

Odilon Delmont Filho

**UTILIZAÇÃO DA TRANSFORMADA *WAVELET* PARA
CARACTERIZAÇÃO DE DISTÚRBIOS NA
QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA**

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

ORIENTADOR: Prof. Dr. Adriano Alber de França Mendes Carneiro

São Carlos

2003

Dedico esta dissertação de mestrado aos meus pais,

Odilon e Rose e a minha querida irmã Larissa.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a DEUS pela presença constante em minha vida.

À minha mãe, Rose e ao meu pai, Odilon por me oferecerem a oportunidade de estudar, sempre me dando carinho e forças para superar as dificuldades e me incentivando no crescimento pessoal e profissional.

À minha irmã Larissa que sempre me apoiou e me ajudou com suas sábias palavras.

Ao Professor Adriano, pela orientação que me ofereceu neste período não só por motivos profissionais, mas também pessoais. Também por acreditar em meu potencial.

À assistência médica oferecida pela USP, a qual neste período de mestrado foi de grande importância para mim.

Aos amigos, que adquiri neste período, do Departamento de Engenharia Elétrica, principalmente ao pessoal do “LSEE – O Lab.” sem os quais não seria possível a realização deste. Em especial aos amigos Elcio e Donato, pela disposição e ajuda contínua.

Aos meus amigos de Pederneiras que não tiveram participação direta neste trabalho, mas que colaboraram nos momentos de descontração dos fins de semana.

Ao pessoal da minha república, pelos momentos inesquecíveis de descontração. Também para meus amigos e amigas de graduação que mesmo distante sempre me apoiaram.

À Ana, pelo crescimento intelectual e pelos momentos que passamos juntos.

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.

À CCPG/SEL pelos auxílios destinados a participação dos congressos.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pela bolsa de estudos concedida.

RESUMO

DELMONT, O. F. (2003). *Utilização da Transformada Wavelet para Caracterização de Distúrbios na Qualidade da Energia Elétrica*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

Este trabalho apresenta um estudo sobre Transformada *Wavelet* aplicada à Qualidade da Energia Elétrica com o intuito de detectar, localizar e classificar eventuais distúrbios que ocorrem no Sistema Elétrico. Inicialmente é apresentada uma introdução sobre Qualidade da Energia, mostrando fatos, evoluções e explicando o conceito dos principais fenômenos que interferem na Qualidade da Energia do Sistema Elétrico Brasileiro, devido, principalmente, à grande demanda de aparelhos eletrônicos produzidos atualmente. Em seguida é mostrada uma revisão dos principais métodos e modelos aplicados atualmente no mundo a respeito do assunto. A Transformada *Wavelet* vem como uma grande ajuda nesta área de análise de sinais, já que é capaz de extrair simultaneamente informações de tempo e frequência, diferentemente da Transformada de *Fourier*. A simulação dos diversos distúrbios ocorridos no sistema foi realizada através do *software* ATP (*Alternative Transients Program*), cujas características seguem corretamente um sistema de distribuição real da concessionária CPFL. Os distúrbios de tensão gerados e analisados foram detectados e localizados através da técnica de Análise Multiresolução e, posteriormente, classificados, utilizando para isto o método da Curva de Desvio Padrão.

Palavras-chave: Qualidade da Energia, Transformada *Wavelet*, Análise Multiresolução, Distúrbios de Sinais em Redes Elétricas.

ABSTRACT

DELMONT, O. F. (2003). *Use of the Wavelet Transform for the characterization of disturbances in the Power Quality*. M.Sc. Dissertation – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

This dissertation presents a study of Wavelet Transform applied to Power Quality in order to detect, locate and classify disturbances that may occur in the Power System. Initially an introduction of Power Quality is presented, showing facts, evolutions and explaining the concept of the main phenomena that interfere the on Power Quality of the Brazilian Power System, due to, mainly, a great demand for electronic devices produced nowadays. A revision of the main methods and models currently applied in the world regarding this subject is also show. The Wavelet Transform comes as a great support in the area of signal assessment, as it can extract information about time and frequency simultaneously, differently from the Fourier Transform. The simulation of the diverse disturbances occurred in the system was accomplished through ATP software (Alternative Transients Program), whose characteristics correctly follow a system of real distribution of CPFL eletric utility. The generated and analyzed voltage disturbances were detected and located by Multiresolution Analysis technique and later classified by the method of the Standard Deviation.

Palavras-chave: Power Quality, *Wavelet* Transform, Multiresolution Analysis, Disturbances of Signals in Electrical Network.

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1 – Transitório oscilatório proveniente do chaveamento de um banco de capacitores.....</i>	<i>7</i>
<i>Figura 2 – Afundamento de tensão de 30% originado por uma falta fase-terra.....</i>	<i>8</i>
<i>Figura 3 - Afundamento de tensão causado pela partida de um motor.....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 4 – Diagrama fasorial dos tipos de falta que podem ocasionar um afundamento de tensão.....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 5 – Elevação de tensão de 60% originado por uma falta fase-terra.</i>	<i>11</i>
<i>Figura 6 – Interrupção momentânea devido a um curto-circuito.</i>	<i>12</i>
<i>Figura 7 - Potência consumida por uma lâmpada incandescente de 100W para diferentes valores de tensão.</i>	<i>14</i>
<i>Figura 8 – Forma de onda com distorções harmônicas de 3ª e 5ª ordem.</i>	<i>17</i>
<i>Figura 9 – Transformada de Fourier Janelada.</i>	<i>32</i>
<i>Figura 10 – Demonstração do fator de escala em uma função senóide.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 11 – Translação de uma função Wavelet: (a) Função Wavelet $\psi(t)$; (b) Função Wavelet Transladada $\psi(t-k)$.</i>	<i>35</i>
<i>Figura 12 – Cálculo do fator c de relação entre a wavelet mãe e o sinal.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 13 – Translação da Wavelet.</i>	<i>36</i>
<i>Figura 14 – Escalonamento da Wavelet.</i>	<i>36</i>
<i>Figura 15 - Representação da Wavelet de Haar.</i>	<i>38</i>
<i>Figura 16 - Famílias Daubechies.</i>	<i>39</i>
<i>Figura 17 – Famílias Symlets.</i>	<i>41</i>
<i>Figura 18 - Filtragem de um sinal.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 19 - Processo de diminuição do número de amostras do sinal (Downsampling).....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 20 - Exemplo de filtragem com downsampling de um sinal senoidal ruidoso.</i>	<i>43</i>
<i>Figura 21 - Demonstração do processo sucessivo de decomposição de um sinal. ...</i>	<i>44</i>
<i>Figura 22 - Processo de reconstrução de um sinal filtrado.</i>	<i>44</i>
<i>Figura 23 - Processo de aumento do número de amostras para reconstrução de um sinal.....</i>	<i>45</i>

<i>Figura 24 - Processos de decomposição e reconstrução de um sinal.</i>	45
<i>Figura 25 - Processo de reconstrução alimentado com vetor de zeros.</i>	46
<i>Figura 26 - Reconstrução do primeiro nível de detalhe do sinal com inserção do vetor de zeros.</i>	46
<i>Figura 27 - Diferentes formas para se reconstruir o sinal a partir de seus coeficientes.</i>	47
<i>Figura 28 – Diagrama do sistema elétrico de distribuição em análise.</i>	48
<i>Figura 29 – Demonstração do módulo de detecção e localização do distúrbio. Sinal de entrada (a) e Segundo nível de decomposição – D2 (b).</i>	55
<i>Figura 30 – Classificação dos diferentes tipos de distúrbios.</i>	57
<i>Figura 31 – Demonstração do Módulo de Estimação da Duração de um determinado distúrbio.</i>	59
<i>Figura 32 – Demonstração do Módulo de Estimação da Amplitude.</i>	60
<i>Figura 33 – Sinal de tensão em regime permanente.</i>	61
<i>Figura 34 – Decomposição em três níveis de um sinal em regime permanente.</i>	62
<i>Figura 35 – Afundamento de tensão de 46%.</i>	62
<i>Figura 36 – AMR de um afundamento de tensão de 45%.</i>	63
<i>Figura 37 – Elevação de tensão de 30%.</i>	65
<i>Figura 38 – AMR da elevação de tensão de 30%.</i>	65
<i>Figura 39 – Decomposição de uma interrupção momentânea de tensão em 3 níveis.</i>	67
<i>Figura 40 – Transitório Oscilatório provocado por um chaveamento de capacitores.</i>	69
<i>Figura 41 – AMR em 3 níveis de decomposição de um transitório oscilatório.</i>	69
<i>Figura 42 – Forma de onda com distorção ruidosa com amplitude de 1%.</i>	71
<i>Figura 43 – AMR de uma forma de onda com ruídos.</i>	71
<i>Figura 44 – CDP de um afundamento de tensão de 46%.</i>	73
<i>Figura 45 – Classificação de uma elevação de tensão de 30% utilizando a CDP.</i>	74
<i>Figura 46 – CDP de uma interrupção momentânea.</i>	75
<i>Figura 47 – CDP de um transitório oscilatório.</i>	76
<i>Figura 48 – CDP de uma forma de onda com ruídos.</i>	77

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1 - Categorias e características típicas de fenômenos eletromagnéticos nos sistema elétricos.</i>	<i>5</i>
<i>Tabela 2 – Dados dos transformadores particulares.</i>	<i>49</i>
<i>Tabela 3 – Dados dos transformadores de distribuição.....</i>	<i>50</i>
<i>Tabela 4 – Resultado das simulações do sistema para afundamento de tensão.....</i>	<i>52</i>
<i>Tabela 5 - Resultado das simulações do sistema para elevações de tensão.....</i>	<i>53</i>
<i>Tabela 6 - Resultado das simulações do sistema para interrupções de tensão.....</i>	<i>53</i>
<i>Tabela 7 – Resultado das simulações do sistema para transitórios oscilatórios.....</i>	<i>54</i>
<i>Tabela 8 – Determinação da detecção dos distúrbios de afundamento de tensão e seus respectivos erros.....</i>	<i>64</i>
<i>Tabela 9 - Determinação da detecção dos distúrbios de elevação de tensão e seus respectivos erros através do algoritmo confeccionado.</i>	<i>66</i>
<i>Tabela 10 – Dados obtidos da detecção dos distúrbios de interrupção de tensão e seus respectivos erros.....</i>	<i>68</i>
<i>Tabela 11 - Detecção dos distúrbios de transitórios oscilatórios e seus respectivos erros através do algoritmo confeccionado.</i>	<i>70</i>
<i>Tabela 12 - Detecção dos ruídos e seus respectivos erros através do algoritmo confeccionado.</i>	<i>72</i>
<i>Tabela 13 – Análise da duração estimada pelo algoritmo para os casos de afundamento de tensão.....</i>	<i>78</i>
<i>Tabela 14 – Análise da duração estimada pelo algoritmo para os casos de elevação de tensão.</i>	<i>80</i>
<i>Tabela 15 – Análise da duração estimada pelo algoritmo para os casos de interrupção de tensão.....</i>	<i>80</i>
<i>Tabela 16 – Análise da amplitude dos afundamentos de tensão estimada pelo algoritmo.....</i>	<i>82</i>
<i>Tabela 17 – Análise da amplitude das elevações de tensão estimada pelo algoritmo.....</i>	<i>83</i>
<i>Tabela 18 – Análise da amplitude das interrupções de tensão estimada pelo algoritmo.....</i>	<i>83</i>

SUMÁRIO

RESUMO	iv
ABSTRACT	v
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	viii
SUMÁRIO	ix
I. INTRODUÇÃO	1
1. <i>O que é Qualidade da Energia?</i>	2
2. <i>Disposição do Texto</i>	3
II. A QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA	4
1. <i>Transitórios</i>	4
1.1 - <i>Transitórios Impulsivos</i>	6
1.2 - <i>Transitórios Oscilatórios</i>	6
2. <i>Variações de Tensão de Curta Duração</i>	8
2.1 - <i>Afundamento de Tensão</i>	8
2.2 - <i>Elevação de Tensão</i>	11
2.3 - <i>Interrupção</i>	12
3. <i>Variações de Tensão de Longa Duração</i>	13
3.1 - <i>Subtensões Sustentadas</i>	13
3.2 - <i>Sobretensões Sustentadas</i>	14
3.3 - <i>Interrupções Sustentadas</i>	15
4. <i>Distorções da Forma de Onda</i>	16
4.1 - <i>Harmônicos</i>	16
4.2 - <i>Interharmônicos</i>	20
4.3 - <i>Ruídos</i>	20
4.4 - <i>Nível CC</i>	21
5. <i>Flutuações ou Oscilações de Tensão</i>	21
6. <i>Desequilíbrios de Tensão</i>	22
7. <i>Variações na Frequência do Sistema Elétrico</i>	23
III. ESTUDO BIBLIOGRÁFICO DE APLICAÇÕES DE WAVELETS EM QUALIDADE DA ENERGIA.....	24

IV. TRANSFORMADA WAVELET : FUNDAMENTOS BÁSICOS.....	31
1. <i>A Transformada Wavelet Contínua</i>	33
1.1 - <i>Escala.....</i>	34
1.2 - <i>Translação</i>	35
1.3 - <i>Cálculo da Transformada Wavelet Contínua</i>	35
2. <i>A Transformada Wavelet Discreta</i>	36
3. <i>Introdução à Família Wavelet.....</i>	37
3.1 - <i>Wavelet de Haar.....</i>	37
3.2 - <i>Wavelet de Daubechies</i>	38
4. <i>Wavelet Mãe utilizada</i>	40
5. <i>O Processo de Filtragem e Reconstrução Wavelet</i>	42
5.1 - <i>Filtragem.....</i>	42
5.2 - <i>Decomposição em múltiplos níveis</i>	43
5.3 - <i>Reconstrução Wavelet.....</i>	44
5.4 - <i>Filtros de Reconstrução</i>	45
5.5 - <i>Aproximações e detalhes na reconstrução.....</i>	46
V. SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO ESTUDADO	48
1. <i>Distúrbios Obtidos Através das Simulações.....</i>	51
VI. METODOLOGIA APLICADA	55
1. <i>Módulo de Detecção e Localização do Distúrbio</i>	55
2. <i>Módulo de Classificação</i>	56
2.1 - <i>Teorema de Paserval</i>	56
3. <i>Módulo de Estimação da Duração do Distúrbio.....</i>	58
4. <i>Módulo de Estimação da Amplitude do Distúrbio</i>	59
VII. RESULTADOS DA ANÁLISE DOS DISTÚRBIOS.....	61
1. <i>Módulo de Detecção e Localização do Distúrbio</i>	61
1.1 - <i>Afundamento de tensão</i>	62
1.2 - <i>Elevação de Tensão</i>	65
1.3 - <i>Interrupção de Tensão</i>	67
1.4 - <i>Transitórios Oscilatórios</i>	68
1.5 - <i>Ruídos.....</i>	70
2. <i>Módulo de Classificação</i>	72

3.	<i>Módulo de Estimação da Duração do Distúrbio</i>	77
3.1 -	<i>Afundamento de Tensão</i>	77
3.2 -	<i>Elevação de Tensão</i>	79
3.3 -	<i>Interrupção de Tensão</i>	79
4.	<i>Módulo de Estimação da Amplitude do Distúrbio</i>	81
4.1 -	<i>Afundamento de Tensão</i>	81
4.2 -	<i>Elevação de Tensão</i>	81
4.3 -	<i>Interrupção de Tensão</i>	81
VIII.	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	84
IX.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88

I. INTRODUÇÃO

O assunto Qualidade da Energia Elétrica, ou simplesmente Qualidade da Energia (QE) ganhou maior enfoque com a evolução tecnológica das cargas dos consumidores, que se tornaram mais exigentes sob o ponto de vista da continuidade e passaram a depender de um sinal isento de distorções, não esquecendo também das diversas mudanças ocorridas na estrutura do Setor Elétrico Brasileiro.

Assim, prevê-se que será fundamental, daqui para frente um melhor rastreamento da qualidade da energia elétrica tanto em termos de controle de tensão, como do ponto de vista de eliminação de diversos distúrbios que afetam a QE.

O cuidado com a QE é um tema que tem sido discutido e analisado não só no Brasil. Segundo dado do *Electric Power Research Institute – EPRI*, cerca de 91% dos cortes de energia elétrica que ocorrem nos Estados Unidos têm uma duração inferior a 2 segundos, e 85%, duração inferior a 200 milissegundos [1]. A maioria das interrupções são quase imperceptíveis para certos tipos de consumidores, mas são suficientes e responsáveis por causarem grandes danos a consumidores que possuem cargas mais sensíveis a estas interrupções. Como exemplo, uma interrupção de curta duração pode causar danos gravíssimos aos consumidores industriais, como desprogramar toda uma linha de produção com custos elevados para restaurar o sistema.

As chamadas cargas não lineares e as cargas chaveadas eletronicamente geram distorções harmônicas nas formas de onda de corrente e tensão. E essas distorções, quando elevadas, causam sobreaquecimento nas máquinas rotativas, sobrecarga nos bancos de capacitores, mau funcionamento de equipamentos elétricos de controle, proteção e comunicação, distorções das tensões das barras do sistema industrial e da concessionária, e ainda afetam o desempenho dos medidores de energia [2, 3, 4].

É importante levar em consideração para um problema de QE a completa interação entre a geração, a transmissão, a distribuição e as características dos equipamentos do usuário final, o consumidor [5].

Num passado recente, a análise dos sinais que afetam a QE era realizada através da Transformada de *Fourier* (TF), onde um sinal de uma base de tempo era transformado para uma base de frequência. Hoje em dia, uma poderosa ferramenta para análise de sinais pode ser utilizada, a Transformada *Wavelet* (TW). A principal vantagem desta transformada é a possibilidade de obter informações tanto no domínio do tempo como no domínio da frequência. Por isso, foi dedicado um capítulo somente para este assunto – *Wavelet*, onde se introduz uma série de informações que fazem parte de uma boa base teórica para poder discutir os resultados obtidos.

Sabendo-se dos problemas que afetam a QE em um dado sistema, deve-se, portanto, precaver das eventuais conseqüências, que podem afetar seriamente o funcionamento do mesmo. Porém, é muito importante além de conhecer profundamente os fenômenos e seus efeitos, identificar o local da ocorrência do mesmo e o instante de tempo em que ocorreu. Com isso, o intuito deste estudo é estabelecer um plano de prevenção e tomadas de decisões precocemente, a tempo de minimizar ou mesmo eliminar seus efeitos, que certamente causarão danos aos equipamentos, circuitos alimentadores e até às pessoas que o operam.

1. O que é Qualidade da Energia?

Antes que se comece a detalhar o assunto é importante definir o que seria de fato um problema de QE. Entre muitos apontamentos da literatura [7] pode-se definir Qualidade da Energia como qualquer problema manifestado na tensão, corrente ou desvio de frequência, que resulte em falha ou má operação dos equipamentos de consumidores.

No entanto, a QE é monitorada atualmente pelas concessionárias fornecedoras de energia elétrica, através de índices, os quais abrangem somente a qualidade do fornecimento da energia, ou seja, o número de interrupções ocorridas. Os índices mais comuns utilizados pelas concessionárias são: DEC e FEC. O DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Consumidor), exprime o espaço de tempo

em que, em média, cada consumidor do conjunto considerado ficou privado do fornecimento de energia elétrica, e o FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Consumidor) representa o número de interrupções que, em média, cada consumidor do conjunto considerado foi atingido durante um determinado intervalo de tempo.

Uma falha destes índices é que os mesmos não detectam distúrbios que hoje em dia são comumente encontrados nas formas de onda de tensão e corrente. Estes índices e demais definições sobre QE foram fixados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), mais precisamente, na Resolução n.º 024 homologada em janeiro de 2000[6]. Esta resolução estabelece metas a serem cumpridas a cada ano pelas Concessionárias, até o ano de 2005, onde serão reavaliados os indicadores e estabelecidas novas metas.

2. Disposição do Texto

O primeiro capítulo apresenta uma introdução geral do trabalho. Toda teoria referente à QE está contida no capítulo 2. O capítulo 3, referente à revisão bibliográfica, apresenta as publicações mais significativas, principalmente internacionais, para o desenvolvimento do projeto e alguns comentários sobre seus conteúdos. A fundamentação teórica sobre TW é apresentada de forma ampla no capítulo 4. Em seguida, o capítulo 5 mostra o sistema de distribuição simulado e utilizado para a confecção dos distúrbios. O algoritmo de detecção, localização e classificação proposto é devidamente explicado e detalhado no capítulo 6. No capítulo 7 são mostrados os resultados obtidos através do algoritmo construído. O capítulo final refere-se às principais conclusões e trabalhos futuros que possam ser realizados.

II. A QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

A Tabela 1, extraída da referência [7], mostra as categorias dos itens de qualidade e as características típicas dos fenômenos que contribuem para a perda da qualidade de um suprimento elétrico. Tais características mostram o conteúdo espectral, duração típica juntamente com a amplitude típica dos efeitos. No texto a seguir detalha-se cada um dos itens, explicando os fatos geradores, problemas e possíveis medidas a serem tomadas para evitar tais fenômenos.

1. 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. Transitórios podem ser consequência de cargas com operação intermitente, chaveamento de bancos de capacitores, faltas a terra, operação de dispositivos de semicondutores e falhas em condutores. Descargas atmosféricas são um caso especial de transitórios, devido aos níveis extremamente altos de energia e rápido tempo envolvido [8].

A duração de um transitório é pequena, porém de grande importância, uma vez que os equipamentos presentes nos sistemas elétricos estarão submetidos a grandes solicitações de tensão e/ou corrente. Fenômenos transitórios podem ser classificados em dois grupos: os chamados transitórios impulsivos e os oscilatórios, causados por descargas atmosféricas e por chaveamentos respectivamente.

Tabela 1 - Categorias e características típicas de fenômenos eletromagnéticos nos sistemas elétricos.

Categoria	Conteúdo Espectral Típico	Duração Típica	Amplitude de Tensão Típica
1.0 – Transitórios			
1.1 – Impulsivos			
1.1.1 – Nanosegundo	5 ns	< 50 ns	
1.1.2 – Microsegundo	1 µs	50 ns - 1 ms	
1.1.3 – Milisegundo	0,1 ms	> 1 ms	
1.2 – Oscilatórios			
1.2.1 - Baixa Frequência	< 5 kHz	3 - 50 ms	0,4 pu
1.2.2 - Média Frequência	5 – 500 kHz	20 µs	0,4 pu
1.2.3 - Alta Frequência	0,5 - 5 MHz	5 µs	0,4 pu
2.0 - Variações de Tensão de Curta Duração			
Instantânea			
2.1 - Afundamento de tensão		0.5 - 30 ciclos	0,1 – 0,9 pu
2.2 - Elevação de tensão		0.5 - 30 ciclos	1,1 – 1,8 pu
Momentânea			
2.3 – Interrupção		0.5 ciclos -3 s	< 0.1 pu
2.1 - Afundamento de tensão		30 ciclos - 3 s	0,1 – 0,9 pu
2.2 - Elevação de tensão		30 ciclos - 3 s	1,1 – 1,4 pu
Temporária			
2.3 – Interrupção		3 s - 1 minuto	< 0,1 pu
2.1 - Afundamento de tensão		3 s - 1 minuto	0,1 – 0,9 pu
2.2 - Elevação de tensão		3 s - 1 minuto	1,1 – 1,2 pu
3.0 - Variações de Tensão de Longa Duração			
3.1 - Subtensão Sustentada		> 1 minuto	0,8 – 0,9 pu
3.2 - Sobretensão Sustentada		> 1 minuto	1,1 – 1,2 pu
3.3 - Interrupção Sustentada		> 1 minuto	0,0 pu
4.0 - Distorção da Forma de Onda			
4.1 – Harmônicos	0 – 100°	regime permanente	0 – 20%
4.2 – Interharmônicos	0 - 6 kHz	regime permanente	0 – 2%
4.3 – Ruído	Faixa ampla	regime permanente	0 – 1%
4.4 – Nível CC		regime permanente	0 – 0,1%
5.0 - Flutuação de Tensão	< 25 Hz	intermitente	0,1 - 7%
6.0 - Desequilíbrio de Tensão		regime permanente	0,5 - 2%
7.0 – Variação da Frequência do Sistema		< 10 s	

1.1 - Transitórios Impulsivos

Como já mencionado, os transitórios impulsivos são causados por descargas atmosféricas. Sua definição pode ser dada 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.

Em sistemas de distribuição, o caminho mais provável para as descargas atmosféricas é através de um condutor fase, no primário ou no secundário, causando altas sobretensões no sistema. Existem numerosos caminhos através dos quais as correntes de descarga podem penetrar no sistema de aterramento, tais como o terra do primário e secundário dos transformadores e as estruturas do sistema de distribuição. Os principais problemas de QE causados por tais correntes no sistema de aterramento são:

- Elevação do potencial do terra local, em relação a outros terras, em vários kV. Equipamentos eletrônicos sensíveis que são conectados entre duas referências de terra podem falhar quando submetidos a altos níveis de tensão, tal como um computador conectado ao telefone através de um “*modem*”.
- Indução de altas tensões nos condutores fase, quando as correntes passam pelos cabos a caminho do terra.

1.2 - Transitórios Oscilatórios

Estes transitórios são decorrentes de energização de linhas, corte de carga indutiva, eliminação de faltas, chaveamento de bancos de capacitores e transformadores.

Os transitórios oscilatórios de baixa frequência são frequentemente encontrados em sistemas de subtransmissão e distribuição e 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 300Hz e 900Hz, com magnitude máxima de 2,0 pu, sendo valores típicos de 1,3 a 1,5 pu com duração entre 0,5 e 3 ciclos, dependendo das características de amortecimento do sistema. A

Figura 1 ilustra o resultado da simulação de energização de um banco de 600kVAr na tensão de 13,8 kV.

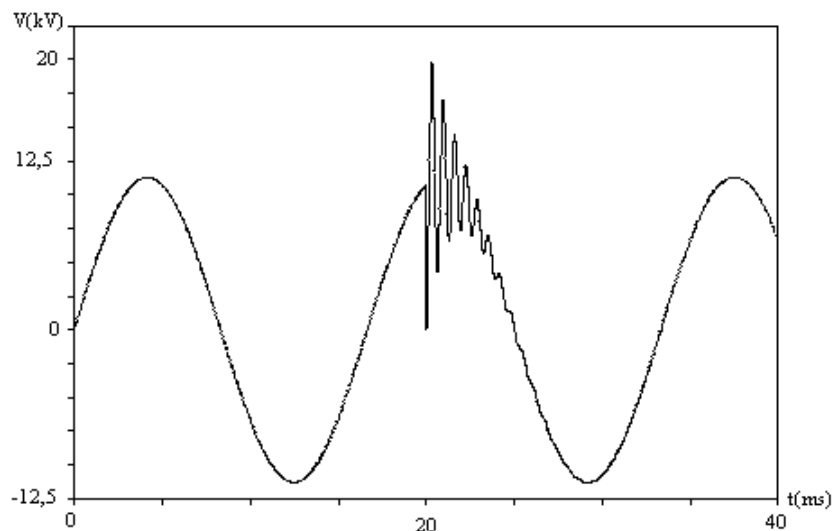


Figura 1 – Transitório oscilatório proveniente do chaveamento de um banco de capacitores.

Transitórios oscilatórios com frequências menores do que 300Hz podem também ser encontrados nos sistemas de distribuição. Estes estão, geralmente, associados aos fenômenos de ferroressonância e energização de transformadores.

Com relação aos transitórios oscilatórios de média-frequência, estes podem ser causados por energização de capacitores, resultando em correntes transitórias de dezenas de kHz, chaveamento de disjuntores para eliminação de faltas e podem também ser o resultado de uma resposta involuntária do sistema a um transitório impulsivo.

Já os transitórios oscilatórios de alta frequência são geralmente o resultado de uma resposta do sistema a um transitório impulsivo. Isto é, podem ser causados por descargas atmosféricas ou por chaveamento de circuitos indutivos. Também, a desenergização de cargas indutivas pode gerar impulsos de alta frequência. Apesar de serem de curta duração, estes transitórios podem interferir na operação de cargas eletrônicas. Filtros de alta-frequência e transformadores isoladores podem ser usados para proteger as cargas contra este tipo de transitório.

2. Variações de Tensão de Curta Duração

As variações de tensão de curta duração apresentam duração típica entre 0,5 ciclo a 1 minuto, e podem ser subdivididas em alterações instantâneas, momentâneas ou temporárias, dependendo da duração do fenômeno, como visto na Tabela 1. 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 sistema elétrico [7].

2.1 - Afundamento de Tensão

Afundamento de tensão, também conhecido como “*sag*”, nada mais é do que, como o próprio nome já diz, uma subtensão de curta duração caracterizada por uma redução no valor eficaz da tensão, entre 0,1 e 0,9 pu, na frequência fundamental, com duração entre 0,5 ciclo e 1 minuto [9]. A Figura 2 mostra um afundamento de tensão típico, resultante de uma falta fase-terra. Observa-se um decréscimo de 30% na tensão por um período de aproximadamente 4 ciclos.

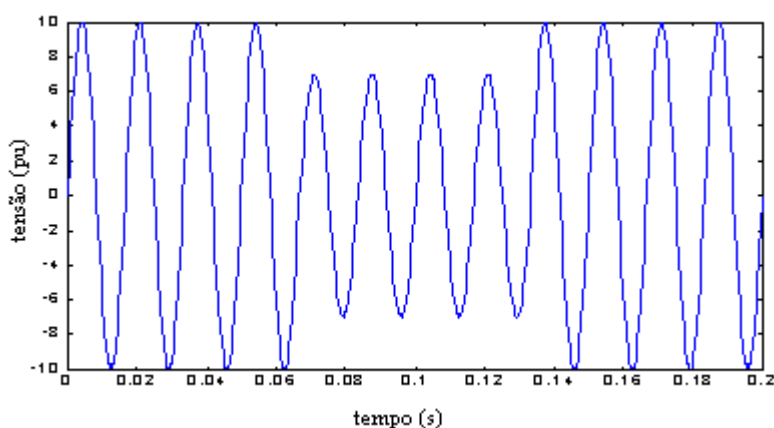


Figura 2 – Afundamento de tensão de 30% originado por uma falta fase-terra.

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 de um transformador [10].

Para ilustrar o afundamento de tensão causado pela partida de um motor de indução tem-se a Figura 3, [7]. Como é conhecido, durante a partida de um motor de indução, este absorve uma corrente de 6 a 10 vezes a corrente nominal, resultando em uma queda significativa na tensão de suprimento. Observa-se que, neste caso, a tensão cai rapidamente para 0,8 pu e, num período de aproximadamente 3 segundos, retorna ao seu valor nominal.

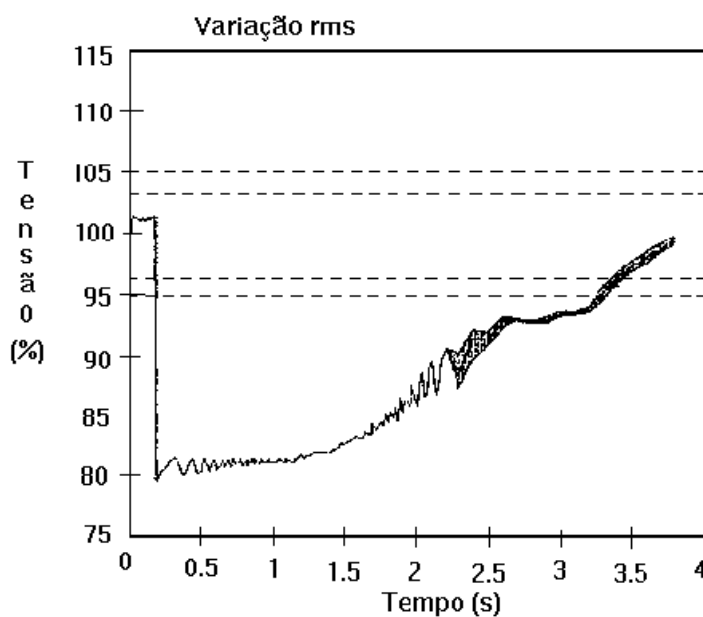


Figura 3 - Afundamento de tensão causado pela partida de um motor.

O principal efeito destes distúrbios é o mal funcionamento dos equipamentos eletrônicos, em especial os computadores, que tem sido alvo de preocupações em órgãos de pesquisa em QE. Entretanto, determinar os níveis de sensibilidade de tais equipamentos torna-se uma tarefa difícil, devido ao grande número de medições necessárias para a coleta de dados, e ainda, as dificuldades de se ter equipamentos de medição em condições reais de campo[9].

Para um sistema onde a tensão em regime permanente é considerada 1 pu, um afundamento de 20% significa uma redução na tensão de 0,2pu, isto é, a tensão resultante é igual a 0,8pu. Afundamentos de tensão com período inferior a 10ms e abaixo de 10% não são levados em consideração. Isto se explica pelo fato de que os distúrbios com período de duração abaixo de 10ms são considerados como transitórios e, quedas de tensão menores que 10% são toleradas pela maioria dos equipamentos elétricos.

Os principais tipos de afundamento de tensão resultantes dos diferentes tipos de faltas estão mostrados nas figuras a seguir, onde o sub-índice N dos fasores indica a tensão pré-falta e o sub-índice F indica a tensão durante a ocorrência da falta[11].

A Figura 4(a) indica que as três tensões por ocasião do afundamento de tensão possuem a mesma amplitude sendo este fenômeno provocado por uma falta do tipo trifásica. A Figura 4(b) é caracterizada por ter apenas uma das tensões com a sua amplitude reduzida e é produzida por uma falta de uma das fases à terra. Na Figura 4(c), duas das tensões possuem suas amplitudes reduzidas, assim como os seus ângulos de fase diferem de 120° , e pode ser produzida ou por uma falta de uma fase para a terra ou por uma falta entre fases. No último caso, mostrado na Figura 4(d), duas fases variam em amplitude e em ângulo, ao passo que a terceira fase varia apenas em módulo, sendo este tipo de fenômeno também provocado por uma falta de uma das fases para a terra ou por um curto bifásico.

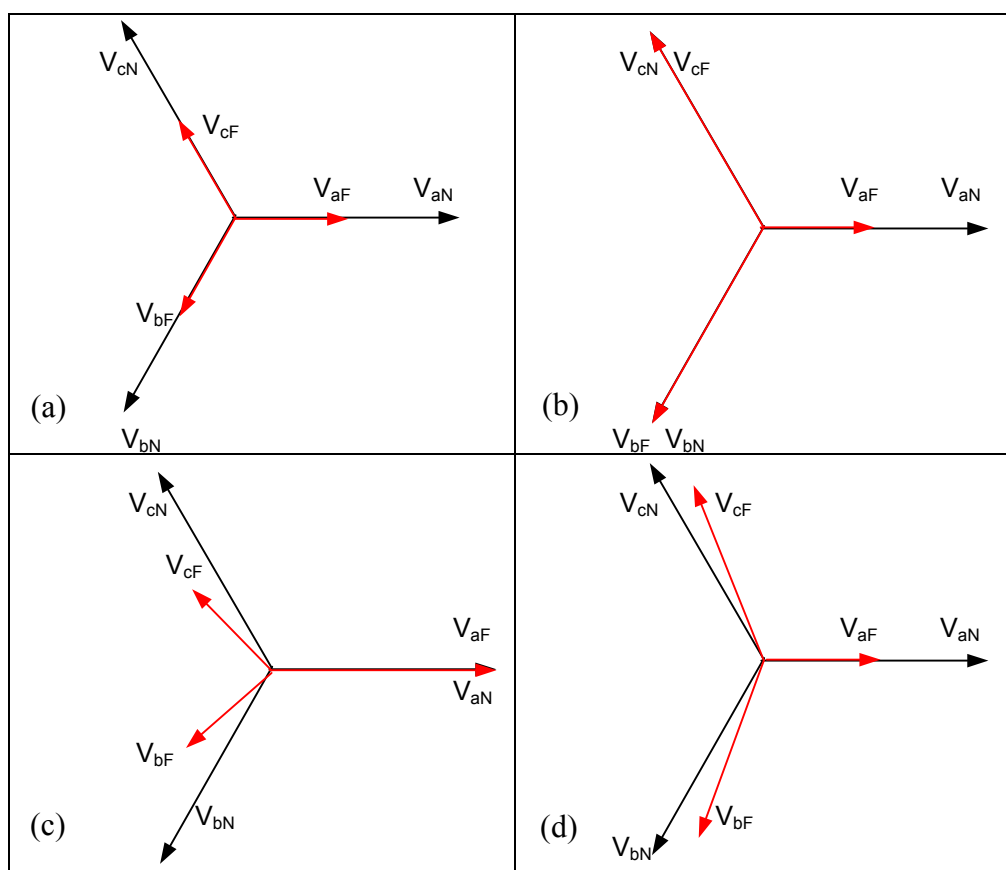


Figura 4 – Diagrama fasorial dos tipos de falta que podem ocasionar um afundamento de tensão.

2.2 - Elevação de Tensão

Elevação de tensão, também conhecido por “*swell*”, é definida como um aumento entre 1,1 e 1,8 pu na tensão eficaz, para uma mesma frequência da rede, com duração entre 0,5 ciclo e 1 minuto [9].

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. A Figura 5 ilustra uma elevação de tensão causada por uma falta fase-terra. Este fenômeno pode também estar associado à saída de grandes blocos de cargas ou a energização de grandes bancos de capacitores, porém com uma incidência pequena se comparada com as sobretensões provenientes de faltas fase-terra nas redes de transmissão e distribuição [7].

No caso da figura, a elevação foi analisada numa fase sã do circuito, sendo comum acontecer nesta fase uma elevação de tensão. Nota-se um acréscimo de 60% na tensão por um período de aproximadamente 4 ciclos.

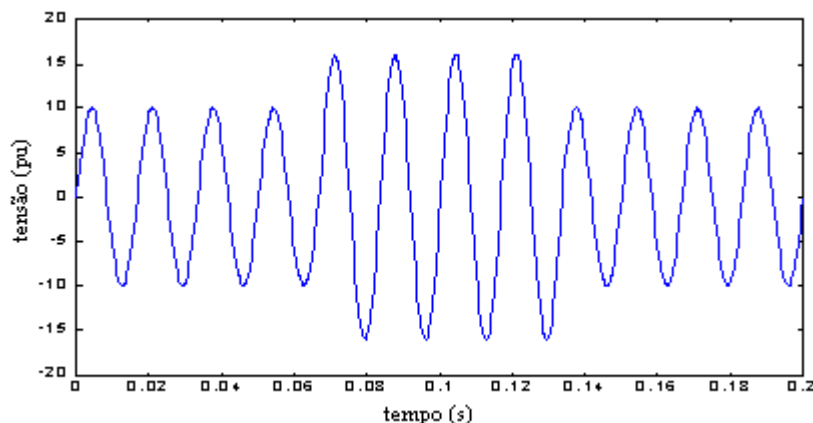


Figura 5 – Elevação de tensão de 60% originado por uma falta fase-terra.

As elevações de tensão são caracterizadas pelas suas magnitudes (valores eficazes) e suas durações. A severidade de uma elevação de tensão durante uma condição de falta é função do local da falta, da impedância do sistema e do aterramento do mesmo. A duração da elevação está intimamente ligada aos ajustes dos dispositivos de proteção, à natureza da falta (permanente ou temporária) e à sua localização na rede elétrica. Em situações de elevação de tensão oriundas de saídas de grandes cargas ou energização de grandes bancos de capacitores, o tempo de

duração das elevações depende da resposta dos dispositivos reguladores de tensão das unidades geradoras, do tempo de resposta dos transformadores de *tap* variável e da atuação de compensadores síncronos que porventura existam no sistema.

As conseqüências de elevações de tensão em aparelhos de iluminação, por exemplo, pode ser o aumento da luminosidade; já em um banco de capacitores pode, freqüentemente, causar sérios danos ao equipamento.

Dentro do exposto, a preocupação principal recai sobre os equipamentos eletrônicos, uma vez que estas elevações podem vir a danificar os componentes internos destes equipamentos, conduzindo-os à má operação, ou em casos extremos, à completa inutilização.

2.3 - Interrupção

Uma interrupção de curta duração ocorre quando a tensão de suprimento decresce para um valor menor que 0,1 pu 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 [7].

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. A Figura 6 mostra uma interrupção momentânea devido a um curto-circuito, sendo precedida por um afundamento de tensão de 80%.

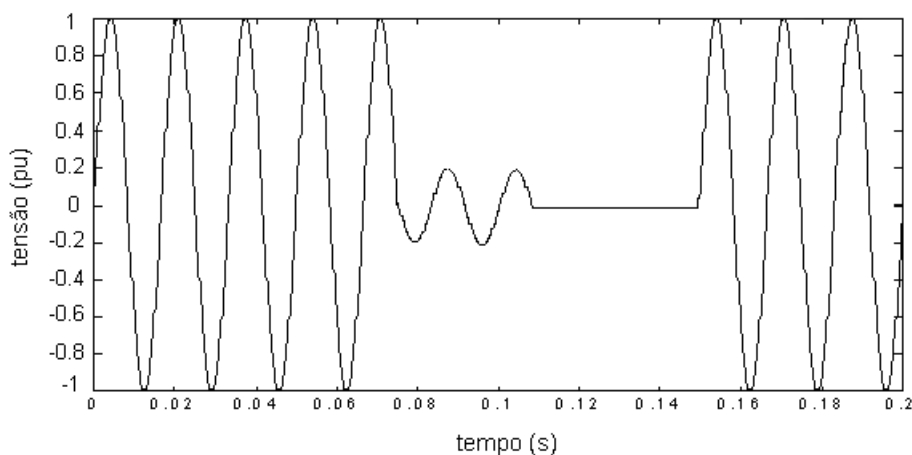


Figura 6 – Interrupção momentânea devido a um curto-circuito.

Alguns dados estatísticos revelam que 75% das faltas em redes aéreas são de natureza temporária. No passado, este percentual não era considerado preocupante. Entretanto, com o crescente emprego de cargas eletrônicas, como inversores e computadores, este número passou a ser relevante nos estudos relacionados ao sistema. Agora são tidos como responsáveis pela saída de operação de diversos equipamentos, interrompendo o processo produtivo e causando enormes prejuízos às indústrias.

3. 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 [7].

Estas variações de tensão podem se dar como subtensões, sobretensões ou interrupções sustentadas. Todas elas são geralmente causadas por variações de carga e operações de chaveamento no sistema, sendo descritas a seguir.

3.1 - Subtensões Sustentadas

Uma subtensão é caracterizada por um decréscimo no valor eficaz da tensão a valores menores que 0,9 pu, na frequência da rede, e com período de duração maior que 1 minuto.

As subtensões são decorrentes, principalmente, do carregamento excessivo de circuitos alimentadores, os quais são submetidos a determinados níveis de corrente que, interagindo com a impedância da rede, dão origem a quedas de tensão acentuadas. Os fatores que contribuem para as subtensões são: a conexão de cargas à rede elétrica, o desligamento de bancos de capacitores e, conseqüentemente, o excesso de reativo transportado pelos circuitos de distribuição, o que limita a capacidade do sistema no fornecimento de potência ativa e ao mesmo tempo eleva a queda de tensão.

Dentre os problemas causados por subtensões de longa duração, destacam-se:

- Redução da potência reativa fornecida por bancos de capacitores ao sistema;

- Possível interrupção da operação de equipamentos eletrônicos, tais como computadores e controladores eletrônicos;
- Redução de índice de iluminação para os circuitos de iluminação incandescente, conforme ilustra a Figura 7;

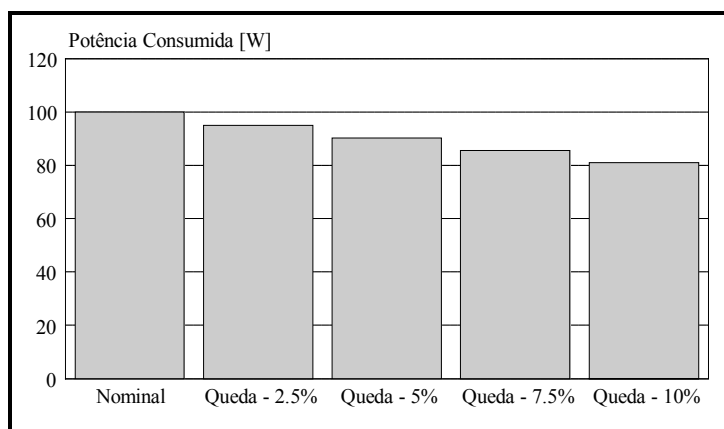


Figura 7 - Potência consumida por uma lâmpada incandescente de 100W para diferentes valores de tensão.

As opções para o melhoramento da regulação de tensão são:

- Instalar reguladores de tensão para elevar o nível da tensão;
- Instalar capacitores “shunt” para reduzir a corrente do circuito;
- Instalar capacitores série para cancelar a queda de tensão indutiva;
- Instalar cabos com bitolas maiores para reduzir a impedância;
- Instalar compensadores estáticos de reativos, os quais tem os mesmos objetivos que os capacitores, para mudanças bruscas de cargas.

Existe uma variedade de dispositivos usados para regulação de tensão. Tais dispositivos são tipicamente divididos em três classes:

- Transformadores de tap variável;
- Dispositivos de isolamento com reguladores de tensão independentes;
- Dispositivos de compensação de impedância, tais como capacitores.

3.2 - Sobretensões Sustentadas

Uma sobretensão é caracterizada por um aumento no valor eficaz da tensão acima de 1,1 pu (valores típicos entre 1,1 e 1,2 pu), na frequência da rede, por um período de duração maior que 1 minuto.

As sobretensões de longa duração podem ser o resultado do desligamento de grandes cargas ou da energização de um banco de capacitores. Transformadores cujos *taps* são conectados erroneamente também podem causar sobretensões.

Com relação às conseqüências das sobretensões de longa duração, estas podem resultar em falha dos equipamentos. Os dispositivos eletrônicos podem sofrer danos durante condições de sobretensões, embora transformadores, cabos, disjuntores, TC's, TP's e máquinas rotativas, geralmente não apresentem falhas imediatas. Entretanto, tais equipamentos, quando submetidos a sobretensões sustentadas, poderão ter as suas vidas úteis reduzidas. Relés de proteção também poderão apresentar falhas de operação durante as sobretensões.

Dentre algumas opções para a solução de tais problemas, destaca-se a troca de bancos de capacitores fixos por bancos automáticos, tanto em sistemas de concessionárias como em sistemas industriais, possibilitando um controle maior do nível da tensão e a instalação de compensadores estáticos de reativos.

3.3 - Interrupções Sustentadas

Interrupção sustentada se define quando a tensão de suprimento permanece em zero por um período de tempo superior a 1 minuto. Interrupções de tensão por um tempo superior a 1 minuto são freqüentemente permanentes e requerem intervenção da concessionária para reparar o sistema e restaurar o fornecimento de energia [7].

As interrupções sustentadas podem ocorrer de forma inesperada ou de forma planejada. A maioria delas ocorre inesperadamente e as principais causas são falhas nos disjuntores, queima de fusíveis e falha de componentes de circuito alimentador. Já as interrupções planejadas são feitas geralmente para executar manutenção da rede, ou seja, serviços como troca de cabos e postes, mudança de tap de transformador e alteração dos ajustes de equipamentos de proteção.

Seja a interrupção de natureza sustentada ou inesperada, o sistema elétrico deve ser projetado e operado de forma a garantir que:

- O número de interrupções seja mínimo;
- Uma interrupção dure o mínimo possível;
- O número de consumidores afetados seja pequeno.

A conseqüência de uma interrupção sustentada é o desligamento dos equipamentos, exceto para aquelas cargas protegidas por sistemas *no-breaks* ou por outras formas de armazenamento de energia. No caso de interrupção sustentada o prejuízo é ainda maior, visto que o tempo de duração da interrupção é muito grande, comparado com o da interrupção de curta duração, retardando a retomada do processo produtivo.

4. Distorções da Forma de Onda

A distorção da forma de onda é definida como um desvio, em regime permanente, da forma de onda puramente senoidal, na freqüência fundamental, e é caracterizada principalmente pelo seu conteúdo espectral [9].

Existem alguns tipos principais de distorções da forma de onda, os quais descreveremos a seguir [7]:

- Harmônicos;
- Interharmônicos;
- Ruídos;
- Nível CC.

4.1 - Harmônicos

Harmônicos são tensões ou correntes senoidais de freqüências múltiplas inteiras da freqüência 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.

A Figura 8 evidencia as deformações na forma de onda por conseqüência de distorções harmônicas de 3ª e 5ª ordem.

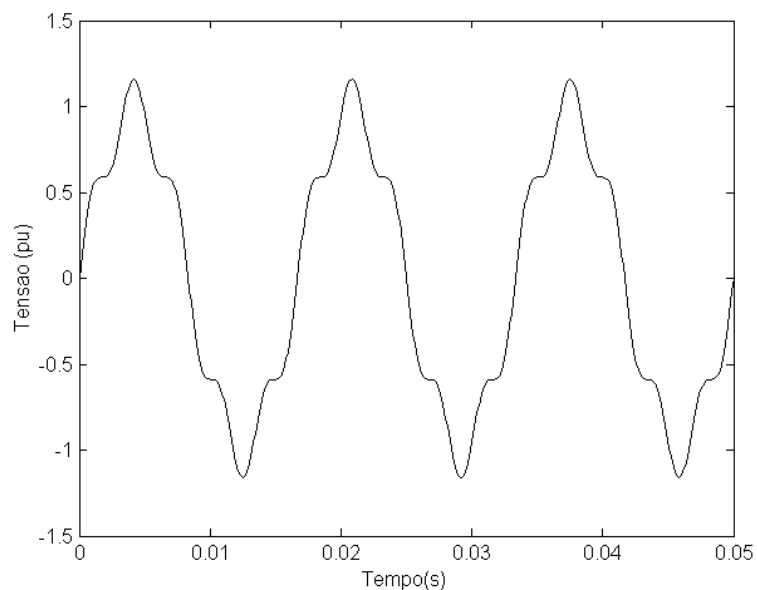


Figura 8 – Forma de onda com distorções harmônicas de 3ª e 5ª ordem.

As distorções harmônicas estão em desacordo com os objetivos da qualidade de suprimento promovido por uma concessionária de energia elétrica, a qual deve fornecer aos seus consumidores uma tensão puramente senoidal, com amplitude e frequência constantes. Entretanto, o fornecimento de energia a determinados consumidores que causam deformações no sistema supridor, prejudicam não apenas o consumidor responsável pelo distúrbio, mas também outros conectados à mesma rede elétrica.

Para fins práticos, geralmente, as componentes harmônicas de ordens elevadas (acima da 25ª a 50ª ordem, dependendo do sistema) são desprezíveis para análises de sistemas de potência. Apesar de poderem causar interferência em dispositivos eletrônicos de baixa potência, elas usualmente não representam perigo aos sistemas de potência[7].

No passado não havia grandes preocupações com harmônicos. Cargas com características não lineares eram pouco utilizadas e os equipamentos eram mais resistentes aos efeitos provocados por harmônicos. Entretanto, nos últimos anos, com o rápido desenvolvimento da eletrônica de potência e a utilização de métodos que buscam o uso mais racional da energia elétrica, o conteúdo harmônico presente nos sistemas tem-se elevado, causando uma série de efeitos indesejáveis em diversos equipamentos ou dispositivos, comprometendo a qualidade e o próprio uso racional

da energia elétrica. O problema é ainda mais agravado pela utilização de equipamentos e cargas mais sensíveis à QE.

Assim, é de grande importância citar aqui os vários tipos de cargas elétricas com características não lineares, denominadas de “Cargas Elétricas Especiais”, que têm sido implantadas em grande quantidade no Sistema Elétrico Brasileiro. Estas, de um modo geral, podem ser classificadas em três grupos básicos, a saber [9]:

- Cargas de conexão direta ao sistema
 - motores de corrente alternada;
 - transformadores alimentadores;
 - circuitos de iluminação com lâmpadas de descarga;
 - fornos a arco;
- Cargas conectadas através de conversores
 - motores de corrente contínua controlados por retificadores;
 - motores de indução controlados por inversores com comutação forçada;
 - processos de eletrólise através de retificadores não-controlados;
 - fornos de indução de alta frequência.
- Reguladores
 - fornos de indução controlados por reatores saturados;
 - cargas de aquecimento controladas por tiristores;
 - reguladores de tensão a núcleo saturado.

Os efeitos causados pelas distorções harmônicas podem ser divididos em três grandes grupos. Nos dois primeiros estariam enquadrados, por exemplo, os problemas de perda da vida útil de transformadores, máquinas rotativas e bancos de capacitores. No terceiro grupo estariam englobadas questões diversas que poderiam se traduzir numa operação errônea ou na falha completa de um equipamento. Nesta categoria estariam incluídos efeitos como: torques oscilatórios nos motores CA, erros nas respostas de equipamentos e aumento ou diminuição do consumo de kWh.

Para ressaltar os efeitos, descreve-se a seguir como as distorções podem alterar a operação de alguns dispositivos encontrados nas redes elétricas:

Cabos

Dentre os efeitos de harmônicos em cabos destacam-se, sobre-aquecimento devido às perdas Joule que são acrescidas e maior solicitação do isolamento devido a possíveis picos de tensão, provocando aquecimento e conseqüentemente uma deterioração do material isolante.

Transformadores

Um transformador, quando submetido a distorções de tensão e corrente, experimentará um sobre-aquecimento causado pelo aumento das perdas Joule, além de intensificar as fugas tradicionalmente manifestadas nos isolamentos.

Este aumento das perdas faz com que a vida útil deste equipamento seja reduzida, uma vez que a degradação do material isolante no interior do transformador ocorrerá de forma mais acentuada.

Motores de Indução

Um motor de indução, operando sob alimentação distorcida, pode apresentar, de forma semelhante ao transformador, um sobre-aquecimento de seus enrolamentos. Este sobre-aquecimento faz com que ocorra uma degradação do material isolante que pode levar a uma condição de curto-circuito por falha do isolamento.

Analisando o desempenho de um motor de indução submetido a tensões harmônicas, verifica-se uma perda de rendimento e qualidade do serviço, devido ao surgimento de torques pulsantes. Estes podem causar uma fadiga do material, ou em casos extremos, para altos valores de torques oscilantes, interrupção do processo produtivo, principalmente em instalações que requerem torques constantes como é o caso de bobinadeiras na indústria de papel-celulose e condutores elétricos.

Bancos de Capacitores

Bancos de capacitores instalados em redes elétricas distorcidas por harmônicos podem originar condições de ressonância, caracterizando uma sobretensão nos terminais das unidades capacitivas.

Em decorrência desta sobretensão, tem-se uma degradação do isolamento das unidades capacitivas, podendo-se ter em casos extremos, uma completa danificação dos capacitores. Além disso, consumidores conectados no mesmo PAC (Ponto de

Acoplamento Comum) ficam submetidos a tensões perigosas, mesmo não sendo portadores de cargas poluidoras em sua instalação, o que estabelece uma condição extremamente prejudicial à operação de diversos equipamentos. Entretanto, mesmo que não seja caracterizada uma condição de ressonância, um capacitor constitui um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas, estando, portanto, constantemente sobrecarregado, sujeito a sobre-aquecimento excessivo, podendo até ocorrer uma atuação da proteção, sobretudo dos relés térmicos.

4.2 - Interharmônicos

Interharmônicos são componentes de frequência, em tensão ou corrente, que não são múltiplos inteiros da frequência fundamental do sistema supridor (50 ou 60Hz). Elas podem aparecer como frequências discretas ou como uma larga faixa espectral.

Os interharmônicos podem ser encontrados em redes de diferentes classes de tensão. As suas principais fontes são conversores estáticos de potência, cicloconversores, motores de indução e equipamentos a arco.

4.3 - Ruídos

Ruído é definido como um sinal elétrico indesejado, contendo uma larga faixa espectral com frequências menores que 200 kHz, as quais são superpostas às tensões ou correntes de fase, ou encontradas em condutores de neutro em linhas de transmissão [9].

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, via de regra, estão relacionados com aterramentos impróprios. Basicamente, os ruídos consistem de uma distorção indesejada no sinal elétrico que não pode ser classificado como distorção harmônica ou transitório.

A faixa de frequência e o nível da amplitude dependem da fonte que produz o ruído e das características do sistema. A amplitude típica é menor que 1% da tensão fundamental, e os mesmos podem causar distúrbios em equipamentos eletrônicos tais como microcomputadores e controladores programáveis. O problema pode ser

minimizado utilizando-se filtros, transformadores isoladores e alguns condicionadores de linha.

4.4 - Nível CC

A presença de tensão ou corrente CC em um sistema elétrico CA é denominado “*DC offset*”. Este fenômeno pode ocorrer como resultado da operação ideal de retificadores de meia-onda [9].

O nível CC em redes de corrente alternada pode levar à saturação de transformadores, resultando em perdas adicionais e redução da vida útil. Pode também causar corrosão eletrolítica dos eletrodos de aterramento e de outros conectores.

5. Flutuações ou Oscilações de Tensão

As flutuações de tensão correspondem a variações sistemáticas dos valores eficazes da tensão de suprimento dentro da faixa compreendida entre 0,95 e 1,05 pu.

Tais flutuações são geralmente causadas por cargas industriais e manifestam-se 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;
- Ferrovias.

Flutuações Esporádicas

A principal fonte causadora destas oscilações é a partida direta de grandes motores.

Os principais efeitos nos sistemas elétricos, resultados das oscilações causadas pelos equipamentos mencionados anteriormente são:

- Oscilações de potência e torque das máquinas elétricas;
- Queda de rendimento dos equipamentos elétricos;
- Interferência nos sistemas de proteção;
- Efeito *flicker* ou cintilação luminosa.

Entretanto, o fenômeno *flicker* consiste no efeito mais comum provocado pelas oscilações de tensão. Este tema merece especial atenção, uma vez que o desconforto visual associado à perceptibilidade do olho humano às variações da intensidade luminosa é, em toda sua extensão, indesejável. A intensidade do efeito *flicker* está associada a amplitude das oscilações e a duração do distúrbio ou ciclo de operação da carga perturbadora.

6. Desequilíbrios de Tensão

Os desequilíbrios de tensão podem ser caracterizados como a relação entre a componente de seqüência negativa pela componente de seqüência positiva dos sinais de correntes ou tensões trifásicas [7].

As origens destes desequilíbrios estão geralmente nos sistemas de distribuição, os quais possuem cargas monofásicas distribuídas inadequadamente, fazendo surgir no circuito tensões de seqüência negativa. Este problema se agrava quando consumidores alimentados de forma trifásica possuem uma má distribuição de carga em seus circuitos internos, impondo correntes desequilibradas no circuito da concessionária. Tensões desequilibradas podem também ser o resultado da queima de fusíveis em uma fase de um banco de capacitores trifásicos.

Tais fatores fazem com que a qualidade no fornecimento de energia, idealizada pela concessionária, seja prejudicada e desta forma alguns consumidores têm em suas alimentações um desequilíbrio de tensão, o qual se manifesta sob três formas distintas: amplitudes diferentes, assimetria nas fases e assimetria conjunta de amplitudes e fases. Destas, apenas a primeira é freqüentemente evidenciada no sistema elétrico.

7. Variações na Freqüência do Sistema Elétrico

Variações na freqüência de um sistema elétrico são definidas como sendo desvios no valor da freqüência fundamental deste sistema. No Brasil a freqüência fundamental é de 60Hz [7].

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 $60 \pm 0,5\text{Hz}$). A amplitude da variação e sua duração dependem das características da carga e da resposta do regulador de velocidade da geração.

Variações de freqüência que ultrapassam os limites para operação normal em regime permanente podem ser causadas por faltas em sistemas de transmissão, saída de um grande bloco de carga ou pela saída de operação de uma grande fonte de geração.

Em sistemas isolados, entretanto, como é o caso da geração própria nas indústrias, na eventualidade de um distúrbio, a magnitude e o tempo de permanência das máquinas operando fora da velocidade, resultam em desvios da freqüência em proporções mais significativas.

III. ESTUDO BIBLIOGRÁFICO DE APLICAÇÕES DE *WAVELETS* EM QUALIDADE DA ENERGIA

Além da revisão bibliográfica realizada em todo o decorrer do trabalho e principalmente no capítulo anterior desta dissertação, mostra-se neste capítulo alguns dos principais artigos e autores na área de QE que utilizam a TW.

Na primeira parte do tutorial, Kim e Aggarwal [12] explicam as vantagens que a Transformada *Wavelet* possui sobre a Transformada de *Fourier* 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 necessário uma periodicidade das funções de 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 eliminar as aplicações de *Fourier* em Sistemas de Potência, mas sim introduzir uma nova metodologia superior à *Fourier*, 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 a teoria da TWD (Transformada *Wavelet* Discreta) com essas *wavelet* mães, no *software* Matlab, em um sinal transitório provocado por um chaveamento de capacitor e verifica a eficácia que se pode obter com a transformada, onde esta, usada adequadamente, é capaz de detectar o distúrbio e quantificar a frequência em cada nível de detalhe, baseado na AMR (Análise Multiresolução).

Na segunda parte do tutorial, [13], tem seqüência a teoria *Wavelet* e a AMR, onde o número de decomposições em *Wavelet* são determinados 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 QE entre eles localização e proteção de faltas em sistema de potência e detecção de distúrbios de QE. Nesta aplicação, as *Wavelet* mães que apresentaram melhores resultados foram as Daubechies de ordem 4 (db4) e de ordem 6 (db6), e também a Symlet de ordem 5, com uma taxa amostral de 3840 Hz.

Em outro trabalho, Gaouda et al.[14] introduziram a TW como uma poderosa ferramenta para a análise de sinais, com isso sendo capaz de detectar e localizar alguns distúrbios que ocorrem no sistema elétrico. A detecção e a localização dos diferentes problemas de QE são feitas através da técnica de AMR em *Wavelet*, utilizando para isso a *Wavelet* mãe db4, técnica esta que decompõe o sinal em diferentes níveis de resolução possibilitando, desta forma, detectar qualquer anormalidade no sinal original por menor que seja, pelos níveis finos de resolução. É proposto também um método de classificação para tais distúrbios, baseado no Teorema de Paserval que depois constrói uma curva de desvio padrão em 12 níveis de decomposição. A técnica de AMR mostrou habilidade para extrair importantes informações do sinal distorcido analisado, com isso podendo classificar corretamente os distúrbios, sem a presença de incertezas ou imperfeições, comprovando a eficácia do método proposto. Assim, esta técnica pode ser usada para impedir futuros problemas de QE.

Chen Xiangxum [15] propõe uma nova metodologia baseada na TW para detectar, localizar, quantificar e classificar importantes distúrbios de curta duração relacionados à QE, tais como afundamento de tensão, elevação de tensão, interrupção momentânea e oscilações transitórias. 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 com este método, que consiste em extrair características únicas dos distúrbios a partir de informações no domínio do tempo ou no domínio da frequência e depois realizar uma conversão de binário para decimal, suficiente para realizar a classificação. Neste artigo utiliza-se uma *wavelet* mãe

biortogonal que foi construída baseada no teorema de Vetterli-Herley-Sweldens, após comprovar que *wavelets* ortogonais complexas com suporte compacto e *wavelets* biortonormais são melhores que as tradicionais reais e complexas que são usadas frequentemente em sistemas de potência. Uma vez que as *wavelet* mães db1 até db45, e várias *wavelets* biortonormais de Daubechies-Cohen-Feauveau, não são adequadas para detectar e localizar afundamentos e elevações de tensão em distorções harmônicas. A classificação é realizada pela construção de um vetor característico com cinco elementos binários, como 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, correto e pode ser expandido para mais distúrbios de QE.

Resende e Penna [16] apresentam uma metodologia que analisa a tensão num barramento e detecta, localiza e classifica possíveis distúrbios da qualidade da energia elétrica ocorridos em tal barramento. Para isso, como os outros artigos antes mencionados, também 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 5 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: Determinar o quadrado dos coeficientes calculados;
- Etapa 3: Calcular a energia concentrada em cada nível de decomposição utilizando o teorema de Parseval;
- Etapa 4: Repetir as 3 etapas anteriores para um sinal senoidal puro;
- Etapa 5: Comparar as 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.

$$dp(j)(\%) = \left[\frac{en_dist(j) - en_ref(j)}{en_ref(7)} \right] * 100 \quad (1)$$

Onde:

- j é o nível da transformada;
- $dp(j)(\%)$ é a diferença percentual entre as distribuições das energias dos sinais com distúrbio e senoidal 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.

Com este método foi possível classificar os diversos distúrbios de qualidade da energia ocorridos no barramento de um sistema, determinando um padrão característico para cada tipo de distúrbio.

Karimi et al. [17] mostraram em seus estudos uma proposta para identificar os distúrbios de tensão e classificar o tipo de evento que resultou no distúrbio de tensão, faltas e chaveamento de capacitor de maneira on-line. A detecção dos distúrbios propostos 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 Máximo Verossimilhança. Os autores apresentaram em [18] uma continuação destes estudos, onde avaliaram a performance experimental do método para um sistema de baixa e média tensão, ou seja, 120V e 12kV respectivamente, classificados pelos autores. Os resultados foram satisfatórios atendendo às expectativas descritas por eles.

Robertson et al. [19] utilizaram a TW como um método para analisar transitórios eletromagnéticos associados com situações de falta e chaveamentos de capacitores. A proposta do novo método utilizando TW é a de capturar e analisar os dados. O sinal analisado, ou sinal de entrada, é característico de uma fase de tensão de uma linha de transmissão trifásica com situações de falta e chaveamento de capacitores, simulado em EMTP, com uma taxa amostral de 10Khz.

Huang et al. [20] propuseram uma técnica que utiliza a TW para a classificação de distúrbios relacionados com a QE. 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 de tensão, elevação de tensão e interrupção momentânea. 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 é capaz de classificar os mesmos em suas diferentes formas.

Em uma próxima versão de seu trabalho, Huang et al. [21] utilizaram a TW como o mais eficiente modelo de monitoramento de diversos distúrbios com tempo variável. Tal método foi testado na detecção de vários distúrbios reais e simulados. Eles comentam algumas diferenças entre a TF e a TW, tais como, se ocorrer um distúrbio impulsivo instantâneo em certo intervalo de tempo, a TF pode contribuir com informações de frequência, porém informações de tempo, como localização são perdidas. No caso da TW, ambas informações de tempo e frequência podem ser obtidas. Os distúrbios analisados foram divididos em dois testes. No primeiro teste foram analisados distúrbios como afundamento e elevação de tensão, interrupção momentânea e transitórios oscilatórios. No segundo teste foram analisadas distorções harmônicas provindas de fornos a arco. Tais distúrbios foram gerados computacionalmente e os resultados obtidos foram satisfatórios e comprovaram mais uma vez a eficiência da TW, tendo como *wavelet* mãe a Morlet.

Santoso et al. [22] procuraram uma nova abordagem para detectar e localizar vários distúrbios relacionados a QE. 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. Neste caso, db4 e db6, devido a seus suportes compactos são melhores na detecção e localização destes distúrbios. Para transitórios lentos, as formas de onda são caracterizadas por mudanças suaves. Segundo os autores, as db4 e db6 não são adequadas para captar tais distúrbios. Com isso as db8 e db10 são usadas, pois o intervalo de integração é longo suficiente para a *Wavelet* captar essas mudanças lentas. Os sinais foram gerados usando códigos computacionais e uma taxa amostral de 2,56KHz. 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 foi a db10, por causa do suporte compacto em relação à db4. Já nas distorções harmônicas, foram adicionadas harmônicas de ordem inferior a 25 e somente de ordem ímpar. Uma onda senoidal, apenas com a frequência fundamental de 60Hz, tem um THD (Distorção Harmônica Total) de 0%, o que seria ideal, encontrando-se nestes testes uma taxa 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.

Angrisani et al. [23] propuseram um método que automaticamente detecta e classifica sinais transitórios. Este método é baseado na *Wavelet Network* (conjunto entre a TW e a Rede Neural Artificial) que combina a habilidade da TW na análise de sinais não-estacionários com a capacidade de classificação das Redes Neurais Artificiais. 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 da performance e aplicação para diferentes transitórios. A atenção do método foi focada em alguns distúrbios transitórios em SEP, em particular, queda de tensão e microinterrupções, transitórios oscilatórios e

impulsivos. Dois tipos de blocos podem ser distinguidos para classificação. No primeiro bloco, bloco A, a WN é capaz de detectar e localizar quedas de tensão ou microinterrupções. A WN deste bloco tem três camadas, a camada de entrada, a camada intermediária e a camada de saída contendo respectivamente 8, 17 e 4 neurônios. O bloco B classifica transitórios oscilatórios e impulsivos e é caracterizado também por três camadas, a camada de entrada, intermediária e de saída, constituída por 4, 9 e 1 neurônio respectivamente.

Santoso et al.(2000)[24] 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 múltiplas redes neurais. Os resultados da rede são integrados usando um método de tomada de decisão, um simples método de votação. Neste trabalho é focada 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 na TW, em seguida passa para a rede neural processar e classificar, logo após tem o bloco de tomada de decisão e, por último, a resposta do tipo de distúrbio que foi dado na entrada e o seu respectivo grau de confiança, que nesta primeira parte do trabalho foi de 85-91%. A segunda parte do trabalho, ou seja a aplicação e implementação de toda a teoria estudada na parte 1, é mostrada em [25] e os resultados comprovaram uma eficiência maior que 90%, com um índice de ambigüidade menor que 10%, entre os seis tipos de distúrbios analisados. Vale lembrar que a taxa amostral utilizada nestes dois artigos foi de 15.375 Hz.

Abdel-Galil et al. [26] propuseram um método automático constituído de dois estágios de reconhecimento de sistemas que é baseado em Monitorar Nós de Distribuição para Qualidade da Energia. No primeiro estágio, os eventos de QE são rastreados, detectados e então classificados. A função do segundo estágio é identificar a causa do distúrbio e sua localização. Sendo capaz de detectar um grande número de distúrbios de QE. As formas de ondas de tensão foram obtidas através de vários pontos especiais de um sistema de distribuição industrial. Para extrair características importantes foi utilizada a *wavelet* mãe db4 e uma taxa amostral de 15.360Hz.

IV. TRANSFORMADA *WAVELET* : FUNDAMENTOS BÁSICOS

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*.

Alguns pesquisadores acham que a utilização da teoria *Wavelet* abre uma nova perspectiva na análise de sinais. Desde a década de 80, a teoria *Wavelet* tem despertado enorme interesse em diversas áreas. A formalização desta teoria foi realizada recentemente, nesta mesma década de 80, com base na generalização de conceitos já conhecidos, originados de vários campos de pesquisa, como análise e compressão de sinais, astronomia, acústica, música, fractais, geofísica, matemática e física, o que tem despertado um grande interesse dos cientistas[27].

O termo “*wavelet*” foi originariamente introduzido por J. Morlet, sendo a base matemática de suas idéias formalizada pelo físico teórico Alex Grossmann. Os dados sísmicos estudados por Morlet exibiam conteúdos de frequência que mudavam rapidamente ao longo do tempo, para os quais a Transformada de *Fourier* (TF) não era adequada como ferramenta de análise[28, 29].

De fato, a TF não permite uma análise local do conteúdo de frequência do sinal. Ou seja, eventos que venham a ocorrer em intervalos de tempos distintos, e mesmo bastante remotos, 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 ($F(u)$)[28, 29],

$$F(u) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i2\pi ut} dt . \quad (2)$$

onde $e^{i2\pi ut}$ é a base da TF.

Por outro lado, a Transformada de *Fourier* Janelada (TFJ), proposta por Dennis Gabor, permite uma análise da freqüência do sinal localmente no tempo (Gabor, 1946 *apud* Misiti, 1997 [30]). 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 9, mapeando o sinal original em uma função bidimensional de tempo e freqüência.



Figura 9 – 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 pode não ser adequada para a análise de determinados sinais, pois sua precisão pode ser limitada. Esta precisão é determinada pelo tamanho da janela, tendo em vista que o tamanho da janela de observação permanece constante para todas as freqüências. Muitos sinais requerem uma maior flexibilidade de aproximação, necessitando-se variar o tamanho da janela para determinar com exatidão o tempo ou a freqüência.

Com isso, Morlet introduziu uma nova transformada, denominada Transformada *Wavelet*, na qual o tamanho da janela é variável, permitindo que eventos de alta freqüência possam ser localizados com uma maior resolução temporal. Intuitivamente, um evento de baixa freqüência precisa de uma janela maior no domínio do tempo para ser observado.

Inicialmente, define-se a Transformada *Wavelet* (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 ψ , 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_{ψ} pode ser finito somente se $\hat{\psi}(0) = 0$, isto é, $\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t)dt = 0$ [29, 31].

Analisando a equação 4 percebe-se que a TW depende de dois parâmetros, a e b , que correspondem, respectivamente, 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 freqüências baixas, a translação é feita com passos maiores[29, 31].

1. A Transformada *Wavelet* Contínua

A TWC, de um sinal dado $f(t)$ em relação a uma *wavelet* mãe ψ é genericamente definida como[12]:

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

onde a é o fator de escala e b é o fator de translação, e ambas 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 corresponde o sinal original $f(t)$ com a *wavelet* mãe. 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, pode-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.

1.1 - Escala

Já mencionou-se o fato da análise *wavelet* produzir uma escala no tempo de um sinal, e agora será abordada uma discussão sobre escala e translação *wavelet*.

Escalar uma *wavelet* significa simplesmente dilatá-la ou comprimí-la. Para ir além de descrições coloquiais tais como “dilatar”, é introduzido o fator de escala, usualmente denotado pela letra a . Por exemplo, o efeito é facilmente observado na Figura 10 através de senóides.

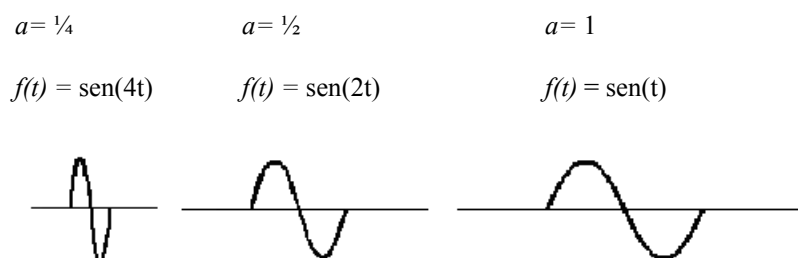


Figura 10 – Demonstração do fator de escala em uma função senóide.

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 .

1.2 - Translação

Transladar uma *wavelet* significa deslocá-la no eixo de tempo, o que se faz matematicamente quando escreve-se $f(x-k)$ como um atraso na função f de um fator k , com k constante, conforme mostrada na Figura 11.

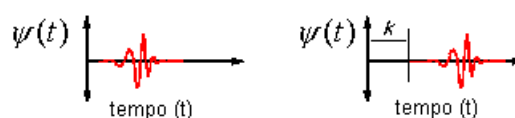


Figura 11 – Translação de uma função Wavelet: (a) Função Wavelet $\psi(t)$; (b) Função Wavelet Transladada $\psi(t-k)$.

1.3 - Cálculo da Transformada Wavelet Contínua

A TWC é a integral em todo o intervalo de definição do sinal multiplicado pelas versões de escala e translação da *wavelet* mãe. Este processo produz coeficientes *wavelet* que são funções da escala e posição. A seguir são mostrados alguns passos para criar a TWC[30]:

- 1) Selecionar um trecho inicial do sinal original e alinhar com uma *wavelet* mãe.
- 2) Calcular o coeficiente C que representa o quão está intimamente relacionada a *wavelet* com o trecho do sinal, onde $C = TWC(a,b)$. Entre os coeficientes calculados os maiores valores de C significam uma maior similaridade do sinal com a *Wavelet*. Note que o resultado vai depender da forma da *wavelet* mãe escolhida, como na Figura 12.

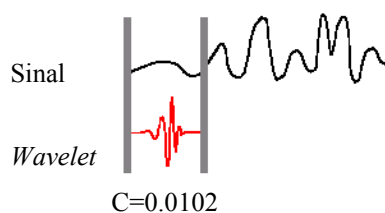


Figura 12 – Cálculo do fator c de relação entre a wavelet mãe e o sinal.

- 3) Transladar a *wavelet* para a direita, como na Figura 13 e repetir os passos 1 e 2 até que você tenha coberto o sinal inteiro.

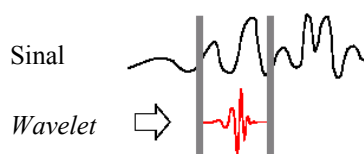


Figura 13 – Translação da Wavelet.

- 4) Dilatar a *wavelet*, Figura 14, e repetir os passos de 1 a 3.

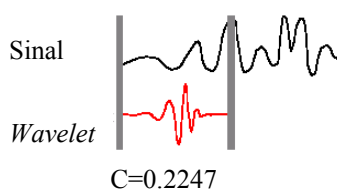


Figura 14 – Escalonamento da Wavelet.

- 5) Repetir os passos de 1 a 4 para todas as escalas.

Quando estiver terminado, obtém-se os coeficientes da TWC produzidos em diferentes escalas, por diferentes trechos do sinal[30].

2. A Transformada *Wavelet* Discreta

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[32]:

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

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 pequenos. Isto é chamado de representação esparsa e é extremamente importante em aplicações para detecção e estimação estatística, compressão de dados, redução de ruídos e algoritmos rápidos[32].

De maneira geral, a TWD também pode ser escrita assim [12]:

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

onde ψ 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. Introdução à Família *Wavelet*

3.1 - *Wavelet* de Haar

A *Wavelet* com os mais simples coeficientes no espaço $L^2(\mathfrak{R})$ 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. A *Wavelet* de Haar [33] é apresentada na Figura 15 com a seguinte função:

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

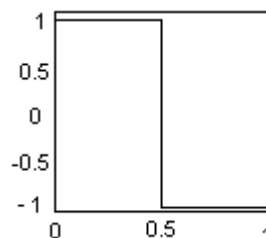


Figura 15 - Representação da Wavelet de Haar.

3.2 - Wavelet de Daubechies

Ingrid Daubechies, uma das mais brilhantes pesquisadoras sobre *wavelet* no mundo, criou o que é chamado “*wavelet* ortonormal com suporte compacto”. Os nomes das *wavelet* da família de Daubechies são escritos por dbN, onde N é a ordem da *wavelet*, e db é o sobrenome da autora da *wavelet* mãe. A *wavelet* db1, é semelhante à de Haar que foi mostrada na Figura 15. Na Figura 16, a seguir, mostram-se alguns modelos de *wavelet* mães da família Daubechies[30]. 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 explícita, à exceção de db1, que é a *wavelet* de Haar. Elas também não são simétricas.

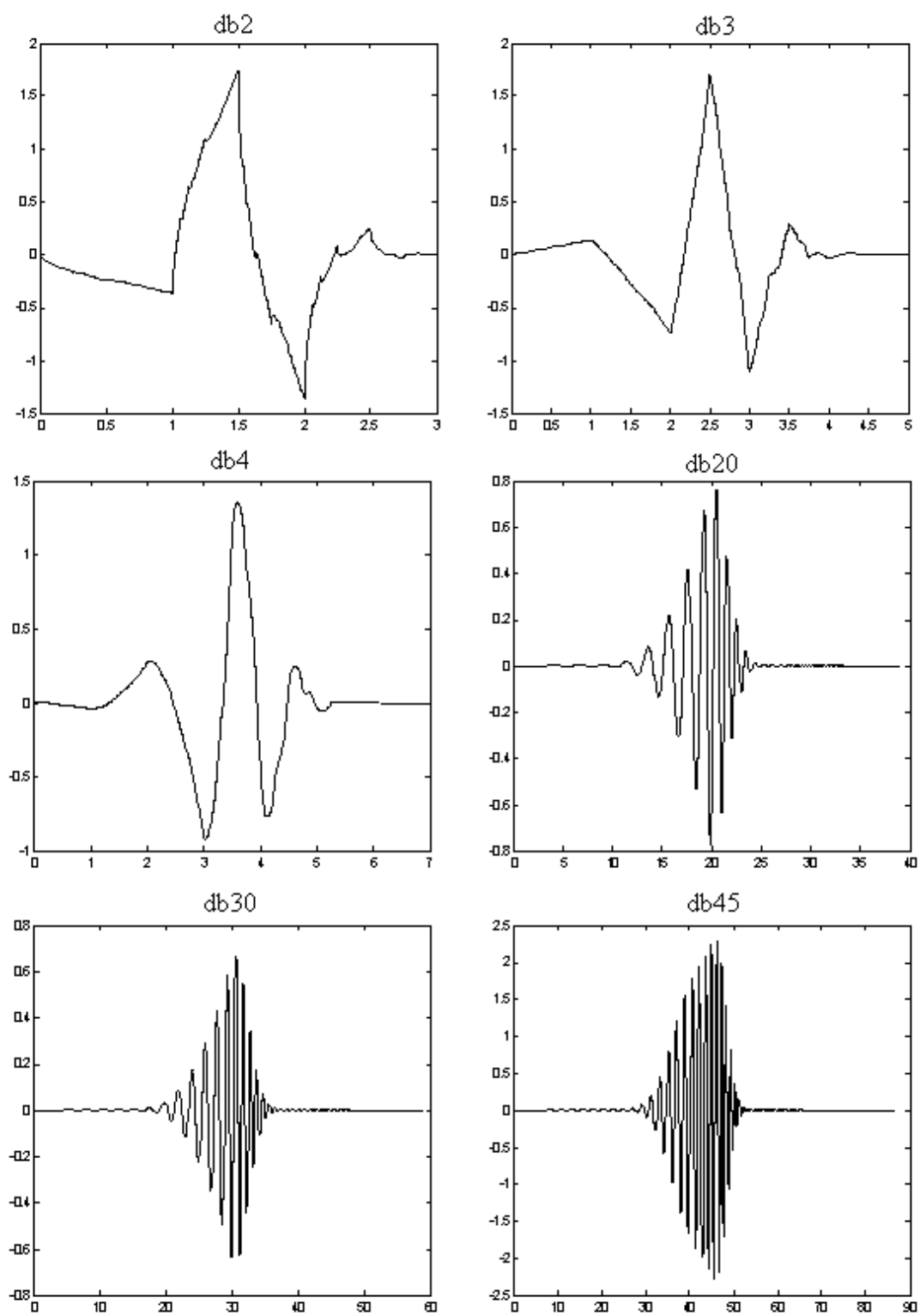


Figura 16 - Famílias Daubechies.

4. *Wavelet Mãe utilizada*

Neste estudo utiliza-se a *wavelet* mãe da família Symlet, a Symlet 4, ou resumidamente a sym4, para verificar suas respostas e analisar sua performance no campo de sistemas de potência. Conforme mostrado em [36], esta *wavelet* mãe é capaz de detectar e localizar os diversos distúrbios de QE mencionados nos capítulos anteriores.

Um outro motivo para escolha desta *wavelet* mãe, de acordo com o mostrado também em [36], é que geralmente *wavelets* mais suaves indicam melhor resolução em frequência que *wavelets* que possuem variações bruscas, ou descontinuidades, como a *wavelet* de Haar, a sym2 ou a db2.

Os modelos de *wavelet* mãe do tipo Symlets são *wavelet* mães aproximadamente simétricas, propostas por Daubechies como modificações à família que ela mesmo criou, as db's. As propriedades das duas famílias de *wavelet* mães são similares.

As *wavelet* mães da família Symlet apresentam-se em vários modelos, variando da sym2 à sym45, como na Figura 17 em que são apresentados alguns destes modelos. Esta família apresenta as seguintes características gerais: as *wavelet* Symlets possuem suporte compacto com menor número de assimetria e maior número de decaimento, para uma largura dada em relação à família daubechies. A sym4 é ortogonal e com ela é possível realizar tanto a decomposição em TWD como em TWC, sendo este mais um motivo a favor de se escolher tal *wavelet* para estes estudos.

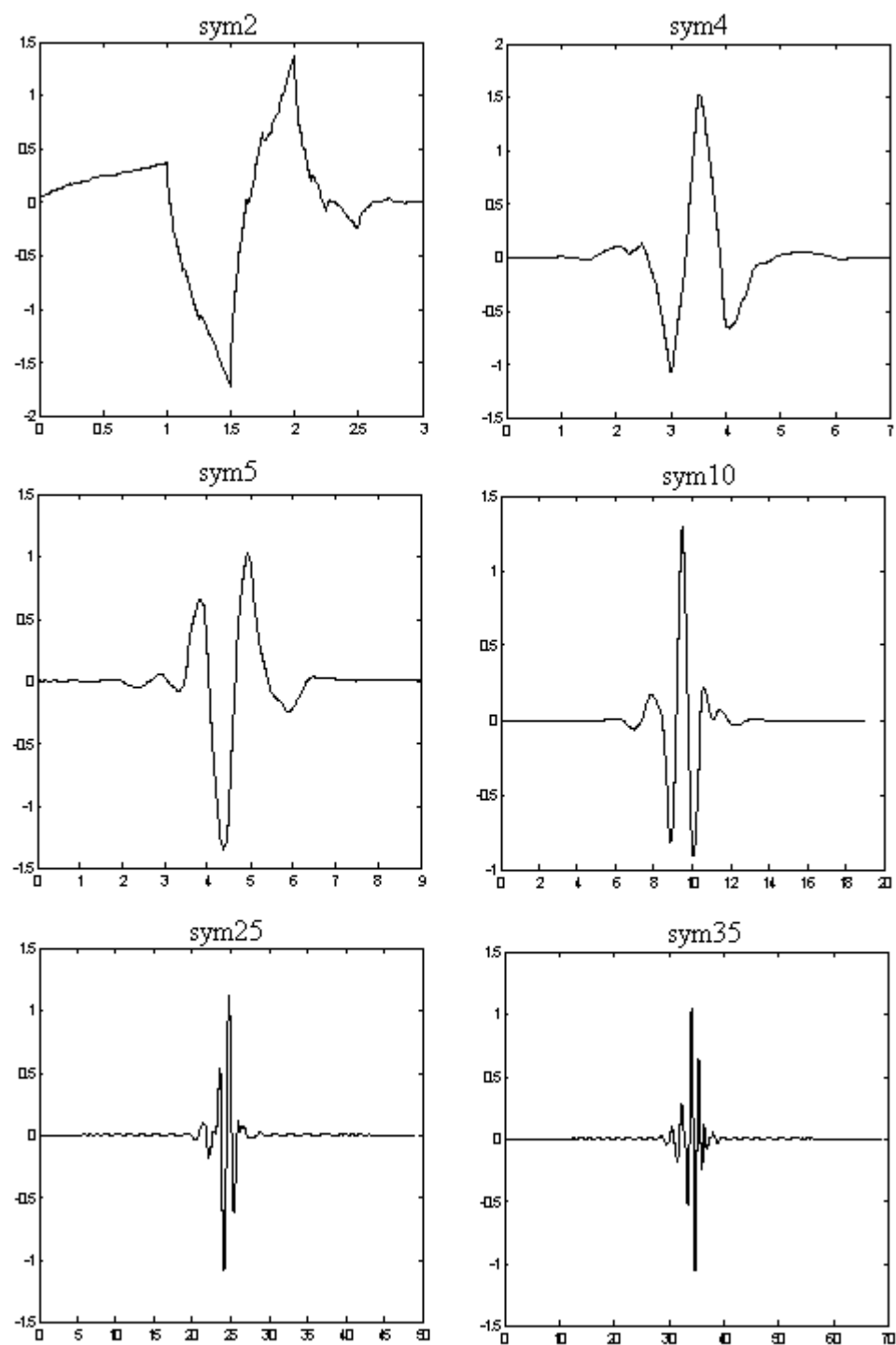


Figura 17 – Famílias Symlets.

5. O Processo de Filtragem e Reconstrução *Wavelet*

5.1 - Filtragem

As componentes dos sinais fornecem características tais como, componentes de baixa frequência fornecem a identidade do sinal e as componentes de alta frequência, por outro lado, fornecem os detalhes do sinal. 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[30]. 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 18:

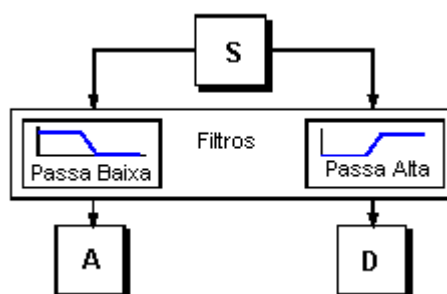


Figura 18 - Filtragem de um sinal.

O sinal S percorre 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.

Com o intuito de corrigir este problema, foi introduzida a diminuição do número de amostras, ou seja, operador “*downsampling*”, ou mesmo, redução da amostra. Isto significa simplesmente considerar dados intercalados, ou seja, levar em conta o primeiro dado (índices ímpares) e rejeitar o segundo (índices pares) e assim

por diante. Com isso é introduzido um fenômeno *aliasing*, ou sobreposição de espectro, na componente do sinal, o que deverá ser levado em conta em tratamentos posteriores. Este fenômeno é um efeito não desejado em tratamento de sinais pois é um tipo de erro, causando descontinuidade no sinal analisado.

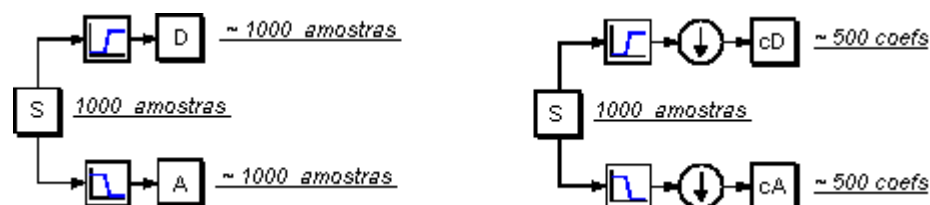


Figura 19 - Processo de diminuição do número de amostras do sinal (Downsampling).

O processo na direita da Figura 19, que inclui diminuição de amostras, produz os coeficientes da TWD. Para obter uma maior apreciação deste processo, é mostrado, em um exemplo, o desenvolvimento da TWD de um sinal. O sinal será uma senóide pura com ruído de alta frequência adicionado a ela.

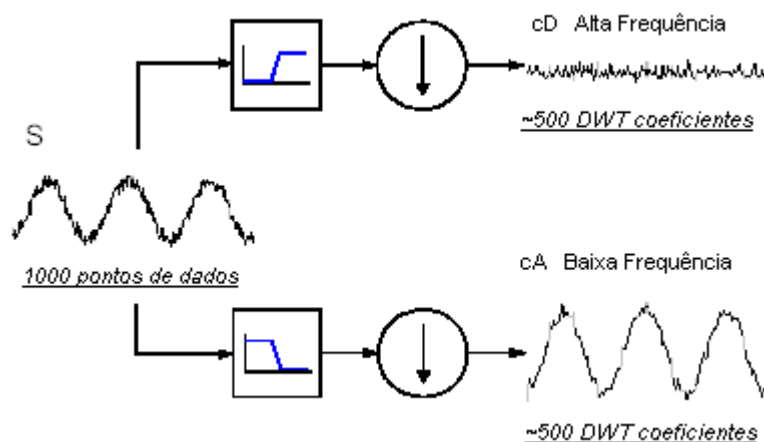


Figura 20 - Exemplo de filtragem com downsampling de um sinal senoidal ruidoso.

Nota-se que o coeficiente de detalhe cD, Figura 20, consiste principalmente do ruído de alta frequência, enquanto que os coeficientes cA contém muito menos ruído que o sinal original.

5.2 - Decomposição em múltiplos níveis

O processo de decomposição pode ser iterativo, com aproximações de decomposição sucessivas, de modo que um sinal é dividido em outras componentes

de resolução menor, como mostrado na Figura 21. Neste estudo, irá se utilizar decomposições em três níveis, e as análises dos dados serão em relação à cD_1 , cD_2 e cD_3 .

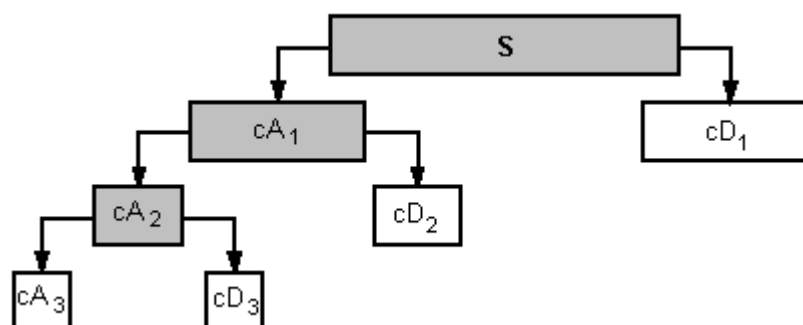


Figura 21 - Demonstração do processo sucessivo de decomposição de um sinal.

Uma vez que o processo é iterativo, na teoria 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.

5.3 - Reconstrução Wavelet

Já foi visto como a TWD pode ser usada para analisar, ou decompor, sinais ou imagens. Uma outra etapa é saber como aquelas componentes podem ser reagrupadas para montar 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 22:

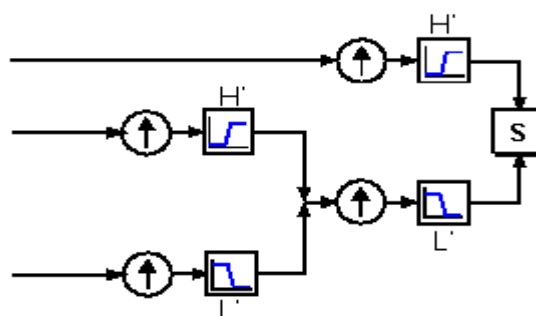


Figura 22 - Processo de reconstrução de um sinal filtrado.

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 aumentar uma componente do sinal pela inserção de zeros entre amostras, o que pode ser visto na Figura 23:

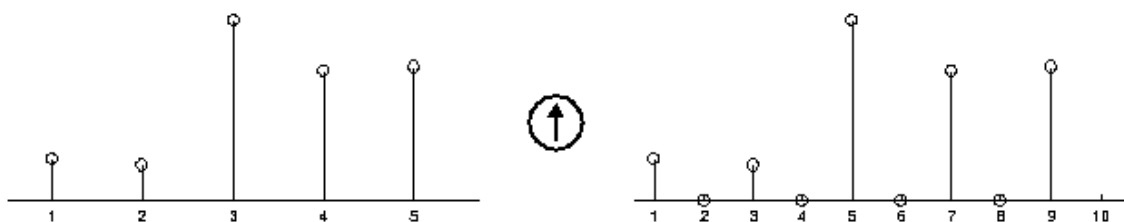


Figura 23 - Processo de aumento do número de amostras para reconstrução de um sinal

5.4 - Filtros de Reconstrução

A parte de filtragem para a reconstrução do sinal também produz 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 introduz neste distorções de *aliasing*. Uma escolha correta do filtro de reconstrução pode cancelar o efeito do *aliasing*. Esta grande descoberta, mostrada na Figura 24, foi feita pelo trabalho de Ingrid Daubechies [30, 31].

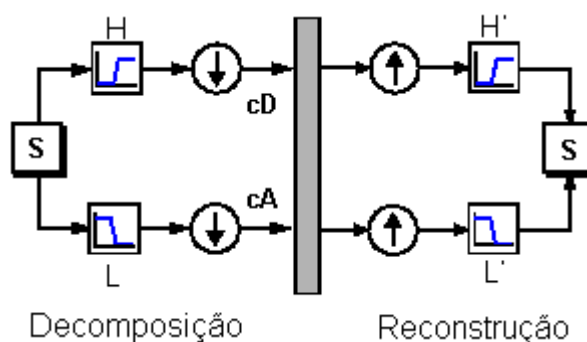


Figura 24 - Processos de decomposição e reconstrução de um sinal.

5.5 - 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 A_1 , do vetor de coeficientes cA_1 .

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 25.

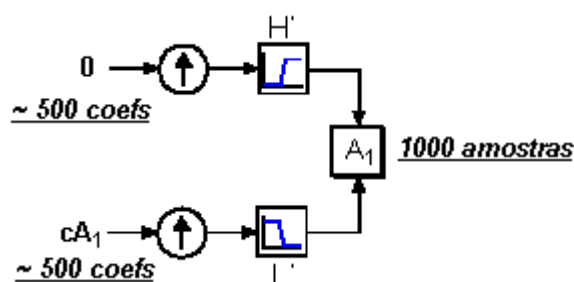


Figura 25 - Processo de reconstrução alimentado com vetor de zeros.

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 o processo análogo, como na Figura 26:

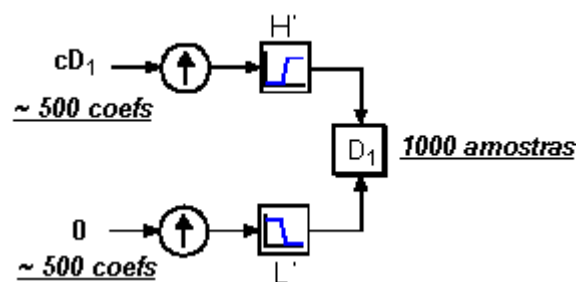


Figura 26 - Reconstrução do primeiro nível de detalhe do sinal com inserção do vetor de zeros.

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 27.

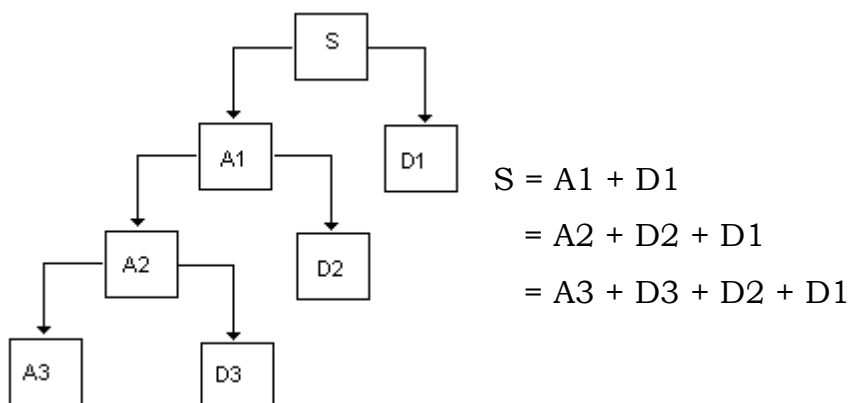


Figura 27 - Diferentes formas para se reconstruir o sinal a partir de seus coeficientes.

V. SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO ESTUDADO

Para a realização deste estudo, de maneira que o mesmo seguisse corretamente as situações reais frequentemente encontradas nas concessionárias de energia elétrica, utilizou-se um sistema que é uma cópia fiel de um sistema de distribuição da concessionária CPFL – Companhia Paulista de Força e Luz. Isto ocorreu com o intuito de realizar um trabalho o mais próximo possível da realidade, uma vez que nesta fase do estudo não estava prevista a realização de uma pesquisa de campo para obtenção de dados reais de concessionárias. Assim, foram usadas simulações computacionais com a utilização de *softwares* específicos na área de SEP, neste caso o *software* ATP – *Alternative Transients Program*, que será citado a seguir.

O sistema de distribuição estudado e simulado através do *software* ATP, é mostrado através do diagrama da Figura 28 [35].

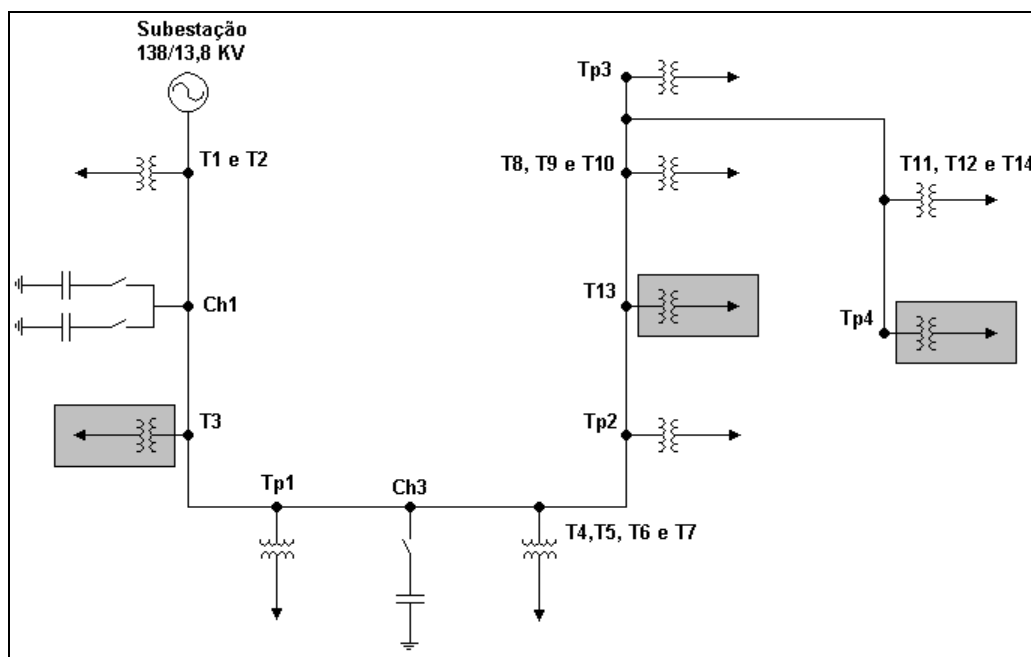


Figura 28 – Diagrama do sistema elétrico de distribuição em análise.

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 nestas simulações foi de 7.680 Hz, assim como a utilizada em [37, 38]. 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.

O transformador da subestação recebe a tensão de 138kV de um sistema de transmissão, passando com isso, a ser um 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 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 capacitor C, para correção do fator de potência. Para dimensionar o capacitor, para correção do fator de potência, as cargas foram consideradas com fator de potência original de 0,75 para posterior correção até os desejados 0,92. As características destes transformadores particulares são mostradas pela Tabela 2 que apresenta as potências e suas respectivas cargas incidentes.

Tabela 2 – Dados dos transformadores particulares.

Transformadores Particulares	Carga Nominal	Carga Incidente
1	2250 kVA (03 trafos)	2500 kVA
2	3000 kVA (04 trafos)	1600 kVA
3	450 kVA (02 trafos)	456 kVA
4	300 kVA (01 trafos)	280 kVA

Os transformadores de distribuição apresentam as características mostradas na Tabela 3 e seus fatores de potência geral são considerados como 0,9538 para se definir a carga RL após o mesmo. Em alguns casos, um grupo de transformadores foi agrupado e representado por apenas um bloco, desta forma representando as cargas equivalentes desses transformadores, cujo ponto de conexão com o sistema está indicado na Figura 28. Deve-se lembrar que todos os transformadores de distribuição

são do tipo delta-estrela aterrado, com resistência de aterramento de zero ohm e *tap* ajustado em 13.200/220 volts.

Tabela 3 – Dados dos transformadores de distribuição.

Transformadores de Distribuição	Carga Nominal	Carga Incidente
1	75 kVA	40 kVA
2	75 kVA	31 kVA
3	45 kVA	32 kVA
4	45 kVA	22 kVA
5	112,5 kVA	19 kVA
6	225 kVA	89 kVA
7	150 kVA	27 kVA
8	150 kVA	29 kVA
9	45 kVA	9 kVA
10	225 kVA	19 kVA
11	30 kVA	26 kVA
12	150 kVA	86 kVA
13	75 kVA	19 kVA
14	75 kVA	7 kVA

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 28. 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 não existem na prática, apenas foram simulados neste sistema para analisar as respostas e também obter dados de transitórios oscilatórios. Vale ressaltar que os três bancos de capacitores nunca estiveram em operação ao mesmo tempo e eles só foram utilizados neste estudo para gerar dados de oscilações transitórias, embora estes bancos tenham funções importantes em um sistema de distribuição. Para a simulação dos dados de transitórios oscilatórios, o banco BC2 se manteve ligado (obtendo-se a condição de regime na presença do banco) e em seguida efetuou-se o chaveamento apenas do

banco BC3 para a obtenção dos dados. Desta forma o BC1 não foi utilizado nesta situação.

O alimentador principal é constituído por um cabo nu, modelo CA-477 MCM, em estrutura aérea convencional com comprimento total de 1.576 metros, e seus trechos são representados por elementos RL mutuamente acoplados. O sistema também possui um alimentador secundário onde estão localizados os transformadores de distribuição 11, 12 e 14 e também o transformador particular 4. Neste alimentador secundário o modelo do cabo é 1/0 AWG, com comprimento de 233 metros.

1. Distúrbios Obtidos Através das Simulações

Após inúmeros testes realizados no *software* ATP com o sistema de distribuição mostrado, obteve-se resultados satisfatórios que serão apresentados no decorrer deste capítulo.

Na Tabela 4 são mostrados os resultados obtidos para o distúrbio de afundamento de tensão com ângulo de incidência de falta de 0° e 90°. Também são mostradas nesta tabela, informações como localização da falta e resistência de falta, sendo estes valores variados com o intuito de atingir valores desejados. Desta forma, as faltas foram aplicadas em quatro diferentes localidades, a saber, Subestação, Transformador de Distribuição 13 e nos Bancos de Capacitores 1 e 3. Já para a resistência de falta, os valores variaram de 0,2 a 9 ohms. Com isso, foram obtidos os valores de amplitude dos afundamentos mostrados na quinta coluna desta mesma tabela, totalizando 32 situações de afundamento de tensão. Nestas simulações, não foram atingidas amplitudes de 90% nos casos de ângulo de inserção a 0° e nem nos casos a 90°, embora estas amplitudes façam parte das definições. Próximo a este valor foram atingidas amplitudes com 92% mas, neste caso, não se tratou de afundamento e sim de interrupção momentânea. Deve ser lembrado que para todos os casos simulados à medição dos valores foi obtida junto a subestação. Segundo a Tabela 1, mostrada no capítulo II desta dissertação, este afundamento de tensão é caracterizado como Afundamento de tensão instantâneo.

Tabela 4 – Resultado das simulações do sistema para afundamento de tensão.

Número de casos	Localização da Falta	Ângulo de Incidência (°)	Resistência de Falta (Ω)	Afundamento Obtido (%)
1	Td13	0 e 90	9	10
2	BC3	0 e 90	6	14
3	BC3	0 e 90	4	20
4	BC3	0 e 90	3	25
5	Td13	0 e 90	2	31
6	Subestação	0 e 90	2	35
7	Td13	0 e 90	1	40
8	Td13	0 e 90	0,5	46
9	BC1	0 e 90	1	50
10	BC1	0 e 90	0,8	55
11	BC1	0 e 90	0,6	60
12	Subestação	0 e 90	0,6	65
13	Subestação	0 e 90	0,5	70
14	Subestação	0 e 90	0,4	75
15	Subestação	0 e 90	0,3	80
16	Subestação	0 e 90	0,2	85

Para os casos de elevações de tensão, a Tabela 5 mostra os resultados obtidos após as simulações. Assim como na tabela anterior, esta tabela mostra os resultados com ângulo de incidência de falta de 0° e 90° . As faltas foram aplicadas na subestação, no transformador particular 4 e no banco de capacitor 1, obtendo-se então os resultados desejados. No caso de elevação de tensão, os valores de resistência de falta variaram de 0,04 a 5 ohms. Com estes valores ajustados foram obtidas as amplitudes de distúrbios mostradas na quinta coluna desta tabela. Embora as amplitudes de 75% e 80% não foram atingidas nestas simulações, estas fazem parte das definições de elevações de tensão. Desta forma foram totalizados 26 casos de elevações de tensão, todos estes casos definidos como elevação de tensão instantânea.

Tabela 5 - Resultado das simulações do sistema para elevações de tensão.

Número de casos	Localização da Falta	Ângulo de Incidência (°)	Resistência de Falta (Ω)	Elevação de Tensão Obtida (%)
1	Subestação	0 e 90	5	10
2	Tp4	0 e 90	3	16
3	Tp4	0 e 90	2	20
4	Tp4	0 e 90	1	26
5	Tp4	0 e 90	0,5	30
6	BC1	0 e 90	1	35
7	BC1	0 e 90	0,7	40
8	BC1	0 e 90	0,5	45
9	Subestação	0 e 90	0,5	50
10	Subestação	0 e 90	0,4	54
11	BC1	0 e 90	0,05	60
12	Subestação	0 e 90	0,1	67
13	Subestação	0 e 90	0,04	69

Com relação às interrupções momentâneas, estas foram adquiridas através de faltas diretamente na subestação como mostrado na Tabela 6. Da mesma forma que nos casos anteriores para afundamento e elevação de tensão, o ângulo de inserção de falta foi de 0° e 90°, com uma resistência de falta variando de 0,01 a 0,10 ohms. Assim foram obtidos os resultados para interrupção de tensão mostrados na quinta coluna desta tabela com amplitude variando de 92 a 99%, 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 são caracterizados como Interrupções Momentâneas.

Tabela 6 - Resultado das simulações do sistema para interrupções de tensão.

Número de casos	Localização da Falta	Ângulo de Incidência (°)	Resistência de Falta (Ω)	Amplitude de Interrupção Obtida (%)
1	Subestação	0 e 90	0,10	92
2	Subestação	0 e 90	0,08	94
3	Subestação	0 e 90	0,05	96
4	Subestação	0 e 90	0,01	99

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 7 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.

Tabela 7 – Resultado das simulações do sistema para transitórios oscilatórios.

Número de Casos	Banco Chaveado	Ângulo de Incidência (°)	Local de Medição
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

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, o qual será mencionado adiante. Esta modelagem foi confeccionada através do *software* Matlab, obtendo 12 casos diferentes de ruídos para submissão da análise.

VI. METODOLOGIA APLICADA

1. Módulo de Detecção e Localização do Distúrbio

Inicialmente, para a detecção do distúrbio, uma janela de meio ciclo percorre o sinal com passos de um quarto de ciclo. Este sinal é o segundo nível de decomposição em AMR. De posse destas informações do segundo nível de decomposição, um limiar é calculado, de acordo com as informações deste próprio nível, para detectar o início de um determinado distúrbio. A Figura 29 mostra este procedimento e o passo da janela. O tamanho da janela pode variar de acordo com a necessidade e também com o tipo de distúrbio utilizado, mas, de um modo geral, esse tamanho de janela e seu respectivo passo se fazem necessários para os casos analisados.

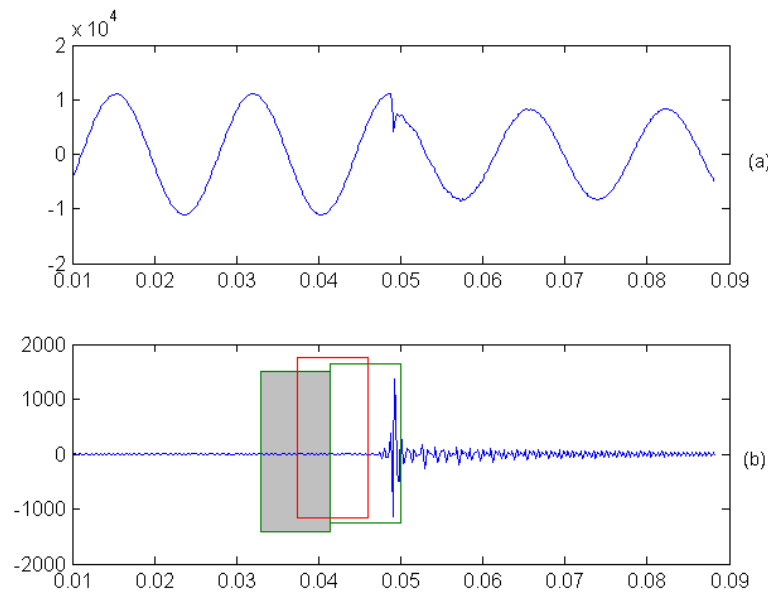


Figura 29 – Demonstração do módulo de detecção e localização do distúrbio. Sinal de entrada (a) e Segundo nível de decomposição – D2 (b).

Seguindo estas etapas, quando o sistema estiver em regime permanente o algoritmo não acusará nenhum tipo de distúrbio, pois as informações do segundo nível de decomposição não ultrapassarão o limiar estipulado.

Quando uma anomalia é encontrada, o algoritmo acusa o momento inicial de tal evento, realizando assim sua detecção e conseqüente localização no tempo. Desta forma, o algoritmo é automaticamente transferido para o próximo passo, que neste caso é o módulo de classificação do distúrbio.

2. Módulo de Classificação

2.1 - Teorema de Parseval

Se as funções escala e *Wavelets* formam bases ortogonais e possuem suporte compacto, existe um teorema de Parseval que relaciona a energia do sinal $f(t)$ com a energia existente em cada componente e seus coeficientes *Wavelets* [32].

Em outras palavras o Teorema de Parseval mostra que a energia contida no sinal distorcido é igual a soma das energias concentradas nos diferentes níveis de resolução de sua Transformada *Wavelet*.

Isto significa que a energia do sinal pode ser particionada em termos de seus coeficientes *wavelets* de expansão, da forma:

$$\sum_{n=1}^N |f(n)|^2 = \sum_{n=1}^N |a_j(n)|^2 + \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N |d_j(n)|^2, \quad (14)$$

onde:

$f(n)$ – representa o sinal distorcido, amostrado no domínio do tempo;

N – corresponde ao número total de amostras do sinal;

$\sum_{n=1}^N |f(n)|^2$ - corresponde à energia do sinal distorcido;

$\sum_{n=1}^N |a_j(n)|^2$ - corresponde à energia concentrada na versão aproximada de

nível ‘j’ do sinal original;

$\sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N |d_j(n)|^2$ - corresponde às energias concentradas nas versões

detalhadas de níveis 1 a 'j' do sinal original.

Com base neste teorema, utilizou-se o método da Curva de Desvio Padrão (CDP) das decomposições em AMR para realizar a classificação dos diversos distúrbios estudados, pois o desvio padrão é considerado como uma medida da energia para um sinal com média zero.

Para a classificação ocorrer de maneira coerente, o número de decomposições utilizados para geração da CDP foi de doze níveis. A classificação propriamente dita é observada na diferenciação entre a curva referente a um determinado distúrbio e a curva referente ao sistema em regime permanente. O desvio padrão é caracterizado pela raiz quadrada da variância [34], conforme mostra a equação 15:

$$dp = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (15)$$

onde dp é o desvio padrão em cada nível de decomposição, x_i são os pontos do vetor de detalhes em cada nível de decomposição e \bar{x} é a média dos pontos em cada nível de decomposição.

A Figura 30 ilustra a classificação dos diferentes tipos de distúrbios baseado na CDP.

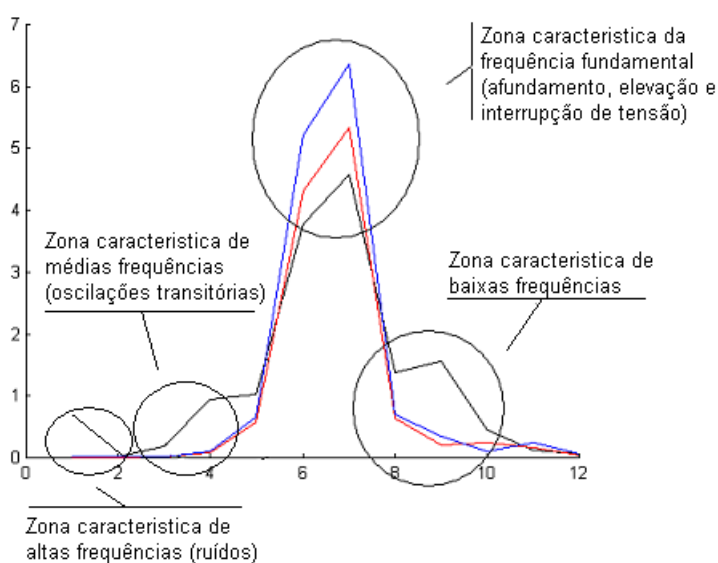


Figura 30 – Classificação dos diferentes tipos de distúrbios.

3. Módulo de Estimação da Duração do Distúrbio

Após realizada a detecção, localização no tempo e classificação do distúrbio, entra em operação o módulo de estimação da duração do distúrbio para os casos de afundamentos de tensão, elevações de tensão e interrupções de tensão. Estes tipos de distúrbios têm como característica um início e um fim, diferentemente dos ruídos que se mantêm constantes e um transitório oscilatório que ocorre rapidamente. Quando ocorre uma anomalia no sinal, uma janela de aproximadamente 10 ciclos é extraída do sinal permitindo, então, a obtenção de informações de início e fim do distúrbio. Lembrando que os distúrbios simulados neste trabalho são inferiores a 10 ciclos, assim, com este tamanho de janela, é possível caracterizar os momentos iniciais e finais dos distúrbios estudados.

Para a estimação da duração dos distúrbios, foram utilizadas as informações do terceiro nível de decomposição (D3) por apresentarem respostas melhores e mais precisas da duração do sinal.

A estimação propriamente dita ocorre da seguinte maneira: após a detecção e localização do início de um determinado distúrbio e sua classificação, este módulo obtém informações do terceiro nível de decomposição e registra os picos máximos desta decomposição. Estes picos caracterizam o início e o fim do distúrbio, como evidenciado na Figura 31, que mostra o terceiro nível de decomposição de um determinado distúrbio.

Com as informações do módulo de detecção e localização sobre o início de um distúrbio, este módulo adquire a informação do instante inicial do distúrbio e constrói uma janela de 64 pontos deste terceiro nível de decomposição. Com esta janela, o algoritmo determina seu valor máximo que é definido como o instante inicial do distúrbio. Após este instante inicial, um intervalo de um ciclo é dado para as devidas respostas de amortecimento do sistema. Em seguida, um novo limiar é determinado, que neste caso foi igual a média de todo o sinal do terceiro nível de decomposição. Assim que o sinal ultrapassa este limiar, uma nova janela, agora de apenas 3 pontos, é obtida e desta nova janela novamente é extraído seu valor máximo, sendo este valor tomado como o valor final do distúrbio.

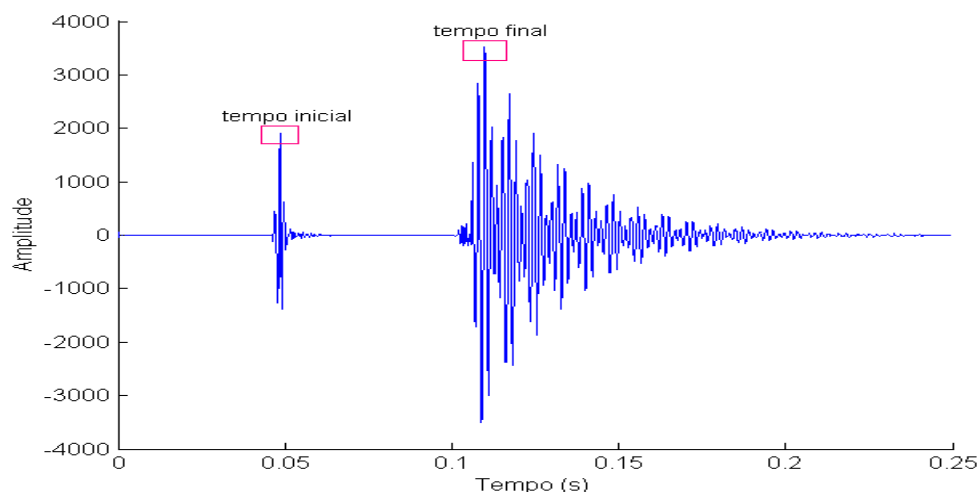


Figura 31 – Demonstração do Módulo de Estimação da Duração de um determinado distúrbio.

4. Módulo de Estimação da Amplitude do Distúrbio

O funcionamento deste módulo é simples e baseado no módulo de detecção e localização, porém somente utilizado para distúrbios como afundamentos, elevações e interrupções de tensão, assim como no módulo anterior de estimação da duração de distúrbios.

Após a detecção do distúrbio, este módulo retém informações do ciclo anterior ao distúrbio do próprio sinal de entrada, obtendo informações do sistema em regime permanente. Estas informações são úteis basicamente para determinar o valor máximo do sinal em regime permanente. A outra etapa deste módulo, é caracterizada pela retenção de informações do ciclo posterior ao distúrbio, possibilitando saber quão grave foi o distúrbio, seja ele afundamento, elevação ou mesmo interrupção de tensão. Isto pode ser melhor visualizado através da Figura 32.

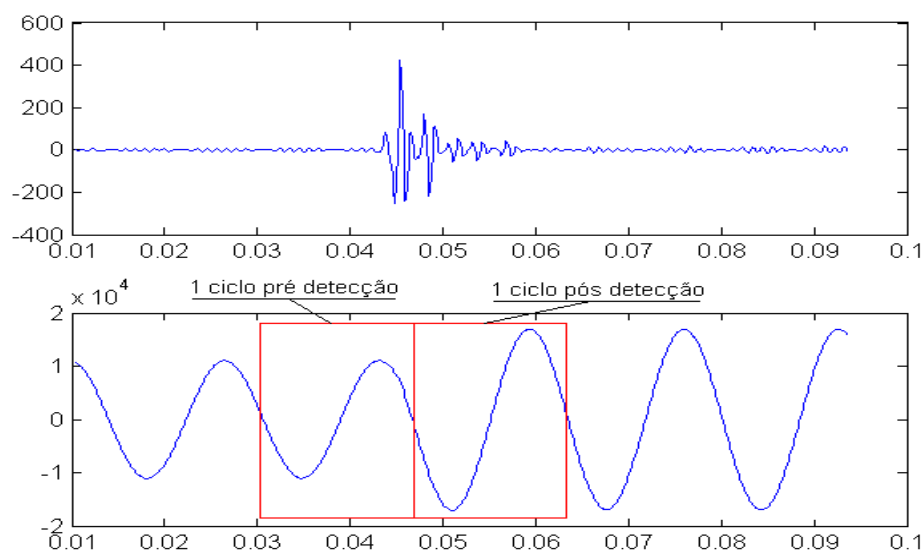


Figura 32 – Demonstração do Módulo de Estimação da Amplitude.

Com estas informações de pré e pós detecção do distúrbio, o algoritmo obtém os valores de máximos destas janelas e em seguida calcula a amplitude do distúrbio através da seguinte formula:

$$Amplitude_do_sinal = \left(\frac{Sinal_com_distúrbio}{Sinal_em_regime} \right) \times 100\% . \quad (16)$$

VII. RESULTADOS DA ANÁLISE DOS DISTÚRBIOS

1. Módulo de Detecção e Localização do Distúrbio

Inicialmente é necessário apresentar o sistema em regime permanente para analisar as respostas que serão apresentadas e depois compará-las com os sinais com distúrbios. Na Figura 33 é apresentado um sistema em regime permanente.

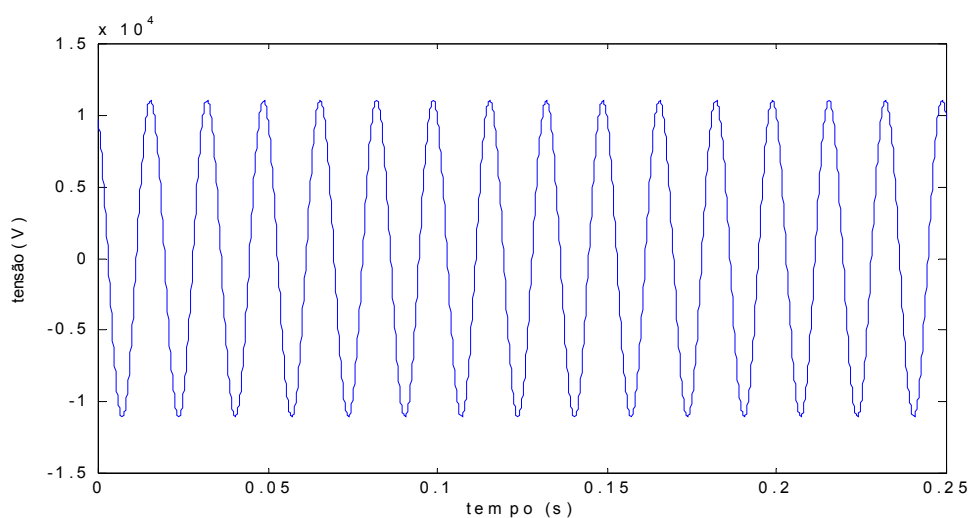


Figura 33 – Sinal de tensão em regime permanente.

Na Figura 34 apresenta-se a Análise Multiresolução (AMR) do sinal em regime permanente. São mostrados nesta figura três níveis de decomposição e nota-se que o sinal permanece constante durante toda a janela amostrada, comprovando que o sinal está em regime permanente, sem nenhum tipo de alteração ou distúrbio. São mostrados apenas três níveis de decomposição pois nesta etapa apenas estes mesmos três níveis serão utilizados. O segundo nível de decomposição é usado para detectar e localizar algum distúrbio e o terceiro nível de decomposição é utilizado no

módulo de estimação da duração do distúrbio. Se na AMR mostrada na Figura 34 estivesse presente algum tipo de distúrbio, nestas mesmas janelas apareceriam alterações que permitiriam diagnosticar que tipo de distúrbio conteria o sinal de entrada. Esta metodologia é aplicada no decorrer deste capítulo, com os distúrbios simulados.

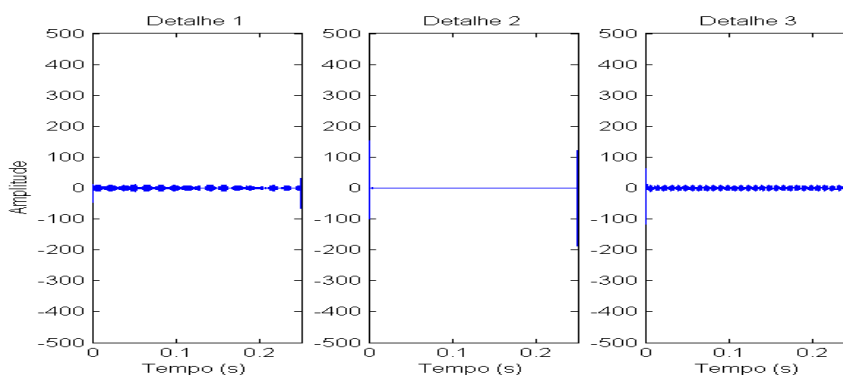


Figura 34 – Decomposição em três níveis de um sinal em regime permanente.

1.1 - Afundamento de tensão

A ocorrência de uma falta no transformador de distribuição 13, com uma resistência de falta de 0,5 ohm e um ângulo de incidência de falta de 0° , acarretou um afundamento de tensão de 46%, como mostrado na Figura 35.

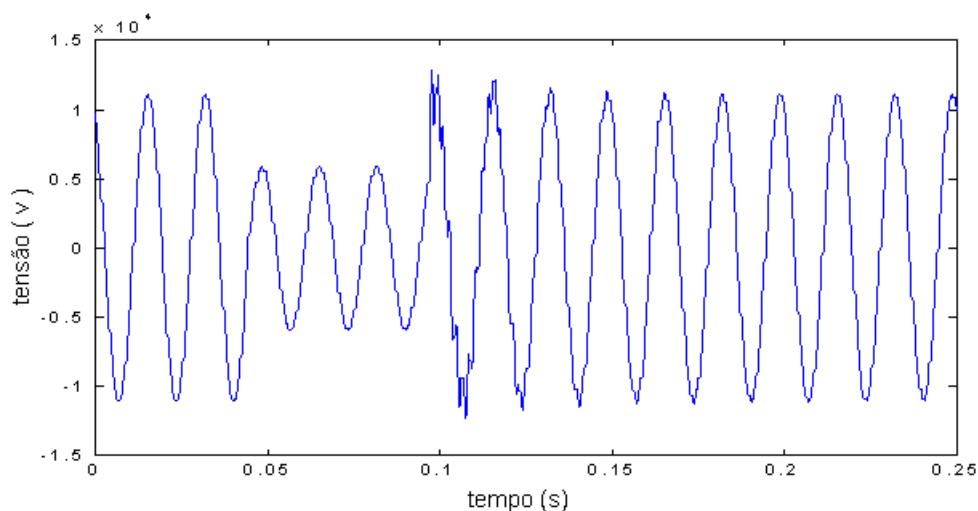


Figura 35 – Afundamento de tensão de 46%.

Na Figura 36 é mostrada a decomposição do sinal com afundamento de tensão em Análise Multiresolução (AMR). Nesta análise, em 3 níveis de decomposições, foi possível perceber que o algoritmo apresentou variações na janela amostrada. Tais variações são responsáveis pelo início e o fim do afundamento de tensão. Através destes dados pode-se afirmar que o algoritmo proposto utilizando a TW foi capaz de detectar as anomalias no sinal de tensão inicial e o momento em que o sistema voltou ao regime permanente. Com isso, foi possível obter informações tais como início e duração do evento, ou seja, detectando e localizando o distúrbio de QE.

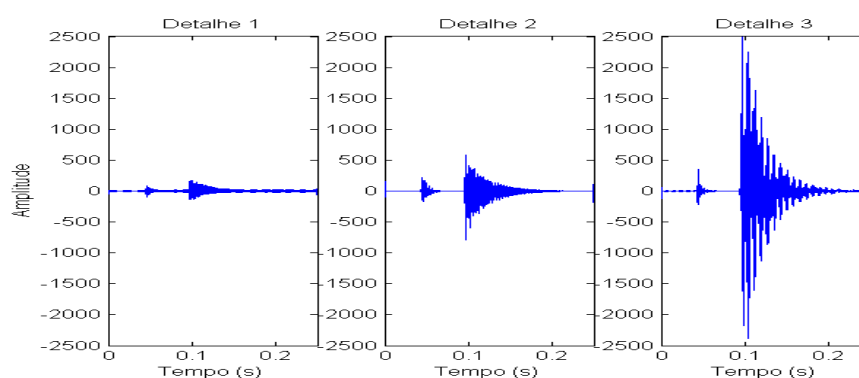


Figura 36 – AMR de um afundamento de tensão de 45%.

A Tabela 8 evidencia a detecção dos distúrbios e o início dos mesmos, ou seja, sua localização. Os distúrbios simulados tiveram seu início em 0,0445s para os casos com ângulo de inserção de falta de 0° e 0,0485s para os casos com ângulo de inserção de falta de 90° . Porém a detecção de cada distúrbio através do algoritmo proposto é mostrada na quinta coluna desta mesma tabela. O erro médio encontrado neste módulo foi de apenas 0,76 %.

Tabela 8 – Determinação da detecção dos distúrbios de afundamento de tensão e seus respectivos erros.

Distúrbios	Amplitude do Afundamento (%)	Ângulo de Inserção (°)	Início do Distúrbio (s)	Localização do Distúrbio (s)	Erro Encontrado (%)
1	10	0	0,0445	0,0446	0,22
2	14	0	0,0445	0,0446	0,22
3	20	0	0,0445	0,0446	0,22
4	25	0	0,0445	0,0446	0,22
5	31	0	0,0445	0,0446	0,22
6	35	0	0,0445	0,0443	0,45
7	40	0	0,0445	0,0446	0,22
8	46	0	0,0445	0,0446	0,22
9	50	0	0,0445	0,0456	2,47
10	55	0	0,0445	0,0456	2,47
11	60	0	0,0445	0,0456	2,47
12	65	0	0,0445	0,0443	0,45
13	70	0	0,0445	0,0443	0,45
14	75	0	0,0445	0,0443	0,45
15	80	0	0,0445	0,0443	0,45
16	85	0	0,0445	0,0443	0,45
17	10	90	0,0485	0,0498	2,68
18	14	90	0,0485	0,0488	0,62
19	20	90	0,0485	0,0493	1,65
20	25	90	0,0485	0,0493	1,65
21	31	90	0,0485	0,0498	2,68
22	35	90	0,0485	0,0485	0
23	40	90	0,0485	0,0498	2,68
24	46	90	0,0485	0,0493	1,65
25	50	90	0,0485	0,0485	0
26	55	90	0,0485	0,0485	0
27	60	90	0,0485	0,0485	0
28	65	90	0,0485	0,0485	0
29	70	90	0,0485	0,0485	0
30	75	90	0,0485	0,0485	0
31	80	90	0,0485	0,0485	0
32	85	90	0,0485	0,0485	0

1.2 - Elevação de Tensão

O caso de elevação de tensão é ilustrado através da Figura 37, com uma elevação que resultou numa amplitude de 30%, causada por uma falta fase-terra no transformador particular 4 a uma distância de 1.809 metros da subestação. A resistência de falta aplicada neste caso foi de 0,5 ohm e o ângulo de incidência da falta foi de 0° .

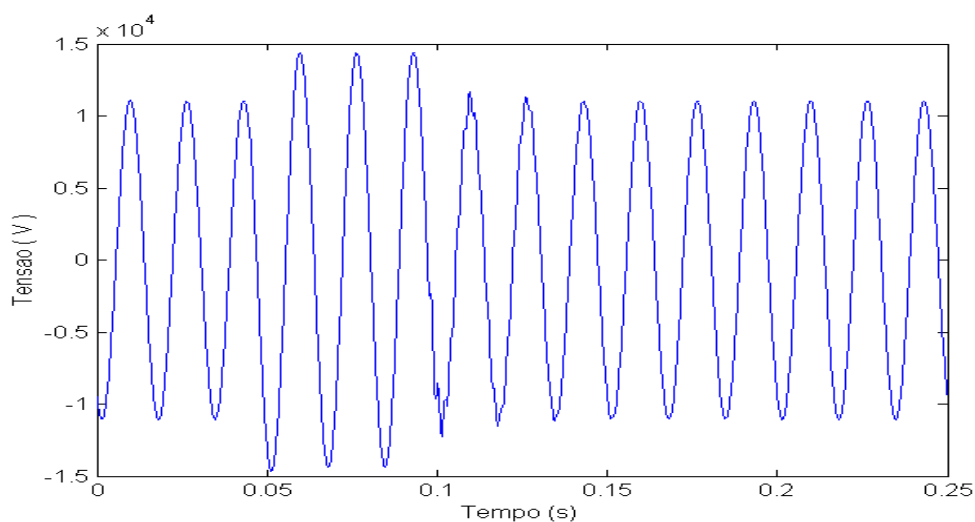


Figura 37 – Elevação de tensão de 30%.

Na Figura 38 é mostrada a decomposição em 3 níveis em que foi possível obter informações sobre detecção e localização deste fenômeno de elevação de tensão.

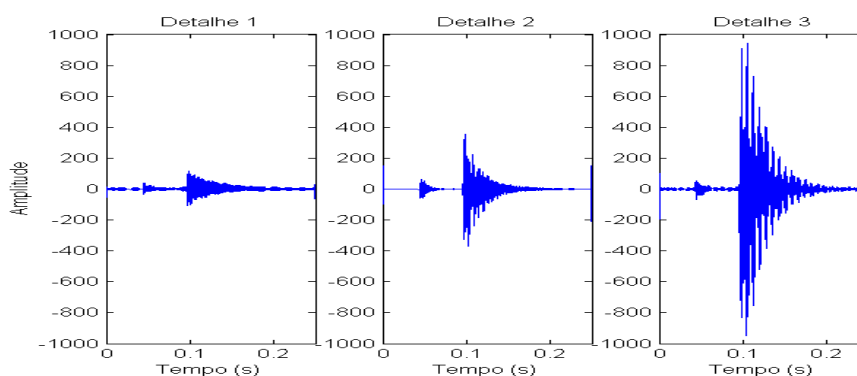


Figura 38 – AMR da elevação de tensão de 30%.

A Tabela 9 mostra a detecção do distúrbio e sua respectiva localização, para os casos de elevação de tensão. Estes distúrbios tiveram seu início em 0,0454s com ângulo de inserção de falta de 0° e 0,0488s com ângulo de inserção de falta de 90° . A

deteccão através do algoritmo é mostrada na quinta coluna desta mesma tabela. Esta deteção ocasionou um erro médio de 1,47% em relação ao início real do distúrbio, como também pode ser observado na tabela.

Tabela 9 - Determinação da deteção dos distúrbios de elevação de tensão e seus respectivos erros através do algoritmo confeccionado.

Distúrbios	Amplitude da Elevação (%)	Ângulo de Inserção (°)	Início do Distúrbio (s)	Localização do Distúrbio (s)	Erro Encontrado (%)
1	10	0	0,0454	0,0451	0,66
2	16	0	0,0454	0,0443	2,42
3	20	0	0,0454	0,0443	2,42
4	25	0	0,0454	0,0456	0,44
5	30	0	0,0454	0,0456	0,44
6	35	0	0,0454	0,0451	0,66
7	40	0	0,0454	0,0461	1,54
8	45	0	0,0454	0,0461	1,54
9	50	0	0,0454	0,0451	0,66
10	54	0	0,0454	0,0451	0,66
11	60	0	0,0454	0,0461	1,54
12	67	0	0,0454	0,0451	0,66
13	69	0	0,0454	0,0451	0,66
14	10	90	0,0488	0,0493	1,02
15	15	90	0,0488	0,0490	0,41
16	20	90	0,0488	0,0498	2,05
17	25	90	0,0488	0,0498	2,05
18	30	90	0,0488	0,0498	2,05
19	35	90	0,0488	0,0503	3,07
20	40	90	0,0488	0,0503	3,07
21	45	90	0,0488	0,0503	3,07
22	50	90	0,0488	0,0493	1,02
23	55	90	0,0488	0,0493	1,02
24	60	90	0,0488	0,0503	3,07
25	65	90	0,0488	0,0493	1,02
26	70	90	0,0488	0,0493	1,02

1.3 - Interrupção de Tensão

Uma interrupção, como já foi dito anteriormente, ocorre quando o fornecimento de tensão decresce para um valor menor do que 0,1 pu por um período de tempo inferior a 1 minuto. As interrupções são classificadas em momentânea, temporária e sustentada. Neste trabalho foram simuladas apenas interrupções momentâneas, uma vez que, o que diferencia estas interrupções é apenas o tempo de duração da mesma.

A Figura 39 mostra a AMR de interrupção momentânea causada por uma falta ocorrida diretamente na subestação, com uma resistência de falta de 0,01 ohm e um ângulo de inserção de falta de 90°. Tal falta ocasionou uma interrupção com amplitude de 99% como mostrado anteriormente na Tabela 6. Através da AMR, realizada em três níveis de decomposição, foi possível obter informações sobre detecção e a respectiva localização da interrupção.

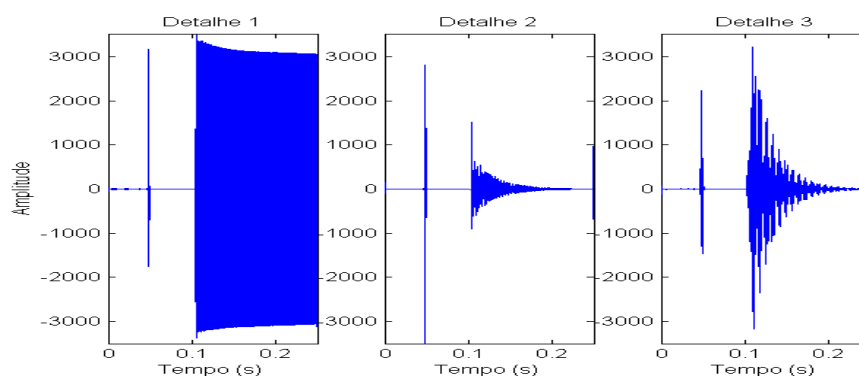


Figura 39 – Decomposição de uma interrupção momentânea de tensão em 3 níveis.

A Tabela 10 mostra os dados obtidos com respeito a detecção e localização dos distúrbios de interrupção de tensão. Para os casos com ângulo de inserção de falta de 0°, a interrupção simulada teve seu início em 0,0445s, assim como para os casos anteriores de afundamentos de tensão, mas o algoritmo detectou o início deste distúrbio a 0,0443s, gerando desta forma um erro de 0,45%. Já para os casos com ângulo de inserção de falta de 90°, a interrupção simulada teve seu início em 0,0485s, da mesma forma que nos afundamentos de tensão, e o algoritmo foi capaz de detectar o momento exato do início do distúrbio, conseqüentemente não ocasionando erros.

Tabela 10 – Dados obtidos da detecção dos distúrbios de interrupção de tensão e seus respectivos erros.

Distúrbios	Amplitude da Interrupção (%)	Ângulo de inserção (°)	Início do Distúrbio (s)	Localização do Distúrbio (s)	Erro Encontrado (%)
1	92	0	0,0445	0,0443	0,45
2	94	0	0,0445	0,0443	0,45
3	96	0	0,0445	0,0443	0,45
4	99	0	0,0445	0,0443	0,45
5	92	90	0,0485	0,0485	0
6	94	90	0,0485	0,0485	0
7	96	90	0,0485	0,0485	0
8	99	90	0,0485	0,0485	0

1.4 - Transitórios Oscilatórios

Transitórios freqüentemente encontrados em sistemas de distribuição das concessionárias são considerados transitórios oscilatórios de baixa freqüência. Possuem uma freqüência menor do que 5 kHz e duração de 0,3 a 50ms, geralmente causados por vários tipos de eventos, entre eles o mais comum é a energização de banco de capacitores.

Na Figura 40 tem-se um transitório oscilatório provocado por um chaveamento no banco de capacitores de 600kVAr, localizado a 1176 metros da subestação. Porém o ponto de medição foi junto a subestação, situada a uma distância de aproximadamente 840 metros do banco de capacitores que foi chaveado. O ângulo de inserção do transitório foi de 90° e seu pico alcançou cerca de 1,2 pu em relação ao regime permanente.

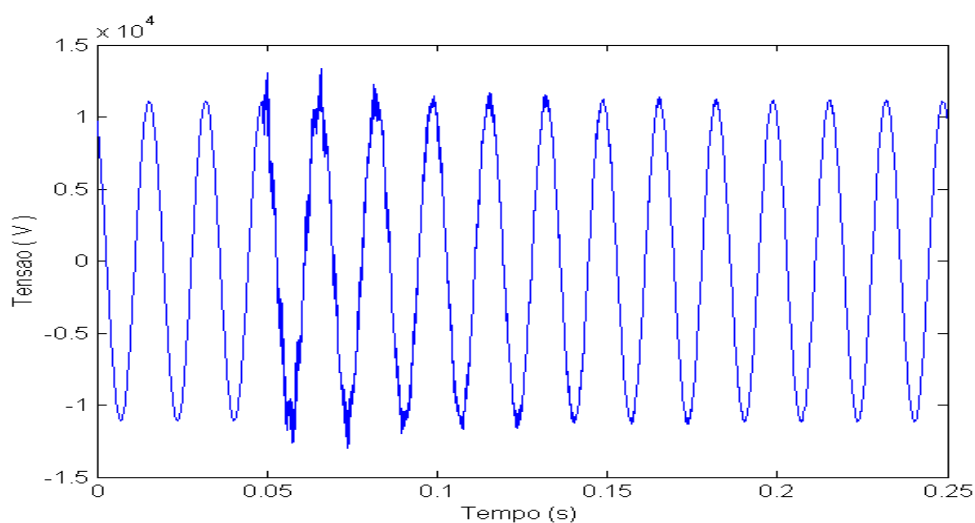


Figura 40 – Transiente Oscilatório provocado por um chaveamento de capacitores.

As decomposições em três níveis são mostradas na Figura 41, podendo-se perceber que a TW forneceu informações suficientes para caracterizar o transiente, detectando e informando a localização do mesmo.

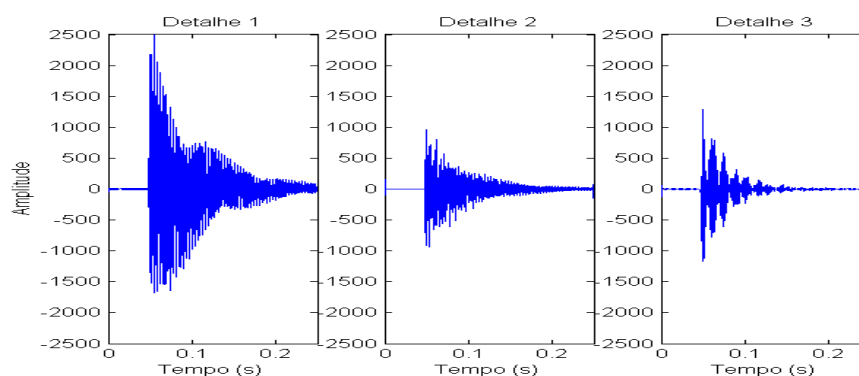


Figura 41 – AMR em 3 níveis de decomposição de um transiente oscilatório.

As respostas do algoritmo para detecção dos casos de transientes oscilatórios são mostradas na Tabela 11. O erro médio total de detecção deste distúrbio foi de 1%. Na quinta coluna desta tabela são mostradas as taxas de erro que o algoritmo cometeu para a localização no tempo de cada um dos doze casos de transientes oscilatórios. Nos casos de ângulo de incidência do chaveamento de 0° , o distúrbio iniciou em 0,0446s e nos casos de ângulo de incidência de chaveamento de 90° , o distúrbio teve seu início em 0,0488s.

Tabela 11 - Detecção dos distúrbios de transitórios oscilatórios e seus respectivos erros através do algoritmo confeccionado.

Distúrbio	Ângulo de inserção (°)	Início do Distúrbio (s)	Localização do Distúrbio (s)	Erro Encontrado (%)
1	0	0,0446	0,0449	0,67
2	0	0,0446	0,0449	0,67
3	0	0,0446	0,0443	0,67
4	0	0,0446	0,0461	3,36
5	0	0,0446	0,0461	3,36
6	0	0,0446	0,0449	0,67
7	90	0,0488	0,0490	0,41
8	90	0,0488	0,0490	0,41
9	90	0,0488	0,0485	0,61
10	90	0,0488	0,0485	0,61
11	90	0,0488	0,0485	0,61
12	90	0,0488	0,0490	0,41

1.5 - Ruídos

Os ruídos foram simulados, assim como sua definição, como sinais elétricos não desejáveis com um conteúdo espectral abaixo de 200 kHz, superposto à tensão do sistema de distribuição de energia. A Figura 42 ilustra um ruído com amplitude máxima de 1%. Este foi gerado da seguinte forma: seleciona-se uma forma de onda de tensão em regime e adiciona-se um ruído branco através do *software* Matlab. O ruído branco foi escolhido por compreender diversas faixas de frequência.

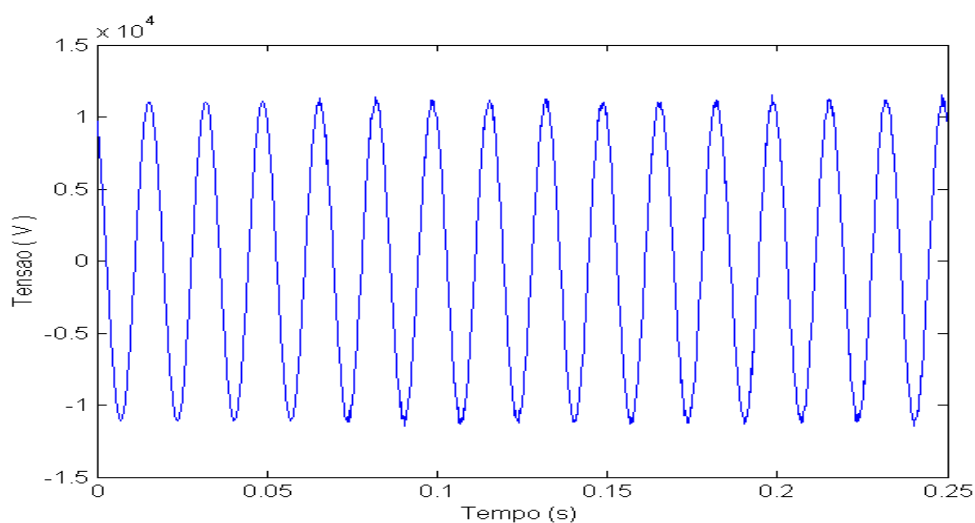


Figura 42 – Forma de onda com distorção ruidosa com amplitude de 1%.

A Figura 43 apresenta a decomposição em três níveis do sinal anterior com ruído. Nesta análise foi possível perceber que houve de fato uma anomalia no sinal, ou seja ruídos incorporados ao sinal. Isto pode ser afirmado pois o primeiro nível de decomposição apresenta um conteúdo de altas frequências que são características dos ruídos. Também é perceptível o instante em que o ruído começou a fazer parte do sinal em regime, caracterizando de fato sua localização temporal.

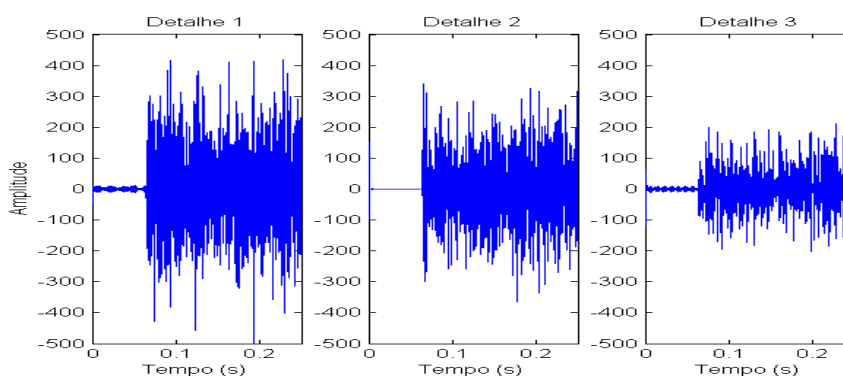


Figura 43 – AMR de uma forma de onda com ruídos.

A detecção e localização dos ruídos são mostrados pelos dados da Tabela 12. Através desta tabela é identificada a localização real do distúrbio, que foi em 0,0649s, e na quarta coluna é apresentada a localização do distúrbio através do algoritmo proposto. Esta localização gerou um erro médio total de 1,4% e os erros individuais são mostrados na quinta coluna desta tabela.

Tabela 12 - Detecção dos ruídos e seus respectivos erros através do algoritmo confeccionado.

Distúrbios	Amplitude do ruído (%)	Início do Distúrbio (s)	Localização do Distúrbio (s)	Erro Encontrado (%)
1	0,1	0,0649	0,0651	0,31
2	0,2	0,0649	0,0659	1,54
3	0,3	0,0649	0,0664	2,31
4	0,4	0,0649	0,0654	0,77
5	0,5	0,0649	0,0680	4,78
6	0,6	0,0649	0,0659	1,54
7	0,7	0,0649	0,0659	1,54
8	0,8	0,0649	0,0649	0
9	0,9	0,0649	0,0646	0,46
10	1,0	0,0649	0,0659	1,54
11	1,1	0,0649	0,0651	0,31
12	1,2	0,0649	0,0658	1,39

2. Módulo de Classificação

Como explicado no capítulo anterior, neste estudo foi utilizado como método de classificação, a Curva de Desvio Padrão (CDP). Com isso, neste tópico serão mostradas as curvas geradas para os diversos distúrbios simulados. Inicialmente foi tomada como referência uma CDP de um sinal em regime permanente e posteriormente tal curva foi comparada com as CDP dos diversos distúrbios analisados.

Iniciando por distúrbios do tipo afundamentos de tensão, o fator determinante para a classificação deste distúrbio é a CDP com distúrbio ser menor que a CDP de referência no seu valor de pico, ou seja, no sexto nível de decomposição como mostra a Figura 44. Isto ocorre, pois no sexto e sétimo nível a CDP apresenta informações referentes a frequência fundamental, ou seja 60Hz que é o nível de frequência presente nos distúrbios de afundamentos de tensão e também elevações e interrupções de tensão.

A Figura 44 mostra a CDP responsável por realizar a classificação de um afundamento de tensão. A curva em preto representa a curva de referência, ou seja, sem nenhum tipo de distúrbio, sendo esta usada como parâmetro em todos os fenômenos estudados. A curva pontilhada representa a CDP do sinal com distúrbio, neste caso um afundamento de tensão de 46%.

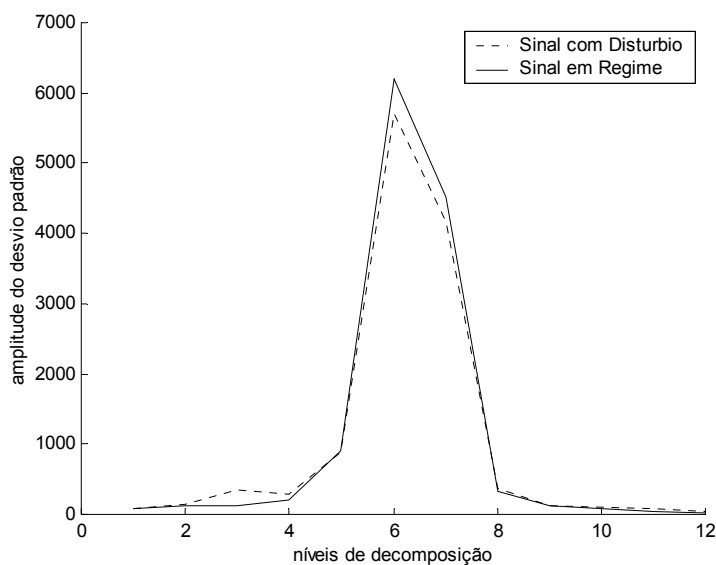


Figura 44 – CDP de um afundamento de tensão de 46%.

No caso de elevação de tensão, a Figura 45 mostra a classificação realizada em uma elevação com amplitude de 30%. Visualmente é perceptível uma diferenciação entre a curva de referência (contínua) e a curva com distúrbio (pontilhada) no sétimo nível do decomposição, nível este responsável pela classificação. Seu valor de pico ultrapassou significativamente o valor de pico da curva de referência.

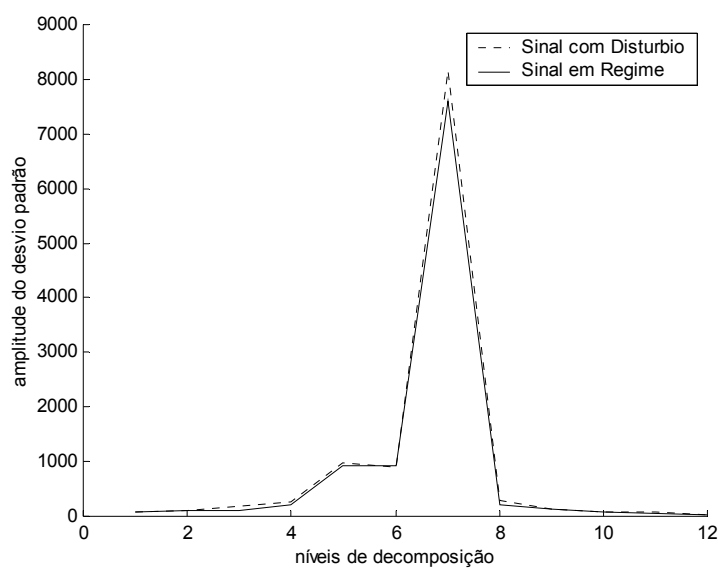


Figura 45 – Classificação de uma elevação de tensão de 30% utilizando a CDP.

A Figura 46 mostra a maneira de classificar uma interrupção momentânea de tensão de acordo com os critérios da CDP. Deve-se lembrar que a curva em preto se refere ao sinal em regime permanente e a curva pontilhada à interrupção propriamente dita. A diferenciação entre a classificação de um afundamento de tensão e uma interrupção de tensão está no valor em que a curva com distúrbio alcança. No caso de uma interrupção de tensão, o valor de pico da curva é inferior aos valores de pico das curvas referentes aos afundamentos de tensão, possibilitando classificar corretamente os distúrbios.

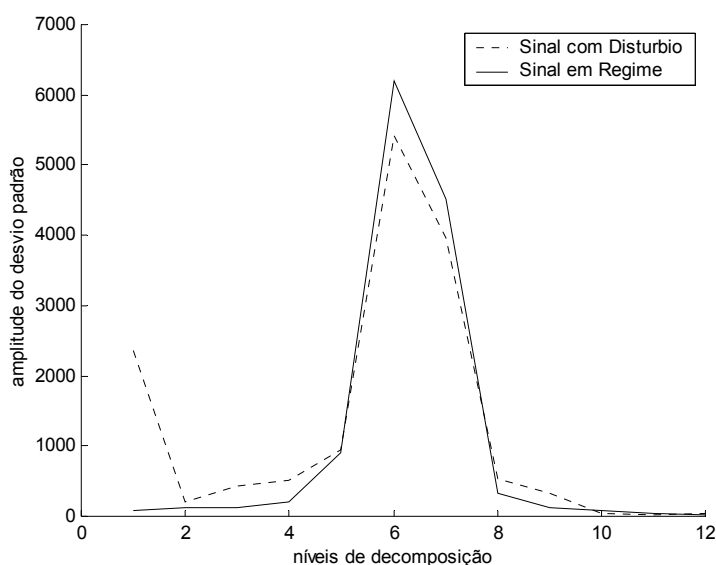


Figura 46 – CDP de uma interrupção momentânea.

Para a classificação de distúrbios como transitórios oscilatórios, provenientes de chaveamento de bancos de capacitores, o terceiro e o quarto detalhes são considerados para o cálculo da CDP. A classificação propriamente dita ocorre quando a diferença da CDP nos detalhes 3 e 4 ultrapassam simultaneamente um limite estipulado. Ou melhor, a indicação da presença de transitórios oscilatórios na sinal analisado ocorre quando a curva referente ao distúrbio for maior que a curva referente ao regime permanente nos níveis de detalhes 3 e 4, e ainda ultrapassar um determinado valor. Este fato se deve à faixa de frequência presente nestes níveis de detalhes, sendo uma característica dos transitórios oscilatórios. O limite mencionado anteriormente foi estipulado empiricamente através dos diversos testes realizados, não sendo difícil sua determinação.

A Figura 47 mostra a classificação de um transitório oscilatório proveniente de um chaveamento de banco de capacitores de um sistema de distribuição mediante a análise da CDP. Seguindo esta metodologia, todos os distúrbios referentes à transitórios oscilatórios também foram devidamente classificados, determinando desta forma um índice de acerto de 100%. Este fato é mostrado na referência [38].

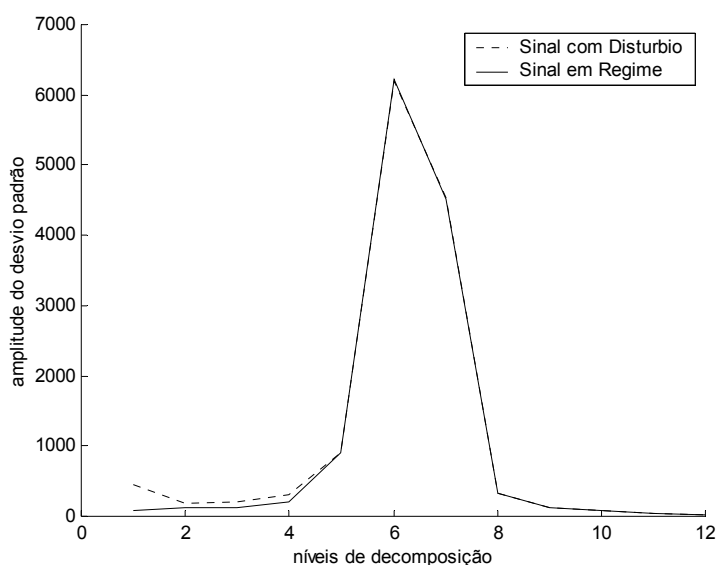


Figura 47 – CDP de um transitório oscilatório.

Em seguida, a Figura 48 mostra a CDP de um sinal com inserção de ruídos. Esta curva deixa a desejar em alguns aspectos com relação a classificação de distúrbios ruidosos. Sua amplitude típica é praticamente insuficiente para realizar uma classificação adequada do sinal. Porém, quando se aumenta a amplitude do ruído, este método consegue classificar corretamente, no entanto, não se trata de um distúrbio real ou comum de acontecer nos sistemas de distribuição.

O ideal desta classificação de ruídos é de ter picos, na curva referente ao sinal ruidoso, significativamente maiores nas primeiras decomposições, detalhes 1 e 2, responsáveis pelas altas frequências, em comparação com a curva referente ao sinal em regime. Mas nesta forma de onda pode-se perceber pela curva pontilhada que sua diferença em relação a curva de referência não foi tão brusca. Em comparação com os outros distúrbios, os ruídos apresentaram maior grau de dificuldade na sua adequada classificação. Porém, mesmo desta forma, foi possível classificar todos os distúrbios ruidosos observando, assim, um índice de 100% de acerto nestas classificações.

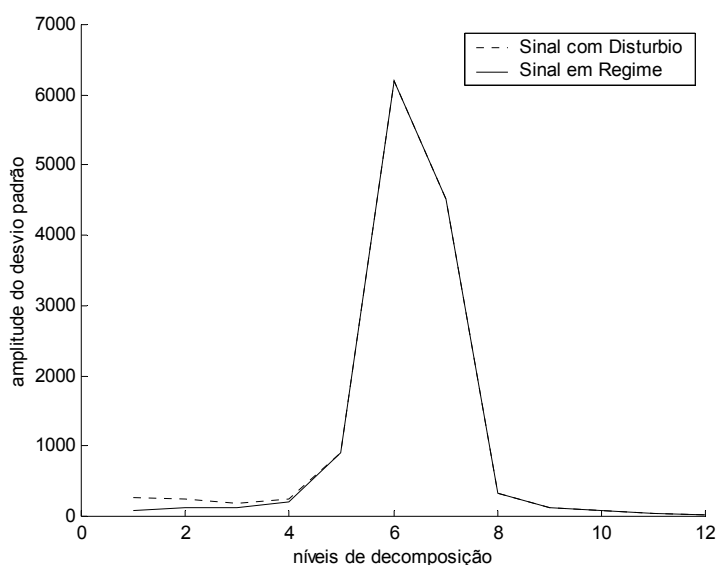


Figura 48 – CDP de uma forma de onda com ruídos.

De uma maneira geral, o classificador atingiu as expectativas apresentando um erro médio total de 1,1%, errando apenas em um caso de afundamento de tensão, confundindo com interrupção de tensão. Cada conjunto de tipo de distúrbio para os casos de interrupção de tensão, elevação de tensão, transitórios oscilatórios e ruídos, a classificação atingiu 100% de acertos. Apenas nos casos de afundamentos de tensão, em que ocorreu o erro de uma classificação, a taxa de erro foi de 3,12% acarretando no erro médio total acima mencionado.

Com os resultados obtidos através deste método de classificação foi possível publicar um artigo no V Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica (V SBQEE), referenciado em [38].

3. Módulo de Estimação da Duração do Distúrbio

3.1 - Afundamento de Tensão

Para estimar a duração de um distúrbio como afundamento de tensão, como já falado anteriormente, são levados em consideração os picos do terceiro nível de decomposição da AMR. Desta forma, a Tabela 13 apresenta os resultados obtidos para estes distúrbios que foram simulados com duração de três ciclos, ou seja 0,05s. A quarta coluna desta tabela apresenta a duração dos distúrbios, estimada pelo

algoritmo, e na coluna seguinte os respectivos erros associados a cada distúrbio. Os casos com ângulo de inserção de falta a 0° apresentaram uma média de erro de 0,95 %, bastante inferior aos 8 % de média de erro dos distúrbios com ângulo de inserção a 90°. Com estes dados foi obtida uma média total de erros para os casos de afundamentos de tensão de 4,5%.

Tabela 13 – Análise da duração estimada pelo algoritmo para os casos de afundamento de tensão.

Distúrbios	Afundamento (%)	Ângulo de inserção (°)	Duração Estimada pelo Algoritmo (s)	Erro Encontrado (%)
1	10	0	0,0514	2,7
2	14	0	0,0504	0,88
3	20	0	0,0503	0,62
4	25	0	0,0504	0,88
5	31	0	0,0504	0,88
6	35	0	0,0499	0,16
7	40	0	0,0514	2,7
8	46	0	0,0514	2,7
9	50	0	0,0503	0,62
10	55	0	0,0503	0,62
11	60	0	0,0501	0,1
12	65	0	0,0503	0,62
13	70	0	0,0503	0,62
14	75	0	0,0503	0,62
15	80	0	0,0503	0,62
16	85	0	0,0503	0,62
17	10	90	0,0546	9,2
18	14	90	0,0536	7,12
19	20	90	0,0536	7,12
20	25	90	0,0536	7,12
21	31	90	0,0545	8,94
22	35	90	0,0536	7,12
23	40	90	0,0536	7,12
24	46	90	0,0536	7,12
25	50	90	0,0536	7,12
26	55	90	0,0536	7,12
27	60	90	0,0556	11,3
28	65	90	0,0536	7,12
29	70	90	0,0536	7,12
30	75	90	0,0536	7,12
31	80	90	0,0536	7,12
32	85	90	0,0555	11

3.2 - Elevação de Tensão

A estimação da duração dos distúrbios de elevação de tensão, é mostrada na Tabela 14, apresentando também os erros associados a cada distúrbio. Assim como nos casos de afundamento de tensão, estes distúrbios também foram simulados com duração de 0,05s.

A quarta coluna desta tabela apresenta a duração dos distúrbio estimada pelo algoritmo e na coluna seguinte os respectivos erros encontrados para cada distúrbio. Os casos com ângulo de inserção de falta a 0° apresentaram uma média de erro de 1,3 %. E os casos com ângulo de inserção de falta a 90° , apresentaram uma média de erro na estimação da duração dos distúrbios de 8,2 %. Com estes dados foi obtido uma média total de erros para os casos de elevação de tensão de 4,8%.

A taxa de erro de estimação dos distúrbios é maior nos casos de ângulo de inserção de falta a 90° por causa da aplicação de faltas no ponto máximo do valor da tensão resultar num alto índice de distorções, diferentemente das faltas aplicadas em tensão zero. Isto ocorre pois não há uma grande mudança de tensão no ponto de aplicação da falta, considerando a situação de pré e pós falta.

3.3 - Interrupção de Tensão

A Tabela 15 apresenta os resultados de estimação da duração da amplitude para distúrbios de interrupção de tensão. São mostrados nesta tabela também os erros de estimação da duração associados a cada distúrbio. Assim como nos casos de afundamento e elevação de tensão, estes distúrbios também foram simulados com duração de 0,05s. Porém a estimação feita pelo algoritmo apresentou, para os casos com ângulo de inserção de falta a 0° , um erro médio de 1,7 %, e 9,7 % de média de erro dos distúrbios com ângulo de inserção a 90° . Desta forma, foi obtida uma média total de erros de 5,7% para os casos de interrupções de tensão, como evidencia a quinta coluna desta mesma tabela.

Tabela 14 – Análise da duração estimada pelo algoritmo para os casos de elevação de tensão.

Distúrbios	Elevação (%)	Ângulo de inserção (°)	Duração Estimada pelo Algoritmo (s)	Erro Encontrado (%)
1	10	0	0,0494	1,2
2	16	0	0,0502	0,36
3	20	0	0,0503	0,62
4	26	0	0,0510	1,92
5	30	0	0,0528	5,56
6	35	0	0,0504	0,88
7	40	0	0,0504	0,88
8	45	0	0,0504	0,88
9	50	0	0,0504	0,88
10	54	0	0,0504	0,88
11	60	0	0,0493	1,46
12	67	0	0,0510	1,92
13	69	0	0,0499	0,16
14	10	90	0,0532	6,34
15	16	90	0,0525	5,04
16	20	90	0,0541	8,16
17	26	90	0,0551	10,2
18	30	90	0,0551	10,2
19	35	90	0,0541	8,16
20	40	90	0,0541	8,16
21	45	90	0,0560	12,1
22	50	90	0,0530	6,08
23	54	90	0,0542	8,42
24	60	90	0,0551	10,2
25	67	90	0,0536	7,12
26	69	90	0,0536	7,12

Tabela 15 – Análise da duração estimada pelo algoritmo para os casos de interrupção de tensão.

Distúrbios	Interrupção (%)	Ângulo de inserção (°)	Duração Estimada pelo Algoritmo (s)	Erro Encontrado (%)
1	92	0	0,0499	0,16
2	94	0	0,0510	1,92
3	96	0	0,0511	2,18
4	99	0	0,0514	2,7
5	92	90	0,0556	11,3
6	94	90	0,0546	9,2
7	96	90	0,0546	9,2
8	99	90	0,0546	9,2

4. Módulo de Estimação da Amplitude do Distúrbio

4.1 - Afundamento de Tensão

Para a determinação da amplitude de cada distúrbio, nos casos de afundamentos de tensão, o algoritmo provou sua eficiência e apresentou resultados satisfatórios com um índice de acerto de 99,2%. Na maioria dos casos a taxa de erro ficou inferior a 1%. Estes dados são mostrados detalhadamente na Tabela 16, apresentando em suas colunas o afundamento real do distúrbio, o ângulo de inserção do próprio distúrbio, o resultado da amplitude estimada pelo algoritmo e o respectivo erro encontrado.

4.2 - Elevação de Tensão

Nos casos de elevações de tensão a estimação da amplitude através do algoritmo provou ser eficiente, alcançando um nível de acerto de 98,8%, como comprovado pela Tabela 17. A taxa de erro apresentada pelo algoritmo variou entre 0 e 6,28 %. Assim o algoritmo provou novamente sua eficácia apresentando níveis aceitáveis de erros.

4.3 - Interrupção de Tensão

Os melhores resultados apresentados pelo algoritmo, no caso de estimação da amplitude, foram para os distúrbios de interrupção de tensão, que apresentaram 99,8% de acerto nas estimações. Ou seja, o erro de estimação de amplitude nos oito casos apresentados ao algoritmo foi de 0,2 %. Este fato pode ser observado através da Tabela 18 que mostra a amplitude real do distúrbio, a amplitude estimada pelo algoritmo e seu respectivo erro.

Tabela 16 – Análise da amplitude dos afundamentos de tensão estimada pelo algoritmo.

Distúrbios	Afundamento (%)	Ângulo de inserção (°)	Amplitude Estimada pelo Algoritmo (%)	Erro Encontrado (%)
1	10	0	10,00	0
2	14	0	14,23	1,61
3	20	0	19,98	0,12
4	25	0	24,77	0,91
5	31	0	30,56	1,42
6	35	0	34,64	1,03
7	40	0	39,87	0,32
8	46	0	46,14	0,30
9	50	0	49,48	1,05
10	55	0	54,07	1,68
11	60	0	59,35	1,08
12	65	0	65,22	0,34
13	70	0	69,36	0,92
14	75	0	73,99	1,35
15	80	0	79,25	0,94
16	85	0	85,22	0,26
17	10	90	9,96	0,35
18	14	90	13,99	0,05
19	20	90	19,66	1,70
20	25	90	24,37	2,50
21	31	90	30,99	0
22	35	90	34,52	1,37
23	40	90	40,34	0,85
24	46	90	45,19	1,77
25	50	90	49,89	0,22
26	55	90	54,53	0,85
27	60	90	59,78	0,36
28	65	90	65,79	1,22
29	70	90	69,93	0
30	75	90	74,57	0,58
31	80	90	79,80	0,25
32	85	90	85,71	0,84

Tabela 17 – Análise da amplitude das elevações de tensão estimada pelo algoritmo.

Distúrbios	Elevação (%)	Ângulo de inserção (°)	Amplitude Estimada pelo Algoritmo (%)	Erro Encontrado (%)
1.	10	0	10,25	2,53
2.	16	0	15,60	2,50
3.	20	0	19,92	0,38
4.	26	0	26,19	0,72
5.	30	0	30,13	0,44
6.	35	0	34,73	0,76
7.	40	0	40,09	0,24
8.	45	0	44,39	1,35
9.	50	0	50,18	0,35
10.	54	0	53,59	0,76
11.	60	0	56,23	6,28
12.	67	0	66,10	1,35
13.	69	0	69,05	0,07
14.	10	90	10,30	3,04
15.	16	90	15,65	2,19
16.	20	90	20,03	0,12
17.	26	90	26,31	1,18
18.	30	90	30,06	0,20
19.	35	90	34,96	0,11
20.	40	90	40,54	1,36
21.	45	90	45,09	0,20
22.	50	90	50,77	1,53
23.	54	90	54,26	0,49
24.	60	90	60,00	0
25.	67	90	67,17	0,25
26.	69	90	70,28	1,85

Tabela 18 – Análise da amplitude das interrupções de tensão estimada pelo algoritmo.

Distúrbios	Interrupção (%)	Ângulo de inserção (°)	Amplitude Estimada pelo Algoritmo (%)	Erro Encontrado (%)
1	92	0	92,08	0,09
2	94	0	93,57	0,45
3	96	0	95,89	0,11
4	99	0	99,15	0,16
5	92	90	92,40	0,44
6	94	90	93,84	0,17
7	96	90	96,08	0,08
8	99	90	99,20	0,20

VIII. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Consciente dos problemas que afetam a QE em um determinado sistema, deve-se, precaver das eventuais conseqüências, que podem afetar seriamente o funcionamento do mesmo. Porém, é muito importante além de conhecer profundamente os fenômenos e seus efeitos, identificar o local da ocorrência do mesmo e o tempo em que ocorreu. Com isso, o intuito deste estudo foi estabelecer um algoritmo que evidenciasse estes fatos, para posteriormente evitar danos aos equipamentos.

Através desta proposta, realizou-se um estudo para diagnosticar quais ferramentas eram viáveis na utilização deste trabalho. Verificou-se que antigamente a análise dos sinais que afetam a QE eram realizadas através da Transformada de *Fourier*, que é uma transformada bastante difundida e conhecida. Nos dias de hoje, a Transformada *Wavelet* é utilizada em larga escala, principalmente na área de SEP. Este foi um dos fatores para a utilização desta transformada neste trabalho e também pela possibilidade de obter informações tanto no domínio do tempo como no domínio da frequência. Outro fator é que a Transformada *Wavelet* possui uma gama de funções de base, as chamadas *wavelets* mães, diferentemente da Transformada de *Fourier* que possui somente as funções seno e cosseno como funções de base.

Diante desta possibilidade de escolha de diferentes *wavelets* mães, foi realizado um estudo, no decorrer da pesquisa, sobre quais seriam mais adequadas para utilização neste trabalho. Este estudo resultou em um artigo publicado no XIV CBA – Congresso Brasileiro de Automática no ano de 2002, referenciado por [36]. O trabalho concluiu que algumas *wavelets* mães seriam adequadas para as aplicações deste estudo, tendo-se, entretanto, optado pela utilização da sym4. A opção por tal *wavelet* mãe ocorreu por ser adequada aos estudos, sendo porém pouco utilizada neste meio constatando-se que a maior quantidade de aplicações se refere a db4. Um

estudo paralelo, realizado por outro membro do grupo de estudos, [35], já vinha utilizando a *wavelet* mãe db4, obtendo resultados também satisfatórios. Assim, a opção pela utilização da sym4 pode permitir, como trabalho futuro, comparar os resultados destas duas *wavelets* mães. Esta escolha foi adequada pois a sym4 mostrou ser eficiente neste trabalho.

A utilização do *software* ATP contribuiu de maneira significativa, pois por intermédio deste, foi possível simular os distúrbios desejados do início do trabalho. Estes distúrbios compreendem 32 casos de afundamentos de tensão, 26 de elevações de tensão, 8 casos de interrupções de tensão, 12 casos de transitórios oscilatórios e 12 casos de ruídos. Totalizando 90 casos submetidos à análise do algoritmo confeccionado.

Com relação ao algoritmo construído, no módulo de detecção e localização de distúrbios, todos os 90 casos foram detectados e devidamente localizados no tempo. A localização dos distúrbios no tempo foi precisa, apresentando um erro médio de apenas 0,9%. Em alguns casos, o algoritmo localizou o momento exato do início do distúrbio. E o maior erro com relação a localização foi de 4,78%, em que o algoritmo deveria localizar em 0,0649s, no entanto localizou em 0,068s.

O método de classificação através da Curva de Desvio Padrão, utilizado neste trabalho, mostrou ser eficiente e sem a presença de ambigüidade. Seu índice de acerto foi de 98,9%, apresentando apenas um erro no caso de afundamento de tensão em que houve a troca com interrupção momentânea de tensão. Nos outros 89 casos, o algoritmo mostrou 100% de eficácia. Este método de classificação resultou em um artigo publicado no V SBQEE – Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica neste ano de 2003, [38].

No módulo de estimação da duração do distúrbio, os três tipos de distúrbios, afundamento, elevação e interrupção de tensão, foram devidamente estimados no tempo. Este módulo teve uma taxa de acertos de 95,3 %. Esta taxa foi mais baixa que nos outros módulos e ocorreu pelo fato do algoritmo apresentar uma taxa de erro maior na estimação dos distúrbios com ângulo de inserção de falta a 90°. Taxa esta superior a 8% nos três casos. Já nos casos com ângulo de inserção a 0°, o algoritmo apresentou uma taxa de erro da ordem de 1 %. Como continuação deste trabalho, um estudo mais detalhado deve ser realizado para melhoria dos resultados deste módulo

de estimação da duração dos distúrbios, principalmente para os casos com ângulo de inserção de falta a 90° , com o intuito de minimizar sua taxa de erro.

No módulo final de estimação da amplitude dos distúrbios, também para os casos de afundamentos, elevações e interrupções de tensão, o algoritmo mostrou sua eficiência. A taxa de acertos dos 66 casos testados foi de 99,7 %. Apenas nos casos de afundamentos de tensão é que o algoritmo apresentou resultados com 0,8 % de taxa de erro na estimação. E nos casos de elevação e interrupção de tensão, esta taxa foi de 0,01% e 0 %, respectivamente.

Além da detecção e localização de cada evento, os detalhes provindos desta análise permitem uma sensibilidade do comportamento do sistema em recuperação. Ou melhor, logo após o término do distúrbio é possível determinar o tempo em que o mesmo volta a operar normalmente. Este é um fato importante nas análises de QE onde o interesse não é somente em classificar o momento da ocorrência de um determinado distúrbio e sim classificar o sinal como um todo, desde a ocorrência do distúrbio até o momento em que o mesmo volta ao seu estado de regime permanente. Porém este objetivo não fazia parte do escopo deste trabalho, ficando para trabalhos futuros.

Desta forma, acredita-se que o objetivo deste projeto de mestrado foi alcançado, uma vez que a proposta inicial era a implementação de um algoritmo que propiciasse uma adequada detecção, localização e classificação automatizada de cada distúrbio que ocorresse no Sistema Elétrico de Potência. E tal algoritmo apresentou resultados satisfatórios pois em todos os módulos, os índices de acertos foram superiores a 95%. Como consequência deste trabalho, além dos artigos já mencionados que foram publicados em congressos nacionais, a referência [37] mostra um artigo que foi aceito para apresentação no 17º Seminário Brasileiro de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – SNPTEE.

Com a utilização destes resultados, pretende-se continuar esta pesquisa dando seguimento a um projeto de doutorado. Nesta nova etapa, pretende-se variar a duração dos diversos distúrbios e a quantidade dos mesmos, além da possibilidade da obtenção de dados reais provindos de concessionárias de energia elétrica. Pode-se também realizar um estudo comparativo entre as ferramentas TF e TW, analisando possíveis melhorias e a utilização de outros métodos de classificação de distúrbios.

Também há a possibilidade de construir um algoritmo dedicado, não mais utilizando o *software* Matlab e sim outra linguagem de programação, capaz de detectar, localizar e classificar mais de um distúrbio que venha a ocorrer no sistema elétrico.

IX. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] DELGADO, J.D.B. et al. (1997). A Qualidade da Energia Elétrica na atualidade e o uso de novas tecnologias reparadoras. In: Seminário Brasileiro sobre Qualidade da energia Elétrica, 2. São Lourenço-MG.
- [2] ARSENEAU, R.; HEYDT, M. J.; KEMPKER, M. J. (1997). Application of IEEE standart 519-1992 harmonic limits for revenue biling meters. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v.12, n.1, p.346-352, Jan.
- [3] BELLEI, T.A.; O'LEARY, R.P.; CAMM, E.H. (1996). Evaluating capacitor-switching devices for preventing nuisance tripping of adjustable-speed drives due to voltage magnification. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v.11, n.3, p.1373-1378, July.
- [4] FULLER, J.F.; FUCHS, E.F.; ROESLER, D.J. (1997). Influence of harmonic on power distribution system protection. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v.3, n.2, p.549-556, Jan.
- [5] SANTOS, C.J. (2000). *Transitórios originados pelo chaveamento de bancos de capacitadores da concessionária em um sistema elétrico de distribuição*. São Carlos. 107 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- [6] ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA: Resolução N° 24. (2000). p.15. Jan.
- [7] DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN, M. F.; BEATY, H. W. (1996). *Electrical power systems quality*. New York, McGraw-Hill.
- [8] IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. (1995). *IEEE*, p.70, Jun.

- [9] OLIVEIRA, J. C. D. Projeto SIDAQEE - Capítulo II Qualidade de Energia Elétrica: Definição e Análise dos Itens de Qualidade. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia.
- [10] 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.
- [11] BOLLEN, M. H. J. (1999). *Understanding power quality problems: voltage sags and interruptions*. New York, IEEE Press.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] RESENDE, J.W.; PENNA, C. (2001). Identificação de Distúrbios da Qualidade da Energia Elétrica Através da Transformada *Wavelet*. In: Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica, 6. Porto Alegre. *Anais*. p.51-56.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] ROBERTSON, D.C. et al. (1996). *Wavelets* and Eletromagnetic Power System Transients. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v.11, n.2, p.1050-1058, Apr.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] SANTOSO, S., POWERS, E. J., GRADY, W. M. (1994). Eletric Power Quality Disturbance Detection Using *Wavelet* Transform Analysis. IEEE International Symposium, p.166-169, Oct.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] DOVICCHI, J.C.L. (1999). *Novos coeficientes wavelet baseados em intervalos musicais para análise de timbres de instrumentos acústicos*. Uberlândia. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia.

- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] MISITI, M. et al.(1997). *Wavelet Toolbox: User`s Guide*. Natick, MA.
- [31] DAUBECHIES, I. (1990). The wavelet transform, time-frequency localization and signal analysis. *IEEE Transactions on Information Theory*, v.36, n.5, p.961-1005.
- [32] BURRUS, C. S.; GOPINATH, R. A.; GUO, H. (1998). *Introduction to wavelets and wavelet transforms: a primer*. New Jersey, Prentice Hall.
- [33] GOMES, J., VELHO, L., GOLDENSTEIN, S. (1997). *Wavelets: Teoria, Software e Aplicações*. In: 21º Colóquio Brasileiro de Matemática, Rio de Janeiro, IMPA, p.216.
- [34] MAGALHÃES, M. N.; LIMA, A. C. P. (2002). *Noções de Probabilidade e Estatística*. São Paulo, Edusp.
- [35] ARRUDA, E. F. (2003). *Análise de Distúrbios Relacionados com a Qualidade da Energia Elétrica Utilizando a Transformada Wavelet*. São Carlos. 114 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- [36] 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).
- [37] OLESKOVICZ, M., ARRUDA, E. F., DELMONT, O. F., COURY, D. V., CARNEIRO, A. A. F. M. (2003). Análise da Qualidade da Energia Utilizando Transformadas *Wavelets* Combinadas às Redes Neurais Artificiais. In: Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 17. Uberlândia.

- [38] 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.