

**Odilon Delmont Filho**

**UM ALGORITMO PARA DETECÇÃO, LOCALIZAÇÃO E  
CLASSIFICAÇÃO DE DISTÚRBIOS NA QUALIDADE DA  
ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO A TRANSFORMADA  
*WAVELET***

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da  
Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para  
obtenção do Título de Doutor em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Adriano A. F. M. Carneiro

CO- ORIENTADOR: Prof. Dr. Mário Oleskovicz

São Carlos

Maio/2007

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.











## AGRADECIMENTOS

À DEUS por sempre ter iluminado meu caminho.

À minha mãe e ao meu pai, Rose e Odilon, pessoas especiais em minha vida, pelo amor que me transmitem e por tudo que fizeram para que eu chegasse até aqui.

À minha irmã Larissa e ao meu cunhado Ricardo que sempre me apóiam em todos os momentos.

Ao Professor Adriano, pela orientação, pela confiança, pela dedicação que me proporcionou nestes anos de convivência e por tudo que colaborou para minha formação como pessoa.

Ao co-orientador, Professor Mário, pela disponibilidade em aceitar este convite, pela amizade e pelas horas dedicadas neste trabalho.

Aos membros da banca examinadora, Prof.<sup>a</sup> Milde, Prof. Paulo Serni e Prof. André pelas contribuições em meu trabalho e também pela dedicação aplicada a pesquisa.

À minha Noiva Fernanda, que sempre me incentivou nesta caminhada e me ampara com seu amor e carinho.

À minha nova família de “Pira” que me acolheram de braços abertos me dando apoio e momentos de descontração aos finais de semana. Agradeço a todos de coração.

Ao pessoal “das antigas” e aos recém chegados, membros do “LSEE – O Lab.”, e ao pessoal do departamento, pessoas que contribuíram direta e indiretamente neste trabalho e que jamais esquecerei os momentos que passamos.

Aos eternos amigos de Pederneiras, aos quais me distancio cada vez mais, mas sei que amizade verdadeira nunca termina.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da EESC/USP pela atenção e disponibilidade com que sempre me atenderam contribuindo para o andamento deste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pela bolsa de estudos concedida.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Senóide e Wavelet	52
Figura 2 – Transformada de Fourier Janelada.	53
Figura 3 - Janela da Incerteza	54
Figura 4 - Celas no domínio do tempo e da frequência.	55
Figura 5 – Demonstração do fator de escala em uma função senóide.	58
Figura 6 – Translação de uma função Wavelet: (a) Função Wavelet $\psi(t)$ ; (b) Função Wavelet Transladada $\psi(t-k)$ .	58
Figura 7 - Filtragem de um sinal.	61
Figura 8 - Decomposição do sinal: a) sem downsampling b) com downsampling.	61
Figura 9 - Exemplo de filtragem com downsampling de um sinal senoidal ruidoso.	62
Figura 10 - Demonstração do processo sucessivo de decomposição de um sinal em três níveis.	62
Figura 11 - Processo de reconstrução de um sinal filtrado.	63
Figura 12 - Processo de aumento do número de amostras para reconstrução de um sinal	64
Figura 13 - Processos de decomposição e reconstrução de um sinal.	64
Figura 14 - Processo de reconstrução alimentado com vetor de zeros.	65
Figura 15 - Reconstrução do primeiro nível de detalhe do sinal com inserção do vetor de zeros.	65
Figura 16 - Diferentes formas para se reconstruir o sinal a partir de seus coeficientes.	66
Figura 17 – AMR de um sinal qualquer com taxa amostral genérica.	67
Figura 18 – AMR de um sinal com detalhamento das frequências.	68
Figura 19 - Representação da função Wavelet de Haar.	70
Figura 20 – Representação da função escala de Haar.	70
Figura 21 – Representação da função $\phi(2t)$ de Haar.	71
Figura 22 – Representação da função $\phi(2t-1)$ de Haar.	71
Figura 23 – Construção da função escala de Haar.	72
Figura 24 - Construção da função wavelet de Haar.	72
Figura 25 - Famílias Daubechies.	79
Figura 26 – (a) Função escala e (b) Função wavelet, de acordo com a construção realizada da db2.	83
Figura 27 – (a) Função escala e (b) Função wavelet, de acordo com a construção realizada da db3.	88
Figura 28 – Wavelets da família Coiflets.	90
Figura 29 – Família Symlets.	91
Figura 30- Sinal de tensão em regime permanente.	92
Figura 31 - Decomposição de um sinal em regime permanente utilizando Haar.	93
Figura 32 - Decomposição de um sinal em regime permanente utilizando a sym2.	93
Figura 33 - Decomposição de um sinal em regime permanente utilizando a sym3.	93
Figura 34 - Decomposição de um sinal em regime permanente utilizando a sym4.	94
Figura 35 - Decomposição de um sinal em regime permanente utilizando a sym5.	94
Figura 36 - Decomposição de um sinal em regime permanente utilizando a sym6.	94
Figura 37 - Decomposição de um sinal em regime permanente utilizando a sym7.	94
Figura 38 - Decomposição de um sinal em regime permanente utilizando a sym8.	95
Figura 39 - Decomposição de um sinal em regime permanente utilizando a db4.	95
Figura 40 - Decomposição de um sinal em regime permanente utilizando a db10.	95
Figura 41 - Sinal de tensão com um afundamento de tensão.	96
Figura 42 - Decomposição de um sinal com afundamento de tensão utilizando Haar.	96
Figura 43 - Decomposição de um sinal com afundamento de tensão utilizando a sym2.	96
Figura 44 - Decomposição de um sinal com afundamento de tensão utilizando a sym3.	96
Figura 45 - Decomposição de um sinal com afundamento de tensão utilizando a sym4.	97
Figura 46 - Decomposição de um sinal com afundamento de tensão utilizando a sym5.	97
Figura 47 - Decomposição de um sinal com afundamento de tensão utilizando a sym6.	97
Figura 48 - Decomposição de um sinal com afundamento de tensão utilizando a sym7.	97
Figura 49 - Decomposição de um sinal com afundamento de tensão utilizando a sym8.	98
Figura 50 - Decomposição de um sinal com afundamento de tensão utilizando a db4.	98
Figura 51 - Decomposição de um sinal com afundamento de tensão utilizando a db10.	98
Figura 52 - Sinal de tensão com uma elevação de tensão.	99
Figura 53 - Decomposição de um sinal com elevação de tensão utilizando Haar.	99

Figura 54 - Decomposição de um sinal com elevação de tensão utilizando a sym2.	99
Figura 55 - Decomposição de um sinal com elevação de tensão utilizando a sym3.	100
Figura 56 - Decomposição de um sinal com elevação de tensão utilizando a sym4.	100
Figura 57 - Decomposição de um sinal com elevação de tensão utilizando a sym5.	100
Figura 58 - Decomposição de um sinal com elevação de tensão utilizando a sym6.	100
Figura 59 - Decomposição de um sinal com elevação de tensão utilizando a sym7.	101
Figura 60 - Decomposição de um sinal com elevação de tensão utilizando a sym8.	101
Figura 61 - Decomposição de um sinal com elevação de tensão utilizando a db4.	101
Figura 62 - Decomposição de um sinal com elevação de tensão utilizando a db10.	101
Figura 63 - Sinal de tensão com transitório oscilatório.	102
Figura 64 - Decomposição de um sinal com transitórios oscilatórios utilizando Haar.	102
Figura 65 - Decomposição de um sinal com transitórios oscilatórios utilizando a sym2.	103
Figura 66 - Decomposição de um sinal com transitórios oscilatórios utilizando a sym3.	103
Figura 67 - Decomposição de um sinal com transitórios oscilatórios utilizando a sym4.	103
Figura 68 - Decomposição de um sinal com transitórios oscilatórios utilizando a sym5.	103
Figura 69 - Decomposição de um sinal com transitórios oscilatórios utilizando a sym6.	104
Figura 70 - Decomposição de um sinal com transitórios oscilatórios utilizando a sym7.	104
Figura 71 - Decomposição de um sinal com transitórios oscilatórios utilizando a sym8.	104
Figura 72 - Decomposição de um sinal com transitórios oscilatórios utilizando a db4.	104
Figura 73 - Decomposição de um sinal com transitórios oscilatórios utilizando a db10.	105
Figura 74 - Diagrama do sistema elétrico de distribuição em análise.	107
Figura 75 - Sinal de tensão com presença de um transitório oscilatório.	119
Figura 76 - Sinal de tensão do sistema de distribuição janelado	120
Figura 77 - Primeiro detalhe em AMR do sinal janelado com distúrbio.	120
Figura 78 - Primeiro detalhe em AMR do sinal janelado em regime.	121
Figura 79 - Sinal de tensão com um ciclo depois de detectado uma anomalia.	122
Figura 80 - Componentes harmônicas presentes no ciclo posterior a detecção do distúrbio.	123
Figura 81 - Gráfico das componentes harmônicas ampliadas para ilustrar as amplitudes das mesmas.	123
Figura 82 - Sinal de entrada ilustrando o primeiro ciclo pós-deteção.	124
Figura 83 - TRF de um ciclo após ser detectado o distúrbio.	125
Figura 84 - Método de classificação via TRF com um deslocamento de $\frac{1}{4}$ de ciclo.	125
Figura 85 - TRF do sinal pós-deteção com deslocamento de $\frac{1}{4}$ de ciclo.	126
Figura 86 - Estrutura da classificação por RNAs.	129
Figura 87 - (a) Detalhes do 1º nível de decomposição; (b) Demonstração do Módulo de Estimação da Amplitude.	131
Figura 88 - (a) Detalhes do 1º nível de decomposição; (b) Módulo de Estimação da Amplitude para transitórios oscilatórios.	132
Figura 89 - Estimação da duração do distúrbio.	133
Figura 90 - (a) Estimação do retorno do distúrbio ao regime permanente. (b) Sinal com Transitórios Oscilatórios.	134
Figura 91 - Resultados obtidos de um afundamento de tensão para 60% de uma falta aplicada a 0°.	136
Figura 92 - Resultados obtidos de um afundamento de tensão para 60% de uma falta aplicada a 90°.	137
Figura 93 - Resultados obtidos de uma elevação de tensão para 150% de uma falta aplicada a 0° na fase A.	138
Figura 94 - Resultados obtidos de uma elevação de tensão para 130% de uma falta aplicada a 90° na fase A.	139
Figura 95 - Resultados obtidos de uma interrupção de tensão de uma falta aplicada a 0°.	140
Figura 96 - Resultados obtidos de um transitório oscilatório para um sistema de distribuição de 13,8kV.	141
Figura 97 - Resultados obtidos de um transitório oscilatório para um sistema de distribuição de 220 V.	142
Figura 98 - Resultados obtidos a partir de ruídos incorporados ao sistema de distribuição.	143
Figura 99 - TRF de um ciclo pós-deteção de cinco casos de afundamentos de tensão a 0°.	145
Figura 100 - TRF de um ciclo pós-deteção de cinco casos de afundamentos de tensão a 90°.	146
Figura 101 - TRF de um ciclo pós-deteção de cinco casos de elevação de tensão a 0°.	147
Figura 102 - TRF de um ciclo pós-deteção de cinco casos de elevação de tensão a 90°.	149
Figura 103 - TRF de um ciclo pós-deteção de cinco casos com transitório oscilatório e destaque para componentes harmônicas.	150
Figura 104 - TRF de um ciclo pós-deteção de cinco casos de ruídos presente no sinal analisado.	151
Figura 105 - TRF de um ciclo pós-deteção com ruídos e destaque para as componentes harmônicas.	152
Figura 106 - TRF de um ciclo pós-deteção com deslocamento de $\frac{1}{4}$ de ciclo de cinco casos para afundamentos de tensão a 90°.	153
Figura 107 - TRF de um ciclo pós-deteção com deslocamento de $\frac{1}{4}$ de ciclo de cinco casos de elevação de tensão a 0°.	154

<i>Figura 108 - TRF de um ciclo pós-deteção com deslocamento de 1/4 de ciclo de cinco casos de elevação de tensão a 90°.</i>	155
<i>Figura 109 – Processo de estimação da amplitude de um afundamento de tensão a 90°.</i>	165
<i>Figura 110 – Processo de estimação da amplitude de um afundamento de tensão a 0°.</i>	165
<i>Figura 111 – Caso típico de injeção das componentes harmônicas num sistema em regime permanente.</i>	172
<i>Figura 112 – Instante de detecção da injeção de componentes harmônicas.</i>	172
<i>Figura 113 – Componentes harmônicas presentes na onda de tensão com o forno em operação.</i>	173
<i>Figura 114 – Falha na detecção para um caso de afundamento de tensão a 0°.</i>	175
<i>Figura 115 – (a) Sinal janelado. (b) Primeiro detalhe do sinal janelado.</i>	176
<i>Figura 116 – Estimação da duração de um determinado distúrbio.</i>	177
<i>Figura 117 – Afundamento de tensão para 0,75 p.u.</i>	178
<i>Figura 118 – Classificação de um Afundamento de tensão.</i>	178
<i>Figura 119 – Caso típico de flutuação de tensão: (a) Sinal ampliado - (b) Sinal normal.</i>	179
<i>Figura 120 – Transitórios oscilatórios.</i>	180
<i>Figura 121 - Modelo geral da interface empregada com a caracterização das informações e respostas decorrentes</i>	191
<i>Figura 122 – Informações detalhadas em função da elevação de tensão acusada..</i>	192
<i>Figura 123 – Erro: arquivo de entrada deve ser escolhido.</i>	192
<i>Figura 124 – Erro: escolha uma opção de fase do sinal em análise.</i>	193
<i>Figura 125 – Erro: escolha uma opção para o nível de tensão.</i>	193
<i>Figura 126 – Erro: entrada de um valor numérico para a frequência de amostragem.</i>	193
<i>Figura 127 – Atenção: os dados não podem ser analisados.</i>	194
<i>Figura 128 – Exemplo do relatório texto gerado.</i>	195
<i>Figura 129 – Exemplo da saída gráfica gerada.</i>	196



## LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1 – Dados dos transformadores particulares.</i>	108
<i>Tabela 2 – Dados dos transformadores de distribuição.</i>	109
<i>Tabela 3 – Afundamentos de tensão obtidos através de faltas aplicadas próximo ao td13.</i>	110
<i>Tabela 4 – Afundamentos de tensão obtidos através de faltas aplicadas no ponto BC1.</i>	111
<i>Tabela 5 – Afundamentos de tensão obtidos através de faltas aplicadas no ponto BC3.</i>	112
<i>Tabela 6 – Afundamentos de tensão obtidos através de faltas aplicadas no lado de baixa tensão do transformador da Subestação.</i>	113
<i>Tabela 7 - Elevações de tensão obtidos através de faltas aplicadas no ponto próximo ao transformador particular 4.</i>	114
<i>Tabela 8 - Elevações de tensão obtidas através de faltas aplicadas no ponto BC1.</i>	114
<i>Tabela 9 - Elevações de tensão obtidas através de falta no BC3.</i>	115
<i>Tabela 10 - Elevações de tensão obtidas através de faltas aplicadas no lado de baixa tensão na Subestação.</i>	116
<i>Tabela 11 - Resultado das simulações do sistema para interrupções de tensão.</i>	116
<i>Tabela 12 – Resultado das simulações do sistema para outros valores de resistência de falta.</i>	117
<i>Tabela 13 – Resultado das simulações do sistema para transitórios oscilatórios.</i>	118
<i>Tabela 14 – Componentes Harmônicas oriundas de Afundamentos de tensão decorrente de faltas fase-terra a 0°.</i>	144
<i>Tabela 15 - Componentes Harmônicas oriundas de Afundamentos de tensão decorrente de faltas fase-terra a 90°.</i>	146
<i>Tabela 16 - Componentes Harmônicas oriundas de Elevações de tensão a 0°.</i>	147
<i>Tabela 17 - Componentes Harmônicas oriundas de Elevações de tensão decorrente de faltas fase-terra a 90°.</i>	148
<i>Tabela 18 - Componentes Harmônicas oriundas de Transitórios Oscilatórios.</i>	150
<i>Tabela 19 - Componentes Harmônicas oriundas de Ruídos.</i>	151
<i>Tabela 20 – TRF de Afundamentos de tensão a 90° de um ciclo com deslocamento de ¼ de ciclo pós detecção.</i>	153
<i>Tabela 21 - TRF de elevações de tensão a 0° de um ciclo com deslocamento de ¼ de ciclo pós detecção.</i>	154
<i>Tabela 22 - TRF de elevações de tensão a 90° de um ciclo com deslocamento de ¼ de ciclo pós detecção.</i>	155
<i>Tabela 23 – Resultado da classificação via TRF.</i>	156
<i>Tabela 24 – Resultado da classificação via TW utilizando Haar.</i>	158
<i>Tabela 25 – Resultado da classificação via TW.</i>	159
<i>Tabela 26 – Resultado preliminar de classificação via RNA.</i>	159
<i>Tabela 27 – Resultado da classificação via RNA utilizando a db4.</i>	162
<i>Tabela 28 – Resultado da classificação via RNA utilizando a sym4.</i>	163
<i>Tabela 29 – Resultado da classificação via RNA utilizando a Haar.</i>	163
<i>Tabela 30 – Alguns casos de estimação da amplitude para afundamentos de tensão.</i>	166
<i>Tabela 31 – Alguns casos de estimação da amplitude para elevação de tensão.</i>	167
<i>Tabela 32 – Alguns casos de estimação da amplitude para interrupção de tensão.</i>	167
<i>Tabela 33 – Estimação de retorno a condição de regime permanente de alguns casos de transitórios oscilatórios.</i>	168
<i>Tabela 34 – Análise dos Métodos de classificação.</i>	169
<i>Tabela 35 - Porcentagem das componentes harmônicas para um forno de indução.</i>	171
<i>Tabela 36 - Casos de afundamento, elevação e interrupção de tensão em conjunto com o forno de indução em operação.</i>	174
<i>Tabela 37 – Tipos de distúrbios caracterizados em campo e índice de acertos observados.</i>	180
<i>Tabela 38 – Conjunto de dados reais originados da CHESF.</i>	181
<i>Tabela 39 – Resultados da classificação dos dados reais – primeira abordagem.</i>	183
<i>Tabela 40 – Análise dos resultados em porcentagem.</i>	184
<i>Tabela 41 – Análise dos resultados em valores absolutos.</i>	185
<i>Tabela 42 – Classificação final dos casos obtidos através do sistema CHESF.</i>	185



## SUMÁRIO

<i>Lista de Figuras</i> .....	<b>9</b>
<i>Lista de Tabelas</i> .....	<b>13</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>17</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>19</b>
<b>1 - INTRODUÇÃO</b> .....	<b>21</b>
<b>1.1 - Fenômenos associados à QEE</b> .....	<b>24</b>
Transitórios .....	25
Variações de Tensão de Curta Duração .....	25
Variações de Tensão de Longa Duração .....	27
Distorções da Forma de Onda .....	27
Flutuações ou Oscilações de Tensão .....	28
Variações na Frequência do Sistema Elétrico .....	29
<b>1.2 - Objetivos da pesquisa</b> .....	<b>29</b>
<b>1.3 - Disposição do texto que segue</b> .....	<b>30</b>
<b>2 - O ESTADO DA ARTE</b> .....	<b>33</b>
<b>3 - TRANSFORMADA WAVELET</b> .....	<b>51</b>
<b>3.1 - Transformada de Fourier x Transformada Wavelet</b> .....	<b>52</b>
<b>3.2 - Wavelets</b> .....	<b>55</b>
<b>3.3 - A Transformada Wavelet Contínua</b> .....	<b>57</b>
Escala .....	57
Translação .....	58
<b>3.4 - A Transformada Wavelet Discreta</b> .....	<b>59</b>
<b>3.5 - O Processo de Filtragem e Reconstrução Wavelet</b> .....	<b>60</b>
Filtragem .....	60
Decomposição em múltiplos níveis .....	62
Reconstrução Wavelet .....	63
Filtros de Reconstrução .....	64
Aproximações e detalhes na reconstrução .....	64
Frequências em cada nível de decomposição .....	66
<b>3.6 - Estudo das Famílias Wavelets</b> .....	<b>69</b>
Wavelet de Haar .....	69
Obtenção dos filtros de análise e síntese: .....	72
Conservação da Energia: .....	76
Compactação da Energia: .....	77
Justificativa da Conservação de Energia .....	77
Wavelet de Daubechies .....	78
Coiflets .....	89
Symlets .....	90
<b>3.7 - Estudo inicial de aplicação das Wavelets em sinais elétricos</b> .....	<b>91</b>
<b>4 - SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO</b> .....	<b>107</b>
<b>5 - ALGORITMO PROPOSTO</b> .....	<b>119</b>
<b>5.1 - Módulo de Detecção e Localização no Tempo</b> .....	<b>119</b>

5.2	-	Módulo de Conteúdo Espectral .....	121
5.3	-	Módulo de Classificação via TRF .....	123
5.4	-	Módulo de Classificação via TW .....	126
5.5	-	Módulo de Classificação via RNA .....	128
5.6	-	Módulo de Estimação da Amplitude .....	130
5.7	-	Módulo de Estimação da Duração do Distúrbio .....	132
6	-	<i>ANÁLISE DOS RESULTADOS</i> .....	135
6.1	-	Módulo de Classificação via TRF .....	143
6.2	-	Módulo de Classificação via TW .....	157
6.3	-	Módulo de Classificação via RNA .....	159
6.4	-	Conclusões Parciais sobre o Módulo de Classificação.....	163
6.5	-	Módulo de Estimação da Amplitude do Distúrbio.....	164
6.6	-	Módulo de Estimação da Duração do Distúrbio .....	167
7	-	<i>VALIDAÇÃO DO ALGORITMO</i> .....	171
7.1	-	Resultados iniciais sobre situações geradas no ATP com injeção de componentes harmônicas.....	171
7.2	-	Resultados iniciais sobre situações reais registradas em campo.....	175
7.3	-	Resultados sobre situações reais registradas em campo num sistema de transmissão da CHESF .....	181
8	-	<i>INTERFACE GRÁFICA</i> .....	187
8.1	-	Ferramentas de construção da interface .....	188
8.2	-	Desenvolvimento da Interface.....	190
8.2.1.		Mensagens de Erro.....	192
9	-	<i>CONCLUSÕES</i> .....	197
10	-	<i>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i> .....	201

## RESUMO

DELMONT, O. F., Um Algoritmo para Detecção, Localização e Classificação de Distúrbios na Qualidade da Energia Elétrica Utilizando a Transformada *Wavelet*. São Carlos, 2007, 209p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

A Qualidade da Energia Elétrica é caracterizada pela disponibilidade da energia através de uma forma de onda senoidal pura, sem alterações na amplitude e frequência. No entanto situações transitórias em sistemas de potência são comuns e estas podem provocar inúmeras interferências indesejáveis. Neste contexto, este trabalho tem como objetivo desenvolver um algoritmo para detectar, localizar no tempo e classificar diversos distúrbios que ocorrem no sistema elétrico através da aplicação da Transformada *Wavelet* (TW). Foi realizado um estudo teórico desde a origem até os recentes avanços sobre a TW. Para a detecção e localização no tempo foi utilizada apenas a TW. Com relação à classificação foram comparadas três ferramentas matemáticas: TW, TRF (Transformada Rápida de Fourier) e RNA (Redes Neurais Artificiais). Através do software ATP (Alternative Transients Program) foi modelado um sistema de distribuição, cujas características seguem um sistema real. Todos os distúrbios de tensão gerados e analisados puderam ser detectados e localizados no tempo através da técnica de Análise Multiresolução. Em relação à classificação, foi realizada uma comparação entre a TW, a TRF e RNA com resultados satisfatórios, destacando dentre elas a TRF e a RNA. Pode-se concluir que os resultados obtidos através do algoritmo mostraram-se eficientes tanto no aspecto da detecção, localização e classificação, assim como na estimação da amplitude do distúrbio e da duração do distúrbio.

**Palavras-chave:** Qualidade da Energia Elétrica, Transformada *Wavelet*, Análise Multiresolução, Transformada de Fourier, Distúrbios de Tensão.



## ABSTRACT

DELMONT, O. F., Detection, Localization and Classification Algorithm for Power Quality Disturbances Using Wavelet Transform. São Carlos, 2007, 209p. Thesis (Doctoral) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

A perfect power supply would be one that is always available, maintaining the supply voltage and frequency within certain limits, and supplying pure noise free sinusoidal waveform. Nevertheless, transient events are usual in power systems, resulting in several interferences. The purpose of this study is for detecting, locating in time and to classifying with Wavelet Transform (WT) several disturbances that occur on power systems. A WT theoretical revision, referring to the first mention in Wavelet up to the recent research advances is presented. Only WT was used in order to detect and locate in time the power system disturbances. For classification, three mathematical tools were compared: WT, FFT (Fast Fourier Transform) and ANN (Artificial Neural Networks). A distribution System, with identical characteristics as the real distribution system, was performed with ATP software (Alternative Transients Program). The results showed that Multiresolution Analysis technique is able to detect and locate all the generated and analyzed voltage disturbances. For classification the results were similar for the WT, FFT and ANN, however FFT and ANN results presented a better performance. The results conclude that the WT algorithm is efficient at detecting, localizing and classifying power system disturbances, as well as, at estimating the amplitude and duration of the voltage disturbance.

**Palavras-chave:** Power Quality, *Wavelet* Transform, Multiresolution Analysis, Fourier Transform, Voltage Disturbances.



## 1 - INTRODUÇÃO

A Qualidade da Energia Elétrica (QEE) é caracterizada pela disponibilidade da energia através de uma forma de onda senoidal pura, sem alterações na amplitude e frequência, emanando de uma fonte de potência infinita. As situações transitórias em sistemas de potência são comuns e, na prática, podem ser ocasionadas por descargas atmosféricas, correntes de magnetização de transformadores, faltas sustentadas, correntes de partida de grandes motores, ou ainda pelos efeitos de chaveamentos de banco de capacitores.

Estas situações transitórias que ocorrem nos Sistemas Elétricos de Potência (SEP) podem provocar inúmeras interferências indesejáveis como acionamento indevido de relés, mau funcionamento de equipamentos sensíveis e distorções em equipamentos de medição, podendo chegar até mesmo à interrupção do fornecimento da energia. Tudo isto resulta em um efeito econômico não desprezível, acarretando em prejuízos tanto às concessionárias como aos consumidores.

Uma etapa importante desta questão é definir o que seria então um problema de QEE. Dentre muitos apontamentos da literatura, Dugan *et al.* [1] relatam que se pode definir o assunto como sendo qualquer problema manifestado na tensão, corrente ou desvio de frequência, que resulte em falha ou má operação dos equipamentos de consumidores.

Como fato, tem-se que da privatização do setor elétrico, as atividades de geração, transmissão e distribuição tendem a se desenvolver em um ambiente competitivo, o que motiva a busca pela eficiência e, portanto, da qualidade [2]. Na fase atual, esta almejada

qualidade engloba a análise, o diagnóstico, a solução e o impacto econômico de qualquer anomalia sobre o sistema elétrico.

A grandeza comumente empregada para descrever a QEE é a tensão [1], visto que da operação do sistema como um todo, tem-se o controle apenas da tensão e não das correntes que as cargas particulares venham a produzir. Portanto, os padrões de qualidade são direcionados e desenvolvidos para manter a tensão fornecida dentro de certos limites.

Como já mencionado, a tensão é um dos parâmetros mais importante na monitoração e controle da QEE e a seu respeito, devem ser observadas três características principais:

- a forma de onda, a qual deve ser o mais próximo de uma senóide;
- a simetria do sistema elétrico entre as fases; e
- as magnitudes das tensões dentro de limites aceitáveis.

Entretanto, existem alguns fenômenos, aleatórios ou intrínsecos que ocorrem no sistema elétrico, os quais causam alterações nos aspectos supracitados, vindo a deteriorar a qualidade do fornecimento da energia elétrica.

Estes fenômenos elétricos podem ser diferenciados em categorias de acordo com o seu tempo de duração, conteúdo espectral, bem como da sua amplitude típica no sistema. Seguindo estes princípios, os diferentes distúrbios podem ser classificados entre transitórios, variações de tensão de curta duração, variações de tensão de longa duração, distorções na forma de onda, flutuação de tensão e variações da frequência do sistema [1], [3]. Mais especificamente, podemos exemplificar estes distúrbios como sendo oscilações transitórias; afundamentos, elevações e interrupções de tensão; sobretensões, subtensões e interrupções sustentadas; distorções harmônicas e ruídos.

Vale apontar que atualmente, a QEE é avaliada pelas concessionárias e órgãos governamentais através de índices específicos, como DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) e FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por

Unidade Consumidora), cujas definições se encontram na Resolução nº 024 da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL [4]. No entanto, estes índices estão relacionados somente com o intervalo de tempo em que o sistema permanece sem energia e a frequência de tais desligamentos. Sendo assim, estes não dete

monitorar problemas relacionados à QEE. A maioria destes trabalhos se relaciona a métodos para detecção, localização e classificação de distúrbios.

Diante do abrangente escopo da QEE e da disponibilização de várias ferramentas que vêm a abordar os fenômenos relacionados, faz-se necessário então uma proposta de desenvolvimento de uma interface que venha a propiciar automaticamente uma adequada análise no contexto da QEE. Além do núcleo central da interface, que neste caso faz uso do algoritmo desenvolvido e dependente ou da TW, ou da TFJ (Transformada de *Fourier* Janelada), ou de técnicas inteligentes entre outras, têm-se em consideração os níveis reais de tensão do sistema (através de um processo de condicionamento dos sinais apresentados nos níveis de 138 kV, 13,8 kV ou 220 V), as grandezas do sistema elétrico envolvidas (tensões e ou correntes trifásicas), a frequência de amostragem dos sinais sob análise e as demais observações pertinentes a cada implementação.

Das ferramentas apontadas, a TW e a TFJ mostram-se aplicáveis a detecção, localização e classificação de distúrbios agregados às formas de ondas de tensão em um sistema de distribuição, com o intuito de prover um diagnóstico preciso das situações enfrentadas. Como evidenciado pelas pesquisas já realizadas [7][8][9], além da detecção, localização e classificação, os distúrbios podem ser classificados segundo sua natureza, utilizando-se de métodos alternativos, como pela aplicação de Redes Neurais Artificiais (RNAs) [10]. Os testes efetuados mostraram que as ferramentas mencionadas possuem uma grande potencialidade quanto às suas aplicações na avaliação da QEE.

### **1.1 - Fenômenos associados à QEE**

Faz-se necessário para o momento, uma pequena e direta apresentação dos principais distúrbios que comumente ocorrem no SEP, em função das suas definições e características. De acordo com [1][3] temos as seguintes definições:

## ***Transitórios***

Fenômenos transitórios ocorrem no sistema elétrico em função de diversas condições. Muitos transitórios são decorrentes de variações instantâneas na corrente, as quais interagem com a impedância do sistema, resultando em elevadas tensões instantâneas. Os transitórios podem decorrer em consequência de cargas com operação intermitente, chaveamento de bancos de capacitores, faltas a terra, operação de dispositivos semicondutores e problemas nos condutores. Descargas atmosféricas são casos especiais de transitórios, devido aos níveis extremamente altos de energia caracterizados em um pequeno intervalo de tempo [11].

- **Transitórios Impulsivos:** Os transitórios impulsivos são decorrentes de descargas atmosféricas. Sua definição pode ser formulada como uma alteração repentina nas condições de regime permanente da tensão, corrente ou ambas, caracterizando-se por apresentar impulsos unidirecionais em polaridade (positivo ou negativo) e com frequência bastante diferente daquela da rede elétrica. Os transitórios impulsivos geralmente são definidos por um tempo de subida e outro de descida do impulso.
- **Transitórios Oscilatórios:** Os transitórios oscilatórios, ou mesmo, oscilação transitória, são causados por diversos eventos. O mais freqüente é a energização de bancos de capacitores, o qual geralmente resulta em oscilações de tensão com frequência entre 300 e 900 Hz, com magnitude máxima de 2,0 p.u., sendo os valores típicos de 1,3 a 1,5 p.u., com duração entre 0,5 a 3 ciclos dependendo das características de amortecimento do sistema.

## ***Variações de Tensão de Curta Duração***

As variações de tensão de curta duração apresentam duração típica entre 0,5 ciclo e 1 minuto, e podem ser subdivididas em alterações instantâneas, momentâneas ou temporárias, dependendo da duração do fenômeno. Tais variações de tensão são, geralmente, causadas por

condições de falta, energização de grandes cargas (as quais requerem altas correntes de partida) ou por intermitentes falhas nas conexões dos cabos do sistema. Dependendo do local da falta e das condições do sistema, a falta pode causar tanto um afundamento de tensão, como uma elevação de tensão, ou mesmo uma interrupção completa do fornecimento da energia no sistema elétrico.

- **Afundamento de Tensão:** Afundamento de tensão, também referenciado como “*sag*”, nada mais é do que, como o próprio nome induz uma subtensão de curta duração caracterizada por uma redução no valor eficaz da tensão, entre 0,1 e 0,9 p.u., na frequência fundamental, com duração entre 0,5 ciclo a 1 minuto. Este tipo de distúrbio está associado, principalmente, a faltas em sistemas de transmissão e de distribuição. Mas pode também ser causado pela energização de grandes cargas (partida de grandes motores) e pela corrente de energização dos transformadores [12].
- **Elevação de Tensão:** A elevação de tensão, também conhecida por “*swell*”, é definida como um aumento entre 1,1 e 1,8 p.u. na tensão eficaz, para a frequência da rede, com duração entre 0,5 ciclo e 1 minuto. Assim como os afundamentos de tensão, as elevações de tensão estão geralmente associadas com as condições de falta no sistema, principalmente aos curtos-circuitos fase-terra, visto que nestas condições as fases não defeituosas tendem a sofrer uma elevação de tensão.
- **Interrupção de tensão:** Uma interrupção de curta duração ocorre quando a tensão de suprimento decresce para um valor menor que 0,1 p.u. por um período de tempo não superior a 1 minuto. Este tipo de interrupção pode ser causado por faltas no sistema de energia, falhas de equipamentos e mau funcionamento de sistemas de controle. Algumas interrupções podem ser precedidas por um afundamento de tensão quando estas são devidas a faltas no sistema supridor. O

afundamento de tensão ocorre no período de tempo entre o início de uma falta e a operação do dispositivo de proteção do sistema.

### ***Variações de Tensão de Longa Duração***

As variações de tensão de longa duração podem ser caracterizadas como desvios que ocorrem no valor eficaz da tensão, na frequência do sistema, com duração maior que 1 minuto. Estas variações de tensão podem se caracterizar como subtensões, sobretensões ou interrupções sustentadas. Todas elas são geralmente causadas por variações de carga e operações de chaveamento no sistema.

### ***Distorções da Forma de Onda***

A distorção da forma de onda é definida como um desvio da situação de regime permanente (forma de onda puramente senoidal - frequência fundamental) caracterizada principalmente pelo seu conteúdo espectral.

- **Distorções Harmônicas:** Harmônicas são tensões ou correntes senoidais com frequências múltiplas e inteiras da frequência fundamental na qual opera o sistema de energia elétrica. Estes harmônicos distorcem as formas de onda da tensão e corrente e são oriundos de equipamentos e cargas com características não-lineares instalados no sistema de energia. As distorções harmônicas estão em desacordo com os objetivos da qualidade de suprimento promovido pelas concessionárias de energia elétrica, as quais devem fornecer aos seus consumidores uma tensão puramente senoidal, com amplitude e frequência constantes. Vale ressaltar que o fornecimento de energia a determinados consumidores que causam deformações no sistema supridor, prejudica não apenas o consumidor responsável pelo distúrbio, mas também outros conectados à mesma rede elétrica.

- **Inter-harmônicas:** são componentes de frequência, em tensão ou correntes, que não são múltiplas inteiras da frequência fundamental do sistema supridor (50 ou 60Hz). Estas podem aparecer como frequências discretas ou por uma larga faixa espectral. As inter-harmônicas podem ser encontradas em redes de diferentes classes de tensão.
- **Ruídos:** Ruído é definido como um sinal elétrico indesejado, contendo uma larga faixa espectral com frequências de até 200 kHz, as quais se apresentam superpostas às tensões ou correntes de fase, ou encontradas em condutores de neutro em linhas de transmissão. Os ruídos em sistemas de potência podem ser causados por equipamentos eletrônicos de potência, circuitos de controle, equipamentos a arco, retificadores a estado sólido e fontes chaveadas e, comumente, estão relacionados com aterramentos impróprios. Basicamente, os ruídos consistem de uma distorção indesejada no sinal elétrico que não pode ser classificado como distorção harmônica e ou transitório.

### ***Flutuações ou Oscilações de Tensão***

As flutuações de tensão correspondem a variações sistemáticas dos valores eficazes da tensão de suprimento dentro da faixa que compreende 0,95 e 1,05 p.u. Tais flutuações são geralmente causadas por cargas industriais e se manifestam de diferentes formas, a destacar:

- **Flutuações Aleatórias:** A principal fonte destas flutuações são os fornos a arco, onde as amplitudes das oscilações dependem do estado de fusão do material, bem como do nível de curto-circuito da instalação.
- **Flutuações Repetitivas:** Dentre as principais fontes geradoras de flutuações desta natureza tem-se máquinas de solda, elevadores de minas e ferrovias.
- **Flutuações Esporádicas:** A principal fonte causadora destas oscilações é a partida direta de grandes motores.

### ***Variações na Freqüência do Sistema Elétrico***

Variações na freqüência de um sistema elétrico são definidas como sendo desvios quando da comparação com o valor da freqüência fundamental. No Brasil a freqüência fundamental é de 60 Hz e vale lembrar que a freqüência do sistema de potência está diretamente associada à velocidade de rotação dos geradores que suprem o sistema. Pequenas variações de freqüência podem ser observadas como resultado do balanço dinâmico entre carga e geração no caso de alguma alteração (variações na faixa de  $60 \pm 0,5$  Hz). A amplitude da variação e sua duração dependem das características da carga e da resposta dos reguladores de velocidade do sistema de geração.

Face aos comentários iniciais apresentados, têm-se como próximo tópico, apontamentos que indicarão o objetivo desta pesquisa no contexto da QEE.

#### **1.2 - Objetivos da pesquisa**

Esta pesquisa pode ser caracterizada por quatro principais etapas, descritas a seguir.

A primeira etapa consiste num estudo teórico sobre a Teoria de *Wavelet*, reportando-se inicialmente à primeira menção em *Wavelet* no ano de 1909. Porém, com enfoque nos grandes avanços que ocorreram em meados da década de 80, indo até os dias atuais, mostrando fatos importantes que fazem com que as *Wavelets* sejam muito utilizadas atualmente.

A segunda etapa consiste na implementação de um algoritmo baseado na Teoria de *Wavelet* para tratamento de sinais com anomalias, relacionados com a QEE.

A terceira etapa desta pesquisa abrange a comparação da TW com a Transformada de *Fourier* (TF). Os resultados obtidos através do algoritmo com a utilização da TW servirão de base para realizar estudos de analogia com a TF para determinados sinais e, quando possível, realizar comparações no sentido de melhoria da metodologia proposta.

A quarta e última etapa dos estudos consiste em validar o algoritmo, ou seja, testar o mesmo frente a diversos casos relacionados com a QEE. Com este intuito, os *softwares* ATP

(*Alternative Transients Program*) [13] e *Pspice* [14], bem como dados reais provenientes de concessionárias de energia elétrica foram utilizados.

### 1.3 - Disposição do texto que segue

Para o capítulo 2 descreve-se uma detalhada revisão bibliográfica, aqui denominado “Estado da Arte”, apresentando as publicações mais significativas nesta área e de interesse para o desenvolvimento do projeto, com alguns comentários pertinentes.

No capítulo 3 apresenta-se uma revisão da ferramenta matemática utilizada, neste caso a Transformada *Wavelet*, vislumbrando uma abrangente fundamentação teórica. Também são apresentados alguns pontos importantes sobre Transformada de *Fourier*, decorrendo em algumas comparações entre as ferramentas (TW x TF). Por fim, um estudo criterioso da ferramenta e o método de construção de uma *wavelet* mãe.

No capítulo 4 apresenta-se o sistema de distribuição simulado, suas principais características e dados relevantes. Através deste sistema foi criado um banco de dados com diversos distúrbios, em diferentes situações e amplitudes.

No capítulo 5, mostra-se em linhas gerais os procedimentos adotados para o desenvolvimento do algoritmo de detecção, localização no tempo e classificação. Neste são detalhados todos os pontos e utiliza-se da Transformada de *Fourier* para estimar alguns dos componentes de frequência e também para realizar uma classificação dos distúrbios.

No capítulo 6 apresentam-se os testes realizados sobre os pontos descritos no capítulo anterior, ou seja, da aplicação da metodologia desenvolvida. E no capítulo 7 é realizada a validação do algoritmo proposto mediante situações reais de algumas concessionárias de energia elétrica.

No capítulo 8 descreve-se a interface gráfica que foi criada para o algoritmo desenvolvido. Este capítulo mostra esta interface possibilitando sugestões para sempre melhorar e atender as necessidades atuais, principalmente em relação ao aspecto didático.

Finalmente, no capítulo 9, concluem-se os estudos realizados e delineiam-se alguns pontos que podem ser continuados neste ramo de pesquisa, apontando alguns tópicos que podem ser derivados do aproveitamento do que foi abordado até então.



## 2 - O ESTADO DA ARTE

São apresentadas neste capítulo, algumas das pesquisas na área de QEE que utilizam a TW, suas metodologias recentemente publicadas e alguns métodos novos de classificação dos distúrbios.

Destaca-se inicialmente, referindo-se a aplicação da teoria de *Wavelet* na análise da QEE, o trabalho de Santoso et al. [15] que procuraram uma abordagem para detectar e localizar vários distúrbios relacionados à QEE. Eles diferenciaram os distúrbios em duas categorias: transitórios rápidos e lentos. Para transitórios rápidos, as formas de onda são caracterizadas por pulsos, variações rápidas e abruptas em um tempo de curta duração. Para isto, foram escolhidas como *Wavelet* mãe a *Daubechies* de ordem quatro e seis (db4 e db6). Devido a seus suportes compactos, são melhores na detecção e localização destes distúrbios, pois se anulam completamente fora de um intervalo finito de tempo, conforme destacam os autores. Para transitórios lentos, as formas de onda são caracterizadas por mudanças suaves. Segundo os autores, as *Wavelets* mãe db4 e db6 não são adequadas para captar tais distúrbios. Com isso são usadas as *Wavelets* mãe db8 e db10, pois o intervalo de integração é longo o suficiente para a *Wavelet* captar essas mudanças lentas. Os sinais foram gerados usando códigos computacionais e uma taxa amostral de 2,56 kHz. Ao final, as *wavelet* mães utilizadas nestas simulações foram as db4 e db10. Os distúrbios analisados foram transitórios, afundamentos de tensão e distorções harmônicas. No primeiro distúrbio analisado a *wavelet* mãe que melhor se adequou foi a db4. No caso de afundamentos de tensão, a melhor resposta proveio da db10, por apresentar o comprimento do suporte maior em relação à db4. Já nas

distorções harmônicas, foram analisadas harmônicas de ordem inferior a 25 e somente de ordem ímpar. Uma onda senoidal, apenas com a frequência fundamental de 60Hz, tem uma DHT (Distorção Harmônica Total) de 0%, o que seria ideal. Entretanto, foi encontrando nestes testes uma taxa de DHT de 11,49%. Com as respostas, foi possível perceber que a *wavelet* detectou o início e término do evento, porém, não identificou os conteúdos de harmônicos inclusos no sinal. Na comparação dos resultados a db10 superou a db4 também no caso de harmônicos.

Em seu próximo trabalho, Santos et al. [16] utilizaram a Análise Multiresolução (AMR), com a db4 como *Wavelet* mãe, para detectar e localizar vários tipos de distúrbios que estão relacionados com a QEE. A idéia chave do trabalho está na decomposição de um dado sinal distorcido em outros sinais que representam uma versão de aproximação (conteúdo de baixa frequência) e uma versão de detalhes (conteúdo de alta frequência) do sinal original. Os autores descreveram também a base de um possível esquema de classificação de distúrbios utilizando coeficientes quadrados da TW, que extraem características dos diferentes distúrbios.

Chaari et al. [17] apresentam a TW e mostram que tal ferramenta é eficiente e útil para sistemas de distribuição. A TW de um sinal consiste na medida de similaridade entre o sinal e um conjunto de versões transladadas e escaladas de uma determinada *wavelet* mãe. A *Wavelet* mãe é uma seleção de funções oscilatórias com rápido amortecimento. A TW neste estudo é usada para analisar transitórios de sinais falta-terra, nível tensão de 20 kV, gerados pela disposição do *software* EMTP (*Electromagnetic Transients Program*). As *wavelets* podem ser empregadas para análise de redes frente a situações de faltas, podendo ser implementadas em tempo real na proteção, como por exemplo, nos relés digitais atualmente disponíveis.

Em [18], trata-se do uso da TW para análise de distúrbios no SEP. Os autores explicam que sinais não periódicos necessitam de uma técnica matemática mais poderosa que

a TF, para sua correta análise. A TW translada a função no domínio do tempo em representações localizadas não apenas em frequência, mas também no tempo. Esta teoria é aplicada para caracterizar vários eventos como transitórios oriundos do chaveamento de banco de capacitores, afundamentos e interrupção de tensão. Para isto são utilizadas como *wavelet* mãe a família *Daubechies* e a *wavelet* de *Haar*.

Robertson et al. [19] utilizam a TW como um método para analisar transitórios eletromagnéticos associados às situações de faltas e chaveamentos de bancos de capacitores. A proposta pelo até então novo método utilizando TW é a de capturar e analisar os dados que são característicos de uma fase de tensão de uma linha de transmissão trifásica. Estes dados compreendem situações de falta e de chaveamento de banco de capacitores, simulados via *software* EMTP, com uma taxa amostral de 10 kHz.

Em [20], os autores apresentam um estudo de caso utilizando TW aplicada a QEE. Um sistema industrial real de 63 kV que alimenta três grandes cargas foi investigado e em seguida este mesmo sistema foi simulado via EMTP. Este estudo foi dividido em quatro partes principais: definição e simulação do banco de capacitores do sistema de potência industrial através do EMTP; análise dos transitórios simulados através da TW; comparação com as medidas em campo através da TW e comparação com o método de análise de transitórios. A taxa amostral utilizada foi de 6,4 kHz sem considerar o filtro *anti-aliasing*, sendo a frequência do sistema de 50 Hz. O objetivo principal foi analisar transitórios devido ao chaveamento de filtros de compensação harmônica. A representação *wavelet* foi disponibilizada em três dimensões. Esta representação permite visualizar a magnitude do coeficiente *wavelet* em função do tempo e da frequência.

Huang et al. [21] propuseram uma técnica que utiliza a TW para a classificação de distúrbios relacionados com a QEE. Esta técnica utiliza a *Wavelet* mãe de Morlet para a decomposição de um dado sinal em AMR, extraindo deste as componentes de frequência de

60 e 600 Hz. A componente de frequência de 60 Hz indica variações de amplitude no sinal, classificando distúrbios entre afundamento, elevação e interrupção momentânea de tensão. Já a componente de 600 Hz indica a presença de pequenas variações transitórias, classificando distúrbios como oscilações transitórias. Desta forma, a técnica descrita pelos autores, além de detectar a presença de distúrbios, também foi capaz de classificar os mesmos em suas diferentes formas.

Angrisani et al. [22] apresentaram um método que automaticamente detecta e classifica sinais transitórios. Este método é baseado na *Wavelet Network* (WN), que combina a habilidade da TW na análise de sinais não-estacionários com a capacidade de classificação das RNAs. A WN pode ser considerada como uma rede neural multicamadas em que os neurônios da primeira camada são alimentados pelas saídas dos nós da TW. A classificação dos distúrbios sugeridos se divide numa seqüência de estágios: extração das características, seleção das características e classificação propriamente dita. A metodologia proposta foi dividida numa série de fases, tais como: estudo dos transitórios aplicados aos testes, confecção do detector e classificador de transitórios, implementação, treinamento, verificação do desempenho e aplicação para diferentes transitórios. A atenção do método foi focada em alguns distúrbios associados a um SEP, em particular, afundamentos, interrupções instantâneas, transitórios oscilatórios e impulsivos. Dois módulos podem ser caracterizados para classificação. No primeiro, módulo A, a WN é capaz de detectar e localizar quedas de tensão ou interrupções. A WN deste módulo tem três camadas: a camada de entrada, a camada intermediária e a camada de saída contendo respectivamente 8, 17 e 4 neurônios. O módulo B classifica transitórios oscilatórios e impulsivos e é também formado por três camadas. Uma camada de entrada, intermediária e de saída, constituídas por 4, 9 e 1 neurônio respectivamente.

Gaouda et al. [23] introduziram a TW como uma poderosa ferramenta para a análise de sinais, sendo capaz de detectar e localizar alguns distúrbios que ocorrem no sistema elétrico. A detecção e a localização dos diferentes problemas de QEE são feitas através da técnica de AMR em *Wavelet*, utilizando para isso a *Wavelet* mãe db4. Esta técnica decompõe o sinal em diferentes níveis de resolução possibilitando, desta forma, detectar qualquer anormalidade no sinal original por menor que seja pela sensibilidade decorrente da resolução. É proposto também um método de classificação para tais distúrbios, baseado no Teorema de *Paserval* que permite definir uma curva de desvio padrão em 12 níveis de decomposição. A técnica de AMR mostrou habilidade para extrair importantes informações do sinal distorcido analisado, podendo com isso classificar corretamente os distúrbios sem a presença de incertezas ou imperfeições, comprovando a eficácia do método proposto. Conforme apontado pelos autores à técnica aprimorada pode ser usada para mitigar futuros problemas de QEE.

Uma comparação de ferramentas para análise da QEE é proposta neste artigo [24]. Tal comparação é realizada entre TF, Transformada *Wavelet* Contínua (TWC), AMR e Transformada Quadrática (TQ), que são ferramentas de representação tempo-frequência. A utilização da TWC teve como base (*Wavelet* mãe) uma função complexa similar à função base de Morlet e implementada usando um algoritmo recursivo que é descrito pelos autores. A AMR teve como *Wavelet* mãe a função *Feauveau*. Quatro tipos de distúrbios foram escolhidos para este estudo, a saber: afundamentos de tensão, transitórios oscilatórios, distorções harmônicas e *flicker*. Desta forma, cada um desses distúrbios é analisado de forma independente por cada uma das ferramentas citadas. A taxa amostral utilizada foi de 10 kHz. Uma comparação qualitativa dos resultados apresenta vantagens e desvantagens de cada técnica de processamento de sinal aplicada para os distúrbios de tensão analisados. Através deste trabalho os autores apontaram como ferramentas seguras para detectar distúrbios e indicar o conteúdo de frequência existente em tais distúrbios, a AMR e a TQ. O estudo

evidencia ainda a TWC como um método confiável para detectar e medir afundamentos de tensão, *flicker* e transitórios na análise da QEE.

Huang et al. [25] utilizaram a TW como o mais eficiente modelo de monitoramento de diversos distúrbios temporais. Tal método foi testado na detecção de vários e distintos distúrbios reais e simulados. Os mesmos comentam algumas das diferenças entre a TF e a TW, tais como, quando da ocorrência de um distúrbio impulsivo instantâneo, a TF pode contribuir com informações de frequência, porém informações de tempo, como localização serão perdidas. No caso da TW, ambas as informações de tempo e frequência podem ser obtidas. Os distúrbios analisados foram divididos em dois conjuntos. No primeiro foram analisados distúrbios como afundamento e elevação de tensão, interrupção momentânea e transitório oscilatório. No segundo foram analisadas distorções harmônicas provindas da inserção de fornos a arco. Tais distúrbios foram gerados computacionalmente e os resultados obtidos foram satisfatórios comprovando a eficiência da TW, tendo como *wavelet* mãe a função de base Morlet.

Zheng *et al.* [26] fazem a modelagem de componentes do SEP tais como resistor, indutor e capacitor no domínio *Wavelet* dispondo da TWD. Os autores afirmam que esta técnica pode ser implementada dispondo-se de qualquer *Wavelet* mãe ortogonal. Os modelos são classificados em transitório e em regime permanente de acordo com as diferentes propostas de análise. O modelo de regime permanente pode ser aplicado para análises de harmônicos e respostas tempo-frequência.

Santoso et al. [27] apresentam uma fundamentação teórica do método de classificação de distúrbios através de redes neurais. O método de reconhecimento proposto utiliza *wavelets* em conjunto com um grupo de redes neurais. Os resultados da rede são integrados usando como método de tomada de decisão, um simples método de votação. Neste trabalho, apresentou-se a fundamentação teórica necessária para construir a rede classificadora baseada

em *wavelet*. A entrada para o classificador consiste num sinal com distúrbio no domínio do tempo. Este sinal é processado via TW, em seguida direcionado para o processamento da rede neural que irá classificá-lo. No seguimento, tem-se o bloco de tomada de decisão. Como resposta, o processo aponta a classificação do ocorrido e o seu respectivo grau de confiança, que nesta primeira parte do trabalho variou entre 85 e 91%. A segunda parte do trabalho [28], ou seja, quando da aplicação e implementação de toda a teoria estudada na parte 1, são apresentados os resultados que comprovaram uma eficiência maior que 90%, com um índice de ambigüidade de distúrbios menor que 10%, para os seis tipos de distúrbios analisados. Vale lembrar que a taxa amostral utilizada nestes dois artigos foi de 15.375 Hz.

Poisson et al. [29] propuseram a aplicação da TWC para detecção e análise de afundamentos de tensão e transitórios. Um algoritmo recursivo é usado e implementado computacionalmente no plano tempo-frequência. Características do sinal investigado são medidas no plano referenciado. Uma comparação entre as características medidas e os valores reais detecta a presença de distúrbios no sinal analisado e classifica o tipo de distúrbio manifestado. São apontados também os valores de duração e a magnitude dos afundamentos de tensão. Os transitórios são localizados na largura do sinal. O processo de detecção dos distúrbios tanto de afundamentos como de transitórios se dá através da comparação de cada pico em alta frequência com um valor normal. Cada pico que excede o valor real é considerado como um sinal descontínuo e, conseqüentemente, passa a ser observado. Para tanto existem alguns valores que foram adotados como referência, tais como, 50, 350 e 650 Hz.

Karimi et al. [30] mostraram em seus estudos uma proposta para identificar os distúrbios de tensão e classificar o tipo de evento de maneira *on-line*. A detecção dos distúrbios proposta é baseada na simulação digital no domínio do tempo de um sistema de distribuição usando o *software* PSCAD/EMTDC. Todo o processo de classificação consiste

em um sistema de quatro blocos: geração do sinal de erro, análise deste sinal usando TW, extração das características do sinal e a tomada de decisão. No primeiro bloco ocorre a subtração entre o sinal em regime permanente e o sinal com distúrbio, gerando desta forma o sinal de erro. No segundo bloco, utiliza-se a TW, sendo esta transformada apropriada aos sinais a serem analisados. Neste mesmo bloco, a *wavelet* mãe com suporte compacto utilizada, foi uma *spline* linear da família *Battle-Lemarie*. Já no terceiro bloco, o processo de extração das características se inicia quando o sinal de erro excede um limiar de 10% da tensão nominal. O último bloco é destinado à classificação do distúrbio com certo grau de precisão, utilizando como função de probabilidade o critério de *Máxima Verossimilhança*. Os autores apresentaram em [31] uma continuação destes estudos, onde avaliaram o desempenho experimental do método para um sistema de baixa e média tensão, ou seja, 120V e 12kV respectivamente. Os resultados foram satisfatórios atendendo às expectativas descritas por eles.

Na primeira parte do tutorial, Kim e Aggarwal [32] explicam as vantagens que a TW possui sobre a TF para análise de sinais, por possuir a capacidade de analisar simultaneamente informações de tempo e frequência. Este tutorial é um bom guia sobre *Wavelets* para iniciantes. Uma *wavelet* é descrita pelos autores, como uma pequeníssima onda no sentido de ser de curta duração e com energia finita. Os autores fazem comparações entre a TW e a TF no sentido de que em *Fourier*, entre outros fatos, é necessária uma periodicidade das funções no tempo envolvidas e as funções de base são somente seno e cosseno, enquanto que a *Wavelet* possui uma vasta gama de funções de base, as chamadas *wavelet* mães. Porém é enfatizado neste tutorial que o propósito não é substituir as aplicações de *Fourier* em sistemas de potência, mas sim introduzir, em certos casos, a TW. O tutorial utiliza nesta primeira parte as *wavelet* mães ortogonais de *Haar*, *Symmlet* e *Daubechies* e a *wavelet* não-ortogonal de *Morlet*. Em seguida, implementa-se a teoria da TWD dispondo do *software Matlab*®,

considerando um sinal transitório devido a um chaveamento de capacitores e se verifica a eficácia que pode obter com a transformada, onde esta, quando usada adequadamente, é capaz de detectar o distúrbio e quantificar a frequência em cada nível de detalhe, baseado na AMR.

Na segunda parte do tutorial, [33], tem-se uma seqüência à teoria *Wavelet* e a AMR, onde o número de decomposições em *Wavelet* é determinado por alguns fatores, tais como, tamanho do sinal original, *wavelet* mãe escolhida e nível de detalhe requerido. As *wavelet* mães utilizadas nesta segunda parte do tutorial foram *Daubechies*, *Morlets*, *Coiflets* e *Symlets*. Desta forma, foram discutidos alguns problemas relacionados à QEE, entre eles, a localização e a proteção de faltas em sistema de potência, além da detecção de distúrbios de QEE. Nesta aplicação, as *Wavelet* mães que apresentaram melhores resultados foram as *Daubechies* de ordem 4 (db4) e de ordem 6 (db6), bem como a *Symlet* de ordem 5, empregando-se uma taxa amostral de 3840 Hz, o que corresponde a 64 amostras por ciclo.

O próximo trabalho diz respeito a uma ferramenta automática de detecção na análise dos distúrbios que utiliza *wavelets* e um sistema neural do tipo LVQ (*Learning Vector Quantization*) [34]. Para treinamento da rede neural é utilizado um vetor proveniente da diferença entre os coeficientes de detalhes do nível de maior energia do sinal original e os coeficientes de detalhes neste mesmo nível de um sinal puramente senoidal. Os autores utilizaram a TW juntamente com RNA para analisar sinais não estacionários, ou seja, distúrbios do sistema, detectando automaticamente, compactando e em seguida classificando-os. Utilizando a TWD, o processo de reconstrução é obtido através do sinal com e sem distúrbio, usando uma redução do número de coeficientes. Com a estrutura da RNA é possível classificar distúrbios típicos encontrados no SEP. A grande dimensão do vetor de entrada é uma das principais dificuldades presentes na fase de treinamento das redes, fase durante a qual um grande número de conexões deverá ter seus pesos atualizados. O treinamento de redes muito grandes ou com grande quantidade de dados, apesar dos algoritmos de

treinamento ser mais eficazes, tende a ser muito longo. Algumas vezes são necessários vários ciclos para alcançar níveis de erros aceitáveis.

Resende e Penna [35] apresentam uma metodologia que analisa a tensão num barramento e detecta, localiza e classifica possíveis distúrbios da QEE ocorridos em tal barramento. Para isso, utilizam a TWD como técnica base para tais estudos, sendo a db4 a *wavelet* mãe utilizada para a análise. A classificação é composta por um processo de cinco etapas, as quais são detalhadas a seguir. O *software Matlab*® foi utilizado como plataforma para a implementação do programa:

- Etapa 1: Decomposição do sinal com distúrbio em diferentes níveis de resolução;
- Etapa 2: Determinação do quadrado dos coeficientes calculados;
- Etapa 3: Cálculo da energia concentrada em cada nível de decomposição utilizando o teorema de *Paserval*;
- Etapa 4: Repetição das 3 etapas anteriores para um sinal senoidal puro;
- Etapa 5: Comparação das energias concentradas em cada um dos níveis entre o sinal com distúrbio (etapa 3) e o sinal senoidal (etapa 4). Esta comparação é realizada segundo a equação a seguir.

$$dp(j)(\%) = \left[ \frac{en\_dist(j) - en\_ref(j)}{en\_ref(j)} \right] * 100 \quad (1)$$

Onde:

- $j$  é o nível da transformada;
- $dp(j)(\%)$  é a diferença percentual entre as distribuições das energias dos sinais com distúrbio e de referência, em cada nível;
- $en\_dist(j)$  é a energia concentrada em cada nível da transformada *wavelet* do sinal com distúrbio;

- $en_{ref}(j)$  energia concentrada em cada nível da transformada *wavelet* do sinal de referência;
- $en_{ref}(7)$  energia no nível 7 do sinal senoidal puro (por conter as informações relativas a frequência fundamental).

Com este método foi possível classificar os diversos distúrbios de QEE ocorridos no barramento de um determinado sistema, definindo um padrão característico para cada tipo de distúrbio analisado.

A TWD foi utilizada por Yang e Liao [36] para a extração de ruídos de um dado sinal para então ser analisado. Tal análise tem como objetivo detectar e localizar distúrbios existentes no SEP relacionados com a QEE. Uma vez que a presença de ruídos pode vir a causar dificuldades na detecção dos eventos, a extração deste é de grande valia. A TWD dispondo-se da técnica de AMR é empregada pelos autores para eliminar a presença de ruído no sinal que caracteriza o distúrbio, podendo desta forma ser criada uma ferramenta de monitoramento do SEP para detectar e localizar com maior eficiência distúrbios como afundamentos e elevações de tensão e transitórios.

Um sistema *Neuro-Fuzzy* classificador de distúrbios relacionados com a QEE foi apresentado por Huang *et al.* [37]. O sistema classificador utiliza uma RNA com treinamento competitivo e um refinamento com o algoritmo LVQ, que compreende um modelo supervisionado da rede de Mapeamento Auto-Organizável. O algoritmo usando a técnica *Fuzzy* é utilizado para otimizar o sistema contendo a RNA. Tal sistema classificador utiliza como entrada de dados, as características do sinal original extraída através da AMR. A *Daubechies* de quarta ordem foi utilizada como *Wavelet* mãe. Treze tipos de distúrbios foram usados como os tipos de padrões de entrada para o Sistema *Neuro-Fuzzy* e, segundo os autores, estes foram classificados com eficiência média próxima a 93%.

Neste trabalho [38], os autores apresentam uma pesquisa que envolve inteligência artificial e ferramentas matemáticas avançadas para aplicação em QEE. Um grande número de ferramentas é mostrado, destacando-se os sistemas inteligentes (lógica *fuzzy*, redes neurais artificiais e algoritmos genéticos). Um enfoque especial é dado à TW que também pode ser utilizada na compressão de dados. Dentre algumas aplicações da lógica *fuzzy*, podemos citar: diagnóstico de problemas envolvendo QEE, classificação de distúrbios em QEE, gerenciamento e controle de dados. Embora sistemas inteligentes consumam tempo em seu desenvolvimento, eles podem ser aplicados na análise de harmônicos, localização e análise de faltas e identificação de eventos de QEE. RNA é a ferramenta que apresenta um maior tempo de experimentação em Inteligência Artificial, podendo ser utilizada na identificação e reconhecimento de eventos de QEE em conjunto com TW, estimação e análise de distorções harmônicas. Em se tratando de algoritmos genéticos, uma das principais contribuições é à busca de soluções ótimas na estimação de componentes harmônicas.

Em [39] é apresentada uma metodologia de detecção, localização e identificação de distúrbios de sinais elétricos utilizando TWD e RNA do tipo MLP (*Multilayer Perceptrons*) para classificar quatro tipos de distúrbios – interrupção momentânea, picos de tensão, harmônicos e *flicker* – e também para acusar a ausência destes quando cabível. Para a classificação dos dados através da Rede Neural foram utilizados no seu treinamento apenas os coeficientes de detalhes do primeiro nível de decomposição, desprezando-se todos os demais. Esta não é uma boa estratégia visto que os coeficientes *wavelets* dos demais níveis desprezados também contêm informações, cuja relevância depende intrinsecamente do modelo do sinal decomposto.

Em [6] é mostrada a caracterização dos eventos presentes no sistema de distribuição através da TF e TW. Neste trabalho a TF é utilizada para caracterizar os fenômenos presentes em regime permanente, enquanto a TW é aplicada nos fenômenos transitórios. Após

determinar as características dos diversos distúrbios utilizando estas ferramentas matemáticas, e pretendendo a identificação dos eventos no SEP, utiliza-se um sistema especialista baseado em regras como paradigma de raciocínio. Estas características extraídas das TF e TW são incorporadas na base de dados de conhecimento do sistema especialista.

Abdel-Galil et al. [40] propuseram um método automático constituído de dois estágios de reconhecimento baseado no monitoramento dos nós de um sistema de distribuição para QEE. No primeiro estágio, os eventos de QEE são rastreados, detectados e então classificados. A função do segundo estágio é identificar a causa do distúrbio e sua localização. O procedimento é capaz de detectar um grande número de distúrbios de QEE. As formas de ondas de tensão foram obtidas através de medições em vários pontos de interesse de um sistema de distribuição industrial. Para extrair características importantes foi utilizada a *wavelet* mãe db4 e uma taxa amostral de 15.360 Hz, a qual corresponde a 256 amostras por ciclo.

Neste trabalho [41], os autores apresentam uma técnica de compressão para dados com distúrbios de QEE utilizando TWD. Esta técnica de compressão pode ser utilizada tanto no monitoramento da QEE quanto na proteção remota do SEP. Esta apresenta a decomposição de um determinado sinal até certo nível, evidenciando os coeficientes *wavelets*, e em seguida, quando necessário, reconstruindo o mesmo. Um fator importante ressaltado pelos autores é a escolha da *wavelet* mãe, pois esta afeta na qualidade do sinal reconstruído. Para isto foi utilizado um conjunto de 22 *wavelets* mãe, dentre elas, dez da família *daubechies*, cinco da família *coiflets* e sete da família *Symlets*. Após um criterioso estudo, evidenciou-se que a *Symlet* de ordem sete apresentou melhores resultados para este caso. Para este estudo foi utilizado o critério MDL (*Minimum Description Length*), que permite selecionar não apenas o filtro *wavelet* adequado, mas também o melhor número de coeficientes *wavelets* retidos para a reconstrução do sinal.

Um *software* para o monitoramento automático de um SEP é proposto por Kezunovic e Liao [42]. A finalidade de tal *software* é detectar e classificar automaticamente distúrbios presentes em um sinal monitorado de tensão. A TW, juntamente com a TF, é utilizada para a extração de características dos distúrbios. Tais características constituem a entrada de dados de um módulo do *software* que é baseado em um sistema *Fuzzy* que classifica o distúrbio em sub-módulos distinguindo-o entre oito tipos referenciados. A porcentagem de acerto para o sistema *Fuzzy* desenvolvido foi, segundo os autores, de 99%. Outro módulo introduzido pelos autores no *software* traz o objetivo de avaliar a sensibilidade de equipamentos na presença de mudanças na forma de onda. Segundo os autores, através deste módulo, o *software* é capaz de explicar porque uma carga específica falhou durante um afundamento de tensão, ou predizer a eficiência de uma carga durante um evento em particular. Para o caso de um afundamento de tensão, os autores introduziram um módulo no *software* para a localização da falta causadora de tal evento. Sendo assim, os autores apresentam um esquema que tende a facilitar o estudo de eventos relacionados com a QEE.

Chen Xiangxun [43] propõe uma nova metodologia baseada na TW para detectar, localizar, quantificar e classificar importantes distúrbios de curta duração relacionados à QEE, tais como afundamento e elevação de tensão, interrupção momentânea e transitórios oscilatórios. Explica-se que muitos autores utilizam a curva de desvio padrão em diferentes escalas, para realizar a classificação dos fenômenos. Por esta razão, o autor preferiu inovar no método, extraindo características únicas dos distúrbios a partir de informações tanto no domínio do tempo como no domínio da frequência, realizando uma conversão de binário para decimal a ser aproveitada para a classificação. Neste artigo foi utilizada uma *wavelet* mãe biortogonal construída baseada no teorema de *Vetterli-Herley-Sweldens*. Isto, após se comprovar que *wavelets* ortogonais complexas com suporte compacto e *wavelets* biortonormais são melhores que as tradicionais reais e complexas que são usadas

frequentemente em SEP. Tal afirmação decorre do fato de que as *wavelet* mães da família *Daubechies*, desde a db1 até db45, e várias *wavelets* biortonormais de *Daubechies-Cohen-Feauveau*, não são adequadas para detectar e localizar afundamentos e elevações de tensão quando da ocorrência de distorções harmônicas. A classificação é realizada pela construção de um vetor característico com cinco elementos binários, por um código binário, e então convertido para um número decimal. Como esta conversão gera 32 números decimais diferentes, é possível distinguir mais de 5 tipos de distúrbios de curta duração. Porém, neste trabalho, o autor, limitou-se aos 5 distúrbios mencionados e verificou a eficiência do método, não havendo ambigüidade. Como conclusão, pode-se afirmar que este método é rápido e eficaz, podendo ser expandido para mais distúrbios associados à QEE.

Neste artigo [44] utiliza-se a TWD juntamente com um modelo de redes neurais artificiais probabilísticas (RNAP) com intuito de classificar distúrbios. Primeiramente é utilizado a AMR e o teorema de *Paserval* para extrair características do sinal distorcido. Em seguida, utiliza-se a RNAP para classificar o tipo do distúrbio manifestado diante das características de frequência, duração e energia. Através do Teorema de *Paserval*, o número de característica do sinal distorcido pode ser reduzido sem perda de suas propriedades, diminuindo também o esforço computacional e a memória. Os distúrbios de afundamento, elevação e interrupção de tensão, distorções harmônicas e oscilações transitórias foram classificadas por esta metodologia. Para isto foi utilizada como *wavelet* mãe a Db4. Para esta implementação foi utilizado o *Toolbox* do *Matlab*® referente a sistemas de potência, com uma taxa amostral de 256 amostras por ciclo.

Saleh e Rahman [45] mostram um método para melhora da QEE empregando TW. Um Restaurador de Tensão Dinâmico (RTD) é usado para compensar o distúrbio de afundamento de tensão e manter a tensão de carga. As tensões de entrada e saída do RTD são controladas pela saída do banco de filtros *wavelet*. As aproximações controlam a tensão de

entrada do conversor e o controle do inversor é feito através dos detalhes. Isso acontece, no caso do conversor, da seguinte forma: a tensão de entrada do RTD é a diferença entre o primeiro nível de aproximação da tensão da linha e o primeiro nível de aproximação da tensão de referência (sinal senoidal). Diversos tipos de distúrbios foram simulados para testar o esquema de controle proposto, dentre eles, distorções harmônicas, afundamentos e interrupções de tensão. Este esquema de controle baseado em *wavelet*, usando a TWD, mostrou resultados satisfatórios na condição de restaurar a tensão rápida e precisamente. A *wavelet* mãe utilizada neste trabalho foi a Db4, que sempre é uma escolha de grande importância quando se quer bons resultados.

Neste artigo [46], os autores comentam que a QEE vêm ganhando mais destaque entre diversos setores, entre eles, os setores de serviços, público e de consumo. Um meio de melhorar a QEE é iniciar pela identificação sistemática dos distúrbios mais frequentes que se apresenta como um grande desafio. Um método tradicional utilizando TF tem muitas desvantagens associadas às perdas de características no domínio do tempo depois da transformação. A TW é uma técnica que apresenta resultados promissores no tratamento de sinais em curto intervalo de tempo com componentes de alta frequência e também em longos intervalos com baixa frequência. Neste trabalho foram utilizadas duas técnicas apontando as vantagens das duas transformadas. Desta forma a TW é usada para extrair informações no domínio do tempo de componentes de alta frequência, enquanto que a TF é usada para prover informações precisas em baixa frequência. O uso da técnica de AMR se faz necessário, pois os detalhes e aproximações serão utilizados na determinação dos distúrbios. Inicialmente é utilizado a TW, com isso o sinal é decomposto em detalhes e aproximações. O detalhe é usado para obter a duração do distúrbio e a aproximação será enviada para a TF, neste caso mais especificamente a FFT (*Fast Fourier Transform*), para obter o espectro de frequência do sinal distorcido.

Basu e Basu [47] apresentam uma técnica para identificar e classificar distúrbios. Para isto, utilizam a TWC e como *wavelet* mãe, a função *Littlewood-Paley* (L-P). Os distúrbios analisados foram distorção harmônica, afundamento de tensão instantâneo, transitórios oscilatórios (causados pelo chaveamento de bancos de capacitores) e achatamento da forma de onda. Estes eventos foram tomados de um sistema com magnitude de tensão de 230 V e frequência fundamental de 50 Hz. Tais dados foram coletados considerando 512 amostras por ciclo. O algoritmo considera que coeficientes *Wavelets* com altos valores apontam um determinado distúrbio de QEE, enquanto que baixos valores são indicativos de ruídos no sistema.

O trabalho proposto por Lira et al. [48] classifica automaticamente distúrbios elétricos baseado em RNA, utilizando no treinamento sinais reais de tensão coletados através de registradores digitais de perturbação existentes no sistema de monitoração da CHESF (Companhia Hidro Elétrica do São Francisco). O sinal de tensão perturbado é coletado a uma taxa de amostragem de 128 amostras por ciclo na frequência de 60 Hz durante 14 ciclos. O sinal de tensão real coletado é processado em duas etapas. Inicialmente é decomposto através da transformada *wavelet* até o quinto nível de resolução, extraíndo suas principais características. Em seguida os coeficientes *wavelets* são processados via Análise de Componentes Principais (ACP) que opera projetando os dados linearmente em um subespaço de menor dimensão (a idéia central da ACP é remover ou combinar características altamente correlacionadas). A classificação realizada pela combinação de três redes MLP com diferentes arquiteturas é baseada nas características extraídas a partir do pré-processamento do sinal de tensão. O algoritmo *Resilient Backpropagation* foi utilizado no treinamento das redes. Na combinação das redes, a cada um dos seis nós de saída, aplicou-se à média entre as três saídas das redes individuais. A decisão final do classificador corresponde à saída combinada de maior valor. Como resultado, além da situação de regime permanente, foram considerados e

classificados nos testes cinco tipos de distúrbios, a saber: afundamentos, elevações e interrupções de tensão, harmônicos e transitórios oscilatórios.

Em [49] é proposto uma metodologia de identificação e classificação de distúrbios de tensão. Esta metodologia analisa tanto distúrbios caracterizados como sendo de baixa frequência, como distúrbios de alta frequência. Para isto são utilizadas as ferramentas TW e RNA. A db4 é a *wavelet* mãe utilizada como função de base da TW. Com relação às RNAs foram utilizadas quatro arquiteturas diferentes: MLP, Kohonen (mapeamento auto-organizável), Bayesian (método estatístico) e SMV (*Support Vector Machines*). A taxa amostral utilizada foi de 7680 Hz, que representa 128 amostras por ciclo. De acordo com as metodologias empregadas, as redes que melhor apresentaram resultados foram a MLP e a SMV com taxa de acertos superiores a 96%.

### 3 - TRANSFORMADA WAVELET

A análise de dados de acordo com escalas variáveis no domínio do tempo e da frequência é a idéia básica da utilização da teoria *Wavelet*.

O tema *Wavelets*, muito desenvolvido desde a década de 80, é formado pela união de idéias em áreas como matemática pura e aplicada, física, computação e engenharia. A primeira menção a *Wavelets* apareceu no apêndice de A. Haar, em 1909, como descrito por Haar [50] *apud* Lima [51]. Porém Ingrid Daubechies apresenta a história das *Wavelets* como uma árvore com raízes profundas e em várias direções. Neste contexto, o tronco corresponderia ao rápido desenvolvimento da ferramenta na segunda metade da década de 80, apoiada pelos esforços de pesquisadores de diferentes campos. A copa da árvore, com seus muitos ramos, corresponderia às diferentes direções e aplicações nas quais *Wavelets* têm se tornado a ferramenta matemática base ao lado de outras técnicas [52]. Muitos pesquisadores em áreas distintas, sem no entanto uma devida comunicação e repasse das inovações, foram responsáveis por muitos avanços nesta área [53].

Uma propriedade das *Wavelets* de Haar diz respeito a estas possuírem suportes compactos, não serem continuamente diferenciáveis, o que de certa forma limita a sua aplicabilidade. As *Wavelets* de Haar continuaram a ser a única base ortonormal de funções *Wavelets* conhecidas, até que em 1985, Stephane Mallat proporcionou às *Wavelets* um impulso através de seu trabalho em processamento digital de imagens e, inspirado nestes resultados, Y. Meyer construiu a primeira *Wavelet* suave [51]. Ao contrário das *Wavelets* de

Haar, as *Wavelets* de Meyer são continuamente diferenciáveis, porém não possuem suportes compactos.

Poucos anos mais tarde, Ingrid Daubechies usou dos trabalhos de Mallat para construir um conjunto de bases ortonormais de *Wavelets* suaves, com suportes compactos [51]. Estes trabalhos são os alicerces das aplicações atuais de *Wavelets*.

### 3.1 - Transformada de Fourier x Transformada *Wavelet*

Inicialmente podemos fazer uma comparação entre as *wavelets* com as ondas senoidais, que são as bases da análise de *Fourier*. Através da Figura 1 podemos visualizar que as senóides são suaves, previsíveis e não tem duração limitada, ou seja, elas se estendem de menos infinito a mais infinito, com sua energia sendo também infinita. Em contra partida, as *wavelets* tendem a serem irregulares, assimétricas e com sua energia concentrada [54].

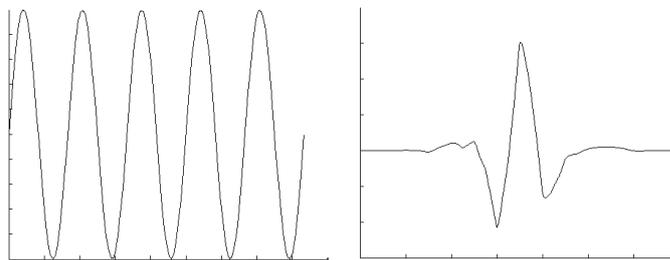


Figura 1 – Senóide e *Wavelet*

Observando apenas o formato das *wavelets* e das senóides, podemos intuitivamente verificar que sinais com mudanças bruscas parecem ser mais bem analisados com *wavelets* do que com suaves senóides. Desta forma faz sentido pensar que características locais são mais bem representadas por *wavelets*, que possuem representação local [48].

Como fato, tem-se que a TF não permite uma análise local do conteúdo de frequência do sinal já que eventos que venham a ocorrer em intervalos distintos de tempos, mesmo que remotamente, contribuem de maneira global para a transformada, afetando a representação como um todo.

A equação 2 ilustra a TF de um sinal contínuo  $f(t)$ . É importante notar que a transformada está baseada na integração de todo o sinal para o cálculo da função que representa seu espectro de frequência ( $F(u)$ ) [55], [56],

$$F(u) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i 2\pi u t} dt, \quad (2)$$

onde  $e^{i2\pi ut}$  é a base da TF.

Um método comumente usado é “*janelar*” o sinal em uma seqüência de intervalos, onde cada seqüência é suficientemente pequena de maneira que a forma de onda seja uma aproximação de uma forma de onda estacionária (quase estacionária). Esta técnica é chamada de Transformada de *Fourier* Janelada (TFJ) ou com Janela [57].

A idéia básica da TFJ consiste na multiplicação de um sinal de entrada  $f(t)$  por uma dada função janela  $W(t)$  cuja posição varia no tempo, isto é, dividindo o sinal em pequenos segmentos no tempo. Deste modo, cada espectro de frequência mostra o conteúdo de frequência durante um curto tempo. A totalidade de tais espectros contém a evolução do conteúdo de frequência com o tempo de todo sinal em análise [58].

Por outro lado, a TFJ proposta por Dennis Gabor permite uma análise da frequência do sinal localmente no tempo (Gabor, 1946 [59] *apud* Misiti, 1997 [60]). Neste caso, uma janela de observação é deslocada no domínio do tempo, em uma técnica chamada de análise do sinal por janelas, e a TF é calculada para cada posição da janela, como mostra a Figura 2, mapeando o sinal original em uma função bidimensional de tempo e frequência.



Figura 2 – Transformada de Fourier Janelada.

Considerando  $j(t)$  a função que cumpre o papel de janela e  $b$  o tamanho da janela, pode-se definir a TFJ de um sinal contínuo  $f(t)$  como segue:

$$F(u, b) = \int_{-\infty}^{\infty} j(t - b) f(t) e^{-i2\pi ut} dt . \quad (3)$$

A TFJ capacita-nos a analisar uma função  $f(t)$ , no sentido de se poderem localizar informações nos domínios do tempo e da frequência.

Para o momento, questiona-se quão precisamente podemos localizar a informação de  $f(t)$  no domínio do tempo e da frequência.

Infelizmente existe um limite para localização precisa no domínio do tempo e da frequência. Esta limitação surge de um princípio que rege as transformadas de tempo e frequência. Este é o *princípio da incerteza* que, de uma maneira simples, afirma o seguinte: “Não se pode obter uma localização precisa simultaneamente no domínio do tempo e da frequência”. Uma intuição além deste princípio é simples: Para medir frequências nós devemos observar o sinal por alguns períodos no tempo e para uma maior precisão no domínio da frequência, um maior intervalo no tempo será necessário [61].

O princípio da incerteza afirma que a localização do sinal no domínio do tempo e da frequência é representada geometricamente pela dimensão do retângulo  $T \times \omega$ . Este retângulo é chamado de *janela de incerteza* ou *cela de informação* da transformada, ilustrada pela Figura 3 [61].

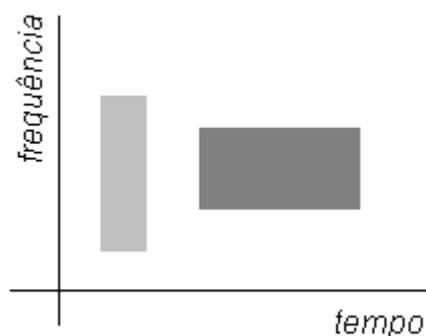


Figura 3 - Janela da Incerteza

Em geral a cor cinza é associada para cada cela para indicar sua energia na decomposição. Considere a Figura 4 abaixo.

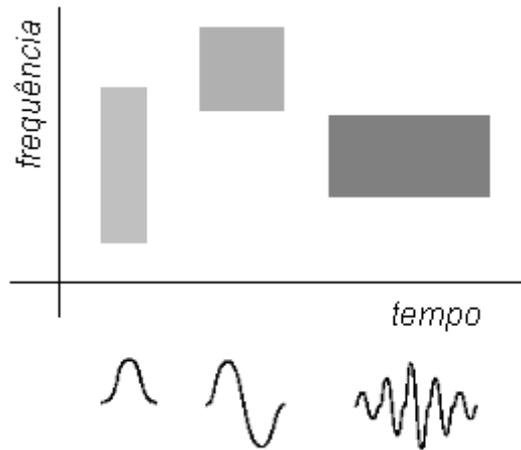


Figura 4 - Celas no domínio do tempo e da frequência.

O sinal associado à cela à esquerda, apresenta uma pequena localização em frequência e uma pequena concentração de energia; a cela central tem uma melhor localização de frequências (ciclo completo) e, portanto mais energia; a cela à direita tem uma boa resolução em frequência (vários ciclos são abrangidos) e, conseqüentemente, uma energia mais concentrada. Como pode ser evidenciado da figura e da discussão acima, aumenta-se o compromisso em frequência, mas peca-se no compromisso com o tempo.

### 3.2 - Wavelets

Diante destes fatos, *Morlet* introduziu uma nova transformada, denominada Transformada *Wavelet* (TW), na qual o tamanho da janela é variável, permitindo que eventos de alta frequência possam ser localizados com uma maior resolução temporal. Intuitivamente, um evento de baixa frequência precisa de uma janela maior no domínio do tempo para ser observado. Inicialmente, define-se a TW considerando um sinal contínuo  $f(t)$ , porém a generalização para sinais ou imagens bidimensionais  $f(x,y)$ , também pode ser obtida. A transformada *wavelet* contínua de  $f(t)$  é dada pela equação 4:

$$F(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\psi_{a,b}(t)dt . \quad (4)$$

Nesta equação, os parâmetros  $a$  e  $b$  variam continuamente em  $\mathfrak{R}$ , sendo que a função  $\psi_{a,b}$  é denominada *wavelet* mãe e definida da seguinte forma:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right). \quad (5)$$

Tal função é derivada a partir de operações como dilatar e transladar uma *wavelet* mãe  $\psi$ , a qual deve satisfazer o critério de admissibilidade,

$$C_{\psi} = 2\pi \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\hat{\psi}(u)|^2}{|u|} du < \infty , \quad (6)$$

onde  $\hat{\psi}(u)$  é a TF de  $\psi(t)$ . Se  $\hat{\psi}$  é uma função contínua, então  $C_{\psi}$  pode ser finito somente se  $\hat{\psi}(0) = 0$ , isto é,  $\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t)dt = 0$ , o que corresponde ao seu valor médio no domínio temporal ser nulo [56][62].

Analisando a equação 4 percebe-se que a TW depende de dois parâmetros,  $a$  e  $b$ , que correspondem, nesta ordem, às informações de escala e tempo, ou dilatação e translação, respectivamente. Assim, o sinal de uma dimensão  $f(t)$  é desdobrado em uma transformada bidimensional  $F(a,b)$ , permitindo uma análise tempo-freqüência do sinal, de forma semelhante à TFJ.

A equação 4 pode também ser representada como o produto interno de  $f$  com uma função *wavelet*  $\psi_{a,b}$ , isto é,  $F(a,b) = \langle f, \psi_{a,b}^* \rangle$ .

A discretização dos parâmetros  $a$  e  $b$  origina a Transformada *Wavelet* Discreta (TWD). É importante notar que o espaço de definição do sinal não é discretizado uniformemente, como ocorre na TFJ discreta. A discretização do parâmetro de translação depende da escala da *wavelet* mãe. Assim, para altas freqüências, as *wavelet* mães são

transladadas por passos pequenos, enquanto que para frequências baixas, a translação é feita com passos maiores [56], [62].

### 3.3 - A Transformada *Wavelet* Contínua

A TWC de um dado sinal  $f(t)$  em relação a uma *wavelet* mãe  $\psi$  é genericamente definida como [32]:

$$(TWC)(b, a) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \cdot dt, \quad (7)$$

onde  $a$  é o fator de escala e  $b$  é o fator de translação, e ambas as variáveis são contínuas. A equação 7 mostra que o sinal unidimensional original  $f(t)$  é mapeado em uma nova função, em um espaço bidimensional, em escala  $a$  e translação  $b$ , pela TW. Um coeficiente da TW,  $TWC(a, b)$ , de uma escala e translação particulares, representa o quão bem o sinal original  $f(t)$  corresponde com a *wavelet* mãe, ou seja, a representa a medida de correlação entre os sinais. Desse modo, o grupo de coeficientes  $TWC(a, b)$  associados a um sinal particular é a representação *wavelet* do sinal original  $f(t)$  em relação à *wavelet* mãe  $\psi(t)$ .

Pode-se visualizar a *wavelet* mãe como uma função janela. O fator de escala  $a$  e o tamanho da janela são interdependentes, onde menores escalas implicam em menores janelas. Conseqüentemente, podem-se analisar componentes de bandas estreitas de frequência de um sinal com um pequeno fator de escala e componentes de bandas largas de frequência com fatores de escala maiores, o que permite captar todas as características de um sinal particular.

#### ***Escala***

Escalar uma *wavelet* significa simplesmente dilatá-la ou comprimi-la. Para ir além de descrições coloquiais tais como “dilatatar”, é introduzido o fator de escala, usualmente denotado pela letra  $a$ . Por exemplo, o efeito é facilmente observado na Figura 5 através de senóides.

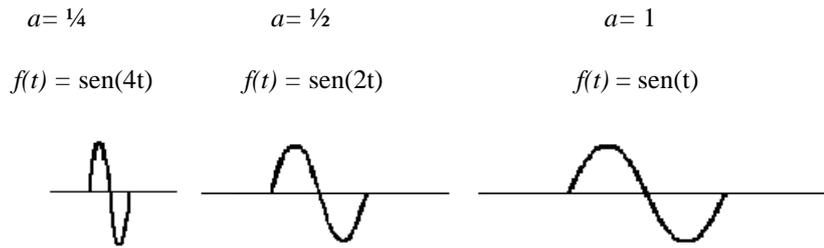


Figura 5 – Demonstração do fator de escala em uma função senóide.

O fator de escala indica o comportamento da *wavelet* mãe. Quanto menor o fator de escala, mais “comprimida” será a *wavelet*.

Na análise *wavelet*, a escala é relacionada com a frequência do sinal. O que corresponde a:

- Baixa escala  $a \rightarrow$  *wavelet* comprimida  $\rightarrow$  detalhes que mudam rapidamente  $\rightarrow$  alta frequência  $w$ .
- Alta escala  $a \rightarrow$  *wavelet* dilatada  $\rightarrow$  detalhes que mudam vagarosamente  $\rightarrow$  baixa frequência  $w$ .

### **Translação**

Transladar uma *wavelet* significa deslocá-la no eixo de tempo, o que se faz matematicamente quando se escreve  $f(x-k)$  como um atraso na função  $f$  de um fator  $k$ , com  $k$  constante, conforme mostrada na Figura 6.

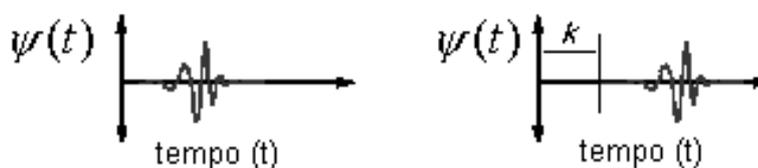


Figura 6 – Translação de uma função Wavelet: (a) Função Wavelet  $\psi(t)$ ; (b) Função Wavelet Transladada  $\psi(t-k)$ .

### 3.4 - A Transformada *Wavelet* Discreta

As transformadas contínuas são primordialmente empregadas na dedução das propriedades das transformadas. Já as transformadas discretas são atraentes do ponto de vista de implementação computacional. Cabe esclarecer que a discretização da TW ocorre no domínio dos parâmetros escala e translação e não na variável independente do sinal a ser analisado – tempo ou espaço [48].

O objetivo da TWD é a generalização da função de expansão, de maneira que qualquer sinal em  $L^2(\mathfrak{R})$  possa ser representado pela série [54]:

$$f(t) = \sum_{j,k} a_{j,k} 2^{j/2} \psi(2^j t - k), \quad (8)$$

ou também, simplificando:

$$f(t) = \sum_{j,k} a_{j,k} \psi_{j,k}(t), \quad (9)$$

onde a bidimensão dos coeficientes  $a_{j,k}$  caracteriza a chamada TWD de  $f(t)$ .

Uma forma mais específica que indica como os coeficientes  $a_{j,k}$  são calculados, pode ser escrita usando produto interno:

$$f(t) = \sum_{j,k} \langle \psi_{j,k}(t), f(t) \rangle \psi_{j,k}(t), \quad (10)$$

onde  $\psi_{j,k}(t)$  forma uma base ortonormal para o espaço de sinais de interesse. O produto interno é usualmente definido como mostrado na Equação 11, onde  $x^*(t)$  é o conjugado de  $x(t)$ :

$$\langle x(t), y(t) \rangle = \int x^*(t) y(t) dt. \quad (11)$$

O objetivo de mais expansões de uma função (ou sinal) é ter o coeficiente de expansão ( $a_{j,k}$ ) apresentando mais informações úteis sobre o sinal, que são diretamente obtidas do sinal

original. Um segundo objetivo é ter a maior parte dos coeficientes iguais a zero ou muito próximos a este. Isto é chamado de representação esparsa e é extremamente importante em aplicações para detecção e estimação estatística, compressão de dados, redução de ruídos e para a velocidade de processamento dos algoritmos [54].

De maneira geral, a TWD também pode ser escrita assim [32]:

$$(TWD)(m, n) := \left| a_0^m \right|^{-\frac{1}{2}} \sum_n f(n) \psi\left(\frac{x - nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right) \quad (12)$$

onde  $\psi$  é a *Wavelet* mãe e os parâmetros  $a$  (escala) e  $b$  (translação), relativos a função TWC (Equação 7), são funções dos parâmetros inteiros  $m$  e  $n$ , isto é  $a = a_0^m$  e  $b = nb_0 a_0^m$ . Este fato pode ser observado na Equação 12, e os parâmetros são usados para gerar a família das funções *Wavelets*.

### 3.5 - O Processo de Filtragem e Reconstrução *Wavelet*

#### ***Filtragem***

As componentes dos sinais fornecem características tais como a identidade (componentes de baixa frequência) e detalhes do sinal (componentes de alta frequência). Um exemplo disto é a análise da voz humana. Se retirarmos as componentes de alta frequência, a voz terá um som diferente, mas é possível entender o que está sendo dito. No entanto, se retirarmos as componentes de baixa frequência, será emitido um palavreado sem sentido[60]. Por esta razão que em análise *wavelet*, fala-se usualmente em aproximações e detalhes.

- Aproximações: componentes de baixa frequência do sinal.
- Detalhes: componentes de alta frequência do sinal.

O processo de filtragem, em seu nível mais básico, é mostrado na Figura 7:

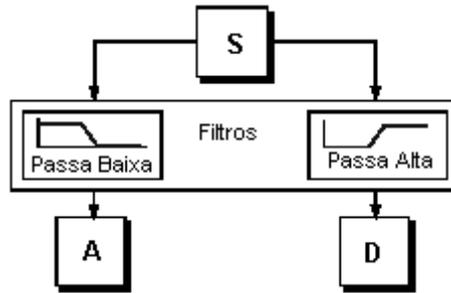


Figura 7 - Filtragem de um sinal.

O sinal  $S$  transpassa dois filtros complementares que fornecem dois sinais como saída. Porém, se utilizarmos este esquema em um sinal digital real, obtém-se duas vezes mais a quantidade de dados que no início. Suponha que o sinal original  $S$  consista de 1.000 amostras de dados. Sendo assim, as versões aproximadas e detalhadas do sinal original terão 1.000 amostras cada uma, totalizando 2.000 amostras (Figura 8a).

Com o intuito de corrigir este problema, foi introduzida a diminuição do número de amostras, ou seja, um operador “*downsampling*” que irá caracterizar uma redução do número de amostras disponibilizadas (Figura 8b). Isto significa simplesmente considerar dados intercalados, ou seja, levar em conta os dados associados a índices ímpares e rejeitar os de índices pares e assim por diante. Com isso é introduzido o fenômeno denominado “*aliasing*”, ou sobreposição de espectro na composição do sinal, o que deverá ser levado em conta em tratamentos posteriores. Este fenômeno é um efeito não desejado em tratamento de sinais, pois causará a descontinuidade no sinal analisado.

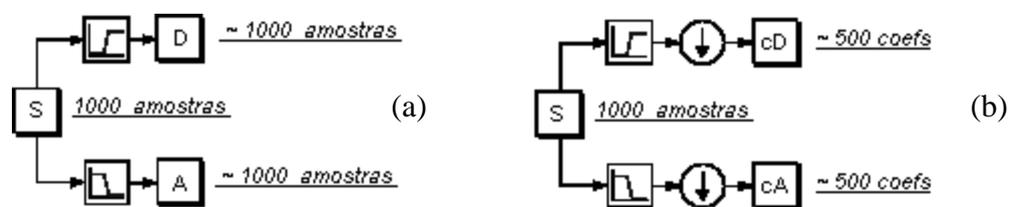


Figura 8 - Decomposição do sinal: a) sem downsampling b) com downsampling.

O processo da Figura 8b, que inclui diminuição de amostras, produz os coeficientes da TWD. Para obter uma melhor visualização deste processo, é mostrado na Figura 9, o

desenvolvimento da TWD de um sinal. O sinal é uma senóide pura adicionada de ruído de alta frequência.

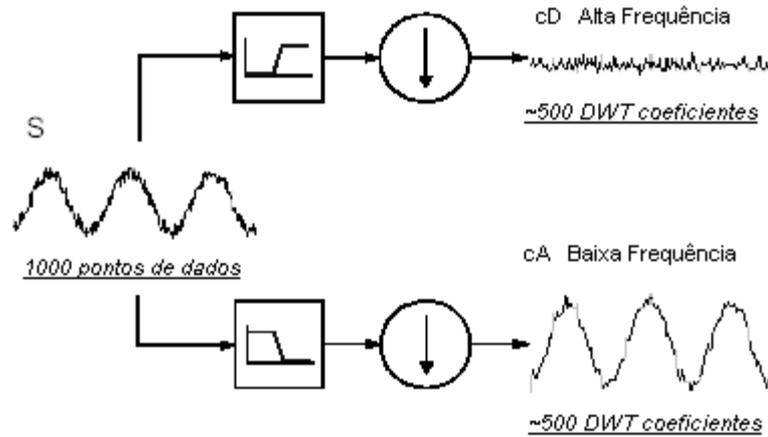


Figura 9 - Exemplo de filtragem com downsampling de um sinal senoidal ruidoso.

Nota-se que o coeficiente de detalhe  $cD$ , Figura 9, consiste principalmente do ruído de alta frequência, enquanto que os coeficientes  $cA$  contém muito menos ruído que o sinal original.

### Decomposição em múltiplos níveis

O processo de decomposição pode ser iterativo, com decomposições sucessivas das aproximações, de modo que um sinal é dividido em outras componentes de resolução menor, como mostrado na Figura 10. Neste estudo, irão se utilizar decomposições em até sete níveis, e as análises dos dados serão em relação aos detalhes, como por exemplo,  $cD_1$ ,  $cD_2$  e  $cD_3$ .

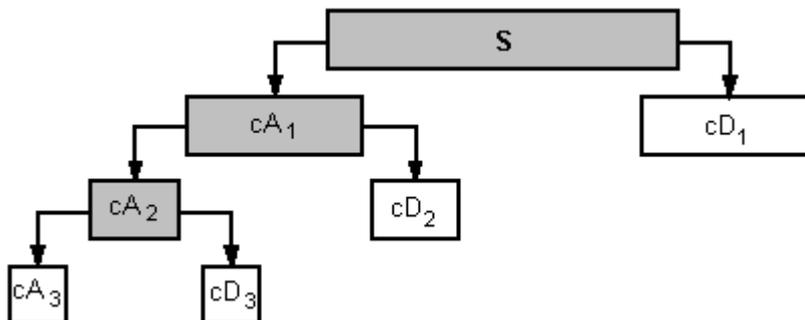


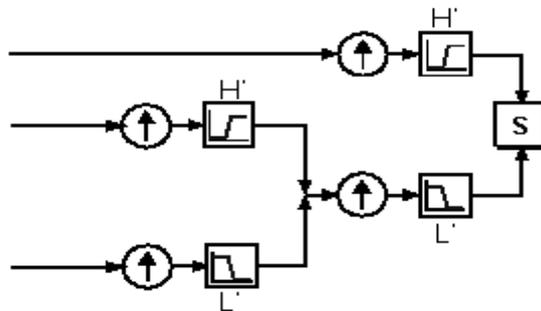
Figura 10 - Demonstração do processo sucessivo de decomposição de um sinal em três níveis.

Uma vez que o processo é iterativo, pelos apontamentos teóricos, pode-se decompô-lo indefinidamente. Na realidade, a decomposição pode ocorrer somente até o detalhe individual consistir em somente uma amostra, ou “*pixel*” para o caso de imagens. Na prática, seleciona-se um número satisfatório de níveis, baseado na natureza do sinal.

### ***Reconstrução Wavelet***

Já foi apresentado como a TWD pode ser usada para analisar, ou decompor, sinais ou imagens. Outra etapa é saber como aquelas componentes podem ser reagrupadas para montar, ou, reconstruir o sinal original, sem perder informações. Este processo é chamado reconstrução, ou síntese. Esta manipulação que efetua a síntese é chamada de Transformada *Wavelet* Discreta Inversa (TWDI).

Para sintetizar um sinal, o reconstruiremos a partir dos coeficientes *wavelets*, como ilustrado na Figura 11.



*Figura 11 - Processo de reconstrução de um sinal filtrado.*

Como a análise *wavelet* envolve filtragem e diminuição do número de amostras, a reconstrução *wavelet* consiste em aumentar o número de amostras e filtragem. Aumentar o número de amostras é o processo de elevar uma componente do sinal pela inserção de zeros entre amostras, o que pode ser visto na Figura 12:

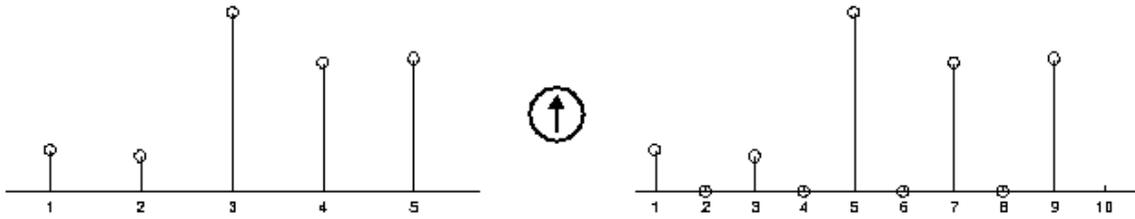


Figura 12 - Processo de aumento do número de amostras para reconstrução de um sinal

### Filtros de Reconstrução

O tópico referente à filtragem para a reconstrução do sinal também merece algumas discussões, devido ao fato da escolha do filtro ser crucial para uma perfeita reconstrução do sinal original.

O processo de diminuição do número de amostras do sinal introduziu neste, distorções de *aliasing*. Uma escolha correta do filtro de reconstrução pode cancelar o efeito do *aliasing*. Esta grande descoberta, mostrada na Figura 13, foi relatada pelos trabalhos de Ingrid Daubechies [60][62].

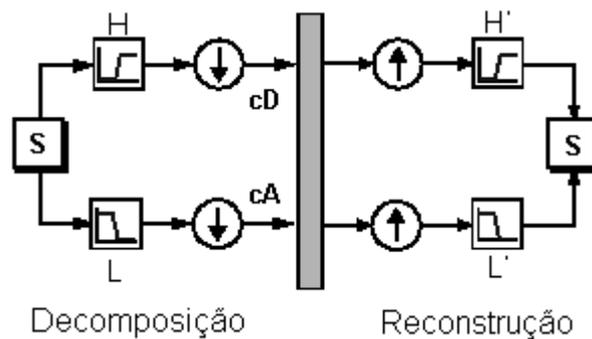


Figura 13 - Processos de decomposição e reconstrução de um sinal.

### Aproximações e detalhes na reconstrução

É também possível reconstruir as aproximações e detalhes em si, a partir dos vetores de coeficientes. Como exemplo, mostra-se como reconstruir o primeiro nível de aproximação  $A1$ , do vetor de coeficientes  $cA1$ .

O vetor dos coeficientes  $cA_1$  passa pelo mesmo processo usado para reconstruir o sinal original. No entanto, ao invés de combiná-los com o nível um de detalhes ( $cD_1$ ), alimenta-se com um vetor de zeros no lugar dos detalhes, como indicado na Figura 14.

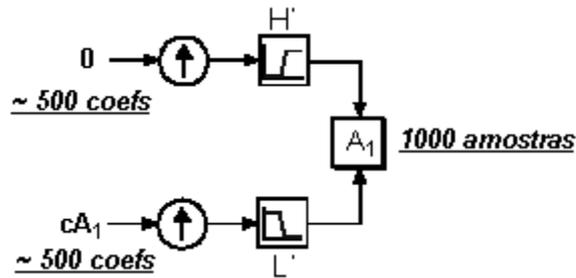


Figura 14 - Processo de reconstrução alimentado com vetor de zeros.

Este processo produz a reconstrução do sinal de aproximação  $A_1$ , que possui o mesmo tamanho que o sinal original  $S$ , sendo uma aproximação real.

Similarmente, pode-se reconstruir o primeiro nível de detalhe  $D_1$ , usando um processo análogo, como mostrado na Figura 15:

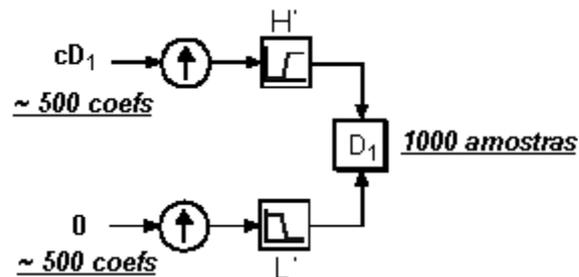


Figura 15 - Reconstrução do primeiro nível de detalhe do sinal com inserção do vetor de zeros.

Os detalhes e aproximações reconstruídos são verdadeiramente constituintes dos sinais originais. De fato, encontramos isto quando combinamos  $A_1 + D_1 = S$ .

Note que os vetores de coeficientes  $cA_1$  e  $cD_1$ , por serem produzidos pela diminuição do número de amostras, contêm distorção *aliasing*, e suas dimensões são somente a metade da dimensão do sinal original. Assim, não podem ser combinados diretamente para reproduzir o sinal original. É necessário reconstruir as aproximações e detalhes antes de combiná-los.

Estendendo esta técnica para componentes de uma análise multinível, encontram-se relações similares para todo o sinal reconstruído (Figura 16).

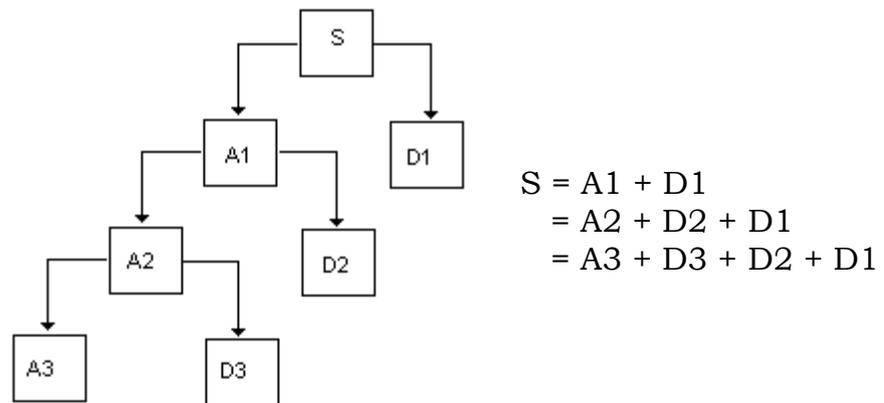


Figura 16 - Diferentes formas para se reconstruir o sinal a partir de seus coeficientes.

### ***Freqüências em cada nível de decomposição***

A AMR apresenta-nos diversas faixas de freqüências de acordo com o nível de decomposição realizado. De uma maneira geral, podemos obter o conteúdo de freqüência de cada nível de decomposição de forma genérica para qualquer valor de taxa amostral. Isto é ilustrado através da Figura 17. De acordo com o teorema de *Nyquist*, temos que a metade da freqüência de amostragem corresponde ao limite máximo da freqüência do sinal que pode ser reproduzido [63]. Desta forma podemos garantir apenas até  $f/2$  Hz do sinal de entrada.

Cabe adiantar que este estudo teve como base sinais de tensão caracterizados a uma taxa amostral de 7.680 Hz, o que corresponde a 128 amostras por ciclo, assim podemos garantir até 3840 Hz do sinal de entrada. Tomando esta informação como ponto inicial, tem-se uma importante análise para o momento, mostrada pela Figura 18. Nesta é ilustrada a decomposição de um sinal em 4 níveis, apresentados da seguinte forma:

- Aproximação 1, *A1*: [0 - 1920] Hz, o que corresponde à metade inferior da freqüência do sinal de entrada, conforme já explicado através da teoria sobre *Wavelets*;
- Detalhe 1, *D1*: [1920 - 3840] Hz, o que corresponde à metade superior da freqüência do sinal de entrada;

- Aproximação 2,  $A_2$ : [0 - 960] Hz, que corresponde à metade inferior da frequência do sinal de aproximação anterior, neste caso  $A_1$ ;
- Detalhe 2,  $D_2$ : [960 - 1920] Hz, que corresponde à metade superior da frequência do sinal de aproximação anterior, neste caso  $A_1$ ;
- Aproximação 3,  $A_3$ : [0 - 480] Hz, que corresponde à metade inferior da frequência de sinal de aproximação 2 -  $A_2$ ;
- Detalhe 3,  $D_3$ : [480 - 960] Hz, que corresponde à metade superior da frequência do sinal de aproximação 2 -  $A_2$ ;
- Aproximação 4,  $A_4$ : [0 - 240] Hz, que corresponde à metade inferior da frequência de sinal de aproximação 3 -  $A_3$ , e
- Detalhe 4,  $D_4$ : [240 - 480] Hz, que corresponde à metade superior da frequência do sinal de aproximação 3 -  $A_3$ .

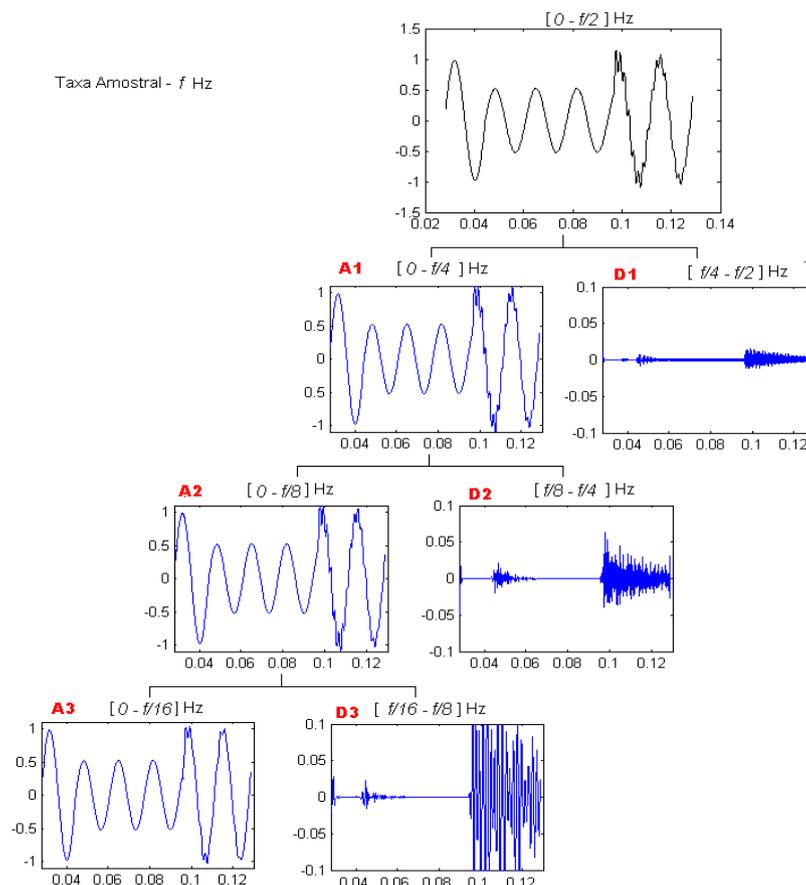


Figura 17 – AMR de um sinal qualquer com taxa amostral genérica.

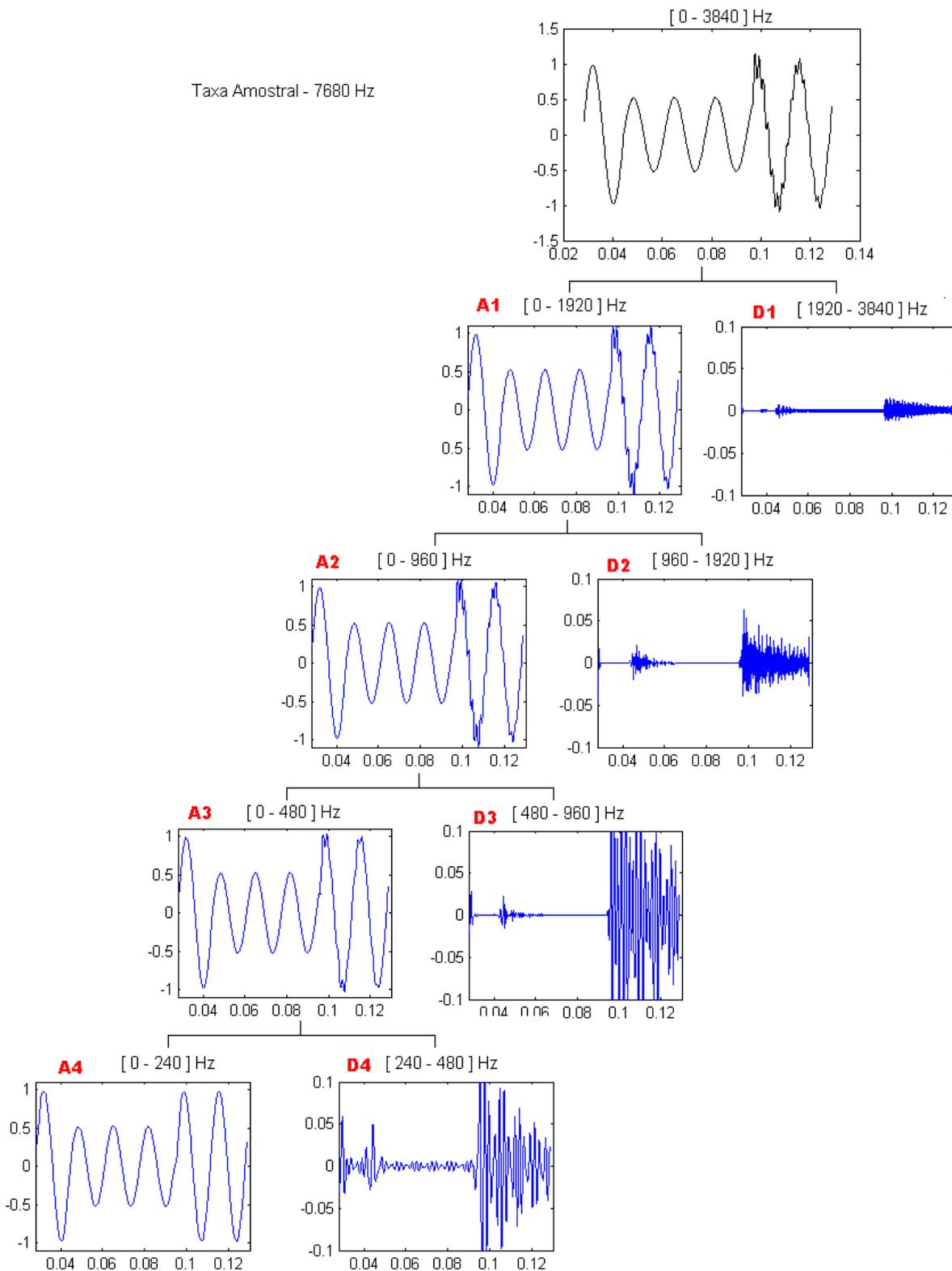


Figura 18 – AMR de um sinal com detalhamento das frequências.

E assim por diante:

- Aproximação 5,  $A5$ : [0 - 120] Hz, que corresponde à metade inferior da frequência do sinal de aproximação 4 –  $A4$ ;
- Detalhe 5,  $D5$ : [120 – 240] Hz, que corresponde à metade superior da frequência do sinal de aproximação 4 –  $A4$ ;
- Aproximação 6,  $A6$ : [0 - 60] Hz, que corresponde à metade inferior da frequência do sinal de aproximação 5 –  $A5$ ;
- Detalhe 6,  $D6$ : [60 – 120] Hz, que corresponde à metade superior da frequência do sinal de aproximação 5 –  $A5$ ;
- Aproximação 7,  $A7$ : [0 - 30] Hz, que corresponde à metade inferior da frequência do sinal de aproximação 6 –  $A6$  e
- Detalhe 7,  $D7$ : [30 – 60] Hz, que corresponde à metade superior da frequência do sinal de aproximação 6 –  $A6$ .

Observa-se então que pelo sétimo nível de decomposição, chega-se a frequência fundamental do sistema, que é de 60 Hz.

### 3.6 - Estudo das Famílias *Wavelets*

#### *Wavelet de Haar*

A *Wavelet* com os mais simples coeficientes no espaço  $L^2(\mathcal{R})$  é denominada *Wavelet* de Haar. Uma propriedade da *Wavelet* de Haar é que ela tem suporte compacto, contudo ela não é continuamente diferenciável, o que de certa forma limita suas aplicações. Sabemos que a caracterização completa de uma TW implica em conhecer os filtros de análise,  $h$  e  $g$  (passa baixa e passa alta), os filtros de síntese,  $\bar{h}$  e  $\bar{g}$  bem como as funções escala e *wavelet*. A *Wavelet* de Haar [60] é apresentada na Figura 19 por sua função *wavelet* e na Figura 20 por sua função escala, da seguinte forma:

$$\psi(t) = \begin{cases} +1 & 0 \leq t < 1/2 \\ -1 & 1/2 \leq t < 1 \end{cases} \quad (13)$$

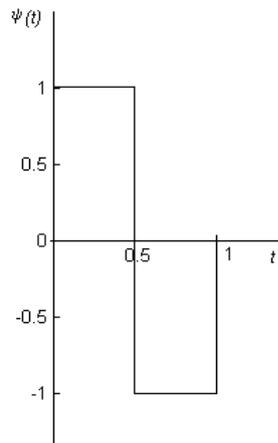


Figura 19 - Representação da função Wavelet de Haar.

$$\phi(t) = \begin{cases} +1 & 0 \leq t < 1 \\ 0 & \text{caso contrario} \end{cases} \quad (14)$$

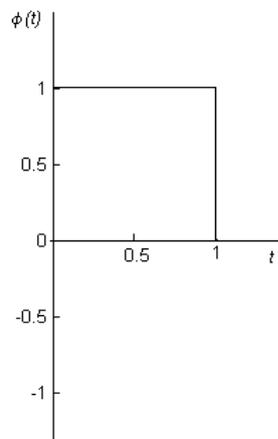


Figura 20 – Representação da função escala de Haar.

Quando foi apresentada, essa transformada tinha o objetivo apenas de fazer a decomposição de um sinal em termos de funções ortogonais: função *wavelet* e função escala. De acordo com as hipóteses na época, essas funções poderiam ser definidas recursivamente da seguinte forma:

$$\phi(t) = \sum_k h_k \phi(2t - k) \quad (15)$$

Desta forma, a função  $\phi$  apresentada por Haar pode ser recursivamente escrita da seguinte maneira:

$$\phi(t) = h_0\phi(2t) + h_1\phi(2t-1) \quad (16)$$

Analisando  $\phi(2t)$  e  $\phi(2t-1)$ , temos:

$$\phi(2t) = \begin{cases} +1 & 0 \leq 2t < 1 \\ 0 & \text{caso contrario} \end{cases} \quad (17)$$

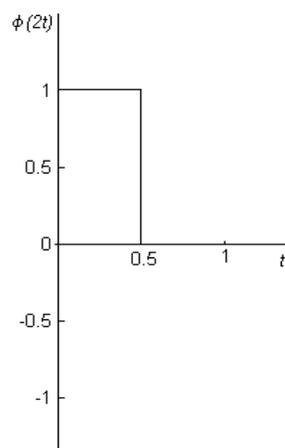


Figura 21 – Representação da função  $\phi(2t)$  de Haar.

$$\phi(2t-1) = \begin{cases} +1 & 0 \leq 2t-1 < 1 \\ 0 & \text{caso contrario} \end{cases} \quad (18)$$

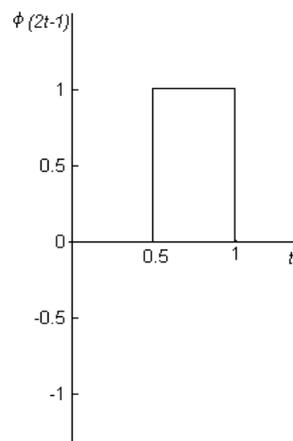


Figura 22 – Representação da função  $\phi(2t-1)$  de Haar.

Sendo assim, a partir da Equação (16) temos:

$$\phi(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t < 0.5 \\ \phi(2t) + 1 & 0.5 \leq t < 1 \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (19)$$

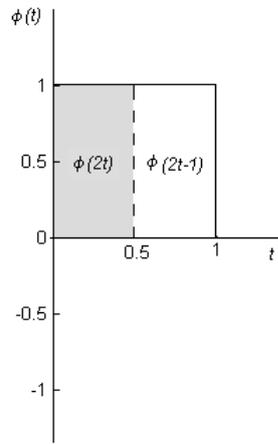


Figura 23 – Construção da função escala de Haar.

Uma vez definida a função escala, a função *wavelet* será de acordo com a teoria das *Wavelets* [64]:

$$\psi(t) = \sum_k g_k \phi(2t - k)$$

$$\psi(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t < 0.5 \\ \phi(2t) - 1 & 0.5 \leq t < 1 \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (20)$$

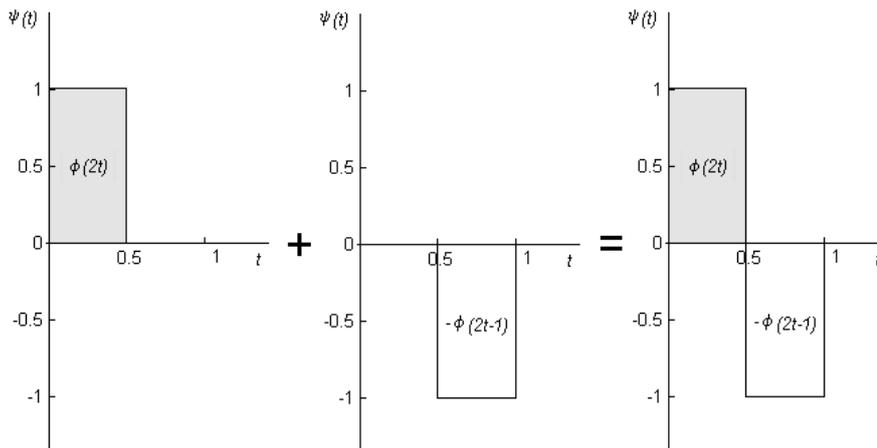
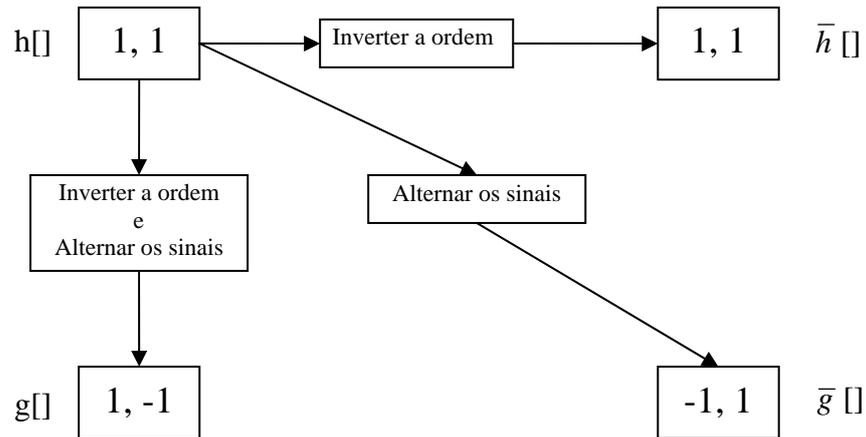


Figura 24 - Construção da função wavelet de Haar.

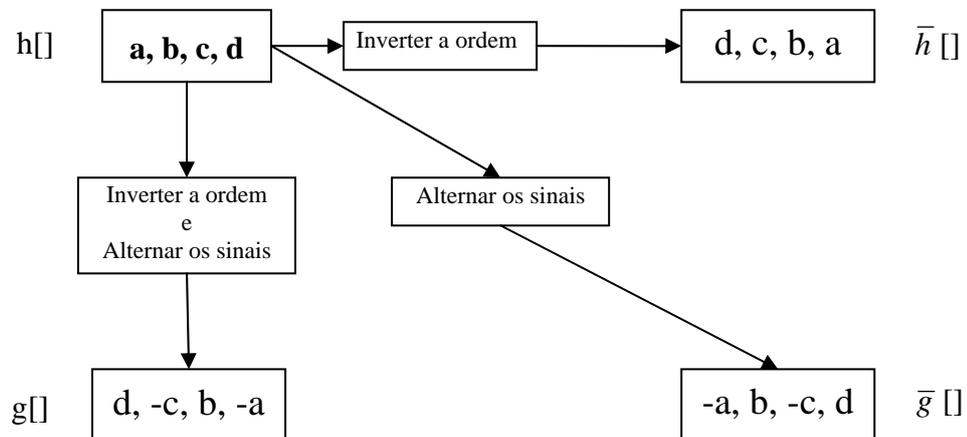
**Obtenção dos filtros de análise e síntese:**

Para que seja possível definir completamente a transformada de Haar, temos que calcular os filtros de síntese,  $\bar{h}$  e  $\bar{g}$ , uma vez que os filtros de análise,  $h$  e  $g$ , já foram

determinados. Desta forma, para determinação do filtro  $g$  (passa alta) de análise e dos filtros  $\bar{h}$  e  $\bar{g}$  de síntese, basta sabermos o filtro de análise  $h$  (passa baixa) e aplicar a seguinte regra prática:



No caso de um filtro de suporte 4, basta aplicar o método seguinte para a obtenção dos filtros de análise e síntese:



Para fins de conservação de energia do sinal transformado, os coeficientes dos filtros de Haar são normalizados para que a soma em módulo de cada filtro seja  $\sqrt{2}$ , conforme abaixo:

$$\sqrt{\quad} \quad \sqrt{\quad}$$

$$\sqrt{\quad} \quad \sqrt{\quad}$$

$$- \quad \sqrt{\quad} \quad \sqrt{\quad}$$

-

Com isso, temos todo o sinal decomposto, tendo a TW nível 2 do sinal f da seguinte forma:

$$\text{TWDn2}(f[]) = \left\{ 5, -2, -\frac{1}{\sqrt{2}}, -\frac{1}{\sqrt{2}} \right\}$$

Como aplicação prática, tem-se uma regra para o cálculo da TW de Haar, a saber [65]:

Primeiro Nível de Decomposição – Aproximação 1:

$$\begin{array}{cccc} f: & 1 & 2 & 3 & 4 \\ & \searrow & \swarrow & \searrow & \swarrow \\ a1: & \frac{3}{\sqrt{2}} & & \frac{7}{\sqrt{2}} & \end{array}$$

Primeiro Nível de Decomposição – Detalhes 1:

$$\begin{array}{cccc} f: & 1 & 2 & 3 & 4 \\ & \searrow & \swarrow & \searrow & \swarrow \\ d1: & -\frac{1}{\sqrt{2}} & & -\frac{1}{\sqrt{2}} & \end{array}$$

Segundo Nível de Decomposição – Aproximação 2:

$$\begin{array}{cc} a1: & \frac{3}{\sqrt{2}} & \frac{7}{\sqrt{2}} \\ & \searrow & \swarrow \\ a2: & & 5 \end{array}$$

Segundo Nível de Decomposição – Detalhes 2:

$$\begin{array}{cc} a1: & \frac{3}{\sqrt{2}} & \frac{7}{\sqrt{2}} \\ & \searrow & \swarrow \\ d2: & & -2 \end{array}$$

Diante disso, podemos estabelecer as duas equações abaixo como método para o cálculo da aproximação e do detalhe de um determinado sinal utilizando a *Wavelet* de Haar:

$$a_m = \frac{f_{2m-1} + f_{2m}}{\sqrt{2}} \quad (22)$$

$$d_m = \frac{f_{2m-1} - f_{2m}}{\sqrt{2}} \quad (23)$$

### ***Conservação da Energia:***

Uma importante propriedade da Transformada de Haar é que a mesma conserva a energia do sinal. Sabemos que a energia do sinal significa calcular a soma dos quadrados do sinal de entrada. Levando em conta esta propriedade, o resultado da energia do sinal transformado deve ser igual ao resultado da energia do próprio sinal original.

Assim temos que:

$$E_f = f_1^2 + f_2^2 + \dots + f_n^2 \quad (24)$$

Portanto podemos calcular a energia do sinal  $f$  que já foi decomposto anteriormente e em seguida calcular a energia do sinal decomposto.

$$E_f = 1^2 + 2^2 + 3^2 + 4^2 = 30$$

$$E_{a1} = \left(\frac{3}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{7}{\sqrt{2}}\right)^2 = 29$$

$$E_{d1} = \left(-\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(-\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^2 = 1$$

Desta forma temos que:

$$E_f = E_{a1} + E_{d1}$$

$$E_f = E_{(a1|d1)}$$

Com base nos resultados anteriores, podemos notar outra propriedade importante da transformada de Haar.

### ***Compactação da Energia:***

A energia do primeiro nível de aproximação de um sinal contém uma grande porcentagem da energia do sinal transformado. Ou seja, o bom desempenho da TW provém da concentração de uma grande porcentagem do total da energia do sinal original em poucos

coeficientes *wavelets* [66]. Em termos de porcentagem, temos que  $\frac{E_{a1}}{E_f} = \frac{29}{30} = 96,67\%$  do

sinal transformado corresponde a aproximação 1. Já o restante,  $\frac{E_{d1}}{E_f} = \frac{1}{30} = 3,33\%$

corresponde ao detalhe 1.

Isto se deve em consequência de que a maior parte das características do sinal está presente no primeiro nível de aproximação, por se tratar de um filtro passa baixa e do sinal ter seus principais componentes em baixas frequências.

### ***Justificativa da Conservação de Energia***

Para realizar uma breve justificativa da conservação da energia de um sinal utilizando a *Wavelet* de Haar, primeiramente observam-se os termos  $a_1^2$  e  $d_1^2$  na equação abaixo:

$$E_{(a|d)} = a_1^2 + \dots + a_{\frac{n}{2}}^2 + d_1^2 \dots + d_{\frac{n}{2}}^2 \quad (25)$$

Estes valores são obtidos, como já apresentado, através das Equações (22) e (23), da seguinte maneira:

$$\begin{aligned}
a_1^2 + d_1^2 &= \left( \frac{f_1 + f_2}{\sqrt{2}} \right)^2 + \left( \frac{f_1 - f_2}{\sqrt{2}} \right)^2 \\
a_1^2 + d_1^2 &= \left( \frac{f_1^2 + 2f_1f_2 + f_2^2}{2} \right) + \left( \frac{f_1^2 - 2f_1f_2 + f_2^2}{2} \right) \\
a_1^2 + d_1^2 &= \left( \frac{f_1^2 + f_2^2}{2} \right) + \left( \frac{f_1^2 + f_2^2}{2} \right) \\
a_1^2 + d_1^2 &= f_1^2 + f_2^2
\end{aligned}$$

Similarmente temos que  $a_m^2 + d_m^2 = f_{2^{m-1}}^2 + f_{2^m}^2$  para todos os valores de  $m$ . Assim, justificando a propriedade de conservação da energia, através da Equação (25) temos:

$$a_1^2 + \dots + a_{\frac{n}{2}}^2 + d_1^2 \dots + d_{\frac{n}{2}}^2 = f_1^2 + \dots + f_n^2$$

$$E_{(a|d)} = E_f$$

### ***Wavelet de Daubechies***

Ingrid Daubechies, uma das mais brilhantes pesquisadoras sobre *wavelet* no mundo, criou o que é chamado de “*wavelet* ortonormal com suporte compacto”. Os nomes das *wavelets* da família Daubechies são escritos por dbN, onde N é a ordem da *wavelet*, e db faz referência ao sobrenome da autora desta *wavelet* mãe. A *wavelet* db1, é semelhante à de Haar que foi apresentada na Figura 19. Na Figura 25, mostram-se alguns modelos de funções *wavelet* da família Daubechies [60]. Pode-se perceber que conforme a ordem da *wavelet* mãe aumenta, seu suporte compacto também sofre um aumento significativo. Estas *wavelets* não têm nenhuma expressão analítica, à exceção da db1, que é a *wavelet* de Haar. Elas também são assimétricas.

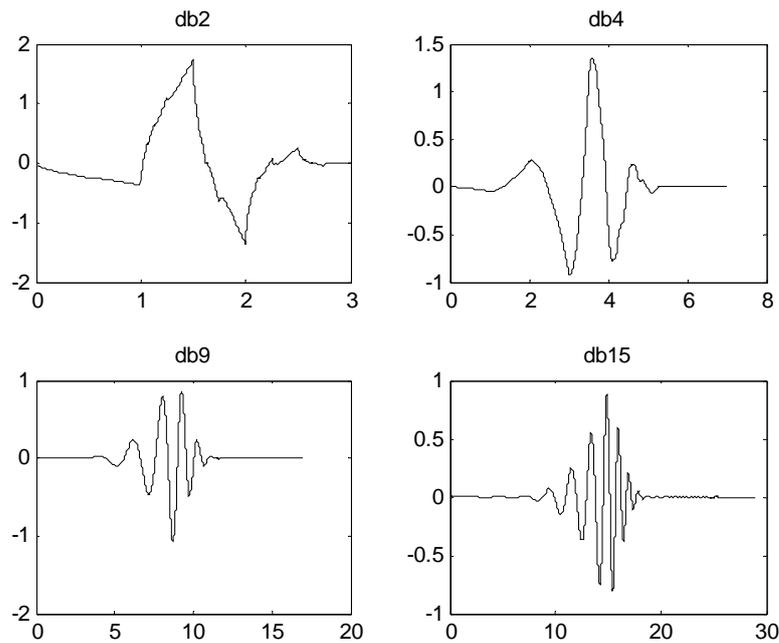


Figura 25 - Famílias Daubechies.

Da mesma forma que em Haar obtiveram-se as funções *wavelet* e escala, nesta seção serão mostradas as funções escala e *wavelet* e o procedimento para chegar até elas somente para a Daubechies de ordem 2, ou seja, suporte compacto de tamanho quatro e quatro coeficientes.

Primeiramente, para obter o filtro de análise  $h[]$  (passa-baixa) devemos resolver o seguinte sistema de três grupos de equações, que quando juntos, correspondem à definição da Transformada de Daubechies [67], [68]:

$$\sum_{k=0}^{n-1} (-1)^k h_k k^b = 0 \quad (26)$$

$$\sum_{k=0}^{n-1} h_k = 2 \quad (27)$$

$$\sum_{k=0}^{n-1} h_k h_{k+2l} = 0 \quad (28)$$

onde  $n$  é o tamanho do suporte,  $b = 0, 1, \dots, (n/2)-1$  e  $l = 1, \dots, (n/2)-1$ . A Equação (26) representa os momentos nulos da *wavelet* mãe. A Equação (27) está relacionada à condição de

normalização e a Equação (28) representa a condição de ortogonalidade da *wavelet* mãe a ser construída. Desenvolvendo este sistema, temos:

$$\begin{aligned} 1h_0 - 1h_1 + 1h_2 - 1h_3 &= 0 \\ 0h_0 - 1h_1 + 2h_2 - 3h_3 &= 0 \\ 1h_0 + 1h_1 + 1h_2 + 1h_3 &= 2 \\ 1h_0 1h_2 + 1h_1 1h_3 &= 0 \end{aligned}$$

De acordo com a resolução do sistema acima, chegamos às seguintes respostas:

$$h_0 = \frac{1 + \sqrt{3}}{4};$$

$$h_1 = \frac{3 + \sqrt{3}}{4};$$

$$h_2 = \frac{3 - \sqrt{3}}{4};$$

$$h_3 = \frac{1 - \sqrt{3}}{4}.$$

Com o filtro de análise  $h[]$  (passa-baixa) calculado, devemos agora obter a função escala. Para isto tomemos a Equação (15), e como a função tem quatro coeficientes, temos que encontrar  $\phi(0)$ ,  $\phi(1)$ ,  $\phi(2)$  e  $\phi(3)$ , desta forma temos:

$$\phi(t) = \sum_k h_k \phi(2t - k)$$

$$\phi(0) = \sum_k h_k \phi(-k) = h_0 \phi(0) \quad (29)$$

$$\phi(1) = \sum_k h_k \phi(2 - k) = h_0 \phi(2) + h_1 \phi(1) + h_2 \phi(0) \quad (30)$$

$$\phi(2) = \sum_k h_k \phi(4 - k) = h_1 \phi(3) + h_2 \phi(2) + h_3 \phi(1) \quad (31)$$

$$\phi(3) = \sum_k h_k \phi(6-k) = h_3 \phi(3) \quad (32)$$

Para encontrar o valor de  $\phi(0)$  e  $\phi(3)$ , substituímos os valores de  $h_0$  e  $h_3$  nas Equações (29) e (32) e chegamos aos seguintes resultados:

$$\phi(0) = 0;$$

$$\phi(3) = 0.$$

Portanto, resolvendo o sistema das Equações (30) e (31), temos que:

$$\phi(1) = 1,366;$$

$$\phi(2) = -0,366 .$$

Depois de encontrados estes valores e ainda de acordo com a teoria das *wavelets*, a função escala não é necessariamente nula nos pontos intermediários dentro do intervalo do suporte, ou seja, neste caso  $1/2$ ,  $3/2$ , e  $5/2$ . Obtendo esses valores intermediários temos:

$$\phi\left(\frac{t}{2}\right) = \sum_k h_k \phi(t-k)$$

Que resulta em:

$$\phi\left(\frac{1}{2}\right) = \sum_k h_k \phi(1-k) = 0,933$$

$$\phi\left(\frac{3}{2}\right) = \sum_k h_k \phi(3-k) = 0$$

$$\phi\left(\frac{5}{2}\right) = \sum_k h_k \phi(5-k) = 0,067$$

Da mesma maneira, a função *wavelet* será:

$$\psi(t) = \sum_k g_k \phi(2t-k)$$

$$\psi(0) = \sum_k g_k \phi(-k) = g_0 \phi(0) \quad (33)$$

$$\psi(1) = \sum_k g_k \phi(2-k) = g_0 \phi(2) + g_1 \phi(1) \quad (34)$$

$$\psi(2) = \sum_k g_k \phi(4-k) = g_1 \phi(3) + g_2 \phi(2) + g_3 \phi(1) \quad (35)$$

$$\psi(3) = \sum_k g_k \phi(6-k) = g_3 \phi(3) \quad (36)$$

Portanto, resolvendo o sistema das Equações de (33) a (36), temos que:

$$\begin{aligned} \psi(0) &= 0 \\ \psi(1) &= -0,366 \\ \psi(2) &= -1,366 \\ \psi(3) &= 0 \end{aligned}$$

E nos pontos intermediários teremos:

$$\psi\left(\frac{1}{2}\right) = g_0 \phi(1) = -0,25$$

$$\psi\left(\frac{3}{2}\right) = g_1 \phi(2) + g_2 \phi(1) = 1,732$$

$$\psi\left(\frac{5}{2}\right) = g_3 \phi(2) = 0,25$$

Obtidos todos os pontos da função escala e da função wavelet, a Figura 26 mostra o resultado calculado.

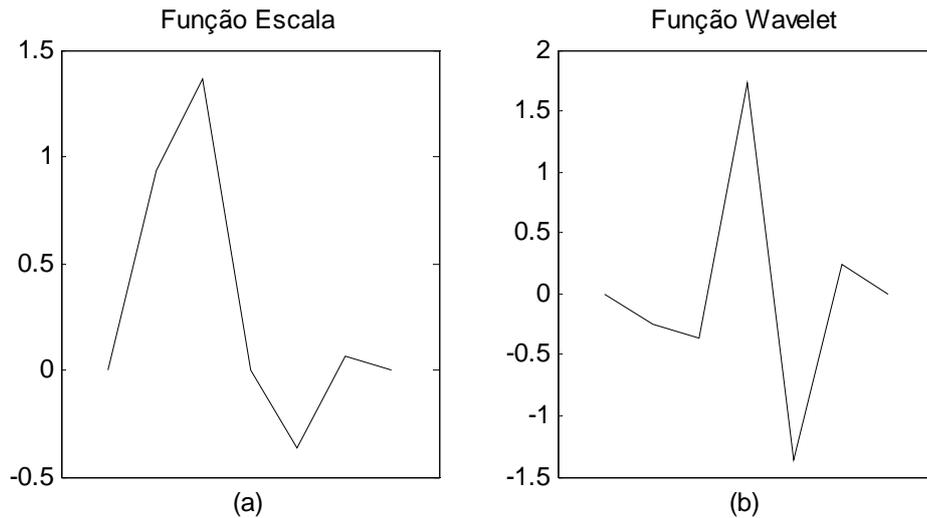


Figura 26 – (a) Função escala e (b) Função wavelet, de acordo com a construção realizada da db2.

De posse das funções escala e *wavelet*, deveremos normalizar os coeficientes do filtro  $h[]$  de modo que a soma em módulo resulte em  $\sqrt{2}$ , para atender o critério de conservação de energia do sinal transformado. Para isto, basta dividirmos todos os coeficientes do filtro  $h[]$  por  $\sqrt{2}$ , assim temos:

$$h_0 = \frac{1 + \sqrt{3}}{4\sqrt{2}};$$

$$h_1 = \frac{3 + \sqrt{3}}{4\sqrt{2}};$$

$$h_2 = \frac{3 - \sqrt{3}}{4\sqrt{2}};$$

$$h_3 = \frac{1 - \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}.$$

Agora, dos coeficientes do filtro  $h[]$ , podemos obter os coeficientes do filtro de análise  $g[]$  (passa-alta) por ser par QMF (*Quadrature Mirror Filter*) do filtro  $h[]$  (passa-baixa). Conseqüentemente, podemos obter os coeficientes dos filtros de síntese passa-alta e passa-baixa de acordo com o que já foi apresentado. Portanto temos:

$$h[] = \left\{ \frac{1+\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, \frac{3+\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, \frac{3-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, \frac{1-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \right\}$$

$$g[] = \left\{ \frac{1-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, \frac{-3+\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, \frac{3+\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, \frac{-1-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \right\}$$

$$\bar{h}[] = \left\{ \frac{1-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, \frac{3-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, \frac{3+\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, \frac{1+\sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \right\}$$

$$\bar{g}[] = \left\{ \frac{-1-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, \frac{3+\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, \frac{-3+\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, \frac{1-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \right\}$$

A transformada de Daubechies por construção dos filtros produz a função *wavelet* com  $n/2$  momentos nulos onde  $n$  é o suporte dos filtros. No caso da Db2, que tem suporte  $n=4$ , tem-se a seguinte formulação de acordo com a ordem do momento:

$$m = \sum_t t^m \psi(t) \quad (37)$$

Então temos, momento de ordem 0:

$$m_0 = \sum_t t^0 \psi(t) = \sum_t \psi(t) = \psi(0) + \psi\left(\frac{1}{2}\right) + \dots + \psi(3) = 0$$

Momento de ordem 1:

$$m_1 = \sum_t t^1 \psi(t) = \sum_t t \psi(t) = 0\psi(0) + \frac{1}{2}\psi\left(\frac{1}{2}\right) + \dots + 3\psi(3) = 0$$

A partir daí os momentos são todos diferentes de 0, como por exemplo, o momento de ordem 2:

$$m_2 = \sum_t t^2 \psi(t) = 0\psi(0) + \left(\frac{1}{2}\right)^2 \psi\left(\frac{1}{2}\right) + \dots + 3^2 \psi(3) \neq 0$$

A construção de uma *wavelet* mãe da família de Daubechies segue o mesmo processo descrito anteriormente. Desta forma, vamos demonstrar a construção da *wavelet* de Daubechies de ordem 3. Para isso, temos que conhecer algumas características como o tamanho do suporte compacto e o número de coeficientes, que neste caso são seis. Assim, da mesma forma como na construção da db2, temos que resolver o seguinte sistema para obter o filtro de análise  $h[]$  (passa-baixas) [67]:

$$\begin{aligned} \sum_{k=0}^{n-1} (-1)^k h_k k^b &= 0 \\ \sum_{k=0}^{n-1} h_k &= 2 \\ \sum_{k=0}^{n-1} h_k h_{k+2l} &= 0 \end{aligned}$$

Onde  $n$  é o tamanho do suporte,  $b = 0, 1, \dots, (n/2)-1$  e  $l = 1, \dots, (n/2)-1$ . Como  $n = 6$ , desenvolvendo o sistema, temos:

$$\begin{aligned} 1h_0 - 1h_1 + 1h_2 - 1h_3 + 1h_4 - 1h_5 &= 0 \\ 0h_0 - 1h_1 + 2h_2 - 3h_3 + 4h_4 - 5h_5 &= 0 \\ 0h_0 - 1h_1 + 4h_2 - 9h_3 + 16h_4 - 25h_5 &= 0 \\ 1h_0 + 1h_1 + 1h_2 + 1h_3 + 1h_4 + 1h_5 &= 2 \\ 1h_0 1h_2 + 1h_1 1h_3 + 1h_2 1h_4 + 1h_3 1h_5 &= 0 \\ 1h_0 1h_4 + 1h_1 1h_5 &= 0 \end{aligned}$$

Resolvendo este sistema chegamos aos valores de  $h_0, h_1, h_2, h_3, h_4$  e  $h_5$ . Com estes valores calculados, que correspondem ao filtro de análise  $h[]$  (passa-baixa), devemos agora obter a função escala. Para isto tomemos a Equação (15) e como a função tem seis coeficientes, temos que encontrar  $\phi(0), \phi(1), \phi(2), \phi(3), \phi(4)$  e  $\phi(5)$ , desta forma temos:

$$\phi(t) = \sum_k h_k \phi(2t - k)$$

$$\phi(0) = \sum_k h_k \phi(-k) = h_0 \phi(0) \quad (38)$$

$$\phi(1) = \sum_k h_k \phi(2-k) = h_0 \phi(2) + h_1 \phi(1) + h_2 \phi(0) \quad (39)$$

$$\phi(2) = \sum_k h_k \phi(4-k) = h_0 \phi(4) + h_1 \phi(3) + h_2 \phi(2) + h_3 \phi(1) + h_4 \phi(0) \quad (40)$$

$$\phi(3) = \sum_k h_k \phi(6-k) = h_1 \phi(5) + h_2 \phi(4) + h_3 \phi(3) + h_4 \phi(2) + h_5 \phi(1) \quad (41)$$

$$\phi(4) = \sum_k h_k \phi(8-k) = h_3 \phi(5) + h_4 \phi(4) + h_5 \phi(3) \quad (42)$$

$$\phi(5) = \sum_k h_k \phi(10-k) = h_5 \phi(5) \quad (43)$$

Para encontrar o valor de  $\phi(0)$  e  $\phi(5)$ , substituímos os valores de  $h_0$  e  $h_5$  nas Equações (38) e (43) e chegamos aos seguintes resultados:

$$\phi(0) = 0;$$

$$\phi(5) = 0.$$

Portanto, resolvendo o sistema das Equações de (39) a (42), temos que:

$$\phi(1) = 1,2862;$$

$$\phi(2) = -0,3857;$$

$$\phi(3) = 0,0952;$$

$$\phi(4) = 0,0042;$$

Depois de encontrados estes valores e ainda de acordo com a teoria das *wavelets*, a função escala não é necessariamente nula nos pontos intermediários dentro do intervalo do suporte, ou seja, neste caso  $1/2$ ,  $3/2$ ,  $5/2$ ,  $7/2$  e  $9/2$ . Para obter estes valores intermediários temos:

$$\phi\left(\frac{t}{2}\right) = \sum_k h_k \phi(t-k)$$

Que resulta em:

$$\phi\left(\frac{1}{2}\right) = \sum_k h_k \phi(1-k) = 0,6051$$

$$\phi\left(\frac{3}{2}\right) = \sum_k h_k \phi(3-k) = 0,4412$$

$$\phi\left(\frac{5}{2}\right) = \sum_k h_k \phi(5-k) = -0,0151$$

$$\phi\left(\frac{7}{2}\right) = \sum_k h_k \phi(7-k) = -0,0315$$

$$\phi\left(\frac{9}{2}\right) = \sum_k h_k \phi(9-k) = 0,000209$$

Da mesma maneira, a função *wavelet* será:

$$\psi(t) = \sum_k g_k \phi(2t-k)$$

$$\psi(0) = \sum_k g_k \phi(-k) = g_0 \phi(0) \quad (44)$$

$$\psi(1) = \sum_k g_k \phi(2-k) = g_0 \phi(2) + g_1 \phi(1) + g_2 \phi(0) \quad (45)$$

$$\psi(2) = \sum_k g_k \phi(4-k) = g_0 \phi(4) + g_1 \phi(3) + g_2 \phi(2) + g_3 \phi(1) + g_4 \phi(0) \quad (46)$$

$$\psi(3) = \sum_k g_k \phi(6-k) = g_1 \phi(5) + g_2 \phi(4) + g_3 \phi(3) + g_4 \phi(2) + g_5 \phi(1) \quad (47)$$

$$\psi(4) = \sum_k g_k \phi(8-k) = g_3 \phi(5) + g_4 \phi(4) + g_5 \phi(3) \quad (48)$$

$$\psi(5) = \sum_k g_k \phi(10-k) = g_5 \phi(5) \quad (49)$$

Portanto, resolvendo o sistema das Equações de (44) a (49), temos que:

$$\begin{aligned}\psi(0) &= 0 \\ \psi(1) &= 0,1362 \\ \psi(2) &= -0,7511 \\ \psi(3) &= -1,1080 \\ \psi(4) &= -0,04 \\ \psi(5) &= 0\end{aligned}$$

Para os pontos intermediários teremos:

$$\psi\left(\frac{1}{2}\right) = 0,0641$$

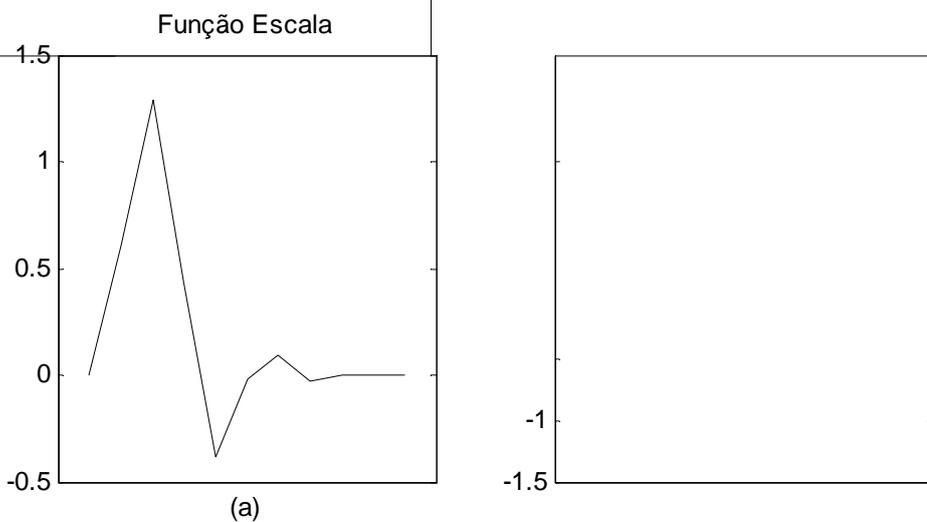
$$\psi\left(\frac{3}{2}\right) = -0,2874$$

$$\psi\left(\frac{5}{2}\right) = 1,7009$$

$$\psi\left(\frac{7}{2}\right) = 0,2874$$

$$\psi\left(\frac{9}{2}\right) = 0,002$$

A Figura 27 apresenta as funções escala e *wavelet* referente à db3.



De posse das funções escala e *wavelet*, deveremos normalizar os coeficientes do filtro  $h[]$  de modo que a soma em módulo resulte em  $\sqrt{2}$ , para atender o critério de conservação de energia do sinal transformado. Para isto, basta dividirmos todos os coeficientes do filtro  $h[]$  por  $\sqrt{2}$ . Assim temos:

$$h_0 = 0,332670552950$$

$$h_1 = 0,806891509311$$

$$h_2 = 0,459877502118$$

$$h_3 = -0,135011020010$$

$$h_4 = -0,0854412738820$$

$$h_5 = -0,0352262918857$$

Agora, já obtido os coeficientes do filtro  $h[]$ , podemos obter os coeficientes do filtro de análise  $g[]$  (passa-alta) por ser par QMF do filtro  $h[]$  (passa-baixa). E conseqüentemente obter os coeficientes dos filtros de síntese passa-alta e passa-baixa de acordo com o que já foi apresentado. Desta forma, temos:

$$h [] = \{0,3327; 0,8069; 0,4599; -0,1350; -0,0854; -0,0352\}$$

$$g [] = \{-0,0352; 0,0854; -0,1350; -0,4599; 0,8069; -0,3327\}$$

$$\bar{h} [] = \{-0,0352; -0,0854; -0,1350; 0,4599; 0,8069; 0,3327\}$$

$$\bar{g} [] = \{-0,3327; 0,8069; -0,4599; -0,1350; 0,0854; -0,0352\}$$

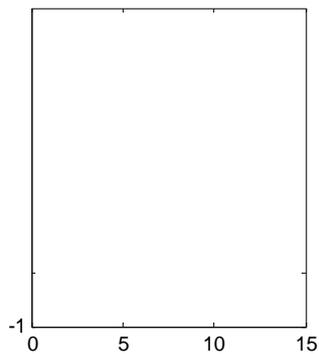
A transformada de Daubechies por construção dos filtros produz a função *wavelet* com  $n/2$  momentos nulos onde  $n$  é o suporte dos filtros. A *wavelet* construída Db3, possui suporte  $n=6$ . Desta forma possui 3 momentos nulos.

### ***Coiflets***

Estas *wavelets* foram definidas por I. Daubechies e R. Coifman, pesquisadores na área de Teoria *Wavelet*, em 1989. As *coiflets* foram construídas para tentar manter uma

semelhança maior entre o sinal original e o sinal transformado. O filtro de análise  $h[]$  é sempre o par QMF de  $g[]$ , que tem suporte sempre múltiplo de 6.

As *wavelet* mães da família *coiflets* são denominadas  $coifN$ , onde  $N$  é a ordem destas. Porém alguns autores usam  $2N$  no lugar de  $N$ . Esta função *wavelet* tem  $2N$  momentos nulos e a função escala tem  $2N-1$  momentos nulos. Estas duas funções têm um suporte compacto de tamanho  $6N-1$ . Pode-se dizer que estas *wavelets* são menos assimétricas do que as *db*s. Com relação ao suporte compacto, podemos comparar a  $coifN$  com  $db3N$ . No que se refere aos momentos nulos, a comparação com  $coifN$  é da ordem da  $db2N$  [60], [64]. A Figura 28 ilustra esta família de *wavelets* mães.



Os modelos de *wavelet* mãe do tipo *Symlets* são *wavelets* mães aproximadamente simétricas, propostas por Daubechies como modificações à família que ela mesmo criou, as *db*s. As propriedades das duas famílias de *wavelets* mães são similares. O filtro de análise  $h[]$  é sempre o par QMF de  $g[]$ , que tem suporte sempre par e maior ou igual a 4. As respostas em frequência de  $h[]$  e  $g[]$  melhoram à medida que o suporte dos filtros aumenta.

As *wavelets* mães da família *Symlet* apresentam-se em vários modelos, variando da *sym2* à *sym45*. Na Figura 29 são apresentados alguns destes modelos. Esta família apresenta algumas características gerais, tais como: possui suporte compacto com menor número de assimetria e maior número de decaimento para uma largura dada em relação à família Daubechies [64], [70].

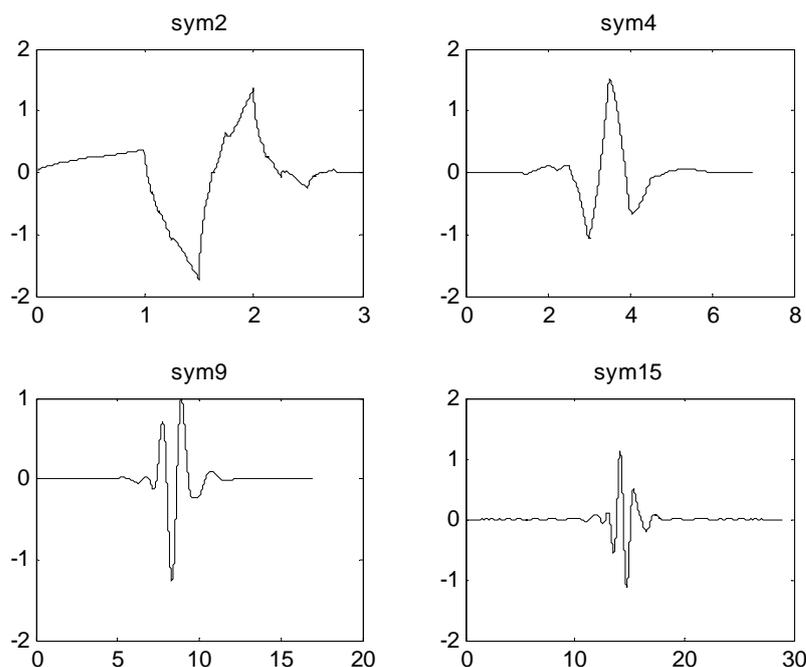


Figura 29 – Família *Symlets*.

### 3.7 - Estudo inicial de aplicação das *Wavelets* em sinais elétricos

Com intuito de analisar a funcionalidade do algoritmo proposto e também de avaliar a adequação de quais *Wavelet* mães são melhores na detecção e localização no tempo para os

casos estudados, fez-se necessário o estudo que segue. Este considera vários tipos de *wavelets* mães aplicados a distúrbios que freqüentemente ocorrem no sistema elétrico.

Primeiramente foram tomados alguns cuidados para que deste estudo incorresse a certa validação. Em todos os casos, para os distintos tipos de *wavelets* mães empregadas, o sinal em análise foi decomposto somente em três níveis em AMR. Desta decomposição resultaram os sinais de detalhes 1, 2 e 3 que serão ilustrados graficamente. Como será observado, respeitaram-se valores padronizados tanto para o eixo das ordenadas, quanto das abscissas. Estas simples observações propiciarão uma direta análise visual entre os gráficos a serem apresentados.

Considerou-se para esta fase, sinais de tensão em regime permanente, com afundamento e elevação de tensão, somando-se ainda da condição de transitórios oscilatórios. Em cada tipo de distúrbio, dez distintas *wavelets* mães foram testadas: *Haar*, *Symlet* 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8, *Daubechies* 4 e 10. Cabe comentar que outros testes foram realizados com outros tipos de *wavelets* mãe. Porém, somente os aqui apresentados mostraram maior grau de relevância. Todos os resultados evidenciados serão descritos no decorrer deste capítulo.

Como primeira situação, tem-se a Figura 30 que mostra um sinal em regime permanente. Este será decomposto em três níveis de resolução através dos 10 tipos de *wavelet* mães testadas.

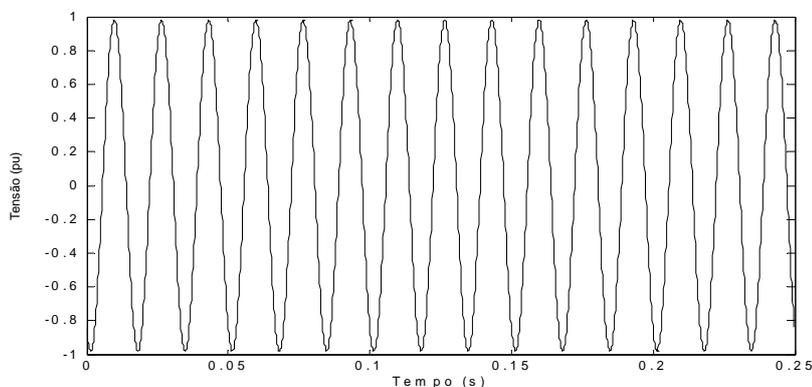
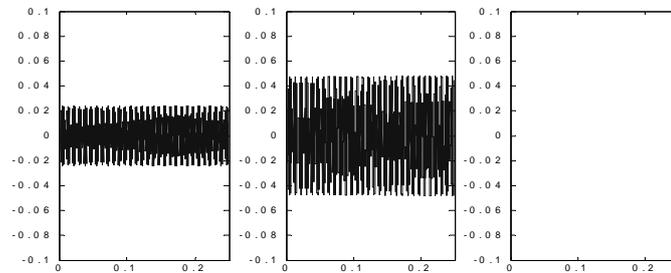


Figura 30- Sinal de tensão em regime permanente.

Como não temos nenhuma anomalia no sinal de entrada, espera-se que a resposta seja a mais suave possível. É perceptível que a partir da *sym4* a decomposição se torna mais suave em relação à *sym2*, *sym3* e a de *Haar*. O mesmo fato ocorre com a *db4* e a *db10*. Desta primeira etapa conclui-se que as *wavelets* de maior grau são melhores para este estudo de detecção e localização no tempo. Tal afirmação pode ser observada através da Figura 34 a 40. Lembra-se que os gráficos mostram no eixo das abscissas o tempo, e no eixo das ordenadas, a amplitude de cada nível de detalhe da AMR.



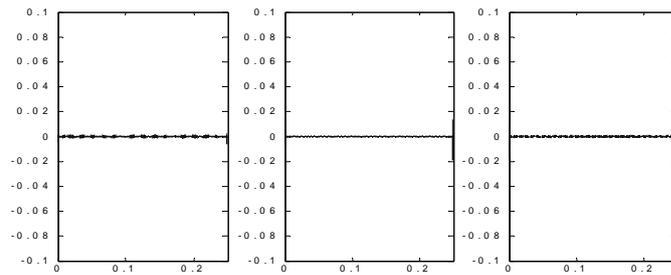


Figura 34 - Decomposição de um sinal em regime permanente utilizando a sym4.

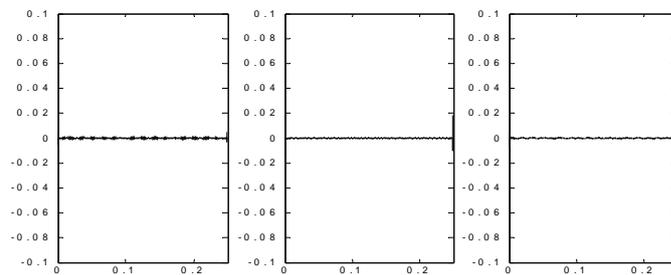


Figura 35 - Decomposição de um sinal em regime permanente utilizando a sym5.

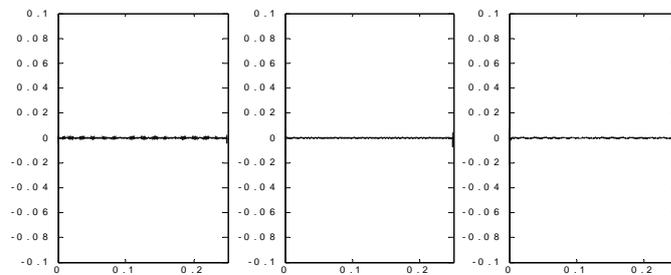


Figura 36 - Decomposição de um sinal em regime permanente utilizando a sym6.

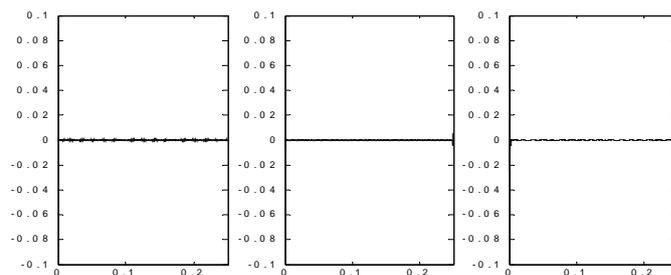


Figura 37 - Decomposição de um sinal em regime permanente utilizando a sym7.

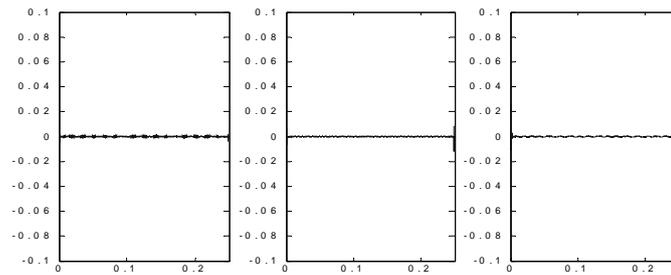


Figura 38 - Decomposição de um sinal em regime permanente utilizando a *sym8*.

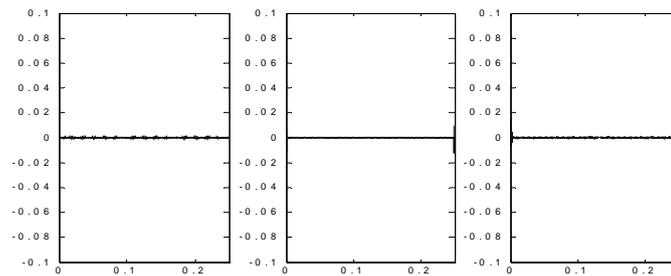


Figura 39 - Decomposição de um sinal em regime permanente utilizando a *db4*.

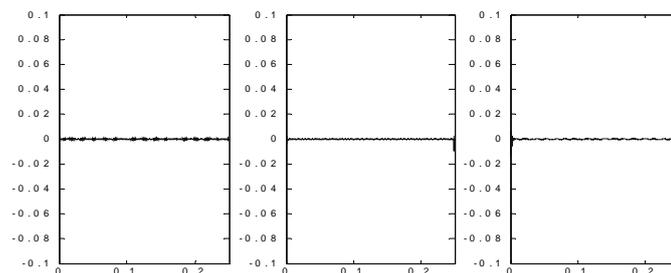


Figura 40 - Decomposição de um sinal em regime permanente utilizando a *db10*.

No que segue são apresentadas as decomposições em três níveis de resolução de um sinal de tensão caracterizando um afundamento de tensão de 20%, conforme ilustra a Figura 41. Foram realizados os mesmos testes que no caso anterior, ou seja, este sinal foi decomposto pelos dez tipos de *wavelets* mães. Através destes gráficos é possível visualizar as *wavelets* mães que apresentaram melhores resultados para este caso em específico. As *wavelets* de *Haar*, *sym2* e *sym3* apresentam muitos componentes indesejáveis que podem atrapalhar na aplicação desejada de detecção e localização no tempo, como ilustram as Figuras 42, 43 e 44. Estes componentes podem ser desprezados pelo uso de *wavelets*

adequadas, como da família *Symlet* de ordem igual ou superior a quatro e também das *Daubechies* de mesma ordem, conforme mostram as Figuras de 45 a 51.

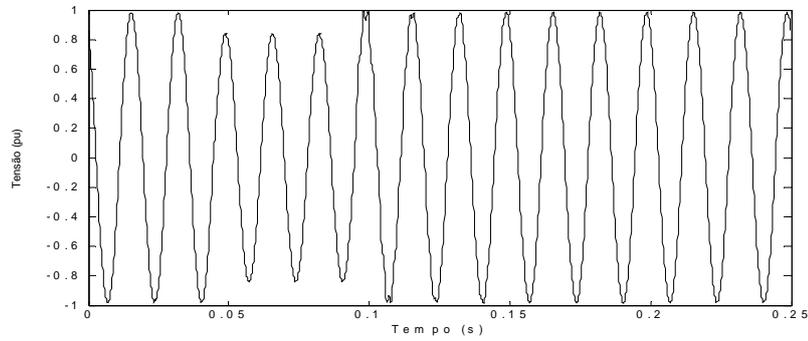


Figura 41 - Sinal de tensão com um afundamento de tensão.

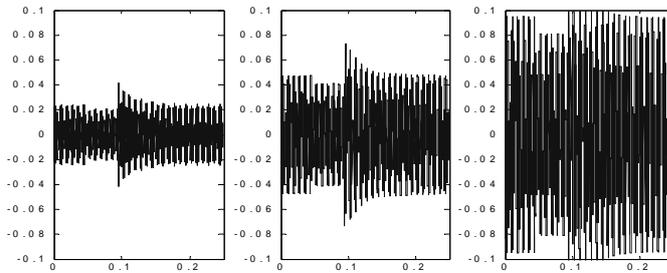


Figura 42 - Decomposição de um sinal com afundamento de tensão utilizando Haar.

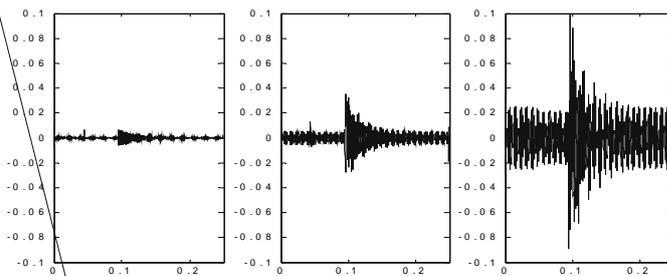
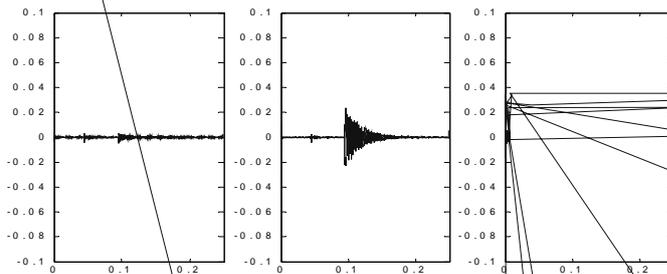


Figura 43 - Decomposição de um sinal com afundamento de tensão utilizando a sym2.



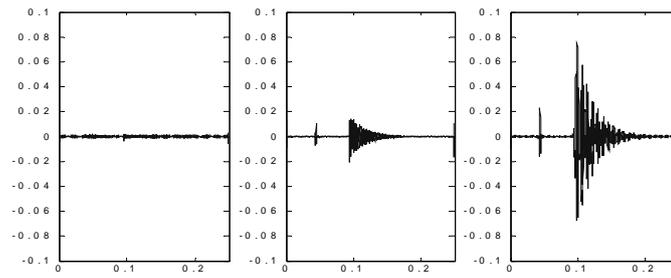


Figura 45 - Decomposição de um sinal com afundamento de tensão utilizando a sym4.

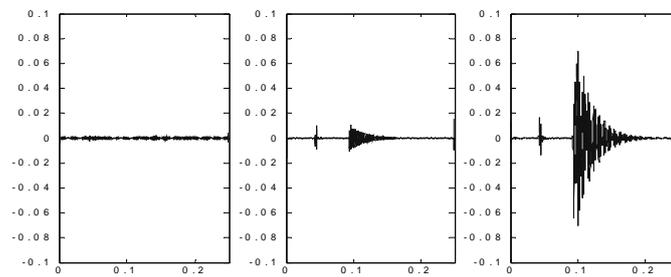
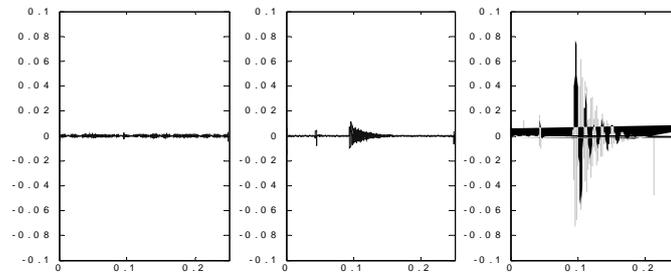


Figura 46 - Decomposição de um sinal com afundamento de tensão utilizando a sym5.



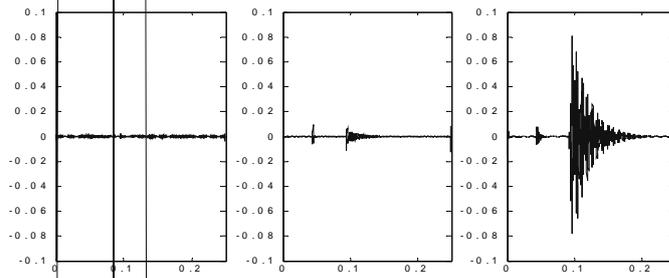
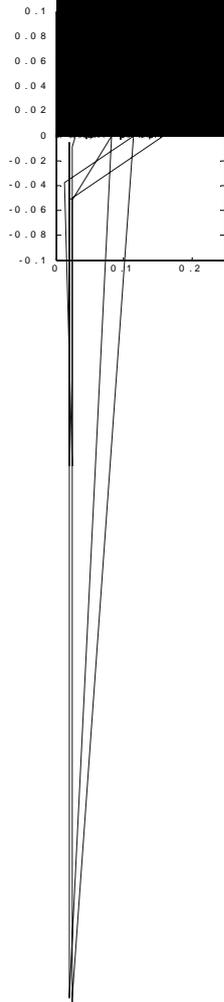
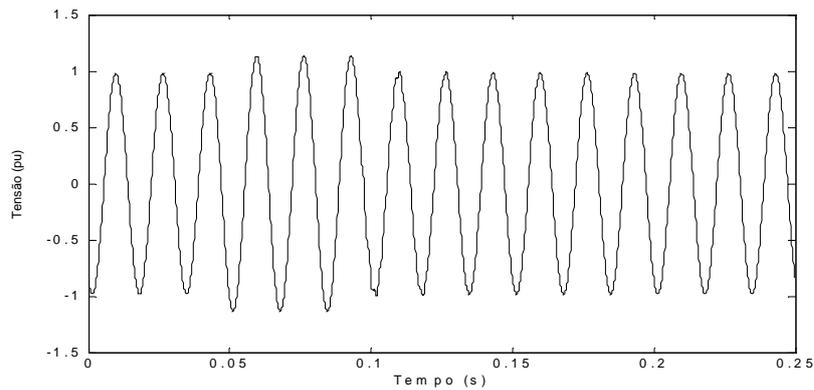


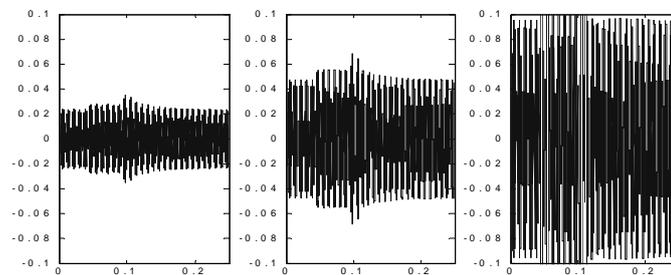
Figura 49 - Decomposição de um sinal com afundamento de tensão utilizando a sym8.



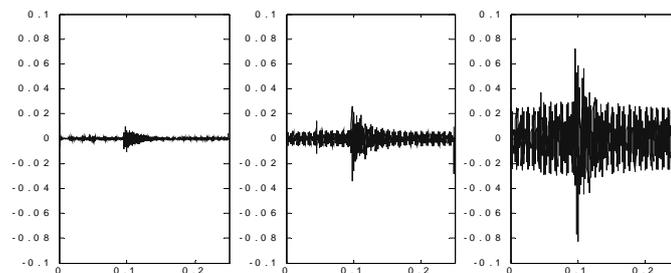
e classificação. Este questionamento pode não ter uma resposta única e conclusiva e sim, um conjunto de soluções factíveis. Visto que algumas *wavelet* mães são apropriadas a determinadas aplicações e outras não.



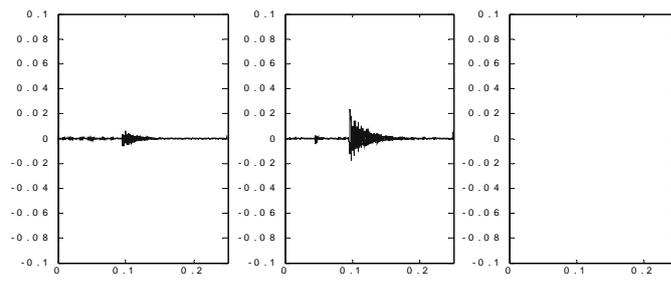
*Figura 52 - Sinal de tensão com uma elevação de tensão.*

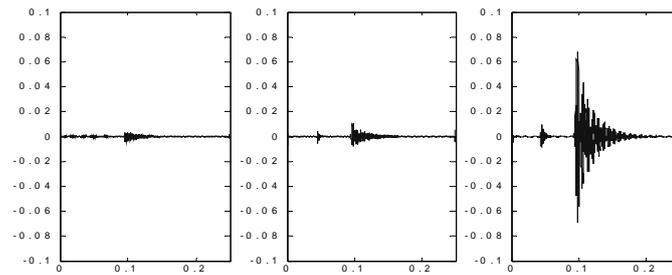


*Figura 53 - Decomposição de um sinal com elevação de tensão utilizando Haar.*

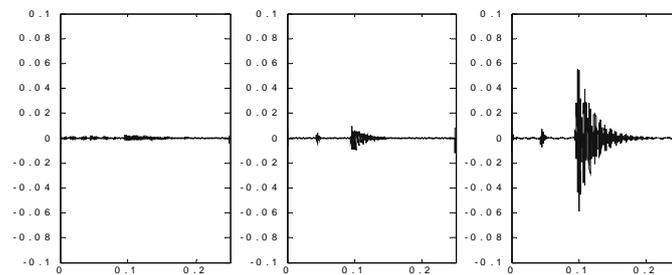


*Figura 54 - Decomposição de um sinal com elevação de tensão utilizando a sym2.*

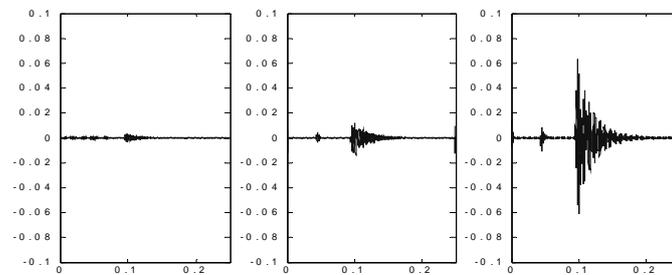




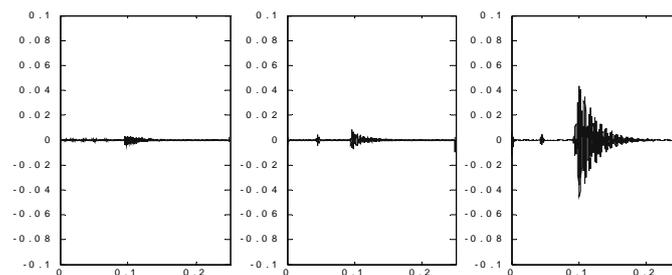
*Figura 59 - Decomposição de um sinal com elevação de tensão utilizando a sym7.*



*Figura 60 - Decomposição de um sinal com elevação de tensão utilizando a sym8.*



*Figura 61 - Decomposição de um sinal com elevação de tensão utilizando a db4.*



*Figura 62 - Decomposição de um sinal com elevação de tensão utilizando a db10.*

Os testes sobre a escolha da melhor *wavelet* mãe também foram aplicados aos casos de distúrbios com transitórios oscilatórios. Inicialmente, na Figura 63, é ilustrado o sinal de tensão a ser analisado através das dez *wavelets* mães.

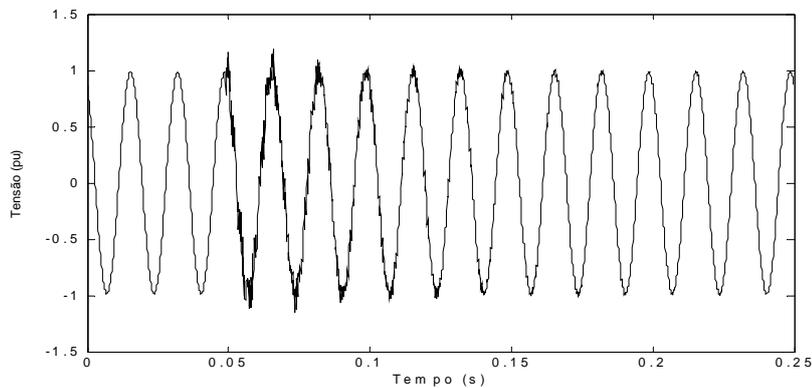


Figura 63 - Sinal de tensão com transitório oscilatório.

Em seguida, são apresentadas as decomposições em três níveis de resolução através da AMR. A Figura 64 ilustra esta decomposição utilizando a *wavelet* de Haar. Conforme discutido anteriormente, esta *wavelet* mãe não apresenta bons resultados para estes casos estudados, assim como as *wavelets* sym2 e sym3 mostradas pelas Figura 65 e Figura 66, respectivamente. Já com relação às demais *wavelets* testadas, estas apresentaram resultados satisfatórios que comprovam sua potencialidade (Figura 67 – 73).

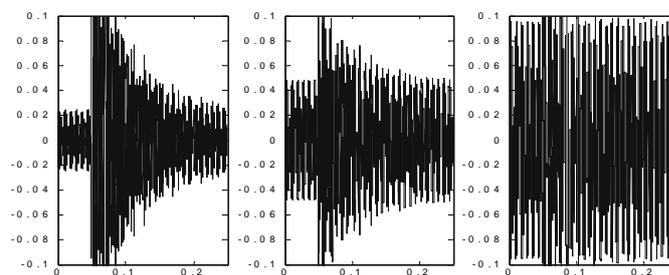
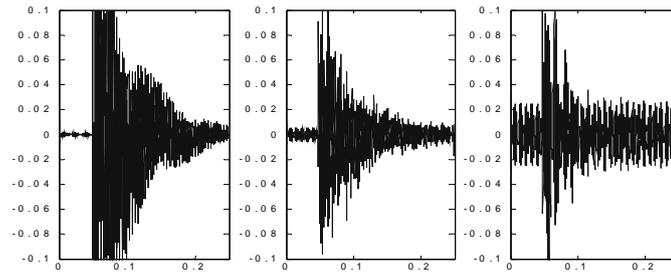
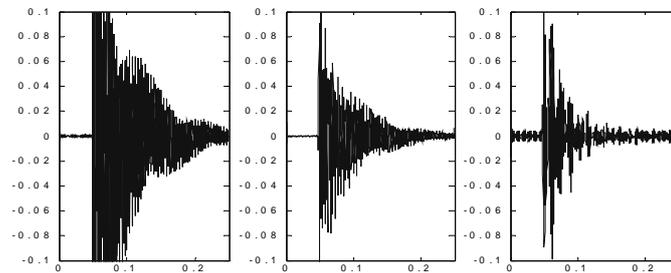


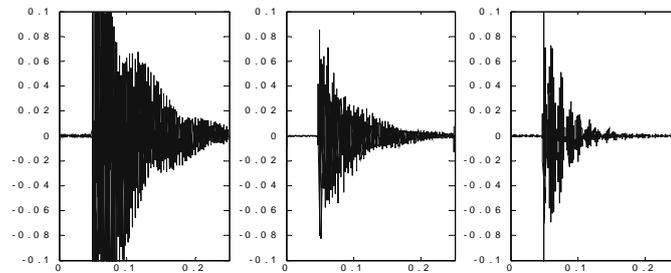
Figura 64 - Decomposição de um sinal com transitórios oscilatórios utilizando Haar.



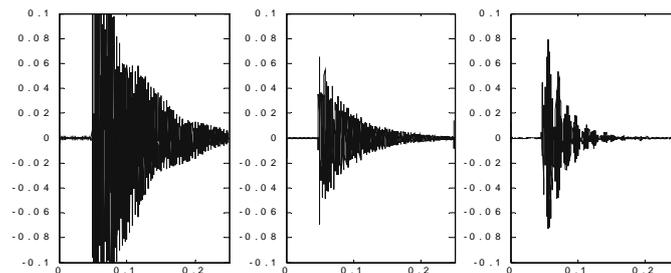
*Figura 65 - Decomposição de um sinal com transitórios oscilatórios utilizando a sym2.*



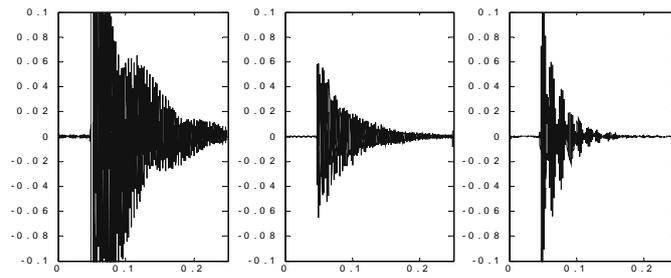
*Figura 66 - Decomposição de um sinal com transitórios oscilatórios utilizando a sym3.*



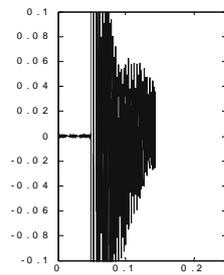
*Figura 67 - Decomposição de um sinal com transitórios oscilatórios utilizando a sym4.*

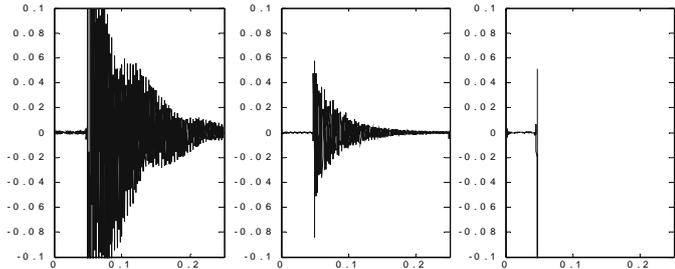


*Figura 68 - Decomposição de um sinal com transitórios oscilatórios utilizando a sym5.*



*Figura 69 - Decomposição de um sinal com transitórios oscilatórios utilizando a sym6.*







## 4 - SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO

Para que este estudo atendesse as situações reais freqüentemente encontradas em campo, utilizou-se a modelagem de um sistema de distribuição real de uma concessionária de energia elétrica regional. Para esta fase da pesquisa não está prevista a realização de uma pesquisa em campo para obtenção de dados reais medidos junto às concessionárias. Assim, fez-se uso de simulações computacionais via *software* específico, neste caso o *software* ATP – *Alternative Transients Program* [13], que será citado a seguir.

O sistema de distribuição estudado e simulado através do *software* ATP, é representado através do diagrama da Figura 74 [71].

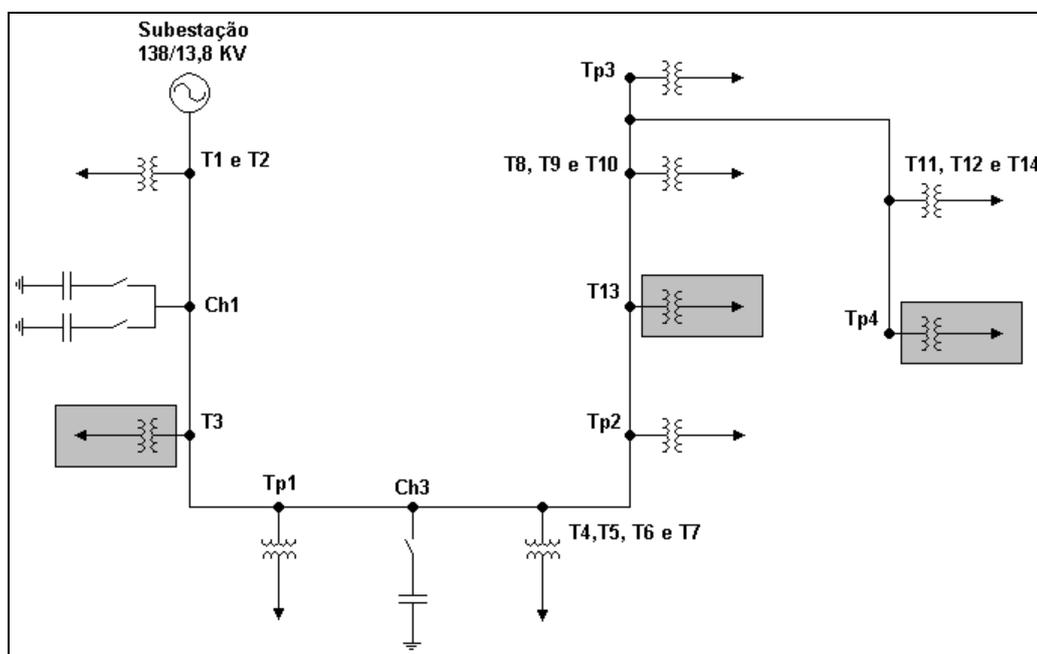


Figura 74 – Diagrama do sistema elétrico de distribuição em análise.

Através da ilustração, é possível ter uma visão adequada do sistema como um todo, situando a localização dos diversos componentes que constituem o sistema de distribuição. A taxa amostral utilizada nas simulações foi de 7.680 Hz, assim como a utilizada em [10]. Tal valor foi utilizado por existir instrumentos de medição e obtenção de dados com frequência de amostragem similar, como por exemplo, o BMI (*Basic Measuring Instrument*) Modelo 7100, que apresenta um valor em torno de 7,7 kHz [72].

O transformador da subestação recebe a tensão de 138kV. A partir desta se define o sistema de distribuição com tensão de 13,8kV. Os transformadores de distribuição 3 e 13 e o transformador particular 4, mostrados no diagrama pelos blocos cinza, foram modelados considerando suas curvas de saturação. Já para os demais, foram considerados somente os seus pontos de ligação com o sistema. Por exemplo, os transformadores particulares 1, 2 e 3, foram modelados sem considerar as respectivas curvas de saturação. Com isso, as cargas foram referidas ao primário com uma parcela RL em paralelo com um banco de capacitores para correção do fator de potência. Para dimensionar o banco, as cargas foram consideradas com um fator de potência original de 0,75 para posterior correção até os desejados 0,92. As características destes transformadores particulares são mostradas na Tabela 1, a qual apresenta as potências e suas respectivas cargas incidentes.

*Tabela 1 – Dados dos transformadores particulares.*

<b>Transformadores Particulares</b>	<b>Carga Nominal (kVA) e número de unidades</b>	<b>Carga Incidente (kVA)</b>	<b>Fator de Potência corrigido da Carga</b>
1	2250/03	2500	0,92
2	3000/04	1600	0,92
3	450/02	456	0,92
4	300/ 01	280	0,92

Os transformadores de distribuição apresentam as características mostradas na Tabela 2 e seus fatores de potência gerais são considerados como 0,95 para se definir a carga RL após o mesmo. Em alguns casos, um grupo de transformadores foi representado por apenas

um bloco, sendo suficiente desta forma, representar somente as cargas equivalentes, cujo ponto de conexão com o sistema está indicado na Figura 74. Deve-se lembrar que todos os transformadores de distribuição possuem conexões do tipo delta-estrela aterrado, com resistência de aterramento de zero ohm e *tap* ajustado em 13.200/220 volts.

*Tabela 2 – Dados dos transformadores de distribuição.*

<b>Transformadores de Distribuição</b>	<b>Carga Nominal (kVA)</b>	<b>Carga Incidente (kVA)</b>	<b>Fator de Potência da Carga</b>
1	75	40	0,95
2	75	31	0,95
3	45	32	0,95
4	45	22	0,95
5	112,5	19	0,95
6	225	89	0,95
7	150	27	0,95
8	150	29	0,95
9	45	9	0,95
10	225	19	0,95
11	30	26	0,95
12	150	86	0,95
13	75	19	0,95
14	75	7	0,95

Com relação aos bancos de capacitores presentes no sistema, estes são três (BC 1, 2 e 3) e estão instalados ao longo do sistema através dos pontos Ch1 e Ch3. Sendo assim, o primeiro banco de capacitor (BC1), é um banco fixo de 1200 kVAr instalado a 476 metros da subestação no ponto Ch1, como pode ser visto na Figura 74. Os outros dois bancos (BC2 e BC3) são de 600 kVAr cada um, distanciados de 476 e 1.176 metros da subestação e situados nos pontos Ch1 e Ch3, respectivamente. Estes dois últimos bancos de capacitores foram alocados no sistema, somente para estudos comparativos entre bancos fixos e automáticos de capacitores em outro contexto.

O alimentador principal é constituído por um cabo nu, CA-477 MCM, em estrutura aérea convencional com comprimento total de 1.576 metros, sendo seus trechos representados

por elementos RL mutuamente acoplados. O sistema também possui um alimentador em derivação onde estão localizados os transformadores de distribuição 11, 12 e 14, e também o transformador particular 4. Neste alimentador o tipo do cabo é 1/0 AWG, com comprimento de 233 metros.

### **Distúrbios Caracterizados Através das Simulações**

Após diversas análises realizadas através do *software* ATP, considerando o sistema de distribuição mostrado, obteve-se a caracterização de diversos fenômenos que serão apresentados no decorrer deste capítulo.

Na Tabela 3 são ilustradas as situações de afundamentos de tensão obtidas, quando da consideração de faltas aplicadas no transformador de distribuição 13, com ângulo de

saber: 0°, 45° e 90°. Os valores da resistência de falta variaram entre 0,01 e 10 ohms de modo a obter as amplitudes dos afundamentos de tensão conforme ilustrados na 5ª coluna desta tabela.

*Tabela 4 – Afundamentos de tensão obtidos através de faltas aplicadas no ponto BC1.*

<b>Número de casos</b>	<b>Localização da Falta</b>	<b>Ângulo de Incidência (°)</b>	<b>Resistência de Falta (<math>\Omega</math>)</b>	<b>Tensão Remanescente (p.u.)</b>
1	BC1	0, 45 e 90	0,01	0,23
2	BC1	0 e 90	0,6	0,40
3	BC1	0 e 90	0,8	0,45
4	BC1	0, 45 e 90	1	0,49
5	BC1	0, 45 e 90	1,5	0,58
6	BC1	0, 45 e 90	2	0,65
7	BC1	0, 45 e 90	2,5	0,69
8	BC1	0, 45 e 90	3	0,73
9	BC1	0, 45 e 90	3,5	0,76
10	BC1	0, 45 e 90	4	0,78
11	BC1	0, 45 e 90	4,5	0,80
12	BC1	0, 45 e 90	5	0,82
13	BC1	0, 45 e 90	5,5	0,83
14	BC1	0, 45 e 90	6	0,84
15	BC1	0, 45 e 90	6,5	0,85
16	BC1	0, 45 e 90	7	0,86
17	BC1	0, 45 e 90	8	0,87
18	BC1	0, 45 e 90	9	0,88
19	BC1	0, 45 e 90	10	0,89

No caso de faltas aplicadas junto ao banco de capacitor 3 (BC3), os resultados são evidenciados na Tabela 5. Nesta situação foram obtidos 17 casos para cada valor de ângulo de incidência da falta. Como os ângulos foram variados entre 0°, 45° e 90°, pode-se obter um total de 51 situações de afundamento de tensão somente para as faltas aplicadas no BC3. As tensões remanescentes, que correspondem a afundamentos de tensão obtidos através destas simulações, variaram entre 0,23 p.u. e 0,89 p.u. de acordo com a mudança dos valores das resistências de falta entre 0,01 e 10  $\Omega$ .

Tabela 5 – Afundamentos de tensão obtidos através de faltas aplicadas no ponto BC3.

Número de casos	Localização da Falta	Ângulo de Incidência (°)	Resistência de Falta ( $\Omega$ )	Tensão Remanescente (p.u.)
1	BC3	0, 45 e 90	0,01	0,41
2	BC3	0, 45 e 90	1	0,54
3	BC3	0, 45 e 90	1,5	0,61
4	BC3	0, 45 e 90	2	0,66
5	BC3	0, 45 e 90	2,5	0,70
6	BC3	0, 45 e 90	3	0,74
7	BC3	0, 45 e 90	3,5	0,76
8	BC3	0, 45 e 90	4	0,78
9	BC3	0, 45 e 90	4,5	0,80
10	BC3	0, 45 e 90	5	0,82
11	BC3	0, 45 e 90	5,5	0,83
12	BC3	0, 45 e 90	6	0,84
13	BC3	0, 45 e 90	6,5	0,85
14	BC3	0, 45 e 90	7	0,86
15	BC3	0, 45 e 90	8	0,87
16	BC3	0, 45 e 90	9	0,88
17	BC3	0, 45 e 90	10	0,89

O quarto ponto de falta ficou localizado junto à subestação conforme mostra a Tabela 6. Nesta tabela são mostrados os valores considerados para os ângulos de incidência e resistência de falta, e por último, as amplitudes dos afundamentos de tensão obtidos. Para estas situações não foram atingidos afundamentos para 0,10 p.u. quando da consideração dos ângulos de inserção apontados (0°, 45° e 90°).

Cabe frisar que foram obtidos 177 casos de afundamento de tensão instantâneo ao longo do sistema, decorrentes da aplicação de situações faltosas em quatro pontos diferentes.

*Tabela 6 – Afundamentos de tensão obtidos através de faltas aplicadas no lado de baixa tensão do transformador da Subestação.*

<b>Número de casos</b>	<b>Localização da Falta</b>	<b>Ângulo de Incidência (°)</b>	<b>Resistência de Falta (<math>\Omega</math>)</b>	<b>Tensão Remanescente (p.u.)</b>
1	Subestação	0 e 90	0,2	0,15
2	Subestação	0 e 90	0,3	0,20
3	Subestação	0 e 90	0,4	0,25
4	Subestação	0 e 90	0,5	0,30
5	Subestação	0 e 90	0,6	0,35
6	Subestação	0, 45 e 90	1	0,46
7	Subestação	0, 45 e 90	1,5	0,57
8	Subestação	0, 45 e 90	2	0,64
9	Subestação	0, 45 e 90	2,5	0,69
10	Subestação	0, 45 e 90	3	0,73
11	Subestação	0, 45 e 90	3,5	0,76
12	Subestação	0, 45 e 90	4	0,78
13	Subestação	0, 45 e 90	4,5	0,80
14	Subestação	0, 45 e 90	5	0,82
15	Subestação	0, 45 e 90	5,5	0,83
16	Subestação	0, 45 e 90	6	0,84
17	Subestação	0, 45 e 90	6,5	0,85
18	Subestação	0, 45 e 90	7	0,86
19	Subestação	0, 45 e 90	8	0,87
20	Subestação	0, 45 e 90	9	0,88
21	Subestação	0, 45 e 90	10	0,89

Para os casos de elevação de tensão, a Tabela 7 mostra os resultados obtidos decorrentes das simulações. Deve ser ressaltado que os valores de elevação de tensão são obtidos junto à fase C de um sistema trifásico, onde, a falta aplicada, incidiu sobre a fase A deste mesmo sistema. Assim como nas tabelas anteriores, esta tabela mostra os resultados com ângulo de incidência de falta de 0° e 90°. A falta foi aplicada junto ao transformador particular 4 (Tp4, Figura 74), obtendo-se então os resultados evidenciados. No caso de elevação de tensão, os valores de resistência de falta variaram de 0,5 a 3 ohms. Com o ajuste destes valores foram obtidas as amplitudes de distúrbios mostradas na quinta coluna desta

tabela, que variaram entre 1,16 p.u. a 1,30 p.u.. Desta forma foram totalizados 8 casos de elevações de tensão através das situações de faltas geradas.

*Tabela 7 - Elevações de tensão obtidos através de faltas aplicadas no ponto próximo ao transformador particular 4.*

<b>Número de casos</b>	<b>Localização da Falta</b>	<b>Ângulo de Incidência (°)</b>	<b>Resistência de Falta (<math>\Omega</math>)</b>	<b>Tensão Remanescente (p.u.)</b>
1	Tp4	0 e 90	0,5	1,30
2	Tp4	0 e 90	1	1,26
3	Tp4	0 e 90	2	1,20
4	Tp4	0 e 90	3	1,16

Na Tabela 8 são evidenciados os resultados obtidos para o distúrbio de elevação de tensão no caso de faltas aplicadas junto ao primeiro banco de capacitores (BC1) com ângulo de incidência de falta de 0°, 45° e 90°. Também são mostradas nesta tabela informações como resistência de falta e a amplitude da elevação de tensão obtida.

*Tabela 8 - Elevações de tensão obtidas através de faltas aplicadas no ponto BC1.*

<b>Número de casos</b>	<b>Localização da Falta</b>	<b>Ângulo de Incidência (°)</b>	<b>Resistência de Falta (<math>\Omega</math>)</b>	<b>Tensão Remanescente (p.u.)</b>
1	BC1	0 e 90	0,05	1,60
2	BC1	0, 45 e 90	0,1	1,55
3	BC1	0 e 90	0,5	1,45
4	BC1	0 e 90	0,7	1,40
5	BC1	0, 45 e 90	1	1,32
6	BC1	0, 45 e 90	1,5	1,26
7	BC1	0, 45 e 90	2	1,21
8	BC1	0, 45 e 90	2,5	1,17
9	BC1	0, 45 e 90	3	1,15
10	BC1	0, 45 e 90	3,5	1,13
11	BC1	0, 45 e 90	4	1,11

Os dados obtidos através da aplicação de faltas próximas ao terceiro banco de capacitores são apresentados na Tabela 9. Nesta tabela também são mostrados os três

diferentes ângulos de incidência de falta  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $90^\circ$ . Os valores de resistência de falta variaram entre 0,01 e 4 ohms de modo a obter as amplitudes de elevações de tensão conforme ilustra a 5ª coluna desta tabela.

*Tabela 9 - Elevações de tensão obtidas através de falta no BC3.*

<b>Número de casos</b>	<b>Localização da Falta</b>	<b>Ângulo de Incidência (<math>^\circ</math>)</b>	<b>Resistência de Falta (<math>\Omega</math>)</b>	<b>Tensão Remanescente (p.u.)</b>
1	BC3	0, 45 e 90	0,01	1,45
2	BC3	0, 45 e 90	1	1,29
3	BC3	0, 45 e 90	1,5	1,24
4	BC3	0, 45 e 90	2	1,20
5	BC3	0, 45 e 90	2,5	1,17
6	BC3	0, 45 e 90	3	1,15
7	BC3	0, 45 e 90	3,5	1,13
8	BC3	0, 45 e 90	4	1,11

As situações de faltas aplicadas diretamente na subestação apresentaram os resultados conforme a Tabela 10. Nesta situação foram obtidos 32 casos entre os 3 tipos de ângulo de incidência de falta que variaram entre  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $90^\circ$ . As amplitudes das elevações de tensão adquiridas através desta simulação variaram entre 1,11 p.u. e 1,70 p.u. de acordo com a mudança dos valores das resistências de falta entre 0,01 e  $4\Omega$ .

Com relação às interrupções de tensão momentâneas, estas foram adquiridas através de faltas diretamente aplicadas no lado de baixa tensão da subestação, junto ao transformador principal, como mostrado na Tabela 11. Da mesma forma que nos casos anteriores para afundamento e elevação de tensão, o ângulo de inserção de falta foi de  $0^\circ$  e  $90^\circ$ , com uma resistência de falta variando entre 0,01 a 0,10 ohms. Assim foram obtidos os resultados para interrupção de tensão mostrada na quinta coluna desta tabela com amplitude variando para 0,08 p.u. a 0,01 p.u., correspondendo aos limites estabelecidos para interrupção de tensão de acordo com a definição. Diferentemente dos casos de afundamentos e elevações de tensão, os

dados obtidos para interrupções de tensão foram caracterizados como Interrupções Momentâneas, em virtude das características inerentes ao sinal.

*Tabela 10 - Elevações de tensão obtidas através de faltas aplicadas no lado de baixa tensão na Subestação.*

<b>Número de casos</b>	<b>Localização da Falta</b>	<b>Ângulo de Incidência (°)</b>	<b>Resistência de Falta (<math>\Omega</math>)</b>	<b>Tensão Remanescente (p.u.)</b>
1	Subestação	0, 45 e 90	0,01	1,70
2	Subestação	0 e 90	0,04	1,69
3	Subestação	0 e 90	0,1	1,67
4	Subestação	0 e 90	0,4	1,54
5	Subestação	0 e 90	0,5	1,50
6	Subestação	0, 45 e 90	1	1,34
7	Subestação	0, 45 e 90	1,5	1,27
8	Subestação	0, 45 e 90	2	1,21
9	Subestação	0, 45 e 90	2,5	1,17
10	Subestação	0, 45 e 90	3	1,15
11	Subestação	0, 45 e 90	3,5	1,12
12	Subestação	0, 45 e 90	4	1,11

*Tabela 11 - Resultado das simulações do sistema para interrupções de tensão.*

<b>Número de casos</b>	<b>Localização da Falta</b>	<b>Ângulo de Incidência (°)</b>	<b>Resistência de Falta (<math>\Omega</math>)</b>	<b>Tensão Remanescente (p.u.)</b>
1	Subestação	0 e 90	0,10	0,08
2	Subestação	0 e 90	0,08	0,06
3	Subestação	0 e 90	0,05	0,04
4	Subestação	0 e 90	0,01	0,01

Também foram simulados outros casos com resistência de falta variando entre  $15\Omega$  e  $10k\Omega$  conforme mostrado na Tabela 12, com intuito de adquirir outras amplitudes de distúrbios. Porém estes casos não apresentaram porcentagens suficientes para refletir um determinado distúrbio. A localização da falta aplicada também foi variada entre subestação, BC1 e BC3, porém nesta tabela, foi mostrado apenas o caso quando da subestação.

Tabela 12 – Resultado das simulações do sistema para outros valores de resistência de falta.

Número de casos	Localização da Falta	Ângulo de Incidência (°)	Resistência de Falta ( $\Omega$ )	Tensão Remanescente (p.u.)
1	Subestação	0, 45 e 90	15	0,92
2	Subestação	0, 45 e 90	20	0,94
3	Subestação	0, 45 e 90	30	0,95
4	Subestação	0, 45 e 90	40	0,96
5	Subestação	0, 45 e 90	50	0,96
6	Subestação	0, 45 e 90	60	0,96
7	Subestação	0, 45 e 90	80	0,96
8	Subestação	0, 45 e 90	100	0,96
9	Subestação	0, 45 e 90	120	0,96
10	Subestação	0, 45 e 90	150	0,96
11	Subestação	0, 45 e 90	200	0,96
12	Subestação	0, 45 e 90	250	0,96
13	Subestação	0, 45 e 90	500	0,96
14	Subestação	0, 45 e 90	1000	0,96
15	Subestação	0, 45 e 90	3000	0,96
16	Subestação	0, 45 e 90	5000	0,96
17	Subestação	0, 45 e 90	7000	0,96
18	Subestação	0, 45 e 90	10000	0,98

Para obtenção dos dados referentes a transitórios oscilatórios, foram utilizados os bancos de capacitores BC2 e BC3. O chaveamento foi realizado no banco BC3, estando o banco BC2 ligado em regime permanente. A Tabela 13 apresenta estes casos simulados, lembrando que o banco foi chaveado com ângulos de incidência de 0° e 90°. O local da medição variou entre subestação, transformador particular 4, transformadores de distribuição 1, 3, 8 e 13, para obtenção destes 12 diferentes casos de transitórios oscilatórios.

No caso de ruídos presentes na forma de onda, alguns cuidados foram tomados, uma vez que estes sinais são comumente encontrados em conjunto com outros distúrbios. Assim, foi adotada a seguinte metodologia: utilizou-se uma forma de onda em regime permanente do próprio sistema em estudo e sobrepôs-se a esta onda um ruído branco com amplitudes variando de 0,1 a 1,2%. Esta sobreposição ocorreu a partir de um determinado instante de

tempo. Esta modelagem foi realizada através do *software Matlab®*, obtendo 12 casos diferentes de ruídos para submissão da análise.

*Tabela 13 – Resultado das simulações do sistema para transitórios oscilatórios.*

<b>Número de Casos</b>	<b>Banco Chaveado</b>	<b>Ângulo de Incidência (°)</b>	<b>Local de Medição</b>
1	BC3	0 e 90	Tp4
2	BC3	0 e 90	Td 8, 9 e 10
3	BC3	0 e 90	Td3
4	BC3	0 e 90	Td13
5	BC3	0 e 90	Td 1 e 2
6	BC3	0 e 90	Subestação

## 5 - ALGORITMO PROPOSTO

### 5.1 - Módulo de Detecção e Localização no Tempo

A estrutura modular do algoritmo implementado terá como objetivos para este relato, caracterizar e transmitir importantes informações sobre o sinal em análise. O primeiro módulo diz respeito à detecção e localização no tempo dos distúrbios associados.

Para ilustrar a seqüência de operações do primeiro módulo, que utiliza a wavelet mãe sym4 para detectar e localizar no tempo os distúrbios, temos a Figura 75 que caracteriza uma condição de transitório oscilatório proveniente do chaveamento de um banco de capacitores. Como critério inicial da lógica computacional implementada, considera-se uma janela de dados contendo informações de um ciclo do sinal sob análise.

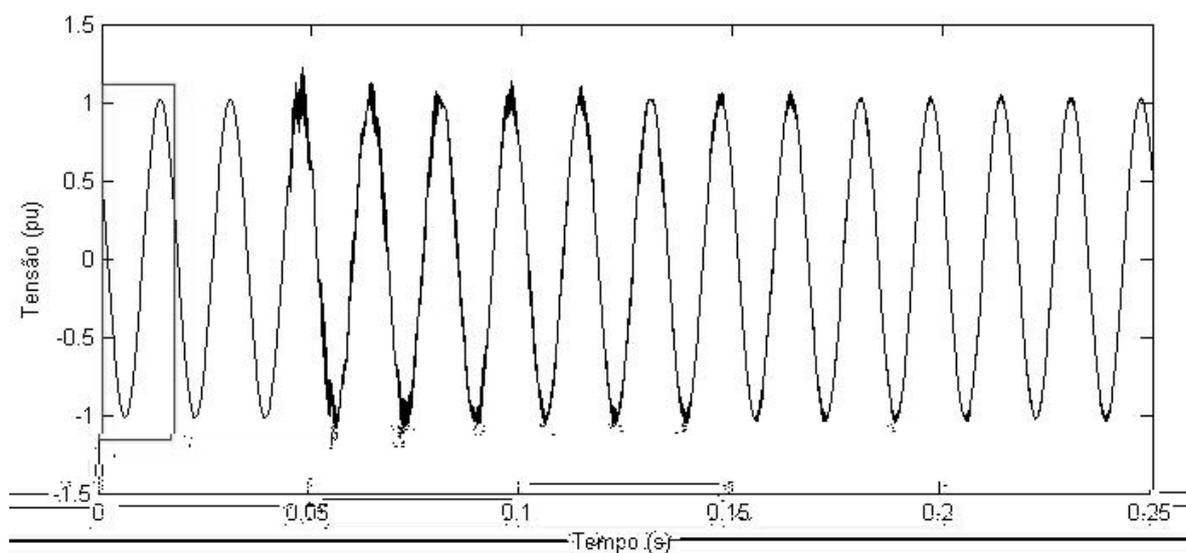
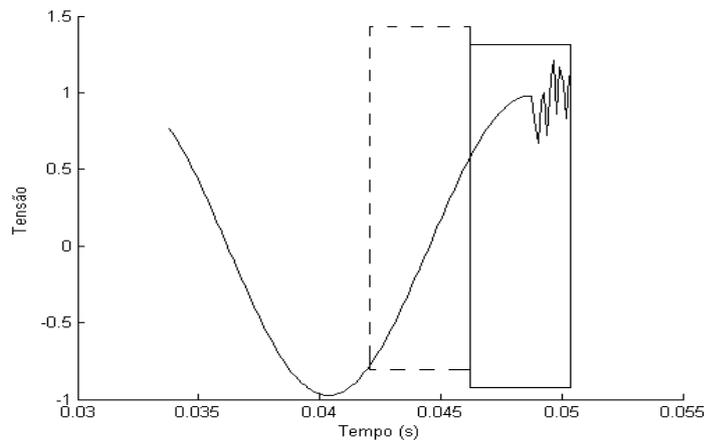


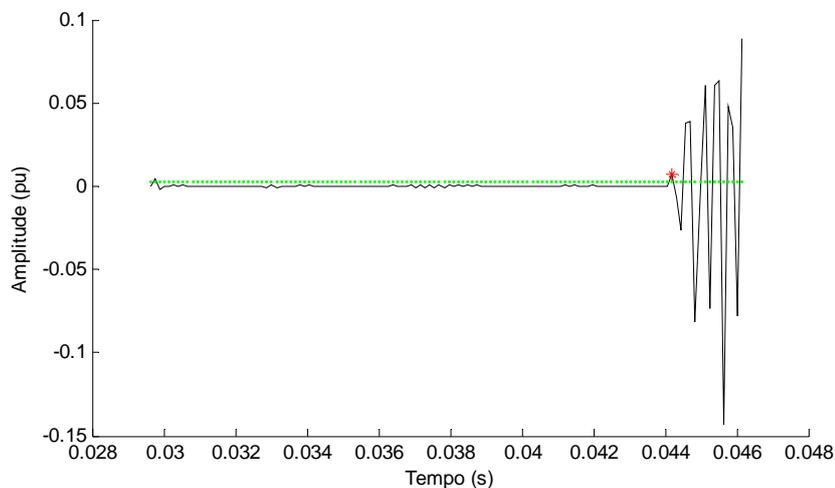
Figura 75 – Sinal de tensão com presença de um transitório oscilatório.

Através desta janela evidencia-se um deslocamento sobre o sinal observado, o qual corresponde a um quarto de ciclo, considerando-se a frequência de 60 Hz do sistema em análise. Fica claro que todo o processamento realizado pela aplicação da TW deverá estar restrito ao tempo caracterizado por este passo de deslocamento, já que, a cada um quarto de ciclo ( $\frac{1}{4}$  de ciclo corresponde a 4,16 ms) teremos uma nova janela de dados a ser analisada pela ferramenta, como ilustrado através da Figura 76.



*Figura 76 – Sinal de tensão do sistema de distribuição janelado*

Quando da ocorrência da anomalia sobre o sinal janelado (1 ciclo), o primeiro módulo do algoritmo será capaz de detectá-lo através do primeiro nível de detalhe em AMR, como evidenciado na Figura 77.



*Figura 77 – Primeiro detalhe em AMR do sinal janelado com distúrbio.*

Analisando-se o primeiro nível de detalhe proveniente da AMR será então possível avaliar as condições operacionais do sistema. Enquanto nenhuma alteração nas formas de onda for acusada, tem-se o sistema sob uma condição normal de operação, Figura 78. Quando da acusação de determinada anomalia, que ocorre quando o primeiro nível de detalhe ultrapassa um limiar empiricamente estabelecido, inicia-se uma análise mais criteriosa pela TW no primeiro módulo (detecção e localização no tempo).

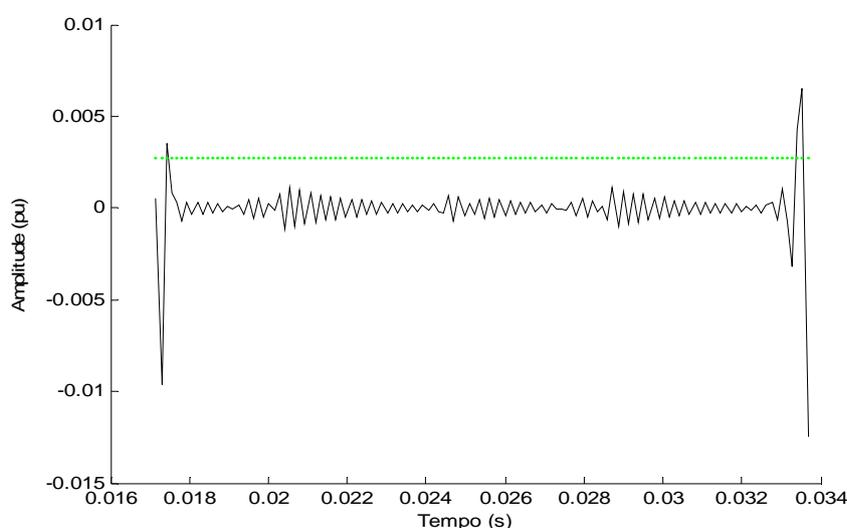


Figura 78 - Primeiro detalhe em AMR do sinal janelado em regime.

Da detecção de uma condição anormal sobre o sistema, tem-se automaticamente a localização no tempo deste e, conseqüentemente, ativa-se o segundo módulo que passa a ser o centro das informações que seguem.

## 5.2 - Módulo de Conteúdo Espectral

O segundo módulo tratará da caracterização das componentes harmônicas manifestadas, quando da existência destas. Cabe ressaltar que o segundo módulo somente será ativado mediante a confirmação da ocorrência de um distúrbio sobre o sistema.

Logo após a detecção do distúrbio pelo primeiro módulo, o algoritmo seleciona um ciclo pós-detecção para ser analisado via TRF. Cabe frisar que o exato instante inicial da

ocorrência de um determinado distúrbio é fornecido pelo primeiro módulo e, a partir deste, 128 amostras do sinal serão analisadas pela referida ferramenta, lembrando que a frequência de amostragem considerada é de 7.680 Hz. Deste procedimento podemos garantir informações de quais componentes harmônicas estão presentes no sinal, caracterizadas somente por amostras pós-deteccção, ou seja, por amostras que correspondem somente a real manifestação do distúrbio.

Como ilustrações, apresentam-se entre as Figura 79 e 81 algumas informações que podem ser evidenciadas e trabalhadas frente a uma situação de transitó

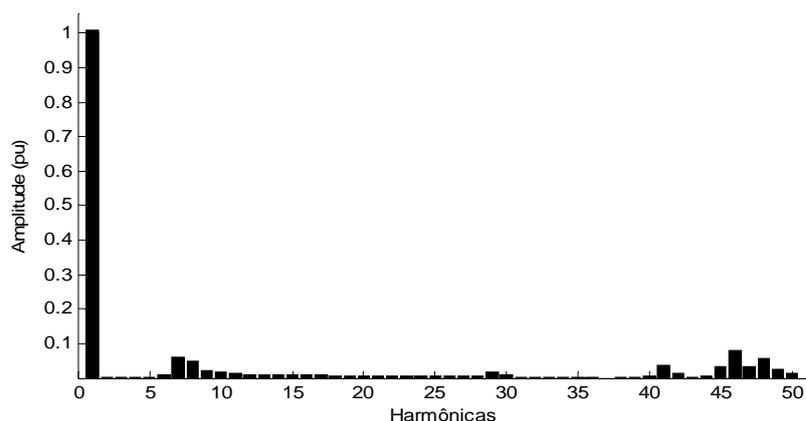


Figura 80 – Componentes harmônicas presentes no ciclo posterior a detecção do distúrbio.

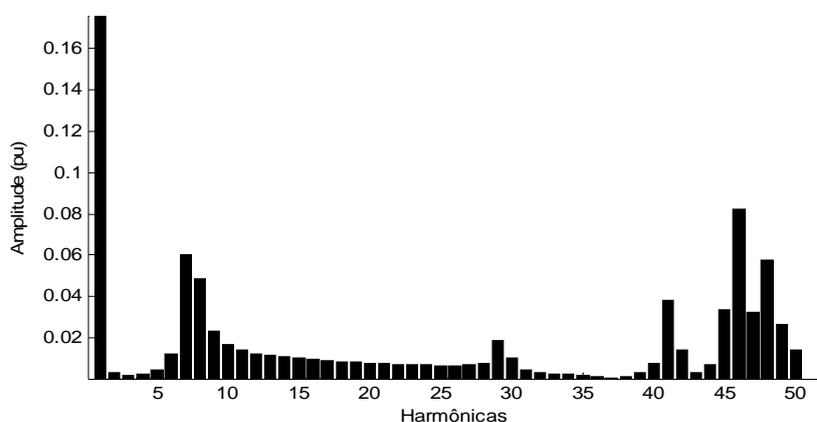


Figura 81 – Gráfico das componentes harmônicas ampliadas para ilustrar as amplitudes das mesmas.

De situações práticas, tem-se que, apesar de poderem causar interferência em dispositivos eletrônicos de baixa potência, geralmente, as componentes harmônicas de ordens elevadas (da 25<sup>a</sup> a 50<sup>a</sup> ordem, dependendo do sistema) são desprezíveis para análises de sistemas de potência [1]. Serão consideradas, para fins de estudos neste trabalho, as componentes harmônicas até a 50<sup>a</sup> ordem, onde estas são normalizadas em relação ao valor máximo caracterizado na frequência fundamental do sistema.

### 5.3 - Módulo de Classificação via TRF

Este módulo de classificação consiste em analisar o primeiro ciclo de um determinado sinal após a detecção de uma anomalia. Esta análise é dada através da aplicação da TRF neste

ciclo e em seguida comparada com a TRF do mesmo ciclo em regime permanente. A Figura 82 ilustra o sinal de entrada, que consiste de um afundamento de tensão, com destaque para o ciclo imediatamente após o distúrbio ser detectado, [73].

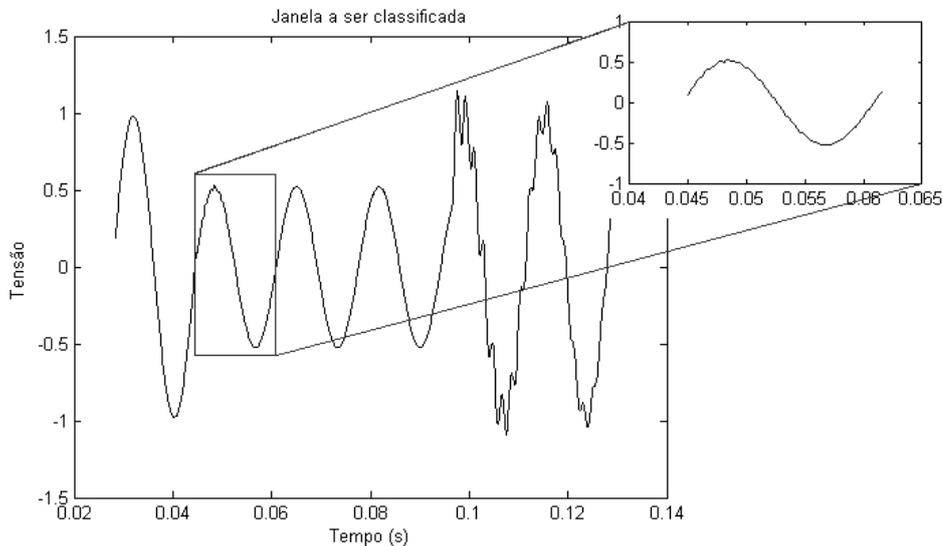


Figura 82 – Sinal de entrada ilustrando o primeiro ciclo pós-deteccção.

As magnitudes obtidas da TRF são normalizadas em relação a uma onda de um ciclo em regime permanente. A Figura 83 mostra essa normalização, caracterizando tal afundamento de tensão, e evidenciando assim, a pré-classificação do sinal. Percebe-se que apenas se obteve informações da componente de frequência fundamental, 60 Hz, sendo que as demais componentes harmônicas, da 2<sup>a</sup> a 50<sup>a</sup> ordem, não foram evidenciadas. Estas informações, juntamente com a diferença de amplitude entre a componente de frequência fundamental do sinal em análise e do sinal em regime permanente, caracterizam perfeitamente o afundamento de tensão analisado, que neste caso foi para 0,5 p.u.

Além desta classificação realizada com um ciclo após a ocorrência de um determinado distúrbio, o algoritmo também pode realizar, com intervenção do usuário, a classificação do sinal com um deslocamento de  $\frac{1}{4}$  de ciclo. Ou seja, ocorreu um distúrbio, com a conseqüente deteccção. No que segue, o algoritmo despreza  $\frac{1}{4}$  de ciclo e aí sim armazena 128 amostras para realizar a classificação como pode ser visto pela Figura 84.

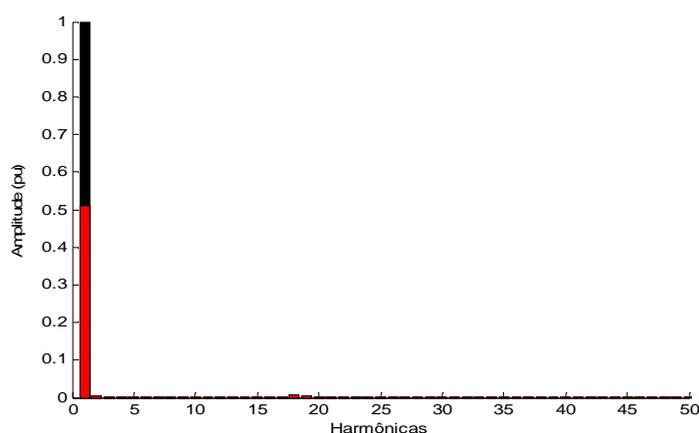


Figura 83 – TRF de um ciclo após ser detectado o distúrbio.

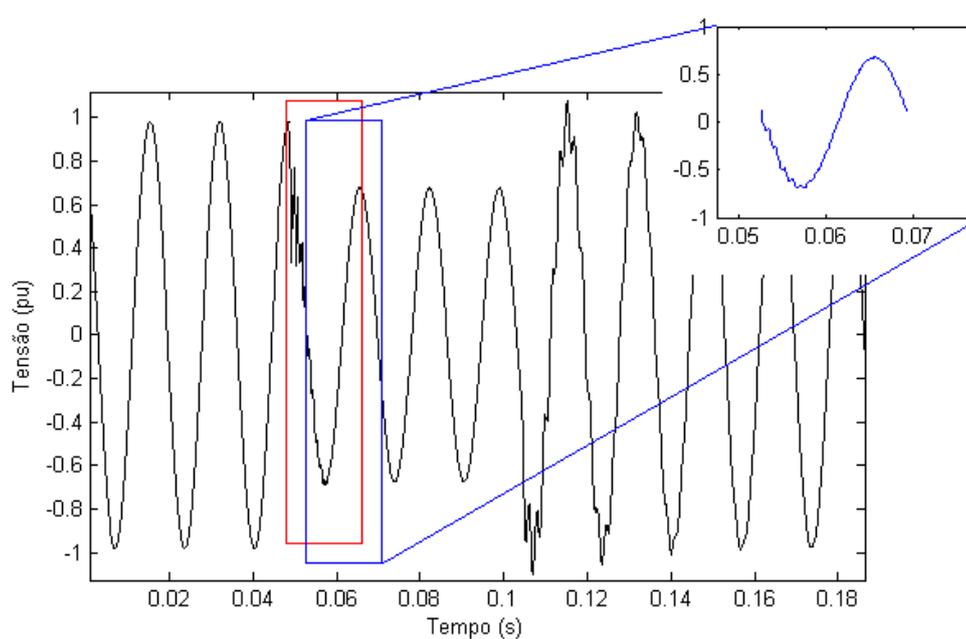


Figura 84 – Método de classificação via TRF com um deslocamento de  $1/4$  de ciclo.

Esta metodologia foi adotada em razão da possibilidade de dois ou mais eventos ocorrerem simultaneamente e assim atrapalhar a classificação coerente do distúrbio principal. Como exemplo, podemos citar a própria figura anterior que consiste de um afundamento de tensão, porém é precedida por um transitório oscilatório. Usando este procedimento evidenciaremos com melhor clareza os distúrbios agregados ao sinal, simultâneos ou não. A Figura 85 ilustra a TRF do sinal pós-deteção com deslocamento de  $1/4$  de ciclo em que é evidenciado um afundamento para 0,67 p.u..

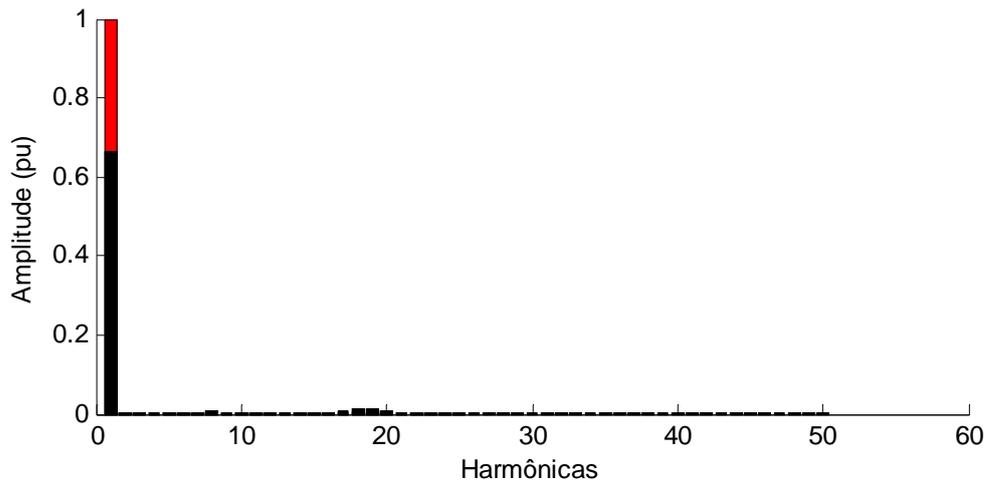


Figura 85 – TRF do sinal pós-deteção com deslocamento de  $\frac{1}{4}$  de ciclo.

#### 5.4 - Módulo de Classificação via TW

Para realizar a classificação, pretende-se testar várias metodologias de modo a obter o melhor método para esta tarefa. Até o momento foi mostrado o método de classificação via TRF, onde o mesmo foi testado e validado de acordo com os distúrbios estudados.

A nova abordagem a ser apresentada, dispondo da TW, consiste no cálculo da energia em cada nível de detalhe provindo da AMR. Desta forma, o sinal que compreende 128 amostras (1 ciclo pós deteção) é decomposto em sete níveis e em seguida é calculado a energia em cada um destes níveis de detalhes.

Para a classificação de cada distúrbio, utilizou-se como critério, três entradas  $x_1$ ,  $x_2$  e  $x_3$  para o módulo de classificação, dadas por:

$$x_1 = \frac{(E_1 + E_2)}{2} \quad (50)$$

$$x_2 = \frac{(E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5)}{5} \quad (51)$$

$$x_3 = \frac{(E_6 + E_7)}{2} \quad (52)$$

onde  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$ ,  $E_4$ ,  $E_5$ ,  $E_6$  e  $E_7$  são as energias referentes aos sete níveis de detalhes. A entrada  $x_1$ , representada pela Equação 50, compreende a zona das altas frequências contidas

no sinal representado pelas energias  $E_1$  e  $E_2$ . Através desta entrada pode-se determinar a presença de ruídos no sinal. A equação 51 representa a entrada  $x_2$  que abrange a zona de médias frequências, que pode caracterizar distúrbios com distorções harmônicas ou oscilações transitórias. A entrada  $x_3$ , ilustrada pela Equação 52, representa as baixas frequências, onde está presente a frequência fundamental. Frequência esta característica dos distúrbios de afundamento, elevação e interrupção de tensão.

Vale comentar que foram feitos testes com outras metodologias, porém não vieram a apresentar resultados significativos. Estes testes compreenderam a variação do tamanho da janela a ser decomposta, a *wavelet* mãe utilizada e também qual seria a melhor entrada para o classificador.

Os primeiros testes foram realizados com um vetor a ser decomposto contendo 10 ciclos (2 ciclos de pré-deteção e 8 de ciclos pós-deteção). Em seguida a abordagem foi testada para um vetor de oito ciclos (2 ciclos de pré-deteção e 6 de ciclos pós-deteção). A utilização destes tamanhos de vetores apresentou resultados satisfatórios, porém além destes resultados é desejado um compromisso com a rapidez na resposta de um determinado distúrbio, portanto, optou-se por uma janela de apenas 1 ciclo para realizar a classificação, vindo também a apresentar resultados satisfatórios.

Outra variável testada foi em relação a qual *wavelet* mãe melhor apresentaria respostas significativas. Neste caso foi testada uma grande quantidade de *wavelet* mãe, dentre as quais se destacaram a db4, sym4 e *Haar*. Sendo que esta última apresentou melhores resultados para esta questão. Como último parâmetro a ser analisado, a entrada do classificador teve como variáveis a energia dos sete níveis de detalhes, seguindo-se da média entre a energia dos dois primeiros níveis, a média do 3º, 4º e 5º nível, e a média do sexto e sétimo nível, também não apresentando resultados satisfatórios.

## 5.5 - Módulo de Classificação via RNA

Como próximo passo, utilizou-se de sistemas inteligentes para realizar a classificação, neste caso RNAs. Uma abordagem inicial utilizando RNA foi construída em [10] atingindo resultados satisfatórios e uma nova metodologia utilizando TW em conjunto com RNA, denominada Sistema Híbrido, também foi avaliada com resultados expressivos que serão comentados no decorrer deste texto.

O princípio de funcionamento desta metodologia consiste em depois de detectado e localizado uma determinada eventualidade, o algoritmo armazenar uma janela de um ciclo pós-deteccção do sinal em questão para extração das características desejadas. Este sinal de um ciclo contém 128 amostras e é decomposto em sete níveis de resolução de acordo com a AMR. Cada nível de decomposição abrange uma determinada faixa de frequência como mostrado no capítulo sobre TW. Através da AMR obtêm-se informações importantes do sinal com respeito à frequência. Um fato importante neste ponto é a escolha da *wavelet* mãe responsável por tal decomposição, uma vez que para detecccção foi utilizada somente a *Symlet* 4. Já no caso da decomposição em sete níveis para pré-processar o sinal que será classificado, serão utilizados três tipos de *wavelet* mãe para avaliar suas respectivas performances, a saber: *wavelet* de *Haar*, *db4* e também a *sym4*. Com isso, calcula-se o valor da energia para cada nível de detalhe segundo o Teorema de Parseval [54]. Os valores de energia obtidos na etapa 1, são empregados na etapa seguinte, denominada etapa 2, para que seja realizada a classificação dos fenômenos incidentes no sinal elétrico através de RNA. Para esta etapa de classificação foram utilizados inicialmente dois tipos de arquiteturas para avaliação: uma do tipo *Perceptron* Multicamadas (PMC) com o algoritmo de treinamento *Levenberg-Marquardt* (LM), que é uma variante do algoritmo *Backpropagation* e a outra do tipo Base Radial conhecido como RBF (*Radial Basis Function*), [74].

Para o reconhecimento de cada distúrbio, utilizou-se uma RNA com três entradas  $x_1$ ,  $x_2$  e  $x_3$  dadas pelas Equações 50, 51 e 52, anteriormente mostradas.

Para a saída da etapa de classificação, utilizou cinco RNAs na qual cada uma é especialista em reconhecer um determinado distúrbio. Todas as RNAs são alimentadas pelas três variáveis de entrada,  $x_1$ ,  $x_2$  e  $x_3$ . O esquema completo de classificação pode ser visto pela Figura 86.

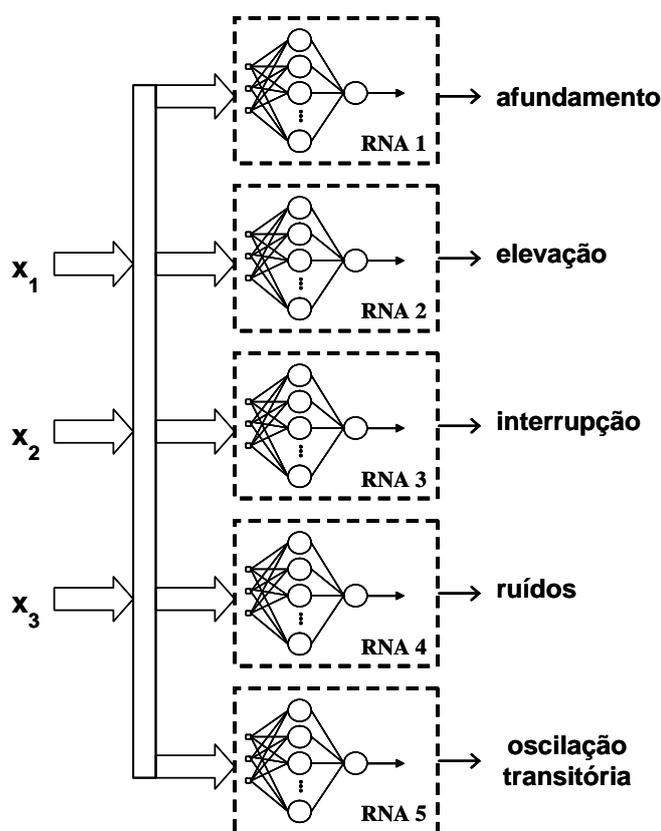


Figura 86 – Estrutura da classificação por RNAs.

Vale comentar que para a classificação, diversas estratégias utilizando-se de RNAs foram testadas para se obter a melhor configuração para este propósito. Dentre elas, utilizou-se como entrada para as RNAs avaliadas:

- Uma janela de um ciclo do sinal pós-deteccção;
- Os sete níveis de detalhes extraídos de um ciclo do sinal pós-deteccção.
- Os níveis de aproximação extraídos de um ciclo do sinal pós-deteccção.

- Os níveis de energia extraídos de um ciclo do sinal pós-deteccção, entre outras.

As estratégias anteriores utilizavam apenas de uma RNA para classificar os cinco distúrbios.

Além dessas variações, utilizaram-se também de diversas RNAs especialistas para classificar um único distúrbio ou grupos destes. Os resultados obtidos não refletiram um índice superior a 90% de acertos relativos aos casos de testes apresentados.

### **5.6 - Módulo de Estimação da Amplitude**

Cabe ressaltar que o funcionamento e o desempenho deste módulo são baseados nos módulos de deteção e localização no tempo. Contudo, este, é somente aplicado e utilizado para distúrbios como afundamentos, elevações e interrupções de tensão. Para os casos de transitórios oscilatórios é determinada a amplitude máxima atingida por tal oscilação. Para os casos de ruídos, este módulo não apresenta resultados por não ser um dado relevante ao distúrbio.

Uma vez realizada a análise e classificado a presença de afundamento, elevação ou interrupção de tensão, o algoritmo verifica o terceiro nível de aproximação do sinal de forma a estimar a amplitude do distúrbio ocorrido. Tal versão de aproximação é utilizada por conter, por completo, a componente fundamental do sinal (como já visto, A3: 0 – 480Hz), tendo sido extraídas as componentes de altas frequências que poderiam induzir a uma estimativa errônea desta grandeza. A utilização deste nível de aproximação é adequada para se obter resultados satisfatórios, ao passo que se utilizarmos níveis mais altos de aproximação haveria um custo computacional maior e os resultados obtidos seriam semelhantes, conforme já testado. Deve ser ressaltado que para esta decomposição em três níveis de aproximação foi utilizada a *wavelet* mãe *Symlet* 4.

No caso da classificação acusar transitórios oscilatórios, o algoritmo faz a análise através do próprio sinal de entrada para obter justamente a amplitude do pico máximo atingido pelo sinal de alta frequência.

Sendo assim, quando da acusação de um fenômeno, o módulo de classificação recupera um ciclo de dados anterior ao distúrbio e observa o terceiro nível de aproximação caracterizado, obtendo informações do sistema em regime permanente, normalmente 1 p.u.. De forma similar, este módulo obtém informações do ciclo posterior ao início do distúrbio, o mesmo ciclo utilizado para realizar a classificação. Das informações observadas têm-se os valores máximos de pré e pós-deteção. A diferença em módulo entre estes valores indica a variação em amplitude, caracterizando o evento ocorrido. Isto pode ser visualizado através da Figura 87, onde, a janela 1 representa o sinal em regime permanente, cujo valor máximo observado foi de 0,9754 p.u., e a janela 2, o sinal com distúrbio, atingindo um valor máximo de 0,5083 p.u. Desta maneira, a amplitude do distúrbio pode ser computada, evidenciando um afundamento de tensão para 0,47 p.u.

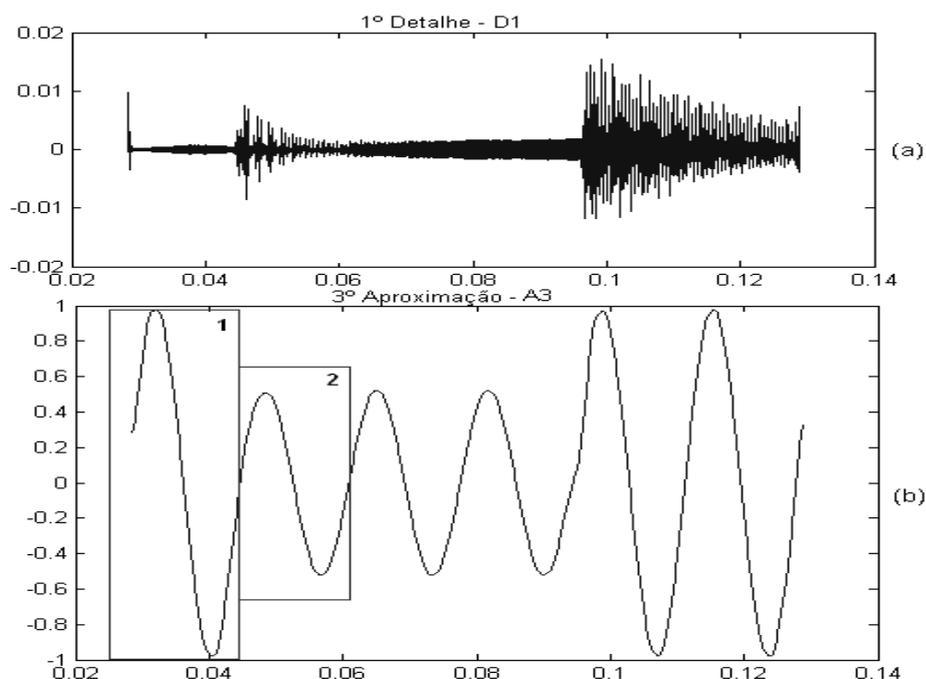


Figura 87 –(a) Detalhes do 1º nível de decomposição; (b) Demonstração do Módulo de Estimação da Amplitude.

A Figura 88 ilustra o módulo de estimação da amplitude para um caso de transitórios oscilatórios, a principal diferença é que este analisa o próprio sinal de entrada. Nesta figura, a janela 1 mostra o valor de 0,98 p.u. e a janela 2 evidencia o pico máximo em módulo de 1,3 p.u., valor este característico à definição de transitórios oscilatórios e enquadrado na faixa de tensão trabalhada.

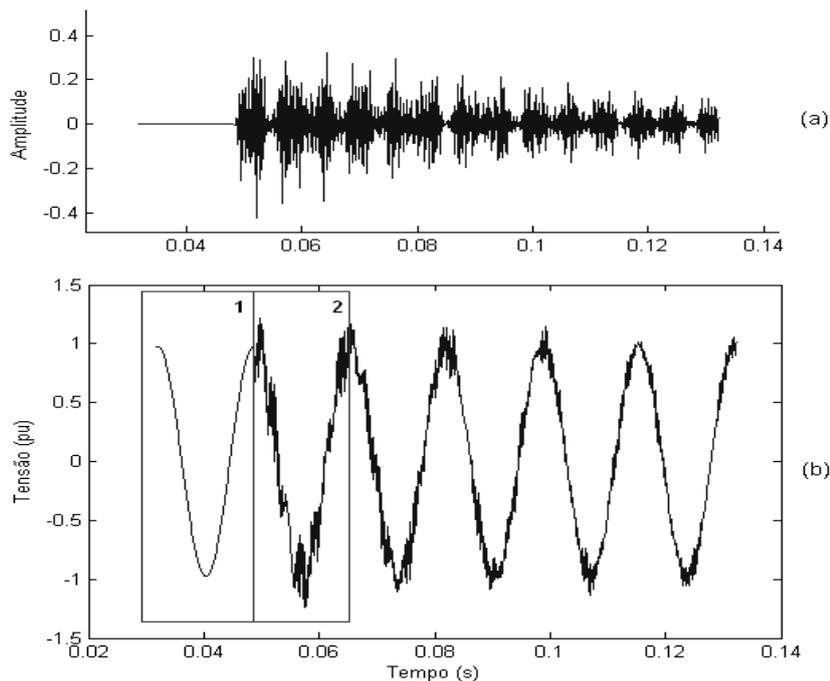


Figura 88 - (a) Detalhes do 1º nível de decomposição; (b) Módulo de Estimação da Amplitude para transitórios oscilatórios.

### 5.7 - Módulo de Estimação da Duração do Distúrbio

Depois de realizada a detecção, a localização no tempo e a classificação de um determinado distúrbio, fazem-se necessárias outras considerações. Dentre elas, a que trataremos neste item é a estimação da duração de um evento. Vale frisar que este módulo é válido apenas para os casos de afundamentos, elevações e interrupções de tensão. Estes tipos de distúrbios têm como característica o início e o fim bem delineados, diferentemente dos ruídos e transitórios oscilatórios. Contudo, de uma maneira específica, a duração dos transitórios oscilatórios

também serão contempladas, ou seja, neste tratamento será enfatizado o retorno do sistema à situação de regime permanente.

Tem-se então que, após a detecção e classificação de uma anomalia sobre o sinal em análise, o algoritmo analisa um vetor que contém uma janela de oito ciclos para determinação do fim do distúrbio, estimando assim a duração do evento uma vez que o início já foi determinado. Esta janela é tomada a partir de um ciclo após a detecção de um distúrbio. Deve ser lembrando que os distúrbios simulados até então são inferiores em duração ao tamanho da janela em análise, mas este parâmetro pode ser ajustado de acordo com as características dos sinais analisados.

Para a estimação da duração dos distúrbios, foram aproveitadas as informações do segundo nível de decomposição ( $D2$ ), utilizando para isto a *wavelet* mãe *sym4*, por apresentarem respostas melhores e mais precisas. A Figura 89 ilustra o processo de estimação da duração que é baseado apenas na informação do tempo final do distúrbio representado pelo ponto que ultrapassa o limiar no segundo nível de decomposição -  $D2$ .

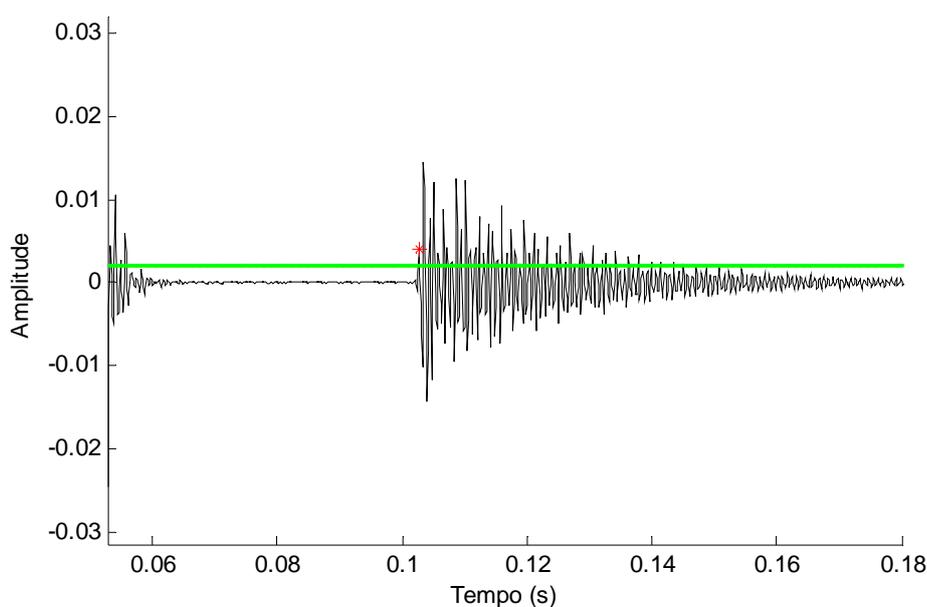


Figura 89 – Estimação da duração do distúrbio.

No caso da estimação de retorno ao regime permanente para os transitórios oscilatórios, o algoritmo verifica o ponto em que o sinal (D2) permanece abaixo do limiar por um período superior a meio ciclo. Esta metodologia é ilustrada na Figura 90 (a). A parte (b) desta figura mostra o próprio sinal que está sendo analisado indicando com um asterisco vermelho o retorno do sistema a condições normais de operação.

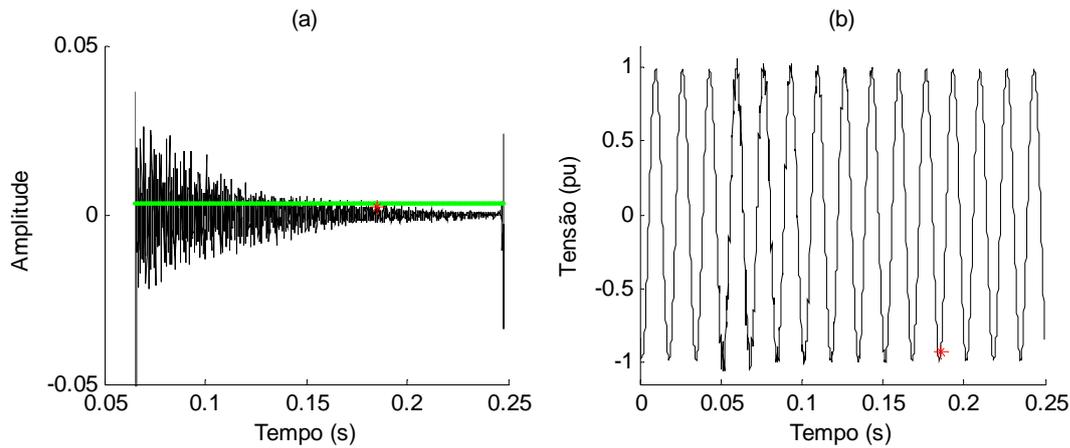


Figura 90 – (a) Estimação do retorno do distúrbio ao regime permanente. (b) Sinal com Transitórios Oscilatórios.

## 6 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

O sistema modular do algoritmo proposto permite uma análise rápida e completa dos vários resultados que podem ser obtidos a partir de um sinal com distúrbio. Dentre os resultados a serem apontados no Módulo de Detecção e Localização no Tempo cabe afirmar que todos os distúrbios caracterizados sobre o sistema, já comentados, foram corretamente detectados e localizados no tempo quando da avaliação do primeiro módulo. A faixa de incerteza na detecção no tempo ficou em torno de 0,3 ms.

Nas próximas figuras serão mostrados os resultados iniciais da primeira parte do algoritmo. Nestas são evidenciados o sinal analisado e o respectivo ponto de detecção (parte (a)). Já na parte (b) da figura será mostrado o momento da detecção através do primeiro nível de detalhe, onde a linha verde corresponde ao limiar de tensão ajustado. O ciclo completo contendo 128 amostras pós-deteção será evidenciado na parte (c) e, completando a figura, na parte (d), será mostrado o conteúdo das componentes harmônicas deste ciclo posterior a detecção via TRF.

Primeiramente são mostrados os resultados dos afundamentos de tensão e em seguida, elevação de tensão, transitórios oscilatórios bem como sinais com ruídos. Na Figura 91 é evidenciado um caso de afundamento de tensão que foi causado por uma falta fase-terra na fase A do sistema de distribuição com um ângulo de incidência da falta de 0°. O asterisco vermelho do item (a) da figura ilustra o momento da detecção do afundamento de tensão acusado pelo algoritmo. Este instante foi a exatamente 0,045 s após o início da análise, que comparado com o tempo inicial de simulação, comprovou-se a eficiência do algoritmo. Esta

correta detecção pode ser observada pelo item (b) da figura, onde este mostra o primeiro nível de detalhe do processo de janelamento do sinal. A partir deste instante de detecção, são armazenados 128 amostras do sinal, que correspondem a 1 ciclo do sinal analisado que é mostrado no item (c) da figura. De posse deste ciclo pós-deteção, é calculado a TRF do mesmo como mostrado no item (d). Através destes valores é possível ter uma sensibilidade de quais componentes harmônicas estão predominantes neste sinal e mais tarde poder tomar atitudes para mitigar tais componentes. No caso deste exemplo que compreende uma falta a  $0^\circ$ , as componentes harmônicas são muito atenuadas, quando comparadas a fundamental. Tal afirmação é válida para os outros distúrbios de afundamentos analisados caracterizados por um ângulo de inserção de  $0^\circ$ .

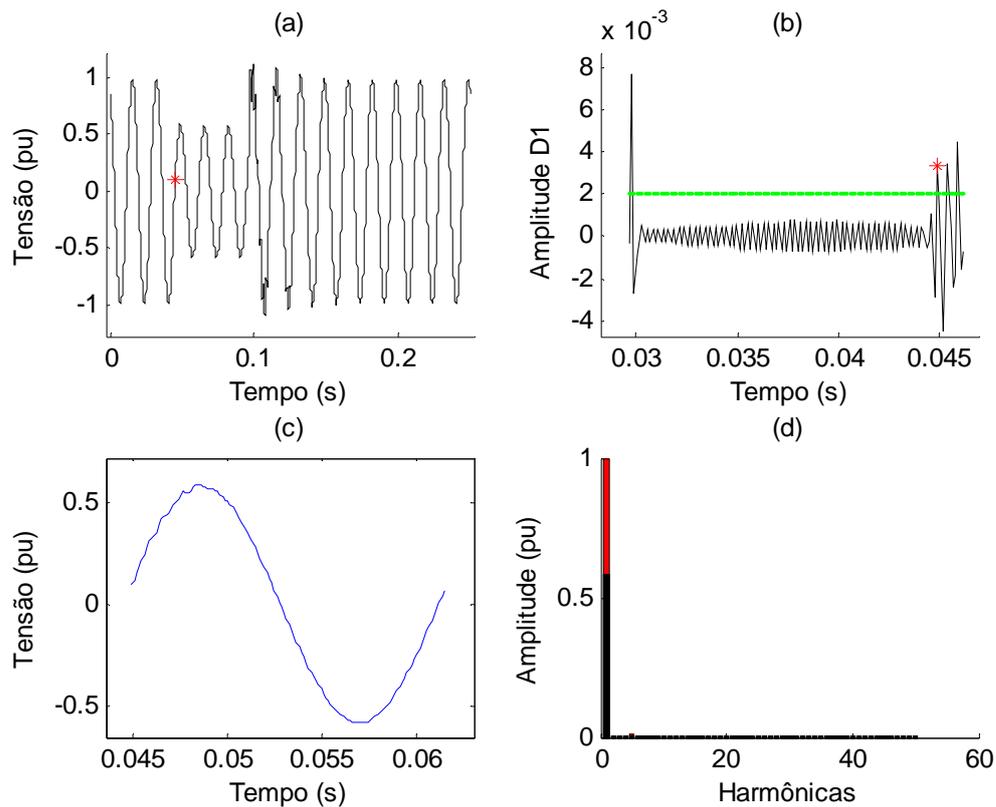


Figura 91 – Resultados obtidos de um afundamento de tensão para 60% de uma falta aplicada a  $0^\circ$ .

A Figura 92 ilustra um sinal que compreende um afundamento de tensão cujo ângulo de inserção de falta foi a  $90^\circ$ . É perceptível que o ciclo pós-deteção apresenta conteúdos não desejáveis para o sistema. Estes conteúdos são bem caracterizados na parte (d) da figura.

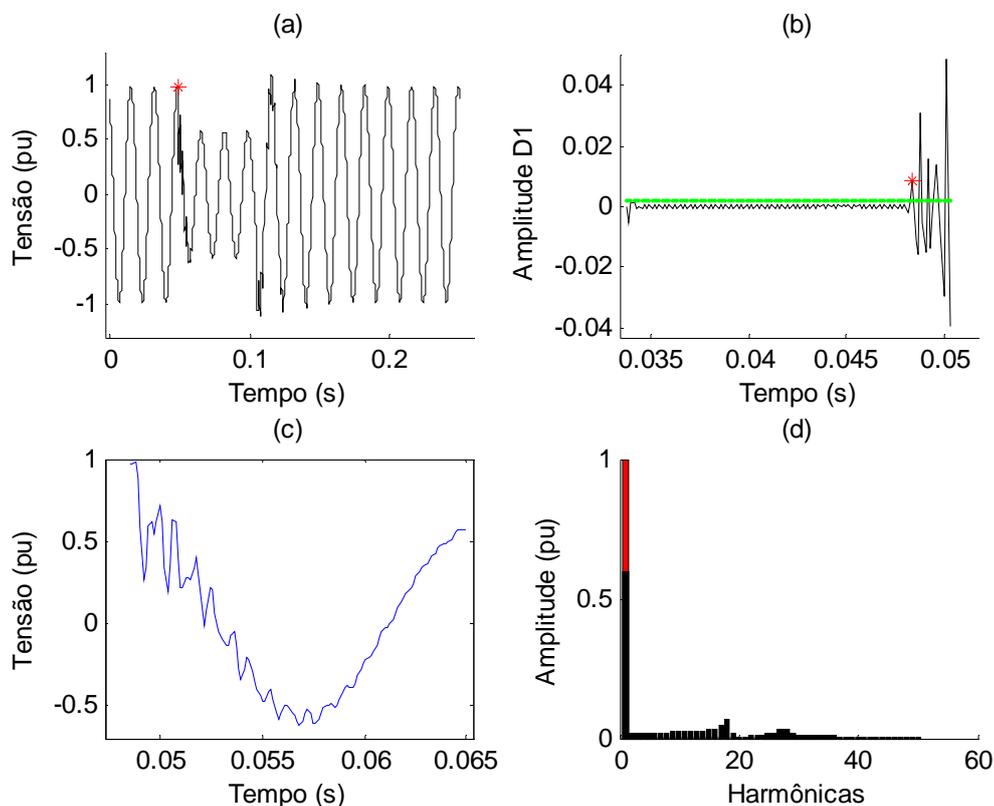
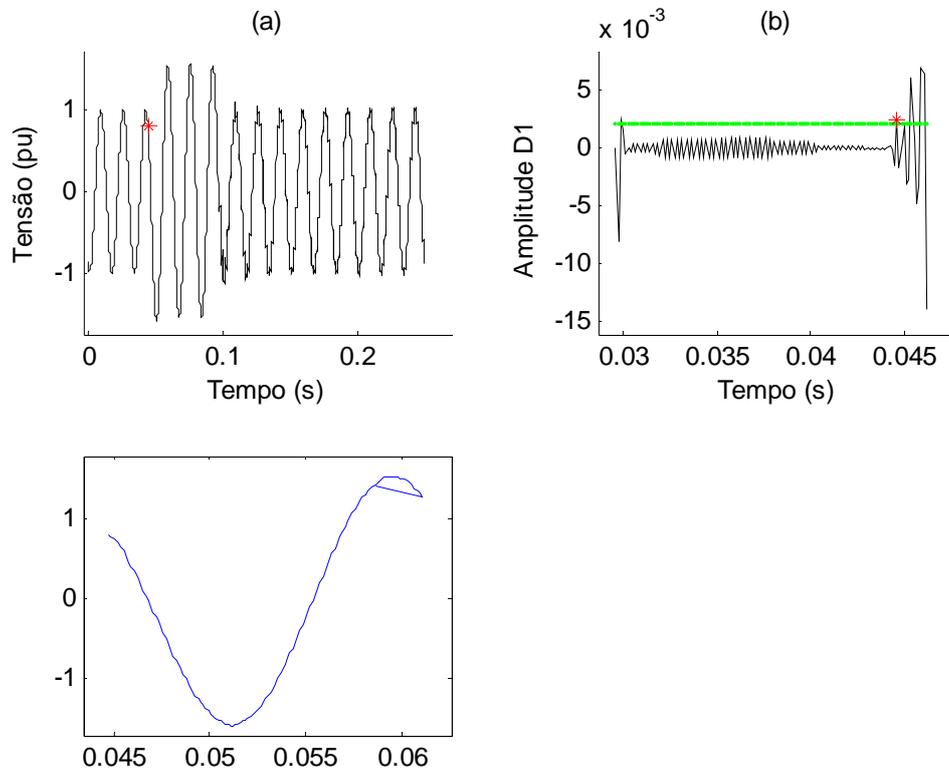


Figura 92 - Resultados obtidos de um afundamento de tensão para 60% de uma falta aplicada a  $90^\circ$ .

O próximo distúrbio a ser mencionado será a elevação de tensão. Na Figura 93 é ilustrada uma elevação de tensão ocasionada por uma falta na fase A do sistema diretamente para terra com um ângulo de incidência de falta de  $0^\circ$ . Em virtude desta falta, a fase A sofreu um afundamento de tensão enquanto que a fase C deste mesmo sistema de distribuição sofreu a elevação de tensão mostrada. O momento exato de detecção desta elevação é acusado no item (a) desta figura. Enquanto que no item (b) é ilustrado este mesmo instante de detecção visto agora pelo primeiro nível de detecção do sinal janelado. O item (c) da figura mostra o ciclo imediatamente posterior à detecção do distúrbio contendo exatas 128 amostras. A TRF

deste ciclo é calculada e mostrada no item (d), onde se tem informações substanciais apenas das primeiras componentes harmônicas, mais especificamente as harmônicas até a 9º ordem.



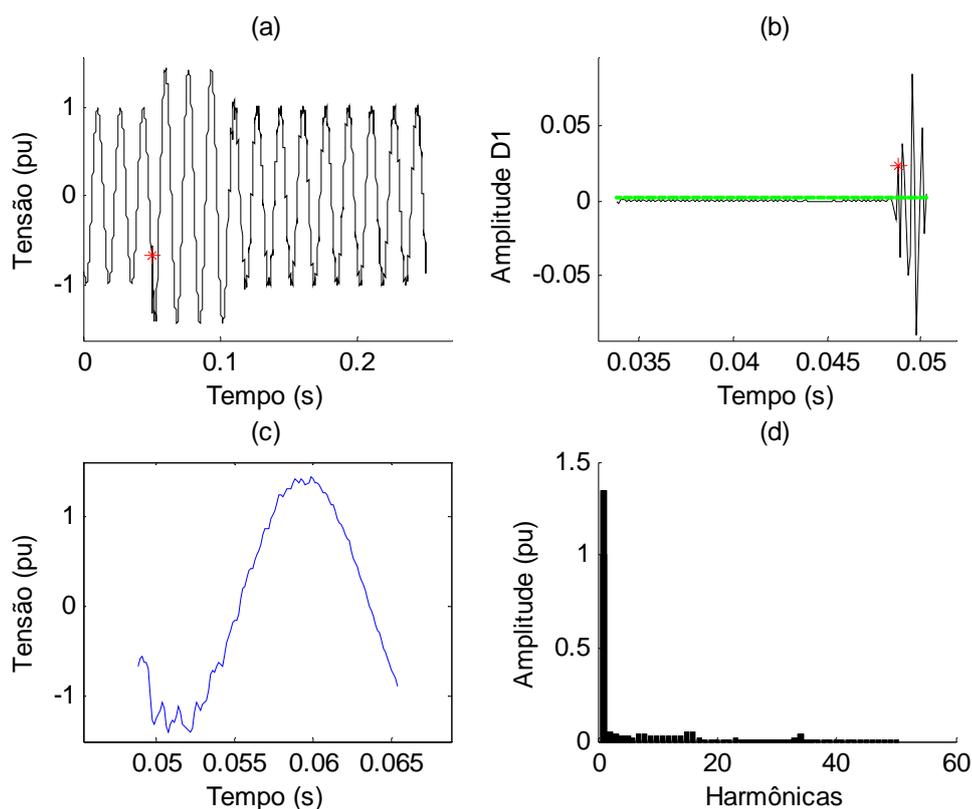


Figura 94 - Resultados obtidos de uma elevação de tensão para 130% de uma falta aplicada a 90° na fase A.

A discussão agora se dá em torno de uma interrupção de tensão, conforme mostra a Figura 95. Nesta figura é mostrado na parte (a) o momento da detecção da interrupção que se deu através de uma falta junto à subestação do sistema de distribuição com um ângulo de incidência de falta de 0°. Pela parte (b) é possível visualizar o instante de início da interrupção que foi em 0,044 s. A parte (c) e (d) mostram respectivamente, o ciclo posterior a detecção e a TRF deste ciclo, onde não há a presença de componentes harmônicas e da fundamental, inerente a situação de interrupção caracterizada.

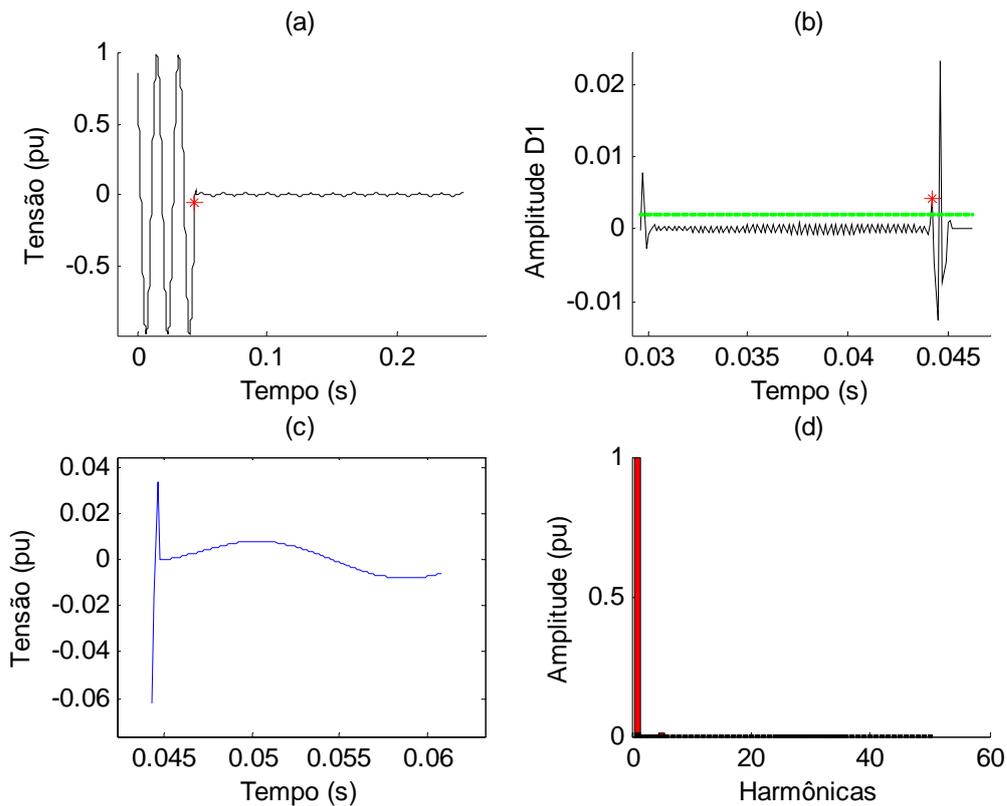


Figura 95 - Resultados obtidos de uma interrupção de tensão de uma falta aplicada a 0°.

Analisando as situações de transitórios oscilatórios, primeiramente será ilustrada na Figura 96 (a) uma oscilação decorrente de um chaveamento de banco de capacitores iniciado com um ângulo de 90°, cujo ponto de medição ocorreu junto à subestação (13,8 kV). O item (b) mostra o ponto exato da detecção através do primeiro nível de decomposição. O item (c) aponta o ciclo imediatamente após a detecção e no item (d) ilustram-se as diversas componentes harmônicas presentes neste ciclo após a detecção. Tais harmônicas são características da classe de tensão trabalhada.

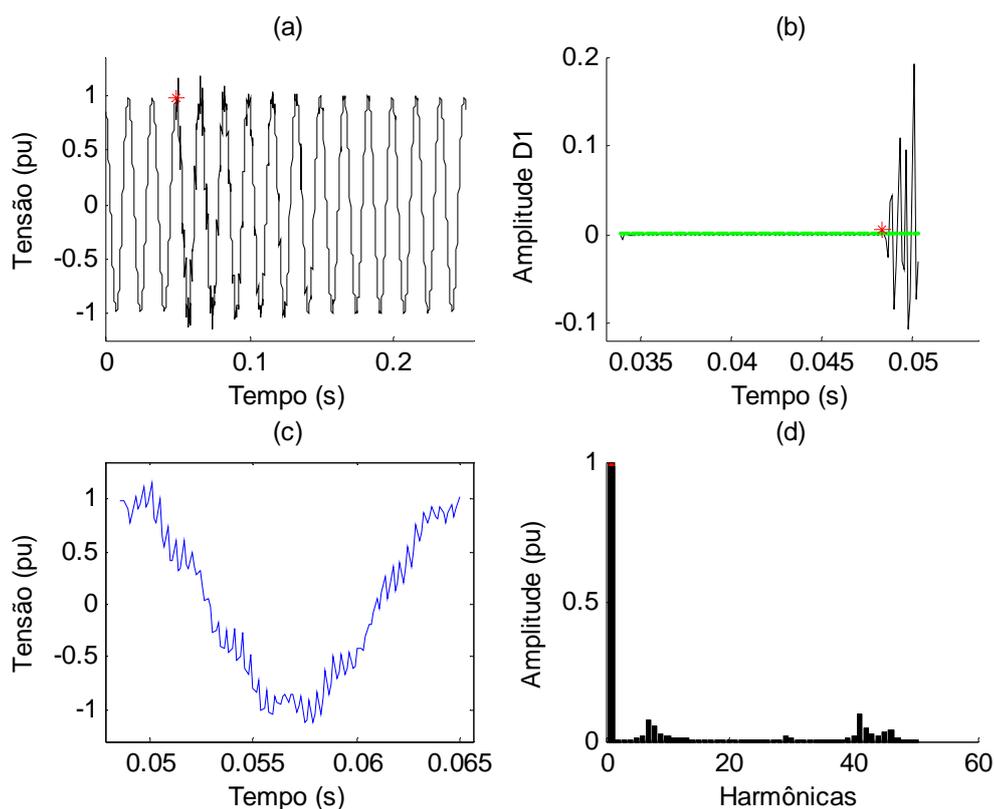


Figura 96 - Resultados obtidos de um transitório oscilatório para um sistema de distribuição de 13,8kV.

Já na Figura 97 mostram-se os resultados de um transitório oscilatório observado no secundário (220 V) do transformador particular 4. O início da oscilação também se deu a um ângulo de  $90^\circ$ , conforme pode ser visto na parte (a) da figura. Na parte (b) e (c) são mostrados o instante de detecção via detalhe 1 da TW e o ciclo imediatamente posterior a esta detecção, respectivamente. A análise pela TRF deste sinal é evidenciada na parte (d) onde também são apontadas as componentes harmônicas presentes nesta classe de tensão.

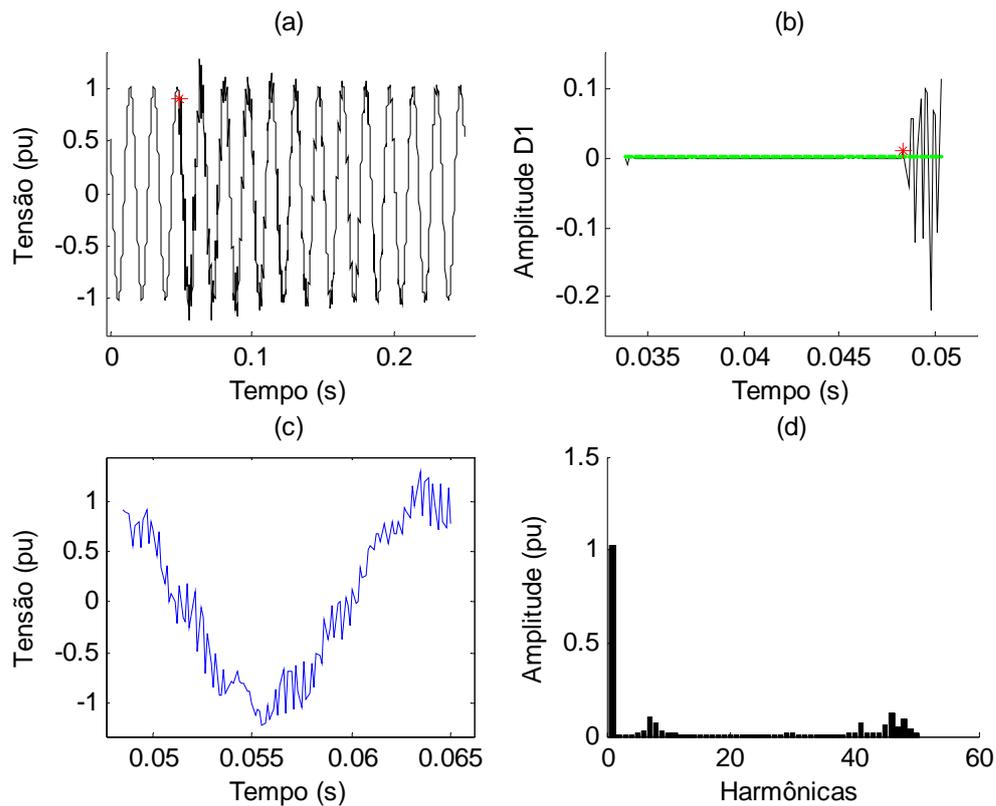


Figura 97 - Resultados obtidos de um transitório oscilatório para um sistema de distribuição de 220 V.

A última classe de distúrbios analisados são os ruídos presentes nos sinais elétricos. Os ruídos caracterizam-se por frequências aleatórias que são incorporadas ao sinal e que atrapalham o bom andamento do sistema. Na Figura 98 (a) é apresentado um sinal com certa quantidade de ruídos e que no momento da inserção destes, o algoritmo foi capaz de detectar com exatidão (0,065 s) como também evidenciado pela parte (b) da figura que ilustra a decomposição do sinal em AMR em apenas um nível. Na próxima parte da figura, (c), é mostrado o ciclo imediatamente posterior a detecção e em seguida, (d), é mostrado a TRF deste sinal pós-deteção contendo 128 amostras. Através desta análise é possível verificar a quantidade de frequências não desejáveis ao sistema distribuídos entre as diversas componentes harmônicas.

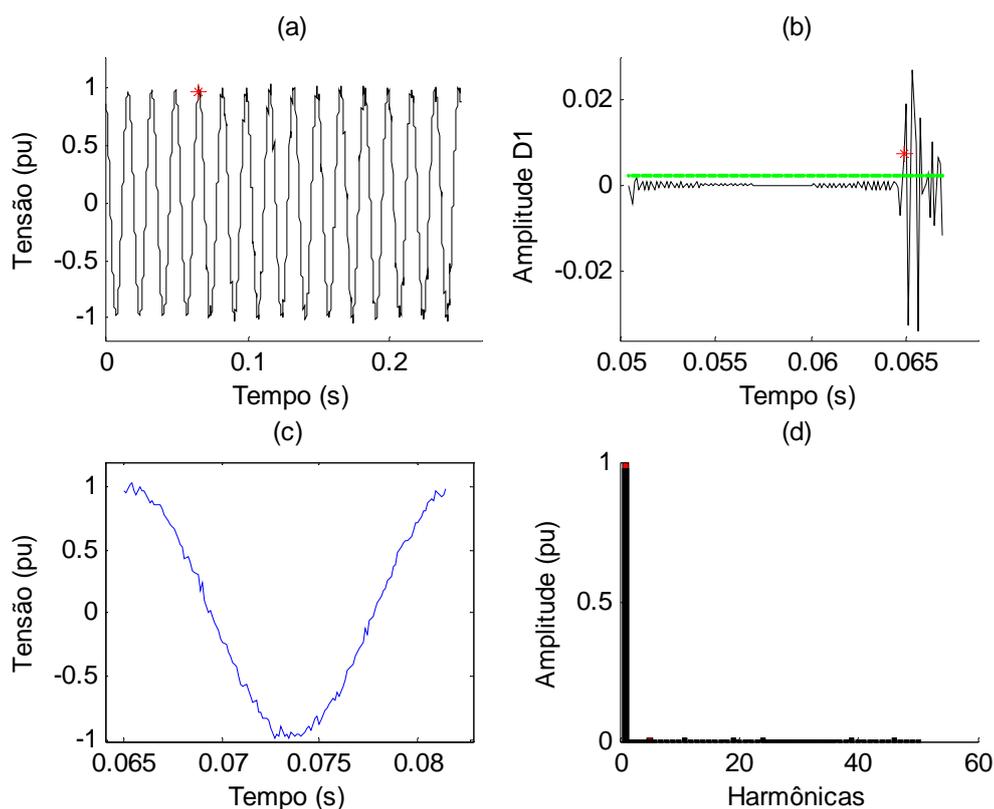


Figura 98 - Resultados obtidos a partir de ruídos incorporados ao sistema de distribuição.

## 6.1 - Módulo de Classificação via TRF

O primeiro método de classificação que será apresentado é baseado na TRF e os resultados obtidos correspondem aos diversos distúrbios já mencionados. As figuras apresentadas nesta seção mostram as componentes harmônicas da 2<sup>o</sup> até a 50<sup>o</sup> ordem. A componente fundamental, que representa 60 Hz, não será mostrada nos gráficos para melhor visualizar as componentes harmônicas que interferem no sinal, uma vez que se considerarmos a componente fundamental, não será possível analisar com detalhes as outras componentes em virtude dos valores absolutos característicos entre elas serem discrepantes. Os valores das componentes fundamentais dos diversos distúrbios serão mostrados na segunda coluna das tabelas a seguir.

A Tabela 14 apresenta os valores de cinco casos de afundamentos de tensão escolhidos aleatoriamente. As informações que podemos extrair desta tabela está principalmente na segunda coluna, onde estão presentes as informações da primeira componente harmônica, ou seja, da frequência fundamental. Através desta coluna é possível realizar a classificação do sinal, visto que estes valores estão normalizados em relação a um ciclo em regime permanente. Desta forma, nesta mesma coluna podemos ter a informação resultante do sistema. Como por exemplo, no caso do primeiro distúrbio mostrado nesta tabela, o valor da tensão foi para aproximadamente 0,89 p.u., caracterizando de fato um afundamento de tensão. Nesta mesma tabela, as colunas restantes, da terceira até a décima, mostram o valor resultante da respectiva ordem da componente harmônica. É notório o baixo valor das componentes harmônicas em virtude destes dados serem originados de falta fase-terra com ângulo de incidência de 0°. Nesta tabela são mostradas as componentes harmônicas apenas até a 9ª ordem. Estes mesmos cinco distúrbios são mostrados em forma gráfica através da Figura 99 apenas para efeito ilustrativo. Nesta figura a componente fundamental não é mostrada para melhor caracterizar, e com precisão, a amplitude das outras componentes harmônicas. Cabe ressaltar que as legendas das curvas apresentadas correspondem aos cinco distúrbios considerados pela Tabela 14.

*Tabela 14 – Componentes Harmônicas oriundas de Afundamentos de tensão decorrente de faltas fase-terra a 0°.*

Distúrbios	Ordem das Componentes Harmônicas								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0,8865	0,0027	0,0019	0,0018	0,0017	0,0018	0,0018	0,0009	0,0005
2	0,8437	0,0054	0,0048	0,0044	0,0040	0,0037	0,0029	0,0016	0,0027
3	0,7879	0,0077	0,0065	0,0057	0,0049	0,0044	0,0034	0,0020	0,0029
4	0,7409	0,0091	0,0074	0,0062	0,0053	0,0046	0,0036	0,0021	0,0030
5	0,6823	0,0069	0,0051	0,0041	0,0034	0,0031	0,0029	0,0014	0,0011

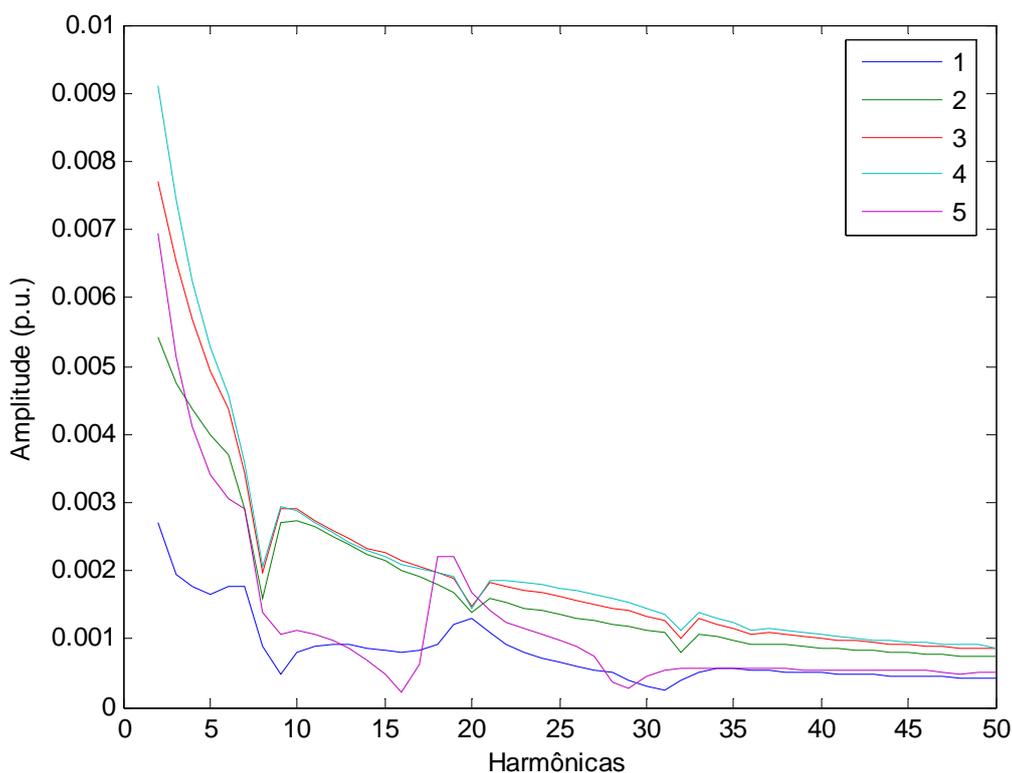


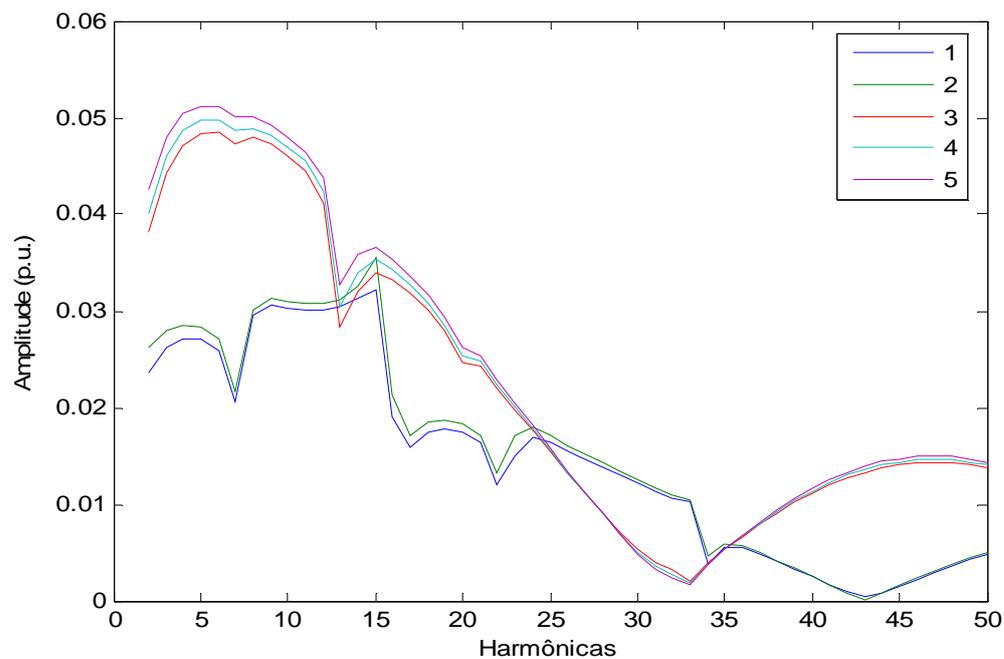
Figura 99 - TRF de um ciclo pós-deteção de cinco casos de afundamentos de tensão a 0°.

Através da Tabela 15 a seguir, será possível perceber também a classificação do sinal analisado uma vez que esta tabela representa valores oriundos de afundamentos de tensão cujo ângulo de incidência de falta foi de 90°. Nesta tabela pode-se abstrair tanto a tensão resultante em 60 Hz quanto as componentes harmônicas que mais estão presentes nestes casos de afundamentos a 90°. Em virtude deste ângulo de incidência de falta, as componentes harmônicas têm um maior valor em comparação com os casos de afundamentos a 0°, presentes na Tabela 14. Isto acontece devido à transição na resposta do sistema frente a uma situação de operação normal até a caracterização do afundamento de tensão propriamente dito. Este fato não foi levado em consideração para classificação, mas poderia ser levado, uma vez que apresenta diferenças entre os vários distúrbios. A Figura 100 mostra a TRF de cinco casos típicos de afundamento de tensão presentes na tabela, com um ângulo de incidência de

falta de 90°. Nesta figura é dado destaque para as componentes de ordem superior a frequência fundamental para se ter clareza dos valores.

*Tabela 15 - Componentes Harmônicas oriundas de Afundamentos de tensão decorrente de faltas fase-terra a 90°.*

Distúrbios	Ordem das Componentes Harmônicas								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0,4495	0,0236	0,0261	0,0271	0,0271	0,0260	0,0206	0,0295	0,0306
2	0,4062	0,0263	0,0280	0,0286	0,0284	0,0271	0,0217	0,0301	0,0313
3	0,3319	0,0381	0,0443	0,0472	0,0483	0,0484	0,0474	0,0479	0,0472
4	0,2964	0,0400	0,0460	0,0487	0,0497	0,0497	0,0486	0,0489	0,0481
5	0,2572	0,0426	0,0481	0,0504	0,0512	0,0511	0,0501	0,0500	0,0492



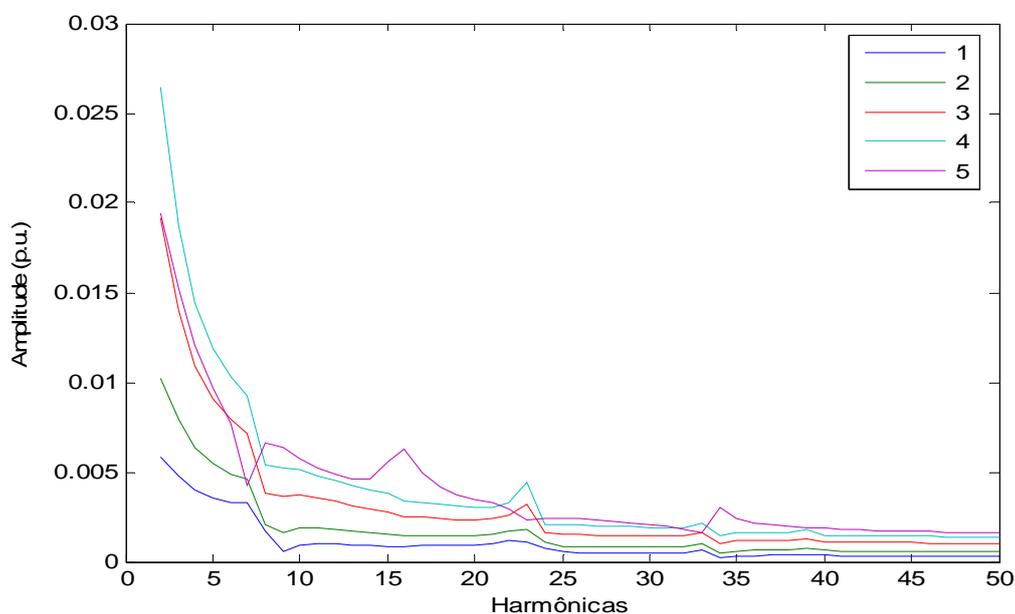
*Figura 100 – TRF de um ciclo pós-deteção de cinco casos de afundamentos de tensão a 90°.*

A classificação de distúrbios de elevação de tensão com ângulo de incidência de falta a 0° é mostrada na Tabela 16. Na segunda coluna é possível perceber os valores obtidos pelo algoritmo que representa o comportamento do sistema. Como exemplo, o distúrbio de número 5 apresenta em sua frequência fundamental um valor aproximado de elevação de tensão para 1,32 p.u. Nesta tabela são mostradas as componentes harmônicas de ordem 1, 2, 3, 5, 7, 15,

23, 33 e 39 por serem as componentes que mais se destacaram neste tipo de distúrbio, tendo valores elevados em amplitudes. Como se tratam de dados obtidos na fase C do sistema, em decorrência de uma situação faltosa na fase A com ângulo de incidência de  $0^\circ$ , as componentes harmônicas não são tão expressivas. Esta afirmação pode ser mais bem evidenciada pela Figura 101 que mostra os mesmos casos da tabela, desta vez em forma gráfica, contendo as componentes harmônicas da 2<sup>a</sup> até 50<sup>a</sup> ordem.

*Tabela 16 - Componentes Harmônicas oriundas de Elevações de tensão a  $0^\circ$ .*

Distúrbios	Ordem das Componentes Harmônicas								
	1	2	3	5	7	15	23	33	39
1	1,1348	0,0059	0,0048	0,0035	0,0033	0,0009	0,0011	0,0007	0,0004
2	1,1768	0,0103	0,0080	0,0055	0,0046	0,0015	0,0018	0,0010	0,0007
3	1,2399	0,0192	0,0140	0,0091	0,0072	0,0028	0,0032	0,0016	0,0013
4	1,2821	0,0264	0,0188	0,0119	0,0092	0,0038	0,0044	0,0021	0,0018
5	1,3159	0,0194	0,0152	0,0097	0,0043	0,0056	0,0023	0,0016	0,0019



*Figura 101 - TRF de um ciclo pós-deteção de cinco casos de elevação de tensão a  $0^\circ$ .*

Na Tabela 17 são mostrados alguns casos de elevação de tensão com ângulo de inserção de falta a  $90^\circ$ . A classificação é obtida através da análise da segunda coluna desta tabela, onde um sinal em regime permanente acusaria algo em torno de 1 p.u., logo, todos os casos desta tabela evidenciam elevações de tensão pois apresentaram em sua componente fundamental valores acima de 1,1 p.u.. Como exemplo, temos o distúrbio número dois apresentado nesta tabela, que mostra que este sinal sofreu uma elevação de tensão e que esta elevação foi para 1,27 p.u.. De acordo com os valores obtidos nesta tabela, é possível perceber as componentes harmônicas que mais interferem num determinado sistema e neste caso, as componentes harmônicas mais expressivas foram as de ordem 2, 7, 8, 13, 15, 23, 33 e 34. Dessa forma é pertinente analisar estas e tomar medidas para evitar tais componentes, tornando o sistema mais próximo do ideal possível. A Figura 102 ilustra a TRF de um ciclo pós-deteccção das situações de elevação de tensão com ângulo de incidência de falta a  $90^\circ$  apresentadas na tabela. Através desta ilustração, é perceptível visualizar as componentes harmônicas que estão presentes no sinal e verificar suas amplitudes em virtude do ângulo que ocasionou a falta. As amplitudes atingidas por estes distúrbios foram superiores as amplitudes dos distúrbios de elevação de tensão a um ângulo de  $0^\circ$  em razão da transição entre o sinal em regime e o sinal faltoso, podendo este ser outro fator positivo na classificação.

*Tabela 17 - Componentes Harmônicas oriundas de Elevações de tensão decorrente de faltas fase-terra a  $90^\circ$ .*

Distúrbios	Ordem das Componentes Harmônicas								
	1	2	7	8	13	15	23	33	34
1	1,2254	0,0325	0,0218	0,0338	0,0080	0,0080	0,0377	0,0111	0,0031
2	1,2737	0,0407	0,0318	0,0394	0,0223	0,0346	0,0093	0,0119	0,0265
3	1,3149	0,0466	0,0329	0,0407	0,0234	0,0413	0,0114	0,0116	0,0315
4	1,3475	0,0507	0,0337	0,0416	0,0241	0,0470	0,0134	0,0111	0,0356
5	1,3902	0,0733	0,0539	0,0347	0,0591	0,0274	0,0088	0,0257	0,0085

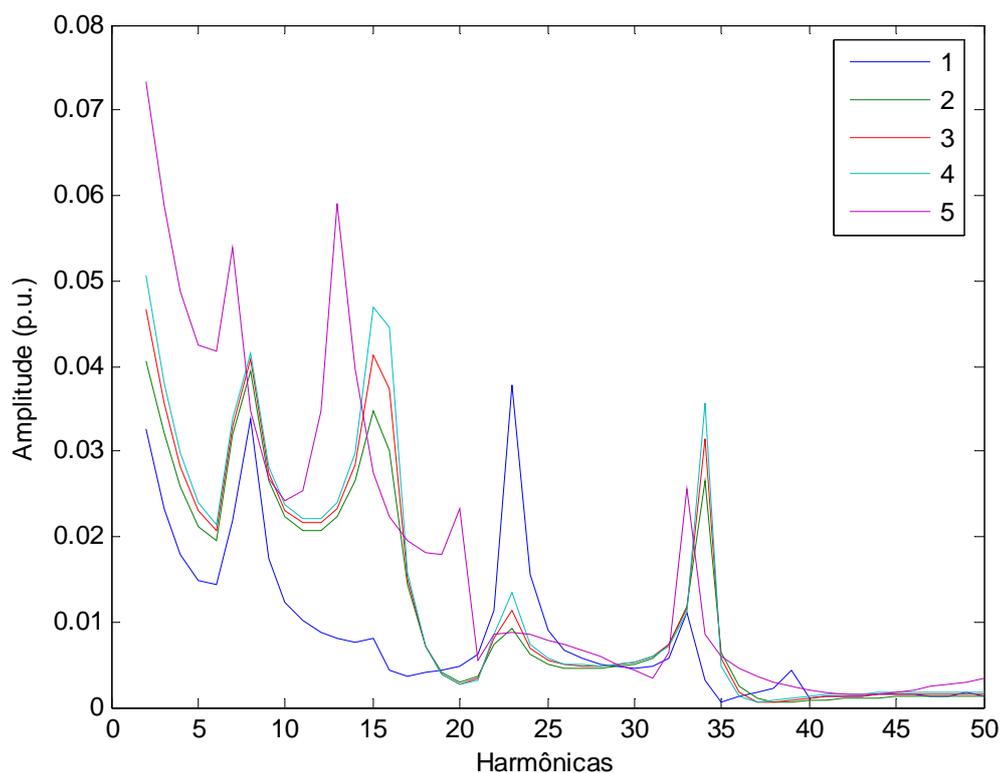


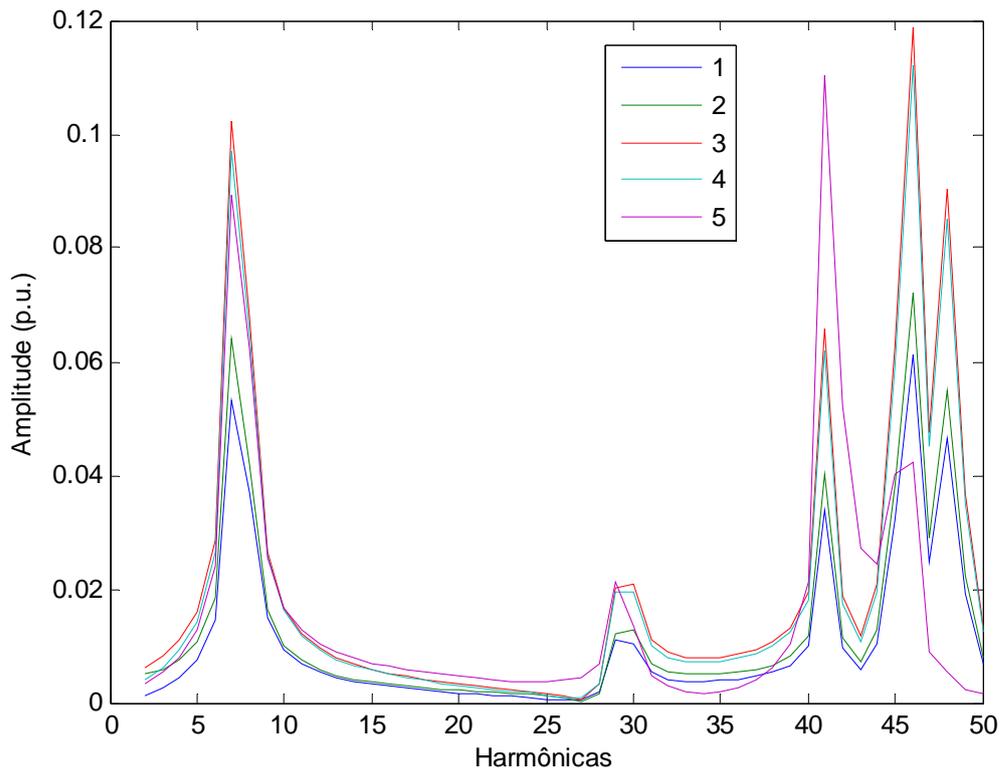
Figura 102 - TRF de um ciclo pós-deteccção de cinco casos de elevação de tensão a 90°.

Para os casos de transitórios oscilatórios, é necessário realizar uma análise diferenciada em relação aos distúrbios anteriores e não somente visualizar a componente fundamental, para poder classificá-los de forma correta. Como em oscilações transitórias a frequência fundamental permanece próximo a 1 p.u., é necessário analisar outras componentes harmônicas. Neste sistema estudado, vale ressaltar que uma situação comumente observada diz respeito aos casos de transitórios oscilatórios, onde as componentes harmônicas predominantes que afetam o sinal de tensão foram da 6ª a 9ª ordem, e também da 40ª a 49ª ordem. Tais valores se justificam por serem decorrentes de chaveamentos de bancos de capacitores sobre o sistema de distribuição de 13,8 kV, conforme mostrado em [75]. A Tabela 18 mostra as componentes harmônicas que mais se destacaram para os casos de transitórios oscilatórios. A Figura 103 mostra os resultados da TRF de um ciclo pós-deteccção para os casos de transitórios oscilatórios presentes na tabela, com destaques para as

componentes de ordem 2 até 50, pois a componente que representa a frequência fundamental sempre permanece próxima a 1 p.u.. Nesta figura são perceptíveis as componentes harmônicas predominantes num sistema de 13,8 kV.

*Tabela 18 - Componentes Harmônicas oriundas de Transitórios Oscilatórios.*

Distúrbios	Ordem das Componentes Harmônicas								
	1	7	8	29	41	43	45	46	48
1	0,9804	0,0532	0,0371	0,0109	0,0339	0,0057	0,0321	0,0613	0,0464
2	0,9806	0,0639	0,0419	0,0122	0,0400	0,0072	0,0382	0,0722	0,0549
3	0,9771	0,1024	0,0680	0,0203	0,0658	0,0116	0,0627	0,1187	0,0902
4	0,9769	0,0969	0,0650	0,0195	0,0621	0,0107	0,0590	0,1122	0,0851
5	0,9824	0,0895	0,0624	0,0211	0,1105	0,0272	0,0401	0,0421	0,0053



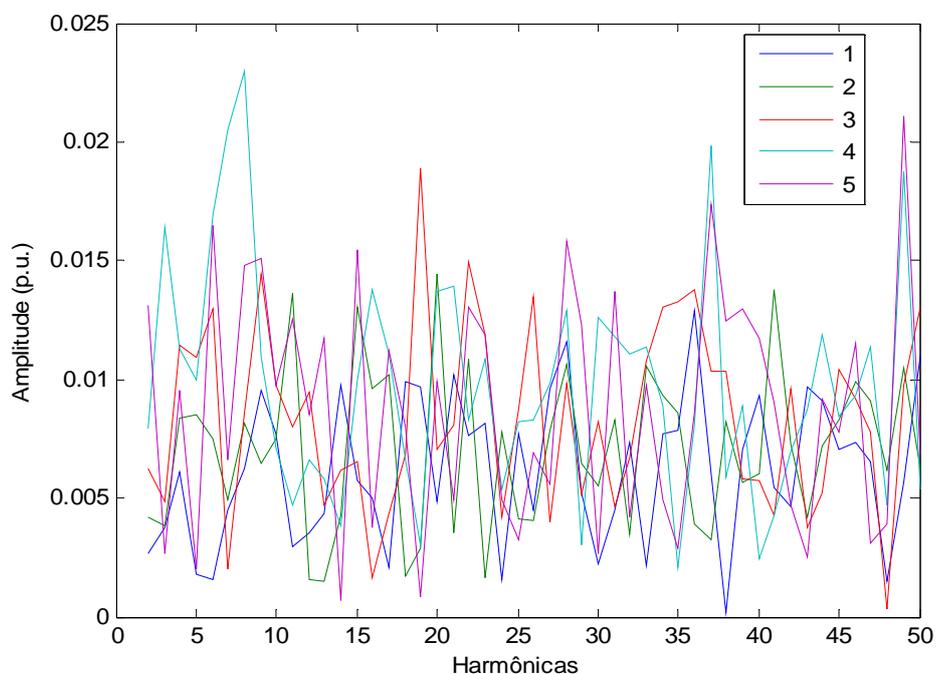
*Figura 103 - TRF de um ciclo pós-deteção de cinco casos com transitório oscilatório e destaque para componentes harmônicas.*

A Tabela 19 mostra as componentes harmônicas provindas de sinais com ruídos. Nesta tabela são mostradas as componentes da 1<sup>o</sup> a 9<sup>o</sup> ordem. De acordo com a definição, estes

sinais tendem a permanecer próximo a 1 p.u. na frequência fundamental e apresentar conteúdos não desejáveis nas demais componentes harmônicas. Este fato é mostrado nesta tabela, onde os valores são baixos, porém suficientes para diferenciar de uma situação normal do sistema. A Figura 104 ilustra os casos mostrados na tabela sem a presença da componente fundamental. Já a Figura 105 mostra apenas um caso típico da TRF de um ciclo pós-deteccção de um sinal contaminado com ruídos, também com a omissão da componente fundamental.

*Tabela 19 - Componentes Harmônicas oriundas de Ruídos.*

Distúrbios	Ordem das Componentes Harmônicas								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0,9838	0,0027	0,0038	0,0061	0,0018	0,0016	0,0045	0,0063	0,0095
2	0,9795	0,0042	0,0038	0,0084	0,0085	0,0075	0,0050	0,0082	0,0065
3	0,9894	0,0062	0,0049	0,0115	0,0109	0,0129	0,0020	0,0086	0,0144
4	0,9687	0,0079	0,0164	0,0113	0,0100	0,0169	0,0205	0,0230	0,0109
5	0,9824	0,0131	0,0027	0,0096	0,0020	0,0165	0,0066	0,0148	0,0151



*Figura 104 - TRF de um ciclo pós-deteccção de cinco casos de ruídos presente no sinal analisado.*

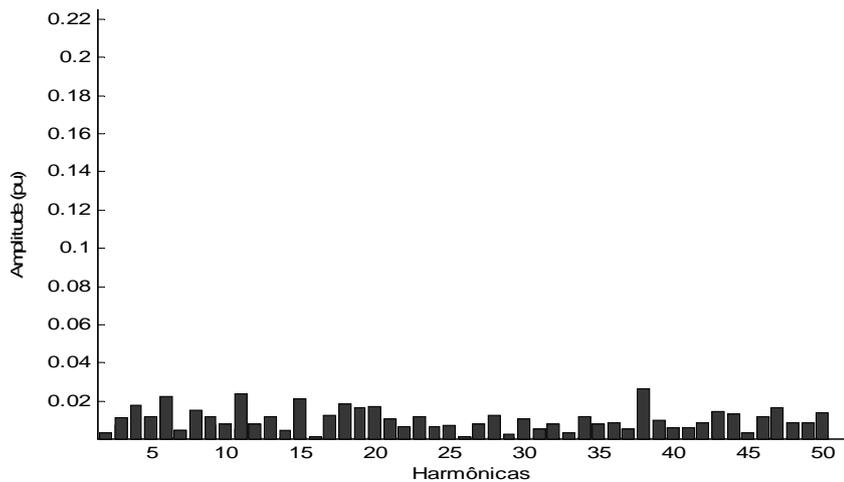


Figura 105 - TRF de um ciclo pós-deteção com ruídos e destaque para as componentes harmônicas.

Seguindo a metodologia de classificação, neste ponto serão mostrados os resultados da classificação com deslocamento de  $\frac{1}{4}$  de ciclo após a detecção do distúrbio. Tal metodologia é recomendável para distúrbios como afundamentos, elevações e interrupções de tensão, principalmente com ângulo de incidência de falta a  $90^\circ$ , por apresentarem componentes harmônicas indesejáveis logo após a ocorrência do distúrbio.

Para os casos de afundamentos com ângulo de incidência de falta a  $0^\circ$ , esta metodologia não traz muita diferença uma vez que nestes casos não se apresentam componentes harmônicas expressivas. Porém, para os casos de afundamentos de tensão com um ângulo de incidência de falta a  $90^\circ$ , as diferenças são nítidas. Isto pode ser visto através da Tabela 20 que em comparação com a Tabela 15 (1 ciclo pós-deteção) mostra as vantagens de se aplicar esta metodologia. Através da Figura 106 é possível visualizar essa diferença com mais clareza e verificar quão vantajoso é a aplicação desta metodologia, pois esta mostra os mesmos casos da tabela.

Tabela 20 – TRF de Afundamentos de tensão a  $90^\circ$  de um ciclo com deslocamento de  $\frac{1}{4}$  de ciclo pós detecção.

Distúrbios	Ordem das Componentes Harmônicas								
	1	2	7	9	13	16	20	22	34
1	0,4908	0,0031	0,0047	0,0014	0,0004	0,0034	0,0017	0,0026	0,0057
2	0,4447	0,0030	0,0046	0,0015	0,0007	0,0042	0,0017	0,0028	0,0065
3	0,3921	0,0026	0,0043	0,0016	0,0011	0,0056	0,0017	0,0029	0,0076
4	0,3366	0,0029	0,0013	0,0006	0,0041	0,0016	0,0023	0,0006	0,0001
5	0,2954	0,0029	0,0013	0,0005	0,0041	0,0015	0,0021	0,0006	0,0002

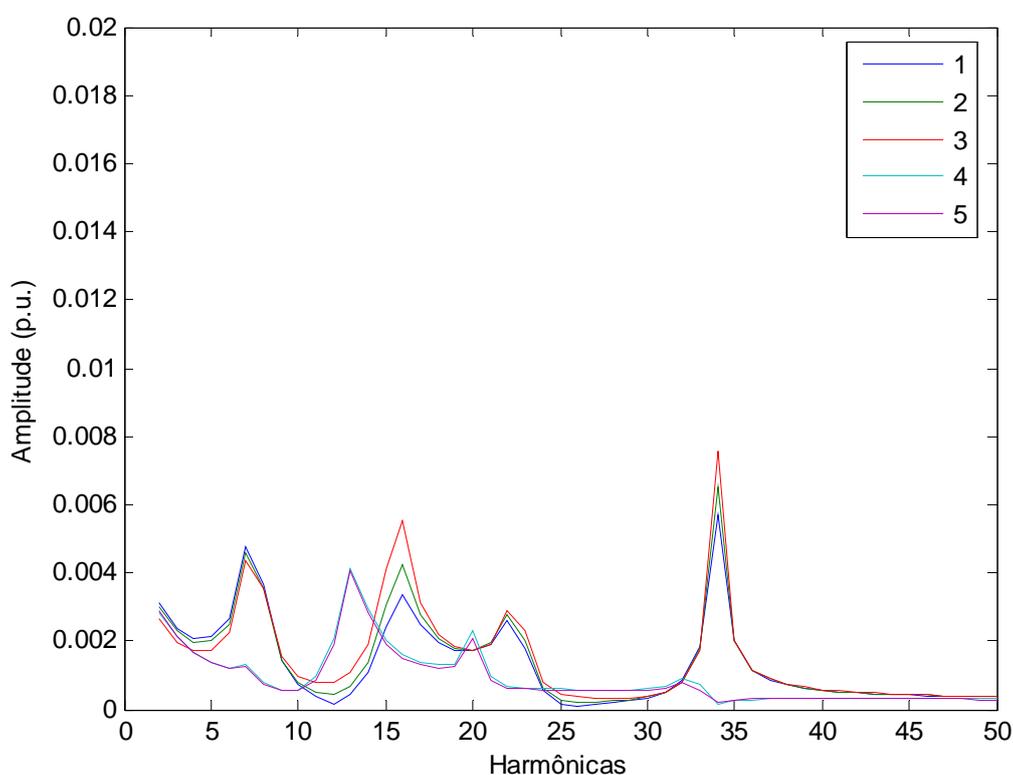


Figura 106 - TRF de um ciclo pós-deteção com deslocamento de  $\frac{1}{4}$  de ciclo de cinco casos para afundamentos de tensão a  $90^\circ$ .

Para os casos de elevação de tensão, não se pode tomar as mesmas conclusões, uma vez que as faltas são aplicadas na fase A do sistema e a elevação é medida na fase C. Desta forma, em razão do defasamento entre as fases, uma falta aplicada na fase A com ângulo de

incidência de  $0^\circ$  não terá o mesmo ângulo refletido na fase C deste sistema. Assim as elevações de tensão em sua maioria apresentam quantidades significativas de componentes harmônicas.

A Tabela 21 apresenta a TRF de cinco casos de elevação de tensão a um ângulo de falta de  $0^\circ$ . As diferenças entre a TRF do ciclo imediatamente posterior a detecção e a TRF com deslocamento de  $\frac{1}{4}$  de ciclo são significativas a ponto de se adotar tal metodologia para se ter uma melhor precisão nos valores correspondentes à frequência fundamental. Isto também pode ser visto através da Figura 107 que apresenta os mesmos casos da tabela.

*Tabela 21 - TRF de elevações de tensão a  $0^\circ$  de um ciclo com deslocamento de  $\frac{1}{4}$  de ciclo pós detecção.*

Distúrbios	Ordem das Componentes Harmônicas								
	1	2	3	5	7	15	23	33	39
1	1,1362	0,0020	0,0012	0,0008	0,0007	0,0001	0,0000	0,0002	0,0001
2	1,1794	0,0026	0,0016	0,0011	0,0008	0,0002	0,0001	0,0003	0,0001

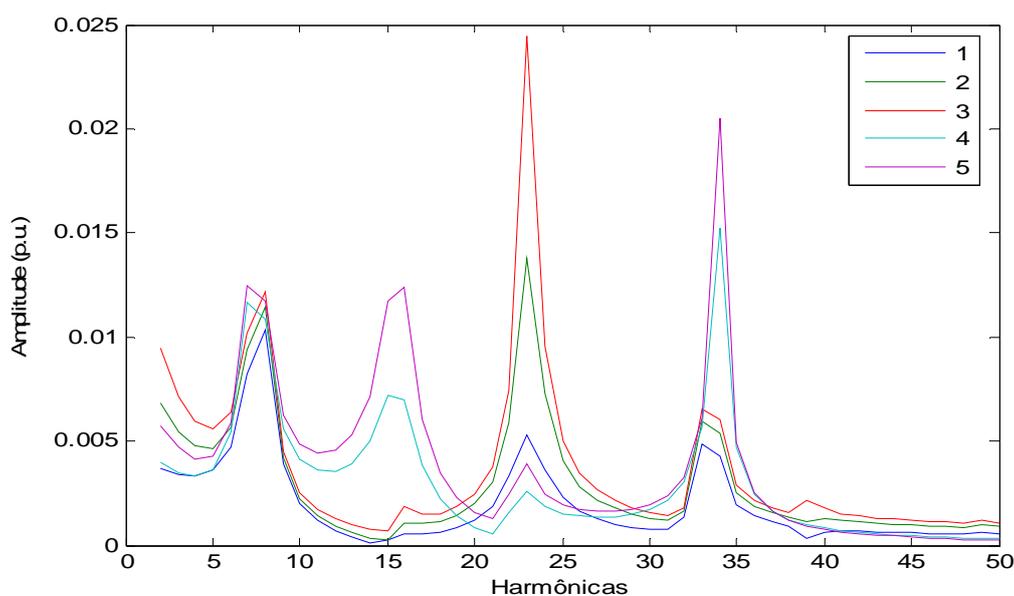
4

de elevação de tensão a u

Na Tabela 22 são mostradas a TRF de cinco casos de elevação de tensão com um ângulo de inserção de falta a  $90^\circ$ . Nesta tabela também é evidenciada a aplicação desta metodologia, mostrando-se mais precisa em relação a TRF do ciclo imediatamente após a detecção, principalmente nos valores absolutos das componentes harmônicas mais expressivas. Nesta tabela são mostradas as componentes harmônicas de ordem 1, 2, 3, 5, 7, 15, 23, 33 e 39. Através da Figura 108 é possível visualizar melhor a eficiência da aplicação desta metodologia.

*Tabela 22 - TRF de elevações de tensão a  $90^\circ$  de um ciclo com deslocamento de  $\frac{1}{4}$  de ciclo pós detecção.*

Distúrbios	Ordem das Componentes Harmônicas								
	1	2	3	5	7	15	23	33	39
1	1,1753	0,0037	0,0034	0,0036	0,0083	0,0003	0,0053	0,0049	0,0003
2	1,2355	0,0069	0,0055	0,0047	0,0094	0,0003	0,0138	0,0059	0,0011
3	1,2735	0,0094	0,0071	0,0056	0,0102	0,0007	0,0245	0,0066	0,0021
4	1,3220	0,0040	0,0035	0,0036	0,0116	0,0072	0,0026	0,0057	0,0010
5	1,3745	0,0057	0,0047	0,0043	0,0125	0,0118	0,0039	0,0061	0,0009



*Figura 108 - TRF de um ciclo pós-deteção com deslocamento de  $\frac{1}{4}$  de ciclo de cinco casos de elevação de tensão a  $90^\circ$ .*

Diante do que foi exposto até o momento e após realizar todos os testes desta metodologia, a Tabela 23 apresenta os resultados desta aplicação. Nesta tabela, apenas os casos de elevação de tensão não foram classificados em 100% dos casos. Estes apresentaram 2 erros, visto que o algoritmo acusou a presença de ruídos no sinal. Este resultado, após uma criteriosa análise, não está em total desacordo uma vez que estes dois sinais apresentaram uma quantidade significativa de ruídos, porém o distúrbio principal e mais evidente seria o de elevação de tensão. Estes resultados foram aplicados através da análise do ciclo posterior a detecção do distúrbio. Ao aplicar um deslocamento de  $\frac{1}{4}$  de ciclo, estes casos de elevação de tensão resultaram em 100% de acertos na classificação. Os casos de afundamento de tensão, interrupção de tensão e regime permanente não apresentaram problemas em relação à classificação. Os casos de regime permanente foram testados para analisar a resposta do algoritmo frente a uma situação normal do sistema e este se mostrou eficaz. Vale ressaltar que caso haja uma falha na detecção sobre uma situação normal de operação do sistema, esta será reparada pelo módulo de classificação, que virá a classificá-la como tal. Os casos de ruídos e transitórios oscilatórios apresentaram 100% de acertos na classificação, sendo a análise baseada nas componentes harmônicas que mais se evidenciaram.

*Tabela 23 – Resultado da classificação via TRF.*

<b>Fenômeno</b>	<b>Número de casos</b>	<b>Classificação</b>
Afundamento	80	100 %
Elevação	89	96,6 %
Regime	64	100 %
Interrupção	21	100 %
Ruídos	330	100 %
Transitórios Oscilatórios	65	100 %

## 6.2 - Módulo de Classificação via TW

O segundo método de classificação é baseado na TW e os resultados obtidos também correspondem aos diversos distúrbios mencionados. Estes resultados apresentados correspondem à decomposição com três tipos de *wavelet* mães diferentes, *sym4*, *db4* e *Haar*.

Os resultados da classificação de distúrbios utilizando a *db4* para decompor um ciclo pós-deteção (128 amostras) em AMR mostraram que esta *wavelet* mãe não é a mais adequada a este fim quando comparada às outras duas. Esta *wavelet* mãe não veio a apresentar bons resultados como classificador de padrões por ter em suas características a suavidade e a continuidade. Os percentuais de acertos para os distúrbios com frequência principal em 60 Hz, ou seja, afundamento, elevação e interrupção de tensão, foram superiores a 80%. Já para os casos de transitórios oscilatórios e ruídos, o percentual de acertos foi inferior a 50%.

A utilização da *wavelet* mãe *sym4*, também não apresentou resultados satisfatórios por ter as mesmas características da *db4*, ou seja, continuidade e suavidade. O teste com esta *wavelet* mãe se deu na tentativa de se utilizar uma única *wavelet* mãe em todo o algoritmo. Os índices de acertos foram parecidos com os apresentados pela *db4* e isto acontece pelo conflito que ocorre na diferenciação entre transitórios oscilatórios e ruídos que não chegaram a 50% de acertos. Os casos de afundamentos, elevações e interrupções de tensão apresentaram uma taxa de acertos pouco superior a 85%.

A *wavelet* mãe que apresenta bons resultados como classificador de padrões é a *wavelet* de *Haar*. Tal afirmação decorre devido as suas características de simetria e descontinuidade. A Tabela 24 mostra os resultados da aplicação da *wavelet* de *Haar* para decompor um ciclo pós-deteção em AMR. A média de acertos total ficou em 96,3%, porém os distúrbios de afundamento, interrupção de tensão e a situação em regime permanente tiveram 100% de acertos na classificação. No caso de elevações de tensão, onde o conjunto de

dados compreende 89 distúrbios, o algoritmo apresentou 97,8 % de índice de acertos. Isto corresponde a apenas dois casos em que o algoritmo confundiu com transitórios oscilatórios. Os casos de ruídos presentes nos sinais de tensão analisados apresentaram 96,9 % de acertos na classificação. Tal percentagem representa 10 distúrbios em que o algoritmo confundiu com outro distúrbio, neste caso 9 classificados como regime permanente e 1 como transitório oscilatório. Os transitórios oscilatórios que compreendem 65 distúrbios apresentaram um índice de acertos de 83,1 %. Este índice, considerado baixo, se deve em razão da confusão feita pelo algoritmo com 11 casos classificando-os como ruídos, visto que muitas das situações se encontram na mesma faixa espectral.

*Tabela 24 – Resultado da classificação via TW utilizando Haar.*

<b>Fenômeno</b>	<b>Número de casos</b>	<b>Classificação</b>
Afundamento	80	100 %
Elevação	89	97,8 %
Regime	64	100 %
Interrupção	21	100 %
Ruídos	330	97 %
Transitórios Oscilatórios	65	83,1 %

A Tabela 25 mostra os mesmos resultados da tabela anterior, porém no formato de uma matriz em que as linhas correspondem à quantidade de distúrbios em que o algoritmo deveria classificar corretamente, e as colunas representam o que o algoritmo realmente classificou. Na primeira linha, como temos 80 casos de afundamento de tensão e como o algoritmo classificou corretamente os 80 casos, as demais colunas referente a esta linha não apresentaram nenhum valor diferente de 0. O mesmo não aconteceu na segunda linha, onde ao todo temos 89 casos de elevação de tensão. Destes, apenas 2 casos foram incorretamente classificados como transitórios oscilatórios e o restante, 87 casos, foram corretamente classificado como elevação de tensão.

Tabela 25 – Resultado da classificação via TW.

<b>Fenômeno</b>	Afundamento	Elevação	Regime	Interrupção	Ruídos	Transitórios Oscilatórios
Afundamento (80)	80	0	0	0	0	0
Elevação (89)	0	87	0	0	0	2
Regime (64)	0	0	64	0	0	0
Interrupção (21)	0	0	0	21	0	0
Ruídos (330)	0	0	9	0	320	1
Transitórios Oscilatórios (65)	0	0	2	0	9	54

### 6.3 - Módulo de Classificação via RNA

Inicialmente para esta etapa de classificação foram avaliados dois tipos de arquiteturas de RNA. Uma do tipo *Perceptron* Multicamadas (PMC) com o algoritmo de treinamento *Levenberg-Marquardt* (LM), e a outra arquitetura, do tipo Base Radial conhecido como RBF (*Radial Basis Function*).

Como primeiro teste, avaliou-se individualmente cada RNA especialista. Os resultados obtidos pela PMC e RBF podem ser observados na Tabela 26. Na primeira coluna, associam-se as redes de 1 a 5, aos fenômenos já evidenciados. Posteriormente, têm-se os índices de acertos individuais das duas arquiteturas avaliadas.

Tabela 26 – Resultado preliminar de classificação via RNA.

<b>Fenômeno</b>	<b>Acertos da PMC</b>	<b>Acertos da RBF</b>
Afundamento	96,86 %	96,20 %
Elevação	95,80 %	95,84 %
Interrupção	99,05 %	99,31 %
Ruídos	93,57 %	89,25 %
Transitórios Oscilatórios	97,14 %	96,87 %

Para a obtenção dos resultados referentes à etapa de classificação conforme apresentados na Tabela 26, utilizou-se cinco RNAs do tipo *Perceptron* Multicamadas (PMC), com uma topologia contendo uma única camada escondida com dez neurônios e uma camada de saída com um neurônio. Também foi testada a mesma estrutura de cinco RNAs do tipo RBF.

As situações geradas foram divididas em 10 conjuntos, para melhor se avaliar as fases de treinamento e de teste. Para se formar cada conjunto dos 10 mencionados, utilizou-se de todos os fenômenos, cada um, contribuindo com 10% do seu total para formar os conjuntos de testes e, do restante, com 90%, para formar os conjuntos de treinamentos.

Escolheu-se a RNA com o melhor desempenho no treinamento para a validação dos resultados apresentados. Essa metodologia foi aplicada para todas as RNAs especialistas.

Cabe ressaltar da viabilidade deste modelo vir a classificar fenômenos sobrepostos, simultâneos e reincidentes sobre o sinal em análise. O ponto inicial desta idéia passa por uma adequada definição das respostas contínuas apresentadas pelas cinco arquiteturas evidenciadas.

Como segundo teste, este consistiu em avaliar o sistema de uma forma global, ou seja, verificar o desempenho de todas as RNAs especialistas simultaneamente. Para avaliar a eficácia de todo o sistema, apresentou-se os dez conjuntos de testes anteriormente apontados. O índice médio de acertos obtido para o sistema global foi de 91,03% para a PMC e 87,07% para a RBF.

Após esta etapa introdutória de classificação, foi estabelecida uma arquitetura final da RNA no algoritmo, neste caso uma rede PMC. Nesta configuração final da PMC foram utilizados os seguintes parâmetros:

- Topologia Neural = 3-10-1 (3 entradas, 10 neurônios na camada neural escondida e 1 neurônio na camada de saída);

- Taxa de Aprendizado = 0,01;
- Erro desejado =  $10^{-4}$ ;
- Número máximo de épocas = 5000;
- Algoritmo de Treinamento = *Backpropagation* tipo *Levenberg-Marquardt*;
- Função de Ativação = *Logsig*.

Para a implementação das RNA foi utilizado o Matlab (Neural Network Toolbox). O treinamento dessas redes foi realizado me

*wavelet* de *Haar* apresentou na abordagem anterior, melhores resultados na classificação de padrões em virtude de sua simetria e descontinuidade.

Diante destes fatos, primeiramente será mostrado os resultados da classificação via RNA com a utilização da *db4* para decompor o sinal em 7 níveis. A Tabela 27 ilustra os resultados da classificação individual de cada rede. Para os distúrbios referentes a faixa de frequência de 60 Hz a classificação atingiu 100% de acerto. Porém para os casos de ruídos e transitórios oscilatórios esta taxa ficou entre 97,9 e 99 %. Em relação aos testes de classificação global, o percentual ficou em 98,81.

*Tabela 27 – Resultado da classificação via RNA utilizando a db4.*

<b>Fenômeno</b>	<b>Número de casos</b>	<b>Classificação</b>
Afundamento	80	100 %
Elevação	89	100 %
Interrupção	21	100 %
Ruídos	330	97,97 %
Transitórios Oscilatórios	65	98,81 %

Já os testes realizados com a *wavelet* mãe *sym4* apresentaram resultados ligeiramente inferiores à *db4* na classificação individual, porém na classificação global foram superiores o que torna estes resultados, não desprezíveis. Os resultados desta metodologia estão na Tabela 28 que mostra a classificação individual de cada rede. Para os casos de elevação e interrupção de tensão o algoritmo apresentou 100% de acertos. Para os casos de afundamento de tensão e ruídos, o algoritmo obteve 99,32 % de acertos. Já no caso de transitórios oscilatórios, o algoritmo mostrou os resultados com índices inferiores aos demais, 98,98 %. Considerando a classificação global, onde todas as redes são avaliadas em conjunto, os testes mostraram um percentual de acertos de 98,98 %.

Tabela 28 – Resultado da classificação via RNA utilizando a *sym4*.

Fenômeno	Número de casos	Classificação
Afundamento	80	99,32 %
Elevação	89	100 %
Interrupção	21	100 %
Ruídos	330	99,32 %
Transitórios Oscilatórios	65	98,98 %

Os testes realizados com a *wavelet* de *Haar* apresentaram os melhores resultados, como já esperado devido às características naturais desta *wavelet* mãe. Os resultados de 100% de acertos na classificação para os casos de afundamento, elevação e interrupção de tensão são mostrados na Tabela 29, que também ilustra os resultados da classificação individual de 99,66 % para os casos de ruídos agregados ao sinal de tensão e de 98,98 % de acertos para os casos de transitórios oscilatórios. Nos testes de classificação global, esta metodologia utilizando a *wavelet* de *Haar* apresentou um percentual de acertos de 98,98 %.

Tabela 29 – Resultado da classificação via RNA utilizando a *Haar*.

Fenômeno	Número de casos	Classificação
Afundamento	80	100 %
Elevação	89	100 %
Interrupção	21	100 %
Ruídos	330	99,66 %
Transitórios Oscilatórios	65	98,98 %

#### 6.4 - Conclusões Parciais sobre o Módulo de Classificação

Como neste módulo foram testadas três metodologias, este merece uma discussão a respeito de qual metodologia melhor se adequou ao problema em questão e quais as vantagens e desvantagens de outras metodologias.

A metodologia utilizando a TRF apresentou resultados suficientes para estabelecer tal procedimento para classificar os distúrbios por apresentar respostas confiáveis e com implementação simples e rápida. Realizando-se uma análise detalhada, podem-se obter outras informações pertinentes ao distúrbio, como por exemplo, de forma aproximada, o ângulo de incidência da ocorrência relacionando-o ao tempo.

Já a utilização da TW para classificar os distúrbios apresenta resultados abaixo dos limites aceitáveis e também necessita de um tempo de processamento que talvez inviabilize a aplicação on-line desta metodologia em comparação ao método utilizando TRF.

O último método testado, RNA, apresentou bons resultados, porém necessitam de um conjunto inicial de treinamento e teste para rede implementada. Após este treinamento, o algoritmo se adequa as necessidades com um baixo esforço computacional e bons índices de acertos, desde que utilizado em conjunto com a TW para decompor o sinal.

### **6.5 - Módulo de Estimação da Amplitude do Distúrbio**

Logo após ser classificado um determinado distúrbio e este não sendo ruído, o algoritmo habilita o módulo de estimação da amplitude. Para isto foram testadas duas metodologias baseadas na estimação via TW e também via TRF. Cabe adiantar que as duas abordagens apresentaram resultados satisfatórios.

Primeiramente serão mostrados os resultados da estimação da amplitude via TRF. Uma vez classificado a presença de afundamento, elevação ou interrupção de tensão, o algoritmo obtém o valor da componente fundamental que foi calculada através da TRF no módulo de classificação, ou seja, a primeira componente harmônica. Este valor já corresponde à amplitude do distúrbio, uma vez que os dados estão normalizados.

No caso da estimação da amplitude através da TW, o ciclo posterior a detecção que fora utilizado para a classificação é decomposto em 3 níveis de resolução, sendo o terceiro nível de aproximação utilizado para obter a amplitude do distúrbio. Nos casos em que o

distúrbio ocorreu a um ângulo de incidência de falta de  $90^\circ$ , onde certamente ocorre um transitório entre a situação de regime e o distúrbio propriamente dito, esta metodologia mostra a amplitude efetiva do sinal, já que os sinais de alta frequência são eliminados através da decomposição em AMR. No terceiro nível de aproximação do sinal analisado é calculado o valor máximo em módulo e este valor representa a amplitude do distúrbio. A Figura 109 (a) mostra um caso de afundamento de tensão com ângulo de incidência de falta a  $90^\circ$  com alto conteúdo de componentes harmônicas. Na parte (b) desta figura é possível perceber a eliminação das componentes de alta frequência através da AMR possibilitando uma estimativa mais coerente de sua amplitude. Já a Figura 110 (a) mostra um caso de afundamento de tensão com ângulo de incidência de falta a  $0^\circ$  com muito conteúdo harmônico não desejado no sinal em virtude da severidade do afundamento de tensão. No item (b) desta figura é mostrado o terceiro nível de aproximação onde se pode realizar a estimativa da amplitude.

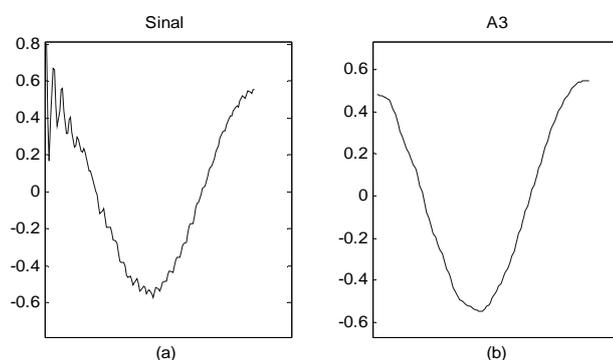


Figura 109 – Processo de estimativa da amplitude de um afundamento de tensão a  $90^\circ$ .

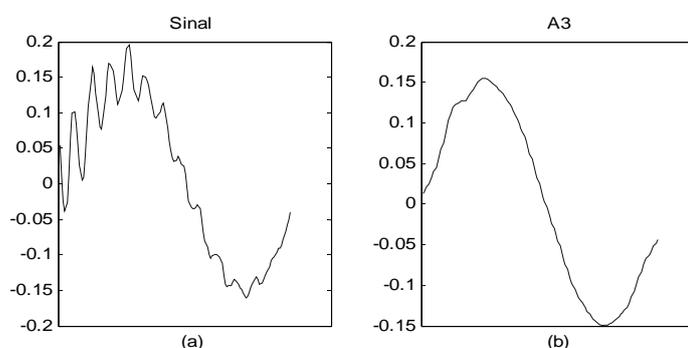


Figura 110 – Processo de estimativa da amplitude de um afundamento de tensão a  $0^\circ$ .

A Tabela 30 mostra a estimação da amplitude para alguns casos de afundamentos de tensão. Nesta tabela evidenciam-se casos que o algoritmo filtrou o sinal e também casos que não houve a necessidade de filtragem em razão do sinal não estar contaminado com frequências indesejáveis. Os dois últimos casos desta tabela se referem às figuras anteriormente mostradas que necessitaram de uma filtragem em razão dos conteúdos espectrais indesejados. Os dois métodos são mostrados nesta tabela, via TW e via TRF, além da estimação do próprio sinal que pode conter erros em razão das componentes não desejáveis.

*Tabela 30 – Alguns casos de estimação da amplitude para afundamentos de tensão.*

Distúrbio	Amplitudes Estimadas		
	Sinal	TW	TRF
1	0,50	0,49	0,50
2	0,58	0,58	0,59
3	0,69	0,69	0,70
4	0,73	0,73	0,73
5	0,83	0,80	0,79
6	0,50	0,50	0,46
7	0,57	0,57	0,52
8	0,64	0,64	0,59
9	0,81	0,55	0,54
10	0,19	0,16	0,16

A Tabela 31 ilustra a estimação da amplitude para dez casos de elevação de tensão. Nesta tabela é mostrada a estimação realizada no próprio sinal, que contém, em alguns casos componentes harmônicas não desejáveis, a estimação através da TW e também através da TRF. A Tabela 32 apresenta a estimação da amplitude para os casos de interrupção de tensão através do método utilizando TW e também TRF.

Com relação aos transitórios oscilatórios, como não há necessidade de filtragem do sinal para realizar a estimação da amplitude, ou melhor, há estimação somente do valor máximo absoluto atingido por tal transitório, a estimação ocorre diretamente no ciclo

posterior a detecção. Os valores mínimos e máximos obtidos pelo algoritmo nestes distúrbios foram 1,05 p.u. e 1,22 p.u., respectivamente.

*Tabela 31 – Alguns casos de estimação da amplitude para elevação de tensão.*

Distúrbio	Amplitudes Estimadas		
	Sinal	TW	TRF
1	1,11	1,11	1,11
2	1,22	1,20	1,21
3	1,61	1,59	1,56
4	1,39	1,35	1,22
5	1,43	1,39	1,29
6	1,32	1,29	1,15
7	1,35	1,32	1,18
8	1,13	1,11	1,11
9	1,48	1,48	1,45
10	1,30	1,30	1,29

*Tabela 32 – Alguns casos de estimação da amplitude para interrupção de tensão.*

Distúrbio	Amplitudes Estimadas		
	Sinal	TW	TRF
1	0,01	0,01	0,01
2	0,07	0,02	0,01
3	0,08	0,02	0,01
4	0,10	0,07	0,07
5	0,04	0,01	0,00
6	0,05	0,01	0,00
7	0,07	0,05	0,05
8	0,07	0,06	0,05

## 6.6 - Módulo de Estimação da Duração do Distúrbio

Depois de realizada a detecção, classificação e estimação da amplitude do distúrbio, deseja-se apontar a estimação da duração do sinal. Para isto, como já evidenciado, os distúrbios que apresentam em suas características um início e um fim bem delineados são os afundamentos, elevações e interrupções de tensão. Para estes distúrbios o índice de imprecisão do algoritmo foi de 1%, levando em consideração que em um caso no conjunto de elevação de tensão esta estimação ocorreu de maneira equivocada, apresentando um tempo

final do distúrbio inferior ao tempo final real do distúrbio. Isto se deve em razão da grande quantidade de oscilação transitória logo após a detecção deste distúrbio, induzindo o algoritmo a esta falha.

Para os casos de transitórios oscilatórios, este módulo funciona como uma estimação do retorno do sinal ao regime permanente. Normalmente um transitório oscilatório de baixa frequência, que são os casos analisados neste algoritmo, tem a duração típica entre 0,3 a 50ms [1]. Os casos de transitórios estudados neste projeto apresentaram uma duração típica inferior a 3 ciclos, ou seja, 50 ms, porém, após este período, o sistema normalmente não retorna ao regime permanente propriamente dito, levando alguns ciclos a mais para caracterizar este estado. Os instantes de tempo apresentados na segunda coluna, Tabela 33, referem-se à detecção. Já a duração aproximada do transitório na terceira coluna e na última coluna, o retorno do sinal a condição de regime permanente.

*Tabela 33 – Estimação de retorno a condição de regime permanente de alguns casos de transitórios oscilatórios.*

Distúrbio	Deteção (s)	Duração Aproximada (s)	Retorno ao Regime (s)
1	0,0485	0,05	0,2098
2	0,0442	0,05	0,2055
3	0,0484	0,05	0,1665
4	0,0485	0,05	0,1849
5	0,0485	0,05	0,1855

De uma maneira geral, podemos concluir que o algoritmo proposto atingiu as expectativas, porém resultados ainda melhores devem ser investigados. No módulo de detecção e localização no tempo, o algoritmo apresentou uma faixa de incerteza no tempo em torno de 0,3 ms. Com respeito ao módulo de classificação, como diversas metodologias foram criadas e testadas, a que apresentou os melhores resultados foi a classificação via RNA utilizando como *wavelet* mãe para decompor o sinal em sete níveis de detalhes a *wavelet* de Haar, conforme pode ser visto na Tabela 34. Nesta tabela são mostrados todos os tipos de metodologias criadas e é possível visualizar também que a classificação via TRF apresentou

resultados muito bons sendo parecidos com o método utilizando RNA juntamente com a *wavelet* de haar.

*Tabela 34 – Análise dos Métodos de classificação.*

<b>Fenômeno</b>	<b>Número de casos</b>	<b>Classificação via TRF</b>	<b>Classificação via TW haar</b>	<b>Classificação via RNA (PMC) db4</b>	<b>Classificação via RNA (PMC) sym4</b>	<b>Classificação via RNA (PMC) haar</b>
Afundamento	80	100 %	100 %	100 %	99,32 %	100 %
Elevação	89	96,6 %	97,8 %	100 %	100 %	100 %
Interrupção	21	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
Ruídos	330	100 %	97 %	97,97 %	99,32 %	99,66 %
Transitórios Oscilatórios	65	100 %	83,1 %	98,81 %	98,98 %	98,98 %



## 7 - VALIDAÇÃO DO ALGORITMO

### 7.1 - Resultados iniciais sobre situações geradas no ATP com injeção de componentes harmônicas

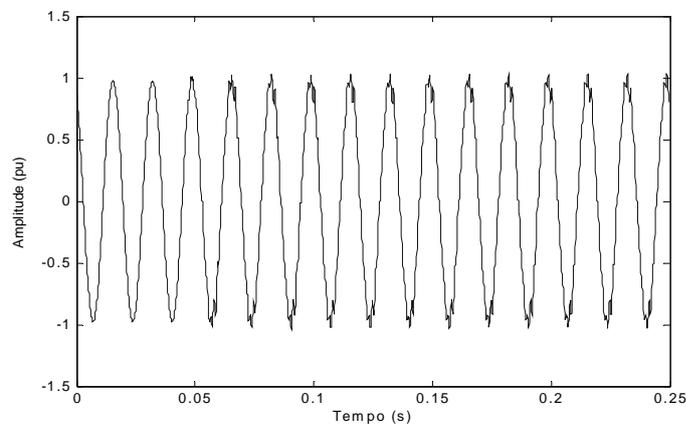
No que segue, serão analisadas formas de ondas que apresentam uma quantidade considerável de distorção harmônica em virtude da entrada em funcionamento de um forno de indução de 2000 kW no sistema. Os níveis de componentes harmônicas adicionadas ao sinal de tensão foram os constantes na Tabela 35. Estes provêm de uma planta industrial real acoplada ao sistema de fornecimento de energia de uma concessionária regional.

*Tabela 35 - Porcentagem das componentes harmônicas para um forno de indução.*

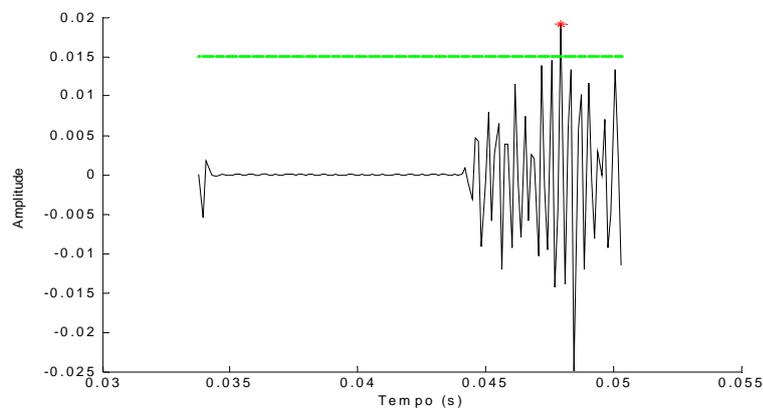
Forno de Indução de 2000 KW								
Ordem das Harmônicas	5	7	11	13	17	19	23	25
Porcentagem das Componentes	2,6	1,6	4,5	2,9	0,2	0,1	0,9	0,8

Os dados contidos nesta tabela foram superpostos a uma onda de tensão em regime permanente através do *software Matlab*® conforme ilustra a Figura 111. No momento desta inserção, a qual vêm a caracterizar a entrada do forno em operação, o algoritmo proposto através da TW foi capaz de detectar com precisão as alterações sobre o sistema, assim como ilustrado na Figura 112, [76]. Por esta é possível indicar no tempo, o início da operação do forno a 0,048 s (módulo I). Esta detecção se deve ao limiar de tensão pré-estabelecido no decorrer desta análise, que, neste caso, foi de aproximadamente 1,5 % em relação à onda em

regime permanente. Este limiar de tensão pode variar dependendo da sensibilidade desejada, como por exemplo, entre 0,1% e 3% em relação ao sinal em regime permanente. Seguido da detecção, o algoritmo acusou, através da TRF contida no segundo módulo, as componentes harmônicas características desta situação, como pode ser observado através da Figura 113. Nesta figura são evidenciadas pela TRF as componentes harmônicas mostradas e caracterizadas pela Tabela 35.



*Figura 111 – Caso típico de injeção das componentes harmônicas num sistema em regime permanente.*



*Figura 112 – Instante de detecção da injeção de componentes harmônicas.*

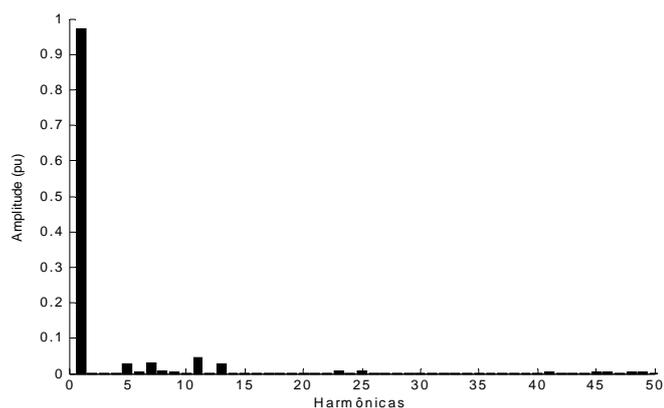


Figura 113 – Componentes harmônicas presentes na onda de tensão com o forno em operação.

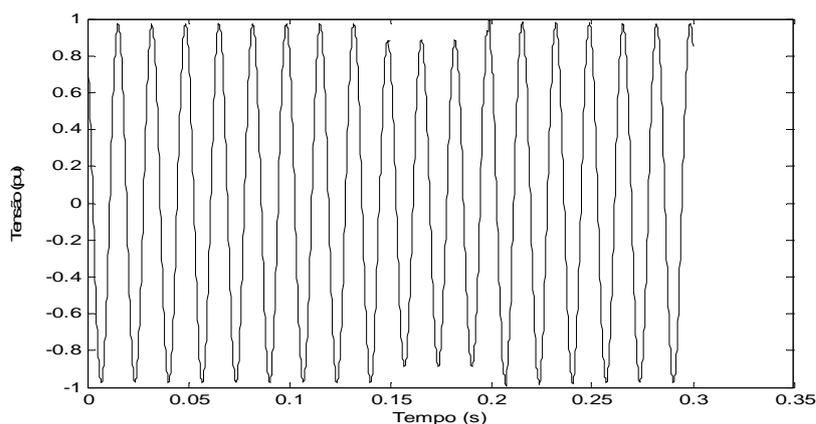
A próxima etapa deste estudo foi a inserção destas características no próprio sistema de distribuição estudado para analisar a resposta do sistema frente a esta situação e também a interação entre o forno e o sistema.

Os dados contidos na Tabela 35 foram injetados em alguns pontos do sistema. Este fato pode ser evidenciado na Tabela 36, que ilustra em sua primeira coluna, o número de casos referente a cada situação e em seguida a localização da situação de falta aplicada no sistema para obtenção dos distúrbios. Na terceira coluna é mostrado o ângulo de incidência de falta e em seguida a localização da fonte de injeção de componentes harmônicas, juntamente com o respectivo ângulo de incidência sobre as formas de onda, e, na última coluna, o ponto de medição dos distúrbios. No momento desta inserção, a qual vem caracterizar a entrada do forno em operação, o algoritmo proposto através da TW foi capaz de detectar as alterações sobre o sistema, dependentes do ponto de medição e de injeção [77].

Tabela 36 - Casos de afundamento, elevação e interrupção de tensão em conjunto com o forno de indução em operação.

Nº de casos	Localização da Falta	Ângulo de Incidência da Falta (°)	Localização da Fonte (secundário)	Ângulo de Incidência da Fonte (°)	Ponto de Medição (primário)
20	BC1	0	TP4	0	T13
20	BC1	0	TP4	90	T13
20	BC1	90	TP4	0	T13
20	BC1	90	TP4	90	T13
19	BC3	0	TP4	0	T13
19	BC3	0	TP4	90	T13
19	BC3	90	TP4	0	T13
19	BC3	90	TP4	90	T13
21	Subestação	0	TP4	0	T13
21	Subestação	0	TP4	90	T13
21	Subestação	90	TP4	0	T13
21	Subestação	90	TP4	90	T13
20	BC1	0	TP4	0	TP4
20	BC1	0	TP4	90	TP4
20	BC1	90	TP4	0	TP4
20	BC1	90	TP4	90	TP4
19	BC3	0	TP4	0	TP4
19	BC3	0	TP4	90	TP4
19	BC3	90	TP4	0	TP4
19	BC3	90	TP4	90	TP4
21	Subestação	0	TP4	0	TP4
21	Subestação	0	TP4	90	TP4
21	Subestação	90	TP4	0	TP4
21	Subestação	90	TP4	90	TP4

Desta tabela, alguns casos analisados, principalmente para os com ângulo de incidência de falta a 0°, o algoritmo proposto não foi capaz de detectar o início do distúrbio em razão da suavidade na transição entre o sinal em regime e o sinal com distúrbio. Um destes casos típicos pode ser evidenciado pela Figura 114. Esta não detecção se deve também ao fato do tamanho da janela. Cabe afirmar que se utilizarmos uma janela de análise maior à usada, estes distúrbios serão detectados com exatidão. Do total de 480 casos novos, apenas 31 distúrbios com ângulo de incidência de falta a 0° não foram detectados. Ao passo que quando do aumento do tamanho da janela de análise, todos estes distúrbios foram detectados corretamente.



*Figura 114 – Falha na detecção para um caso de afundamento de tensão a 0°.*

Com relação à detecção, a média dos erros absolutos para os casos de aplicação do ângulo de falta a 0° foi de 0,45 ms. Já para os casos de ângulo de falta a 90° este foi de 0,14 ms. A média dos erros na detecção da entrada do forno de indução em operação foi de 3,49 ms, valor este alto se comparado com as médias anteriores em virtude da dificuldade do algoritmo em detectar tal entrada em operação.

Um fato importante é a possibilidade de ajuste dos limiares de acordo com a necessidade e sensibilidade desejada para os casos em questão. Pode-se afirmar que dos casos simulados com distúrbios simultâneos, uma parcela de 6,5% não teve a detecção concretizada, porém estes casos compreendem aplicações de falta a um ângulo de 0°, as quais dificultam tal detecção. Já para todos os outros casos, o algoritmo foi capaz de corretamente detectar o início do distúrbio bem como apresentar sua respectiva localização no tempo[78].

## **7.2 - Resultados iniciais sobre situações reais registradas em campo**

Uma validação inicial desta abordagem passa por detectar, localizar no tempo e classificar os fenômenos envolvidos com uma taxa amostral inferior a 7680 Hz. Para tal finalidade, como grandezas de análise, utilizou-se de tensões trifásicas compondo um conjunto de dados referente a distúrbios reais coletados por meio de equipamentos de medições, instalados em

vários pontos do sistema elétrico de distribuição [79]. Estes foram coletados a uma taxa amostral de 1,2 kHz. Ou seja, disponibilizando apenas 20 amostras por ciclo.

Como critério inicial, o algoritmo considera a detecção e a localização no tempo quando da ocorrência de um determinado fenômeno. Para esta tarefa, toma-se então uma janela de dados correspondente a três ciclos do sinal registrado com passos de um ciclo, que percorrerá o sinal apresentado, enquanto da não observância de uma alteração característica na forma de onda. Quando da incidência de alguma descontinuidade no sinal, afirma-se que o algoritmo será capaz de detectá-lo através do primeiro nível de detalhe em AMR, como evidenciado na Figura 115, onde na parte (a) é mostrado o sinal janelado e na parte (b), o primeiro nível de decomposição em AMR. Deve ser mencionado que este tamanho de janela foi escolhido empiricamente em função da frequência de amostragem comentada. Outros tamanhos também foram avaliados, não vindo a apresentar resultados satisfatórios.

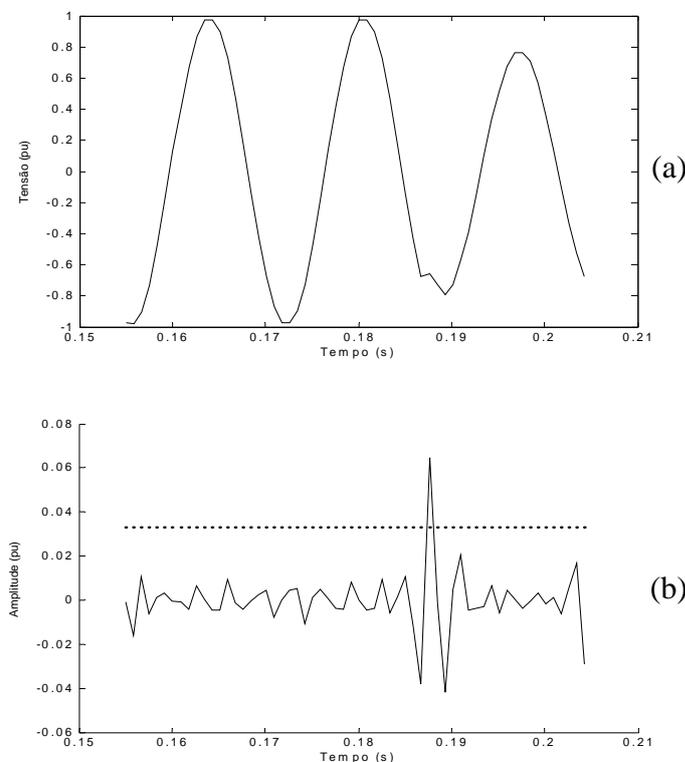
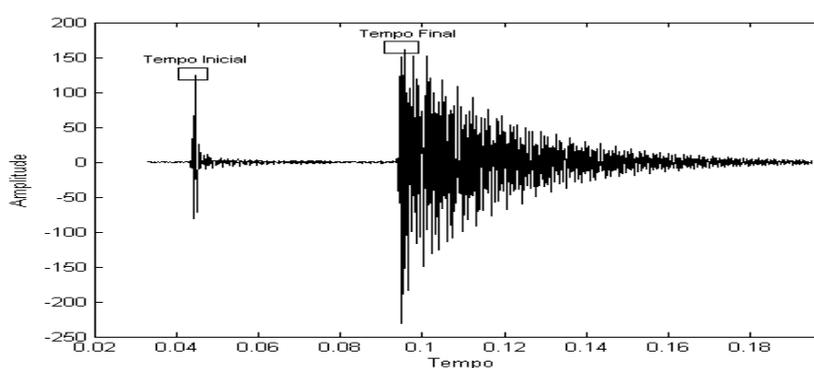


Figura 115 – (a) Sinal janelado. (b) Primeiro detalhe do sinal janelado.

A partir da detecção, a janela de dados é ampliada para até 10 ciclos do sinal em análise. Desta forma, a mesma compreenderá nestes 10 ciclos, dois ciclos de pré-deteção e oito de pós-deteção. Tal medida decorre da necessidade de se obter as demais informações precisas e pertinentes à localização do distúrbio, como o tempo inicial e final, a classificação e outras características quando desejadas.

A Figura 116 ilustra as informações tomadas do primeiro nível de decomposição de um afundamento de tensão. Esta se faz necessária para obter informações sobre a localização temporal do distúrbio, ou seja, tempo inicial e final de uma determinada situação com anomalia.



*Figura 116 – Estimativa da duração de um determinado distúrbio.*

Um detalhe importante que deve ser observado com respeito à classificação, refere-se à necessidade de se processar quatro níveis de decomposição em AMR, para se evidenciar as informações do sinal a 60 Hz. O desempenho do método de classificação é basicamente caracterizado pela comparação entre os valores calculados referentes aos desvios padrões dos detalhes do sinal sem distúrbio com o sinal distorcido, ou seja, o sinal em regime é tomado como referência para avaliar possíveis situações anormais de operação sobre o sistema, assim como mostrado em [77].

Sabe-se que os distúrbios de afundamento, elevação e interrupção de tensão são caracterizados pelo seu conteúdo espectral a 60 Hz. Desta forma, pela AMR tem-se que este

conteúdo é representado pelo quarto nível de decomposição, em virtude da baixa taxa amostral empregada. Este nível é então empregado para a classificação destes fenômenos pela abordagem proposta. Para obter corretamente a diferenciação entre estes três distúrbios, calcula-se o valor resultante da diferença entre os desvios padrões do sinal com distúrbio e do sinal em regime. Se a diferença observada for positiva, este é classificado como elevação de tensão, ao passo que se a diferença for negativa, o mesmo é classificado como afundamento ou mesmo interrupção momentânea dependendo dos níveis atingidos. Na Figura 117 é evidenciado um afundamento de tensão para 0,75 p.u. e, na Figura 118, sua respectiva classificação.

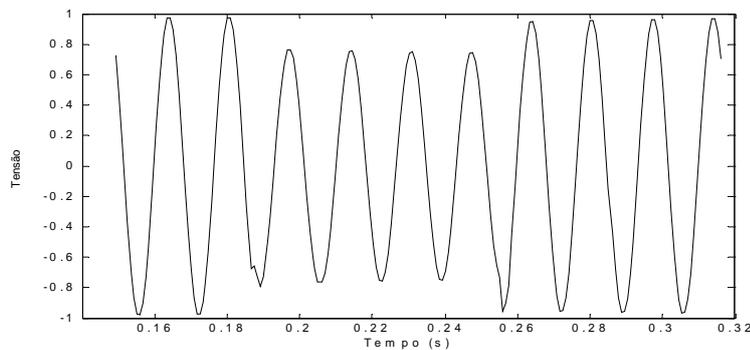


Figura 117 – Afundamento de tensão para 0,75 p.u.

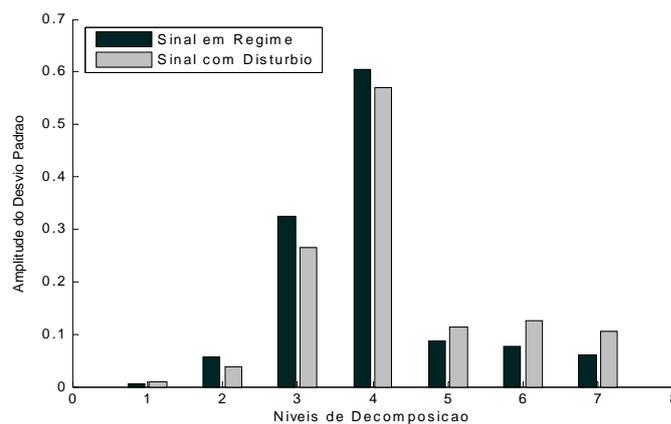


Figura 118 – Classificação de um Afundamento de tensão.

Como já mencionado, a taxa amostral deste banco de dados de medições reais, para os casos de afundamento e elevação de tensão, é de 1200 Hz, taxa esta considerada baixa para a aplicação em questão. Com apenas 20 amostras por ciclo o algoritmo não se mostrou

totalmente eficaz. Já para os casos de chaveamento de bancos de capacitores, a frequência de amostragem disponibilizada foi de 7,68 kHz, ou seja, 128 amostras por ciclo, não apresentando desta maneira, problemas tanto na detecção quanto na classificação dos mesmos pela aplicação da TW.

Cabe comentar que por mais que testado, a metodologia ainda merece um refinamento no sentido de abranger um maior número de tipos e ocorrências simultâneas de distúrbios relacionados à QEE, bem como uma melhor adequação à frequência amostral disponibilizada.

Destes fatos temos que algumas das situações reais apresentadas à lógica implementada, pré-classificadas visualmente como regime permanente, apontaram certa descaracterização à forma de onda senoidal. Uma análise criteriosa realizada com estes casos revelou a presença de distúrbios que ainda não foram contemplados pela lógica implementada. Um exemplo disto foi à presença de flutuações de tensão no sinal em análise. Para esta situação, os níveis de tensão observados variam entre 0,95 p.u. e 1,05 p.u. [1]. Um caso típico é ilustrado na Figura 119.

Das situações medidas em campo foi possível caracterizar apenas duas condições de elevação de tensão. Estas foram corretamente detectadas e classificadas pela abordagem implementada.

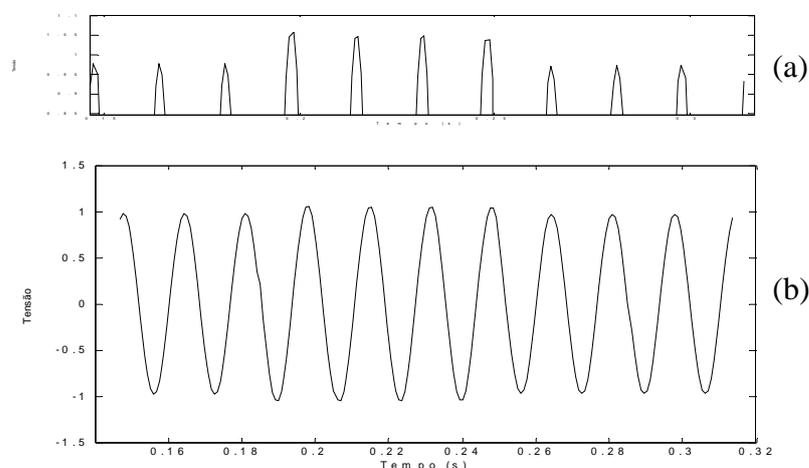
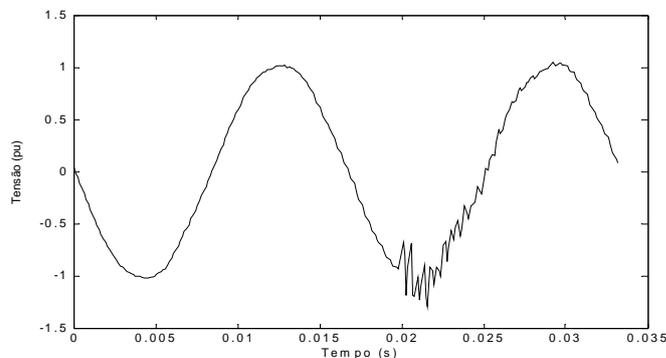


Figura 119 – Caso típico de flutuação de tensão: (a) Sinal ampliado - (b) Sinal normal.

Para os casos de oscilações transitórias apresentadas ao algoritmo, estes foram 100% detectados e classificados. Porém, um fator importante deve ser lembrado, que diz respeito à frequência de amostragem de 7,68 kHz disponibilizada para caracterizar estes sinais - 128 amostras por ciclo. Dessa maneira, o algoritmo não necessitou de uma janela de dados sobre três ciclos para detectar corretamente o distúrbio, mas sim, de apenas um único ciclo. Na seqüência implementada, logo após a detecção, uma janela maior de dados foi encaminhada para o módulo de classificação como anteriormente apresentado. A Figura 120 ilustra uma situação caracterizada como transitório oscilatório.



*Figura 120 – Transitórios oscilatórios.*

A Tabela 37 indica os tipos de distúrbios caracterizados e o índice de acertos frente aos dados reais coletados. Nota-se que para a classificação, apenas os casos de afundamentos de tensão tiveram erros para duas situações. Já na detecção, cerca de 25% das situações foram incorretamente acusados, erros estes decorrentes da baixa taxa amostral disponibilizada para uma boa parte das situações analisadas.

*Tabela 37 – Tipos de distúrbios caracterizados em campo e índice de acertos observados.*

<b>Fenômeno</b>	<b>Número de casos</b>	<b>Deteção</b>	<b>Classificação</b>
Afundamento	24	92%	91,7%
Elevação	2	100%	100%
Regime	16	56,3%	100%
Transitórios	24	100%	100%

Deve ser destacado que sobreposto aos dados coletados, caracterizou-se uma pequena parcela de ruído. Contudo, tais ruídos sobrepostos aos sinais não foram significativos a ponto de atrapalhar o desempenho do algoritmo implementado.

Outra importante questão a comentar é a presença de distintos distúrbios em seqüência a primeira detecção. Dois casos de afundamentos de tensão apresentaram em sua continuidade a caracterização de outros dois distintos afundamentos, sendo estes, corretamente detectados ao longo do processo [71].

### **7.3 - Resultados sobre situações reais registradas em campo num sistema de transmissão da CHESF**

O conjunto de testes que será mostrado nesta seção compreende situações reais do sistema de transmissão da CHESF (Companhia Hidrelétrica do São Francisco). Estes casos têm como objetivo validar toda a metodologia proposta no decorrer deste texto. Tais dados compreendem situações provindas de linhas de transmissão de varias classes de tensão, a saber, 69, 138 e 230 kV. Os dados foram coletados a uma taxa amostral de 7.680 Hz por meio de RDPs (Registradores Digitais de Perturbações) tipo ION 7700 e de oscilógrafos instalados em pontos estratégicos do sistema de transmissão da CHESF e nas instalações de seus grandes consumidores industriais [48]. O conjunto de dados detalhado está descrito na Tabela 38.

*Tabela 38 – Conjunto de dados reais originados da CHESF.*

Fenômeno	Número de casos
Regime Permanente	1170
Afundamento de Tensão	730
Distorções Harmônicas	477
Oscilações Transitórias	874

A primeira análise realizada neste conjunto de dados foi a verificação dos instantes iniciais dos distúrbios. Todos estes instantes foram anotados e depois comparados com os valores obtidos pelo algoritmo. Sendo assim, podem-se obter informações sobre o primeiro módulo do algoritmo proposto que trata da detecção e localização no tempo dos distúrbios.

Para os casos em regime permanente, onde se tinha 1170 casos, 65 destes foram detectados como que apresentando algum tipo de distúrbio. Isto representa um percentual de erro da ordem de 5,5. Analisando detalhadamente estes casos, percebeu-se que alguns destes continham algumas distorções na forma de onda além de ruídos incorporados ao sinal de tensão. Os demais casos não apresentaram problemas em relação à detecção dos mesmos.

Do conjunto de dados referente a afundamentos de tensão, em alguns casos o algoritmo não foi capaz de detectar o início deste distúrbio. Estes casos somaram 48 situações, o que representa 6,6 % de erro na detecção. Esta não detecção se deve ao fato da suavidade na transição entre o estado em regime permanente e o distúrbio propriamente dito. Em alguns casos o afundamento vai se caracterizando de maneira decrescente, o que muitas vezes é um fator prejudicial ao bom funcionamento do algoritmo.

Para os casos de transitórios oscilatórios, todos os casos foram corretamente detectados. Em relação à precisão na detecção, os testes mostraram para estes distúrbios uma precisão superior a 95,5 %. Para a estimação da amplitude, a média obtida foi de 1,1p.u., sendo os valores comuns em torno de 1,2 p.u. No módulo de estimação da duração do distúrbio, que no caso dos transitórios oscilatórios se trata do tempo de retorno do sinal ao regime permanente, os resultados apontaram uma duração média de retorno de 1 ciclo e meio ou mais, precisamente 0,0243 segundos.

Em relação aos casos de componentes harmônicas incorporadas ao sinal elétrico, como se trata, pela definição, de um distúrbio tipicamente permanente, ou seja, não se tem um início ou um fim determinado, este módulo de detecção não foi testado.

Com respeito à classificação, os primeiros resultados apontam um fato interessante aos casos reais registrados em campo. Como a maioria dos distúrbios não acontece isoladamente, sempre há mais de um distúrbio incorporado ao sinal. Isto se aplica principalmente para os casos de afundamento de tensão, já que, muito antes de o algoritmo detectar tal afundamento, o mesmo detecta a presença de imperfeições na forma de onda. Estas imperfeições correspondem a uma determinada quantidade de ruídos presentes no sinal que prejudica a classificação do distúrbio principal, neste caso, do afundamento de tensão. Este fato pode ser observado pela taxa de acertos do algoritmo com respeito à classificação de afundamentos de tensão que foi de apenas 59 %. Neste primeiro teste em que o algoritmo detecta qualquer imperfeição no sinal de tensão e o classifica, os resultados são apresentados na Tabela 39. Em relação aos sinais em regime permanente esta taxa de acertos na classificação corresponde a um determinado ciclo do sinal registrado que o algoritmo determina aleatoriamente para verificar se o mesmo está realmente em regime. Em alguns casos houve uma falsa detecção por parte do algoritmo, sendo que posteriormente, o mesmo veio a reavaliar corretamente a situação apresentada. Apenas em três casos de regime permanente foram acusadas a presença de distorções harmônicas e em outros doze casos acusados a presença de transitórios oscilatórios, o que justifica a taxa de 98,7% de acertos nas situações em regime permanente.

*Tabela 39 – Resultados da classificação dos dados reais – primeira abordagem.*

Fenômeno	Número de casos	Classificação (%)
Regime	1170	98,7
Afundamento	730	59,0
Harmônicas	477	90,2
Transitórios	874	84,7

Os valores apresentados podem ser mais bem visualizados através da matriz de acertos apresentada na Tabela 40. Esta matriz mostra o percentual de acertos em cada tipo de

distúrbio, e onde o algoritmo esta se equivocando. É necessário salientar que este equívoco muitas das vezes tem justificativa, pois no caso dos afundamentos de tensão, muitos casos apresentaram imperfeições na forma de onda muito antes do afundamento propriamente dito. Desta forma, como foi detectado uma imperfeição na forma de onda, o algoritmo captura um ciclo após esta imperfeição e a classifica. Destas situações, resulta um índice de 11,4% das situações de afundamento acusar regime permanente, 12,9% das situações acusarem distorções harmônicas e outros 16,7% acusarem transitórios oscilatórios.

*Tabela 40 – Análise dos resultados em porcentagem.*

Fenômeno	Regime	Afundamento	Harmônicas	Transitórios Oscilatórios	Ruídos
Regime	98,7	0	0,3	1,0	0
Afundamento	11,4	59,0	12,9	16,7	0
Harmônicas	2,7	2,3	90,2	4,2	0,6
Transitórios Oscilatórios	7,2	0,1	3,7	84,7	4,3

Já a Tabela 41 mostra os mesmos resultados, mas agora em valores absolutos. Nota-se que dos 477 casos de distorções harmônicas, 13 acusaram situação em regime permanente, 11 situações acusaram afundamento de tensão, outras 20 situações acusaram transitórios oscilatórios e apenas 3 casos foram classificados como ruídos presentes no sinal de tensão. Para os casos de transitórios oscilatórios, 63 acusaram situação em regime permanente, 32 situações acusaram distorções harmônicas, 38 situações indicaram ruídos presentes no sinal e apenas um caso foi acusado como de afundamento de tensão. O que se pode concluir através destes dados apresentados é que muitos deles contem realmente o que foi indicado nesta tabela, podendo o algoritmo acusar com certeza a presença de um distúrbio e dar indícios da presença de outro tipo de distúrbio.

Tabela 41 – Análise dos resultados em valores absolutos.

Fenômeno	Regime	Afundamento	Harmônicas	Transitórios Oscilatórios	Ruídos	Total
Regime	<b>1155</b>	0	3	12	0	<b>1170</b>
Afundamento	83	<b>431</b>	94	122	0	<b>730</b>
Harmônicas	13	11	<b>430</b>	20	3	<b>477</b>
Transitórios Oscilatórios	63	1	32	<b>740</b>	38	<b>874</b>

Diante destes resultados foi desenvolvida uma metodologia de classificação do distúrbio principal, ou seja, foi selecionado um ciclo de dados a partir do distúrbio propriamente dito. No caso de dados referentes aos afundamentos de tensão, um ciclo contendo 128 amostras somente do distúrbio foi submetido à classificação. Os resultados desta abordagem são ilustrados na Tabela 42.

Tabela 42 – Classificação final dos casos obtidos através do sistema CHESF.

Fenômeno	Regime	Afundamento	Harmônicas	Transitórios Oscilatórios	Ruídos
Regime	<b>99,5</b>	0	0,2	0,3	0
Afundamento	0,8	<b>97,0</b>	0,1	2,1	0
Harmônicas	2,7	2,3	<b>90,2</b>	4,2	0,6
Transitórios Oscilatórios	5,0	0,1	3,2	<b>86,5</b>	5,2

Através desta tabela é possível analisar melhor os resultados obtidos. Nos dados referentes às situações em regime permanente o algoritmo apresentou como resultados que 0,2% dos casos contêm distorções harmônicas e 0,3% contém transitórios oscilatórios, os 99,5% restantes das situações estão de fato em regime permanente. No segundo caso analisado, afundamento de tensão, o algoritmo acusou que 0,8% das situações estão em regime permanente, 0,1% contém distorções harmônicas e 2,1% das situações contém transitórios oscilatórios. Sendo assim, 97% compreendem casos de afundamento de tensão propriamente dito. As situações compreendidas como distorções harmônicas, como não apresentam um ponto de início de distúrbio não coube à detecção da mesma e os ciclos

submetidos à classificação foram determinados aleatoriamente. Desta forma, 90,2% das situações foram classificadas como distorções harmônicas, 2,7 % como regime permanente, 2,3% como afundamentos de tensão, 4,2 % como transitórios oscilatórios e 0,6 % como ruídos. Os últimos casos analisados foram os transitórios oscilatórios, que apresentam os mais baixos percentuais de acertos em virtude da proximidade das frequências com os distúrbios de distorções harmônicas e ruídos presentes ao sinal. Sendo assim, 86,5 % das situações acusaram a presença de transitórios oscilatórios, 5 % apresentaram situação de regime permanente, 0,1 % afundamento de tensão e o restante, 3,2 % e 5,2 %, acusaram a presença de distorções harmônicas e ruídos respectivamente.

## 8 - INTERFACE GRÁFICA

No intuito de propiciar de forma automatizada uma adequada análise no contexto da QEE, generalizando às possíveis ferramentas de domínio do grupo de pesquisas alocado junto ao LSEE (Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica), seja para a TW, TFJ ou RNA, tem-se a necessidade da criação de uma interface gráfica. Além da opção de escolha entre as ferramentas fundamentais citadas, a interação entre *software* e usuário permitirá a escolha quanto aos níveis reais de tensão do sistema a ser analisado, dando também opções quanto às grandezas do sistema elétrico envolvidas, à frequência de amostragem dos sinais sob análise e demais considerações pertinentes a cada implementação.

Desta necessidade, desenvolveu-se um ambiente padronizado das informações que são direcionadas à aplicação da TW e também outras ferramentas importantes como TFJ e RNA. A mesma também favorece a uma formatação comum no tratamento das variáveis intermediárias às análises, bem como às variáveis de saída, as quais deverão relatar as condições da QEE observadas pelos algoritmos aplicados. As variáveis de saída poderão ser apresentadas no formato de arquivo texto, gráfico e ou impresso, dependendo da necessidade e escolha do usuário final, como será apresentado no decorrer deste capítulo.

Cabe ressaltar que esta interface como se apresenta, resulta do trabalho conjunto dos projetos desenvolvidos junto ao LSEE [80].

## 8.1 - Ferramentas de construção da interface

Em vista da necessidade de uma interação e formatação mais amigável entre os programas relacionados à QEE e o usuário final, será apresentado no que segue os recursos para a caracterização desta interface gráfica dispondo do *software Matlab®*.

Por definição, uma interface com o usuário é o ponto de contato ou método de interação entre uma pessoa e um computador ou programa computacional. A essa interface no *Matlab®*, dá-se o nome de GUI (*Graphical User Interface*). Uma GUI proporciona um ambiente familiar para trabalhos contendo botões, chaves, listas, menus e caixas de texto entre outros, já familiares para o usuário. Do uso adequado destas funções pré-definidas, o usuário pode se concentrar em utilizar a aplicação em vez de cuidar da automatização envolvida na execução de determinadas ações.

Os três elementos principais requeridos para criar uma GUI no *Matlab®* são:

- Componentes:

Cada item em uma GUI é um componente gráfico. Dentre os tipos de componentes temos: controles gráficos (botões, caixas de edição, listas, régua, etc.); elementos estáticos (quadros e cadeia de caracteres de texto); menus e eixos (utilizados para exibir dados gráficos);

- Figuras:

Os componentes de uma GUI precisam ser arranjados dentro de uma figura, que é uma janela na tela do computador. As figuras são criadas automaticamente quando desenhamos os dados. Entretanto, figuras vazias podem ser criadas e utilizadas com qualquer combinação de componentes;

- Chamadas de Retorno:

É preciso existir alguma maneira de executar uma ação caso o usuário pressione o botão de um *mouse* ou digite uma informação pelo teclado. Um pressionar de botão do *mouse*

ou de tecla é um evento, e o programa *Matlab*® precisa responder a cada evento para desempenhar sua função. Por exemplo, se um usuário pressiona um botão, esse evento precisa levar o código *Matlab*® que implementa a função do botão a ser executado. O código executado em resposta a um evento é conhecido como chamada de retorno, do inglês *callback*. Deve existir uma chamada de retorno para programar a função de cada componente gráfico da GUI.

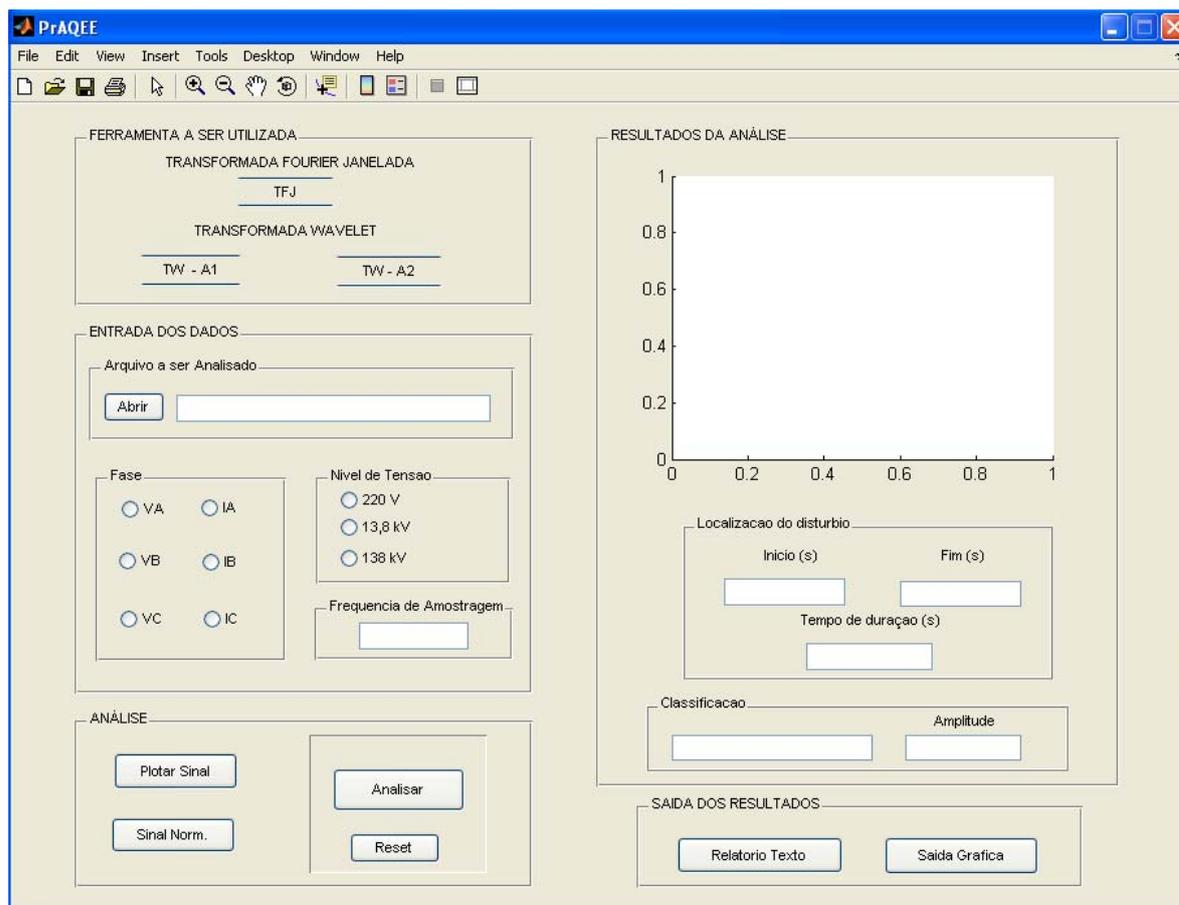
As GUIs do *Matlab*® são criadas utilizando uma ferramenta denominada *GUIDE* - Ambiente de Desenvolvimento da GUI. A *guide* é uma função fornecida pelo *Matlab*® para construção das GUIs com maior facilidade e rapidez. Contém ferramentas para criar, instalar, alinhar e alterar o tamanho de objetos (componentes), um editor de propriedades e inspetor (*Property Inspector*) que lista propriedades de objetos e que permite ao usuário modificar essas propriedades interativamente, além de um menu editor para a edição interativa e para modificar os menus definidos na GUI.

Assim podem-se definir os passos de um usuário para a criação de uma GUI *Matlab*®. Quando a função *guide* é executada, ela cria uma janela de *Editor* que contém diversos componentes de GUI no lado esquerdo da área de projeto. O usuário decide quais componentes são requeridos para a GUI e qual a função de cada um; cria qualquer quantidade desses componentes através da seleção com o *mouse* do componente desejado, seguido de seu arraste para a área de projeto. Aqui, o tamanho da figura e o alinhamento e espaçamento dos componentes podem ser ajustados com as ferramentas do *guide*. Utiliza-se o *Inspetor de Propriedades* para dar a cada componente um nome e ajustar suas características, como cor, texto exibido, tipo de chamada de retorno e assim por diante. Em seguida grava-se a figura em um arquivo. Quando a figura é gravada, dois arquivos são criados no disco com o mesmo nome, mas com extensões diferentes. O arquivo *fig* contém a GUI criada, e o arquivo *M*

contém o código para carregar a figura e os esqueletos de chamadas de retorno para cada elemento de GUI. Por último, deve ser escrito, nesse arquivo *M*, gerado após a criação da GUI, o código que implementa o comportamento associado a cada função de chamada de retorno.

## **8.2 - Desenvolvimento da Interface**

Das ferramentas apontadas, a TW, TFJ e RNA, mostraram-se aplicáveis à detecção, localização no tempo e classificação de distúrbios agregados às formas de ondas de tensão em um sistema de distribuição, com o intuito de prover um diagnóstico preciso das situações



*Figura 121 - Modelo geral da interface empregada com a caracterização das informações e respostas decorrentes*

Ativando a interface como mencionado acima, obtém-se, por exemplo, a caracterização das informações e respostas decorrentes da análise como ilustra a Figura 122. Para efeitos ilustrativos, esta figura traz uma situação de elevação da tensão caracterizada e avaliada sobre o sistema, a partir da fase C do sinal de tensão (Vc), nível de 13,8 kV, denotando-se as informações necessárias quando da escolha da TW, com os conseqüentes resultados observados.

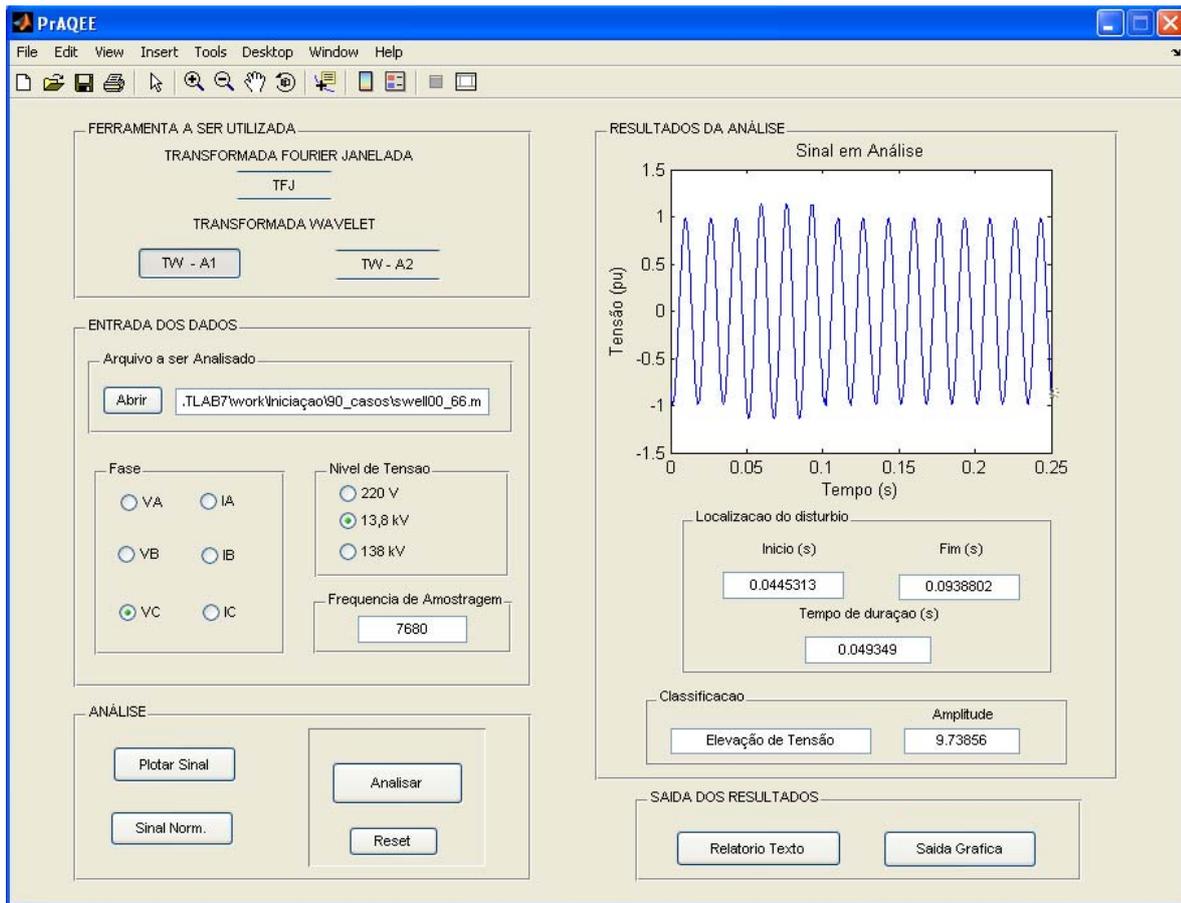


Figura 122 – Informações detalhadas em função da elevação de tensão acusada..

### 8.2.1. Mensagens de Erro

Vale comentar que sobre esta interface, mensagens de erro e alerta poderão ser exibidas quando da inclusão pelo usuário de valores e ou parâmetros de entrada indevidos. As mensagens implementadas são mostradas e listadas a seguir.

A Figura 123 ilustra uma mensagem de erro. Neste caso, um arquivo de entrada deve ser escolhido para sua devida leitura e utilização via interface.

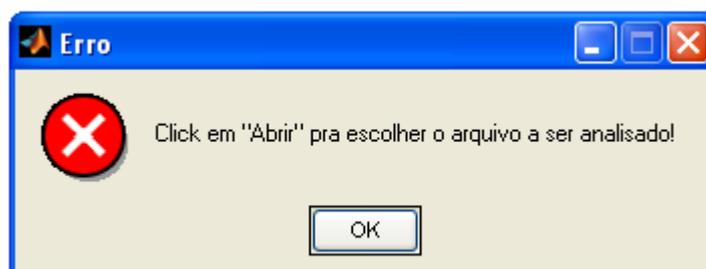


Figura 123 – Erro: arquivo de entrada deve ser escolhido.

Já na Figura 124 apresenta-se outra mensagem de erro devido à necessidade de escolha de uma das três fases referentes ao sinal de tensão ou corrente para a análise.

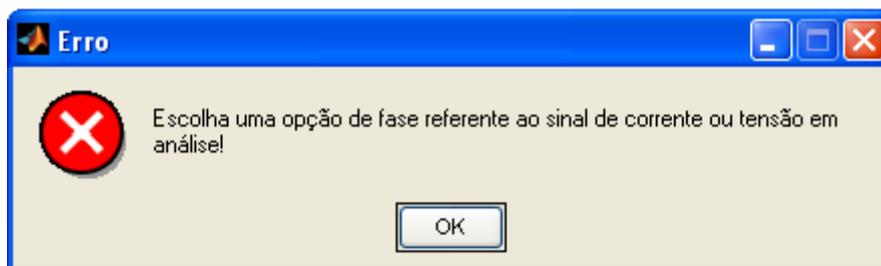


Figura 124 – Erro: escolha uma opção de fase do sinal em análise.

A próxima mensagem disponibilizada pela interface é com relação à seleção do nível de tensão a ser utilizado, com opções entre 220 V, 13,8 kV e 138 kV. Esta mensagem é ilustrada pela Figura 125.

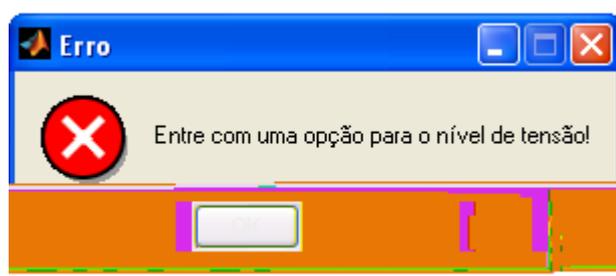


Figura 125 – Erro: escolha uma opção para o nível de tensão.

A Figura 126 ilustra uma janela de erro com relação à variável de entrada da frequência de amostragem que foi incorretamente fornecida.

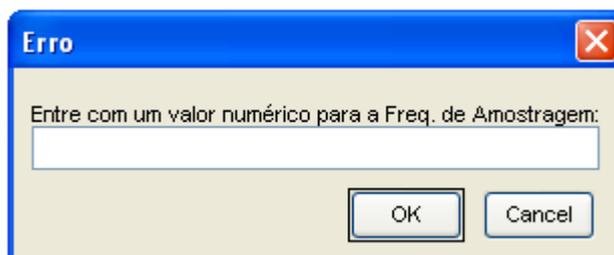


Figura 126 – Erro: entrada de um valor numérico para a frequência de amostragem.

No caso do usuário não inserir novamente um valor numérico para a frequência de amostragem, uma mensagem de atenção é exibida informando da impossibilidade da análise, conforme mostra a Figura 127.

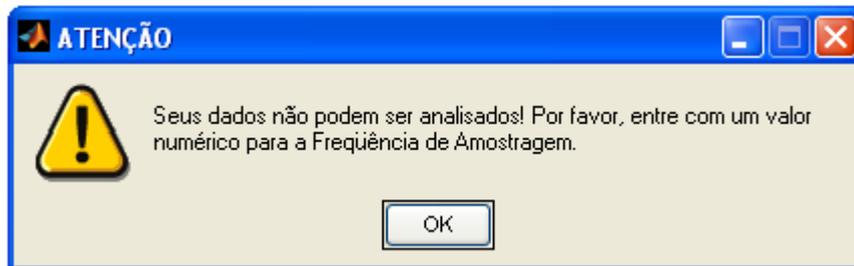


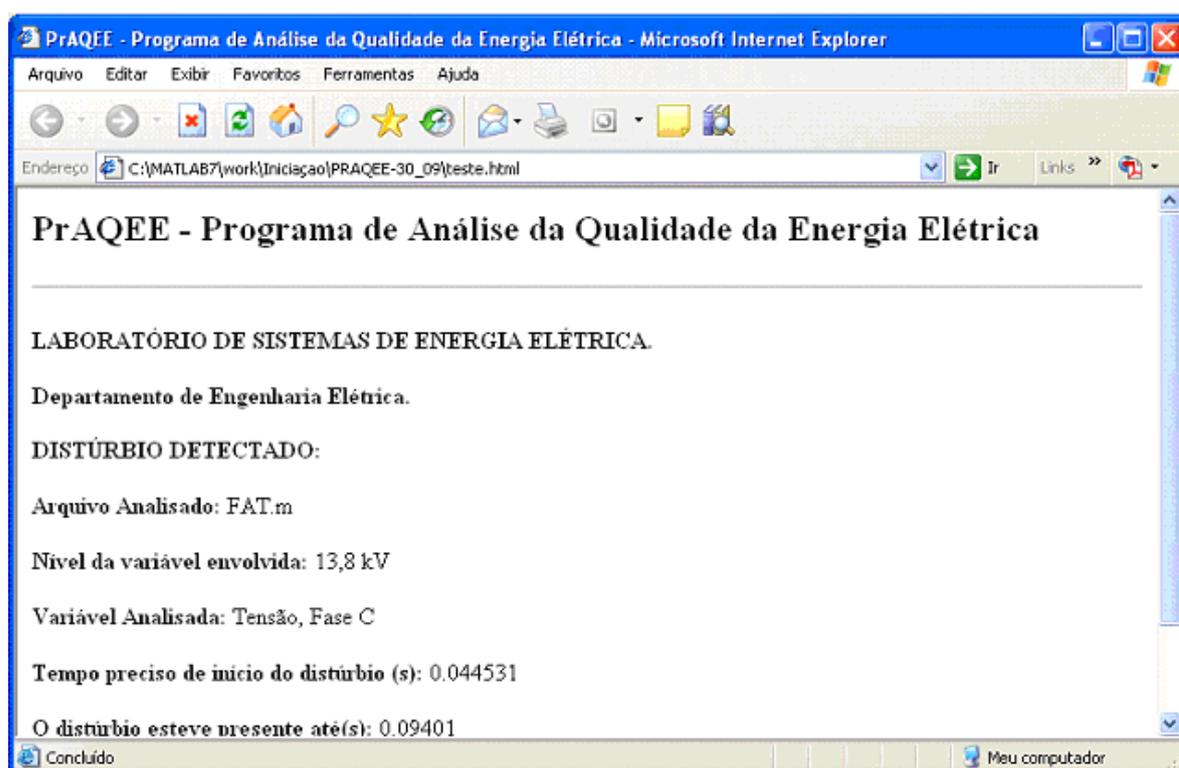
Figura 127 – Atenção: os dados não podem ser analisados.

Também como já mencionado anteriormente, a partir das opções dispostas em ‘*Saída dos Resultados*’, as variáveis de saída são apresentadas no formato de arquivo texto, gráfico e ou impresso, dependendo da necessidade e escolha do usuário final.

Ao pressionar o botão “*Relatório texto*”, o usuário terá a sua disposição um relatório do tipo texto, contendo todos os resultados da análise referentes à localização no tempo do distúrbio, como tempo do instante inicial e final, com a conseqüente duração do fenômeno sobre o sistema, a amplitude caracterizada, bem como a classificação do mesmo. Esse relatório é disponibilizado a partir de uma função pré-definida pelo *software Matlab®*, a função “*report*”. Para dispor dessa função, toma-se uso do “*Report Generator*”. Através deste, é possível tomar informações da área de trabalho (“*workspace*”) ou de variáveis salvas no presente diretório de trabalho do *Matlab®*, podendo-se exportá-las para um documento em forma de um relatório. Os relatórios criados pelo uso do “*Report Generator*” podem incluir figuras, variáveis, textos, datas e autores. Além disso, podem ser criados relatórios em outros formatos de documentos, como:

- *Rich Text Format (RTF)*;
- *Extensible Markup Language (XML)*;
- *Hypertext Markup Language (HTML)*.

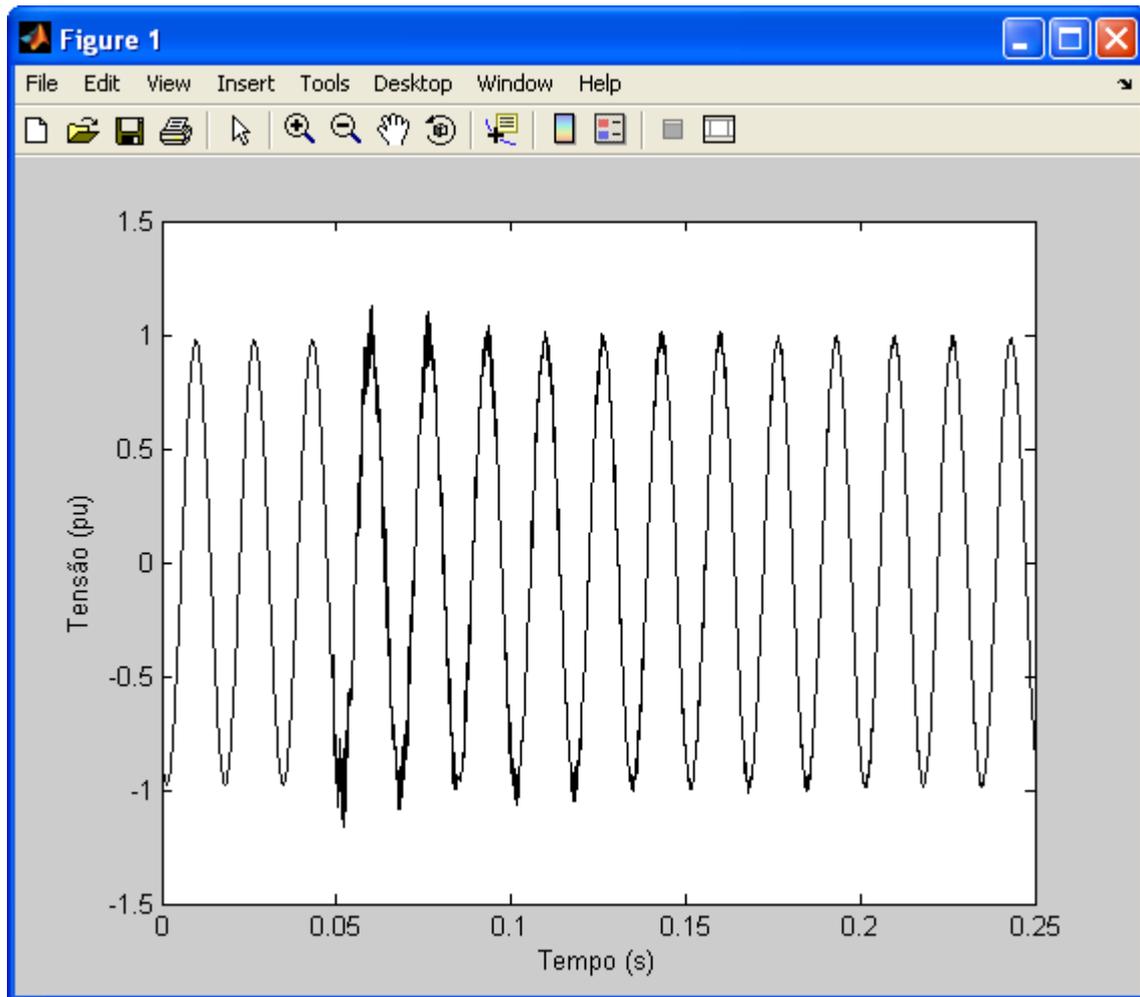
Para ilustrar o uso deste recurso por parte do usuário, ativa-se a interface para a análise de um sinal, o qual reflete uma situação de elevação de tensão no nível de 13,8 kV, manifestado na fase C do sinal de tensão ( $V_c$ ), quando da escolha e análise pela TW, apresentando os seguintes resultados observáveis (Figura 128).



*Figura 128 – Exemplo do relatório texto gerado.*

O relatório gerado, como o apresentado na Figura 128, foi criado em formato (HTML).

Como outra forma de visualização, não menos importante, tem-se a saída gráfica disponibilizada ao usuário conforme a Figura 129, tomada com base nas informações da Figura 122.



*Figura 129 – Exemplo da saída gráfica gerada.*

É importante ressaltar que tanto no relatório texto como na saída gráfica, o usuário terá a sua disposição recursos de impressão, de edição e exibição de textos e imagens, podendo salvar o documento e configurar os arquivos desejados.

## 9 - CONCLUSÕES

Como fato temos que a análise e o entendimento dos distúrbios associados à QEE têm sempre auxiliado na mitigação e retificação dos mesmos.

Para este relato em específico, pôde-se verificar que em 100% dos casos simulados e avaliados, o momento exato da ocorrência de uma determinada anomalia foi corretamente acusado através da TW. Desta situação, pela aplicação da TRF exclusivamente a um ciclo pós-deteccção, foi possível caracterizar com precisão o conteúdo harmônico do sinal e deste, evidenciar características do ocorrido.

Basicamente, parte dos fenômenos relacionados aos assuntos delineados já foi estudada, mas, por mais amplas que tenham sido estas novas situações, específicas características ainda devem ser incluídas e trabalhadas no sentido de se alcançar uma implementação prática e confiável ao que foi proposto.

Com relação à adaptação do algoritmo ao fato de se ter uma baixa taxa amostral, observou-se à relevância da disponibilização de uma adequada taxa amostral dos equipamentos de medição à aplicação da TW, no tocante à precisão obtida pelas análises. Algumas situações normais foram identificadas como distúrbio em função de descontinuidades geradas pela transição entre um dado valor do sinal de tensão medido e amostrado em um determinado instante e o valor medido subsequente. Para um aceitável desempenho do algoritmo, uma taxa amostral de 3.840 Hz é suficiente, o que representa 64 amostras por ciclo. Com taxa amostrais inferiores a este valor, o algoritmo deve ser

remodelado e testado. Cabe lembrar que a baixa taxa de amostragem não o impede de apresentar resultados satisfatórios.

Com respeito à classificação dos distúrbios, três metodologias foram testadas, TW, TRF e RNA. Em todas as ferramentas foi adotado o mesmo procedimento em relação ao dado de entrada do módulo classificador, ou seja, um ciclo do sinal pós-deteção contendo 128 amostras. Os resultados apresentaram o potencial das três ferramentas, com ressalva a TW que deve utilizar como função de base a *wavelet* mãe de *Haar*. No entanto como método prático e rápido a TRF mostrou-se eficiente para os casos testados. Com respeito a RNA, o único inconveniente seria o conjunto inicia

Cabe comentar, que o desenvolvimento da interface para o algoritmo proposto, criando uma interação e formatação final mais amigável, e a definição de um ambiente padrão de comunicação entre as lógicas implementadas e validadas com o intuito de se aproximar do usuário final, iniciou-se por um ambiente flexível e adequado as expectativas geradas.

Pretende-se como continuidade desta interface, além do informe técnico da ocorrência sobre o sistema em análise, desenvolver recursos didáticos que permitam uma melhor observância das condições do sistema, formas de ondas registradas e sobre o processamento da informação pela aplicação da TW, da TRF be



## 10 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN, M. F.; BEATY, H. W. (1996). *Electrical power systems quality*. New York, McGraw-Hill.
- [2] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO – ONS. Procedimentos de Rede, Submódulo 2.2 – Padrões de Desenvolvimento da Rede Básica, vigente em 9/10/2000.
- [3] BOLLEN, M. H. J. (1999). *Understanding power quality problems : voltage sags and interruptions*. New York: IEEE Press, xvii, 543 p.
- [4] ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA: Resolução N° 024. (2000). p.15, Jan.
- [5] ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA: Resolução N° 505. (2001). p.11, Nov.
- [6] SANTOSO, S., et al. (2000). *Characterization of Distribution Power Quality Events with Fourier and Wavelet Transforms*. IEEE Transactions on Power Delivery, 15, 1, 247-254, Jan.
- [7] ARRUDA, E. F. (2003). Análise de distúrbios relacionados com a qualidade da energia elétrica utilizando a transformada *Wavelet*. São Carlos. 121 p. Dissertação (Mestrado) – EESC, Universidade de São Paulo.
- [8] DELMONT FILHO, O. (2003). Utilização da transformada *wavelet* para caracterização de distúrbios na qualidade da energia elétrica. São Carlos. 92 p. Dissertação (Mestrado) – EESC, Universidade de São Paulo.

- [9] SOUZA, S. A. (2004). Utilização da Transformada de Fourier Janelada para Caracterização de Distúrbios na Qualidade da Energia Elétrica. São Carlos. 124 p. Dissertação (Mestrado) – EESC, Universidade de São Paulo.
- [10] OLESKOVICZ, M.; ARRUDA, E. F.; DELMONT FILHO, O.; COURY, D. V. e CARNEIRO, A. F. M. (2003) “Análise da qualidade da energia utilizando transformadas *wavelet* combinadas às redes neurais artificiais”, XVII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – SNPTEE, Uberlândia, MG, Brasil, Anais do Congresso (CD).
- [11] IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. (1995). *IEEE*, p.70, Jun.
- [12] SILVA, V.F. (2001). *Condicionador de potência para aplicação em inversor de frequência de média tensão*. São Paulo. 140 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- [13] ALTERNATIVE Transients Program. (1987) Rule Book, Leuven EMTP Center (LEC), ATP.
- [14] ORCAD PSpice A/D. (1999) User’s Guide.
- [15] SANTOSO, S., POWERS, E. J., GRADY, W. M. (1994). Electric Power Quality Disturbance Detection Using *Wavelet* Transform Analysis. IEEE International Symposium, p.166-169, Oct.
- [16] SANTOSO, S., POWERS, E. J., GRADY, W. M. and HOFMANN, P. (1996). *Power Quality Assessment Via Wavelet Transform Analysis*. IEEE Transactions on Power Delivery, 11, 2, 924-930, Apr.
- [17] CHAARI, O. et al. (1996). *Wavelet: A new tool for the resonant grounded power distribution systems relaying*. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v.11, n.3, p.1301-1308, Jul.
- [18] PILLAY, P.; BHATTACHARJEE, A. (1996). Application of *Wavelet* to model short-term Power System Disturbances. *IEEE Transactions on Power Systems*, v.11, n.4, p.2031-2037, Nov.

- [19] ROBERTSON, D.C. et al. (1996). *Wavelets and Electromagnetic Power System Transients. IEEE Transactions on Power Delivery*, v.11, n.2, p.1050-1058, Apr.
- [20] POISSON, O. et al. (1998). Advanced Techniques for Power Quality Analysis: A Real Case Study. *IEEE PES*, Oct.
- [21] HUANG, S.J.; HSIEH, C.T.; HUANG, C.L. (1998). Application of *wavelets* to classify power system disturbances. *Electric Power Systems Research*, v.47, p.87-93, Mar.
- [22] ANGRISANI, L.; DAPONTE, P.; D'APUZZO, M. A. (1998). Method Based on *Wavelet* Networks for the Detection and Classification of Transients. *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, v.2, p.903-908, May.
- [23] GAOUDA, A. M. et al. (1999). Power Quality Detection and Classification Using *Wavelet*-Multiresolution Signal Decomposition. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v.14, n.4, p.1469-1476, Oct.
- [24] POISSON, O.; RIOUAL, P.; MEUNIER, M. (1999). New Signal Processing Tools Applied to Power Quality Analysis. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v.14, n.2, p.561-566, Apr.
- [25] HUANG, S.J.; HSIEH, C.T.; HUANG, C.L. (1999). Application of Morlet *Wavelets* to Supervise Power System Disturbances. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v.14, n.1, p.235-243, Jan.
- [26] ZHENG, T., MAKRAM, E. B. and GIRGIS, A. A. (1999). *Power System Transient and Harmonic Studies Using Wavelet Transform*. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 14, 4, 1461-1467, Oct.
- [27] SANTOSO, S. (2000) Power Quality Disturbance Waveform Recognition Using *Wavelet*-Based Neural Classifier - Part1: Theoretical Foundation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v.15, n.1, p.222-228, Jan.

- [28] SANTOSO, S. (2000). Power Quality Disturbance Waveform Recognition Using *Wavelet*-Based Neural Classifier - Part 2: Application. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v.15, n.1, p.229-235, Jan.
- [29] POISSON, O.; RIOUAL, P.; MEUNIER, M. (2000). Detection and Measurement of Power Quality Disturbances Using *Wavelet* Transform. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v.15, n.3, p.1039-1044, Jul.
- [30] KARIMI, M.; MOKHTARI, H.; IRAVANI, M. R. (2000). *Wavelet* Based *On-Line* Disturbance Detection for Power Quality Applications. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v.15, n.4, p.1212-1220, Oct.
- [31] MOKHTARI, H.; KARIMI, M.; IRAVANI, M. R. (2002). Experimental Performance Evaluation of a *Wavelet*-Based *On-Line* Voltage Detection Method for Power Quality Applications. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v.17, n.1, p.161-172, Jan.
- [32] KIM, C. H.; AGGARWAL, R. (2000). *Wavelet* transforms in power systems: Part 1 General introduction to the *wavelet* transforms. *Power Engineering Journal*, p.81-87, Apr.
- [33] KIM, C. H.; AGGARWAL, R. (2001). *Wavelet* transforms in power systems: Part 2 Examples of application to actual power system transients. *Power Engineering Journal*, p.193-202, Aug.
- [34] BORRÁS, D. et al. (2001). *Wavelet* and Neural Structure: A new tool for diagnostic of power system disturbances. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v.37, n.1, p.184-190, Jan.
- [35] RESENDE, J.W.; PENNA, C. (2001). Identificação de Distúrbios da

- [37] HUANG, J., NEGNEVITSKY, M. and NGUYEN, D. T. (2002). *A Neural-Fuzzy Classifier for Recognition of Power Quality Disturbances*. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 17, 2, 609-616, Apr.
- [38] IBRAHIM, W.R.A.; MORCOS M.M. (2002). Artificial Intelligence and Advanced Mathematical Tools for Power Quality Applications: A Survey. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v.17, n.2, p.668-673, Apr.
- [39] FACEROLI, S.T.; VELASCO, M.; PACHECO, M.A. (2002). Assesment of Eletrical Disturbances Using Discrete *Wavelet* Analysis and Neural Nets. In SIMPOSIO DE ESPECIALISTAS EM PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO E EXPANSÃO ELÉTRICA (8.: Mai.2002: Brasília, DF). Anais. Brasília, p. 778-782.
- [40] ABDEL-GALIL, T.K., EL-SASDANY, E. F., SALAMA, M. M. A. (2002). Power Quality Assessment in Deregulated Power Systems. *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, v.2, p.952-958.
- [41] HAMID, E.Y.; KAWASAKI, Z. I. (2002). *Wavelet*-Based Data Compression of Power System Disturbances Using the Minimum Description Length Criterion. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v.17, n.2, p.460-466, Apr.
- [42] KEZUNOVIC, M. and LIAO, Y. (2002). *A Novel Software Implementation Concept for Power Quality Study*. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 17, 2, 544-549, Apr.
- [43] XIANGXUN, C. (2002). *Wavelet*-Based Detection, Localization, Quantification and Classification of Short Duration Power Quality Disturbances. *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, v.2, p.931-936.
- [44] GAING, Z.L. (2003). Implementation of Power Disturbance Classifier Using *Wavelet*-Based Neural Networks. *IEEE Bologna Power Tech Conference*, Jun.
- [45] SALEH, S.A.; RAHMAN, M. A. (2004). *Wavelet*-Based Dynamic Voltage Restorer for Power Quality Improvement. *IEEE Power Electronics Specialists Conference*.

- [46] SIU, H.K.; NGAN, H.W. (2004). Automatic Power Quality Recognition System using *Wavelet Analysis*. *IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies*, p.311-316, Apr.
- [47] BASU, M; BASU, B. (2004). Application of *Wavelet Transform* for Power Quality (PQ) Disturbance Analysis.
- [48] LIRA, M. M. S. (2004). *Wavelets na Compactação e Processamento de Sinais de Distúrbios em Sistemas de Potência para a Classificação via Redes Neurais Artificiais*. Recife. 117p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco.
- [49] CÉSAR, D. G.; VALDOMIRO, V. G.; GABRIEL, O. P. (2006). Automatic Power Quality Disturbances Detection and Classification Based on Discrete *Wavelet Transform* and Artificial Intelligence. *IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition Latin America*, Venezuela.
- [50] HAAR, A. (1910). Zur Theorie der Orthogonalen Funktionen-Systeme, *Math. Ann*, 69, pp.331-371.
- [51] LIMA, P. C. (2002). *Wavelets: Teoria, Algoritmos e Aplicações*. Belo Horizonte: Departamento de Matemática - ICEX - UFMG.
- [52] DAUBECHIES, I. (1996). *Where Do Wavelets Come From? - A Personal Point of View*. *Proceedings of the IEEE*, 84, 4, 510-513, Apr.
- [53] MORETTIN, P. A. (1999). Ondas e ondaletas: da análise de Fourier à análise de ondaletas. IME-USP - São Paulo, Edusp, 272 p.
- [54] BURRUS, C. S.; GOPINATH, R. A.; GUO, H. (1998). *Introduction to wavelets and wavelet transforms: a primer*. New Jersey, Prentice Hall.
- [55] GROSSMANN, A.; MORLET, J. (1984). Decomposition of hardy functions into squared integrable *wavelets* of constant shape. *SIAM J. Math. Analysis*, v.15, p.723-736.
- [56] SCHMIDT, R.F. (2001). *Rastreamento eficiente de faces em um subespaço wavelet*. São Paulo. 74 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Matemática e Estatística, Universidade de São Paulo.

- [57] PORTNOFF, M. (1980) Time-frequency representation of digital signals and systems based on short-time *Fourier* analysis *Acoustics, Speech, and Signal*, IEEE Transactions on, Volume: 28 Issue: 1, Feb.
- [58] JARAMILLO, S.H.; HEYDT, G.T.; O'NEILL-CARRILLO, E.; MARISCOTTI, A. (2000). Discussion on "Power quality indices for aperiodic voltage and currents" *Power Delivery*, IEEE Transactions on , Volume: 15 Issue: 4 , Oct.
- [59] GABOR, D. (1946). *Theory of Communication*, J. Inst. Electr. Engrg., London, 93 (III), pp. 429-457.
- [60] MISITI, M. et al.(1997). *Wavelet Toolbox: User`s Guide*. Natick, MA.
- [61] GOMES, J., VELHO, L.; GOLDENSTEIN, S. (1997). 21º Colóquio Brasileiro de Matemática - *Wavelets: Teoria, Software e Aplicações*. IMPA Rio de Janeiro, Brasil: Impa, iv-216 p.
- [62] DAUBECHIES, I. (1990). The *wavelet* transform, time-frequency localization and signal analysis. *IEEE Transactions on Information Theory*, v.36, n.5, p.961-1005.
- [63] HAYKIN, S., VEEN, B. V. (2005). *Sinais e Sistemas*. Porto Alegre, Ed. Bookman, 668 p.
- [64] ADDISON, P. S. (2002). *The illustrated Wavelet Transform Handbook: Introductory Theory and Applications in Science, Engineering, Medicine and Finance*. Edinburg-UK: Institute of Physics Publishing.
- [65] WALKER, J. S. (1999). *A Primer on Wavelets and their Scientific Applications*. Chapman and Hall/CRC, New York.
- [66] COIFMAN, R., WICKERHAUSER, M. V. (1992). Entropy – Based Algorithms for Best Basis Selection. *IEEE Trans. on Information Theory*, v. 38, n. 2, p. 713-719, Mar.
- [67] WILLIAMS, J. R., AMARATUNGA, K. (1994). Introduction to *wavelets* in engineering. *Int. J. Num. Meth. Engng*, v.37, p. 2365-2388.

- [68] GUIDO, R. C., (2003). *Spikelet: Uma nova transformada wavelet aplicada ao reconhecimento digital de padrões, em tempo real, de spikes e overlaps em sinais neurofisiológicos do campo visual da mosca*. São Carlos. 132 p. Tese (Doutorado) – Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- [69] ARRUDA, E. F., DELMONT, O. F., COURY, D. V., CARNEIRO, A. A. F. M. (2002). Um Estudo das Famílias *Wavelets* Aplicadas à Qualidade da Energia Elétrica. In: Congresso Brasileiro de Automática, 14. Natal-RN. (CD).
- [70] ZHANG, X., YOSHIKAWA, T. (2001). A new class of complex compact-supported orthonormal symmlets. *IEICE Trans. Fundamentals*, v. E84-A, n.7, p. 1740-1746, Jul.
- [71] DELMONT, O. F., OLESKOVICZ, M., ARRUDA, E. F., SOUZA, S. A., CARNEIRO, A. A. F. M., COURY, D. V. (2004). Técnicas de Localização e Classificação de Distúrbios Relacionados à Qualidade da Energia Utilizando Transformadas *Wavelet*. In: Congresso Brasileiro de Automática, 15. Gramado-RS. (CD).
- [72] HANDBOOK of Power Signatures. (1993) Santa Clara, CA: Basic Measuring Instruments, 2° Ed.
- [73] OLESKOVICZ, M., DELMONT, O. F., ARRUDA, E. F., SOUZA, S. A., COURY, D. V., CARNEIRO, A. A. F. M. (2006). Power Quality Analysis with the Discrete Windowed Fourier Transform and Discrete *Wavelet* Transform. In: International Conference on Harmonics and Quality of Power, 12. Cascais-Portugal. (CD).
- [74] DELMONT, O. F., USIDA, W. F., OLESKOVICZ, M., CARNEIRO, A. A. F. M., COURY, D. V. (2006). Hybrid System Developed to Analyze the Power Quality in Electric Distribution System. In: International Conference on Harmonics and Quality of Power, 12. Cascais-Portugal. (CD).
- [75] COURY, D. V.; SANTOS C. J.; OLESKOVICZ, M. and TAVARES, M. C.; (2002) "Transient Analysis Concerning Capacitor Bank Switching in a Distribution System", *Electric Power Systems Research*. Vol.65, Issue 1, pp 13-21, Oct.

- [76] DELMONT, O. F., OLESKOVICZ, M., SANTOS, C. J., SOUZA, S. A., CARNEIRO, A. A. F. M., COURY, D. V. (2005). Análise de Distúrbios Relacionados à Qualidade da Energia Utilizando a Transformada *Wavelet* – Um Enfoque para as Distorções Harmônicas. In: Congresso Latino Americano de Geração e Transmissão de Energia Elétrica, 6. Mar Del Plata - Argentina, Nov.
- [77] DELMONT, O. F., CORRÊA, F. I. M., OLESKOVICZ, M., CARNEIRO, A. A. F. M. (2006). Método Computacional de Detecção de Distúrbios Elétricos Utilizando a Transformada *Wavelet*. In: Iberian Latin American Congress On Computational Methods In Engineering, 27, Belém-PA (CD).
- [78] DELMONT, O. F., ARRUDA, E. F., OLESKOVICZ, M., CARNEIRO, A. A. F. M., COURY, D. V. (2003). Utilização da Transformada *Wavelet* e RNAs para Caracterização de Distúrbios na Qualidade da Energia Elétrica. In: Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica, 5. v.2, p.381-386, Aracajú-SE.
- [79] DELMONT, O. F., SANTOS, C. J., OLESKOVICZ, M., SOUZA, S. A., CARNEIRO, A. A. F. M., COURY, D. V. (2005). Detecção, Localização e Classificação de Distúrbios em Sistemas Elétricos Através da Transformada *Wavelet*. In: Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica, 6. Belém-PA (CD).
- [80] DELMONT, O. F., PIRES, L. R. S., CORDEIRO, P. R. L., OLESKOVICZ, M., CARNEIRO, A. A. F. M., COURY, D. V. (2006). Um Ambiente Padrão de Comunicação para a Análise da Qualidade da Energia Elétrica Dispondo da Transformada *Wavelet*. In: Conferência Internacional de Aplicações Industriais, 7. Recife-PE.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)