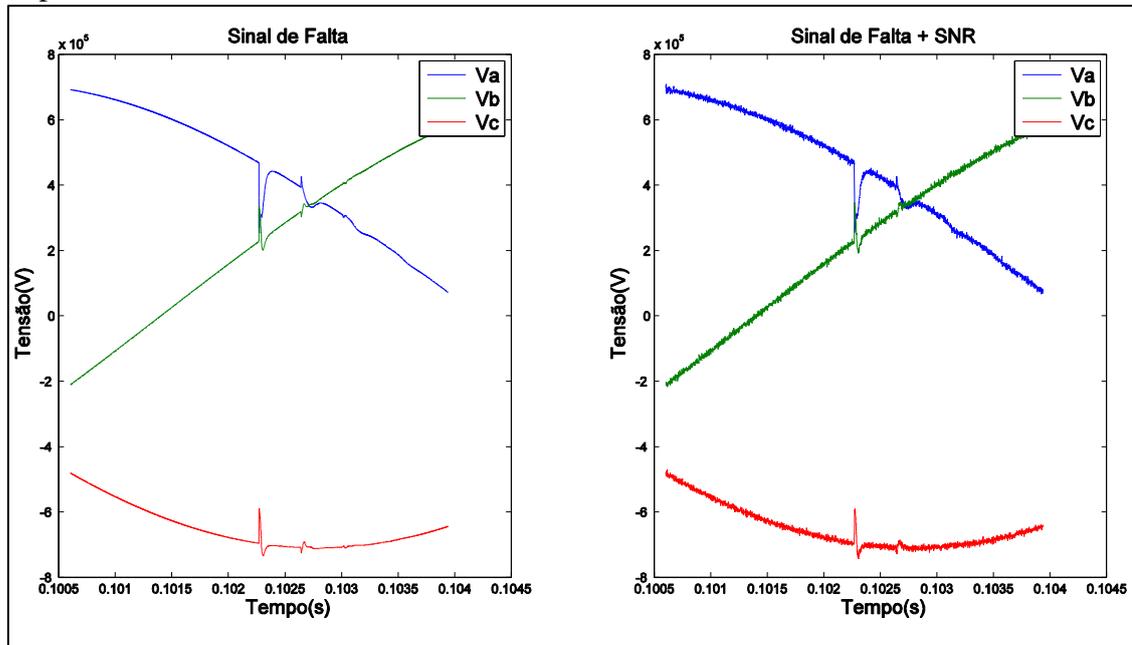
3.2.2 Módulo para Geração de Ruído Branco

O ruído branco é adicionado aos sinais de tensão com o intuito de aproximar o sinal simulado da falta aos sinais de oscilografia reais na ocorrência de uma falta, assim como foi utilizado em Parentoni (2006). A caracterização do sinal recebido é feita através da relação entre a potência do sinal e a potência do ruído – relação sinal/ruído (SNR – Signal to Noise Ratio). Utiliza-se nesse trabalho o Ruído Branco Aditivo e Gaussiano com SNR entre 10dB a 100dB.

Como exemplo, a Figura 3.13 apresenta os sinais de tensão em ambos os terminais da linha, com a correta sincronização por GPS, de uma falta fase-terra simulada a 55km do

terminal local, com um ângulo de incidência de 45° , resistência de falta de 150Ω com uma frequência de amostragem de 400kHz e ruído Branco Aditivo com SNR 40 dB .

Figura 3.13 - Forma de onda da tensão para uma falta fase-terra aplicada a 55km do terminal local. Sinal de falta original e sinal de falta mais ruído SNR 40 dB respectivamente.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

3.2.3 Módulo de Transformada Modal

Em linhas de transmissão trifásicas, as fases estão mutualmente acopladas e, conseqüentemente, as perturbações de alta frequência geradas durante uma falta podem também aparecer nas fases não faltosas.

Porém, pode-se fazer uso de componentes de sistemas para prover o desacoplamento eletromagnético das seções simétricas da linha de transmissão e, dessa forma, a linha de transmissão trifásica pode ser decomposta em três circuitos monofásicos, através dos quais pode-se estudar cada um desses circuitos de forma independente (SIEMENS,1981). A análise modal realiza tal tarefa, obtendo, no caso de um sistema trifásico, 3 modos independentes: o modo 0 (M0), também denominado de modo terra e os modos 1(M1) e 2 (M2), denominados de modos aéreos (HEDMAN, 1965). Nessa análise os componentes modais são obtidos a partir dos sinais de fase de acordo com a equação a seguir,

$$v_{mod} = T v_f \quad (3.1)$$

em que T é uma matriz de transformação modal, v_f são os valores no domínio de fase e v_{mod} são os valores no domínio modal.

Existem diversas soluções para a matriz T , uma das mais usuais é dada pela transformada de Clarke (CLARKE, 1943), a qual é definida de acordo com a Equação (3.2):

$$T = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & \sqrt{3} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

A velocidade de propagação do modo terra (v_{m0}) e do modo aéreo (v_{m1}), a qual é dada, respectivamente, por (VALINS, 2005):

$$v_{m0} = \frac{1}{\sqrt{(L_0 \times C_0)}} \quad (3.3)$$

$$v_{m1} = \frac{1}{\sqrt{(L_1 \times C_1)}} \quad (3.4)$$

sendo L_0 , C_0 , L_1 e C_1 são as indutâncias e capacitâncias de sequência zero e positiva da linha.

É importante mencionar que para faltas com conexão ao terra (fase-terra, fase-fase-terra), existem sempre modos aéreos e terra, ao passo que para outros tipos de falta (fase-fase, trifásica) somente existirão modos de propagação aéreos. Assim, o algoritmo de localização de faltas faz uso do modo aéreo 1 (M1) dos sinais de tensão trifásicos das barras local e remota da LT, isso porque esse modo apresenta-se em todos os tipos de falta que possam vir a acometer um SEP (SILVA, 2005).

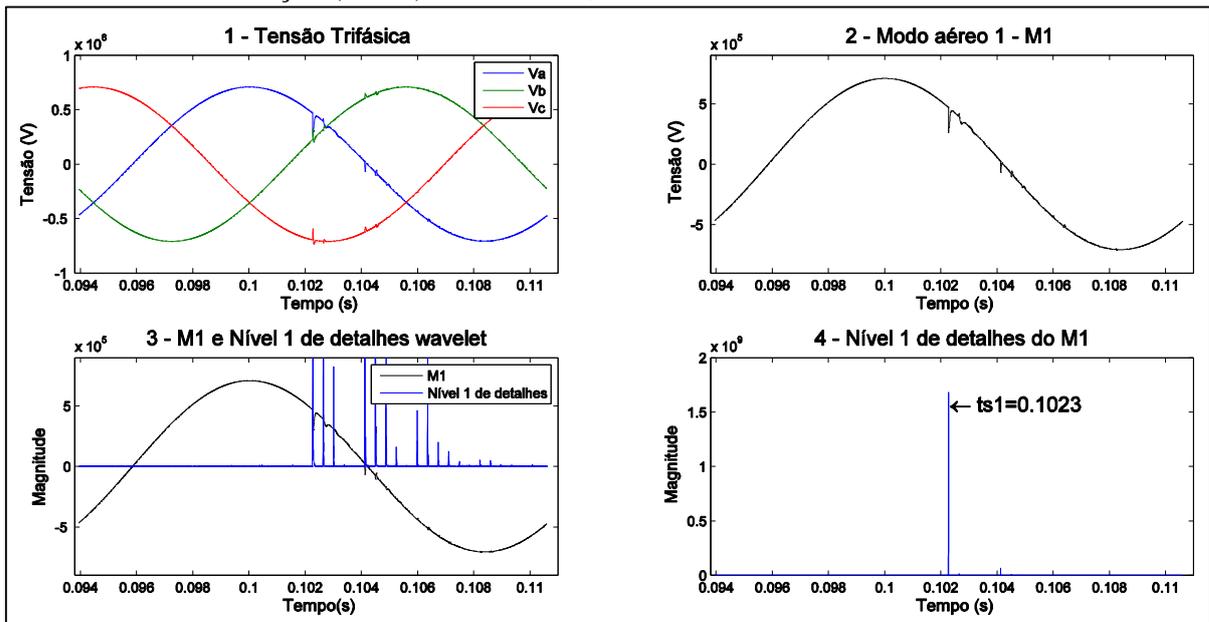
3.2.4 Módulo de Transformada Wavelet (TW)

Considerando a excelente capacidade da TW em discriminar e identificar com precisão os instantes de descontinuidade sobre formas de ondas, a ferramenta mostra-se propícia a aplicação na localização de faltas sobre sistemas elétricos (SILVA, 2003). Tal localização é possível em virtude da TW mostrar, através da análise em detalhes da Análise Multiresolução (AMR), os instantes de reflexão das ondas nos terminais, necessário para se estimar a distância do ponto de falta conforme ilustra a Figura 3.14.

Na Figura 3.14 são ilustrados um sinal de uma falta fase-terra, o modo aéreo 1 proveniente da transformação Modal e o primeiro detalhe de decomposição da Análise Multiresolução (AMR) *wavelet*. Pode-se observar que no instante que precede a falta, o sinal de tensão encontra-se em regime permanente. Quando este se encontra em regime, o valor médio do primeiro detalhe de decomposição apresenta valores próximos de zero, como é ilustrado na Figura 3.14. No instante em que ocorre a falta, o sinal decomposto indica a presença

de picos que mostram o início do distúrbio. Esses picos alteram o valor médio do sinal em regime, permitindo a detecção do distúrbio.

Figura 3.14 - Aplicação da Transformada *Wavelet* em um sinal com descontinuidade proveniente de uma falta monofásica para o terminal local. 1- Falta monofásica; 2- Modo aéreo 1(M1) resultante da transformada de Clarke; 3- Nível 1 de detalhe *wavelet* através da Análise Multiresolução (AMR) do sinal M1; 4- Nível 1 de detalhes *wavelet*.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

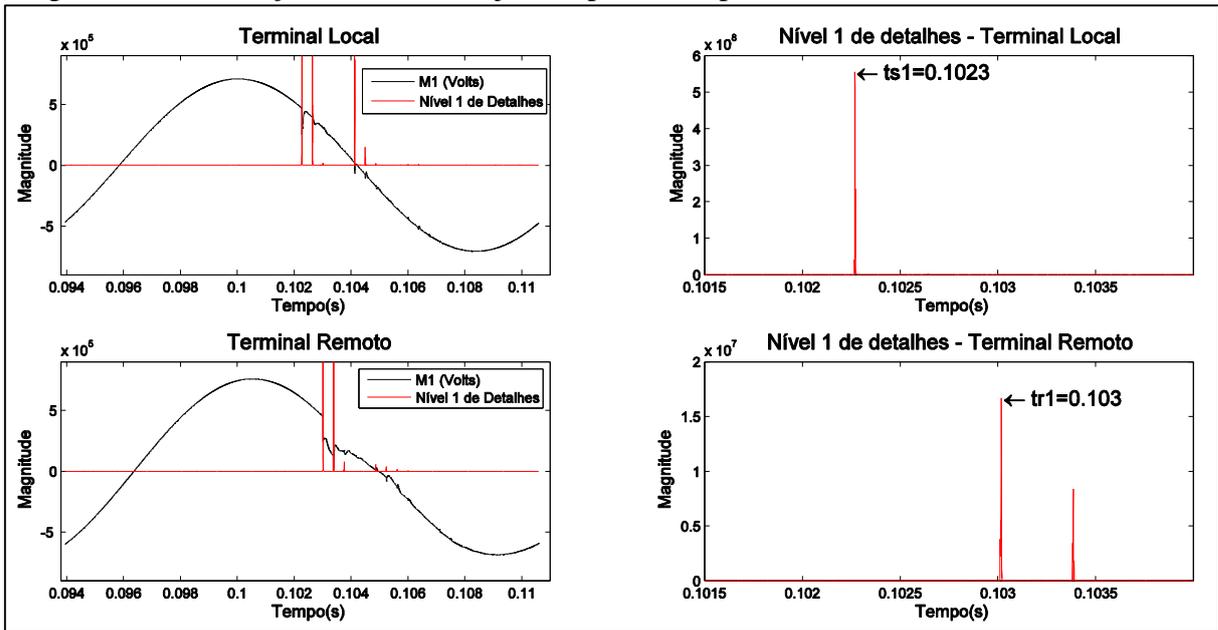
3.2.5 Módulo de Localização da Falta

Partindo do pressuposto que os estágios vistos anteriormente tenham sido executados, tem-se então, a partir deste ponto, os sinais de detalhe 1 do modo aéreo 1, referentes ao terminal local e remoto. Analisando os sinais de detalhe 1, pode-se determinar os instantes de tempo de reflexão da primeira onda em ambos os terminais e com isso estimar a localização da falta.

A estimação da distância da falta nesta técnica é baseada no primeiro instante de reflexão em ambos os barramentos. Esses instantes são relatados pelos sinais de detalhe 1 do modo aéreo 1 de ambas as barras e são representados por picos presentes nos mesmos.

A detecção desses instantes é feita através da verificação dos picos, maiores valores, dos sinais do detalhe 1, referentes ao terminal local e remoto como pode ser observado na Figura 3.15.

Figura 3.15 - Detecção das ondas viajantes, primeiros picos, nos terminais locais e remotos.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

A Figura 3.15 ilustra o processo de detecção dos tempos de reflexão, considerando uma situação de falta fase-terra. Pode-se observar pela mesma Figura que o distúrbio é detectado e os picos escolhidos adequadamente pelo algoritmo. Determinado os tempos, passamos ao próximo e último passo desta técnica que consiste no cálculo da distância da falta.

Considerando que $ts1$ e $tr1$ (Figura 3.15) correspondem ao tempo dos picos iniciais dos coeficientes *Wavelets* de detalhe 1 do modo 1, para os sinais registrados nos terminais local e remoto respectivamente, podemos calcular a distância da falta através da Equação 3.5:

$$d = \frac{l - v_{m1}(tr1 - ts1)}{2} \quad (3.5)$$

em que l é o comprimento da linha de transmissão (km), v_{m1} é a velocidade de propagação do modo aéreo 1 (km/s) e d a distância da falta em relação ao terminal local (km).

3.3 Considerações Finais

Este capítulo apresentou as simulações realizadas para essa dissertação no intuito de obterem-se os resultados principais buscados por esse estudo. Verificou-se a potencialidade do simulador ATP na geração dos sinais contendo as ondas viajantes oriundas das faltas aplicadas ao SEP e formulou-se o algoritmo do localizador de faltas baseado na AMR *wavelet* e na teoria das ondas viajantes.

Logo, as ferramentas de software utilizadas, assim como o algoritmo de localização, mostraram-se adequados à concretização dos resultados buscados para o trabalho, os quais serão explanados no próximo capítulo.

4 RESULTADOS

O algoritmo de localização foi implementado através do uso do *software* Matlab® e testado com os dados obtidos através de simulações do *software* ATP/EMTP. Como foi descrito no Capítulo 3, foram considerados vários tipos de faltas em diferentes localizações entre os terminais local e remoto, com diferentes ângulos de incidência e resistências de faltas.

Para localização da falta, foram utilizados os sinais das tensões trifásicas sem e com a adição de ruído branco com as SNRs de 10 dB, 20 dB, 30 dB, 40 dB, 50dB, 60dB, 70dB, 80dB, 90dB e 100dB. O sistema elétrico considerado na Figura 3.4 apresenta para o modo aéreo 1 (modo 1) uma velocidade de propagação de $2,9137 \times 10^5$ km/s calculada utilizando os dados apresentados por Machado *et al.* (2007) na Equação (3.4), sendo o passo de amostragem usado de $2,5 \mu\text{s}$ (400KHz).

Os sinais do modo 1 são decompostos em um nível através da Análise Multiresolução utilizando-se as famílias *wavelets* com as ordens apresentadas na Tabela 4.1 disponíveis no toolbox do software MATLAB®. Utilizou-se todas as ordens presentes no toolbox para as famílias *wavelets* com exceção da *Symlets*, apenas as vinte primeiras ordens foram utilizadas, por essa família apresentar um aumento exponencial do tempo de processamento à medida que se aumento da ordem das *wavelets* como será apresentado na seção 4.7.

Tabela 4.1 - *Wavelets* utilizadas para localização de faltas.

FAMÍLIA WAVELET	ORDENS
Daubechies	Db1, 2, 3, 4, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44 e 45
Coiflets	Coif1, 2, 3, 4 e 5
Symlets	Sym2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19 e 20
Biorthogonal	Bior1.1, 1.3, 1.5, 2.2, 2.4, 2.6, 2.8, 3.1, 3.3, 3.5, 3.7, 3.9, 4.4, 5.5 e 6.8
Reverse Biorthogonal	Rbio1.1, 1.3, 1.5, 2.2, 2.4, 2.6, 2.8, 3.1, 3.3, 3.5, 3.7, 3.9, 4.4, 5.5 e 6.8

Fonte: (Elaborada pelo Autor).

Tendo os arquivos de faltas processados pelo algoritmo de localização desenvolvidos no Matlab[®], o local do defeito foi calculado e os erros absolutos e relativos foram armazenados em planilhas do *software* Microsoft Excel.

O Erro Absoluto, o Erro Relativo e o Erro Médio Relativo são calculados através das Equações (4.1), (4.2) e (4.3), respectivamente:

$$EA(km) = |d - d_{calc}| \quad (4.1)$$

$$ER(\%) = \frac{EA \cdot 100}{l} \quad (4.2)$$

$$EMR(\%) = \sum_{n=1}^N \frac{ER_n}{N} \quad (4.3)$$

em que d é a distância real da falta (km), d_{calc} distância estimada pelo localizador (km), l é o comprimento total da linha (330km), N é o número de situações considerando estáticos o tipo de falta, a *wavelet*, a distância real da falta e a presença ou não do ruído branco.

Já o Erro Médio Relativo Total e o Desvio Padrão Relativo são calculados através das equações (4.4) e (4.5), respectivamente.

$$EMR_T(\%) = \sum_{n=1}^N \frac{ER_n}{N} \quad (4.4)$$

$$DPR(\%) = \sqrt{\sum_{n=1}^N \frac{(ER_n - \bar{x})^2}{N - 1}} \quad (4.5)$$

em que ER é o erro relativo (%), \bar{x} é média dos ER (%), N é o número de situações considerando estáticos o tipo de falta, a *wavelet* e a presença ou não do ruído branco.

Neste capítulo, serão apresentados os resultados do desempenho do localizador de faltas com e sem a adição de ruído branco frente às diversas *wavelets* buscando identificar para cada situação, presença ou não do ruído, quais são as *wavelets* que apresentam os melhores resultados quando utilizadas na localização de faltas.

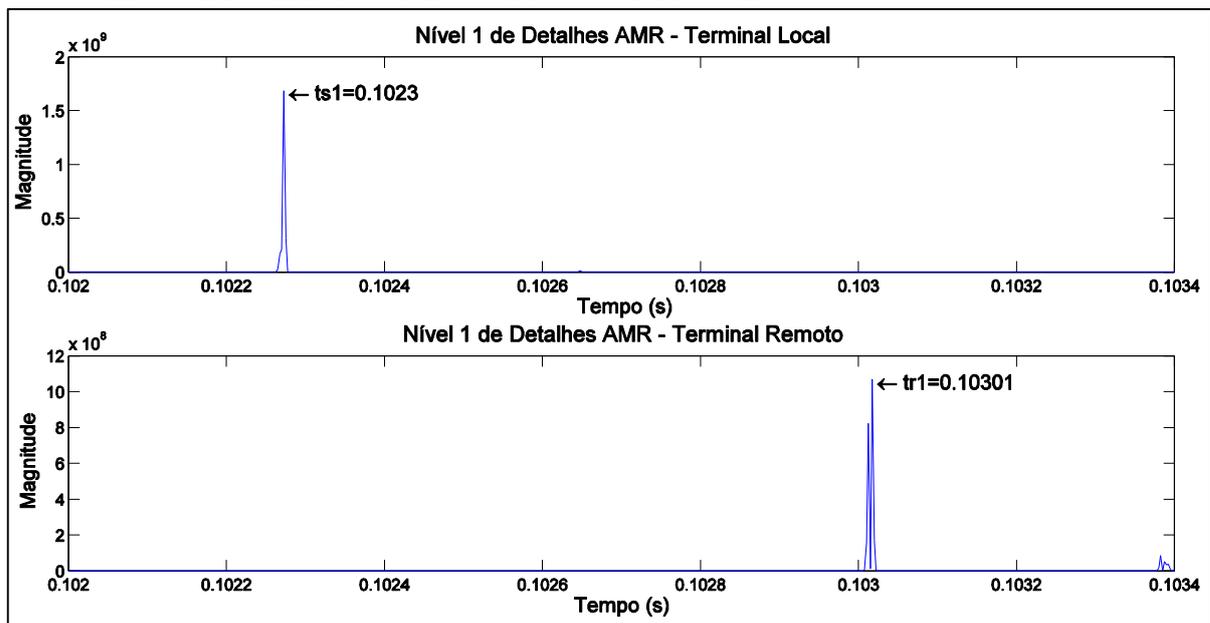
Nas seções 4.1, 4.2 e 4.3 serão apresentados os resultados obtidos pelo localizador para faltas dos tipos FT, FFT e FFF respectivamente. Já as influências da distância da falta, da resistência de falta e do ângulo de incidência no erro médio relativo total - EMR_T são investigadas nas seções 4.4, 4.5 e 4.6 respectivamente.

Embora extensivos testes tenham sido realizados, somente uma parte destes com seus respectivos comentários serão apresentados no corpo deste documento.

4.1 Faltas Monofásicas - Tipo FT

Assumindo os registros dos sinais de tensão em ambos os terminais, locais e remotos, com a correta sincronização por GPS, uma falta fase-terra é simulada a 55Km do terminal local, com o ângulo de incidência de 45° , resistência de falta de 150Ω , utilizando a *wavelet* *coif1* e com ruído branco aditivo com SNR de 80 dB. A Figura 4.1 ilustra os níveis 1 de Detalhes da AMR do modo 1 obtidos em ambos os terminais (Local e Remoto), respectivamente. Neste exemplo, o primeiro pico no terminal remoto ocorreu em $tr1=0,10301s$ e, no terminal local $ts1=0,1023s$. Logo, substituindo esses valores na Equação (3.5), tem-se que a distância estimada é igual a 56.4612 Km.

Figura 4.1 – Nível 1 de Detalhes da Análise Multiresolução (AMR) para uma falta fase A-terra a 55 km do terminal local, com resistência de falta de 150Ω , ângulo de incidência de 45° , *wavelet* mãe *coif1* com ruído branco aditivo de SNR 80 dB.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Esse valor para localização da falta pode ser observado na Tabela 4.2, na qual são apresentados os resultados alcançados pelo algoritmo de localização frente as diferentes situações de faltas simuladas com a adição de ruído branco de SNR 80 dB utilizando a *wavelet* *coif1*.

A Tabela 4.2 apresenta os seguintes parâmetros: (i) tipo de falta que expressa o envolvimento das fases no distúrbio; (ii) Relação Sinal Ruído – SNR (Signal-to-Noise Ratio) que expressa a razão da potência do sinal de falta e a potência do ruído branco adicionado ao

sinal de falta; (iii) a *Wavelet*, a qual expressa qual função *wavelet* que é utilizada na análise Multiresolução. (iv) a distância real, que representa o ponto exato da aplicação da situação de falta sobre o sistema com relação ao terminal local; (v) o ângulo de incidência da falta, o qual indica o ângulo de inserção da mesma; (vi) resistência de falta, que representa o valor da resistência de falta entre a fase e o terra (presente quando a falta tem envolvimento do terra); (vii) a distância estimada, que diz respeito a localização da falta estimada pelo algoritmo; (viii) o erro absoluto calculado conforme Equação (4.1); (ix) o erro relativo, calculado conforme Equação (4.2) e, na parte inferior (x) o erro médio calculado conforme Equação (4.3), para as respectivas condições de faltas.

Tabela 4.2 - Falta fase terra (A-terra) a 55km, *wavelet* coif1 com SNR 80 dB.

Tipo de Falta	SNR	Wavelet	Distância real (km)	Ângulo (°)	Resistencia (ohms)	Distância Estimada (km)	Erro Absoluto (km)	Erro Relativo (%)
FT	80	coif1	55	0	1	55,73272	0,732719	0,2220
FT	80	coif1	55	0	10	55,73272	0,732719	0,2220
FT	80	coif1	55	0	25	55,73272	0,732719	0,2220
FT	80	coif1	55	0	50	55,73272	0,732719	0,2220
FT	80	coif1	55	0	150	56,46121	1,461207	0,4428
FT	80	coif1	55	0	200	1,827431	53,17257	16,1129
FT	80	coif1	55	45	1	56,46121	1,461207	0,4428
FT	80	coif1	55	45	10	56,46121	1,461207	0,4428
FT	80	coif1	55	45	25	56,46121	1,461207	0,4428
FT	80	coif1	55	45	50	55,73272	0,732719	0,2220
FT	80	coif1	55	45	150	56,46121	1,461207	0,4428
FT	80	coif1	55	45	200	56,46121	1,461207	0,4428
FT	80	coif1	55	90	1	56,46121	1,461207	0,4428
FT	80	coif1	55	90	10	56,46121	1,461207	0,4428
FT	80	coif1	55	90	25	56,46121	1,461207	0,4428
FT	80	coif1	55	90	50	56,46121	1,461207	0,4428
FT	80	coif1	55	90	150	56,46121	1,461207	0,4428
FT	80	coif1	55	90	200	56,46121	1,461207	0,4428
Erro Médio Relativo (%)								1,2520

Fonte: Elaborada pelo Autor.

Observa-se na Tabela 4.2 que nestas condições, o algoritmo desenvolvido apresentou um erro médio relativo de 1,252%, valor não aceitável para um localizador de faltas por representar um erro absoluto de cerca de 4 Km. Nesse caso, mesmo que o erro médio relativo para as demais condições de distância real, conforme pode ser observado na Tabela 4.3, a *wavelet* coif1 deve ser evitada na localização de faltas com a presença de ruído branco aditivo com SNR de 80 dB.

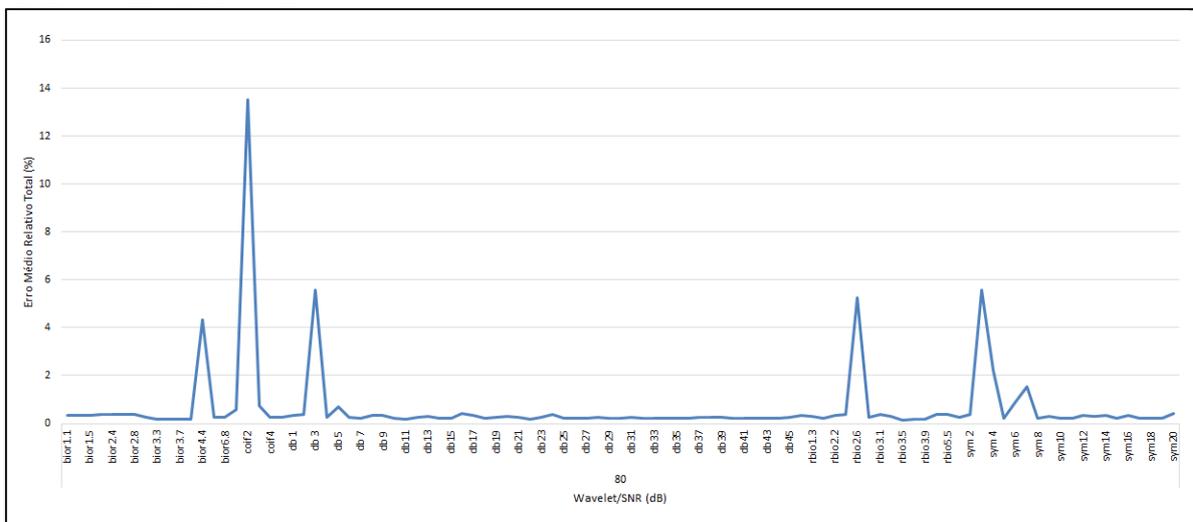
Tabela 4.3 - Falta tipo FT (fase A- Terra) com SNR 80 dB em função da distância real.

Tipo de Falta	SNR (dB)	Wavelet	Distância real (km)	EMR (%)
FT	80	coif1	55	1,2520
FT	80	coif1	110	0,3318
FT	80	coif1	220	0,3317
FT	80	coif1	275	0,3692
EMR_T (%)				0,5712

Fonte: Elaborada pelo Autor.

Da Tabela 4.3, observa-se que a *wavelet* *coif1* apresentou o EMR_T de 0,5712% para sinais com a adição de ruído branco com SNR de 80dB. Utilizando as demais *wavelets* presentes na Tabela 4.1 para localização de faltas com sinais sob a influência de ruído branco com SNR de 80 dB e realizando os procedimentos apresentados acima para o cálculo do Erro Médio Relativo Total - EMR_T elaborou-se a Figura 4.2.

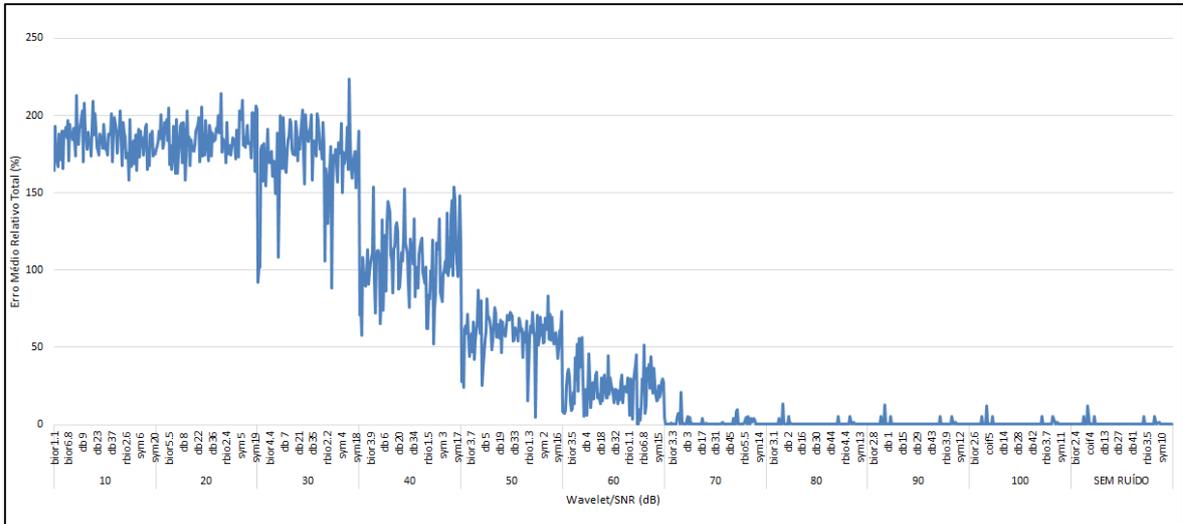
Figura 4.2 - ERM_T alcançadas pelas *wavelets* para o tipo de falta FT com a adição de ruído branco com SNR 80dB.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

A Figura 4.2 apresenta os EMR_T obtidos pelas *wavelets* quando utilizadas na localização de faltas monofásicas do tipo FT em LTs para sinais de faltas sob a influência de ruído branco com SNR de 80 dB. Já na Figura 4.3, tem-se os EMR_T obtidos pelas *wavelets* na localização de faltas monofásicas em LTs sem e com a adição de ruído branco com SNR de 10 a 100 dB.

Figura 4.3 - ERM_T alcançadas pelas *wavelets* para o tipo de falta FT com e sem adição de ruído branco.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Na Figura 4.3 verifica-se que algumas *wavelets* apresentaram os EMR_T próximos de zero para sinais de tensão sem e com a adição de ruído branco com SNR de 60dB a 100dB. Assim, visando uma análise mais detalhada para os melhores casos, elaborou-se a Tabela 4.4 na qual são apresentadas as *wavelets* que alcançaram os menores EMR_T para as faltas do tipo FT com sinais de tensão sem e com a adição de ruído branco com SNR de 60dB a 100 dB.

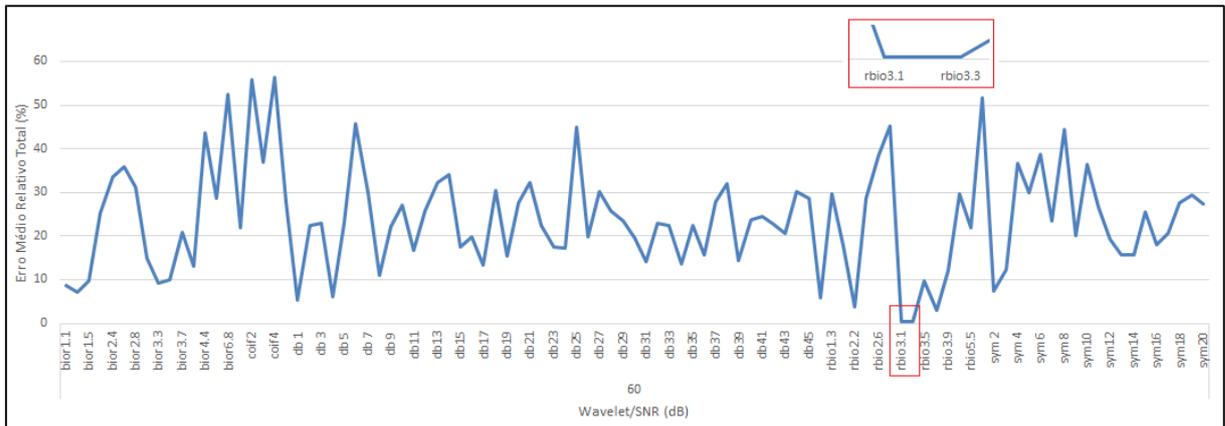
Tabela 4.4 - *Wavelets* que apresentaram os menores EMR_T para faltas do tipo FT sem e com a adição de ruído branco com SNR entre 60 dB a 100 dB.

SNR	Wavelet	EMR_T (%)	DPR (%)
SEM RUIDO	rbio3.5	0,1527	0,0839
	bior3.9	0,1650	0,1083
	bior3.7	0,1650	0,1083
	bior3.5	0,1650	0,1083
	rbio3.7	0,1650	0,1083
100 dB	rbio3.5	0,1527	0,0839
	bior3.9	0,1650	0,1083
	bior3.7	0,1650	0,1083
	bior3.5	0,1650	0,1083
	rbio3.7	0,1650	0,1083
90 dB	rbio3.5	0,1543	0,0841
	bior3.9	0,1650	0,1083
	bior3.7	0,1650	0,1083
	bior3.5	0,1650	0,1083
	rbio3.7	0,1650	0,1083
80 dB	rbio3.5	0,1527	0,0839
	bior3.9	0,1650	0,1083
	bior3.7	0,1650	0,1083
	bior3.5	0,1650	0,1083
	rbio3.7	0,1650	0,1083
70 dB	rbio3.5	0,1573	0,0845
	bior3.7	0,1650	0,1083
	bior3.5	0,1650	0,1083
	rbio3.7	0,1650	0,1083
	bior3.3	0,1650	0,1083
60 dB	rbio3.3	0,3137	0,0851
	rbio3.1	0,3781	0,1605
	rbio3.7	2,9411	14,4018
	rbio2.2	3,7535	28,8344
	db 1	5,3785	30,2200

Fonte: Elaborada pelo Autor.

Observa-se na Tabela 4.4 que as *wavelets* rbio3.5, bior3.9, bior3.7, bior3.5 e rbio3.7 apresentaram os melhores resultados com os EMR_T praticamente iguais, entre 0.1527% a 0.1650%, para os casos sem e com a adição de ruído branco com SNR de 80 dB a 100 dB. Para os casos com SNR de 70 dB, as *wavelets* rbio3.5, bior3.7, bior3.5, rbio3.7 e bior3.3 apresentaram os menores erros relativos, entre 0,1573% a 0,1650%, diferenciando dos casos anteriores por não apresentar entre as melhores *wavelets* a bior3.9 e sim bior3.3. Já para os casos com SNR 60 dB como pode ser observado na Figura 4.4, apenas as *wavelets* rbio3.1 e rbio3.3 com o EMR_T menores que 0,38% (erro absoluto de 1,24 km) podem ser utilizadas para localização de faltas visto que, as demais *wavelets* apresentam EMR_T maiores que 2,9411% representando erro absoluto de 9,7 Km.

Figura 4.4 - EMR_T alcançadas pelas *wavelets* para o tipo de falta FT com adição de ruído branco com SNR 60dB.

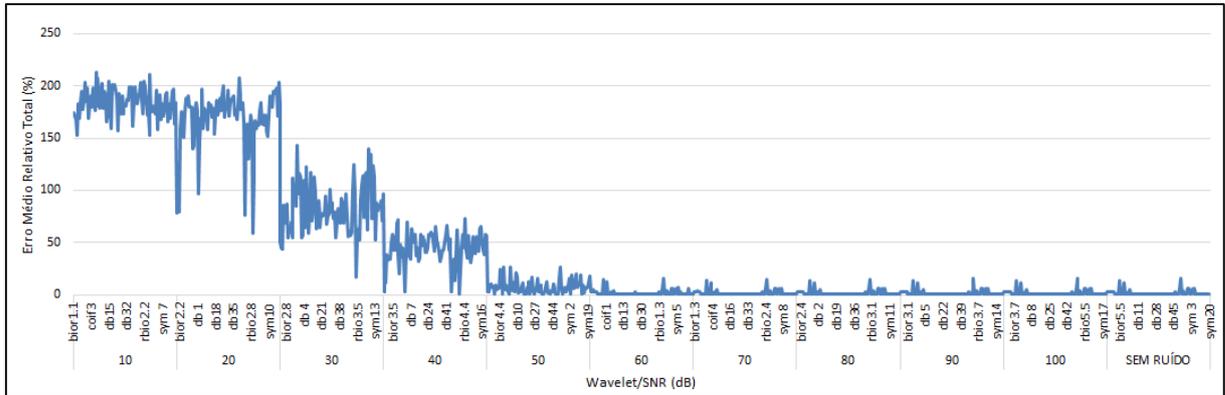


Fonte: Elaborada pelo Autor.

4.2 Faltas Bifásicas Terra – Tipo FFT

Para faltas do tipo FFT, inicialmente buscou-se identificar em qual faixa de SNR as *wavelet* alcançaram os menores EMR_T . Seguindo os procedimentos apresentados na seção 4.1 elaborou-se a Figura 4.5 na qual mostra os EMR_T alcançados pela *wavelets* para sinais de tensão com e sem a presença de ruído branco aditivo. Nela, observa-se que algumas *wavelets* apresentaram EMR_T próximo de zero para sinais de tensão sem e com a presença de ruído branco com SNR de 40dB a 100dB. Observa-se que o algoritmo obteve melhores resultados se comparados com as faltas do tipo FT com algumas *wavelets* apresentando EMR_T próximo de zero para sinais de tensão com a adição de ruído branco com SNR de 40dB e 50dB.

Figura 4.5 - EMR_T alcançadas pelas *wavelets* para o tipo de falta FFT com e sem adição de ruído branco.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Assim, visando uma análise mais detalhada para os melhores casos, elaborou-se a Tabela 4.5 na qual são apresentadas as *wavelets* que alcançaram os menores EMR_T para as faltas do tipo FFT sem e com a adição de ruído branco com SNR de 40dB a 100 dB.

Tabela 4.5 - *Wavelets* que apresentaram os menores EMR_T para faltas do tipo FFT sem e com a adição de ruído branco com SNR entre 40 dB a 100 dB.

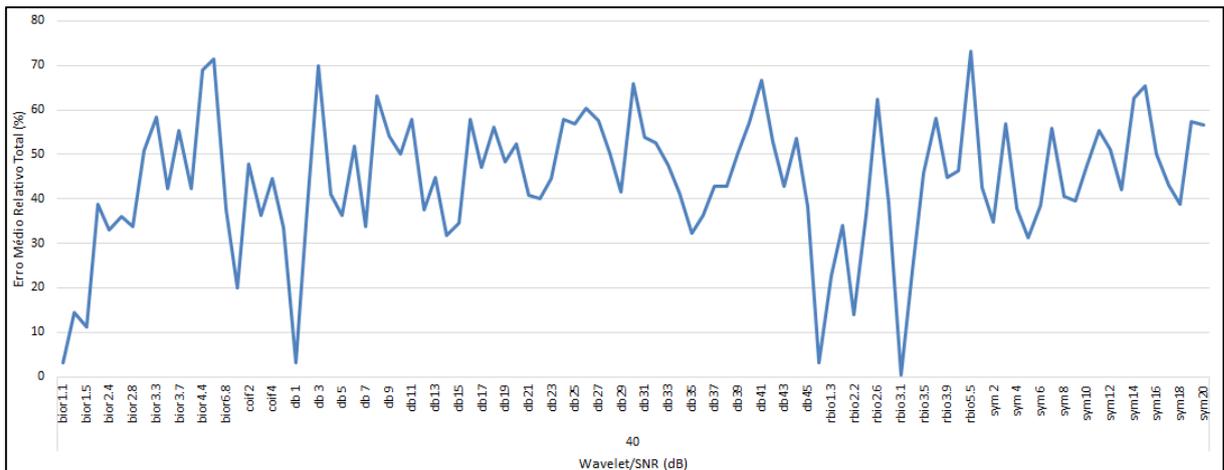
SNR	Wavelet	EMR_T (%)	DPR (%)	SNR	Wavelet	EMR_T (%)	DPR (%)
SEM RUÍDO	rbio3.5	0,1573	0,0845	70 dB	rbio3.5	0,1573	0,0845
	bior3.9	0,1665	0,1067		bior3.9	0,1665	0,1067
	bior3.7	0,1665	0,1067		bior3.7	0,1665	0,1067
	bior3.5	0,1665	0,1067		bior3.5	0,1665	0,1067
	rbio3.7	0,1665	0,1067		rbio3.7	0,1665	0,1067
100 dB	rbio3.5	0,1573	0,0845	60 dB	bior3.7	0,1665	0,1067
	bior3.9	0,1665	0,1067		rbio3.7	0,1665	0,1067
	bior3.7	0,1665	0,1067		bior3.5	0,1665	0,1067
	bior3.5	0,1665	0,1067		bior3.9	0,1665	0,1067
	rbio3.7	0,1665	0,1067		bior3.3	0,1665	0,1067
90 dB	rbio3.5	0,1573	0,0845	50 dB	db34	0,2213	0,1207
	bior3.9	0,1665	0,1067		db41	0,2243	0,1207
	bior3.7	0,1665	0,1067		db18	0,2243	0,1499
	bior3.5	0,1665	0,1067		db26	0,2259	0,1170
	rbio3.7	0,1665	0,1067		bior3.1	0,2401	0,1518
80 dB	rbio3.5	0,1573	0,0845	40 dB	rbio3.1	0,3842	0,1649
	bior3.9	0,1665	0,1067		db 1	3,0730	6,2729
	bior3.7	0,1665	0,1067		bior1.1	3,0730	6,2729
	bior3.5	0,1665	0,1067		rbio1.1	3,0730	6,2729
	rbio3.7	0,1665	0,1067		bior1.5	11,2987	50,0082

Fonte: Elaborada pelo Autor.

Observa-se na Tabela 4.5 que as *wavelets* rbio3.5, bior3.9, bior3.7, bior3.5 e rbio3.7 apresentaram os melhores resultados com os EMR_T iguais, entre 0,1573% a 0,1665%, para os casos sem e com a adição de ruído branco com SNR de 70 dB a 100 dB correspondendo erros absolutos entre 520m a 540m. Estas *wavelets*, com a substituição da rbio3.5 por bior3.3, apresentaram os menores EMR_T iguais a 0,1565% para sinais de tensão com a dição de ruído branco com SNR 60dB. Para sinais com adição de ruído com SNR 50 dB, as *wavelets* db34, db41, db18, db26 e bior3.1 com EMR_T entre 0,2213% a 0,2401% apresentaram os melhores resultados.

Já para sinais com SNR 40dB como pode ser observado na FIGURA 4.6, apenas a *wavelet* rbio3.1 com EMR_T de 0,3842% (Erro absoluto igual a 1,3Km) pode ser utilizada para localização de faltas visto que, as demais *wavelets* apresentam EMR_T maiores que 3% representando erro absoluto de 9,9 Km.

Figura 4.6 - EMR_T alcançadas pelas *wavelets* para o tipo de falta FFT com adição de ruído branco com SNR 40dB.

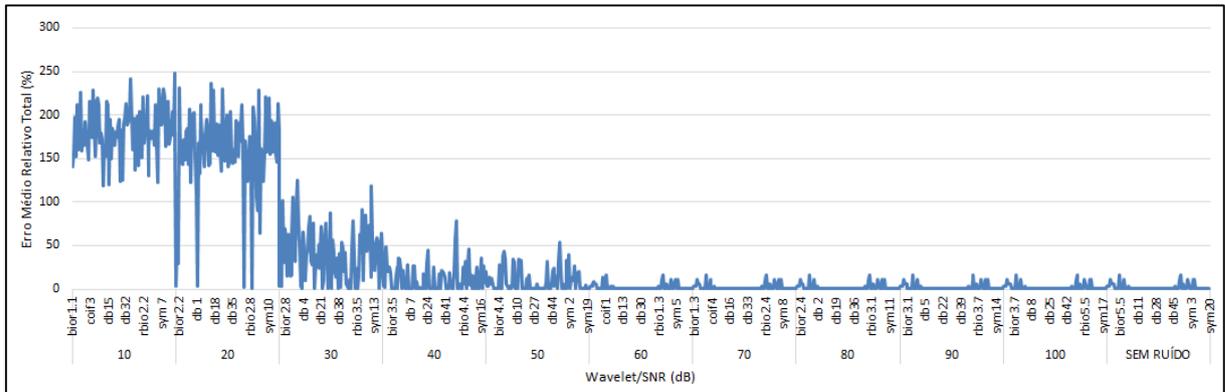


Fonte: Elaborada pelo Autor.

4.3 Faltas Trifásicas – Tipo FFF

Para faltas do tipo FFF assim como os demais tipos de faltas, inicialmente buscou-se identificar em qual faixa de SNR as *wavelet* alcançaram os menores EMR_T . Através do procedimento descrito na seção 4.1 elaborou-se a Figura 4.7 na qual mostra os EMR_T alcançados pela *wavelets* para sinais de tensão com e sem a presença de ruído branco aditivo.

Figura 4.7 - EMR_T alcançadas pelas *wavelets* para o tipo de falta FFF com e sem adição de ruído branco.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Observa-se na Figura 4.7 que apenas para sinais de tensão com SNR de 10dB nenhuma *wavelet* apresentou EMR_T próximos a zero. Visando uma análise mais detalhada para os melhores casos, elaborou-se a Tabela 4.6 na qual são apresentadas as *wavelets* que alcançaram os menores EMR_T para as faltas do tipo FFF sem e com a adição de ruído branco com SNR de 20dB a 100 dB.

Observa-se na Tabela 4.6 que as *wavelets* rbio3.5, bior3.9, bior3.7, bior3.5 e rbio3.7 apresentaram os menores EMR_T , praticamente iguais, para os casos sem e com a adição de ruído branco com SNR de 60 dB a 100 dB entre 0,1573% a 0,1665%. Para SNR 50dB, as *wavelets* rbio3.5, rbio3.7, bior3.3, bior3.9 e db11 apresentaram os melhores resultados com EMR_T entre 0,1389% a 0,1937% representando erros absolutos médios inferiores a 640m. Estas *wavelets*, com a substituição de bior3.3 e db11 por bior3.5 e bior3.7, apresentaram os melhores resultados para sinais de tensão com SNR de 40dB com EMR_T entre 0,1481% a 0,1665%. Para sinais com adição de ruído branco com SNR de 30dB as *wavelets* db22, rbio3.7, sym17, db30 e db37 apresentaram os menores EMR_T entre 0,1847% a 0,2398%.

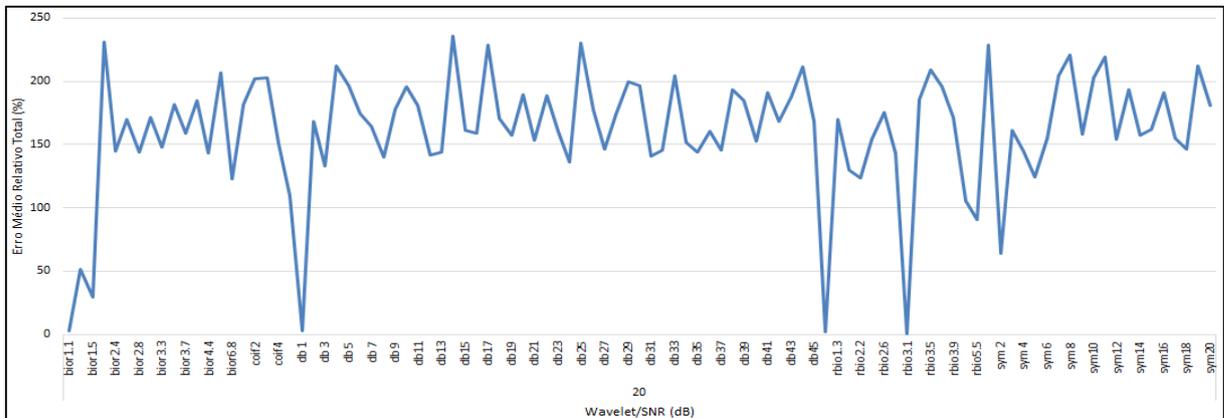
Já para sinais com SNR 20 dB como pode ser observado na Figura 4.8, apenas a *wavelet* rbio3.1 apresentou EMR_T de 0,3689% (Erro absoluto médio de 1,2km) pode ser utilizada para localização de faltas visto que, as demais *wavelets* apresentam EMR_T maiores que 1,7% representando erro absoluto de 5.6 Km.

Tabela 4.6 - Wavelets que apresentaram os menores EMR_T para faltas do tipo FFF sem e com a adição de ruído branco com SNR entre 20 dB a 100 dB.

SNR	Wavelet	EMR_T (%)	DPR (%)	SNR	Wavelet	EMR_T (%)	DPR (%)
SEM RUÍDO	rbio3.5	0,1573	0,0876	60 dB	rbio3.5	0,1481	0,0981
	bior3.9	0,1665	0,1107		bior3.9	0,1665	0,1107
	bior3.7	0,1665	0,1107		bior3.7	0,1665	0,1107
	bior3.5	0,1665	0,1107		bior3.5	0,1665	0,1107
	rbio3.7	0,1665	0,1107		rbio3.7	0,1665	0,1107
100 dB	rbio3.5	0,1573	0,0876	50 dB	rbio3.5	0,1389	0,0957
	bior3.9	0,1665	0,1107		rbio3.7	0,1665	0,1107
	bior3.7	0,1665	0,1107		bior3.3	0,1665	0,1107
	bior3.5	0,1665	0,1107		bior3.9	0,1665	0,1107
	rbio3.7	0,1665	0,1107		db11	0,1937	0,1347
90 dB	rbio3.5	0,1573	0,0876	40 dB	rbio3.5	0,1481	0,1276
	bior3.9	0,1665	0,1107		rbio3.7	0,1573	0,1199
	bior3.7	0,1665	0,1107		bior3.9	0,1665	0,1107
	bior3.5	0,1665	0,1107		bior3.5	0,1665	0,1107
	rbio3.7	0,1665	0,1107		bior3.7	0,1665	0,1107
80 dB	rbio3.5	0,1573	0,0876	30 dB	db22	0,1847	0,1589
	bior3.9	0,1665	0,1107		rbio3.7	0,1847	0,0981
	bior3.7	0,1665	0,1107		sym17	0,1848	0,1588
	bior3.5	0,1665	0,1107		db30	0,2031	0,1480
	rbio3.7	0,1665	0,1107		db37	0,2398	0,1042
70 dB	rbio3.5	0,1573	0,0876	20 dB	rbio3.1	0,3689	0,1588
	bior3.9	0,1665	0,1107		rbio1.1	1,7117	4,8174
	bior3.7	0,1665	0,1107		db 1	2,9810	9,0389
	bior3.5	0,1665	0,1107		bior1.1	3,0730	6,5061
	rbio3.7	0,1665	0,1107		bior1.5	29,2677	95,0718

Fonte: Elaborada pelo Autor.

Figura 4.8 - EMR_T alcançadas pelas wavelets para o tipo de falta FFF com adição de ruído branco com SNR 20dB.

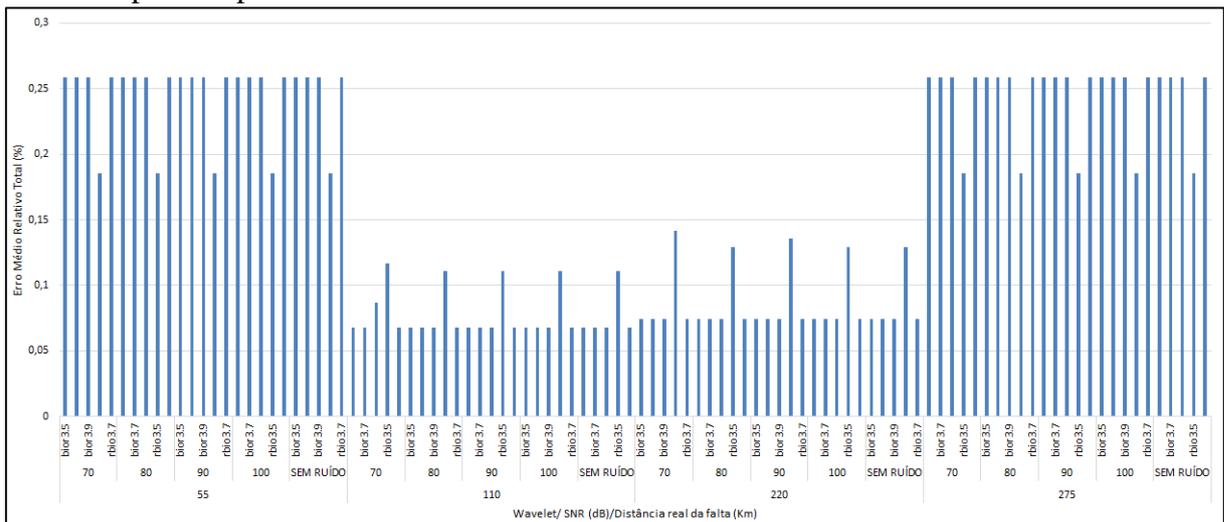


Fonte: Elaborada pelo Autor.

4.4 Influência da distância da Falta sobre a variação do EMR_T

Observa-se que os melhores resultados encontrados pelo algoritmo de localização para os três tipos de faltas apresentados nas seções 4.1, 4.2 e 4.3 foram alcançados pelas *wavelets* bior3.5, bior3.7, bior3.9, rbio3.5 e rbio3.7 para sinais sem e com adição de ruídos brancos com SNR entre 60dB a 100dB. Assim, utilizando as melhores *wavelets* nessa faixa de SNR elaborou-se a Figura 4.9, na qual os EMR_T obtidos pelas referidas *wavelets* para faltas do Tipo FT, mas cujas curvas também são condizentes com as faltas dos tipos FFT e FFF, será utilizada para investigar a influência da distância da falta para a precisão do algoritmo de localização de faltas.

Figura 4.9 - EMR_T obtidos pelas *wavelets* bior3.5, bior3.7, bior3.9, rbio3.5 e rbio3.7 para sinais com ruído com SNRs de 70dB, 80dB, 90dB e 100dB em função das distâncias da ocorrência das faltas para o tipo FT.



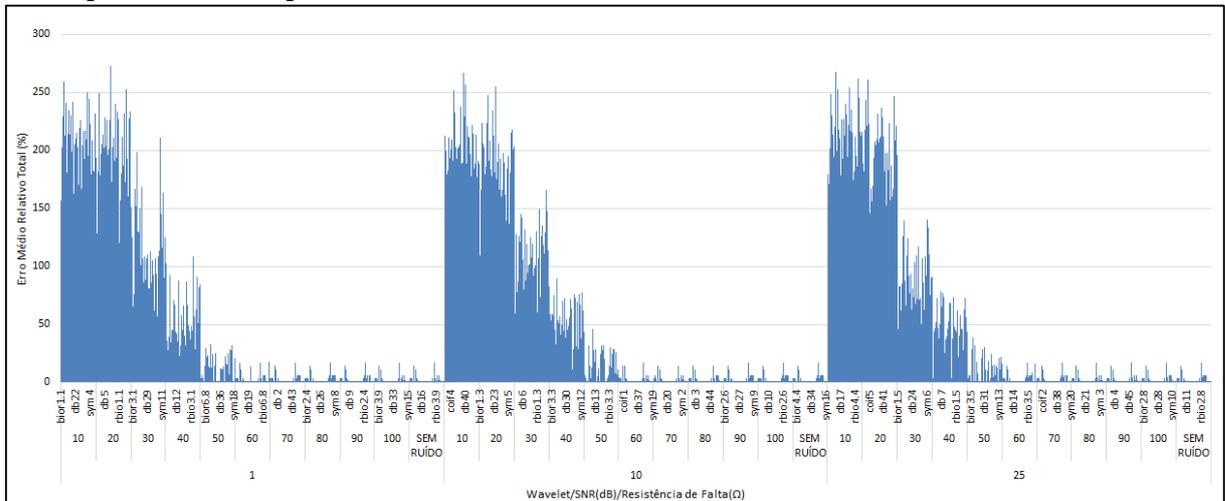
Fonte: Elaborada pelo Autor.

Na Figura 4.9, observa-se que os EMR_T são menores para faltas no meio da LT e maiores para faltas próximas aos terminais de medição (Terminais local e remoto). Resultado esperado em função da simetria das medições realizadas nos dois terminais.

4.5 Influência da Resistência de Falta sobre o Erro Médio Relativo Total

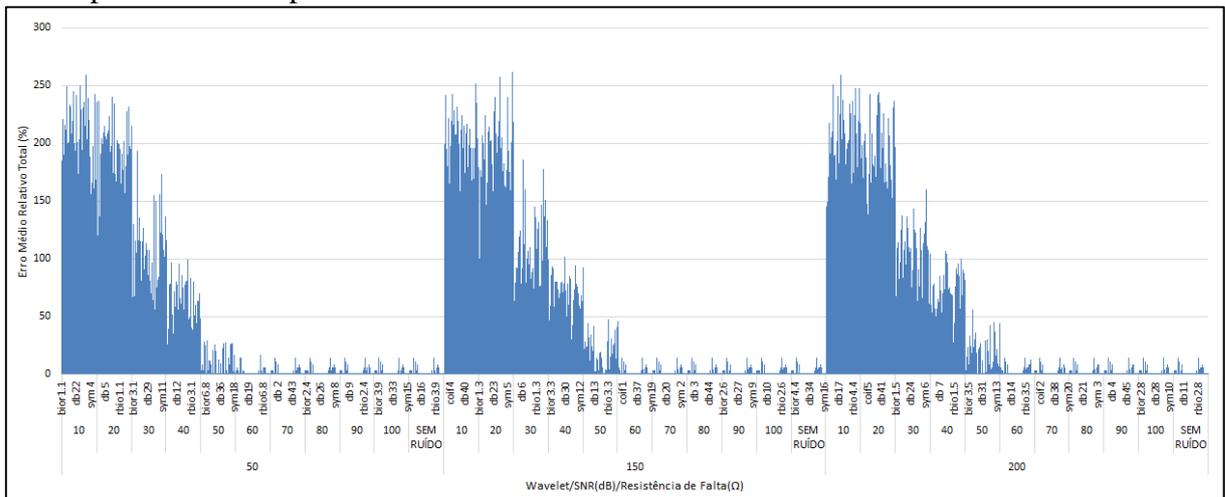
Buscando investigar a influência da resistência de falta sobre a variação do EMR_T do algoritmo de localização elaborou-se as Figuras 4.10 e 4.11. Nelas, apresentam-se o EMR_T para as *wavelets* em função da influência do ruído branco e da resistência de falta para faltas do tipo FFT, mas cujas curvas também são condizentes com as faltas FT.

Figura 4.10 - EMR_T em função da *wavelet*, do ruído branco e das resistências de falta 1 Ω , 10 Ω e 25 Ω para faltas do tipo FFT.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Figura 4.11 - EMR_T em função da *wavelet*, do ruído branco e das resistências de falta 1 Ω , 10 Ω e 25 Ω para faltas do tipo FFT.



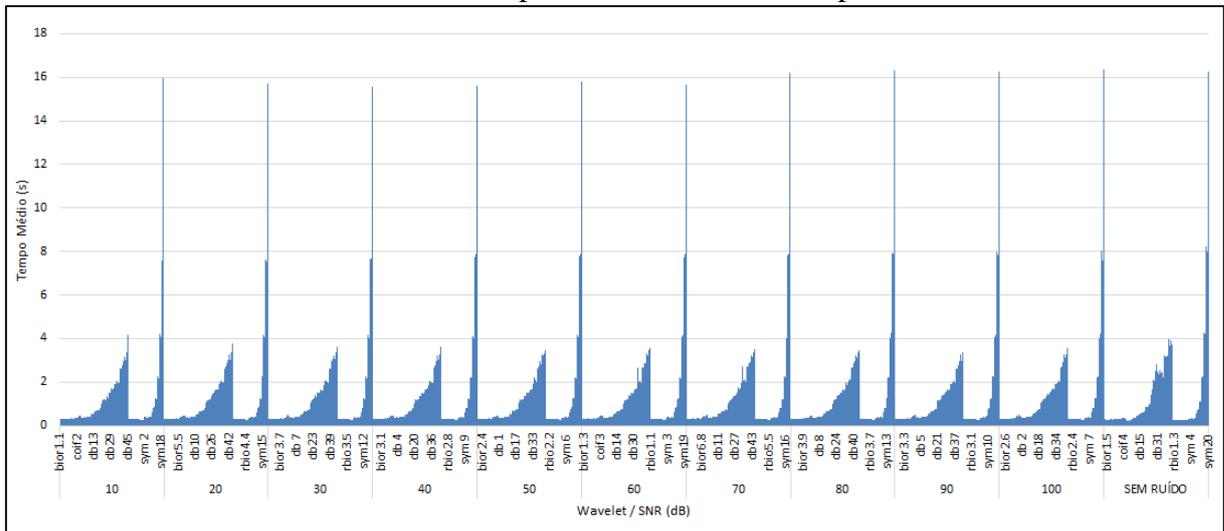
Fonte: Elaborada pelo Autor.

Dos gráficos das Figuras 4.10 e 4.11 infere-se que não houve alterações significativa do EMR_T devido à variação da resistência de falta, uma vez que as curvas permaneceram praticamente idênticas para todos os valores de resistência.

4.6 Influência do Ângulo de Incidência sobre o Erro Médio Relativo Total

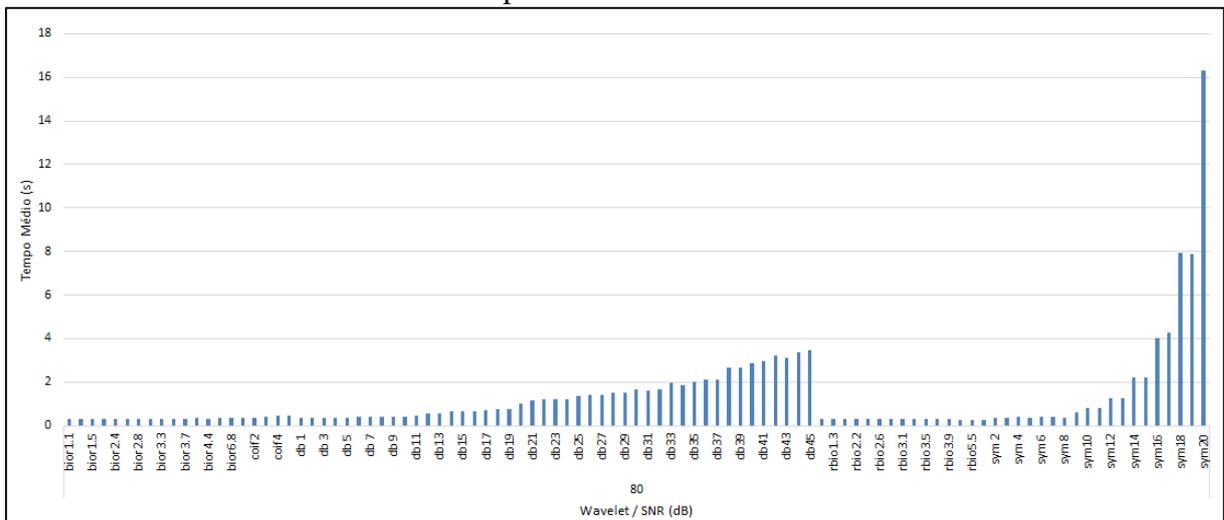
A influência do ângulo de incidência na variação do EMR_T será analisada através da Figura 4.12 na qual apresenta os EMR_T das *wavelets* em função do ruído branco e do ângulo de incidência para faltas do tipo FT, mas cujas curvas também são condizentes com as faltas FFT, FFF.

Figura 4.13 - Tempo médio de processamento das *wavelets* utilizadas na localização de faltas com e sem a influência do ruído branco para sinais de faltas do tipo FT.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Figura 4.14 - Tempo médio de processamento das *wavelets* com adição de ruído branco com SNR de 80dB em sinais de faltas do Tipo FT.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

4.8 Considerações Finais

Este capítulo apresentou os resultados do que foi objetivado para essa pesquisa, devendo-se destacar que a alteração das famílias e ordens das *wavelets* introduz uma grande variabilidade nos erros perpetrados pelo localizador com e sem a presença de ruído. Com a influência do ruído, verifica-se que a precisão do algoritmo é diretamente proporcional a SNR e só apresenta erros relativos médios aceitáveis para sinais com SNR a partir de 60 dB, 40 dB, 20 dB para faltas dos tipos FT, FFT e FFF, respectivamente.

5 CONCLUSÕES

Esta dissertação apresentou a implementação de um algoritmo de localização de faltas em LT fundamentado na teoria de ondas viajantes e na utilização da transformada *wavelet* sob a influência de ruído branco a fim de identificar quais *wavelets* conferem-lhe maior exatidão.

De antemão, o arranjo das diversas condições de defeito aplicadas às simulações de um sistema elétrico protótipo, modelado utilizando dados da linha de transmissão real do sistema Eletrobras-Chesf no ATP/EMTP, resultou em uma grande variabilidade da dinâmica transitória dos sinais faltosos e proporcionou um banco de dados consistente para uma validação satisfatória do algoritmo de localização. Este, utiliza os sinais de tensão de dois terminais que foram amostrados na frequência de 400 KHz. O ruído branco foi adicionado aos sinais de tensão com o intuito de aproximar o sinal simulado da falta aos sinais de oscilografia reais.

Para faltas do tipo FT, o algoritmo apresentou os melhores resultados para sinais de faltas com SNR a partir de 60 dB. As famílias *rbio* e *bior* apresentaram os menores erros médios relativos totais com destaque para a *wavelet* *rbio3.5* por conseguir os melhores resultados para sinais de falta com SNR entre 70dB a 100dB e sem a adição de ruído com EMR_T cerca de 0,15%.

Para faltas do tipo FFT, o algoritmo de localização apresenta erros médios relativos totais aceitáveis para algumas *wavelets* a partir de 40dB. Novamente, as famílias *rbio* e *bior* apresentaram os melhores resultados para sinais sem e com a adição de ruídos com SNR entre 60dB a 100dB com destaque para a *wavelet* *rbio3.5* por ser a melhor. Para 50dB, a família *db* apresentou os melhores resultados com destaque para as *wavelets* *db34*, *db41* e *db18*. Já para 40dB a penas a *wavelet* *rbio3.1* apresentou erros médios relativo total aceitáveis para o localizador de faltas.

Para faltas do tipo FFF, apenas para os casos com a adição de ruído com SNR de 10dB o algoritmo não apresentou erros médios relativos aceitáveis para localização de faltas. Para 20 dB, apenas a *wavelet* *rbio3.1* alcançou erro médio relativo aceitável para a localização de faltas. Para 30dB, as *wavelets* *db22*, *rbio3.7*, *sym17*, *db30* e *db37* apresentaram os melhores resultados com EMR_T entre 0,1481% a 0,1665%. Já para sinais sem e com adição de ruído com SNR entre 40dB a 100dB novamente as famílias *rbio* e *bior* apresentam os melhores resultados com destaque para a *wavelet* *rbio3.5*.

Considerando todos os tipos de faltas (FT, FFT e FFF), conclui-se que o algoritmo apresenta os melhores resultados para sinais de faltas sem e com a adição de ruídos branco com SNR acima de 60 dB, em função das faltas do Tipo FT, para as *wavelets* rbio3.5, bior3.9, bior3.7, bior3.5 e rbio3.7. Essa faixa de SNR não é uma problemática para o localizador, em virtude de os sinais medidos nos extremos de LTs reais não terem valores a baixos 60 dB (ARAÚJO, 2011).

Observou-se que a precisão do algoritmo de localização de faltas não mudou com a variação das resistências de faltas e sim com a variação do ângulo de incidência da falta. Os melhores resultados foram atingidos para faltas com ângulo de incidência de 90° diminuindo a precisão do algoritmo para sinais de faltas com ângulo de incidência de 45° e 0°.

Quanto a distância da falta, observou-se que a precisão do algoritmo é máxima no meio da LT diminuindo a medida em que a falta se aproxima dos terminais de medição. Resultado esperado em função da simetria das medições dos terminais local e remoto.

Quanto ao tempo médio de processamento dos sinais, observa-se existir relação com a presença ou não do ruído branco nos sinais de tensão e sim com a ordem da *wavelet* considerada. Quanto maior é a ordem da *wavelet*, maior é o tempo de processamento com destaque para a família sym por apresentar tempo de processamento que cresce em uma escala, praticamente, exponencial com o crescimento das suas ordens.

Por fim, a abordagem desse trabalho otimizou a desempenho de um algoritmo de localização de faltas pela escolha da *wavelet* mais adequada à minimização dos erros na localização de faltas nas linhas de transmissão sob a influência do ruído branco.

5.1 Sugestões de Trabalhos Futuros

A partir da pesquisa realizada no trabalho, propõem-se como futuras pesquisas envolvendo as temáticas aqui abordadas:

- Investigar a influência de ruído branco na localização de faltas em linhas de transmissão em tempo real utilizando ondas viajantes e transformada *wavelet*.
- Aplicação da metodologia descrita em sistemas de transmissão com aquisição de dados em um terminal.
- Utilizar inteligência computacional para classificar a falta.
- Utilizar dados reais para validar o modelo proposto.

- Caracterizar matematicamente a influência do ruído branco nos coeficientes das *wavelets*.
- Caracterizar matematicamente o ruído colorido originado em falhas na linha, por exemplo queimadas, em decorrência da dinâmica do sistema.
- Investigar as características das *wavelets* Biorthogonal e Reverse Biorthogonal que apresentaram os melhores resultados.

REFERÊNCIAS

- ADAMI, J. F. **Detecção e Identificação de Arcos de Contorno em Cadeias de Isoladores de Linhas de Transmissão Utilizando Técnicas de Processamento de Sinais**. Dissertação (Mestrado) - UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ – UNIFEI, 2008.
- AIEE Committee Report. **Bibliography and summary of fault location methods**. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Power apparatus and systems, part iii., v. 74, n. 3, p. –, 1955. ISSN 0097-2460.
- ALMEIDA, A. R.; ALMEIDA O. M.; ABREU, F. C. M; SILVA, J. P.; SILVA M. H. S., **Localização de Falhas em Sistemas de Transmissão de Alta Tensão a partir de Registros Oscilográficos Usando Análise de Componentes Independentes**. V Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos – SBSE 2014.
- ARAÚJO, M. S., **Influência de Famílias Wavelets e suas ordens no desempenho de um localizador de Falhas em Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2011.
- BEWLEY, L. V. **Traveling waves on transmission systems**. John Wiley & Sons, New York, 1963.
- BEWLEY, L. V. **Traveling waves on transmission systems**. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, v. 50, n. 2, p. 532–550, 1931. ISSN 0096-3860.
- BOLLEN, M. H. J. **Understanding Power Quality Problems**. New York, USA: IEEE, 2000.
- CHANDA, D.; KISHORE, N. K.; SINHA, A. K. **A wavelet multiresolution analysis for location of faults on transmission lines**. Electrical Power & Energy Systems, v.25, p.59-69, 2003.
- CÂNDIDO, C. K. S. S, **Classificação de Distúrbios na Rede Elétrica Usando Redes Neurais e Wavelets**, Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2008.
- CHEN, Z.; MAUN, J.-C. **Artificial neural network approach to single-ended fault locator for transmission lines**. IEEE Transactions on Power Systems, v. 15, n. 1, p. 370–375, 2000. ISSN 0885-8950.
- CLARKE, E. **Circuit Analysis of A-C Power Systems**. John Wiley & Sons, New York, USA, 1943.
- COHEN, A.; DAUBECHIES, I.; FEAUVEAU, J.C. **Biorthogonal bases of compactly supported wave lets**. Commun Pure Appl Math 45:485 560, 1992.
- 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, Delft, Netherlands, June 2011.

COSTA, F. B.; SOUZA, B. A.; BRITO, N. S. D. **Detecção de faltas evolutivas e múltiplos distúrbios em registros oscilográficos baseada na transformada wavelet discreta.** *Revista Controle e Automação*, p. 173–184, Mar 2010a.

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 em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica) - UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE, Campina Grande – Paraíba, 2010.

DALLBELLO, A.C.; SILVEIRA, P. M.; PARENTONI, M. F.C.; ADAMI J.F., **Análise de Sinais Provocados por Defeitos em Linhas de Transmissão Utilizando Técnicas de Telecomunicação e Processamento de Sinais.** IV Congresso de Inovação Tecnológica em Engenharia Elétrica – CITENEL, 2007.

DAVOUDI, M.; SADEH, J.; KAMYAB, E. **Time domain fault location on transmission lines using genetic algorithm.** 11th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), [S.l.: s.n.], 2012. p. 1087–1092.

DAWIDOWSKI, P.; BALCEREK, P.; IZYKOWSKI, J.; ROSOLOWSKI, E. **Atp-empt investigation of two-end synchronized fault location on transmission lines not requiring line parameters.** *International Conference on Power Systems Transients*, Vancouver, Canada, 2013.

DAUBECHIES, I. **Ten lectures on wavelets.** Society of Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, PA, 1992.

ELHAFFAR, A. M. **Power transmission line fault location based on current traveling waves.** Doctoral Dissertation. Finland: Helsinki University of Technology, 2008.

EL-NAGGAR, K. **A genetic based fault location algorithm for transmission lines.** In: 16th International Conference and Exhibition on (IEE Conf. Publ No. 482) Electricity Distribution, 2001. Part 1: Contributions. CIREN. [S.l.: s.n.], 2001. v. 3, p. 5 pp. vol.3-. ISSN 0537-9989.

ERIKSSON, L.; SAHA M.; ROCKEFELLER, G., **An accurate fault locator with compensation for apparent reactance in the fault resistance resulting from remote-end infeed,** *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 104, no. 2, pp. 424–436, 1985.

EVRENOSOGLU, C. Y.; ABUR, A. **Travelling Wave Based Fault Location for Teed Circuits.** *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 20, No. 2, 2005.

FAYBISOVICH, V.; FEIGINOV, M.; KHOROSHEV, M. I. **Investigation of frequency domain traveling wave fault location methods.** In: IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1 –9.

FENG, Z. JUN, L.; LI, Z.; ZHIHAO, Y. **A new fault location method avoiding wave speed and based on traveling waves for EHV transmission line.** Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 2008.

FISCHER, N.; SKENDZIC, V.; MOXLEY, R.; NEEDS, J.; **Localização de Falhas em Relés de Proteção Através de Ondas Viajantes,** 11th International Conference on Developments in Power System Protection, Birmingham, United-Kingdom 2012.

GALE, P.; CROSSLEY, P.; BINGYIN, X.; YAOZHONG, G.; CORY, B.; BARKER, J. **Fault location based on travelling waves.** In: Fifth International Conference on Developments in Power System Protection. [S.l.: s.n.], 1993. p. 54 –59.

GAO, R.X.; YAN, R. **Wavelets: Theory and Applications for Manufacturing,** ISBN 978-1-4419-1544-3, pp. 1–220. Springer, 2011.

GIRGIS, A. A.; FALLON, C. M. **Fault location techniques for radial and loop transmission systems using digital fault recorded data.** IEEE Transmission Power Delivery, v.7, n.4, pages1396-1945, October 1992.

GRAPS, A. **An Introduction to Wavelets.** IEEE Computational Science & Engineering. 1995.

GURU, B. S.; HIZIROGLU, H. R., **Electromagnetic Field Theory Fundamentals.** PWS Publishing Company, Boston, MA, 1997.

HE, Z.; MAI, R.; HE, W.; QIAN, Q. **Phasor-measurement-unit-based transmission line fault location estimator under dynamic conditions.** IET Generation, Transmission and Distribution, v. 5, n. 11, p. 1183–1191, 2011. ISSN 1751-8687.

HEDMAN, D. E. **Propagation on Overhead Transmission Lines – Theory of Modal Analysis.** IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, New York, v. 84, September 1965, p. 762-771.

IURINIC, L.; FERRAZ, R.; GUIMARÃES, E.; BRETAS, A. **Transmission lines fault location based on high-frequency components technique: a general formulation for estimation of the dominant frequency.** International Conference on Power Systems Transients, Vancouver, Canada, 2013.

JIAN, Q.; XIANGXUN, C.; JIANCHAO, Z. **Travelling wave fault location of transmission line using wavelet transform.** In: International Conference on Power System Technology, 1998 (POWERCON '98). [S.l.: s.n.], 1998. v. 1, p. 533 –537 vol.1.

JOHNS, A.; JAMALI, S. **Accurate fault location technique for power transmission lines.** **Generation, Transmission and Distribution,** IEE Proceedings C, v. 137, n. 6, p. 395 –402, November 1990. ISSN 0143-7046.

JOHNS, A.; JAMALI, S. **Accurate fault location technique for power transmission lines.** Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings C, v. 137, n. 6, p. 395–402, November 1990. ISSN 0143-7046.

KIM, C. H.; AGGARWAL, R. **Wavelet transforms in power systems: Part 1 General introduction to the wavelet transforms.** Power Engineering Journal, v.14, n.2, pp. 81-87, 2000.

KINDERMANN, Geraldo. **Curto-circuito.** 2ª Ed. Porto Alegre: Sagra Luzzatto, 1997.

LOPES, F. V. **Localização de Falhas em Tempo Real Baseada na Teoria de Ondas Viajantes Usando Dados Não Sincronizados de Dois Terminais.** Tese (Doutorado em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica) - UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE, Campina Grande – Paraíba, 2014.

LOPES, F. V.; FERNANDES JR, D.; NEVES, W. L. A. **Localização de Falhas em Linhas de Transmissão: Revisão da Literatura e Tendências Recentes,** V Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos – SBSE 2014^a.

LOPES, F. V., **Localização de Falhas em Tempo Real Baseada na Teoria de Ondas Viajantes Usando Dados Não Sincronizados de Dois Terminais.** Dissertação (Mestrado) - UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE – UFCG, 2014b.

LOPES, F. V.; FERNANDES Jr., D.; NEVES, W. L. A. **A traveling-wave detection method based on Park's transformation for fault locators.** IEEE Transactions on Power Delivery, v. 28, n. 3, p. 1626–1634, 2013a. ISSN 0885-8977.

LOPES, F. V.; FERNANDES Jr., D.; NEVES, W. L. A. **Um Algoritmo para Localização de Falhas em Tempo Real Sem Uso do GPS.** Décimo Quinto Encontro Regional Iberoamericano do CIGRÉ (ERAC 2013), Foz do Iguaçu, Brazil, maio 2013b.

MACHADO, V. G.; MACHADO JÚNIOR, C.; FERNANDES, J. H. M.; ARAÚJO, M. C. de; TAKAI, M. N.; SOARES, F. G.; SILVA, P. R. R. L. da; MELLO, R. C. de; FERREIRA, S. J. **LT 500 Kv Interligação Norte / Sul III – Trecho 2 Solução Estrutural com Torre Estaiada Monomastro E Feixe Expandido.** Rio de Janeiro: Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – XIX SNPTEE GLT 01, 2007.

MALLAT, S. G.; **A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation.** IEEE TRANSACTIONS ON PATTERN ANALYSIS AND MACHINE INTELLIGENCE. VOL. II, NO. 7. 1989.

MARTI, J. R., **Accurate Modeling of Frequency Dependent Transmission Lines in Electromagnetic Transient Simulations,** IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol, PAS-101, N°1, pp 147-155, 1982.

MENDES, S. C. **Transformada de Wavelet aplicada a proteções digitais,** Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2008.

MISITI, M.; MISITI, Y.; OPPENHEIM, G.; POGGI, J. M. **Wavelet Toolbox – User’s Guide**. The MathWorks.2002.

NAIDU, S. R. **Transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência**. Editora Grafset – Co-edição Eletrobrás/Universidade Federal do Paraíba, 1985.

NGU, E.E., RAMAR K. **A combined impedance and traveling wave based fault location method for multi-terminal transmission lines**. in *Electrical Power and Energy Systems* 33 1767–1775, 2011.

OLIVEIRA, H. M. **Análise de Sinais para Engenheiros: uma abordagem via Wavelets** – Rio de Janeiro: Brasport, 2007.

PARENTONI, M. F. C, **Localização de Falhas por Ondas Viajantes em Linhas de Transmissão de Três Terminais – Abordagem Baseada em Decomposição Wavelet** Dissertação (Mestrado) –Universidade Federal De Itajubá, Itajubá, 2006.

PRESTON, G.; RADOJEVIC, Z.; KIM, C.; TERZIJA, V. **New settings-free fault location algorithm based on synchronised sampling**. *IET Generation, Transmission and Distribution*, v. 5, n. 3, p. 376–383, 2011. ISSN 1751-8687.

PRIKLER, L.; HOIDALEN, H. Kr. **ATPDraw for Windows 9x/NT/2000/XP/Vista: version 5.6**. Preliminary Release No. 1.0. NOV 2009.

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*, Kyoto, Japan, 2009.

SACHDEV, M. S.; AGGARWAL, R. **Accurate fault location estimates from digital impedance relay measurements**. *IEE Conference Publication*, n.249, p. 193-198, 1985.

SADEH, J; AFRADI, H. **A new and accurate fault location algorithm for combined transmission lines using Adaptive Network-Based Fuzzy Inference System**. *Electric Power Systems Research* 79, 1538–1545, 2009.

SADINEZHAD, I; AGELIDIS, V. **An adaptive precise one-end power transmission line fault locating algorithm based on multilayer complex adaptive artificial neural networks**. In: *IEEE International Conference on Industrial Technology*, 2009. ICIT 2009. [S.l.: s.n.], 2009.

SAHA, M. M.; IZYKOWSKI, J.; ROSOŁOWSKI, E. **Fault Location on Power Networks**. London: Ed. Springer, 2010. (Power Systems). ISBN 978-1-84882-885-8.

SAHA, M.; WIKSTROM, K.; IZYKOWSKI, J.; ROSOŁOWSKI, E., **New accurate fault location algorithm for parallel lines**. in *IEE conference publication*, pp. 407–410, London; Institution of Electrical Engineers, 2001.

SALIM, R.; SALIM, K. C. O.; BRETAS, A. **Further improvements on impedance-based fault location for power distribution systems.** IET Generation, Transmission and Distribution, v. 5, n. 4, p. 467–478, 2011. ISSN 1751-8687.

SCHWEITZER, E. O.; JACHINOWSKI, J. K.. **A prototype microprocessor-based system for transmission line protection and monitoring.** Eight Annual Western protective Relay Conference, Spokane, Washington, USA, 1981.

SHI, Q.; TROELTZSCH, U.; KANOUN, O. **Detection and localization of cable faults by time and frequency domain measurements.** In: Systems Signals and Devices (SSD), 2010 7th International Multi-Conference on. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–6.

SIEMENS, AG. **Electrical engineering handbook.** Whitefriars Press Ltd, 1981.

SILVA, A. P. A.; LIMA, A. C. S.; SOUZA, S. M. **Fault location on transmission lines using complex-domain neural networks.** Electrical Power and Energy Systems 43 (2012) 720–727.

SILVA, M. da; OLESKOVICZ, M. e COURY, D. V. **Aplicação da transformada wavelet ao problema de localização de faltas em linhas de transmissão com três terminais.** SBQEE, Belém, 2005.

SILVA, M. **Localização de Faltas em Linhas de Transmissão Utilizando a Teoria de Ondas Viajantes e Transformada Wavelet.** Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

SILVEIRA, P. M. da; SEARA, R.; ZÜRN, H. H. **Localização de Falta por Ondas Viajantes - Uma Abordagem Baseada em Decomposição Wavelet.** Vol. 1. XVI SNPTEE, Campinas, 2001.

TAKAGI, T.; YAMAKOSHI, Y.; BABA, J.; UEMURA, K.; SAKAGUCHI, T. **A new algorithm an accurate fault location for EHV/UHV transmission lines: parte I –Fourier analysis.** IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 3, 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, v.PAS-101, n.3, p. 564-573, March 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, vol. PAS-101, no. 8, pp. 2892 – 2898, aug. 1982b.

TZIOUVARAS, D.; ROBERTS, J.; BENMOUYAL, G. **New multi-ended fault location design for two- or three-terminal lines.** In: Seventh International Conference on (IEE) Developments in Power System Protection, 2001. [S.l.: s.n.], 2001. p. 395–398. ISSN 0537-9989.

URUSAWA, K.; KANEMARU, K.; TOYOTA, S.; SUGIYAMA, K. **New fault location system for power transmission lines using composite fiberoptic overhead ground wire (OPGW)**. IEEE Transactions on Power Delivery, v.4, n.4, p.2005-2011, 1989.

VALINS, T. F., **Relé digital de distância baseado na teoria de ondas viajantes e transformada Wavelet**, Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

VISACRO S. **Descargas Atmosféricas: Uma Abordagem de Engenharia**, Ed. ArtLiber, São Paulo, 2005.

WICKERHAUSER, M. V. **Adapted Wavelet Analysis from Theory to Software**. 10. ed. Wellesley: A K Peters Ltd., 1994, p. 24-25.

YU, C. S.; LIU, C. W.; LIN, Y. H. **A Fault Location Algorithm for Transmission Lines with Tapped Leg - PMU Based Approach**. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 2001. Vol. 2, p. 915- 920, 2001.

APENDICE A – FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA DE LOCALIZAÇÃO UTILIZANDO AS FUNÇÕES DO MATLAB.

