

Comparação de Métodos de Detecção de Distúrbios de Qualidade da Energia Elétrica

Frederico Ramos Cesário

Dissertação de Mestrado submetida à Coordenação dos Cursos de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Ciências no domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento da Energia

Washington Luiz Araújo Neves, Ph. D. – UFCG
Orientador

Edmarcio Belati, Dr. – UFABC
Orientador

Campina Grande, Paraíba, Brasil

17 de Março de 2011

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

C421c

Cesário, Frederico Ramos.

Comparação de métodos de detecção de distúrbios de qualidade da energia elétrica /Frederico Ramos Cesário. — Campina Grande, 2011.
63 f.: il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática.

Orientadores: Prof^o. Ph.D. Washington Luiz Araújo Neves, Prof^o. Dr^o. Edmarcio Antonio Belati.

Referências.

1. Transformada de Fourier com Janela. 2. Transformada wavelet. 3. Distúrbios da Qualidade da Energia Elétrica. 4. Detecção. I. Título.

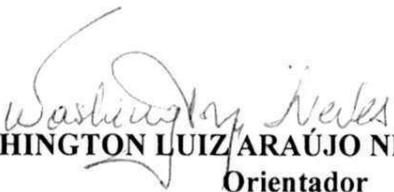
CDU 621.317(043)

| | |
|--------------------------|-----------|
| UFCG BIBLIOTECA-CAMPUS I | |
| 3703 | 28-08-011 |
| | |

**COMPARAÇÃO DE MÉTODOS DE DETECÇÃO DE DISTÚRBIOS DE QUALIDADE
DA ENERGIA ELÉTRICA**

FREDERICO RAMOS CESÁRIO

Dissertação Aprovada em 17.03.2011


WASHINGTON LUIZ ARAÚJO NEVES, Ph.D., UFCG
Orientador

EDMARCIO ANTONIO BELATI, Dr., UFABC
Orientador (Ausência Justificada)


BENEMAR ALENCAR DE SOUZA, D.Sc., UFCG
Componente da Banca


DAMÁSIO FERNANDES JÚNIOR, D.Sc., UFCG
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE - PB
MARÇO -2011

DIS
621.314(043)
C421e



Dedicatória

Aos meus pais, João Paulo Cesário e Neide Ramos Cesário, por terem se dedicado para que eu tivesse uma boa formação acadêmica.

À minha esposa, Wandinha de Queiroz Cesário, por tolerar minha falta de atenção durante minhas horas de estudo e pesquisas, principalmente durante a redação deste trabalho.

Ao meu filho, Pedro Frederico de Queiroz Cesário, o melhor presente que eu já recebi e motivador emocional para a persistência na conclusão da redação desta dissertação.

À minha irmã, Juliana Ramos Cesário, pelo apoio moral.

Ao meu sobrinho, Júlio Tavares Cesário de Almeida, pela alegria e ternura incondicional.

À minha sogra, Claudina Maria de Queiroz, pela paciência e tolerância nas horas de estudos durante o dia e a noite em sua casa.

Agradecimentos

À Deus por estar sempre presente em minha vida e ter me concedido condições intelectuais e emocionais para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu orientador, professor Washington Luiz Araújo Neves, pela acolhida ao mestrado, pela orientação segura, pelo constante apoio e compreensão, fundamentais para efetivação desta dissertação.

Ao meu orientador, professor Edmarcio Belati, por ter incentivado a continuar meus estudos.

Ao professor Benemar Alencar de Souza pela acolhida ao mestrado e apoio para o cumprimento dos compromissos administrativos.

À COPELE, representada por Ângela, pelo apoio para o cumprimento dos compromissos administrativos, pela paciência e atenção prestadas.

Ao Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial – SENAI, representado por Leone e Breda, pelo apoio financeiro sem o qual não seria possível cursar o mestrado.

Aos colegas Greta Fernandes, Dennis Viana, Milton Bastos e Valter Beal pelas mais diversas contribuições.

Agradeço ainda a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para a conclusão deste trabalho.

Sumário

| | |
|--|----------|
| Lista de Figuras | vii |
| Lista de Tabelas | x |
| Lista de Abreviaturas, Siglas e Símbolos | xi |
| Resumo | xiii |
| Abstract..... | xiv |
| CAPÍTULO 1- INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1. Motivação..... | 1 |
| 1.2. Objetivos | 2 |
| 1.3. Contribuições | 2 |
| 1.4. Metodologia | 3 |
| 1.5. Descrição do sistema analisado..... | 6 |
| 1.6. Orgnização da dissertação..... | 7 |
| CAPÍTULO 2-DISTÚRBIOS DE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA..... | 9 |
| 2.1. Transitório | 10 |
| 2.1.1. Transitório Impulsivo..... | 10 |
| 2.1.2. Transitório Oscilatório | 12 |
| 2.2. Variações de Tensão de Curta Duração..... | 12 |
| 2.2.1. Interrupção de Tensão | 13 |
| 2.2.2. Afundamento de Tensão..... | 14 |
| 2.2.3. Elevação de Tensão | 15 |
| 2.3. Variações de Tensão de Longa Duração | 16 |
| 2.3.1. Interrupção Sustentada..... | 16 |

| | |
|--|----|
| 2.3.2. Subtensão Sustentada | 16 |
| 2.3.3. Sobretensão Sustentada | 17 |
| 2.4. Distorção da Forma de Onda | 17 |
| 2.4.1. Nível CC..... | 17 |
| 2.4.2. Inter-harmônico..... | 17 |
| 2.4.3. Harmônico | 18 |
| 2.4.4. <i>Notching</i> | 20 |
| 2.4.5. Ruído | 20 |
| 2.5. Flutuação de Tensão | 21 |
| 2.6. Variações de Frequência..... | 21 |
| 2.7. Desequilíbrio de Tensão | 22 |
| CAPÍTULO 3 - MÉTODOS DE DETECÇÃO E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 24 |
| 3.1. Valor RMS (<i>Root Mean Square</i>) | 25 |
| 3.2. Transformada de <i>Fourier</i> Janelada | 26 |
| 3.3. Transformada <i>Wavelet</i> | 30 |
| 3.4. Revisão bibliográfica | 37 |
| CAPÍTULO 4 – VALIDAÇÃO DOS MÉTODOS UTILIZADOS | 41 |
| 4.1. Validação da análise utilizando a Transformada de <i>Fourier</i> Janelada | 42 |
| 4.2. Validação da análise utilizando a Transformada <i>Wavelet</i> | 43 |
| CAPÍTULO 5 - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS | 45 |
| 5.1. Detecção de Afundamento de Tensão. | 47 |
| 5.1.1. Detecção através da Transformada de <i>Fourier</i> Janelada..... | 48 |
| 5.1.2. Detecção através da Transformada <i>Wavelet</i> | 49 |
| 5.2. Detecção de Elevação de Tensão..... | 49 |

| | |
|---|----|
| 5.2.1. Detecção através da Transformada de <i>Fourier</i> Janelada..... | 50 |
| 5.2.2. Detecção através da Transformada <i>Wavelet</i> | 51 |
| 5.3. Detecção de Harmônico..... | 51 |
| 5.3.1. Detecção através da Transformada de <i>Fourier</i> Janelada..... | 52 |
| 5.3.2. Detecção através da Transformada <i>Wavelet</i> | 53 |
| 5.4. Detecção de <i>Notching</i> | 54 |
| 5.4.1. Detecção através da Transformada de <i>Fourier</i> Janelada..... | 55 |
| 5.4.2. Detecção através da Transformada <i>Wavelet</i> | 55 |
| 5.5. Detecção de Flutuação de Tensão | 57 |
| 5.5.1. Detecção através da Transformada de <i>Fourier</i> Janelada..... | 57 |
| 5.5.2. Detecção através da Transformada <i>Wavelet</i> | 58 |
| 5.6. Resultados..... | 58 |
| CAPITULO 6 -CONCLUSÕES E CONTINUAÇÃO DO TRABALHO | 60 |
| 6.1. Conclusões..... | 59 |
| 6.2. Continuação do trabalho..... | 62 |
| REFERÊNCIAS | 63 |

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1.1. Modelo do algoritmo de detecção do distúrbio e registro do erro..... | 5 |
| Figura 1.2. Diagrama do sistema elétrico de distribuição analisado..... | 7 |
| Figura 2.1. Fluxograma com das características principais dos distúrbios típicos de QEE..... | 9 |
| Figura 2.2. Transitório impulsivo..... | 11 |
| Figura 2.3. Transitório Impulsivo – Forma de onda da tensão..... | 11 |
| Figura 2.4. Transitório Oscilatório – Chaveamento de capacitor com pico de tensão..... | 12 |
| Figura 2.5. Interrupção momentânea de tensão. | 14 |
| Figura 2.6. Afundamento de tensão em 30% | 15 |
| Figura 2.7. Elevação de tensão em 25%..... | 15 |
| Figura 2.8 Efeito do 3°, 5° e 7° harmônico..... | 19 |
| Figura 2.9 Cortes de tensão..... | 20 |
| Figura 2.10. Flutuação de tensão..... | 21 |
| Figura 2.11. Sinais de tensão trifásica: a) Sistema equilibrado; b) Sistema desequilibrado..... | 22 |
| Figura 2.12. Forma de onda ilustrativa dos distúrbios de qualidade da Energia Elétrica..... | 23 |
| Figura 3.1. Digitalização do sinal analógico..... | 25 |
| Figura 3.2. Transformada de <i>Fourier</i> Janelada..... | 28 |
| Figura 3.3. Transformada de <i>Fourier</i> Janelada com $\tau = -1, \tau = 0$ e $\tau = 1$ | 28 |
| Figura 3.4. Funções Janela típicas, $N =$ tamanho da janela..... | 29 |
| Figura 3.5. Princípio do Espectrograma – densidade espectral no plano $t \times f$ | 30 |
| Figura 3.6. Exemplo do Espectrograma – densidade espectral no plano $t \times f \times E$ | 30 |
| Figura 3.7. Comportamento da <i>wavelet Haar</i> | 33 |
| Figura 3.8. <i>Wavelet</i> -mãe (<i>wavelet</i> no ponto $\psi(a, \tau) = \psi(0,0)$) da <i>wavelets Daubechies(db)</i> ... | 34 |
| Figura 3.9. <i>Wavelet</i> -mãe (<i>wavelet</i> no ponto $\psi(a, \tau) = \psi(0,0)$) da <i>wavelets Symmlets (sym)</i> ... | 34 |
| Figura 3.10. <i>Wavelet</i> -mãe <i>Daubechies 2</i> e <i>wavelets</i> -filhas..... | 34 |
| Figura 3.11. Sucessivas filtragens e decomposições de um sinal até o 3° nível..... | 35 |
| Figura 3.12. Frequência fundamental e frequência central, e largura das sub-bandas..... | 36 |

| | |
|---|----|
| Figura 5.1. Sinal sem distúrbio, 1 ciclo do sinal e espectro de frequência..... | 45 |
| Figura 5.2. Espectrograma em duas dimensões e três dimensões..... | 46 |
| Figura 5.3. Semelhança conteúdo espectral da fundamental com sinal aproximação de nível 7..... | 46 |
| Figura 5.4. Sinal referência, um ciclo do sinal referência e decomposição em sete níveis..... | 47 |
| Figura 5.5. Sinal em análise – Detecção de afundamento de tensão pelo oscilógrafo e espectro de frequência do sinal..... | 48 |
| Figura 5.6. Detecção de afundamento de tensão pela TFJ - Espectrograma em duas dimensões e três dimensões..... | 48 |
| Figura 5.7. Detecção de afundamento de tensão pela TW - Decomposição no primeiro nível..... | 49 |
| Figura 5.8. Sinal em análise – Detecção de elevação de tensão pelo oscilógrafo e espectro de frequência do sinal..... | 50 |
| Figura 5.9. Detecção de elevação de tensão pela TFJ - Espectrograma em duas dimensões e três dimensões..... | 50 |
| Figura 5.10. Detecção de elevação de tensão pela TW - Decomposição no primeiro nível. | 51 |
| Figura 5.11. Sinal em análise – Detecção de harmônicos pelo oscilógrafo..... | 52 |
| Figura 5.12. Sinal em análise – Detecção de harmônicos pelo oscilógrafo. Espectro de frequência..... | 52 |
| Figura 5.13. Detecção de harmônicos pela TFJ - Espectrograma em duas dimensões e três dimensões..... | 53 |
| Figura 5.14. Detecção de harmônicos pela TFJ – Confirmação visual..... | 53 |
| Figura 5.15. Detecção de harmônicos pela TW – Distribuição das frequências nos níveis de decomposição. Detalhes até o sétimo nível..... | 54 |
| Figura 5.16. Sinal em análise – Detecção notching pelo oscilógrafo. Detecção e detalhe de um ciclo..... | 55 |
| Figura 5.17. Detecção <i>notching</i> pela TFJ - Espectrograma em duas dimensões e três dimensões..... | 55 |
| Figura 5.18. Detecção de <i>notching</i> pela TW – Detalhes do 1º ao 7º nível..... | 56 |
| Figura 5.19. Sinal em análise – Detecção de flutuação de tensão pelo oscilógrafo..... | 57 |

| | |
|---|----|
| Figura 5.20. Detecção de flutuação de tensão pela TFJ - Espectrograma em duas dimensões, três dimensões e três dimensões em detalhes..... | 57 |
| Figura 5.21. Detecção de flutuação de tensão pela TW - Detalhe 1º Nível..... | 58 |

Lista de Tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 2.1. Variações de tensão de curta duração – Classificação ANEEL/IEEE..... | 13 |
| Tabela 2.2. Variações de tensão de longa duração – Classificação IEEE Std 1159 (1995)..... | 16 |
| Tabela 2.3. Sequência dos Harmônicos. Fonte: Datapool Eletrônica (2010)..... | 19 |
| Tabela 2.4. Resumo: Nível CC, Inter-harmônico, Sub-harmônico e Harmônico. | 19 |
| Tabela 4.1. Erros médios obtidos através da comparação das janelas x distúrbios Média dos Erros %) | 42 |
| Tabela 4.2. Processo de codificação por sub-banda para uma banda de amostragem de 512 amostras por ciclo..... | 44 |
| Tabela 5.1. Eficiência na detecção dos distúrbios | 59 |

Lista de Abreviaturas, Siglas e Símbolos

| | |
|-----------|--|
| a | Parâmetro de escalonamento |
| k | Número inteiro |
| B | Faixa de frequência (largura de banda de frequência) |
| B_a | Faixa de frequência (largura de banda de frequência) do coeficiente de aproximação |
| cA | Coeficiente de aproximação ou escalar |
| cD | Coeficiente de detalhe ou wavelet |
| δ | Impulso unitário |
| E | Energia |
| e | Erro |
| F | Transformada de <i>Fourier</i> |
| f | Frequência |
| f_s | Frequência de amostragem |
| f_0 | Frequência fundamental |
| φ | Função amostral |
| ψ | Função <i>Wavelet</i> |
| g | Função de translação |
| J | Transformada de <i>Fourier</i> Janelada |
| j | Unidade imaginário |
| m | Número inteiro |
| ϕ | Ângulo de defasagem |

| | |
|------------|---|
| ϕ_n | Ângulo de defasagem da componente harmônica |
| N | Intervalo de amostragem |
| n | Número inteiro maior que zero |
| η | Número da ordem |
| p | Número real |
| Q | Frequência relativa ou fator de qualidade |
| q | Número inteiro |
| s | Sinal |
| s_{ava} | Sinal a ser avaliado |
| s_D | Sinal do oscilógrafo |
| s_{fo} | Componente fundamental do sinal |
| s_{in} | Sinal do sistema |
| \bar{s} | Módulo do sinal |
| T | Intervalo de tempo |
| t | Variável tempo |
| τ | Parâmetro de deslocamento da janela (intervalo de translação) |
| W | Transformada <i>Wavelet</i> |
| WC | Transformada <i>Wavelet</i> contínua |
| WD | Transformada <i>Wavelet</i> discreta |
| ω | Frequência angular |
| ω_0 | Frequência angular fundamental |
| x | Função contínua |
| Y_n | Amplitude da componente harmônica ordem n |
| Y_0 | Amplitude da componente contínua |

Resumo

A detecção de distúrbios de qualidade da energia elétrica é uma tarefa muito importante para a proteção do sistema elétrico e manutenção do suprimento de energia. Destarte, ela deve ser feita de forma eficiente, no monitoramento dos sinais de tensão e corrente do sistema com a utilização de métodos de processamento de sinais para identificação destes eventos. O monitoramento proposto nesta dissertação inicia com a decomposição do sinal gerados em uma bancada de simulação de distúrbios na qualidade da energia elétrica e utiliza a Transformada de *Fourier* Janelada (TFJ) e Transformada *Wavelet* (TW). Esses métodos utilizam uma frequência de amostragem é de 30.720 Hz, escolhida para que sejam gerados 512 pontos a cada ciclo de sinal analisado, cuja frequência fundamental é 60 Hz. Desta forma, pode ser feita a discretização de sinal até a frequência de 15.360 Hz, que corresponde a 256º harmônico. Os métodos fazem a comparação do sinal amostrado com o sinal de referência sem distúrbio. O resultado é comparado com a detecção feita na bancada para verificar o erro. A detecção consiste em identificar o evento e pré-classificá-lo sem o auxílio de técnicas complementares. Deste modo, este trabalho apresenta um comparativo do desempenho desses métodos demonstrando que ambos apresentam uma baixa eficiência na detecção de pelo menos um distúrbio na qualidade da energia elétrica.

Palavras-Chave: Transformada de *Fourier* Janelada, Transformada *Wavelet*, Distúrbios de qualidade da energia elétrica, Detecção.

Abstract

The detection of disturbances of power quality is a very important task for system protection and maintenance of electric power supply. In this context, it must be done efficiently, in monitoring for signals of voltages and currents of the system, using signal processing methods for identifying these events. The monitoring proposed here starts with the decomposition of the signal generated in a bench simulation of disturbances in power quality and uses the Fourier Transform Window (TFW) and Wavelet Transform (WT). These methods use a sampling frequency of 30,720 Hz is chosen to be generated 512 points in each cycle of the analyzed signal whose fundamental frequency is 60 Hz. Thus, the discretization can be made to the signal frequency of 15,360 Hz, which corresponds to 256^o harmonic. These methods make comparison of the sampled signal with the reference signal without disturbance. The result is compared with detection done at the bench to verify the error. The detection is to identify the event and pre-classify it without the help of complementary techniques. Thus, this work presents a comparative performance of these methods by demonstrating that both have a low efficiency in detecting at least one disturbance in the power quality.

Keywords: Fourier Transform Window, Wavelet Transform, Disturbances of Electric Power Quality, Detection.

CAPÍTULO 1- INTRODUÇÃO

O uso de cargas não lineares – particularmente para controle do consumo de energia de grandes consumidores (ex.: motores elétricos), controle automático de fator de potência entre outras aplicações – contribuiu sensivelmente para a degradação da qualidade do fornecimento de energia elétrica. As correntes não senoidais das cargas e as flutuações no consumo de energia causam distúrbios elétricos capazes de comprometer o desempenho e a vida útil de equipamentos e afetar ou interromper processos industriais. Essas mesmas cargas não lineares são compostas por dispositivos eletrônicos altamente sensíveis que requerem fonte de alimentação confiáveis, as quais devem ter elevado nível de Qualidade da Energia Elétrica (QEE). O diagnóstico dos distúrbios inicia com a aquisição de amostras do sinal visando o seu estudo através de ferramentas matemáticas utilizadas para a decomposição destes em sinais elementares ou extraíndo características relevantes do sinal.

1.1. Motivação

Os estudos envolvendo distúrbios de energia são conduzidos a partir da monitoração dos sinais de tensão e/ou corrente do sistema elétrico e, posteriormente, sua decomposição em sinais elementares para que se possa entender as causas dos distúrbios e seus impactos sobre o sistema elétrico como um todo. A presença dos eventos da qualidade de energia elétrica no sistema elétrico torna-se necessário caracterizar os sinais no domínio do tempo e da frequência. Para estes propósitos, são utilizadas diversas técnicas de processamento de sinais, dentre as quais a Transformada de *Fourier* Janelada (TFJ) e Transformada *Wavelet* (TW).

A TFJ é uma poderosa ferramenta matemática utilizada principalmente para se obter informações fundamentais para caracterização de fenômenos ligados à qualidade da energia elétrica, com a obtenção de informações no domínio do tempo e da frequência. É a Transformada de *Fourier* (TF) incluindo a relação no domínio do tempo.

A TW é outra poderosa ferramenta matemática que propicia a extração das características da forma de onda com distúrbios em problema de Qualidade da Energia Elétrica (QEE). Em síntese, é a análise de dados de acordo com escalas variáveis no domínio do tempo e da frequência. Ela é bem aceita para uma ampla faixa de sinais que não são

periódicos e podem conter ambos os componentes senoidais e de impulso, como os sinais típicos nos transitórios de sistemas de potência. A Transformada *Wavelet* concentra-se em pequenos intervalos de tempo, para componentes de alta frequência, e em longos intervalos de tempo, para componentes de baixa frequência, com isso, melhora-se a análise de sinais caracterizados por impulsos e oscilações localizadas como os componentes sub harmônicos.

1.2. Objetivos

Este trabalho tem como objetivo principal:

- Fazer uma análise comparativa da Transformada de *Fourier* Janelada (TFJ) e Transformada *Wavelet* (TW) para decomposição de sinais elétricos;
- Avaliar o desempenho dos métodos utilizando simulações de distúrbios para diferentes condições de operação de um sistema elétrico.

Como objetivo suplementar, pretende-se ainda:

- Realizar simulações para detecção do instante de ocorrência dos seguintes distúrbios: afundamento de tensão, elevação de tensão, harmônicos, *notching* e flutuação de tensão;
- Produzir resultados da aplicação dos métodos de Transformada de *Fourier* Janelada (TFJ) e Transformada *Wavelet* (TW) na detecção do distúrbio em tempo real;
- Produzir exemplos didáticos para construção do conhecimento em análise de distúrbios de Qualidade da Energia Elétrica.

1.3. Contribuições

Durante o estudo para verificação de distúrbios da qualidade de energia elétrica as ferramentas passam pelas etapas de detecção e classificação. A etapa de detecção trata-se da percepção da existência do evento de qualidade da energia elétrica finalizando em uma pré-classificação. Em seguida é classificado o distúrbio com a comparação a padrões de referência

dos distúrbios. As duas ferramentas são auxiliadas por métodos complementares como filtros digitais, Redes Neurais Artificiais, técnica *FUZZY*, etc. para classificação do distúrbio após detecção nos seguintes casos: A TFJ quando precisa classificar eventos de curta duração, de características temporárias e transitórias e a TW para distúrbio cuja concentração da energia analisada conforme teorema de *Parseval* do sinal em estudo é semelhante ao sinal de referência. O destaque desse trabalho é a avaliação do desempenho da TF e da TW na etapa de detecção, sem utilização de ferramentas e métodos auxiliares.

1.4. Metodologia

O método é fundamentado no monitoramento do sistema com a aplicação da Transformada de *Fourier* Janelada (TFJ) e da Transformada *Wavelet* (TW) para decomposição do sinal elétrico amostrado do sistema. As ferramentas de forma independente, detectam os distúrbios nos sinais quando comparado o sinal decomposto com um sinal de referência.

A frequência de amostragem é de 30.720 Hz. Ela foi escolhida para que sejam gerados 512 pontos a cada ciclo de sinal da rede, cuja frequência fundamental é 60 Hz. Desta forma, pode ser feita a discretização correta de sinais até a frequência de 15.360 Hz, que corresponde a 256º harmônico conforme teorema de *Nyquist*.

Este procedimento torna-se viável a comparação entre as amostras caracterizadas em cada janela sob análise com o sinal da fundamental (sinal de referência), seja pela TFJ ou pela TW, sendo possível a detecção do momento inicial do distúrbio e, conseqüentemente, sua localização no tempo (ANEEL, 2001, BELISÁRIO; BAHIENSE; OLIVEIRA 2003).

Os distúrbios são simulados na bancada de teste QEE 2910 da Datapool. O sinal a ser analisado é o registro oscilográfico. Também são retiradas as informações sobre a frequência fundamental e sobre a detecção do evento. Estes são, respectivamente, sinal para análise de presença do distúrbio e sinal de verificação do erro do instante de detecção.

Os dois métodos (TFJ e TW) fazem a identificação da ocorrência do distúrbio utilizando-se informações da própria transformada e do instante de descontinuidade da energia contida no sinal analisado, conforme relação de energia de cada transformada (equações 1.1, 1.2 e 1.3):

$$E(x) = |F(x)|^2. \quad (1.1)$$

Segundo teorema de *Parseval*, $E(x)$ é a energia contida na função x e $F(x)$ é a Transformada de *Fourier* da função.

Para a TFJ:

$$E(x) = |J(x, \tau)|^2, \quad (1.2)$$

onde J Transformada de *Fourier* Janelada da função e τ é o deslocamento (intervalo de translação) da janela.

E para a TW:

$$E(f) = |W(a, \tau)|^2, \quad (1.3)$$

onde W é a Transformada *Wavelet* da função e a é o escalonamento.

A forma simplificada do algoritmo de detecção do distúrbio e registro do erro é mostrado na Figura 1.1, onde s_{in} é o sinal do sistema em regime permanente, s_{ava} é o sinal a ser analisado pelo método já reproduzido durante a detecção no oscilógrafo, s_D é o sinal já analisado do oscilógrafo. Ele é composto pelas características do distúrbio. O sinal senoidal na frequência fundamental s_{f0} é reproduzido com as características extraídas pelo método utilizado. O erro e_{DTFJ} caracteriza a existência do evento pela TFJ e o erro e_{DTW} caracteriza a existência do evento pela TW.

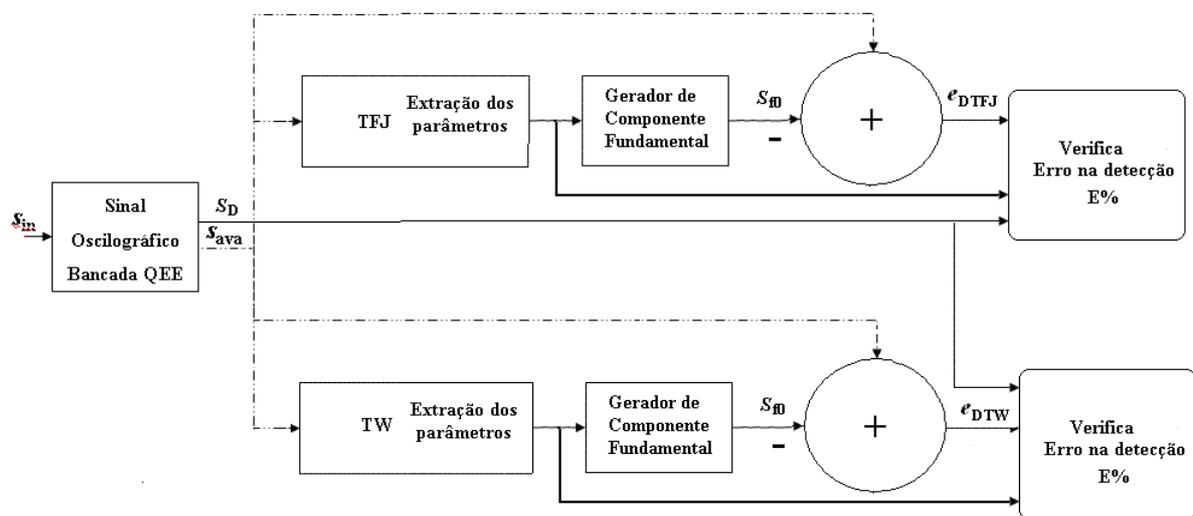


Figura 1.1. Modelo do algoritmo de detecção do distúrbio e registro do erro.

A aplicação da TFJ tem o janelamento dos sinais feito utilizando-se janelas de *Kaiser* (com $\alpha = 10$) de um ciclo, com passo de deslocamento de meio ciclo (ANDO JÚNIOR, 2009, IEC 61000-4-30, 2003, ARRUDA, 2003). O resultado da aplicação do método é visualizado pelo uso do gráfico do espectro de frequência, gráficos em duas dimensões (tempo x frequência) e três dimensões (tempo x frequência x energia), retirados do método pela função *specgram* do aplicativo *MatLab*®7.

A detecção do evento com a TW é realizada mediante aplicação do algoritmo de Análise multiresolução (AMR). A *wavelet*-mãe empregada é a *Daubechies* de ordem 5 (db5) conforme sugerido por Delmont Filho (2007) e demais resultados dos trabalhos revisados que serão vistos no capítulo 4. Utilizando o método da TW são analisadas as variações de energias janeladas dos coeficientes *wavelet* até sétima escala, conforme frequência de amostragem e frequência fundamental mediante aplicação do teorema de *Nyquist* (MISITI *et al*, 2008) e comparada com a do sinal a ser avaliado.

Ambos os métodos tem os erros relativos observados na estimação dos tempos de detecção e são tabulados e comparados. Como resultado tem-se a eficiência e desempenho de cada método.

1.5. Descrição do sistema analisado

O sistema em análise é composto pela bancada QEE2910 da Datapool. A bancada é um *kit* educacional de Qualidade da Energia Elétrica que traz, guardadas as proporções, a réplica de um sistema elétrico, equipado com: módulo de geração arbitrária de sinais; módulo para aquisição e análises de sinais; carga não linear (SCR - *Silicon Controlled Rectifier*), carga resistiva, carga indutiva e carga capacitiva. Cada módulo representa respectivamente os seguintes componentes do sistema elétrico: geração e transmissão de energia; oscilógrafos/qualímetros; cargas e dispositivos de acionamento e controle presentes no sistemas elétricos tais como dispositivos de acionamento de partida suave e motor de indução.

A bancada permite a geração de distúrbios tais como afundamento instantâneo, elevação momentânea, interrupção temporária, ruído, harmônico, flutuação de tensão e variação de frequência que são detectados e modelados pelo sistema de aquisição e análise de sinais nos domínios do tempo e da frequência (oscilógrafo/qualímetro). Ela fornece também a medição e visualização da forma de onda dos sinais de tensão e corrente em tempo real, modelando o sinal analisado. A Figura 1.2 ilustra diagrama elétrico simplificado da bancada QEE2910.

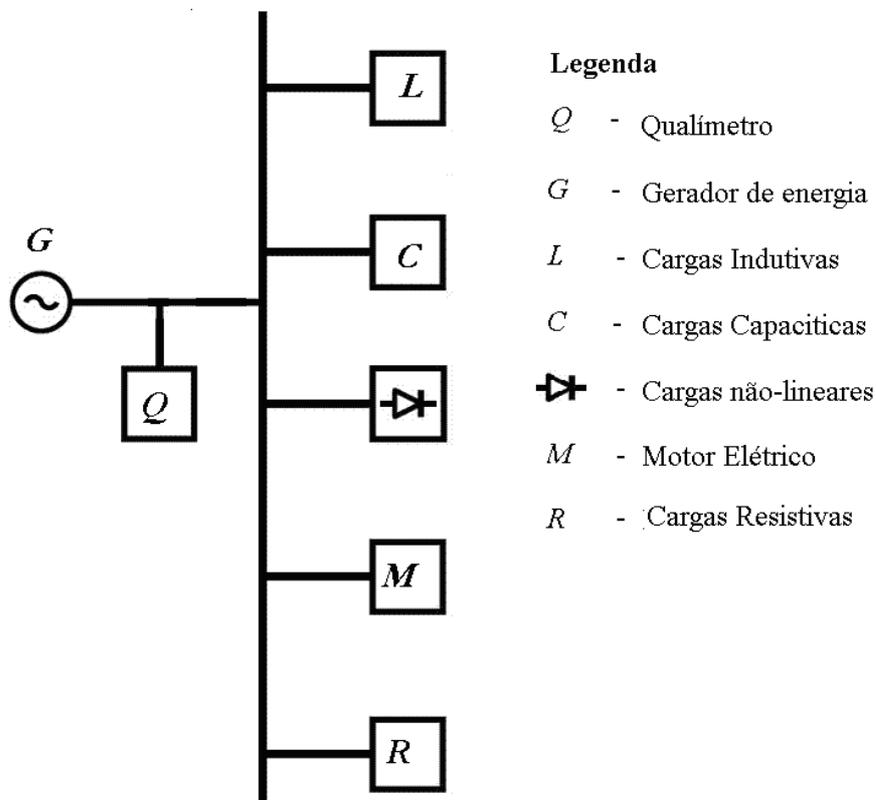


Figura 1.2. Diagrama do sistema elétrico de analisado.

1.6. Orgnização da dissertação

O capítulo 2 apresenta toda a teoria referente à Qualidade da Energia Elétrica. O capítulo 3, referente aos métodos de detecção e revisão bibliográfica, apresenta de forma ampla a fundamentação teórica sobre Transformada de *Fourier* Janelada e Transformada *Wavelet* e respectivas publicações mais significativas para o desenvolvimento do projeto com os comentários sobre seus conteúdos. Em seguida, o capítulo 4 mostra a validação dos métodos propostos na dissertação. No capítulo 5 são mostrados os resultados obtidos através

da aplicação dos métodos. O capítulo final refere-se às principais conclusões e trabalhos futuros que possam ser realizados.

CAPÍTULO 2-DISTÚRBIOS DE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

O fluxograma da Figura 2.1 é uma compilação dos distúrbios típicos de QEE e uma breve revisão das suas características.

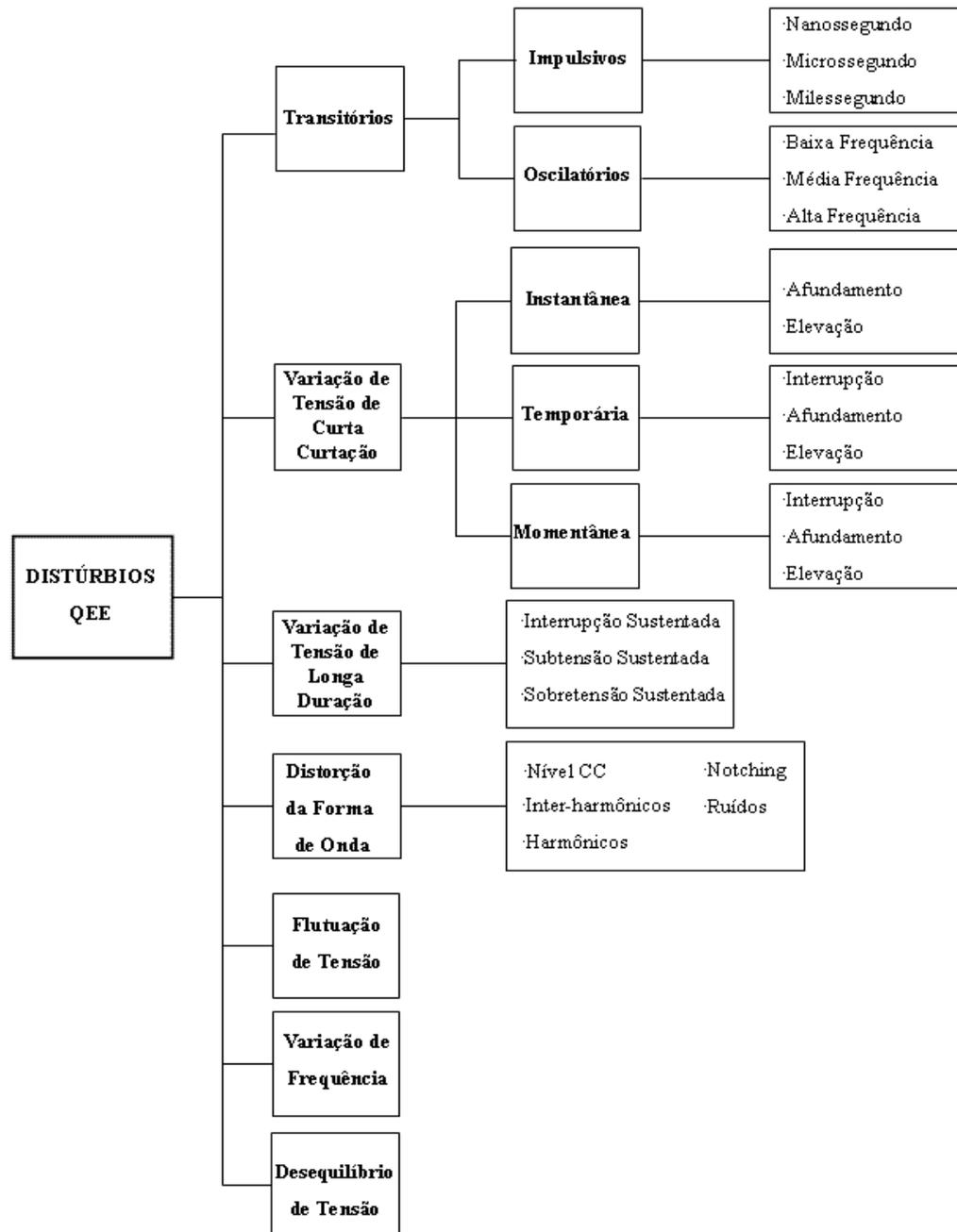


Figura 2.1. Fluxograma com das características principais dos distúrbios típicos de QEE.

A Qualidade da Energia Elétrica de um sistema é a compatibilidade entre a fonte de energia e o equipamento elétrico ligado a esta fonte. Essa energia fornecida deve atender às necessidades de quem a utiliza (MARTINHO, 2009). No sistema elétrico brasileiro está diretamente ligada ao fornecimento de um sinal elétrico no padrão senoidal de amplitude constante e frequência constante de 60 Hz.

Em função de características elétricas operacionais do sistema tais como presença de variação da demanda – carga –, assimetria na ligação de carga, falta no sistema, partida de grandes cargas, presença de cargas não-lineares, etc., ocorrem alterações no padrão de fornecimento, característica intrínseca a QEE. Essas alterações podem permanecer no regime permanente ou durar um curto período. Destarte, faz-se necessária a existência de indicadores (KAGAN; ROBBA; SCHMIDT, 2009; ANDO JÚNIOR, 2009). O sinal elétrico com alteração além dos limites aceitáveis desses indicadores é classificado como sinal elétrico com distúrbio. A seguir é discorrido sucintamente cada um deles com o objetivo de fornecer as referências dos limites aceitáveis das alterações.

2.1. Transitório

Transitório é o distúrbio de QEE que resulta em variações instantâneas de tensão e de correntes não projetados no sistema elétrico que resulta em alterações súbitas nas condições operacionais. É classificado em impulsivo e oscilatório (DUGAN *et al*, 1996).

2.1.1. Transitório Impulsivo

É a alteração unidirecional em polaridade (negativa ou positiva) do sinal. O tempo de subida ou descida do impulso que o caracteriza e revela o seu conteúdo espectral. São classificados em:

- Nanossegundo – conteúdo espectral típico de 5 nanossegundos e duração típica menor que 50 nanossegundos;
- Microssegundo – conteúdo espectral típico de 1 microssegundo e duração típica entre 50 nanossegundos e 1 milissegundo;

- Milissegundo – conteúdo espectral típico de 100 microssegundos e duração típica maior que 1 milissegundo.

A Figura 2.2 mostra o sinal típico de um transitório impulsivo. A amplitude do sinal pode apresentar pico de corrente de dezenas de quiloampères.

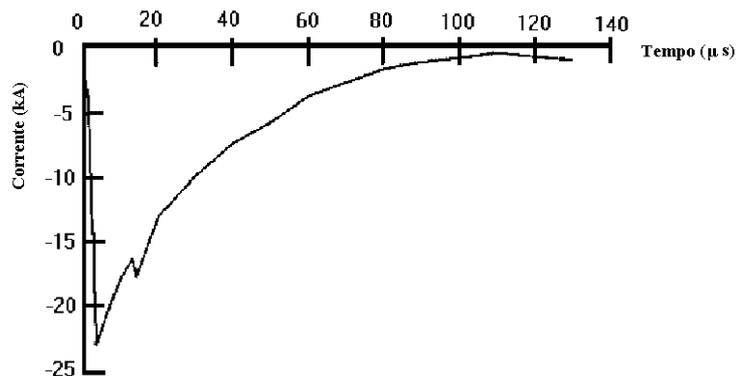


Figura 2.2. Transitório impulsivo. Fonte: Dugan; McGranaghan; Beathy (1996).

Como consequência da variação brusca do sinal de corrente, sobretensões transitórias que surgem pelo sistema elétrico. A Figura 2.3 exemplifica o efeito da variação de tensão decorrente de uma descarga atmosférica.

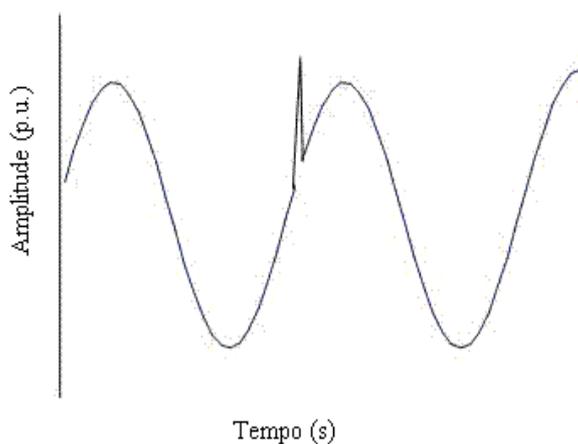


Figura 2.3. Transitório Impulsivo – Forma de onda da tensão. Fonte: Araújo e Neves (2005).

2.1.2. Transitório Oscilatório

É a alteração brusca no padrão do sinal nos dois sentidos (negativo ou positivo). São classificados em:

- Alta frequência - acima de 500 kHz e duração de milissegundos. É, em geral, uma reação do sistema a um transitório impulsivo;
- Média frequência - entre 5 kHz e 500 kHz, duração de dezenas de milissegundos;
- Baixa frequência - inferior a 5 kHz e duração de 0,3 a 50 milissegundos.

A amplitude típica é de 2 p.u., podendo ampliar para 4 p.u. conforme ressonância no circuito em questão. A Figura 2.4 representativa do transitório.

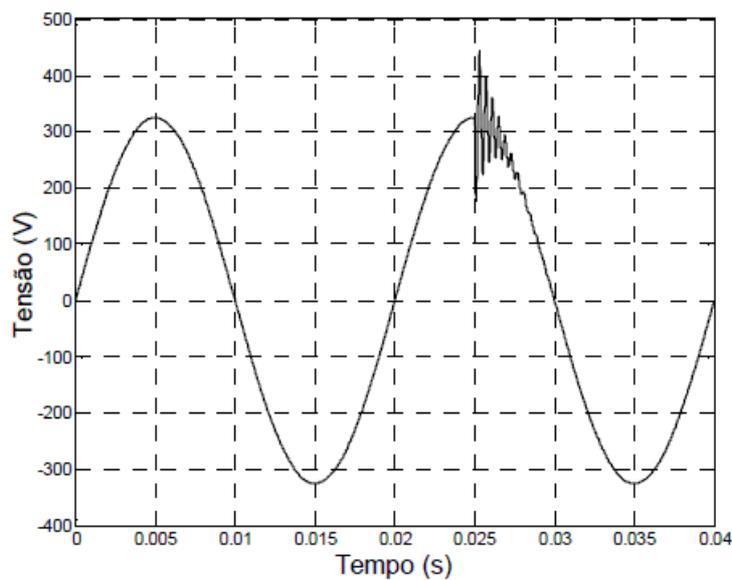


Figura 2.4. Transitório Oscilatório – Chaveamento de capacitor com pico de tensão. Fonte Araújo e Neves (2005) com adaptações.

2.2. Variações de Tensão de Curta Duração.

Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD) são fenômenos que apresentam desvios significativos no valor eficaz de tensão em um curto intervalo de tempo. A legislação internacional (IEEE STD 1195, 1995; IEEE STD 493, 1997) em complementar a legislação brasileira (ANEEL 2001, 2008) classifica a VTCD conforme sua duração e tipo de evento como descrito na Tabela.

Tabela 2.1. Variações de tensão de curta duração – Classificação ANEEL/IEEE.

| Classificação | Denominação | Duração do Evento | Magnitude da Tensão |
|--------------------------------|-----------------------------------|------------------------|---------------------|
| Variação Instantânea de Tensão | Afundamento instantâneo de Tensão | 0,5 a 30 ciclos | 0,1p.u. a 0,9p.u. |
| | Elevação instantâneo de Tensão | | 1,1p.u. a 1,8p.u. |
| Variação Momentânea de Tensão | Interrupção momentânea de Tensão | 0,5 ciclo a 3 segundos | Inferior a 0,1p.u. |
| | Afundamento momentâneo de Tensão | 30 ciclos a 3 segundos | 0,1p.u. a 0,9p.u. |
| | Elevação momentânea de Tensão | | 1,1p.u. a 1,8p.u. |
| Variação Temporária de Tensão | Interrupção temporária de Tensão | 3 segundos a 1 minuto | Inferior a 0,1p.u. |
| | Afundamento temporário de Tensão | | 0,1p.u. a 0,9p.u. |
| | Elevação temporária de Tensão | | 1,1p.u. a 1,2p.u. |

O tempo de uma VTCD no sistema trifásico deve ser caracterizado pelo início do primeiro evento que transpõe determinado limite até o instante em que o último dos eventos retorna para determinado limite. Assim, eventos simultâneos são agregados compondo um único evento.

2.2.1. Interrupção de Tensão

Interrupção de Tensão é a redução de tensão de alimentação para valor menor que 0,1p.u. por um tempo menor que 1 minuto. A Figura 2.5 ilustra uma interrupção momentânea de tensão.

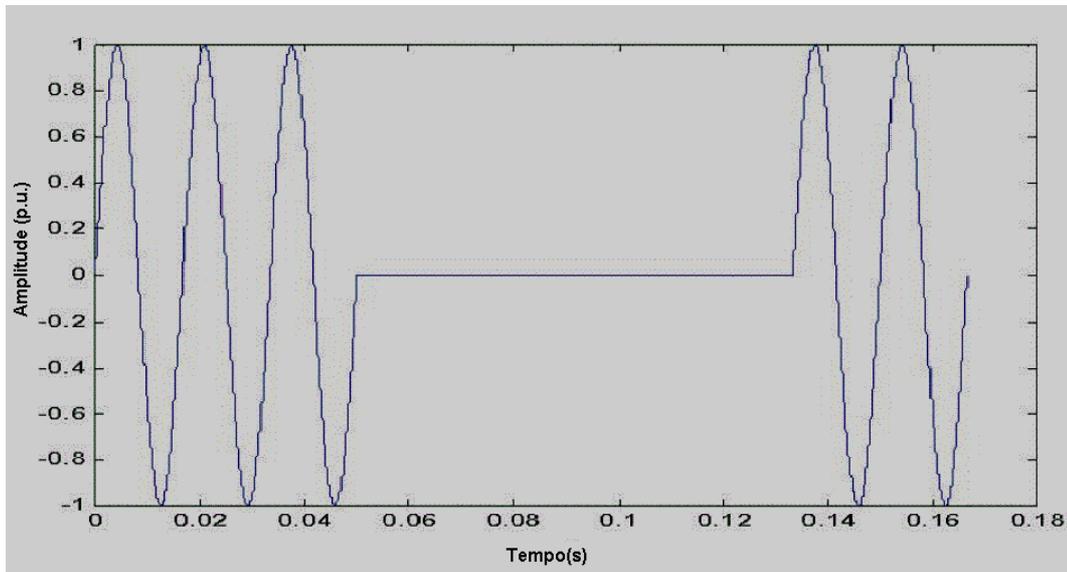


Figura 2.5. Interrupção momentânea de tensão. Fonte: Datapool Eletrônica (2010).

Algumas interrupções podem ser precedidas por uma queda rápida da tensão (*voltage dip*) quando estas interrupções são devidas à faltas no sistema.

2.2.2. Afundamento de Tensão

Afundamento de tensão é a queda brusca da tensão para um valor entre 0,1 p.u. e 0,9 p.u., na frequência fundamental, com duração entre 0,5 ciclo a 1 minuto.

Voltage Dip e *Voltage Sag*, apesar de serem usados para definir o mesmo fenômeno, apresentam originalmente definições diferentes. *Voltage Dip*, conforme o IEC 61000-2-8 (2002) e IEC 61000-4-34 (2005), é o valor que a tensão assume no ponto de interesse. Está relacionada ao valor da queda no instante analisada. Conforme o IEEE Std 1159 (1995) e IEEE Std 493 (1997) *Voltage Sag* é a variação de tensão que ocorre quando se registra um afundamento. *Voltage Sag* é definido no IEC 61000-2-8 (2002) e IEC 61000-4-34 (2005) como a profundidade do afundamento (*depth of voltage dip*). Portanto, para este trabalho, o termo *Dip* descreve melhor o fenômeno de afundamento de tensão. A Figura 2.6 exemplifica um *Dip* instantâneo de tensão.

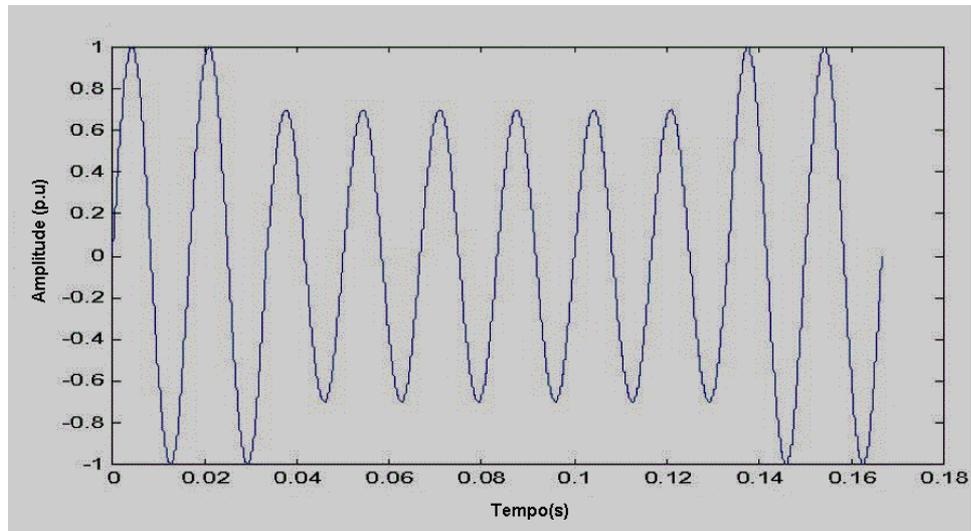


Figura 2.6. Afundamento de tensão em 30% . Fonte: Datapool Eletrônica (2010).

2.2.3. Elevação de Tensão

São elevações de tensão (*Swell*) acima de 1,1p.u. com duração entre 0,5 ciclo e 1 minuto. A Figura 2.7 exemplifica um *Swell* de 1,25 p.u.

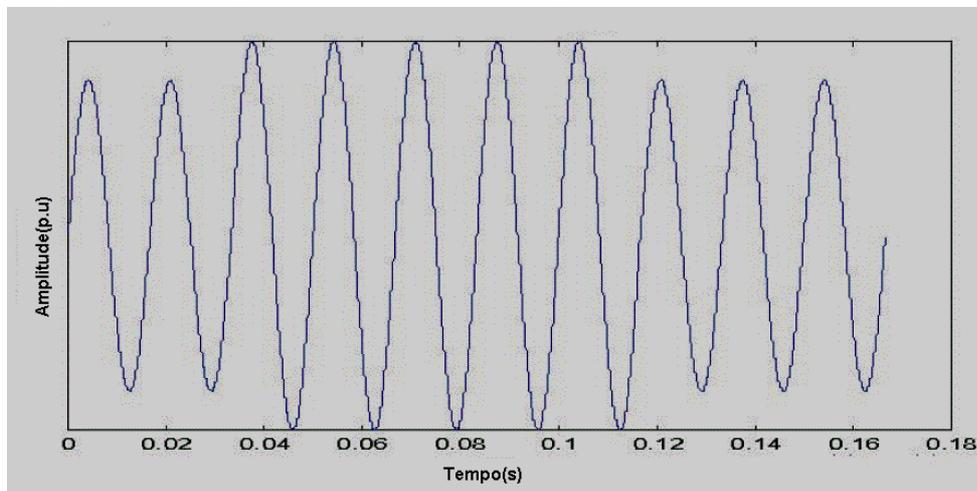


Figura 2.7. Elevação de tensão em 25%. Fonte: Datapool Eletrônica (2010).

2.3. Variações de Tensão de Longa Duração

As Variações de Tensão de Longa Duração são caracterizadas como aumento do valor da tensão por duração maior que 1 minuto. O IEEE Std 1159 (1995) classifica as variações de tensão de longa duração conforme a Tabela 2.2.

Tabela 2.2. Variações de tensão de longa duração – Classificação IEEE Std 1159 (1995).

| Classificação | Denominação | Duração do Evento | Magnitude da Tensão |
|---|---|--------------------|---|
| Variação de Tensão de Longa Duração (<i>Long Duration Variation</i>) | Interrupção Sustentada da Tensão (<i>Sustained Interruption</i>) | Maior que 1 minuto | 0 p.u. |
| | Subtensão Sustentada (<i>Undervoltage</i>) | Maior que 1 minuto | Superior ou igual a 0,8 p.u. e inferior ou igual a 0,9 p.u. |
| | Sobretensão Sustentada (<i>Overvoltage</i>) | Maior que 1 minuto | Superior ou igual a 1,1 p.u. e inferior ou igual a 1,2 p.u. |

2.3.1. Interrupção Sustentada

A Interrupção Sustentada é a ausência de tensão com duração maior que 1 minuto (*Sustained Interruption*) ou 3 minutos (*Long Interruption*), dependendo da norma em questão.

O IEC 61000-4-11 (2004) classifica como Interrupção de Tensão de Longa Duração (*Long Interruption*) como sendo um evento de duração maior que 3 minutos e de amplitude inferior a 0,1 p.u.

2.3.2. Subtensão Sustentada

Subtensão (*undervoltage*) é redução para valores entre 0,8 p.u. a 0,9 p.u. da tensão com duração maior que 1 minuto (IEEE STD 1159, 1995; IEC 61000-4-11, 2004).

2.3.3. Sobretensão Sustentada

Sobretensão (*overvoltage*) é a elevação para valores entre 1,1 p.u. a 1,2 p.u. da tensão com duração maior que 1 minuto.

2.4. Distorção da Forma de Onda

A Distorção da Forma de Onda é o distúrbio de Qualidade da Energia Elétrica caracterizado pelo desvio da situação de funcionamento em regime permanente. É a deformação permanente da onda senoidal de tensão ou corrente em função de cargas não-lineares. Segundo Dugan *et al* (1996) e IEC 61000-4-11 (2004) ela se classifica em Nível CC, Inter-harmônicos, Harmônicos e Flutuação de Tensão.

2.4.1. Nível CC

Nível CC ou *Direct Current* (DC) *offset*, é definido como um deslocamento do sinal de tensão ou corrente alternada (CA) de um nível de tensão ou corrente contínua (CC). A referência a um nível CC implica na componente de frequência nula de um sinal com certo conteúdo harmônico, ao passo que o deslocamento CC pode ocorrer da superposição linear de um sinal CA e outro contínuo. De qualquer maneira, o efeito final é o mesmo, mas os tratamentos corretivos podem ser diferentes. Na prática, o fenômeno é principalmente devido à retificação em meia onda. Na ocorrência do evento a corrente CC circula pelo circuito CA.

2.4.2. Inter-harmônico

Inter-harmônicos são tensões ou correntes com uma frequência que não é múltipla inteira da frequência fundamental de alimentação. Os inter-harmônicos ganharam interesse recentemente uma vez que o uso generalizado de sistemas eletrônicos causou um aumento da sua intensidade. A ordem de um inter-harmônico é determinada pela relação entre a frequência do inter-harmônico e a frequência da fundamental. Se esse valor é menor que a unidade pode-se dizer que se trata de uma frequência sub-harmônica.

2.4.3. Harmônico

É a combinação das componentes instantâneas dos valores de tensões ou correntes senoidais com as frequências múltiplas e inteiras da fundamental. A soma dos valores instantâneos do sinal fundamental com os sinais de frequências múltiplas resulta no sinal distorcido do sinal original padrão (DIAS, 2002). Eles distorcem a forma de onda da tensão e da corrente passando a ter um comportamento não-senoidal, permanecendo no regime permanente.

A soma dos valores instantâneos do sinal fundamental com os sinais de frequências múltiplas resulta no sinal original. Esta técnica (ou decomposição) matemática é denominada Série de *Fourier*. Com desenvolvimentos em Séries de *Fourier*, é possível decompor um sinal de tensão ou de corrente em um somatório de ondas senoidais com frequências múltiplas da fundamental, cuja representação é dada pela equação 2.1:

$$s(t) = Y_0 + \sum_{n=1}^{\infty} Y_n \sqrt{2} \text{sen}(n\omega_0 t - \phi_n), \quad (2.1)$$

onde Y_0 é valor da componente CC, Y_n é o valor eficaz da componente harmônica de ordem n , ω_n é a frequência angular do sinal, ϕ_n é defasagem da componente harmônica de ordem n .

A Figura 2.8 é de um sinal com presença de harmônicos.

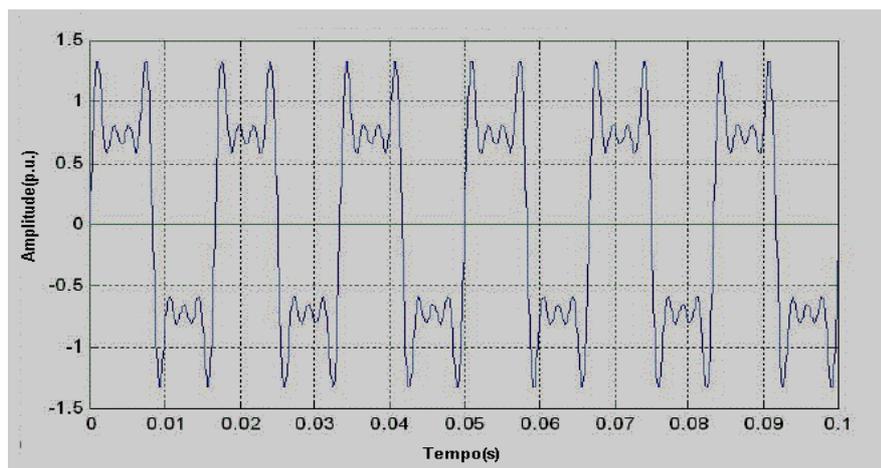


Figura 2.8. Efeito do 3º, 5º e 7º harmônico. Fonte: Datapool Eletrônica (2010).

A ordem de um harmônico está relacionada com o valor múltiplo da frequência fundamental (2º, 3º,...). Por exemplo, o 3º harmônico, ou harmônico de ordem 3, tem uma

frequência (180 Hz) três vezes superior à frequência fundamental (Tabela 2.3). A sequência está relacionada com o sentido de rotação do campo girante criado pelo respectivo harmônico, com relação ao campo girante induzido pela componente fundamental. Isto é particularmente importante nos motores de indução, uma vez que os harmônicos de sequência positiva (+) induzem campos magnéticos que giram no sentido do campo magnético fundamental e os harmônicos de sequência negativa (-) induzem campos magnéticos que giram em sentido oposto ao do campo magnético fundamental, dando origem a um torque contrário. Os harmônicos de sequência zero induzem campos magnéticos de resultante nula.

Tabela 2.3. Sequência dos Harmônicos. Fonte: Datapool Eletrônica (2010).

| Ordem | Fundamental | 2° | 3° | 4° | 5° | 6° | 7° | 8° | ... | n° |
|-----------------|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---------------|
| Frequência (Hz) | 60 | 120 | 180 | 240 | 300 | 360 | 420 | 480 | ... | $i \times 60$ |
| Sequencia | + | - | 0 | + | - | 0 | + | - | ... | ... |

Os harmônicos de ordem ímpar são muito mais significativos que os harmônicos de ordem par. Os harmônicos de ordem par devem-se geralmente à assimetria da corrente ou da tensão na presença de uma componente contínua.

A Tabela 2.4 resume as três primeiras distorções da forma de onda.

Tabela 2.4. Resumo: Nível CC, Inter-harmônico, Sub-harmônico e Harmônico.

| | |
|--|---|
| Nível CC | $f = pf_0$, para $p = 0$. |
| Inter-harmônico | $f \neq pf_0$, onde p é número não inteiro maior que zero. |
| Sub-harmônico | $f = pf_0$, para $0 < p < 1$. |
| Harmônico | $f = pf_0$, onde p é número inteiro maior que zero. |
| f_0 é a frequência fundamental do sinal. | |

2.4.4. Notching

Notchings ou cortes são distúrbios de tensão causados pela operação normal de equipamentos de eletrônica de potência quando a corrente é comutada de uma fase para outra. A intensidade resultante é função das impedâncias envolvidas. Este fenômeno pode ser detectado por meio da informação do conteúdo harmônico da tensão afetada. As componentes de frequência associadas com os *notchings* são de alto valor e, desta forma, não podem ser medidas por equipamentos convencionais. A Figura 2.9 ilustra este fenômeno. Os indicadores são caracterizados pelas seguintes propriedades:

- Profundidade – mede a amplitude média dos cortes nas tensões de linha;
- Largura – é diretamente proporcional ao tempo de comutação;
- Área – largura x profundidade;
- Posição – localização do corte na forma de onda de tensão.

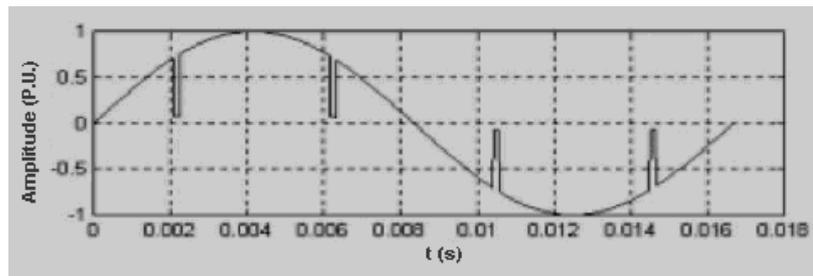


Figura 2.9. Cortes de tensão. Fonte: Datapool Eletrônica (2010).

2.4.5. Ruído

Ruído é qualquer sinal indesejado, geralmente com uma distribuição espectral abaixo de 200 kHz, presente nas linhas de suprimento de energia superpostas a tensão ou correntes de fases ou encontradas em condutores de neutro em linha e que não pode ser classificado como harmônico ou transitório.

2.5. Flutuação de Tensão

Flutuação de tensão é uma variação aleatória, repetitiva ou esporádica do valor de tensão, tipicamente entre 0,9 p.u. e 1,1 p.u. A Figura 2.10 mostra um sinal de tensão modulado por um sinal de 8,5 Hz e amplitude de 0,1 p.u. de tensão.

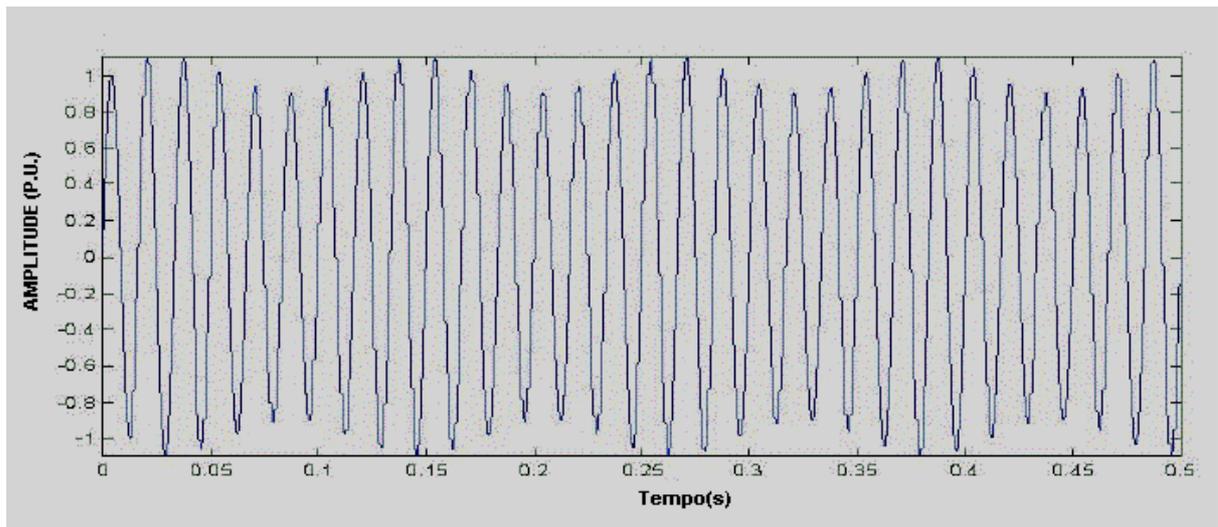


Figura 2.10. Flutuação de tensão. Fonte: Datapool Eletrônica (2010).

Também é chamada de *flicker*, que na verdade é o efeito visual dessa variação. Segundo o IEC 61000-4-15 (1999) *flicker* é a sensação de instabilidade visual provocada por um estímulo luminoso, cuja luminância ou repartição espectral flutua no tempo. O evento se torna mais crítico em lâmpadas incandescentes. Por isso, a medição do fenômeno de flutuação de tensão (*flickermeter*) utiliza como referência o efeito causado em uma lâmpada incandescente de 60 W.

2.6. Variações de Frequência

Em sistemas elétricos, a frequência está diretamente relacionada com a rotação dos geradores do sistema. Em qualquer instante, esta depende do balanço entre a carga e a geração disponível. Pequenas variações de frequência poderão ocorrer quando este equilíbrio é alterado. A intensidade do desvio de frequência e sua duração dependem das características da carga e da resposta do sistema de controle da geração frente às variações da carga. Um valor máximo aceito dessa variação para se ter energia de boa qualidade é de 0,5 Hz.

2.7. Desequilíbrio de Tensão

O desequilíbrio ou assimetria é uma situação decorrente da forma de utilização do sistema elétrico, em que as tensões ou correntes apresentam amplitudes desiguais entre si.

Um sistema trifásico equilibrado é caracterizado por três tensões senoidais com amplitudes iguais e defasamento de 120° entre si, tal como ilustra a Figura 2.11.a. Porém, devido a diversos fatores, os sinais de tensões podem apresentar deformações como ilustrado na Figura 2.11.b.

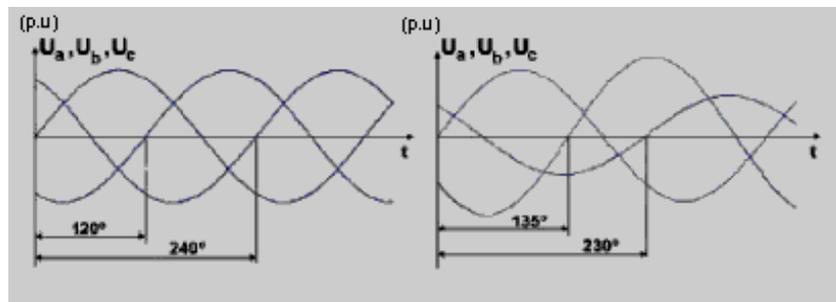


Figura 2.11. Sinais de tensão trifásica: a) Sistema equilibrado; b) Sistema desequilibrado.
Fonte: Datapool Eletrônica (2010).

Pode-se avaliar o grau de assimetria em regime permanente de um sistema trifásico de duas maneiras:

a) Componentes Simétricas

Um sistema desequilibrado pode ser decomposto em três sistemas equilibrados: de sequência positiva; de sequência negativa; e de sequência zero. O nível de desbalanceamento pode ser avaliado relacionando-se as sequências zero ou a negativa com a positiva. Como os sistemas de geração só fornecem sequências positivas, as duas outras só passam a existir se houver desequilíbrio no circuito. Logo, a comparação entre as sequências acima mencionadas é um indicador da medida do distúrbio.

b) Relação entre Valores Mínimos e Médios

Uma forma simplificada de se quantificar o desequilíbrio é comparar o menor valor medido das tensões ou correntes de fase com a média das grandezas das três fases.

Resumindo os distúrbios e suas características têm-se a Figura 2.12 referente à ilustração dos distúrbios citados.

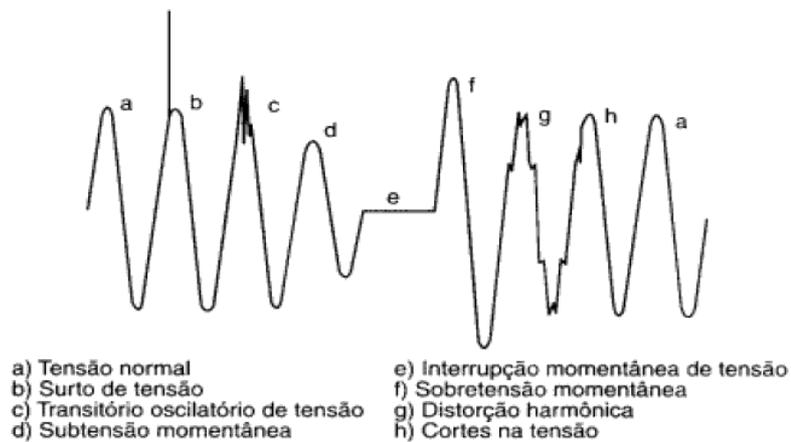


Figura 2.12. Forma de onda ilustrativa dos distúrbios de qualidade da Energia Elétrica. Fonte: Franco (2010).

CAPÍTULO 3 - MÉTODOS DE DETECÇÃO E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A interpretação correta dos resultados obtidos por um equipamento que se propõe a detectar a presença dos distúrbios de Qualidade da Energia Elétrica (QEE) está diretamente ligada com o entendimento da metodologia utilizada pelo equipamento. Diferentes métodos de cálculo e parametrização resultarão em diferentes respostas e conseqüentemente diferentes interpretações. Conhecer as técnicas utilizadas para o processamento dos sinais, bem como as diferentes respostas obtidas em cada tipo é imprescindível (GONÇALVES *et al*, 2007).

Recursos como Valor RMS (*Root Mean Square*), Transformada de *Fourier* (TF), Transformada *Wavelet* (TW) e outros, são utilizados para extrair características de cada tipo de sinal. Todos esses processamentos são realizados sobre o sinal discretizado do sistema elétrico que armazena a amostra do sinal a ser analisado.

Considerando que o sinal $s(t)$ do sistema elétrico monitorado apresenta parâmetros que podem variar com o tempo e é representado conforme equação 3.1:

$$s(t) = A \text{sen}(\omega_0 t - \phi) , \quad (3.1)$$

onde A é o valor instantâneo da amplitude, ω_0 é a frequência fundamental e ϕ é a defasagem angular.

A amostra do sinal a ser analisado no tempo deve ser discretizado conforme equação 3.2 e Figura 3.1.

$$\bar{s}(t) = \sum_n x(nT) \delta(t - nT) , \quad (3.2)$$

onde $x(nT)$ é o valor instantâneo da amostra de ordem n , T é o intervalo de amostragem e $\delta(t - nT)$ é o trem de impulso repetido a cada T segundos.

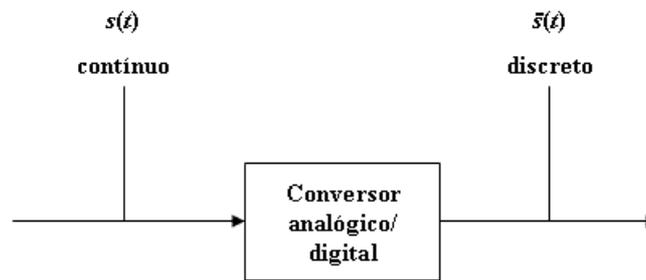


Figura 3.1. Digitalização do sinal analógico.

Segundo teorema da amostragem (teorema de *Nyquist*), para que a discretização do sinal possa reconstruí-lo ou representá-lo, o intervalo de amostragem T do conversor analógico/digital tem que atender a equação (3.3):

$$T < \frac{1}{2B}, \quad (3.3)$$

onde B é a faixa de frequência onde existe o espectro de frequência de $s(t)$ (LATHI, 2007). B também é, no mínimo, a frequência fundamental f_0 .

A seguir é discorrido o resumo dos principais tipos de técnica de processamento.

3.1. Valor RMS (*Root Mean Square*)

O valor RMS é uma das técnicas mais utilizadas para a detecção dos distúrbios da energia elétrica. A norma IEC 61000-4-30 (2003) define que os equipamentos devem medir afundamentos e elevações de tensão utilizando janelas discretas de um ciclo com atualização a cada meio ciclo. Para o cálculo do valor eficaz é usada uma janela de duração múltipla de meio ciclo da frequência fundamental. Isto implica em um cálculo de raiz quadrado para cada fase do sinal a cada amostra (FEREIRA, 2009; KAGAN *et al*, 2009).

Uma aproximação da amplitude do sinal descrito pelas equações 3.1 e 3.2 pode ser facilmente encontrada através do cálculo de seu valor RMS, que é obtido utilizando as equações 3.4 e 3.5, respectivamente, para sinais contínuos e discretos. T ou N que define o intervalo do comprimento da janela de dados (JOHNSON *et al*, 2000):

$$s_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T |s(t)|^2 dt} , \quad (3.4)$$

$$s_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \bar{s}^2(t)} . \quad (3.5)$$

O cálculo do Valor RMS é simples e garante uma alta velocidade de processamento e a mínima necessidade de memória do sistema. A limitação se encontra na precisão do valor RMS estimado que depende do comprimento da janela. Durante a análise de sinais suaves, uma janela de comprimento de um ciclo da componente fundamental apresenta resultados mais precisos que a outra janela de comprimento de apenas meio ciclo. Usando uma janela de comprimento maior resulta na diminuição da resolução no tempo do valor estimado. Também deve ser levada em consideração que esta técnica não distingue a componente fundamental de componentes harmônicas ou de ruído presente no sistema analisado, por consequência, a precisão da estimativa do valor da amplitude do sinal dependerá diretamente da presença de harmônicos e de ruído no sinal.

3.2. Transformada de *Fourier* Janelada

A obtenção de informações no domínio do tempo e da frequência são utilizadas como parâmetros para caracterização de dados para estudo de distúrbios da QEE. A expansão por série de *Fourier* é uma representação de funções periódicas (estacionárias) através de somatório de funções senoidais harmônicas. A TF, batizada em homenagem a *Jean-Baptiste Joseph Fourier*, é utilizada para representar um sinal não-periódico e genérico por uma função aproximada e constituída por um período de um sinal periódico, no domínio da frequência conforme equação 3.6 (LATHI, 2007).

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \cdot e^{-j \cdot \omega \cdot t} dt , \quad (3.6)$$

onde ω é a frequência múltipla n da frequência fundamental ω_0 .

A TF inclui implicitamente a hipótese do sinal em análise ser estacionário (OLIVEIRA, 2007b), pois na ocorrência do distúrbio na passagem do domínio do tempo para o domínio da frequência, parte das informações é perdida de maneira tal que não é possível identificar um evento em particular. Ou seja, quando se observa a TF de um sinal não é possível dizer em que instante iniciou ou terminou um determinado evento. A identificação do distúrbio só será possível se janela de análise for posicionada exatamente sobre a ocorrência do evento, no momento que ele ocorrer. Todavia, em um sistema dinâmico não é possível prever quando o distúrbio ocorrerá.

Dennis Gabor adaptou a transformada de *Fourier* para analisar uma parte do sinal no tempo, o método de “abrir janelas” no sinal. A adaptação de Gabor é uma técnica chamada de *Short Time Fourier Transform* (STFT) ou Transformada de *Fourier* Janelada (TFJ).

A técnica consiste em “abrir janelas” no sinal em uma sequência de intervalos, onde cada sequência é suficientemente pequena de maneira que a forma de onda seja uma aproximação de uma onda quase estacionária.

O janelamento é feito mediante o uso da multiplicação de um sinal de entrada $s(t)$ por uma dada função janela $g(t-\tau)$ cuja posição varia no tempo (é transladada pelo parâmetro τ), isto é, divide o sinal em pequenos segmentos no tempo. Sendo assim, para cada janela é aplicada a TF e o sinal é colocado em 2 dimensões, tempo e frequência. Destarte, pode-se definir a TFJ de um sinal contínuo $s(t)$ como segue na equação 3.7:

$$S(\tau, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t).g(t-\tau).e^{-j.\omega.t} dt, \quad (3.7)$$

onde $g(t-\tau)$ é o janelamento prévio da função $s(t)$ por uma função $g(t)$ transladada ao redor do tempo τ .

Desta forma, a cada janela tem-se um espectro de frequência que apresenta o conteúdo da frequência deste pequeno intervalo de tempo mapeados em uma função bidimensional (tempo e frequência), como mostra as Figuras 3.2 e 3.3.

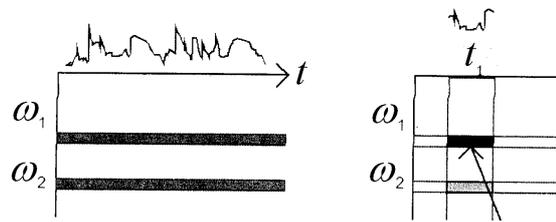


Figura 3.2. Transformada de *Fourier* Janelada. Fonte: (OLIVEIRA, 2007b) com adaptações.

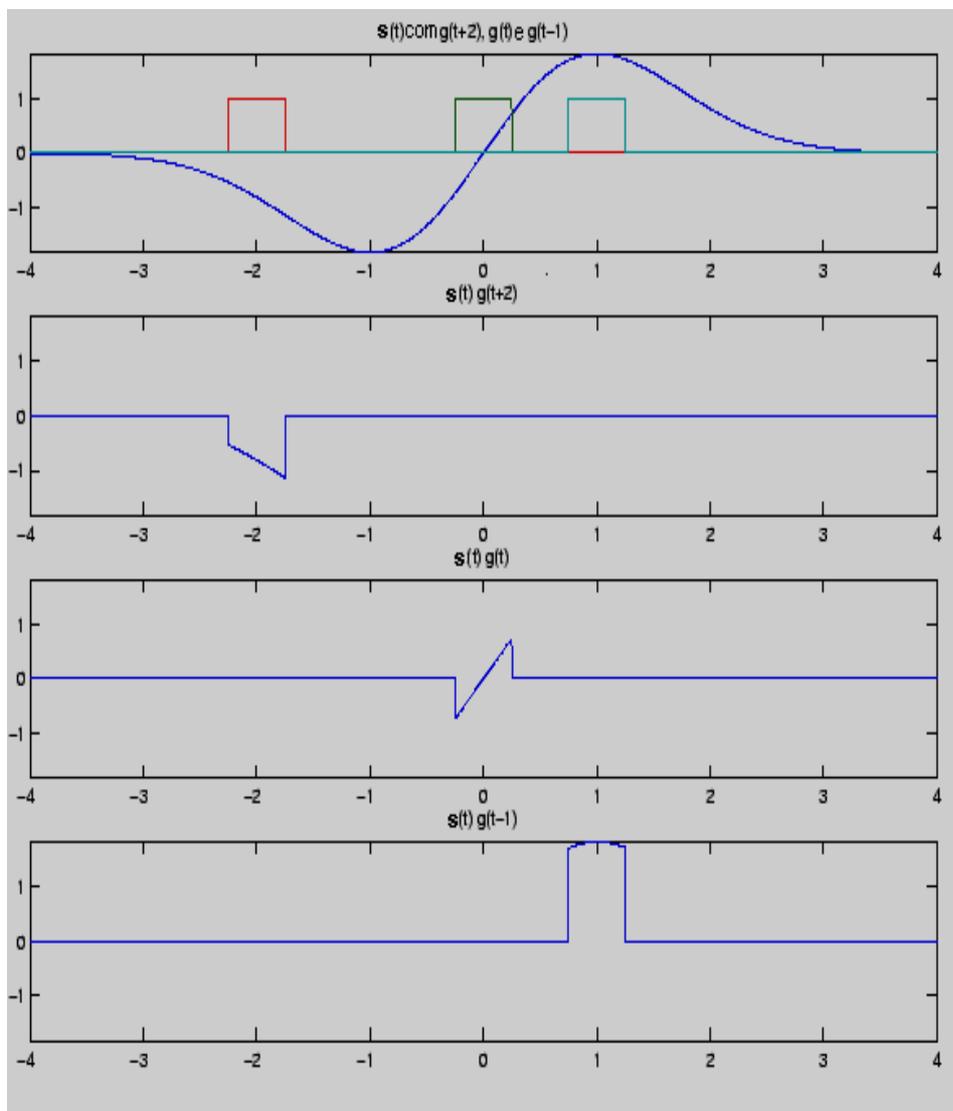


Figura 3.3. Transformada de *Fourier* Janelada com $\tau = -1$, $\tau = 0$ e $\tau = 1$.

A seguir na Figura 3.4 têm-se algumas funções janelas típicas para análise de QEE. A diferença básica entre elas é que à medida que diminui gradativamente a descontinuidade no início e no final do trecho analisado, aumenta o tempo de processamento do janelamento.

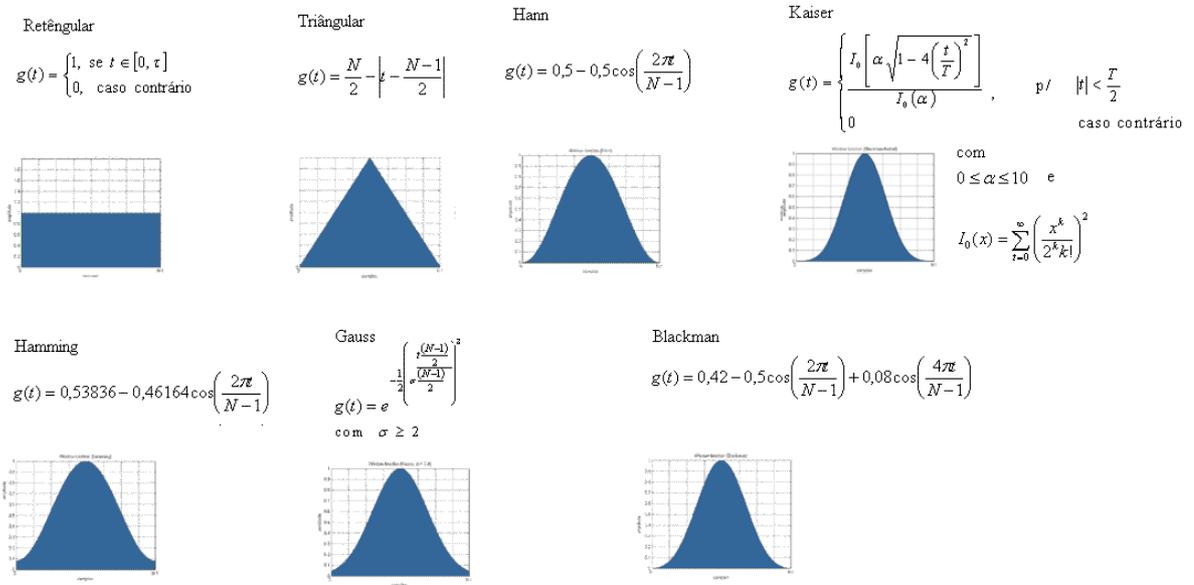


Figura 3.4. Funções Janela típicas, N = tamanho da janela. Fonte: Lathi (2007), Misiti, M.; Misiti, Y.; Oppenheim (2008) com adaptações.

Intuitivamente, quando a análise é visualizada como um banco de filtros, a resolução no tempo aumenta com a frequência central dos filtros, ou seja, realiza a análise em banco de filtros compostos por passa-faixas com banda passante relativa constante (ou fator de qualidade Q constante. Relação entre a energia armazenada e a potência média dissipada). Com Q constante, as resoluções t e ω mudam com a frequência central conforme equação 3.8 abaixo (OLIVEIRA, 2007b):

$$\Delta t \cdot \Delta \omega \geq \frac{1}{2}. \tag{3.8}$$

A TFJ pode ser também representada pela distribuição da energia densidade espectral no plano $t \times f$ ou no plano $t \times f \times E$, conforme Figuras 3.5 e 3.6, onde $f = \frac{\omega}{2\pi}$ e E é a energia da densidade espectral.

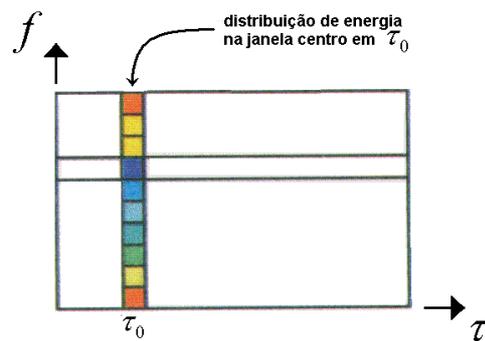


Figura 3.5. Princípio do Espectrograma – densidade espectral no plano $t \times f$. Fonte: Oliveira (2007a).

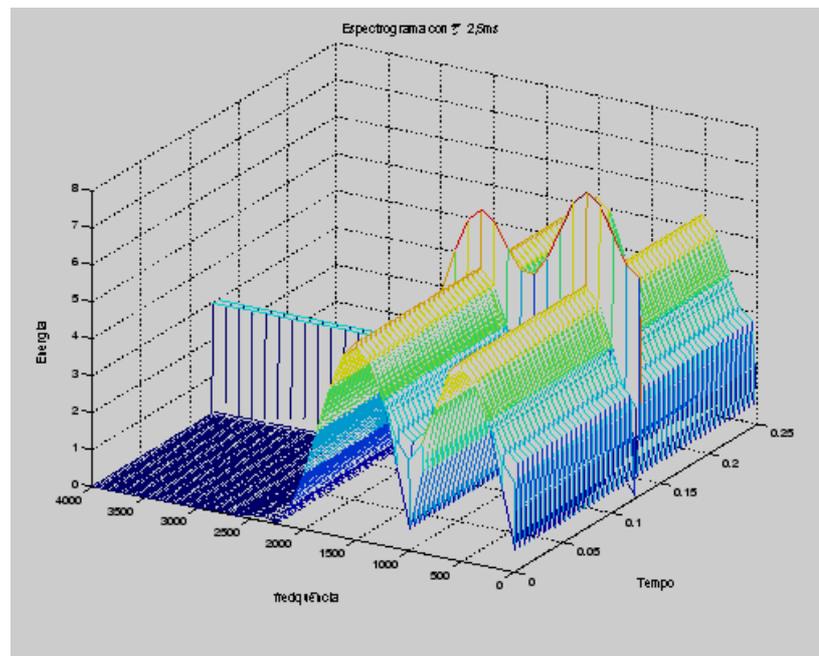


Figura 3.6. Exemplo do Espectrograma – densidade espectral no plano $t \times f \times E$.

3.3. Transformada *Wavelet*

Ferramenta matemática mais atual para o estudo de distúrbios da QEE a qual obtém informações no domínio do tempo e da frequência é a Transformada *Wavelet* (TW). A TW foi introduzida por Jean Morlet com bases matemáticas de Alex Grossmann. O termo original era

ondolletes, que significa “ondinha” e *wavelets* corresponde à versão angloflônica (OLIVEIRA, 2007a, 2007b).

A TW é uma técnica de janelamento variável, permitindo uma avaliação no tempo de longa duração (baixa frequência) ou curta duração (alta frequência). Ela trabalha com dados contínuos e com dados discretizados respectivamente com as versões da TW contínua (TWC) e TW discreta (TWD). Associada a técnica de Análise Multirresoluções (AMR), decompõe deslocando o sinal em diferentes escalas, com diferentes níveis de resolução, a partir de uma função principal (BRITO *et al*, 1998). A decomposição baseada em TW e AMR resulta em representações locais no domínio do tempo e da frequência, diferentemente da TF que fornece uma representação global do sinal, solucionando também o problema da resolução da TF. A TW é uma transformada linear local gerada por um banco de filtro de fator de qualidade constante/frequência relativa (OLIVEIRA, 2007a, 2007b, MISITI *et al*, 2008).

O escalonamento com deslocamento da função *wavelet* $\psi(t)$ é mostrado na equação 3.9.

$$\psi_{a,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \cdot \psi\left(\frac{t-\tau}{a}\right), \quad (3.9)$$

onde a é o parâmetro de escalonamento e é diferente de zero. E τ é o parâmetro de translação, tendo que pertencer ao conjunto dos números reais.

A *wavelet* se comprime quando a é maior que zero e menor que um e se dilata quando a é maior que um. A função $\psi(t)$ se modifica no decorrer da transformada. É a *wavelet* principal (*wavelet*-mãe) que origina as funções com diferentes tamanhos (*wavelets*-filhas) usadas no processo da transformada. A *wavelet*, mesmo deslocada e escalonada, contém a mesma energia garantindo a sua isomeria, ou seja, a energia da *wavelet*-mãe é igual à energia da *wavelet*-filha (OLIVEIRA, 2007a, 2007b).

A TWC é calculada fazendo translações e escalonamento contínuos de sinal. Na prática requer a realização de infinitas translações e escalonamentos, demandando muito tempo e recursos computacionais e gerando redundância.

A função *wavelet* $\psi_{a,\tau}(t)$ pode ser modificada para equação 3.10 para ser definida apenas para valores positivos de escala para facilitar sua discretização (OLIVEIRA, 2007a, 2007b, RODRIGUES, 2008):

$$\psi_{a,\tau}(t) = \psi_{m,q}(t) \frac{1}{\sqrt{|a_o^m|}} \psi\left(\frac{t - q\tau_0 a_o^m}{a_o^m}\right), \quad (3.10)$$

em que m e q são inteiros, a_o é um parâmetro de dilatação fixo e maior que 0, τ_0 é o fator de translação fixo e diferente de zero. Os coeficientes m e q correspondem a pontos num retículo bidimensional (domínio escala-translação), sendo o primeiro associado aos passos na escala discreta e o segundo aos passos da translação discreta.

Desta forma a TWC mapeia uma função de uma variável contínua através de uma função de duas variáveis contínuas. Assim a TWC de uma dada função $x(t)$ é representada pela equação 3.11:

$$WC(a, \tau) = WC(m, q) = \frac{1}{\sqrt{a_o^m}} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi\left(\frac{t - q\tau_0 a_o^m}{a_o^m}\right) dt \quad (3.11)$$

No contexto da análise espectral, a exprime uma medida de fator de qualidade/frequência relativa ($a = Q = \frac{f_0}{f}$, com $f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi}$). Então a equação 3.11 também pode ser reescrita conforme a equação 3.12:

$$WC(f, t) = \sqrt{\frac{f}{f_0}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(\tau) \psi\left(\frac{f}{f_0}(\tau - t)\right) d\tau. \quad (3.12)$$

A TWD mapeia um sinal discreto unidimensional (tempo) em uma representação bidimensional (tempo e escala), em diferentes escalas, com diferentes níveis de resolução. É representada pela equação 3.13:

$$F(a, \tau) = \frac{1}{\sqrt{a_o^m}} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} f(t) \psi\left(\frac{t - n\tau_0 a_o^m}{a_o^m}\right), \quad (3.13)$$

A *wavelet Haar* foi a primeira a ser elaborada. A *wavelet Daubechies* é a mais utilizada atualmente.

A equação 3.14 define a *wavelet*-mãe (*wavelet* no ponto $\psi(a, \tau) = \psi(0, 0)$) da *wavelet Haar* como:

$$\psi_{(0,0)}(t) = \begin{cases} 1 & \text{p/ } 0 \leq t < \frac{1}{2} \\ -1 & \text{p/ } \frac{1}{2} \leq t < 1 \end{cases} \quad (3.14)$$

e suas *wavelets*-filhas, decompostas na equação 3.15:

$$\psi_{(a,\tau)}(t) = \psi_{(0,0)}(2^j t - \tau) = \begin{cases} 1 & \text{p/ } \tau 2^{-j} \leq t < \left(\tau + \frac{1}{2}\right) 2^{-j} \\ -1 & \text{p/ } \left(\tau + \frac{1}{2}\right) 2^{-j} \leq t < (\tau + 1) 2^{-j} \end{cases} \quad (3.15)$$

Para exemplificar o efeito do deslocamento e escalonamento, a Figura 3.7 mostra como ocorre a variação dos índices de escala e localização para a *wavelet Haar*:

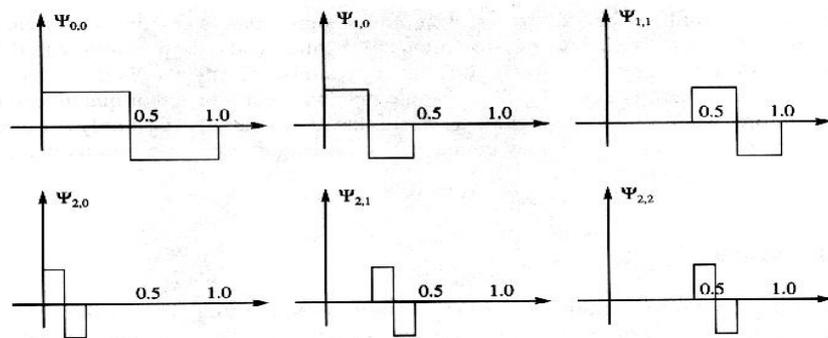


Figura 3.7. Comportamento da *wavelet Haar*. Fonte: OLIVEIRA (2007a, 2007b) com adaptações.

A família *wavelets*-mãe *Daubechies* são definidas por *dbn*, onde *n* é a ordem da *wavelet*. A família *Symmlets* são *wavelets* mais simétricas as quais foram projetadas para garantir momentos nulos tanto na função de escala $f(t)$ quanto na *wavelet*-mãe $\psi(t)$. Ela foi criada a partir da *Daubechies*. A Figura 3.8 abaixo mostra *wavelets Daubechies* de ordem 2 a 10. A *wavelet db1* não é mostrada porque corresponde exatamente a *wavelet Haar*. A Figura 3.9 mostra a *Symmlets* de ordem 2 a 8. (MALANGE, 2010).

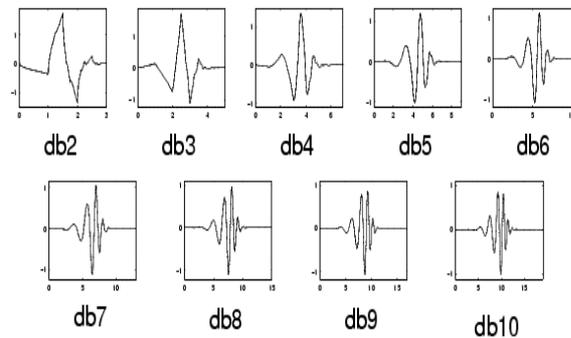


Figura 3.8. Wavelet-mãe (wavelet no ponto $\psi(a, \tau) = \psi(0,0)$) da wavelets Daubechies (db).
Fonte: OLIVEIRA (2007a, 2007b).

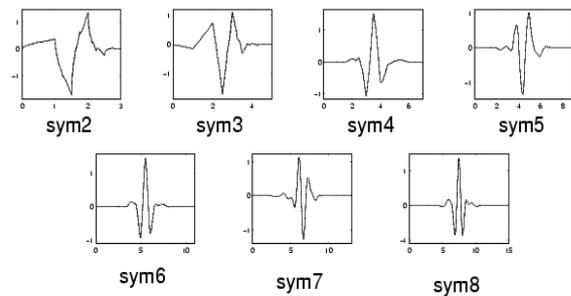


Figura 3.9. Wavelet-mãe (wavelet no ponto $\psi(a, \tau) = \psi(0,0)$) da wavelets Symmlets (sym).
Fonte: OLIVEIRA (2007a, 2007b)

A Figura 3.10 abaixo mostra wavelets-mãe Daubechies de ordem 2 (db2) e as wavelets-filhas.

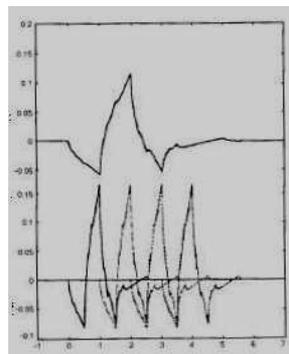


Figura 3.10. Wavelet-mãe Daubechies 2 e wavelets-filhas. Fonte: OLIVEIRA (2007a, 2007b).

A técnica de Análise de Multirresolução (AMR) foi desenvolvida por Mallat (1999). Permite a decomposição de um sinal em diferentes níveis de resolução, fornecendo

informações importantes tanto no domínio do tempo como da frequência. Por esta técnica, o sinal s analisado é decomposto primeiramente em dois outros sinais: Coeficiente de Aproximação/Escalar 1 (cA_1) e Coeficiente de Detalhe/*Wavelet* 1 (cD_1), relativo cada um deles a uma versão atenuada e outra versão detalhada, através de filtros passa baixa (sub-banda de baixas frequências do sinal decomposto que corresponde à metade inferior da frequência do sinal de entrada) e passa alta (sub-banda de altas frequências do sinal decomposto que corresponde à metade superior da frequência do sinal de entrada). Como exemplo do descrito, a seguir a Figura 3.11 representa o sinal s filtrado até o 3º nível.

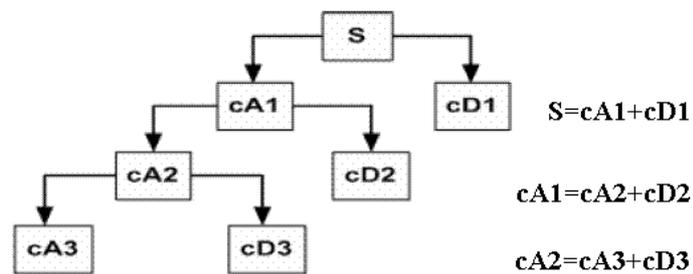


Figura 3.11. Sucessivas filtragens e decomposições de um sinal até o 3º nível. Fonte: RODRIGUES (2008).

A decomposição do sinal s de entrada é feita a partir da filtragem deste e decomposição em cA_1 e cD_1 até o nível r , gerando cA_r e cD_r . O número de níveis de decomposição é feita de forma que a frequência fundamental do sinal (f_0) esteja situada no centro da sub-banda das frequências mais baixas, a fim de limitar os efeitos do conteúdo espectral da fundamental nas outras sub-bandas (MISITI *et al*, 2008).

Para os filtros (aproximação e detalhe) *wavelet* denotando o conjunto de sub-bandas como $b_1, b_2, \dots, b_r, b_{r+1}$ (iniciando-se da frequência mais baixa) para um total de r níveis, as larguras das bandas correspondentes (equação 3.16) são $B_a, B_r, \dots, B_2, B_1$ e os centros das frequências (equação 3.17) são $f_a, f_r, \dots, f_2, f_1$ como mostrada na Figura 3.12. A largura do filtro no nível k é

$$B_a = B_r, B_k = \frac{f_s}{2^{k+1}}, \quad k = 1, 2, \dots, r. \quad (3.16)$$

B_a é a largura da banda do filtro de aproximação e f_s é a frequência de amostragem. O centro da frequência no nível k é

$$f_a = f_r - B_r, \quad f_k = 3 \frac{f_s}{2^{k+2}}, \quad k = 1, 2, \dots, r. \quad (3.17)$$

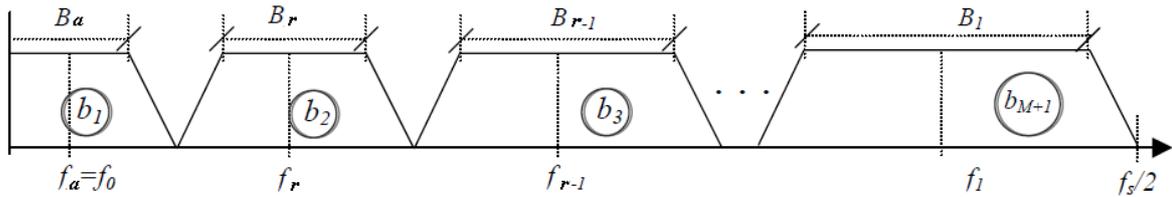


Figura 3.12. Frequência fundamental e frequência central e largura das sub-bandas.

Desta forma, sinais complexos são decompostos em sinais mais simples que contenham características específicas do primeiro e, assim, podem ser analisados individualmente. O sinal atenuado de saída do filtro passa-baixa é novamente decomposto, resultando em dois novos sinais detalhado e atenuado, em níveis de frequência diferentes. As informações relativas ao sinal original são fornecidas no domínio da frequência e do tempo.

Utilizando o método TWD com a AMR, os coeficiente de escala cA_k e detalhe cD_k podem ser calculados pela equações 3.18 e 3.19.

$$cA_n = \sqrt{2} \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(t) \varphi(2t - n) dt, \quad (3.18)$$

onde $\varphi(t)$ é a função amostral que expressa a função escala da wavelet-mãe (OLIVEIRA, 2007a, 2007b, RODRIGUES, 2008).

$$cD_n = \sqrt{2} \int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) \varphi(2t - n) dt. \quad (3.19)$$

3.4. Revisão bibliográfica

Considerando-se que, neste trabalho, será abordada a detecção de eventos de qualidade da energia elétrica utilizando os métodos de Transformada de *Fourier* Janelada e Transformada *Wavelet*, esta análise restringirá às principais referências que fazem uso de conceitos e métodos associados a esta modalidade de estudo.

O trabalho de Delmont (2003) apresenta um algoritmo para caracterização de distúrbios relacionados à QEE. Para a detecção e localização dos distúrbios, o mesmo utiliza a TW em AMR nível 2, Janeladas de $\frac{1}{2}$ ciclo e passo de $\frac{1}{4}$ de ciclo, apresentando um erro médio de 1%. Para a classificação, foi calculada a curva de desvio padrão e utilizado o teorema de *Parseval*, sendo indicada uma taxa de acerto geral de 98,9%. Para a estimação da duração do distúrbio, o sinal é decomposto até o 3º nível, apresentando uma taxa de acerto de 95,3%. Já para a estimação da amplitude, calcula-se a relação entre o sinal com o distúrbio e o sinal em regime. A estimação da amplitude e a duração do distúrbio são aplicadas somente para os as Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD) em análise. Para estes casos o índice de acerto foi de 99, 7%. Contudo, neste trabalho não é contemplado os eventos transitórios que precedem o evento principal.

O trabalho de Arruda (2003) utiliza Transformada *Wavelet* (TW) para o monitoramento da QEE do sistema elétrico com o objetivo de detectar, localizar e classificar os mesmos. É calculada a diferença dos coeficientes entre o detalhe do primeiro nível do sinal com distúrbio com o do sinal em regime permanente para a detecção dos eventos. Por esta lógica, obteve-se 100% de acerto para a detecção dos eventos. Para a classificação, também é realizada esta diferença entre os sinais, mas com energia do sexto detalhe. Para a estimação da amplitude foram utilizados os coeficientes da quinta aproximação, apresentando um erro médio de 2,3%, sendo que para a estimação da duração, alguns casos apresentaram erro superior a 10%. O autor deixa clara a dificuldade encontrada em se estipular um limiar que venha a corretamente diferenciar entre afundamento e interrupção no fornecimento da energia.

No trabalho de Trindade (2005) foi desenvolvido um sistema, utilizando Transformada de *Fourier* Janeladas e Valor RMS, capaz de detectar, armazenar em mídia digital e

classificar eventos de Qualidade da Energia como *notching*, distorção harmônica, *swell*, afundamentos, *flicker*, etc.. A detecção é feita a partir da monitoração do sinal de erro definido como a diferença entre o sinal de tensão obtido da rede elétrica e a componente senoidal fundamental gerada pelo próprio algoritmo com valores de amplitude, frequência e fase estimados a partir da tensão monitorada. A classificação do distúrbio é feita com base no sinal de erro obtido pelo algoritmo de detecção proposto. A mesma janela de erro armazenada, referente ao distúrbio detectado, é, então, utilizada para classificação do mesmo. Os resultados obtidos a partir de simulações do algoritmo mostram que a utilização da janela de erro para a classificação de eventos é viável, e ainda, apresenta maior versatilidade durante o processo de treinamento da rede em relação à janela de sinal monitorado. Ele obtém uma eficiência global de 98,37%. Ele propõe como melhoria de seu trabalho a disponibilização de um banco de dados formado apenas por eventos reais para que o treinamento do classificador seja feito com base nesses dados, o que deve proporcionar um maior grau de reconhecimento de eventos relacionados com o sistema sob monitoração.

Na tese descrita em Delmont Filho (2007) é apresentada uma proposta técnica para detectar, localizar no tempo e classificar diversos eventos relacionados com a qualidade da energia elétrica. Para a detecção, utiliza-se somente a TW e, para a classificação, foram comparadas três ferramentas matemáticas: TW, Transformada Rápida de *Fourier* (FFT) e Redes Neurais Artificiais (RNA). Para validar o algoritmo, foram utilizados dados de um sistema elétrico da CHESF (Companhia Hidro Elétrica do São Francisco). Com estes, obteve-se para a detecção resultados superiores a 95% utilizando a TW. Na classificação, o maior problema enfrentado foi à ocorrência da simultaneidade de eventos sobre os sinais em análise. Para solucionar este problema, fez-se uma segunda classificação, tomando-se um ciclo a partir do distúrbio propriamente dito. Com isso, obteve-se um acerto médio de 90%.

O trabalho de Rodrigues (2008) apresentou algoritmo baseado em diversas ferramentas para a detecção e localização no tempo e a classificação automática destes distúrbios. Além da determinação do início e fim do evento, também determinou n possíveis desconformidades na forma de onda as quais vieram existir em determinados registros em análise, localizando-os Janeladas com tamanhos flexíveis. Desta maneira, vários eventos sobre o sinal em análise puderam ser avaliados, bem como as durações associadas. A

Transformada *Wavelet* (TW) foi utilizada para realizar a detecção e também a localização destas alterações no tempo. Já para a classificação da ocorrência, ou das ocorrências, a TW, a Transformada de *Fourier* (TF) e o valor RMS foram empregados. Para validar o estudo, várias situações de distúrbios foram caracterizadas referentes a um sistema elétrico de distribuição real, implementado e simulado pela aplicação do software ATP (*Alternative Transients Program*). Destaca-se que a eficiência desta metodologia para a classificação dos eventos, apresentou um índice médio de acertos de 98,4% para todas as situações avaliadas e descritas anteriormente. Todas as situações analisadas foram corretamente detectadas e localizadas no tempo, dentro de valores percentuais aceitáveis em comparação aos indicadores de qualidade da energia elétrica. A restrição do trabalho é que a metodologia não pode ser aplicada para detecção de distúrbios simultâneos.

O trabalho de Ando Júnior (2009) apresenta uma metodologia para análise e monitoração da QEE, através da identificação e quantificação dos distúrbios. A metodologia utiliza processamento de sinais como Valor RMS e TF para a detecção de eventos e a estimativa da frequência dos sinais elétricos analisados. Os principais distúrbios de QEE definidos pelas normas da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) são quantificados através de um algoritmo desenvolvido no trabalho. O programa foi testado usando formas de ondas com distúrbios previamente conhecidos para sua validação. Na análise das formas de onda obtidas de medições em campo verificou-se a robustez do algoritmo frente a ruídos e outros fenômenos vinculados à QEE presentes em medições reais. A pesquisa apresenta um programa eficaz e prático que pode ser utilizado no desenvolvimento de um novo equipamento de medição dos distúrbios da QEE. Os resultados obtidos através da análise de dados (sintetizados e medições de campo) valida o programa proposto, demonstrando que o programa desenvolvido é funcional, prático e eficaz na classificação dos distúrbios conforme as Normas referidas. A limitação do trabalho é que o algoritmo não trabalha integrado ao sistema para captação de dados.

Ferreira (2009) desenvolveu um algoritmo que identifica os distúrbios de QEE envolvendo variações de frequência, afundamento de tensão e elevação de tensão no Sistema Elétrico de Potência. Ele também quantificou o tempo em que o sistema esteve operando nestas condições. Utiliza a TW através da AMR para detecção dos distúrbios. Os dados

obtidos são tratados de modo a serem empregados para uma possível manutenção preditiva do sistema em análise. O algoritmo opera de forma satisfatória, na identificação e quantificação do tempo de ocorrência dos distúrbios. Como limitação do trabalho, não foram feitos os testes para distúrbios cujas características permanecem no regime permanente.

No trabalho de Costa *et al* (2010) utilizam-se dos dois métodos (TFJ e TW) durante a caracterização dos distúrbios de afundamento de tensão, elevação de tensão, interrupção de tensão, ruído e transitório. Porém é feita a detecção automática de faltas baseada na análise da energia das janelas dos coeficientes da TW das tensões e correntes de fase. O método é eficaz na identificação dos instantes inicial e final da falta, além de conseguir analisar sinais referentes a linhas de transmissão de diferentes classes de tensão e que tenham sido registrados com diversas frequências de amostragem. Não utiliza a TFJ para a detecção dos distúrbios.

CAPÍTULO 4 – VALIDAÇÃO DOS MÉTODOS UTILIZADOS

Os métodos propostos foram desenvolvidos utilizando o aplicativo *MatLab*^{®7} permitindo uma análise do sinal conforme visto no capítulo anterior. Elaborou-se um teste de operação sobre a bancada QEE2910 para validar as técnicas utilizadas na TFJ e n TW. Foram utilizados como distúrbios para validação o afundamento de tensão e a elevação de tensão e observada a detecção do distúrbio na qualidade da energia elétrica na percepção do evento até a pré-clasificação utilizando somente a técnica proposta sem o auxílio de técnicas complementares.

O Sinal tem as seguintes características:

- ✓ Tipo de sinal – Senoidal;
- ✓ Valor rms – 127 V;
- ✓ Frequência – 60 Hz.

O sinal em análise é gerado e analisado na bancada de teste e simulação, onde será feita a identificação do evento com suas características. O sinal em análise é decomposto pelos métodos para verificar presença de evento conforme as seguintes etapas:

- ✓ O sinal gerado é amostrado da bancada e analisado por cada método fazendo sua decomposição para extração dos parâmetros das frequências fundamental;
- ✓ É gerado um sinal simulado em cada método com os parâmetros da frequência fundamental a partir das características do sinal amostrado;
- ✓ O sinal simulado é comparado com o sinal em análise para verificar se tem algum erro de sinal e detectar a presença de distúrbio pelo método;
- ✓ O resultado da detecção feita pelo método é comparado com o resultado da detecção feita pela bancada de teste para verificar o erro na detecção.

A frequência de amostragem é de 30.720 Hz. Ela foi escolhida para que sejam gerados 512 pontos a cada ciclo de sinal da rede, cuja frequência fundamental é 60 Hz. Desta forma, pode ser feita a discretização do sinal até a frequência de 15.360 Hz, que corresponde a 256º harmônico conforme teorema de *Nyquist*.

CAPÍTULO 4 – VALIDAÇÃO DOS MÉTODOS UTILIZADOS

4.1. Validação da análise utilizando a Transformada de *Fourier* Janelada

A aplicação da TFJ tem o janelamento do sinal de um ciclo, com passo de deslocamento de meio ciclo (ANDO JÚNIOR, 2009, IEC 61000-4-30, 2003, ARRUDA, 2003). Com o objetivo de escolha da janela que melhor analise o sinal, foram feitos testes utilizando as janelas retangular, de *Hanning* e de *Kaiser* (com $\alpha = 10$). O resultado da aplicação do método é visualizado pelo uso do gráfico do espectro de frequência, gráficos em duas dimensões (tempo x frequência) e três dimensões (tempo x frequência x energia), retirados do método pela função *specgram* do aplicativo *MatLab* ®7. São consideradas as componentes harmônicas até a 256ª ordem, normalizadas em relação à amplitude da frequência fundamental do sistema, extraída do espectrograma conforme frequência de amostragem.

A TFJ conseguiu detectar todos os casos de elevações e afundamentos. A Tabela 4.1 reporta a média dos erros observados na estimação do sinal com a presença dos fenômenos envolvidos quando realizado empregando-se os três tipos de janelas em estudo.

Tabela 4.1. Erros médios obtidos através da comparação das janelas x distúrbios
Média dos Erros (%)

| Janela | Elevação | Afundamento |
|------------|----------|-------------|
| Retangular | 0,0837 | 0,0981 |
| Han | 0,0893 | 0,0933 |
| Kaiser | 0 | 0 |

Pode ser observado na referida Tabela que, considerando-se o erro global, os desempenhos dos diferentes tipos de janelas na análise são similares. No entanto, deve-se acrescentar que a janela retangular é Kaiser apresenta a melhor exatidão na detecção, sendo a janela utilizada na dissertação. O coeficiente α foi considerado igual a 10 para melhor suavizar os erros de sobreposição das janelas durante seu deslocamento.

CAPÍTULO 4 – VALIDAÇÃO DOS MÉTODOS UTILIZADOS

4.2. Validação da análise utilizando a Transformada *Wavelet*

Com o objetivo de selecionar uma função *Wavelet*-mãe que melhor se adeque à análise de distúrbios relacionados com a qualidade da energia elétrica foram realizados testes realizados com algumas funções. Os testes consistiram em submeter os distúrbios afundamento de tensão e elevação de tensão, gerados na bancada de teste e simulação.

Geralmente *Wavelets* mais suaves indicam melhor resolução em frequência que *Wavelets* que possuem variações bruscas como a *Wavelet* de *Haar* (Figura 3.7), sendo o oposto aplicado para resolução no domínio do tempo. As funções: *Haar*, *Daubechies* (dbN , $N = 2, 3, \dots, 10$) e *Symlets* ($symN$, $N = 1, 2, \dots, 8$), formam o grupo de dezoito bases ortogonais submetidas a testes com o objetivo de detectar e localizar distúrbios relacionados com a qualidade da energia elétrica. Note-se que N representa a ordem de tais funções, sendo algumas destas exemplificadas nas Figuras 3.7, 3.8 e 3.9.

A técnica de Análise Multiresolução foi empregada para análise dos fenômenos afundamento de tensão e elevação de tensão, com a utilização das bases ortogonais para cada distúrbio mencionado e a escolha de uma base para a análise de distúrbios deve considerar sua capacidade de distinção entre o nível de frequência do sinal original e o nível de frequência dos distúrbios.

A função *Wavelet*-mãe será adequada quando esta for capaz de diferenciar todos os distúrbios e o sinal senoidal puro através de características ilustradas nas versões de detalhes em seus níveis de decomposição. Pôde ser observado que aumentando da ordem das *Wavelets*-mães, seus comportamentos em suavidade oferecem melhor resolução em frequência.

Sendo assim, as *Wavelets* de *Daubechies* de ordem superior a quatro oferecem melhores resultados em relação às bases *Wavelets* ortogonais utilizadas para análise de distúrbios ligados da qualidade da energia elétrica. Tal resultado, associado à facilidade de cálculos que a envolve, justifica a ampla utilização da *Wavelet* de *Daubechies* de quarta ordem ($db5$) para análises por apresentarem comportamentos com menor suavidade, as demais bases (dbN , $N = 1, \dots, 4$ e $symN$) se mostraram inviáveis na aplicação em destaque neste trabalho.

Análise Multiresolução do sinal sem distúrbio foi os sete níveis de decomposição conforme equações 3.16 e 3.17, resultando na Tabela 4.2.

CAPÍTULO 4 – VALIDAÇÃO DOS MÉTODOS UTILIZADOS

Tabela 4.2. Processo de codificação por sub-banda para uma banda de amostragem de 512 amostras por ciclo

| Nível | Filtro escala/aproximação (Hz) | Filtro wavelet / detalhe (Hz) |
|-------|--------------------------------|-------------------------------|
| 1 | 0 - 7680 | 7680 - 15360 |
| 2 | 0 - 3840 | 3840 - 7680 |
| 3 | 0 - 1920 | 1920 - 3840 |
| 4 | 0 - 960 | 960 - 1920 |
| 5 | 0 - 480 | 480 - 960 |
| 6 | 0 - 240 | 240 - 480 |
| 7 | 0 - 120 | 120 - 240 |

CAPÍTULO 5 - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Conforme seção 1.3, o algoritmo utilizado segue fluxo conforme a Figura 1.1. O sinal elétrico foi analisado pelos métodos da Transformada de *Fourier* Janelada (TFJ) e da Transformada *Wavelet* (TW). Nas simulações a seguir foram utilizados os sinais cuja aquisição foi feita pelo oscilógrafo da bancada de teste QEE 2910 da Datapool.

Os eventos simulados com participação de cargas não-lineares no controle do consumo de energia de grandes consumidores (ex.: motores elétricos), controle automático de fator de potência e da própria carga no sistema. São eles: afundamento de tensão, elevação de tensão, harmônico, *notching* e flutuação de tensão. A geração de cada tipo de evento considera as características intrínsecas de cada um apontadas na literatura, conforme foi apresentado no Capítulo 2.

Inicialmente é apresentado na Figura 5.1 o sinal em análise do sistema (s_{in} ou s_{ava}) em regime permanente e seu espectro de frequência.

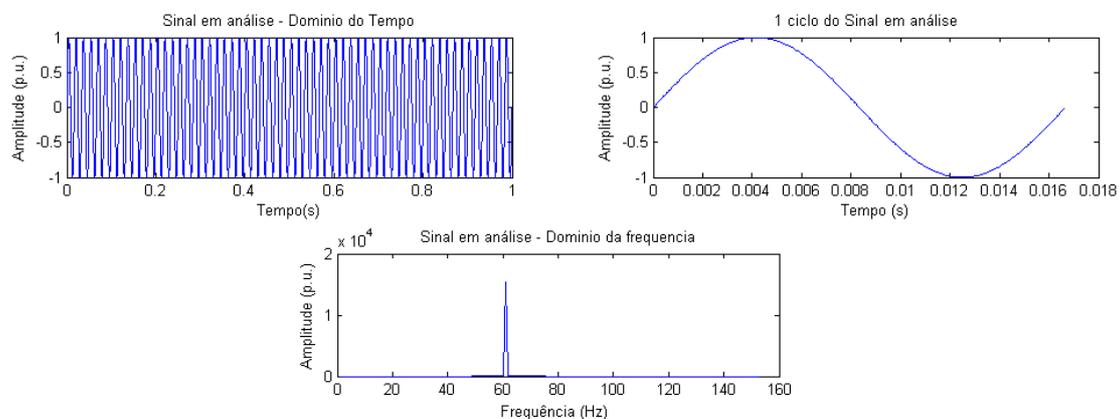


Figura 5.1. Sinal sem distúrbio, 1 ciclo do sinal e espectro de frequência.

A Figura 5.2 apresenta o espectrograma do sinal em duas dimensões (Tempo x Frequência) e em três dimensões (Tempo x Frequência x Energia) resultante da TFJ. O gráfico demonstra que o sinal em regime permanente não tem distúrbio, pois a concentração da energia esta constante no começo da faixa de frequência (em 60 Hz).

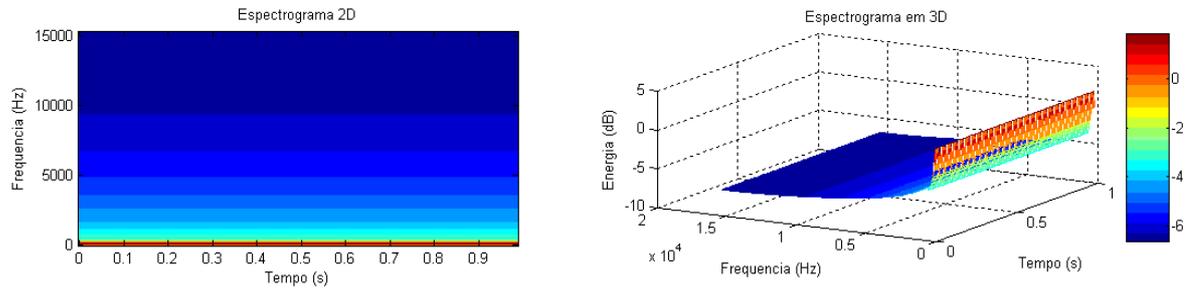


Figura 5.2. Espectrograma em duas dimensões e três dimensões

A Análise Multiresolução (AMR) do sinal sem dirtúrbio para sete níveis de decomposição pode-se verificar o efeito do conteúdo espectral da fundamental no sinal de aproximação do 7º nível por meio da semelhança de ambos com o sinal original (Figura 5.3). Este fenômeno ocorre porque a frequência fundamental está exatamente dividindo as subbandas b_1 e b_2 , como se observa na última linha da Tabela 4.2. O resultado do sétimo nível utilizado na comperação é verificado pelo ilustrado AMR da Figura 5.4, conforme sinal amostrado (referência), 1 ciclo do sinal amostrado e os coeficientes da solução da TW da Tabela 4.2.

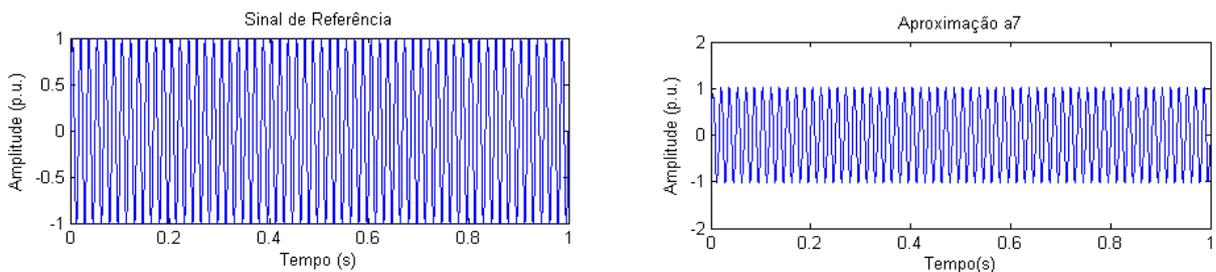


Figura 5.3. Semelhança conteúdo espectral da fundamental com sinal aproximação de nível 7.

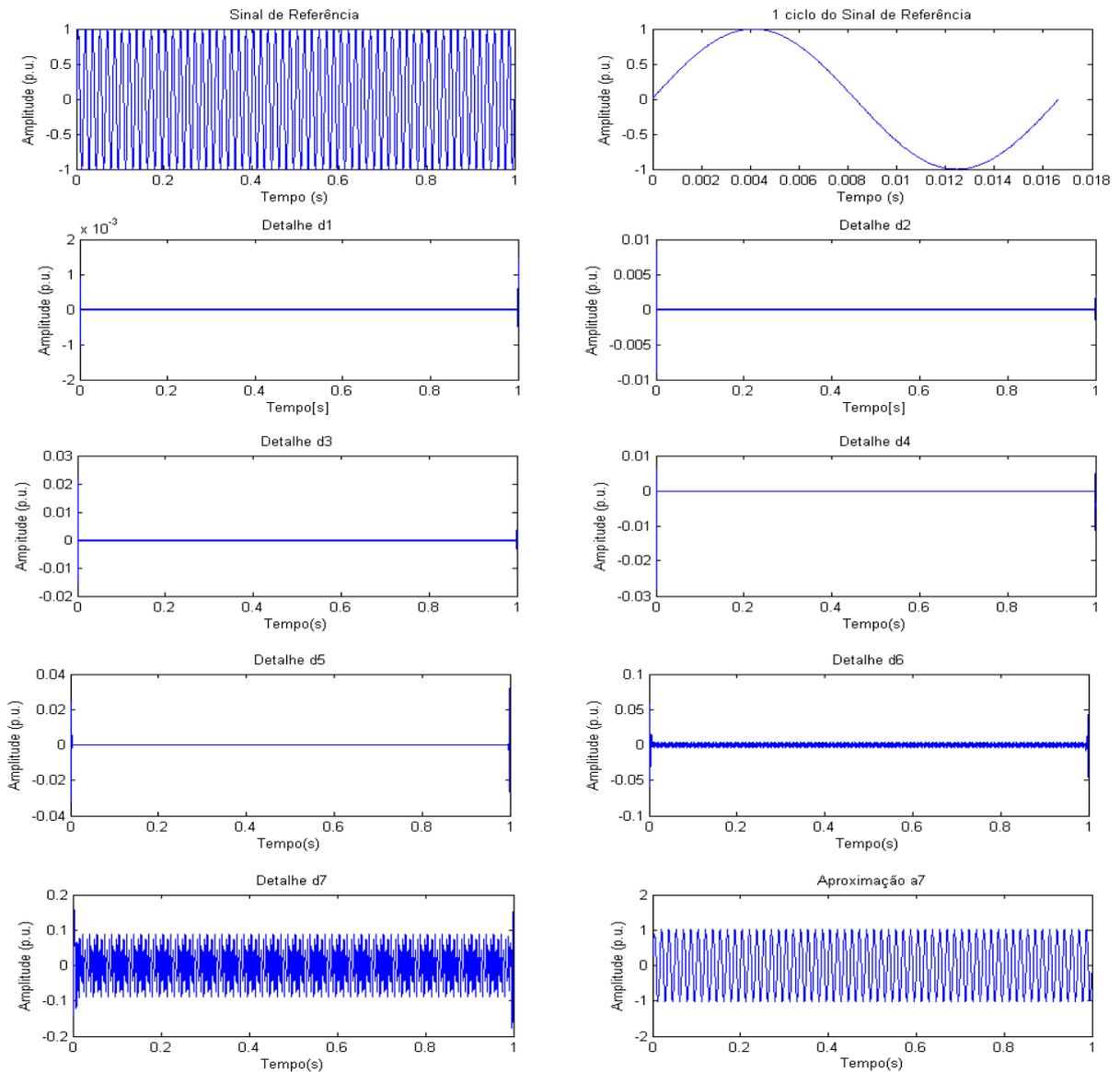


Figura 5.4. Sinal referência, um ciclo do sinal referência e decomposição em sete níveis.

5.1. Detecção de Afundamento de Tensão.

É um distúrbio que tem como uma das causas as faltas no sistema de potência, energização de cargas de potências elevadas, interação entre a carga e a linha de alimentação (principalmente durante a partida de equipamentos) ou entre a carga e a impedância da fonte de energia. A Figura 5.5 ilustra o afundamento de tensão de 0,2 p.u. e duração de 10 ciclos.

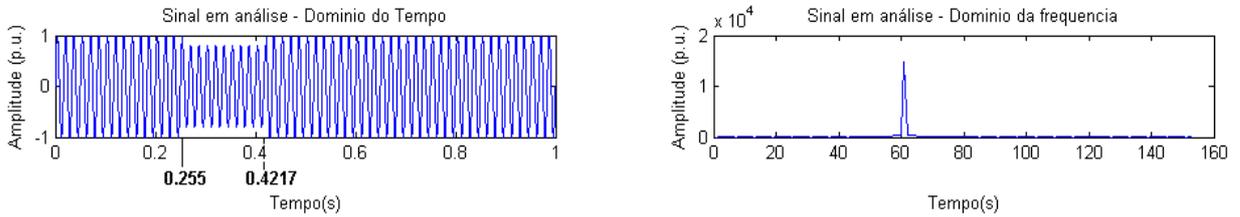


Figura 5.5. Sinal em análise – Detecção de afundamento de tensão pelo oscilógrafo e espectro de frequência do sinal.

A Figura 5.5 traz também a informação do resultado da detecção do oscilógrafo do DIP. O evento começou no instante 0,255 segundos e terminou no instante 0,4217 segundos.

5.1.1. Detecção através da Transformada de *Fourier* Janelada

A Figura 5.6 apresenta o espectrograma do sinal em duas dimensões (Tempo x Frequência) e em três dimensões (Tempo x Frequência x Energia) resultante da TFJ. O gráfico demonstra que ocorreu afundamento de tensão, visto pela descontinuidade da energia do começo da faixa de frequência (em 60 Hz).

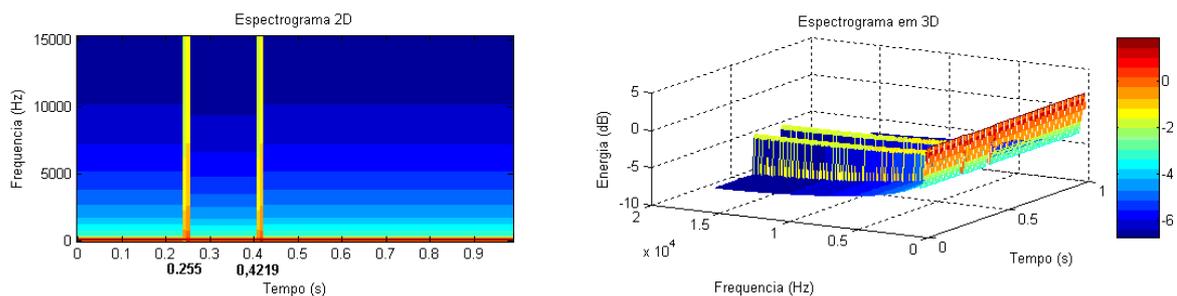


Figura 5.6. Detecção de afundamento de tensão pela TFJ - Espectrograma em duas dimensões e três dimensões.

A Figura 5.6 ilustra também a informação do resultado da detecção do oscilográfico do DIP.. O evento começou no instante 0,255 segundos e terminou no instante 0,4219 segundos.

5.1.2. Detecção através da Transformada *Wavelet*

Tem-se na Figura 5.7 o resultado da TW utilizando a AMR. Nesta análise já no primeiro nível de decomposição é possível que o algoritmo apresente as variações na janela amostrada. Tais variações são responsáveis pelo início (0,255 segundos) e o fim (0,4217 segundos) 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.

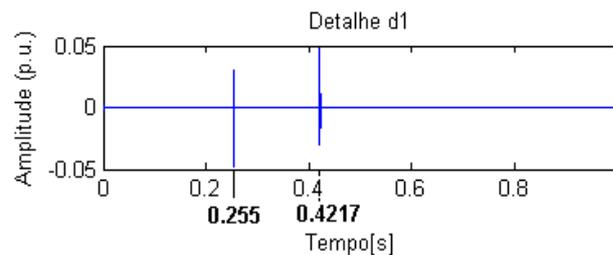


Figura 5.7. Detecção de afundamento de tensão pela TW - Decomposição no primeiro nível.

5.2. Detecção de Elevação de Tensão

É um distúrbio tipicamente resultante de faltas no sistema de potência, desenergização de cargas de potências elevadas, chaveamento de um grande banco de capacitores. A Figura 5.8 mostra a elevação de tensão de 0,3 p.u. e duração de 40 ciclos.

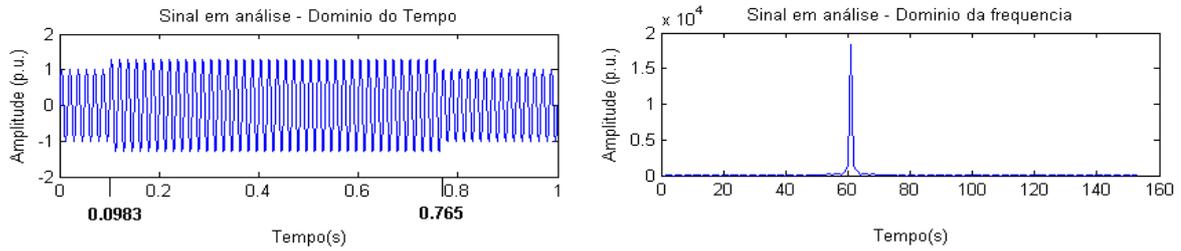


Figura 5.8. Sinal em análise – Detecção de elevação de tensão pelo oscilógrafo e espectro de frequência do sinal.

A Figura 5.8 ilustra também a informação do resultado da detecção do oscilógrafo da elevação de tensão. O evento começou no instante 0,0983 segundos e terminou no instante 0,765 segundos.

5.2.1. Detecção através da Transformada de *Fourier* Janelada

A Figura 5.9 apresenta o espectrograma do sinal em duas dimensões (Tempo x Frequência) e em três dimensões (Tempo x Frequência x Energia) resultante da TFJ. O gráfico demonstra que ocorreu elevação de tensão, visto pela descontinuidade da energia do começo da faixa de frequência (em 60 Hz).

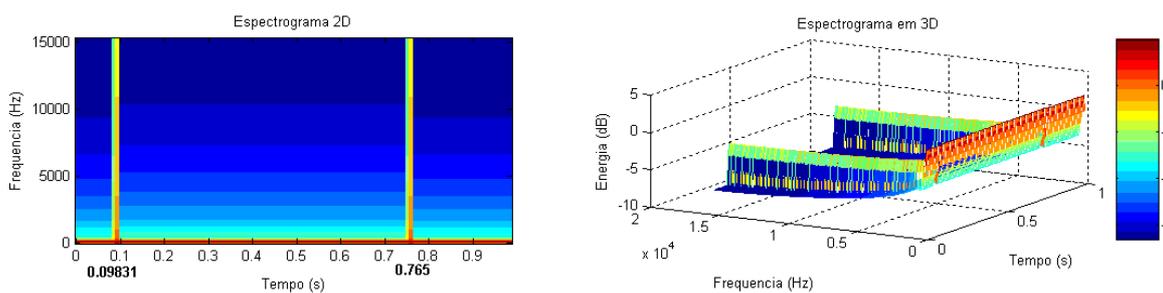


Figura 5.9. Detecção de elevação de tensão pela TFJ - Espectrograma em duas dimensões e três dimensões.

A Figura 5.9 também ilustra informação do resultado da detecção do oscilógrafo do DIP. O evento começou no instante 0,09831 segundos e terminou no instante 0,765 segundos.

5.2.2. Detecção através da Transformada *Wavelet*

Tem-se na Figura 5.10 o resultado da TW utilizando a AMR. Nesta análise já no primeiro nível de decomposição é possível que o algoritmo apresente as variações na janela amostrada. Tais variações são responsáveis pelo início (0,0983 segundos) e o fim (0,765 segundos) 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.

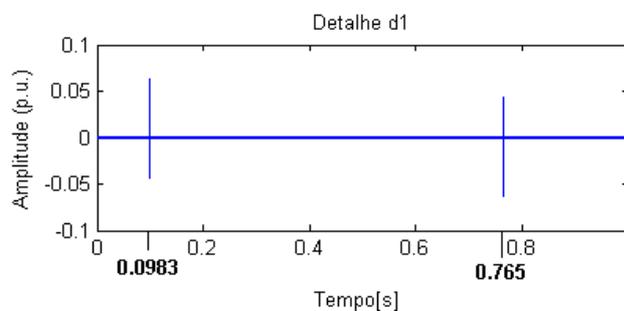


Figura 5.10. Detecção de elevação de tensão pela TW - Decomposição no primeiro nível.

5.3. Detecção de Harmônico

É um distúrbio tipicamente causado pela presença de dispositivos não-lineares e cargas como Controlador Lógico Programável (CLP), acionamentos de velocidade variável, *Soft-starter*, fontes ininterruptas de energia (*Uninterruptible Power Supply* - UPS).

A Figura 5.11 mostra o sinal com presença de harmônicos de 3^a, 5^a, 7^a e 9^a ordem (sinal em análise - s_{in} ou s_{ava}) e uma ampliação do sinal em um ciclo. A Figura 5.12 mostra seu espectro de frequência. Esse distúrbio permanece no sistema elétrico enquanto a fonte geradora esta em funcionamento, caracterizando com de permanente. Destarte, é evidenciado pela presença de harmônicas no sinal elétrico que deforma-o padrão senoidal.

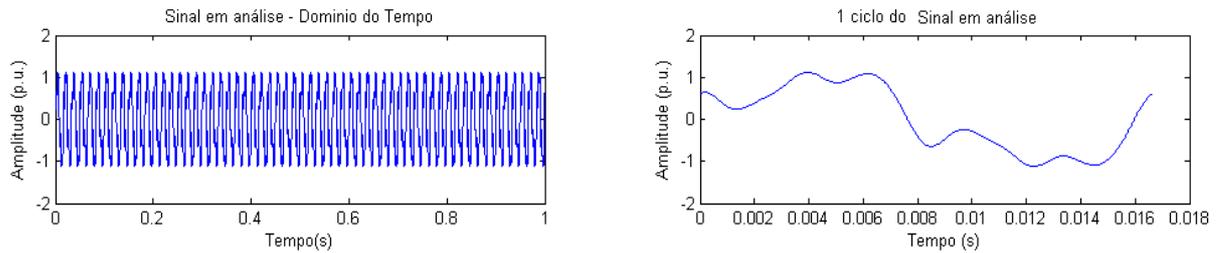


Figura 5.11. Sinal em análise – Detecção de harmônicos pelo oscilógrafo.

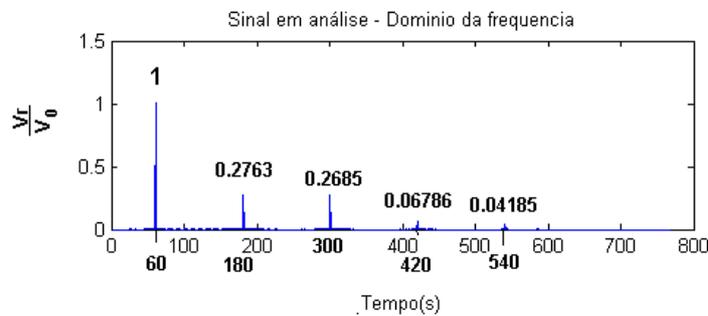


Figura 5.12. Sinal em análise – Detecção de harmônicos pelo oscilógrafo. Espectro de frequência.

5.3.1. Detecção através da Transformada de *Fourier* Janelada

A Figura 5.13 apresenta o espectrograma do sinal em duas dimensões (Tempo x Frequência) e em três dimensões (Tempo x Frequência x Energia) resultante da TFJ. O gráfico demonstra um espalhamento de energia além da frequência de 60 Hz (próximo ao ponto zero no gráfico). Fazendo uma comparação com o gráfico do sinal sem distúrbio (Figura 5.2), percebe-se que o espalhamento estende-se até próximo a 600 Hz. Porém não é possível descrever em quais frequências possuem tais concentrações de energia.

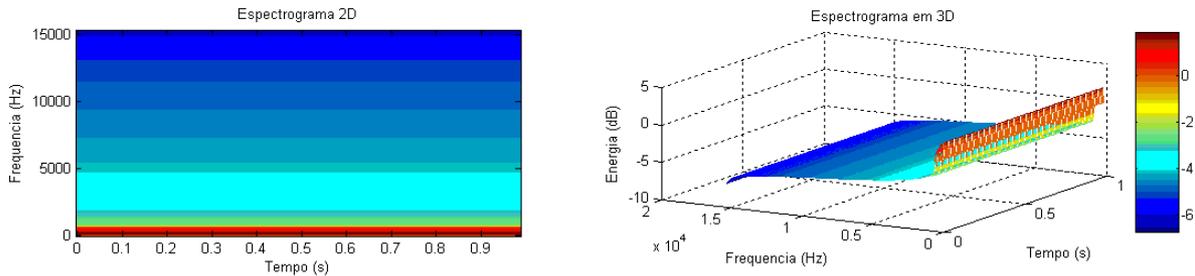


Figura 5.13.. Detecção de harmônicos pela TFJ - Espectrograma em duas dimensões e três dimensões.

Nesta Figura, percebe-se o espalhamento da energia além das proximidades da frequência de 60Hz, mais não se consegue precisar quais frequências. A Figura 5.14 torna mais evidente as frequências do sinal.

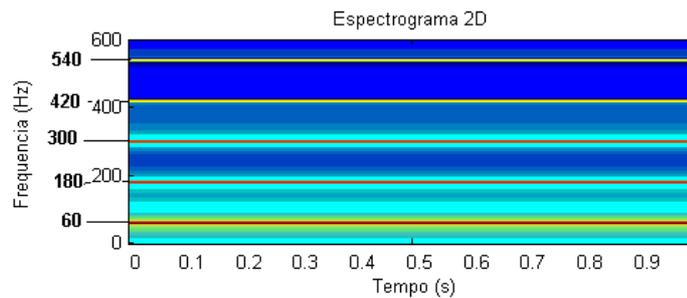


Figura 5.14. Detecção de harmônicos pela TFJ – Confirmação visual.

A melhoria da resolução na detecção só foi possível com o estreitamento da janela da TFJ. Porém o método é usado com detector do distúrbio, não tendo como fazer tal ajuste durante a detecção sem métodos auxiliares.

5.3.2. Detecção através da Transformada *Wavelet*

Tem-se na Figura 5.15 o resultado da TW utilizando a AMR. Nesta análise já no primeiro nível de decomposição não se verifica alteração significativa. Porém, tem-se a distribuição das energias conforme frequência e nível de detalhe: 7ª e 9ª harmônicas no nível 4, 5ª harmônica no nível 5, 3ª harmônica no nível 6 e fundamental no nível 7 (Tabela 4.2)

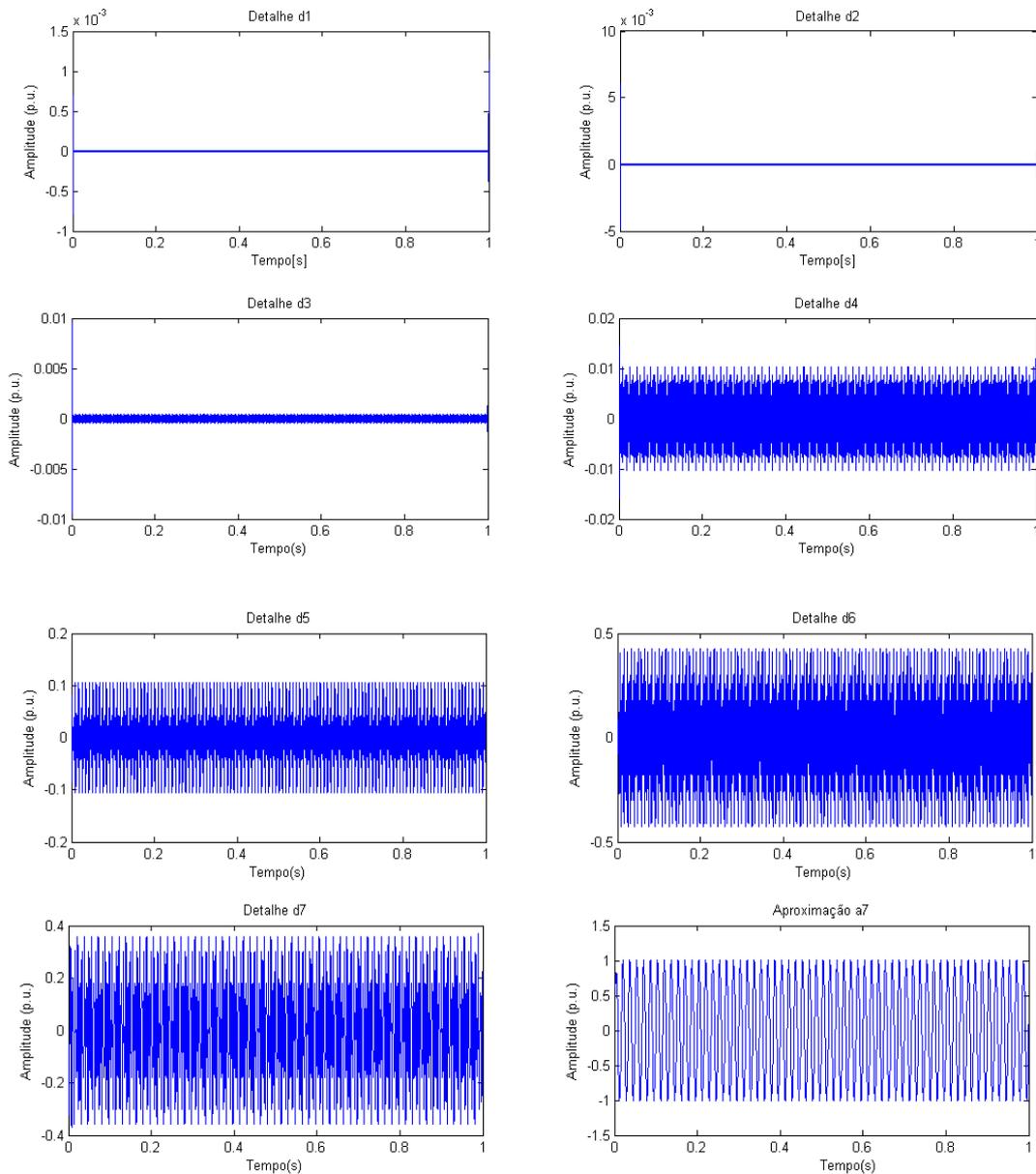


Figura 5.15. Detecção de harmônicos pela TW – Distribuição das frequências nos níveis de decomposição. Detalhes até o sétimo nível.

5.4. Detecção de *Notching*

É um distúrbio gerado pelo funcionamento normal de dispositivos chaveados de a base dispositivos de eletrônica de potência, quando ocorre o chaveamento de uma fase para outra. O chaveamento dos dispositivos gera momentos de curto-circuito entre fases, resultando o

surgimento de corte de tensões. Exemplo desses dispositivos: acionamentos de velocidade variável e fontes ininterruptas de energia (*Uninterruptible Power Supply* - UPS). A Figura 5.16 mostra a forma de onda resultante de um dispositivo com o ângulo de disparo de 30° e de comutação de 5° .

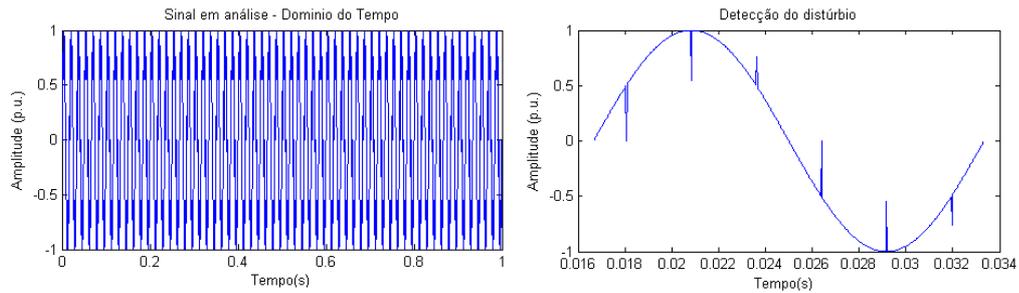


Figura 5.16. Sinal em análise – Detecção de *notching* pelo oscilógrafo. Detecção e detalhe de um ciclo.

5.4.1. Detecção através da Transformada de *Fourier* Janelada

A Figura 5.17 apresenta o espectrograma do sinal em duas dimensões (Tempo x Frequência) e em três dimensões (Tempo x Frequência x Energia) resultante da TFJ. O gráfico demonstra um espalhamento de energia além da frequência de 60 Hz (próximo ao ponto zero no gráfico). Analisando o gráfico, não é percebido nenhum destaque.

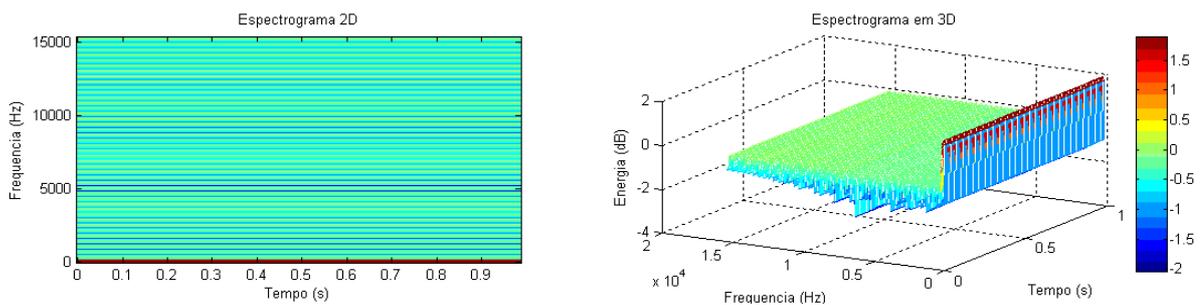


Figura 5.17. Detecção de *notching* pela TFJ - Espectrograma em duas dimensões e três dimensões.

5.4.2. Detecção através da Transformada *Wavelet*

Tem-se nas Figuras 5.18 o resultado da TW utilizando a AMR. Nesta análise já no primeiro nível de decomposição não se verifica alteração significativa. Na análise dos 7 níveis, é verificada a

concentração da energia na última decomposição (7º nível) com um pouco de espalhamento para o 6º nível. Esta característica coincide com o sinal sem distúrbio.

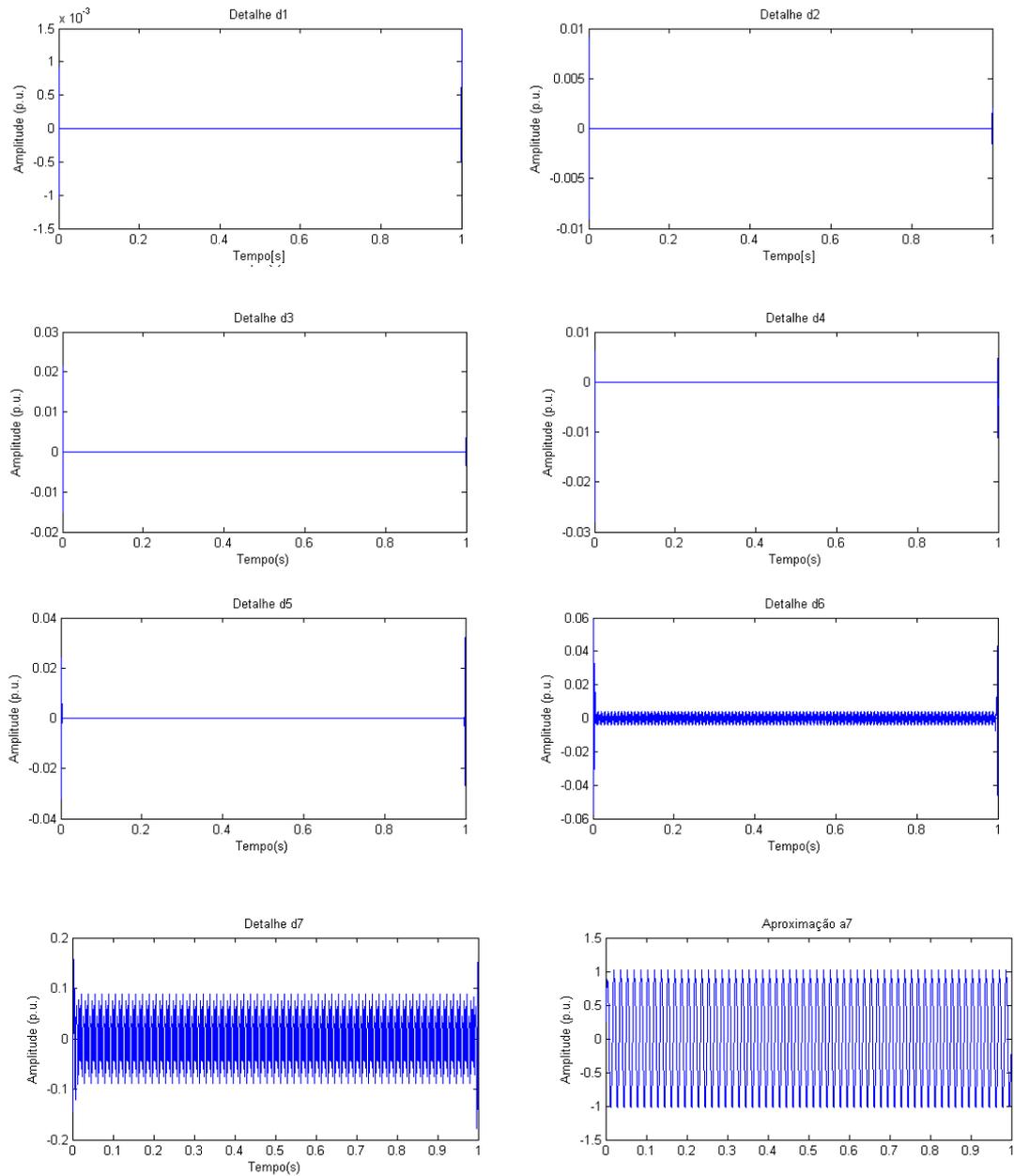


Figura 5.18. Detecção de *notching* pela TW – Detalhes do 1º ao 7º nível.

5.5. Detecção de Flutuação de Tensão

É o distúrbio gerado por qualquer carga com considerável variação de corrente, especialmente em componente reativa, como por exemplo, partida de grandes motores. A Figura 5.19 ilustra o sinal da rede com flutuação de 7Hz, $\pm 5\%$. Observe que o distúrbio inicia no instante de 0,1983 segundos e termina no instante 0,615 segundos.

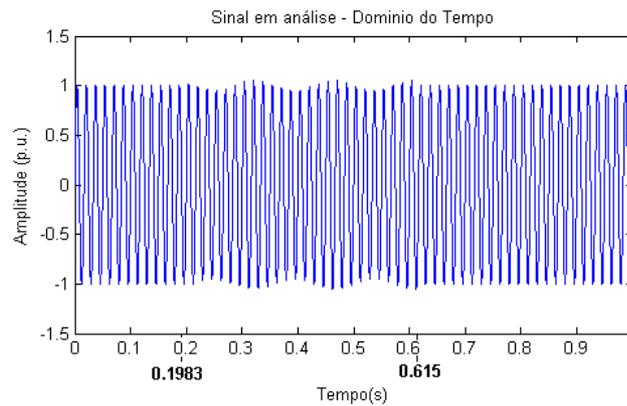


Figura 5.19. Sinal em análise – Detecção de flutuação de tensão pelo oscilógrafo.

5.5.1. Detecção através da Transformada de *Fourier* Janelada

A Figura 5.20 apresenta o espectrograma do sinal em duas dimensões (Tempo x Frequência) e em três dimensões (Tempo x Frequência x Energia) resultante da TFJ. Também foi inserido o TFJ 3D Janelada estreitada para visualização do distúrbio.

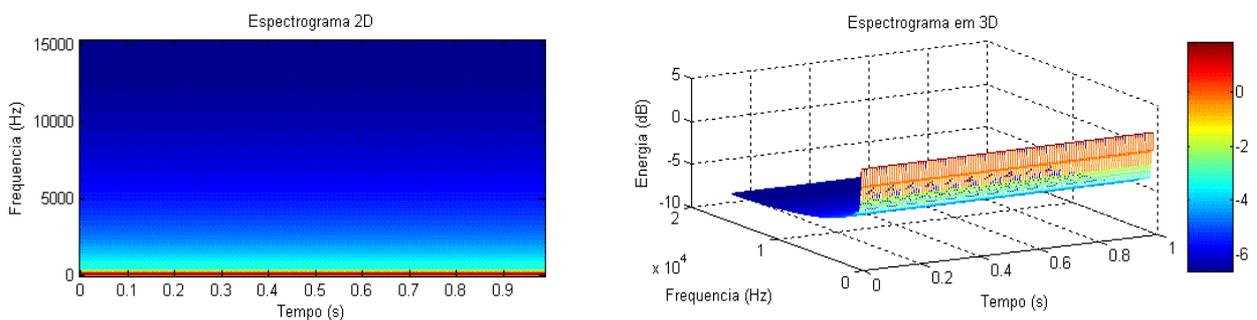


Figura 5.20. Detecção de flutuação de tensão pela TFJ - Espectrograma em duas dimensões, três dimensões e três dimensões em detalhes.

A Figura 5.20 informa que não há evento.

5.5.2. Detecção através da Transformada *Wavelet*

Tem-se na Figura 5.21 o resultado da TW utilizando a AMR. Nesta análise já no primeiro nível de decomposição é possível que o algoritmo apresente as variações na janela amostrada. Tais variações são responsáveis pelo início (de 0,1983) e o fim (0,615 segundos) da flutuação de tensão.

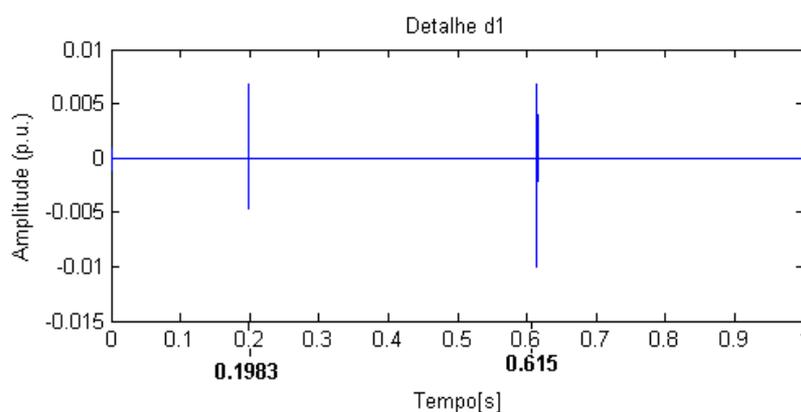


Figura 5.21. Detecção de flutuação de tensão pela TW – Detalhe 1º Nível.

5.6. Resultados

Pelos resultados observados nas seções anteriores e comparação com a bibliografia revisada, verifica-se que os dois métodos têm uma eficiência satisfatória para detecção dos distúrbios de afundamento de tensão, elevação de tensão. A Transformada *Wavelet* tem também eficiência satisfatória para detecção dos distúrbios de Harmônico e Flutuação de Tensão. Já a Transformada de *Fourier* Janelada não conseguiu detectar estes distúrbios. Os dois métodos têm resultados insatisfatórios para detecção de *Notching*. Esses resultados estão evidenciados na Tabela 5.3. Para o cálculo do percentual de erro foi considerado a duração total dos eventos registrados pelos métodos.

Tabela 5.1. Eficiência na detecção dos distúrbios.

| Distúrbio | Percentual de erro | |
|-----------------------|--------------------|------|
| | TFJ | TW |
| Afundamento de Tensão | 0,12% | 0% |
| Elevação de Tensão | 0,01% | 0% |
| Harmônico | 100% | 0% |
| <i>Notching</i> | 100% | 100% |
| Flutuação de Tensão | 100% | 0% |

CAPITULO 6 -CONCLUSÕES E CONTINUAÇÃO DO TRABALHO

6.1. Conclusões

Este trabalho teve como objetivo fazer uma análise comparativa do desempenho da Transformada de *Fourier* Janelada (TFJ) e Transformada *Wavelet* (TW), mediante simulações de distúrbios para diferentes condições de operação de um sistema elétrico. O diferencial deste trabalho esta na comparação dos dois métodos durante a detecção dos distúrbios de características temporárias e de características permanentes: afundamento de tensão, elevação de tensão, harmônico, *notching* e flutuação de tensão) presentes devido à atuação de dispositivos não-lineares, seja diretamente no sistema ou para funcionamento de cargas (a exemplo: motores elétricos).

Embasado na literatura, os resultados obtidos não indicam superioridade absoluta de uma das duas técnicas na detecção dos distúrbios de elevação de tensão, afundamento de tensão, harmônicos, *notching* e flutuação de tensão que possam ocorrer em regime permanente para aplicação dos métodos na detecção dos distúrbios. O melhor resultado obtido é pela TW por conseguir se destacar durante a detecção de todos os distúrbios analisado (acerto de 100%), com exceção de *notching*. A TFJ teve um resultado satisfatório, conforme literatura revisada, para detecção de afundamento de tensão e elevação de tensão (99,98% e 99,99%, respectivamente). Não conseguiu detectar demais eventos.

É apresentado de forma simples, sucinta e didática que a detecção de sinais elétricos usando a TFJ e a TW, tem as seguintes características :

- Para elevação e afundamento de tensão, distúrbio de ocorrência transitória as duas metodologias são assertivas para ajuste da janela (TFJ) e do nível de decomposição (TW com análise de multiresolução - AMR);

▪ Para harmônico, distúrbio com período de ocorrência continuada, conforme frequências múltiplas da fundamental, a detecção via TW possui destaque pela característica do método (associado à análise de multiresolução) de filtrar as frequências em faixas, conservando as energias de cada faixa de frequência. A TFJ não consegue detectar o distúrbio porque, durante o ajuste da janela, a melhoria na transformação para o domínio da frequência a informação do tempo é perdida, e a melhoria na transformação para o domínio do tempo a informação na frequência é perdida, existindo sempre uma perda de informação;

▪ Para distúrbios de características continuadas e instantâneas (*notching*) inicialmente as duas metodologias são de baixo desempenho por apresentar erro de 100%. A TFJ depende do ajuste da janela, e a TW depende do nível de decomposição para filtrar o evento da fundamental. Em ambos os casos há uma distribuição de energia conforme teorema *Parseval* capaz de ser caracterizado o distúrbio na etapa de caracterização, após a detecção. A transformada Wavelet pela sua robustez tem maior facilidade na detecção do evento quando observado a distribuição da energia do sinal analisado cada nível, conforme revisão bibliográfica. Mas este trabalho limitou a detecção na identificação e pré-classificação do distúrbio com janelas e filtros selecionados conforme visto no capítulo 4..

▪ Para distúrbios de características transitórias e variações em frequência baixas (flutuação de tensão), a princípio somente a TW tem bom desempenho, devido à detecção da característica transitória. A TFJ vai depender do tamanho da janela ;

▪ A TW provê informações sobre o conteúdo de frequência de sinais similarmente a TFJ. Porém, ao contrário da TFJ, a TW é capaz de focalizar pequenos intervalos de tempo para conteúdos de alta frequência e em longos intervalos de tempo para conteúdos de baixa frequência, destacando-se na aplicação por este motivo;

▪ Para aplicação de TFJ, o uso de uma janela larga resulta em boa resolução na frequência, porém resolução baixa no tempo ao passo que o uso de uma janela estreita fornecerá uma boa resolução no tempo e baixa resolução na frequência e

▪ Para aplicação da TW com o método de AMR, deve ser calculado o nível a partir da definição do limite de frequência a ser monitorado.

6.2. Continuação do trabalho

No decorrer do presente trabalho, foram identificadas várias possibilidades de desenvolvimento de novos projetos relacionados com a metodologia fundamentada no estudo de detecção de distúrbios de qualidade da energia elétrica com base na Transformada de Fourier Janelada (TFJ) e Transformada Wavelet (TW). Algumas dessas estão relacionadas abaixo:

- 1) Melhorar o método utilizado na dissertação através a partir da definição da janela para TFJ e da *Wavelet*-mãe para TW para os distúrbios que tiveram a taxa de erro de próxima ou igual a 100%;
- 2) Aplicar a comparação dos métodos TFJ e TW utilizado nesta dissertação na detecção dos demais distúrbios de qualidade da energia elétrica;
- 3) Estudar métodos alternativos, tipo decomposição do sinal utilizando a transformada, modelagem da fundamental e recomposição do sinal pela transformada inversa. Este último faz-se a comparação com o sinal em análise para extração do erro na detecção e
- 4) Estudar métodos a partir da definição da janela para TFJ e da *Wavelet*-mãe para TW para detecção de eventos simultâneos.

REFERÊNCIAS

- ANDO JÚNIOR, O. H. Desenvolvimento de uma Metodologia para Identificar e Quantificar Distúrbios da Qualidade da Energia Elétrica. Porto Alegre. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 186p, 2009.
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica: Resolução nº 505 (2001) de 26 de novembro de 2001 - Conformidade dos níveis de tensão. Disponível em <http://www.aneel.gov.br/biblioteca.cfm>>Acesso em:10/06/2010.
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica: Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. Módulo 8 (2008)- Qualidade da Energia Elétrica
- ARAÚJO, A. E. A, NEVES, W. L. A. Calculo de Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Energia. Editora UFMG, 2005.
- ARRUDA, E. F. Análise de Distúrbios Relacionados com a Qualidade da Energia Elétrica Utilizando a Transformada *Wavelet*. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. 114p, 2003.
- BELISÁRIO, C. D. A.; BAHIENSE, D. A.; OLIVEIRA, G. M. Continuidade nos Serviços de Distribuição de Energia Elétrica, Conj. & Planej., Salvador: SEI, fev 2003, n. 105, 2003.
- BRITO, N. S. D.; SOUZA, B. A.; PIRES, F. A. C. *Daubechies wavelets in quality of electrical power, In: 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power Proceedings*, v.1, p. 511 - 515. Athens, Greece, October 14-16, 1998.
- COSTA, F. B.; SOUZA, B. A. de; BRITO, N. S. D. Detecção de Falhas Evolutivas e Múltiplos Distúrbios em Registros Oscilográficos Baseada na Transformada *Wavelet* Discreta. Revista Controle & Automação/Vol.21 no.2/Março e Abril 2010.
- DATAPOOL ELETRÔNICA. Apostila de Qualidade da Energia Elétrica – QEE2910. Itajubá, 2010.

- DELMONT, O. F. Utilização da Transformada Wavelet para a caracterização de Distúrbios de Qualidade da Energia Elétrica. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. São Carlos, 2003.
- DELMONT, O. F. Um Algoritmo para Detecção, Localização e Classificação de Distúrbios na Qualidade da Energia Elétrica Utilizando a Transformada *Wavelet*. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. São Carlos, 2007.
- DIAS, G. A. D. Harmônicas em Sistemas Industriais. 2ª Ed. Porto Alegre. EDIPUCRS. 284p, 2002.
- DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN, M. F.; BEATHY, H. W. *Electrical Power Systems Quality*, 2nd edition, McGraw-Hill. 528p, 2003.
- FERREIRA, J. C. Utilização da Transformada Wavelet para Detectar Variações Anormais de Frequência em Sistemas de Geração Distribuída. Uberlândia. 191p. Dissertação de Mestrado – FEELT, Universidade Federal de Uberlândia, 2009.
- FILHO, O. D. Um Algoritmo para a Detecção, Localização e classificação de distúrbios na Qualidade da Energia Elétrica utilizando a Transformada Wavelet; Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, 2007.
- FRANCO, E. Qualidade de Energia. Engecomp – Tecnologia em Automação e Controle Ltda. Artigo. Disponível <http://www.engecomp.com.br/pow_qual.htm>. Acesso em: 06/04/2010.
- GONÇALVES, H. A.; ARGENTA, J. B.; SANCHEZ, W. D. C. Utilização da Transformada Discreta de Fourier para a Análise e Síntese de Sinais de Variações Momentâneas e Temporárias Tipo Afundamento de Tensão. Trabalho Acadêmico de Engenharia Elétrica – Eletrotécnica, UTFPR, Curitiba, 2007.
- IEC 61000-2-8. *Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 2: Environment – Section 8: Voltage Dips and Short Interruptions on Public Electric Power Supply Systems with Statistical Measurement Result*, 2002.

- IEC 61000-4-11. *Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 4: Testing and measurement technique - Section 11: Voltage dips, short interruptions and voltage variations immunity tests*, 2004.
- IEC 61000-4-15: *European Committee for Electrotechnical Standardization Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 4: Testing and measurement technique -. Section 15: Flickermeter functional and design specifications*, 1999.
- IEC 61000-4-30: *Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 4: Testing and Measurement Techniques - Section 30: Power Quality Measurement Methods*, 2003.
- IEC 61000-4-34. *Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 4: Testing and Measurement Techniques - Section 34: Voltage Dips, Short Interruptions and Voltage Variations Immunity Tests and Equipment with Input Current more than 16 A per phase*, 2005.
- IEEE Std. 1159. *Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*. IEEE Standards Coordinating Committee 22 on Power Quality, November, 1995.
- IEEE Std 493. *Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems — Power Systems Reliability Subcommittee of the Power Systems Engineering Committee of the IEEE Industry Applications Society*, August 1998.
- JOHNSON, D. E.; HILBURN, J. L.; JOHNSON, J. R. *Fundamentos de Análise de Circuitos Elétricos*. Editora LTC, 4ª edição, 541 p, 2000.
- KAGAN, M; ROBBA, E. J.; SCHMIDT, H. P. *Estimação de Indicadores de Qualidade da Energia Elétrica-São Paulo*. Blucher.pp 230, 2009.
- LATHI, B. P. *Sinais e Sistemas Lineares*. 2ª Ed.Porto Alegre. Bookman, 2007.
- MALANGE, F. C. V. *Rede Neuro-Fuzzy-Wavelet para Detecção e Classificação de Anomalias de Tensão em Sistemas Elétricos de Potência*. Tese - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação.128 p, 2010.
- MALLAT, S. *A WAVELET TOUR OF SIGNAL PROCESSING*. 2a. ed. San Diego. Academic Press, 1999.

MARTINHO, E. Distúrbio da Energia Elétrica – 1ª Ed - São Paulo. Érica. 140 p, 2009.

MISITI, M.; MISITI, Y.; OPPENHEIM G.; POGGI. J. M. *Wavelet Toolbox for use with. Natick, MA: The Math Works*, 1202 p, 2008.

OLIVEIRA, H. M. Análise de Sinais para Engenheiros: Uma abordagem via Wavelets. 1 ed. BRASPORT. 268 p, 2007a.

OLIVEIRA, H. M. Análise RODRIGUES, L. C. P. (2008). Técnicas para a Detecção, Classificação e Localização no Tempo das Variações de Tensão de Curta e Longa Duração. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. 154p, 2007b.

TRINDADE R. M. Sistema Digital de Detecção e Classificação de Eventos de Qualidade de Energia. Dissertação de Mestrado - Faculdade de Engenharia. Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora. 114p, 2005.