Campus de São Carlos

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

Autor: Silvio Aparecido de Souza

Orientador: Prof. Titular Denis Vinicius Coury

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

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

Silvio Aparecido de Souza

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

ORIENTADOR: Prof. Tit. Denis Vinicius Coury

São Carlos
2004

DEDALUS - Acervo - EESC

Class.	TFSE EESC
Num.	6396
Tombo	T145/04
Sysno	1380658

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

S729u Souza, Silvio Aparecido de
Utilização da transformada de *Fourier* janelada para
caracterização de distúrbios na qualidade da energia
elétrica / Silvio Aparecido de Souza. -- São Carlos,
2004.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de
São Carlos-Universidade de São Paulo, 2004.
Área: Engenharia Elétrica.
Orientador: Prof. Tit. Denis Vinicius Coury.

1. Qualidade da energia. 2. Transformada de *Fourier*
janelada. 3. Classificação de distúrbios em redes
elétricas. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **SILVIO APARECIDO DE SOUZA**

Dissertação defendida e julgada em 31-03-2004 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Tit. **DENIS VINÍCIUS COURY (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO

Prof. Dr. **MARCELO BASÍLIO JOAQUIM**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO

Prof. Dr. **HERNÁN PRIETO SCHMIDT**
(Escola Politécnica/USP)

APROVADO

Prof. Assoc. **MURILO ARAUJO ROMERO**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica

Profa. Assoc. **MARIA DO CARMO CALIJURI**
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

Dedico este trabalho a minha família.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por guiar meus passos em tudo que faço.

À minha família, minha mãe Joselita, meu pai Francisco de Assis, meus irmãos Maria Lúcia, José Roberto e Maria do Carmo, meus sobrinhos Caroline Vitória e João Vitor, cunhados Celismar e Vilidiana pelo carinho e constante incentivo.

Ao Prof. Tit. Denis Vinicius Coury pela orientação, dedicação, amizade e por acreditar em meu potencial.

A todos os amigos que fiz em São Carlos, em especial aos amigos do “LSEE – O Lab.” por compartilharem comigo momentos de preocupações, discussões e principalmente muita alegria.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da EESC/USP que contribuíram, de alguma forma, para o andamento deste trabalho.

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

SUMÁRIO

SUMÁRIO.....	iv
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS.....	x
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	xi
RESUMO.....	xii
ABSTRACT	xiii
I. INTRODUÇÃO	1
1.1. <i>Organização do Trabalho</i>	3
II. A QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA	4
2.1. <i>Fenômenos Elétricos Transitórios Relacionados com a QE.....</i>	6
2.1.1. <i>Transitórios Impulsivos.....</i>	8
2.1.2. <i>Transitórios Oscilatórios</i>	9
2.2. <i>Interrupção de Tensão.....</i>	11
2.3. <i>Variações de Tensão de Curta Duração Relacionadas com a QE.....</i>	12
2.3.1. <i>Afundamento de tensão de Curta Duração</i>	12
2.3.2. <i>Elevação de tensão de Curta Duração</i>	17
2.3. <i>Variações de Tensão de Longa Duração</i>	19
2.3.1. <i>Interrupções Sustentadas</i>	19
2.3.2. <i>Subtensões Sustentadas.....</i>	20
2.3.3. <i>Sobretensões Sustentadas.....</i>	21
2.4. <i>Desequilíbrios ou Desbalanços</i>	22
2.5. <i>Distorções da Forma de Onda.....</i>	23
2.5.1. <i>Harmônicos</i>	23
2.5.2. <i>Interharmônicos.....</i>	28
2.5.3. <i>Notching</i>	28
2.5.4. <i>Ruídos.....</i>	28
2.5.5. <i>Nível CC.....</i>	29
2.6. <i>Flutuações ou Oscilações de Tensão</i>	29
2.7. <i>Variações na Frequência do Sistema Elétrico</i>	30
III. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	32

IV. A TRANSFORMADA DE FOURIER	39
4.1. <i>A Série de Fourier</i>	39
4.2. <i>A Transformada de Fourier</i>	42
4.2.1. <i>O par da Transformada de Fourier</i>	43
4.3. <i>A Transformada Discreta de Fourier</i>	44
4.4. <i>A Transformada Rápida de Fourier</i>	48
4.5. <i>A Transformada de Fourier Janelada</i>	52
4.5.1. <i>Definição e Propriedades da Transformada de Fourier Janelada</i>	55
4.5.2. <i>Interpretação como a Transformada de Fourier</i>	56
4.5.2.1. <i>Espalhamento Espectral (Leakage)</i>	61
4.5.2.2. <i>Janela Retangular</i>	62
4.5.2.3. <i>Janela de Hanning</i>	63
4.5.2.4. <i>Janela de Kaiser</i>	64
4.5.3. <i>Interpretação como Filtragem Linear</i>	67
V. O SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO SIMULADO	69
5.1. <i>Dados de Entrada para o Software ATP</i>	72
5.2. <i>Caracterização dos Distúrbios Através de Simulações no ATP Para o Sistema em Estudo</i>	76
VI. O ALGORITMO IMPLEMENTADO PARA ANÁLISE DA QUALIDADE DA ENERGIA VIA TRANSFORMADA DE FOURIER JANELADA	79
6.1. <i>Deteção e Localização do Distúrbio</i>	79
6.2. <i>Classificação dos Distúrbios</i>	80
6.2.1. <i>Classificação de uma Elevação de Tensão</i>	84
6.2.2. <i>Classificação de um Afundamento de Tensão</i>	85
6.2.3. <i>Classificação de uma Interrupção de Tensão</i>	85
6.2.4. <i>Classificação de um Transitório Oscilatório</i>	85
6.2.5. <i>Classificação de Ruídos</i>	86
6.3. <i>Estimação da Duração dos Distúrbios</i>	86
VII. RESULTADOS OBTIDOS UTILIZANDO O ALGORITMO IMPLEMENTADO	88
7.1. <i>Resultados do processo de deteção e localização dos Distúrbios</i>	88
7.2. <i>Resultados do processo de Classificação dos Distúrbios</i>	89

<i>7.3. Resultados do processo de Estimação da Duração dos Distúrbios.....</i>	<i>101</i>
<i>7.3.1. Afundamento de Tensão</i>	<i>101</i>
<i>7.3.2. Elevação de Tensão</i>	<i>102</i>
<i>7.3.3. Interrupção de Tensão</i>	<i>104</i>
VIII. CONCLUSÕES.....	105
<i>8.1. Trabalhos Futuros.....</i>	<i>107</i>
IX. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	108

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1. Custo estimado resultante de Interrupção de até 1 min.</i>	<i>5</i>
<i>Figura 2. Corrente transitória impulsiva oriunda de uma descarga atmosférica</i>	<i>8</i>
<i>Figura 3. Transitório oscilatório proveniente do chaveamento de um banco de capacitores.</i>	<i>10</i>
<i>Figura 4. Interrupção momentânea devido a um curto-circuito.</i>	<i>12</i>
<i>Figura 5. Afundamento de tensão de 30% originado por uma falta fase-terra.</i>	<i>13</i>
<i>Figura 6. Afundamento de tensão causado pela partida de um motor.</i>	<i>14</i>
<i>Figura 7. Tolerâncias típicas de tensão para computadores (curva CBEMA).</i>	<i>15</i>
<i>Figura 8. Elevação de tensão de 60% originado por uma falta fase-terra.</i>	<i>17</i>
<i>Figura 9. Potência consumida por uma lâmpada incandescente de 100W para diferentes valores de tensão.</i>	<i>21</i>
<i>Figura 10. Forma de onda com distorções harmônicas de 3ª e 5ª ordem.</i>	<i>23</i>
<i>Figura 11. Vida útil x Sobre-temperatura em capacitores.</i>	<i>27</i>
<i>Figura 12. Função senoidal com frequências 2, 4 e 8 Hz.</i>	<i>40</i>
<i>Figura 13. Par de transformadas de Fourier.</i>	<i>45</i>
<i>Figura 14. Função impulso com período T.</i>	<i>45</i>
<i>Figura 15. Convolução de $f(t) \cdot \Delta(t)$.</i>	<i>46</i>
<i>Figura 16. Transformada de Fourier Janelada.</i>	<i>53</i>
<i>Figura 17. Janela da Incerteza.</i>	<i>54</i>
<i>Figura 18. Átomos no domínio do tempo e da frequência.</i>	<i>54</i>
<i>Figura 19. Esboço de $x(m)$ e $w(t-m)$ para vários valores de t.</i>	<i>56</i>
<i>Figura 20. Descontinuidade resultante da extensão do sinal através do processo da TDF. (a) sinal contínuo; (b) sinal mostrando a descontinuidade assumida pelo processo da TDF.</i>	<i>61</i>
<i>Figura 21. Análise dos dois sinais mostrando o espalhamento espectral.</i>	<i>62</i>
<i>Figura 22. (a) Janela Retangular (b) Resposta em frequência – magnitude (dB)</i>	<i>63</i>
<i>Figura 23. (a) Janela de Hanning (b) Resposta em frequência – magnitude (dB) ...</i>	<i>64</i>
<i>Figura 24. (a) Janela de Kaiser (b) Resposta em frequência com $\beta=3.0$ – magnitude (dB)</i>	<i>65</i>

<i>Figura 25. (a) Janelas Kaiser para $\beta=0, 3$ e 6 com $M=20$. (b) Transformadas de Fourier correspondente as janelas em (a). (c) Transformada de Fourier correspondente a janela de Kaiser com $\beta= 6$ e $M=10, 20$ e 40.</i>	66
<i>Figura 26. Interpretação da análise do espectro de tempo curto como filtragem linear</i>	67
<i>Figura 27. Diagrama unifilar do sistema elétrico de distribuição em análise.</i>	69
<i>Figura 28. Formas de ondas das tensões originadas por uma falta fase-terra (AT).</i>	75
<i>Figura 29. Formas de ondas das correntes originadas por uma falta fase-terra (AT).</i>	75
<i>Figura 30. Janelamento dos sinais em regime permanente e sob análise, nas cores azul e vermelha respectivamente.</i>	79
<i>Figura 31. Esquema de Janelamento utilizando janelas de 2 ciclos.</i>	80
<i>Figura 32. Avaliação sucessiva das informações através da TRF.</i>	81
<i>Figura 33. Afundamento de tensão de 31 %.</i>	82
<i>Figura 34. Espectrograma para um Afundamento de tensão de 31 %.</i>	83
<i>Figura 35. Análise espectral para um Afundamento de tensão de 31%.</i>	84
<i>Figura 36. Ilustração do processo de detecção do fim do distúrbio.</i>	87
<i>Figura 37. Elevação de tensão de 30%.</i>	90
<i>Figura 38. Espectrograma para o caso de elevação de tensão utilizando a janela Retangular.</i>	90
<i>Figura 39. Espectrograma para o caso de elevação de tensão utilizando a janela de Hanning.</i>	91
<i>Figura 40. Espectrograma para o caso de elevação de tensão utilizando a janela de Kaiser.</i>	91
<i>Figura 41. Análise espectral para uma elevação de tensão de 30%.</i>	92
<i>Figura 42. Interrupção momentânea de tensão curta duração.</i>	95
<i>Figura 43. Análise espectral para o caso de uma interrupção de tensão.</i>	96
<i>Figura 44. Oscilação transitória provocada por um chaveamento de capacitores.</i>	97

<i>Figura 45. Ruídos de 1,2% superpostos a um sinal de tensão em regime permanente.....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 46. Espectrograma para o caso de transitório oscilatório com as janelas: (a)Retangular, (b) de Hanning e (c) de Kaiser.....</i>	<i>98</i>
<i>Figura 47. Espectrograma para o caso de ruído de 1,2% com as janelas: (a)Retangular, (b) de Hanning e (c) de Kaiser.....</i>	<i>99</i>
<i>Figura 48. Análise espectral para um chaveamento de Banco de Capacitores.....</i>	<i>100</i>
<i>Figura 49. Análise espectral para um caso de ruídos de 1,2%.....</i>	<i>101</i>

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1 – Categorias e características típicas de fenômenos eletromagnéticos nos sistemas elétricos.</i>	<i>7</i>
<i>Tabela 2 – Resumo das características dos distúrbios relacionados com a QE.....</i>	<i>31</i>
<i>Tabela 3 – Características de algumas janelas no domínio da frequência.</i>	<i>60</i>
<i>Tabela 4 – Dados dos transformadores particulares.</i>	<i>70</i>
<i>Tabela 5 – Dados dos transformadores de distribuição.</i>	<i>71</i>
<i>Tabela 6 – Resultado das simulações do sistema para afundamentos de tensão.....</i>	<i>77</i>
<i>Tabela 7 – Resultado das simulações do sistema para elevação de tensão.....</i>	<i>77</i>
<i>Tabela 8 – Interrupções momentâneas geradas através de situações de faltas.....</i>	<i>78</i>
<i>Tabela 9 – Casos simulados para obtenção de oscilações transitórias</i>	<i>78</i>
<i>Tabela 10 – Tempos de detecção inicial dos distúrbios</i>	<i>89</i>
<i>Tabela 11 – Amplitudes estimadas pelo algoritmo para os casos de elevação de tensão.</i>	<i>93</i>
<i>Tabela 12 – Amplitudes estimadas pelo algoritmo para os casos de afundamento de tensão.</i>	<i>94</i>
<i>Tabela 13 – Amplitudes estimadas pelo algoritmo para os casos de interrupção de tensão.</i>	<i>96</i>
<i>Tabela 14 – Análise da duração estimada pelo algoritmo para os casos de afundamento de tensão.</i>	<i>102</i>
<i>Tabela 15 – Análise da duração estimada pelo algoritmo para os casos de elevação de tensão.....</i>	<i>103</i>
<i>Tabela 16 – Análise da duração estimada pelo algoritmo para os casos de interrupção de tensão.</i>	<i>104</i>
<i>Tabela 17 – Média dos erros obtidos através da comparação Janelas x distúrbios.....</i>	<i>106</i>

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

DEC – Duração Equivalente de Interrupção por Consumidor

FEC – Frequência Equivalente de Interrupção por Consumidor

PAC – Ponto de Acoplamento Comum

QE – Qualidade da Energia

RNA – Redes Neurais Artificiais

SEP – Sistema Elétrico de Potência

TW – Transformada *Wavelet*

TF – Transformada de *Fourier*

TDF – Transformada Discreta de *Fourier*

TRF – Transformada Rápida de *Fourier*

TFCT – Transformada de *Fourier* de Curto Tempo

TFJ – Transformada de *Fourier* Janelada

DHT – Distorção Harmônica Total

DHCT – Distorção Harmônica de Curto Tempo

WN – *Wavelet* Network

RESUMO

SOUZA, S. A., Utilização da Transformada de *Fourier* Janelada para Caracterização de Distúrbios na Qualidade da Energia Elétrica. São Carlos, 2004, 124p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Este trabalho apresenta um estudo da aplicação da Transformada de *Fourier* Janelada à Qualidade da Energia Elétrica. Esta abordagem procura, pela implementação de um algoritmo computacional, detectar, localizar e classificar eventuais distúrbios que ocorrem em um determinado Sistema Elétrico. Da situação atual, tem-se que variações nas formas de ondas dos sinais de tensão como elevação, afundamento e interrupção de tensão, oscilações transitórias e ruídos, são freqüentes, chamando a atenção para a qualidade da energia elétrica fornecida pelas concessionárias. A análise de tais fenômenos, que normalmente é descrita no domínio do tempo (resolução de equação diferencial) ou no domínio da freqüência (através da Transformada de *Fourier*), pode agora ser analisada simultaneamente em ambos os domínios do tempo e da freqüência, dispondo-se da Transformada de *Fourier* Janelada. As janelas utilizadas para esta finalidade foram as de Hanning, retangular e a de Kaiser. Para esta análise em específico, a simulação dos diversos distúrbios ocorridos no sistema de distribuição foi realizada através do *software* ATP – *Alternative Transients Program* – cujas características seguem corretamente um sistema real da concessionária CPFL - Companhia Paulista de Força. Os testes efetuados mostraram que a Transformada de *Fourier* Janelada possui uma grande potencialidade quanto à sua aplicação na avaliação da qualidade da energia elétrica.

Palavras-chave: Qualidade da Energia, Transformada de *Fourier* Janelada, Classificação de Distúrbios em Redes Elétricas.

ABSTRACT

SOUZA, S. A., The use of the Windowed *Fourier* Transform for the Characterization of Disturbances in Power Quality. São Carlos, 2004, 124p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

This dissertation presents a study of Windowed *Fourier* Transform applied to Power Quality. By the implementation of a computational algorithm, this approach aims to detect, locate and classify disturbances that may occur in Power Systems. Variations in voltage waveforms, such as sag, swell, interruption, oscillatory transient and noise have become frequent in electric systems, attracting the attention to the power quality supplied. The analysis of such phenomena, which is usually described either in the time domain (differential equation resolution) or in the frequency domain (Fourier Transform), can now be analyzed simultaneously in both domains: time and frequency, by the windowed *Fourier* Transform. The windows used to provide this information are the Hanning, rectangular and Kaiser. The simulation of the diverse disturbances occurred in the distribution system was accomplished by means of ATP software – *Alternative Transients Program* – whose characteristics correctly follow a real distribution system of CPFL electric utility. The tests show the windowed *Fourier* Transform has a great potentiality when applied to evaluate the power quality.

Key Words: Power Quality, Windowed *Fourier* Transform, Classifying Disturbances in Electrical Network.

I. INTRODUÇÃO

Atualmente a Qualidade da Energia (QE) é uma preocupação constante que envolve tanto empresas de energia elétrica, quanto os consumidores e fabricantes de equipamentos. As concessionárias são responsáveis principalmente pela distribuição e fornecimento dos níveis de tensão do sistema. Os consumidores podem ser afetados de modo bastante significativo, ou por outro lado, contribuir com perturbações o próprio sistema elétrico utilizado.

O assunto, Qualidade da Energia, ganhou maior enfoque com a crescente modernização do parque industrial brasileiro, no início da década de 90, motivada pela competição de um mercado cada vez mais exigente, caracterizando um maior emprego não só de microcomputadores como também de outras cargas com características não lineares, sendo estas utilizadas nas mais diferentes atividades desde as produtivas até as recreativas. Com isso, os clientes que utilizam os serviços de energia elétrica passaram a pleitear uma melhor QE para essas novas cargas [1].

Assim, prevê-se que é de fundamental importância, um melhor acompanhamento da qualidade da energia elétrica tanto em termos de controle das grandezas elétricas envolvidas, como do ponto de vista da eliminação de diversos distúrbios que por ventura venham a afetar a QE.

O cuidado com a QE é um tema que tem sido discutido e analisado mundialmente. Segundo dados do *Electric Power Research Institute – EPRI*, cerca de 91% dos cortes de energia elétrica que ocorrem nos Estados Unidos têm uma duração inferior a 2 segundos, e 85%, duração inferior a 200 milisegundos [2]. As maiorias das interrupções são quase imperceptíveis para certos tipos de consumidores, mas são suficientes e responsáveis por causarem grandes danos a consumidores que possuem cargas mais sensíveis a estas interrupções. Como exemplo, uma interrupção de curta duração pode causar danos gravíssimos aos consumidores industriais, como

retirar de serviço toda uma linha de produção acarretando custos elevados para a restauração do sistema.

À medida que são incorporadas de forma inadequada aos sistemas elétricos, cargas com características não lineares, sendo estas geradoras de distorções harmônicas (tais como retificadores, sistemas de acionamento de laminadores, comando de máquinas de processo industrial), maior será a distorção da forma de onda senoidal de tensão e ou corrente fornecida ao sistema. Dependendo do nível dessas distorções, as mesmas causam o sobreaquecimento nas máquinas rotativas, sobrecarga nos bancos de capacitores, mau funcionamento de equipamentos elétricos de controle, proteção e comunicação, distorções das tensões das barras do sistema industrial e da concessionária, e ainda afetam o desempenho dos medidores de energia elétrica [3, 4, 5].

Tais níveis de distorções devem ser levados em consideração, uma vez que, para problemas relacionados com a QE, existe uma completa interação entre a geração, transmissão e distribuição, onde tais níveis de distorções podem afetar os consumidores finais dependendo das características de seus equipamentos [6].

Sendo assim, uma etapa importante desta questão é definir o que seria então um problema de QE. Entre muitos apontamentos da literatura DUGAN *et al* [7] dizem que se pode classificar o assunto como qualquer problema manifestado na tensão, corrente ou desvio de frequência, que resulte em falha ou má operação dos equipamentos de consumidores.

Atualmente, a QE é avaliada pela concessionária e órgãos governamentais através de equipamentos que medem índices específicos, como DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) e FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora), cujas definições se encontram na Resolução N° 24 da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANNEL [8]. No entanto, estes índices estão relacionados somente com o intervalo de tempo em que o sistema permanece desligado e a frequência de tais desligamentos. Dessa maneira, estes não acusam certas alterações nas formas de onda e na frequência que são, na maioria das vezes, causadas por ruídos, distorções harmônicas, certas condições de falta e chaveamento de capacitores que podem acarretar em problemas operacionais dos equipamentos.

1.1. Organização do Trabalho

Uma introdução geral sobre o assunto é vista no capítulo 1. No capítulo 2, denominado “A Qualidade da Energia Elétrica”, são definidos vários distúrbios relacionados com a QE. Neste, a origem de tais distúrbios é apresentada, bem como algumas medidas para diminuir seus efeitos ou até mesmo eliminá-los.

Um levantamento bibliográfico sobre a utilização da Transformada de *Fourier* Janelada (TFJ), baseada na mesma idéia da Transformada de *Fourier* de Curto Tempo (TFCT) na análise da QE é apresentada no capítulo 3. Tal levantamento bibliográfico apresenta as publicações mais significativas para o desenvolvimento desse projeto e alguns comentários e apontamentos sobre os mesmos.

A teoria fundamental no entendimento da TFJ é apresentada no capítulo 4. O capítulo 5 compreende a simulação de um Sistema Elétrico de Distribuição em situações típicas de origem de distúrbios relacionados com a QE. Tal simulação é feita utilizando-se o *software* ATP (*Alternative Transient Program*), que constitui uma ferramenta poderosa para este fim.

O algoritmo implementado para análise qualidade da energia com a finalidade de detecção, localização e classificação dos distúrbios é detalhada no capítulo 6.

Resultados da submissão dos eventos gerados, usando-se o sistema simulado, com base na análise da TFJ são apresentados no capítulo 7, e no capítulo 8, são apresentados os comentários e conclusões finais sobre o trabalho desenvolvido, bem como sugestões para trabalhos futuros.

II. A QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

Este Capítulo visa apresentar a definição de alguns dos fenômenos elétricos relacionados com a Qualidade da Energia, bem como as suas origens, consequências e sugestões para a mitigação dos mesmos. O termo “Qualidade da Energia” refere-se a uma ampla variedade de fenômenos que se caracterizam pela tensão e corrente para um dado tempo e para uma dada localização no sistema elétrico de potência [9].

A crescente aplicação de equipamentos eletrônicos que podem causar distúrbios eletromagnéticos, ou que podem ser sensíveis a estes fenômenos, tem aumentado o interesse da QE nos últimos anos. No passado, os problemas causados pela má qualidade no fornecimento de energia não eram tão expressivos, visto que, os equipamentos existentes eram pouco sensíveis aos efeitos dos fenômenos ocorridos e não se tinham instalados, em grandes quantidades, dispositivos que causassem a perda da qualidade da energia. Em decorrência do desenvolvimento tecnológico, principalmente da eletrônica, consumidores e concessionárias de energia elétrica têm se preocupado muito com a qualidade da energia. Isto se justifica, principalmente, pelos seguintes motivos como exposto em [7]:

- A sensibilidade dos equipamentos atualmente utilizados, quanto às variações nas formas de onda de energia fornecidas, tem sido um fator preocupante, uma vez que na sua maioria, possuem controles baseados em microprocessadores e dispositivos eletrônicos sensíveis a muitos tipos de distúrbios;
- O crescente interesse pela racionalização e conservação da energia elétrica, com vistas a otimizar a sua utilização, tem aumentado o uso de equipamentos que, em muitos casos, aumentam os níveis de distorções harmônicas e podem levar o sistema a condições de ressonância;

- Uma maior integração dos processos, significando que a falha de qualquer componente traz consequências ainda mais importantes para o sistema elétrico;
- Maior conscientização dos consumidores em relação aos fenômenos ligados à QE, visto que os mesmos, estão se tornando mais informados a respeito de fenômenos como interrupções, subtensões, transitórios de chaveamentos, etc;
- As consequências resultantes de variações nas formas de onda sobre a vida útil dos componentes elétricos.

Para exemplificar os impactos econômicos da QE, a Figura 1 extraída da referência [10] mostra os custos associados a interrupções elétricas com duração de até 1 minuto para diferentes setores econômicos dos Estados Unidos.

Figura 1. Custo estimado resultante de Interrupção de até 1 min.

Para avaliar o quanto um sistema está operando fora de suas condições normais, duas grandezas elétricas básicas, tensão e frequência, podem ser empregadas. A frequência em um sistema interligado situa-se na faixa de $60 \pm 0,5\text{Hz}$. Por outro lado, com relação à tensão, três características principais devem ser observadas:

- A forma de onda, a qual deve ser o mais próxima possível da forma senoidal;

- A simetria do sistema elétrico; e
- As magnitudes das tensões dentro de limites aceitáveis.

Entretanto, existem alguns fenômenos, aleatórios ou intrínsecos, que ocorrem no sistema elétrico os quais causam o deterioramento no fornecimento da qualidade da energia. Sendo assim, são utilizados métodos de análise para tais distúrbios, com o intuito de conhecê-los, permitindo assim a compreensão de suas causas.

A Tabela 1, extraída da referência [7], mostra as categorias dos itens de QE e as características típicas dos fenômenos (conteúdo espectral, duração e amplitude) que contribuem para a perda da qualidade de um suprimento elétrico.

2.1. Fenômenos Elétricos Transitórios Relacionados com a QE

O termo, transitório, tem sido usado na análise de variações que ocorrem no sistema de energia para denotar um evento que é indesejado, mas momentâneo em sua natureza. A ocorrência de tais fenômenos transitórios deve-se a diversas situações. Muitos são decorrentes de variações instantâneas na corrente, as quais interagem com a impedância do sistema, resultando em elevadas tensões instantâneas. Outros podem ser consequência de cargas com operação intermitente, chaveamento de bancos de capacitores, faltas à terra, pela própria operação de dispositivos de semicondutores e falhas em condutores. A duração de um transitório é pequena, porém de grande importância, uma vez que os equipamentos presentes nos sistemas elétricos estarão submetidos a grandes solicitações de tensão e/ou corrente. Os fenômenos transitórios podem ser classificados em dois grupos: os chamados transitórios impulsivos e os oscilatórios, causados, por exemplo, por descargas atmosféricas e por chaveamentos de bancos capacitivos sobre o sistema respectivamente.

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

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

2.1.1. Transitórios Impulsivos

Normalmente causado por descargas atmosféricas, um transitório impulsivo pode ser definido como uma alteração repentina nas condições de regime permanente da tensão, corrente ou ambas, caracterizando-se por apresentar impulsos unidirecionais em polaridade (positiva ou negativa) e com frequência bastante diferente daquela da rede elétrica. A Figura 2, extraída de [7], ilustra uma corrente típica de um transitório impulsivo, oriundo de uma descarga atmosférica.

Os transitórios impulsivos geralmente são definidos por um tempo de subida e outro de descida do impulso, os quais, também, podem ser expressos pelo seu conteúdo espectral. Para exemplificar, afirmar que um transitório impulsivo apresenta como parâmetros $1,2 \times 50 \mu\text{s}$ e 2000V , significa caracterizar que o mesmo atinge seu valor máximo de 2000V em um tempo de $1,2 \mu\text{s}$ e, posteriormente, decai até a metade de seu valor máximo no tempo de $50 \mu\text{s}$.

Figura 2. Corrente transitória impulsiva oriunda de uma descarga atmosférica

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

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

Em se tratando de descargas em pontos de Extra Alta Tensão, o surto se propaga ao longo da linha em direção aos seus terminais podendo atingir os equipamentos instalados em subestações de manobra ou estações abaixadoras. Entretanto, a onda de tensão ao percorrer a linha, desde o ponto de incidência até as subestações abaixadoras para a tensão de distribuição, tem a sua crista atenuada consideravelmente, o que tende a eliminar os efeitos oriundos de descargas atmosféricas ocorridas em nível de transmissão, em consumidores ligados em nível de baixa tensão. Contudo, os consumidores atendidos em tensão de transmissão, e supostamente localizados nas proximidades do ponto de descarga, estarão sujeitos a tais efeitos, podendo danificar alguns equipamentos de suas respectivas instalações [10].

2.1.2. Transitórios Oscilatórios

Um transitório oscilatório também é caracterizado por uma alteração repentina nas condições de regime permanente da tensão e/ou corrente possuindo valores de polaridade positiva e negativa. Os tipos de transitórios oscilatórios podem ser definidos em função do conteúdo espectral, duração e magnitude da tensão.

Estes transitórios são decorrentes da energização de linhas, corte de corrente indutiva, eliminação de faltas, chaveamento de bancos de capacitores e transformadores, dentre outros.

Os transitórios oscilatórios de baixa frequência são freqüentemente encontrados em sistemas de subtransmissão e distribuição e são causados por diversos eventos. O mais freqüente é a energização de banco de capacitores, o qual geralmente resulta em oscilações de tensão com frequência entre 300 e 900 Hz, com magnitude máxima de 2,0 pu, sendo valores típicos de 1,3 a 1,5 pu com duração entre 0,5 e 3 ciclos dependendo das características de amortecimento do sistema. A Figura 3 ilustra o resultado da simulação de energização de um banco de capacitores de 600 kVAr na tensão de 13,8 kV.

Figura 3. Transitório oscilatório proveniente do chaveamento de um banco de capacitores.

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

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

Os transitórios oscilatórios de alta frequência são geralmente o resultado de uma resposta do sistema a um transitório impulsivo, isto é, podem ser causados por descargas atmosféricas ou por chaveamento de circuitos indutivos [7].

A desenergização de cargas indutivas pode gerar impulsos de alta frequência. Apesar de serem de curta duração, estes transitórios podem interferir na operação de cargas eletrônicas. Filtros de alta-frequência e transformadores isoladores podem ser usados para proteger as cargas contra este tipo de transitório.

Conforme apresentado, existem diferentes meios causadores de oscilações transitórias e algumas técnicas podem ser utilizadas na tentativa de se reduzir os níveis dos transitórios observados, sejam estes provenientes dos chaveamentos ou das descargas atmosféricas ocorridas sobre o sistema. Como por exemplo, os transitórios oriundos de surtos de chaveamento em redes de distribuição, podem ter seu grau de incidência e magnitudes reduzidas através de uma reavaliação das filosofias de proteção e investimentos para melhorias nas redes. Esta medida visa o aumento da capacidade da rede evitando que bancos de capacitores venham a ser exigidos [10].

2.2. Interrupção de Tensão

Uma interrupção de curta duração ocorre quando a tensão de suprimento decresce para um valor menor que 0,1 pu por um período de tempo não superior a 1 minuto [10].

Este tipo de interrupção pode ser causado por faltas no sistema de energia, falhas de equipamentos e mau funcionamento de sistemas de controle. A duração de uma interrupção, devido a uma falta no sistema da concessionária, é determinada pelo tempo de operação dos dispositivos de proteção. Religadores programados para operar instantaneamente, geralmente limitam a interrupção a tempos inferiores a 30

ciclos. Contudo, religadores temporizados podem originar interrupções momentâneas ou temporárias, dependendo da escolha das curvas de operação do equipamento [10].

Algumas interrupções podem ser precedidas por um afundamento de tensão quando estas são devidas à faltas no sistema supridor. O afundamento de tensão ocorre no período de tempo entre o início de uma falta e a operação do dispositivo de proteção do sistema. A Figura 4 mostra uma interrupção momentânea devido a um curto circuito, sendo precedida por um afundamento de tensão de 80%.

Figura 4. Interrupção momentânea devido a um curto-circuito.

2.3. Variações de Tensão de Curta Duração Relacionadas com a QE

As variações de tensão de curta duração apresentam duração típica entre 0,5 ciclo a 1 minuto, e podem ser subdivididas em alterações instantâneas, momentâneas ou temporárias, dependendo da duração do fenômeno como visto na Tabela 1. Tais variações de tensão são, geralmente, causadas por condições de falta, energização de grandes cargas, as quais requerem altas correntes de partida, ou por intermitentes falhas nas conexões dos cabos do sistema. Dependendo do local da falta e das condições do sistema, a falta pode causar tanto um afundamento de tensão, como uma elevação de tensão, ou mesmo uma completa interrupção do sistema elétrico [7].

2.3.1. Afundamento de tensão de Curta Duração

Afundamento de tensão, também conhecido como “*voltage sag*”, nada mais é do que, uma subtensão de curta duração caracterizada por uma redução no valor eficaz da tensão, entre 0,1 e 0,9 p.u., na frequência fundamental, com duração entre

0,5 ciclo e 1 minuto [10]. A Figura 5 mostra um afundamento de tensão típico, resultante de uma falta fase-terra. Observa-se um decréscimo de 30% na tensão por um período de aproximadamente 4 ciclos.

Figura 5. Afundamento de tensão de 30% originado por uma falta fase-terra.

Um afundamento de 20% significa uma redução na tensão de 0,2 p.u., isto é, a tensão resultante é igual a 0,8 p.u.. Este tipo de tensão é geralmente associado à ocorrência de faltas em sistemas de transmissão ou distribuição, mas pode também ser provocado por cargas que requeiram altas correntes na energização [11].

Quedas de tensão com período inferior a 10 ms e até 10% no valor eficaz da tensão não são levadas em consideração. Isto se explica pelo fato de que os distúrbios com período de duração abaixo de 10 ms são considerados como transitórios e, quedas de tensão menores que 10% são toleradas pela maioria dos equipamentos elétricos. Este tipo de distúrbio está associado, principalmente, a curto-circuitos ocorridos nas redes de distribuição. Mas pode também ser causado pela energização de grandes cargas, partida de grandes motores e pela corrente de energização de um transformador.

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

Figura 6. Afundamento de tensão causado pela partida de um motor.

Como efeito destes distúrbios, tem-se principalmente, a má operação de equipamentos eletrônicos. Em especial os computadores, que tem sido alvo de preocupações em órgãos de pesquisa em QE. Entretanto, determinar os níveis de sensibilidade de tais equipamentos torna-se uma tarefa difícil, devido ao grande número de medições necessárias para a coleta de dados, e ainda, as dificuldades de se ter equipamentos de medição em condições reais de campo [10].

Sendo os computadores uma fonte de preocupação no que se refere aos afundamentos de tensão, uma vez que os dados armazenados na memória podem ser totalmente perdidos em condições de subtensões indesejáveis, foi estabelecido pela ANSI/IEEE (*American National Standards Institute/Institute of Electrical and Electronic Engineering*), limites de tolerância relativos a distúrbios no sistema elétrico. Estes trabalhos conduziram à Figura 7, onde os níveis de tensão abaixo, ou acima do valor nominal representam os limites dentro dos quais um computador típico pode resistir a distúrbios de afundamentos ou elevações de tensão sem apresentar falhas. Nota-se que a sensibilidade de um computador é grandemente dependente do período de duração do distúrbio.

Figura 7. Tolerâncias típicas de tensão para computadores (curva CBEMA).

Existem várias medidas que podem ser tomadas por parte de consumidores, concessionárias e fabricantes de equipamentos no sentido de diminuir o número e a severidade dos afundamentos de tensão de curta duração. Algumas destas medidas são [7]:

- Utilização de transformadores ferroressonantes, conhecidos também como CVT's (*Constant Voltage Transformers*).

Este equipamento pode controlar a maioria das condições de afundamento de tensão. Transformadores ferroressonantes são altamente excitados em suas curvas de saturação, fornecendo assim uma tensão de saída que não é significativamente afetada pelas variações da tensão de entrada.

- UPS's - *Uninterruptible Power Supply*. Estes dispositivos podem ser usados também para períodos de interrupção acima de 15 minutos de duração. Os tipos básicos de UPS's fundamentam-se nas operações *on-line* e *standby*. A UPS híbrida, que corresponde a uma variação da UPS *standby*, também pode ser usada para interrupções de longa duração.

- Utilização de conjuntos motor-gerador (M-G).

Estes conjuntos existem em uma grande variedade de potências e configurações. Este é capaz de suprir uma saída constante. A inércia do volante faz com que o rotor do gerador mantenha a rotação caso ocorra a falta de energia.

- Utilização de um dispositivo magnético supercondutor de armazenamento de energia.

Este dispositivo utiliza um magneto supercondutor para armazenar energia da mesma forma que uma UPS utiliza baterias. A principal vantagem deles é a grande redução do espaço físico necessário ao magneto, quando esta solução é comparada ao espaço para as baterias. Os projetos iniciais dos micro-SMES estão sendo testados em vários locais nos EUA com resultados favoráveis [10].

- Utilização de métodos de partida de motores.

Dentre os mais utilizados pode-se citar os seguintes métodos de partida:

- Partida suave (*Soft Started*);
- Partida por meio de autotransformadores;
- Partida por meio de resistência e reatância;
- Partida por meio de enrolamento parcial;
- Partida pelo método estrela-triângulo.

- Melhorar as práticas para o restabelecimento do sistema da concessionária em caso de faltas.

Isto implica em adicionar religadores de linha, eliminar as operações rápidas de religadores e/ou disjuntores, adicionar sistemas do tipo *Network* e melhorar o projeto do alimentador. Estas práticas podem reduzir o número e/ou a duração de interrupções momentâneas e afundamentos de tensão, mas não podem garantir por completo a eliminação das faltas nos sistemas das concessionárias.

- Adotar medidas de prevenção contra faltas no sistema da concessionária. Estas medidas incluem atividades como poda de árvores, colocar pára-raios de linha, manutenção dos isoladores, blindagem de cabos, modificar o espaçamento entre condutores e melhorar o sistema de aterramento.

2.3.2. Elevação de tensão de Curta Duração

Uma elevação de tensão de curta duração é definida como um aumento entre 1,1 e 1,8 p.u. na tensão eficaz, considerando-se a frequência do sistema, com duração entre 0,5 ciclo a 1 minuto [10].

Assim como os afundamentos de tensão, as elevações de tensão estão geralmente associadas com as condições de falta no sistema, principalmente no que diz respeito ao curto-circuito fase-terra, visto que nestas condições as fases não defeituosas experimentam uma elevação de tensão. Esta elevação de tensão pode atingir num sistema a 4 fios multi-aterrado, valores próximos a 1,25 p.u. [10]. Este fenômeno pode também estar associado à saída de grandes blocos de cargas ou a energização de grandes bancos de capacitores, porém, com uma incidência pequena se comparada com as elevações provenientes de faltas fase-terra nas redes de transmissão e distribuição [7]. A Figura 8 ilustra uma elevação de tensão causada por uma falta fase-terra. Nota-se um acréscimo de 60% na tensão por um período de aproximadamente 4 ciclos.

Figura 8. Elevação de tensão de 60% originado por uma falta fase-terra.

As elevações de tensão são caracterizadas pelas suas magnitudes (valores eficazes) e suas durações. A severidade de uma elevação de tensão durante uma condição de falta é função do local da falta, da impedância do sistema e do aterramento do mesmo. A duração da elevação está intimamente ligada aos ajustes dos dispositivos de proteção, à natureza da falta (permanente ou temporária) e à sua localização na rede elétrica. Em situações de elevação de tensão oriundas de saídas de grandes cargas ou energização de grandes bancos de capacitores, o tempo de duração das sobretensões depende da resposta dos dispositivos reguladores de tensão das unidades geradoras, do tempo de resposta dos transformadores de “tap” variável e da atuação de compensadores síncronos que porventura existam no sistema [7].

Dependendo da frequência de ocorrência do distúrbio, pode-se ter como consequência das elevações de tensão de curta duração em equipamentos, falhas dos componentes. Dispositivos eletrônicos incluindo computadores e controladores eletrônicos podem apresentar falhas imediatas durante uma condição de elevação de tensão. Já os transformadores, cabos, barramentos, dispositivos de chaveamento, Transformadores de Potencial (TP's), Transformadores de Correntes (TC's) e máquinas rotativas podem ter sua vida útil reduzida. Um aumento na tensão por um curto período em alguns relés pode resultar em má operação dos mesmos, enquanto outros podem não ser afetados. Uma elevação de tensão em um banco de capacitores pode causar danos ao equipamento. Aparelhos de iluminação podem ter um aumento da luminosidade e dispositivos de proteção contra surto, podem ser destruídos quando submetidos a elevações de tensão que excedam suas taxas de MCOV (*Maximum Continuous Overvoltage*) [7].

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

Diante de tais problemas causados por elevações de tensão de curta duração, uma atenção especial deve ser mantida por parte de consumidores, fabricantes e concessionárias, no intuito de eliminar ou reduzir as consequências oriundas deste fenômeno.

2.3. Variações de Tensão de Longa Duração

As variações de tensão de longa duração podem ser caracterizadas como desvios que ocorrem no valor eficaz da tensão na frequência fundamental do sistema (60 Hz), com duração superior a 1 minuto [7].

Estas variações podem se dar como afundamentos de tensão, elevações de tensão ou interrupções sustentadas. Estas são geralmente ocasionadas por variações de carga e operações de chaveamento no sistema [10].

2.3.1. Interrupções Sustentadas

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

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

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

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

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

2.3.2. Subtensões Sustentadas

Um afundamento de tensão é caracterizado por um decréscimo no valor eficaz da tensão a valores menores que 0,9 p.u., na frequência da rede, e com período de duração maior que 1 minuto.

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

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

- Redução da potência reativa fornecida por bancos de capacitores ao sistema;
- Possível interrupção da operação de equipamentos eletrônicos, tais como computadores e controladores eletrônicos;
- Elevação do tempo de partida das máquinas de indução, o que contribui para a elevação de temperatura dos enrolamentos;
- Aumento nos valores das correntes do estator de um motor de indução quando alimentado por uma tensão inferior à nominal. Desta forma tem-se um sobre-aquecimento da máquina, o que certamente reduzirá a expectativa de vida útil da mesma;
- Redução do índice de iluminação para os circuitos de iluminação incandescente, conforme ilustra a Figura 9;

Figura 9. Potência consumida por uma lâmpada incandescente de 100W para diferentes valores de tensão.

As opções para o melhoramento da regulação de tensão são:

- Instalar reguladores de tensão para elevar o nível da tensão;
- Instalar capacitores “shunt” para reduzir a corrente do circuito;
- Instalar capacitores série para cancelar a queda de tensão indutiva;
- Instalar cabos com bitolas maiores para reduzir a impedância;

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

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

2.3.3. Sobretensões Sustentadas

Uma elevação de tensão ou sobretensão é caracterizada por um aumento no valor eficaz da tensão acima de 1,1 p.u. (valores típicos entre 1,1 e 1,2 p.u.), na frequência da rede, por um período de duração maior que 1 minuto [7].

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

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

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

2.4. Desequilíbrios ou Desbalanços

Os desequilíbrios podem ser caracterizados usando-se diagramas de seqüências, considerando-se a componente de seqüência negativa e a componente de seqüência positiva dos sinais referenciados [7].

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

Tais fatores prejudicam a qualidade no fornecimento de energia idealizada pela concessionária, e desta forma, alguns consumidores encontram na sua alimentação um desequilíbrio de tensão, a qual pode se manifestar sob três formas distintas:

- Amplitudes diferentes;
- Assimetria nas fases e
- Assimetria conjunta de amplitudes e fases.

Destas, apenas a primeira é freqüentemente evidenciada no sistema elétrico.

2.5. Distorções da Forma de Onda

A distorção da forma de onda é definida como um desvio, em regime permanente, da forma de onda puramente senoidal, na frequência fundamental, e é caracterizada principalmente pelo seu conteúdo espectral [10]. Existem cinco tipos principais de distorções da forma de onda, os quais descreveremos a seguir [7]:

- Harmônicos;
- Interharmônicos;
- “Notching”;
- Ruídos;
- Nível CC;

2.5.1. Harmônicos

Harmônicos são tensões ou correntes senoidais de frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental na qual opera o sistema de energia elétrica (usualmente 50 ou 60 Hz) [10]. Estes harmônicos distorcem as formas de onda da tensão e corrente e são oriundos de equipamentos e cargas com características não-lineares instalados no sistema de energia.

A Figura 10 evidencia as deformações na forma de onda por consequência de distorções harmônicas de 3ª e 5ª ordem.

Figura 10. Forma de onda com distorções harmônicas de 3ª e 5ª ordem.

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

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

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

Assim, é de grande importância citar aqui os vários tipos de cargas elétricas com características não lineares, denominadas de “Cargas Elétricas Especiais”, que têm sido implantadas em grande quantidade no Sistema Elétrico Brasileiro. Estas, de um modo geral, podem ser classificadas em três grupos básicos, a saber [10]:

- Cargas de conexão direta ao sistema
 - Motores de corrente alternada;
 - Transformadores alimentadores;
 - Circuitos de iluminação com lâmpadas de descarga;
 - Fornos a arco;

- Cargas conectadas através de conversores
 - Motores de corrente contínua controlados por retificadores;
 - Motores de indução controlados por inversores com comutação forçada;
 - Processos de eletrólise através de retificadores não-controlados;
 - Fornos de indução de alta frequência.

- Reguladores
 - Fornos de indução controlados por reatores saturados;
 - Cargas de aquecimento controladas por tiristores;
 - Velocidade dos motores CA controlados por tensão de estator;
 - Reguladores de tensão a núcleo saturado;
 - Computadores;
 - Eletrodomésticos com fontes chaveadas.

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

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

Cabos

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

Transformadores

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

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

Motores de Indução

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

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

Bancos de Capacitores

Relembra-se que bancos de capacitores instalados em redes elétricas distorcidas podem originar condições de ressonância, caracterizando uma sobretensão nos terminais das unidades capacitivas.

Em decorrência desta sobretensão, tem-se uma degradação do isolamento das unidades capacitivas, e em casos extremos, uma completa danificação dos capacitores. Além disso, consumidores conectados no mesmo PAC (Ponto de Acoplamento Comum) ficam submetidos a tensões perigosas, mesmo não sendo portadores de cargas poluidoras em sua instalação, o que estabelece uma condição extremamente prejudicial à operação de diversos equipamentos. Entretanto, mesmo

que não seja caracterizada uma condição de ressonância, um capacitor constitui-se um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas, estando, portanto, constantemente sobrecarregado, sujeito a um sobre-aquecimento excessivo, podendo até ocorrer uma atuação da proteção, sobretudo dos relés térmicos.

Estes efeitos, isolados ou em conjunto, resultam na diminuição da vida útil do capacitor. A equação 1.1 determinada de forma empírica estima a vida útil de um capacitor.

$$VU = \left(\frac{1}{S \cdot T} \right)^{7,45} \quad (1.1)$$

Onde, VU é a vida útil em p.u., S é o valor de pico da sobretensão em p.u. e T é a sobre-temperatura também em p.u..

De posse da equação 1.1 é possível traçar o comportamento da vida útil de capacitores para vários valores de sobretensão e sobre-temperatura. A Figura 11 ilustra a redução da vida útil dos capacitores em função da temperatura.

Figura 11. Vida útil x Sobre-temperatura em capacitores.

2.5.2. Interharmônicos

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

Os interharmônicos podem ser encontrados em redes de diferentes classes de tensão. As suas principais fontes são conversores estáticos de potência, cicloconversores, motores de indução e equipamentos a arco. Sinais *carrier* (sinal superposto ao sinal de tensão utilizado para transmissão de informações) em linhas de potência também podem ser considerados como interharmônicos [7].

2.5.3. Notching

Notching é um distúrbio de tensão causado pela operação normal de equipamentos de eletrônica de potência quando a corrente é comutada de uma fase para outra [10].

Este fenômeno pode ser detectado através 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 pelos equipamentos normalmente utilizados para análise harmônica.

2.5.4. Ruídos

Ruído é definido como um sinal elétrico indesejado, contendo uma larga faixa espectral com frequências menores que 200 kHz, as quais são superpostas às tensões ou correntes de fase, ou encontradas em condutores de neutro em linhas de transmissão [10].

Os ruídos em sistemas de potência podem ser causados por equipamentos eletrônicos de potência, circuitos de controle, equipamentos a arco, retificadores a estado sólido e fontes chaveadas e, via de regra, estão relacionados com aterramentos impróprios. Basicamente, os ruídos consistem de uma distorção indesejada no sinal elétrico que não pode ser classificado como distorção harmônica ou transitório.

A faixa de frequência e o nível da amplitude dependem da fonte que produz o ruído e das características do sistema. A amplitude típica é menor que 1% da tensão fundamental, e os mesmos podem causar distúrbios em equipamentos eletrônicos tais como microcomputadores e controladores programáveis. O problema pode ser minimizado utilizando-se filtros, transformadores isoladores e alguns condicionadores de linha [7].

2.5.5. Nível CC

A presença de tensão ou corrente CC em um sistema elétrico CA é denominado “*DC offset*”. Este fenômeno pode ocorrer como o resultado da operação de retificadores de meia-onda [7].

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

2.6. Flutuações ou Oscilações de Tensão

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

Tais flutuações são geralmente causadas por cargas industriais e podem manifestar-se de diferentes formas, a destacar:

Flutuações Aleatórias

As principais fontes destas flutuações são os fornos a arco, onde as amplitudes das oscilações dependem do estado de fusão do material, bem como do nível de curto-circuito da instalação.

Flutuações Repetitivas

Dentre as principais fontes geradoras de flutuações desta natureza tem-se:

- Máquinas de solda;
- Laminadores;
- Elevadores de minas.

Flutuações Esporádicas

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

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

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

O fenômeno *flicker* consiste no efeito mais comum provocado pelas oscilações de tensão. Este tema merece especial atenção, uma vez que o desconforto visual associado a perceptibilidade do olho humano às variações da intensidade luminosa é, em toda sua extensão, indesejável.

2.7. Variações na Frequência do Sistema Elétrico

Variações na frequência de um sistema elétrico são definidas como sendo desvios no valor da frequência fundamental deste sistema (50 ou 60Hz).

A frequência do sistema de potência está diretamente associada à velocidade de rotação dos geradores que suprem o sistema. Pequenas variações de frequência podem ser observadas como resultado do balanço dinâmico entre carga e geração no caso de alguma alteração (variações na faixa de $60 \pm 0,5\text{Hz}$). A amplitude da variação e sua duração dependem das características da carga e da resposta do regulador de velocidade instalado no sistema de geração [10].

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

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

A Tabela 2, extraída da referência [10], mostra os fenômenos que se relacionam com a QE com as suas respectivas causas, efeitos e propõe algumas soluções para mitigar tais fenômenos apresentados ao longo deste Capítulo.

Tabela 2 – Resumo das características dos distúrbios relacionados com a QE.

Tipo de Distúrbio	Causas	Efeitos	Soluções
Transitórios Impulsivos	-Descargas atmosféricas; -Chaveamentos de cargas.	-Excitação de circuitos ressonantes; -Redução da vida útil de motores, geradores, transformadores, etc.	-Filtros; -Supressores de surto; -Transformadores isoladores.
Transitórios Oscilatórios	-Descargas atmosféricas; -Chaveamentos de: capacitores, linhas, cabos, cargas e transformadores.	-Mal funcionamento de equip. controlados eletronicamente, conversores de potência, etc.; -Redução da vida útil de motores, geradores, transformadores, etc.	-Filtros; -Supressores de surto; -Transformadores isoladores.
Sub e Sobretensões	-Partidas de motores; -Variações de cargas; -Chaveamento de capacitores.	-Pequena redução na velocidade dos motores de indução e no reativo dos bancos de capacitores; -Falhas em equipamentos eletrônicos; -Redução da vida útil de máquinas rotativas, transformadores, cabos, disjuntores, TP's e TC's; -Operação indevida de relés de proteção.	-Reguladores de tensão; -Fontes de energia de reserva; -Chaves estáticas; -Geradores de energia.
Interrupções	-Curto-circuito; -Operação de disjuntores; -Manutenção.	-Falha de equipamentos eletrônicos e de iluminação; -Desligamento de equipamentos; -Interrupção do processo produtivo (altos custos);	-Fontes de energia sobressalentes; -Sistemas "no-break" ; -Geradores de energia.
Desequilíbrios	-Fornos a arco; -Cargas monofásicas e bifásicas; -Assimetrias entre as impedâncias.	-Redução da vida útil de motores de indução e máquinas síncronas; -Geração, pelos retificadores, de 3º harmônico e seus múltiplos.	-Operação simétrica; -Dispositivos de compensação.
Nível CC	-Operação ideal de retificadores de meia onda, etc.	-Saturação de transformadores; -Corrosão eletrolítica de eletrodos de aterramento e de outros conectores.	
Harmônicos	-Cargas não-lineares.	-Sobreaquecimento de cabos, transformadores e motores de indução; -Danificação de capacitores, etc.	-Filtros; -Transformadores isoladores.
Interharmônicos	-Conversores estáticos de potência; -Cicloconversores; -Motores de indução; -Equipamentos a arco, etc.	-Interferência na transmissão de sinais "carrier"; -Indução de "flicker" visual no "display" de equipamentos.	
"Notching"	-Equipamentos de eletrônica de potência.		
Ruídos	-Chaveamento de equip. eletrônicos de potência; -Radiações eletromagnéticas.	-Distúrbios em equip. eletrônicos (computadores e controladores programáveis).	-Aterramento das instalações; -Filtros.
Oscilações de Tensão	-Cargas intermitentes; -Fornos a arco; -Partidas de motores.	-"Flicker" ; -Oscilação de potência e torque nas máquinas elétricas; -Queda de rendimento de equipamentos elétricos; -Interferência nos sistemas de proteção.	-Sistemas estáticos de compensação de reativos; -Capacitores série.
Variações na Frequência do Sistema Elétrico	-Perda de geração, perda de linhas de transmissão, etc.	-Pode causar danos severos nos geradores e nas palhetas das turbinas, etc.	

III. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este levantamento bibliográfico tem por finalidade, evidenciar alguns dos principais trabalhos realizados referentes à aplicação da Transformada de *Fourier* Janelada (TFJ), na análise de distúrbios relacionados com a Qualidade da Energia Elétrica.

Vários tipos de distúrbios estão relacionados com o assunto QE. ABREU *et al* [12] apresentam propostas sobre nomenclatura e definições para caracterização do tema Qualidade da Energia como forma de buscar um consenso no que se refere ao assunto. Os distúrbios foram definidos como: interrupções transitórias (momentâneas, temporárias e sustentadas), variações de tensão (curta ou longa duração, afundamento de tensão e elevação de tensão), distúrbios de curtíssima duração (surtos e distúrbios oscilatórios), distúrbios periódicos (distorções harmônicas e corte), cintilação, ruído e radio frequência.

O aumento das reclamações de consumidores, no que tange aos distúrbios verificados nos sistemas elétricos de potência (SEP), somando-se às normas e padrões impostos pelos órgãos reguladores, tem incentivado as concessionárias a estabelecerem programas de QE. HUGHES *et al* [13] apresentam uma metodologia para quantificação da qualidade da energia no âmbito do consumidor, sendo esta adotada no programa de diagnóstico de qualidade da energia desenvolvida pela empresa canadense *British Columbia Hydro*. Os tipos de distúrbios de tensão registrados foram: surtos, distorções da forma de onda, afundamentos e elevações de tensão e interrupções. Para cada local onde foram feitas as medições foi proposta uma avaliação da qualidade da energia, através de três gráficos resumidos, contendo: histogramas de frequência cumulativa e relativa de nível de tensão eficaz em situação de regime, perfil de tensão mostrando a intensidade e a duração dos distúrbios de tensão e um histograma de frequência da distorção harmônica total de tensão.

Resultados de estudos em consumidores das classes residencial, comercial e industrial foram apresentados. Porém, não foi feita uma investigação que correlacionasse os valores obtidos nas medições, com as ocorrências registradas no sistema elétrico da concessionária ou nas instalações dos consumidores, a fim de que pudessem ser identificados os pontos críticos que estariam afetando a QE fornecida.

Como vimos, a análise das formas de onda de tensão/corrente é um processo importante para o entendimento de fenômenos relacionados à qualidade da energia elétrica. Diferentes fenômenos requerem diferentes ferramentas de análise. Em alguns casos, busca-se apenas a caracterização de um sinal em regime permanente, por exemplo, a tensão eficaz, espectro de frequência ou harmônicas. Em outras circunstâncias, o principal interesse está no comportamento da tensão em função do tempo, como por exemplo, na ocorrência de um transitório devido ao chaveamento de banco de capacitores em um determinado ponto do SEP. Desse modo, informações no domínio do tempo e da frequência têm sido frequentemente exploradas para analisar sinais com rápidas mudanças no seu conteúdo espectral.

Muitas das questões que surgem com relação à QE, têm uma melhor interpretação no domínio da frequência, isto é, depois da execução da Transformada Rápida de *Fourier* (TRF) para sinais dependentes do tempo registrados ou simulados. A análise da TRF fornece espectros discretos contendo as chamadas harmônicas de um sinal dependente do tempo. Como se sabe, o resultado da TRF é apenas de fácil interpretação se o período base utilizado para análise do sinal combina com o período do sinal a ser analisado, evitando assim o espalhamento espectral conhecido como *Leakage*. Uma maneira de resolver este problema é sugerida por V. STAUDT [14] com a aplicação de funções janelas em sinais dependentes do tempo antes da análise da TRF. No entanto, cuidados devem ser tomados quando se faz a aplicação das funções janelas para sinais típicos de sistemas de energia. Mostra-se ainda neste trabalho que, interpretações errôneas são possíveis, e orientações são fornecidas para uma melhor compreensão com a aplicação de tais funções janelas na avaliação da QE.

A TRF, quando utilizada na análise de harmônicas em SEP, apresenta um determinado erro, especialmente no erro de fase. FUSHENG ZHANG *et al* [15] discutem o fenômeno do *leakage* com a utilização da TRF e apresentam um

algoritmo para a correção deste erro. Uma interpolação é feita através da utilização de uma janela cossenoidal de “*poly-item*”, o qual é baseado no algoritmo de interpolação proposto por T. GRANDKE *apud* FUSHENG ZHANG. Este novo algoritmo de interpolação janelado aumenta efetivamente a exatidão na medição de harmônicas num sistema elétrico, melhorando, portanto, a exatidão da TRF e obtendo com isso uma diminuição considerável no erro de fase. Os resultados simulados mostram que a aplicação de janelas diferentes resultam em diferentes efeitos na exatidão, mostrando que a janela de *Blackman - Harris* possui uma alta precisão. Um *software* capaz de medir o conteúdo harmônico no SEP com base neste algoritmo foi projetado, obtendo-se excelentes resultados através dos experimentos simulados.

FREDRIC J. HARRIS [16] faz uma revisão importante sobre as janelas e seus efeitos na detecção de sinais harmônicos na presença de ruídos com largas faixas de frequências e na presença de fortes interferências harmônicas. O autor chama a atenção para erros comuns na aplicação das janelas quando usadas com ajuda da TRF. Este trabalho inclui um catálogo compreensivo das informações referentes às janelas com seus parâmetros de execução mais significantes, através dos quais, as diferentes janelas podem ser comparadas. Finalmente, um exemplo demonstra o uso e o mérito das janelas para analisar sinais harmônicos caracterizados por grandes diferenças nas suas amplitudes.

Uma técnica comum para processamento de sinal ou imagem é o uso da Transformada Discreta de *Fourier* (TDF) para extrair uma porção do sinal pelo janelamento, e então aplicar a TDF para obtenção do conteúdo de frequência da janela analisada. Movendo-se apropriadamente a janela, todo o sinal pode ser analisado. B. G. SHERLOCK & D. M. MONRO [17] propuseram em seu trabalho o desenvolvimento de um algoritmo baseado na TRF móvel, aplicado a um caso particular, onde a janela é deslocada ao longo do sinal por sucessivas transformadas. A TRF móvel atualiza a TDF para refletir o novo conteúdo da janela, utilizando menos esforço computacional. O algoritmo da TRF móvel pode ser adaptado para o uso com janelas do tipo: *retangular*, *triangular*, *Hanning*, *Hamming* e *Blackman*. Generalizações podem ser estendidas para seqüências de janelas lineares e seqüências polinomiais.

A quantificação da QE em termos de índices comuns, tal como distorção harmônica total (DHT) e outras medidas são revistas em termos da Transformada de *Fourier* de Curto Tempo (TFCT) por SERGIO H. JARAMILLO *et al* [18]. A TFCT é avaliada sobre uma janela no tempo. O resultado é um conjunto de novos índices usuais para o caso de sinais periódicos e em estado estacionário, possibilitando a quantificação das amplitudes transitórias para sinais não-estacionários. A principal conclusão deste trabalho, é que, com a escolha correta do tamanho da janela, a TFCT pode ser usada como uma base para o desenvolvimento de um índice da Distorção Harmônica de Curto Termo (DHCT). A DHCT é similar a DHT, diferenciando-se apenas pela aplicação de uma janela de duração finita. A existência de uma relação direta entre o tamanho da janela usada no cálculo da DHCT e a exatidão deste índice mostra-nos a concentração de “energia” contida num determinado sinal analisado.

No trabalho de M. R. PORTNOFF [19], é desenvolvido uma representação de sinais e sistemas baseados na análise da TFCT. A TFCT e a resposta em frequência variando no tempo são revistas como uma representação para sinais e sistemas lineares variantes no tempo. Os problemas para a representação de um sinal pela sua TFCT e a sintetização de um sinal pela sua transformada são considerados. Uma nova equação sintetizada é introduzida como sendo suficientemente geral para descrever diferentes métodos de sínteses relatados na literatura. É mostrado que uma classe de problemas de filtragem linear pode ser representada como o produto da resposta em frequência de um filtro multiplicado pelo sinal de entrada da TFCT. A representação de um sinal por amostras de sua TFCT é aplicada para o problema de filtragem linear. Esta representação tem um significado prático devido à existência de um algoritmo empregando a Transformada Rápida de *Fourier*, a qual possui uma alta eficiência computacional para implementação de tais sistemas. Finalmente, para filtros lineares não variantes no tempo esta representação implica na implementação que é computacionalmente equivalente ao método da convolução rápida.

A Transformada de *Fourier* Janelada é utilizada para fazer uma avaliação da QE sugerida por G. HENSLEY *et al* [20]. A TFJ é uma versão janelada no tempo da transformada de *Fourier* discreta no tempo. A largura da janela pode ser ajustada e deslocada para explorar uma grande quantidade de dados referentes à QE. Quando há a necessidade de focar uma região problemática específica, a largura da janela é

diminuída para uma análise mais detalhada, enquanto que a largura da janela pode ser aumentada quando não forem detectados problemas referentes à QE. No processo de janelamento do sinal, há a introdução de um erro governado por uma função multiplicadora *sinc* do espectro do sinal desejado. A possibilidade de ajuste dos parâmetros que envolvem tal função viabiliza a sua utilização, controlando assim, o erro no cálculo do espectro desejado. Dois exemplos de aplicações foram testados. O primeiro referente a um afundamento de tensão de 30% num sistema de distribuição de 21,6 kV. O segundo consiste numa sobretensão de 20%. Ambos foram detectados e classificados corretamente utilizando como base às definições encontradas na norma 1159 do IEEE.

YUHUA GU & MATH H. J. BOLLEN [21], propuseram uma análise onde a TFCT é usada para a análise no domínio do tempo e da frequência, enquanto filtros *wavelets dyadic* são usados para a análise no domínio do tempo e escala. Filtros *wavelets dyadic* não são adaptáveis para a análise de componentes harmônicos em tal distúrbio. A frequência central e a largura de banda do filtro são inflexíveis, e os resultados não fornecem uma fácil compreensão em relação ao tempo do seu conteúdo harmônico. Por outro lado, as saídas de um filtro passa-baixa oriundos da TFCT discreta são melhores adaptados com harmônicas e são assim mais úteis para análise da Qualidade da Energia. Portanto, a TFCT discreta pode ser vista como uma representação passa-baixa das saídas de um filtro passa-banda, onde todos os filtros passa-banda têm a mesma largura de banda determinada pela janela selecionada. Com a escolha adequada do tamanho da janela, a TFCT Discreta é também capaz de detectar e analisar transitórios em um distúrbio de tensão. Sobretudo, a TFCT mostra-se mais apropriada do que os filtros *wavelets dyadic* para análise de distúrbios de tensão.

O trabalho de SANTOSO *et al* [22] objetiva a apresentação de características únicas para caracterização de eventos da QE e uma metodologia para extraí-las de suas formas de ondas tensões/correntes usando as Transformadas de *Fourier* e *Wavelets*. Exemplos de características únicas incluem amplitudes de pico, RMS, frequência, e estatística dos coeficientes da transformada *wavelet*. Estas características são oriundas de teorias bem documentadas, experiência adquirida pelos profissionais da área ao longo dos anos e informações sobre a QE coletadas

recentemente. Operações de comutação, energização de transformadores, e energização de capacitores tais como: energização normal (energização de capacitores de serviço, a qual é uma operação diária normal no SEP), energização “back-to-back” (a qual ocorre quando os capacitores estão sendo chaveados nas proximidades de capacitores já energizados), e numa situação em que, durante o processo de desenergização de um capacitor, seu contator não abre perfeitamente, criando assim, um arco elétrico entre seus contatos e com isso reenergizando o capacitor. Esses eventos são comuns ao nível de distribuição de energia e fornecem uma base com características adicionais de outros eventos da QE. Com base nas características extraídas deste estudo, foi construído um módulo identificador de eventos de QE. Este módulo foi modelado para capturar o conhecimento de especialistas na área de QE, permitindo em contra partida, a identificação de um processo lógico para se chegar a uma decisão desejada.

Muitos trabalhos envolvendo detecção e classificação de eventos de QE relatam o uso de Redes Neurais Artificiais (RNA) para a tarefa de classificação. A. HUSSAIN *et al* [23] propõem uma técnica alternativa para detecção de distúrbios de QE, a qual é simples, expansível e não requer treinamento. O sistema proposto é construído e testado usando formas de onda de tensão medidas em campo, obtendo cinco tipos de distúrbios de QE, designados como: Transitórios Impulsivos, Transitórios Oscilatórios, “Notching” individual, “Notching” repetitivo e Afundamento de Tensão. Esta técnica detecta e classifica perfeitamente todos os testes classificando-os como, “clean” ou “not clean”. Quando são classificados como “not clean”, entende-se que de alguma forma há um distúrbio na QE. Resultados mostram que, a estrutura de identificação consistindo de distúrbios Transitórios Oscilatórios e Impulsivos alcançaram uma taxa de exatidão próxima de 95%. É importante enfatizar que este trabalho não tem a finalidade de identificar as causas prováveis dos eventos de QE detectados, mas meramente detectar e classificá-los.

Uma aproximação sistemática para extração do vetor característico para classificação automática dos distúrbios da qualidade da energia é proposto por C. H. Lee *et al* [24]. Os métodos da Transformada *Wavelet* e da estimação de energia de um sinal são utilizados para localizar distúrbios e extrair os correspondentes vetores

característicos. Técnicas de compressão de informações e a TRF são também aplicadas para melhorar na tarefa de classificação dos fenômenos. Além disso, o método de extração do vetor característico proposto é aplicado para classificar os distúrbios de QE gerados pelo EMTP (Electromagnetic Transients Program). Desta aplicação, 97,1% dos casos foram corretamente analisados, quando do emprego da MLP (Multilayer Perceptron) como um classificador, demonstrando assim, o bom desempenho e aplicabilidade da aproximação proposta.

Um *software* para monitoramento automático do SEP é proposto por KEZUNOVIC & LIAO [25]. A finalidade de tal *software* é detectar e classificar automaticamente distúrbios presentes em um sinal de tensão monitorado. A Transformada de *Fourier* juntamente com a Transformada *Wavelet* são utilizadas para a extração de características dos distúrbios. Tais características constituem a entrada de dados de um módulo do *software* que é baseado em um sistema *Fuzzy* que classifica o distúrbio em sub-módulos, possibilitando distinguir entre oito possíveis tipos de fenômenos. A porcentagem de acerto para o sistema *Fuzzy* desenvolvido é, segundo os autores, de 99%. Um outro módulo desenvolvido pelos autores, objetiva avaliar a sensibilidade de equipamentos na presença de mudanças na forma de onda. Segundo os mesmos, através deste módulo, o *software* é capaz de explicar porque uma carga específica falhou durante um afundamento de tensão, ou predizer a eficiência de uma determinada carga durante um evento em particular. Para o caso de um distúrbio de afundamento de tensão, os autores apresentam um específico módulo para a localização da situação de falta que por ventura tenha causado a manifestação tal evento. Sendo assim, pelos autores, a implementação apresentada tende a facilitar o estudo de eventos relacionados com a QE.

As publicações citadas apresentam alguns dos principais trabalhos realizados utilizando a Transformada de *Fourier* e, particularmente, a Transformada de *Fourier* janelada para análise de distúrbios relacionados com a Qualidade da Energia Elétrica.

O capítulo seguinte apresenta alguns apontamentos no que se referem a ferramenta empregada no desenvolvimento do trabalho, a Transformada de *Fourier* Janelada, na busca de uma melhor compreensão dos fenômenos relacionados a Qualidade da Energia Elétrica.

IV. A TRANSFORMADA DE *FOURIER*

O estudo para obtenção de técnicas que forneçam uma boa representação para uma determinada função a ser analisada, deve objetivar o desenvolvimento de ferramentas que nos capacite a localizar características diferenciadas de uma dada função ou forma de onda analisada. A mais tradicional dessas ferramentas é a Transformada de *Fourier* (TF). A Transformada de *Fourier* Janelada (TFJ), uma particularidade da TF, será objetivo de estudo deste capítulo, uma vez que estaremos utilizando-a para uma análise mais detalhada de alguns índices relacionados à Qualidade da Energia Elétrica.

A melhor maneira de se analisar as características de um sinal é estudando suas frequências [26]. Em sinais de áudio, por exemplo, as frequências são responsáveis pelo o que nós estamos acostumados a identificar como som *grave* ou *agudo*. Além disso, a distinção entre verde e vermelho é capturado na frequência de uma onda eletromagnética associada. Desta forma veremos as representações que podemos utilizar na análise de determinadas funções ou formas de ondas.

4.1. A *Série de Fourier*

Na tentativa de analisar o conteúdo de frequência de uma função nós devemos, inicialmente, responder a seguinte questão: *O que é a frequência de uma função?* Isso é uma tarefa fácil de responder quando a função é periódica, na realidade dada uma certa função do tipo:

$$f(t) = A \sin(2\pi\omega t), \quad A > 0, \quad (4.1)$$

Onde o parâmetro A , na equação (4.1), mede a amplitude (valores máximos e mínimos assumidos pela função $f(t)$) e o parâmetro w indica a frequência do sinal. Este número está diretamente associado com o número de oscilações da função na unidade de tempo, a qual é chamada de *frequência* de uma função. A Figura 12 mostra o gráfico de $f(t)$ para diferentes valores de w .

Figura 12. Função senoidal com frequências 2, 4 e 8 Hz.

A série de *Fourier* é, em geral, um conjunto de número infinito de elementos. Considere a função abaixo:

$$f(t) = \sum_k A_k \cos(2\pi\omega_k t) + B_k \sin(2\pi\omega_k t) \quad (4.2)$$

Para sabermos qual o conteúdo de frequência da função $f(t)$, devemos primeiramente encontrar os termos A_k (*termos em cosseno*), B_k (*termos em seno*) e w_k (*frequência*).

Como T é o período base da função $f(t)$, a frequência w_k é dada por

$$\omega_k = \frac{k}{T}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad (4.3)$$

Onde os termos para uma onda cossenoidal pura são dados por:

$$A_0 = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) dt, \quad (4.4)$$

$$A_k = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \cos\left(\frac{2\pi kt}{T}\right) dt, \quad k = 1, 2, \dots, \quad (4.5)$$

$$B_k = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \sin\left(\frac{2\pi kt}{T}\right) dt, \quad k = 1, 2, \dots, \quad (4.6)$$

Uma vez que os termos A_0 , A_k e B_k foram calculados e substituídos em (4.2), eles convergirão especificamente para função $f(t)$. Em geral, dada qualquer função $f(t)$ arbitraria, nós não podemos garantir que a série da equação (4.2) convergirá para $f(t)$ ou que os termos A_k , B_k e w_k irão existir. No entanto, com o propósito de integridade, serão simplificadas as afirmações das *Condições de Dirichlet* as quais, se satisfeita, garantem que a função $f(t)$ terá o conteúdo de frequência da série de *Fourier*. Tais condições são:

- O sinal $f(t)$ tem um número finito de descontinuidade em qualquer período;
- O sinal $f(t)$ contém um número finito de máximos e mínimos, em qualquer período. Ou seja, o sinal é limitado.
- O sinal $f(t)$ é absolutamente integrável em qualquer período, e assumindo periodicidade, tem-se,

$$\int_{t_0}^{t_0+T} |f(t)| dt < \infty \quad (4.7)$$

Desta forma, a teoria da série de *Fourier* diz que o sinal $f(t)$ pode ser decomposto como:

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_k e^{j \frac{2\pi k t}{T}} \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (4.8)$$

Onde o parâmetro C_k mede a amplitude da componente de frequência k/T da função $f(t)$.

Estas são condições suficientes, mas não necessariamente únicas. Isto quer dizer que, se estas condições forem satisfeitas, então a função terá o conteúdo de frequência dado pela série de *Fourier*, mas existem ainda outras funções que podem não satisfazer tais condições, mas que também possuem um determinado conteúdo de frequência. Uma das sérias limitações do uso da série de *Fourier* é que muitas das funções são não periódicas não atendendo, portanto, uma das principais condições para sua existência [27].

4.2. A Transformada de Fourier

Como visto anteriormente, podemos obter uma representação exata da função $f(t)$ e essa representação caracteriza completamente tal função por suas respectivas frequências. O único inconveniente é o fato que $f(t)$ tem que, necessariamente, ser periódica.

Uma pergunta que surge naturalmente depois de verificado às condições de *Dirichlet* é:

Será possível estender os resultados acima para funções não periódicas? Neste caso, não teremos espectros discretos para frequências bem definidas. No entanto, pode-se usar a representação da série de *Fourier* como um primeiro passo para introduzir o conceito de frequência para funções arbitrárias.

A TF faz parte dos modelos não-paramétricos (onde são envolvidos um número infinito de parâmetros e a análise é feita no domínio da frequência) e é uma representação no domínio da frequência de uma função do tempo, mantendo exatamente as mesmas informações que a função tempo, mudando apenas a maneira de apresentação das informações [28].

Hoje, as áreas de aplicação da TF são muitas, onde podemos citar alguns exemplos de aplicações como:

- *Sistemas Lineares*: A transformada de *Fourier* como saída de um sistema linear é dada pelo produto da função de transferência do sistema pela transformada de *Fourier* do processo;
- *Física Quântica*: O princípio da incerteza na teoria quântica é fundamentalmente associado à transformada de *Fourier*, já que o momento e a posição da partícula são essencialmente descritos no conceito de transformada de *Fourier*;
- *Problemas de Contorno*: A solução de equações diferenciais parciais pode ser obtida por meio da transformada de *Fourier*.

A análise espectral é usada no campo da Física, Acústica, Geofísica, Medicina, Biologia, Psicologia, Análise Numérica, Engenharia Elétrica e outras, etc.

4.2.1. O par da Transformada de Fourier

Dada uma função $f(t)$, o par da TF é dado por:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j2\pi\omega t} dt \quad (4.9)$$

$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{j2\pi\omega t} d\omega \quad (4.10)$$

A equação (4.9) é chamada de Transformada de *Fourier* Direta e a equação (4.10) é conhecida como a Transformada de *Fourier* Inversa.

Pode-se perceber, das equações anteriores, a diferença essencial entre a série de *Fourier* e a Transformada de *Fourier* onde se nota que o espectro, neste último caso, é contínuo e por isso a síntese de um sinal não-periódico de seu espectro é completo por meio de integração ao invés de somatório [29].

Da mesma forma as equações (4.9) e (4.10) devem satisfazer as condições de *Dirichlet*, já apresentadas no item 4.1, para garantir a existência das mesmas.

Portanto, na condição do sinal $f(t)$ ser absolutamente integrável em qualquer período, isto é:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |f(t)| dt < \infty \quad (4.11)$$

Pela definição da TF, equação (4.9), tem-se,

$$|F(\omega)| = \left| \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j2\pi\omega t} dt \right| \leq \int_{-\infty}^{\infty} |f(t)| dt \quad (4.12)$$

por isso, a condição $|F(\omega)| < \infty$ é satisfeita.

Se o sinal $f(t)$ é absolutamente integrável, o mesmo terá energia (E_x) finita. Isto é. Se,

$$\int_{-\infty}^{\infty} |f(t)| dt < \infty \quad (4.13)$$

então,

$$E_x = \int_{-\infty}^{\infty} |f(t)|^2 dt < \infty \quad (4.14)$$

4.3. A Transformada Discreta de Fourier

Até agora, vimos a TF na sua forma contínua, mas sabemos que não é possível trabalhar em cálculos computacionais com funções contínuas, já que só podemos defini-las para um conjunto de valores e não em sua totalidade. Para análise de dados, devemos estimar uma função que mais se aproxime da função contínua, tornando estes cálculos possíveis, isto é, aplicar a teoria da Transformada Discreta de Fourier (TDF), que é baseada na amostragem de uma função contínua. A TDF é uma operação a qual mapeia uma seqüência $\{f(k)\}$ para outra seqüência $\{F(j)\}$.

Dada qualquer seqüência de n -ésima ordem $\{f(k)\}$, o par da transformada discreta de Fourier é definida como:

$$F(j) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} f(k) e^{-2\pi i k j / N} \quad j \in [0, N-1] \quad (4.15)$$

$$f(k) = \sum_{j=0}^{N-1} F(j) e^{2\pi i k j / N} \quad k \in [0, N-1] \quad (4.16)$$

fazendo $W_N = e^{2\pi i / N}$, Obteremos então,

$$F(j) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} f(k) W_N^{-kj}, \quad j=0, 1, \dots, N-1 \quad (4.17)$$

$$f(k) = \sum_{j=0}^{N-1} F(j) W_N^{kj}, \quad k=0, 1, \dots, N-1 \quad (4.18)$$

A equação (4.17) é chamada TDF *direta* e a equação (4.18) é conhecida como a TDF *inversa*.

O entendimento do teorema amostral ou teorema da amostragem e a função amostral tornam-se, a partir de agora, fundamentais para o desenvolvimento da TDF.

Função Amostral: Considere o par de transformada de *Fourier* ilustrado a seguir:

Figura 13. Par de transformadas de *Fourier*

Vamos obter uma função amostral que represente a função no domínio do tempo. O primeiro passo é definir uma função impulso com um período T . Denotamos a função impulso por $\Delta(t) = \delta(t - T)$. Esta notação indica uma sequência infinita de impulsos separados pelo período amostral T . A transformada de *Fourier* da função impulso $\Delta(t)$ é denotado por $\Delta(w)$ e ambas formam um par de transformadas de *Fourier*. A função impulso com período T é ilustrada a seguir.

Figura 14. Função impulso com período T .

Antes de continuarmos, faz-se necessário à definição do Teorema da Convolução.

Teorema da Convolução: Se $f(t)$ tem a transformada de *Fourier* $F(w)$ e $x(t)$ tem a transformada de *Fourier* $X(w)$, então $f(t) \otimes x(t)$ tem a transformada de *Fourier* $F(w)X(w)$, ou seja, a transformada de *Fourier* da convolução de duas funções no domínio do tempo é obtida pelo produto das suas respectivas transformadas de *Fourier*.

Teorema da Convolução em Relação à Frequência: Se $f(t)$ tem a transformada de Fourier $F(w)$ e $x(t)$ tem a transformada de Fourier $X(w)$, então a inversa da convolução das duas transformadas de Fourier $F(w) \otimes X(w)$ é o produto de suas respectivas funções no domínio do tempo, ou seja, $f(t) \cdot x(t)$.

Pelo teorema da convolução das frequências, sabemos então que a transformada inversa da convolução de $F(w)$ com $\Delta(w)$ é o produto de suas respectivas funções tempo, ou seja, $f(t) \cdot \Delta(t)$.

A representação gráfica desta convolução esta ilustrada abaixo:

Figura 15. Convolução de $f(t) \cdot \Delta(t)$.

Com a multiplicação de $f(t)$ e $\Delta(t)$ temos uma amostra da função $f(t)$, que denominamos função amostral e denotamos por $\hat{f}(t)$. A transformada de Fourier amostral é denotada por $\hat{F}(w)$.

Se $f(t)$ é uma função contínua, sua amostra com período igual a T é definida por:

$$\hat{f}(t) = f(t) \cdot \Delta(t) = f(t) \delta(t - T) = f(T) \delta(t - T) \quad (4.19)$$

Sabemos que $f(t)$ é uma função contínua, enquanto que a sua amostra $\hat{f}(t)$ tem n períodos amostrais T . Assim, a função amostral para esse caso é definida como:

$$\hat{f}(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f(nT) \delta(t - nT) \quad (4.20)$$

A função amostral $\hat{f}(t)$ é uma seqüência infinita de impulsos eqüidistantes. A amplitude de cada impulso é dada pelo valor de $f(t)$ correspondente ao tempo de ocorrência do impulso.

Observando a transformada de *Fourier* amostral de $\hat{F}(w)$ da Figura 15, notamos que ocorreu uma sobreposição de espectros, o que proporciona uma distorção na transformada de *Fourier*, ou seja, um erro. Portanto a amostra obtida não é uma aproximação da função original. Esta distorção na transformada de *Fourier* é conhecida na literatura como efeito “*aliasing*”.

O efeito “*aliasing*” ocorre devido à escolha do período amostral. Se escolhermos o período amostral T grande para $\Delta(t)$, o período amostral da transformada de *Fourier* de $\Delta(t)$ é pequeno, ocorrendo a sobreposição de espectros e gerando o efeito “*aliasing*”. Desta forma, não conseguimos uma amostra que represente $f(t)$, pois nosso objetivo é que $\hat{f}(t)$ se aproxime o máximo possível da função contínua estudada. Se escolhermos o período amostral T pequeno para $\Delta(t)$, o período amostral da transformada de *Fourier* da função impulso será grande, diminuindo a possibilidade de erro e fornecendo uma boa amostra da função estudada.

Chegamos então a seguinte questão: como garantir que na transformada de *Fourier* de uma função amostral não ocorra o “*aliasing*”?

Quando ocorre o processo de convolução, devido ao espaçamento dos impulsos na transformada de *Fourier* da função impulso, temos a sobreposição de espectros. Para que isso não ocorra, temos que separar os impulsos de $\Delta(w)$ em pelo menos $\frac{1}{T} = 2f_M$, em que f_M é a componente de freqüência máxima da transformada de *Fourier* da função $f(t)$, ou seja, se o período T for escolhido como metade da componente de freqüência máxima $T = \frac{1}{2f_M}$, o “*aliasing*” não ocorrerá.

Se a função amostral é obtida sem que ocorra o “*aliasing*”, esta amostra poderá reconstruir identicamente a função original, como afirma o teorema enunciado a seguir.

Teorema Amostral: Se a transformada de *Fourier* de uma função contínua $f(t)$ é zero para qualquer frequência maior que a frequência máxima f_M , isto é, se a função for de banda limitada onde $F(w) = 0$ para $|1/T| \geq f_M$, então a função $f(t)$ é unicamente determinada através dos seus valores amostrais.

Geralmente faz-se o uso de filtros *anti-aliasing* para garantir a existência de uma função com banda limitada que permita obter uma função amostral a qual represente a função original estudada. Enunciamos o teorema amostral em relação à função no domínio do tempo, mas podemos estender esta definição para a função no domínio da frequência, que é chamado de teorema amostral de frequência.

Teorema Amostral de Frequência: Se a função contínua $f(t)$ é de tempo limitado, isto é, $f(t) = 0$ para $|t| \geq T_M$ (T_M é o tempo máximo da inversa da transformada de *Fourier*), então a transformada de *Fourier* $F(w)$ fica unicamente determinada através dos seus valores amostrais.

Esforço computacional no cálculo da TDF: Para uma amostra de tamanho N , temos N^2 multiplicações complexas e $N(N-1)$ adições complexas, num total de $N[N+(N-1)]$ operações complexas para determinar a transformada discreta de *Fourier*, tornando os cálculos demorados e trabalhosos [28].

4.4. A Transformada Rápida de Fourier

Para obter os valores discretos através da transformada de *Fourier*, temos que realizar muitas operações complexas. Desta maneira, o cálculo da transformada de discreta de *Fourier* torna-se demorado e trabalhoso. Por este motivo, foi desenvolvida a Transformada Rápida de *Fourier* (TRF).

O algoritmo da TRF foi descrito por James W. COOLEY e JOHN W. TUKEY em [30]. Este método é agora amplamente conhecido, e oferece mudanças importantes nas técnicas computacionais usadas na análise digital de espectros. Tais técnicas têm uma longa e interessante história que pode ser encontrada, resumidamente por COOLEY *et al* [31].

A TRF é um método eficiente para o cálculo computacional da transformada discreta de *Fourier* de uma série no tempo (amostras de informações discretas).

Permita-nos assumir que tenhamos uma seqüência de n -ésima ordem $\{f(k)\}$ com a transformada Discreta de *Fourier* $\{F(j)\}$. Além disso, nós assumimos que N é um número par e inteiro e assim nós podemos formar duas novas seqüências:

$$f_1(k) = f(2k) \quad (4.21)$$

$$f_2(k) = f(2k + 1) \quad k = 0, \dots, M - 1, \quad (4.22)$$

Onde $M = N / 2$.

Desde que $\{f_1(k)\}$ e $\{f_2(k)\}$ sejam seqüências de m -ésima ordem, nós podemos usar a equação (4.19) para determinar suas transformadas discretas de *Fourier*:

$$F_1(j) = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} f_1(k) W_M^{-kj}, \quad j=0, 1, \dots, M-1 \quad (4.23)$$

$$F_2(j) = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} f_2(k) W_M^{-kj}, \quad j=0, 1, \dots, M-1 \quad (4.24)$$

Para $\{f_1(k)\}$ e $\{f_2(k)\}$ periódicas com periodicidade M , considere a transformada discreta de *Fourier* de uma seqüência $\{f(k)\}$ de n -ésima ordem dada por:

$$F(j) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} f(k) W_N^{-kj} \quad (4.25)$$

Dividindo o somatório nós podemos reescrever a equação acima como:

$$F(j) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{M-1} f(2k) W_N^{-2kj} + \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{M-1} f(2k+1) W_N^{-(2k+1)j} \quad (4.26)$$

No entanto, notamos que,

$$W_N^{-2kj} = e^{-2\pi i k j / (N/2)} = W_M^{-k j} \quad (4.27)$$

$$W_N^{-(2k+1)j} = e^{-2\pi i j (2k+1) / N} = W_M^{-k j} W_N^{-j} \quad (4.28)$$

Portanto, a equação (4.26) torna-se:

$$F(j) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{M-1} f_1(k) W_M^{-kj} + \frac{W_N^{-j}}{N} \sum_{k=0}^{M-1} f_2(k) W_M^{-kj} \quad j=0, 1, \dots, N-1 \quad (4.29)$$

Comparando com as equações (4.23) e (4.24) tem-se:

$$F(j) = \frac{F_1(j)}{2} + \frac{W_N^{-j} F_2(j)}{2}, \quad j=0, \dots, N-1. \quad (4.30)$$

Devido $\{F_1(j)\}$ e $\{F_2(j)\}$ serem periódicos (com período M) tem-se:

$$F(j) = \frac{1}{2} [F_1(j) + F_2(j) W_N^{-j}] \quad j=0, \dots, M-1. \quad (4.31)$$

$$F(j+M) = \frac{1}{2} [F_1(j) - F_2(j) W_N^{-j}] \quad j=0, \dots, M-1. \quad (4.32)$$

Como temos notado, para calcular a transformada discreta de *Fourier* de $\{f(k)\}$ requer-se N^2 operações complexas (adições e multiplicações), enquanto para calcular a transformada discreta de *Fourier* de $\{f_1(k)\}$ ou $\{f_2(k)\}$ requer apenas M^2 ou $N^2/4$ operações complexas. Quando usamos as equações (4.31) e (4.32) para obter $\{F(j)\}$ de $\{F_1(j)\}$ e $\{F_2(j)\}$, nós requeremos $N + 2(N^2/4)$ operações complexas. Em outras palavras, nós primeiro requeremos $2(N^2/4)$ operações para calcular as duas transformadas de *Fourier* $\{F_1(j)\}$ e $\{F_2(j)\}$, e então N operações de adição descritas pelas equações (4.31) e (4.32). Assim, o número de operações é reduzido de N^2 para $N + N^2/2$.

Agora, supondo que N é divisível por 4 ou $M=N/2$ é divisível por 2. Então as seqüências $\{f_1(k)\}$ e $\{f_2(k)\}$ podem ser subdivididas em quatro ordens de seqüências $M/2$ como através das equações (4.21) e (4.22), como mostra-se a seguir:

$$g_1(k) = f_1(2k), \quad g_2(k) = f_1(2k+1),$$

$$k = 0, 1, \dots, \frac{M}{2} - 1$$

$$h_1(k) = f_2(2k), \quad h_2(k) = f_2(2k+1).$$

Portanto, podemos usar as equações (4.31) e (4.32) para obter a transformada de *Fourier* de $\{F_1(j)\}$ e $\{F_2(j)\}$ com apenas $M + M^2/2$ operações complexas e então usar estes resultados para obter $\{F(j)\}$. Uma idéia é que isto requer um número de operações de:

$$N + 2\left(M + \frac{M^2}{2}\right) = 2N + \frac{N^2}{4} \quad (4.33)$$

Assim, quando nós dividimos uma seqüência duas vezes ($N > 4$ e N divisível por 4) nós reduzimos o número de operações de N^2 para $2N + N^2/4$. Então o termo $2N$ é o resultado da aplicação das equações (4.31) e (4.32), duas vezes, enquanto que o termo $N^2/4$ é o resultado da transformação das quatro seqüências reduzidas. Para o caso de $N = 4$ notamos que reduzimos completamente a seqüência para as quatro primeiras ordens de seqüências que são suas próprias transformadas e, portanto, não necessitando adicionar $N^2/4$ operações de transformadas. A fórmula então torna-se $2N$. O menor valor de N que não resulta em uma redução completa da seqüência é 8. Para este caso temos um fator de redução de $1/2$, enquanto para N grande o fator aproxima-se de $1/4$. Continuando neste caminho, podemos mostrar que se N é divisível por 2^p (p é um número inteiro positivo), então o número de operações requerido para calcular a transformada discreta de *Fourier* de uma seqüência $\{f(k)\}$ de n -ésima ordem por repetidas subdivisões é:

$$pN + \frac{N^2}{2^p} \quad (4.34)$$

Novamente para uma redução completa, isto é, $N = 2^p$, o termo $N^2/2^p$ não é requerido e nós obtemos pN para o número de equações requeridas. Este resulta em um fator de redução de:

$$\frac{pN}{N^2} = \frac{p}{N} = \frac{\log_2 N}{N} \quad (4.35)$$

A essência do Algoritmo de COOLEY - TUKEY é escolher seqüências com $N = 2^p$ para fazer a redução completa. Embora a maioria das seqüências não tenha tais números convenientes de termos, nós podemos artificialmente adicionar zeros na extremidade de uma seqüência para atingir tal valor. Este número extra de termos na seqüência é mais que compensado, pois fornece uma enorme redução do esforço computacional pelo uso do Algoritmo de COOLEY - TUKEY.

4.5. A Transformada de Fourier Janelada

Em muitas áreas da ciência e engenharia, a representação de sinais ou de outras funções pela soma de senóides ou exponenciais complexas permitem soluções convenientes para problemas e freqüentemente dão um melhor entendimento do fenômeno físico em análise do que se poderia obter de outras maneiras. Tais representações de *Fourier*, como são geralmente chamadas, são úteis em processamento de sinais por duas razões básicas. A primeira é que para sistemas lineares esta representação é muito conveniente para determinar a resposta para uma superposição de senóides ou exponenciais complexas. A segunda razão é que a representação de *Fourier* freqüentemente serve para estabelecer certas propriedades do sinal que podem ser obscurecidas ou menos evidenciadas no sinal original [32].

Embora a transformada de *Fourier* trabalhe bem para o caso infinito no tempo de um sinal estacionário, ela é incapaz de resolver qualquer informação temporal associada com estas oscilações. Se a amplitude de um sinal harmônico oscila com o tempo, a transformada de *Fourier* não pode ser usada sem modificação [19].

Um método comumente usado é “janelar” o sinal em uma sequência de intervalos, onde cada sequência é suficientemente pequena de maneira que a forma de onda seja uma aproximação de uma forma de onda estacionária (quase estacionária). Esta técnica é chamada de Transformada de *Fourier* Janelada (TFJ) [19].

A idéia básica da TFJ consiste na multiplicação de um sinal de entrada $f(t)$ por uma dada função janela $W(t)$ cuja posição varia no tempo, isto é, dividindo o sinal em pequenos segmentos no tempo. Deste modo, cada espectro de freqüência mostra o conteúdo de freqüência durante um curto tempo. A totalidade de tais espectros contém a evolução do conteúdo de freqüência com o tempo de todo sinal em análise [18].

Proposta por DENNIS GABOR, o autor afirma que a TFJ, permite uma análise da freqüência do sinal localmente no tempo [33]. Neste caso, uma janela de observação é deslocada no domínio do tempo, em uma técnica chamada de análise do sinal por janelas, e a TF é calculada para cada posição da janela, como mostra a

Figura 16, mapeando o sinal original em uma função bidimensional de tempo e frequência.

Figura 16. Transformada de Fourier Janelada.

A transformada de *Fourier* janelada capacita-nos a analisar uma função $f(t)$, no sentido de se poder localizar informações nos domínios do tempo e da frequência.

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

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

O princípio da incerteza, mencionado acima, afirma que: $4\pi\omega T \geq 1$. Isto significa dizer que a localização do sinal no domínio do tempo e da frequência é representado geometricamente pela dimensão do retângulo $T \times \omega$. Este retângulo é chamado de *janela de incerteza* ou *cela de informação* da transformada, ilustrada pela Figura 17. Do princípio da incerteza, a área desse retângulo é $\geq \frac{1}{4\pi}$.

Figura 17. Janela da Incerteza

Em geral a cor cinza é associada para cada cela para indicar sua energia na decomposição. Considere a Figura 18 abaixo.

Figura 18. Átomos no domínio do tempo e da frequência.

O sinal associado à cela ou átomo à esquerda, apresenta uma pequena localização em frequência e uma pequena concentração de energia; o átomo central tem uma melhor localização de frequências (ciclo completo) e, portanto mais energia; o átomo à direita tem uma boa resolução em frequência (vários ciclos são abrangidos) e, conseqüentemente, uma energia mais concentrada.

4.5.1. Definição e Propriedades da Transformada de Fourier Janelada

Na determinação da representação de *Fourier* dependente do tempo, nós estamos motivados pela necessidade de uma representação espectral a qual reflete as propriedades variando no tempo de determinados sinais.

Uma definição usual da transformada de *Fourier* dependente do tempo é:

$$X_t(e^{j\omega}) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \omega(t-m)x(m)e^{-j\omega m} \quad (4.36)$$

Na equação acima, $w(t-m)$ é uma seqüência de janelas reais as quais determinam a porção do sinal de entrada que recebe ênfase para um índice de tempo particular, t . A transformada de *Fourier* dependente do tempo é claramente uma função de duas variáveis: o índice tempo, t , o qual é discreto e a variável frequência, ω , a qual é contínua. Uma forma alternativa da equação (4.36) é obtida por uma mudança no índice do somatório a qual produz a seguinte expressão:

$$X_t(e^{j\omega}) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \omega(m)x(t-m)e^{-j\omega(t-m)} \quad (4.37)$$

$$X_t(e^{j\omega}) = e^{-j\omega t} \sum_{m=-\infty}^{\infty} x(t-m)\omega(m)e^{j\omega m} \quad (4.38)$$

onde $\omega = 2\pi k/N$ é a frequência em radianos,

N é o número de bandas de frequências k , com $k = 0, 1, \dots, N-1$,

$W(m)$ é a janela selecionada simétrica de tamanho L ,

$L \leq N$ se a reconstrução do sinal é requerida.

Se nós definirmos,

$$\tilde{X}_t(e^{j\omega}) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x(t-m)\omega(m)e^{j\omega m} \quad (4.39)$$

então $X_t(e^{j\omega})$ pode ser expressa como:

$$X_t(e^{j\omega}) = e^{-j\omega t} \tilde{X}_t(e^{j\omega}) \quad (4.40)$$

Estas equações podem ser interpretadas de duas maneiras distintas. A primeira, se nós assumirmos que t é fixo, nós notamos que $X_t(e^{j\omega})$ é simplesmente a transformada normal da seqüência $w(t-m)x(m)$, $-\infty < m < \infty$. Portanto para t fixo $X_t(e^{j\omega})$ tem a mesma propriedade de uma transformada de *Fourier* normal. A segunda interpretação segue considerando $X_t(e^{j\omega})$ como uma função do tempo t com w fixo. Neste caso nós observamos que ambas as equações (4.36) e (4.39) estão na forma de uma convolução. Esta interpretação permite-nos naturalmente considerar a representação de *Fourier* dependente do tempo em termos de filtragem linear. Ambas as interpretações permitem um melhor discernimento da análise de um determinado sinal.

4.5.2. Interpretação como a Transformada de Fourier

Para começar, consideraremos $X_t(e^{j\omega})$ como a transformada de *Fourier* normal de uma seqüência $w(t-m)x(m)$, $-\infty < m < \infty$, para t fixo. A transformada de *Fourier* dependente do tempo é uma função do índice tempo, t , o qual toma todos valores inteiros de modo à “deslizar” a janela, $w(t-m)$, ao longo da seqüência, $x(m)$. Este processo é descrito na Figura 19, abaixo.

Figura 19. Esboço de $x(m)$ e $w(t-m)$ para vários valores de t .

Note que o sinal e a janela são plotados como funções contínuas por conveniência mesmo embora eles são apenas definidos para valores inteiros de m e $t-m$.

As condições para a existência da transformada de *Fourier* dependente do tempo são facilmente obtidas uma vez que a condição suficiente para a transformada de *Fourier* convencional existir é que a sequência $w(t-m)x(m)$ seja absolutamente integrável, quando esta for representada na sua forma integral. Se, como é freqüente o caso, $w(t-m)$ for de duração finita, então esta condição é claramente satisfeita.

Como no caso da transformada *Fourier* de um sinal discreto no tempo, a transformada de *Fourier* variando no tempo é periódica em w com período 2π . Isto pode ser facilmente visto substituindo $w + 2\pi$ na equação (4.36). Note também, que é possível expressar a transformada de *Fourier* variando no tempo em termos de uma variedade de freqüências variáveis. Por exemplo, se $w = \Omega T$, onde T é período de amostragem usado para obter uma sequência $x(m)$, então Ω é a freqüência analógica em radianos. Também, fazendo a substituição de $w=2\pi f$ ou $w=2\pi FT$, podemos expressar a transformada de *Fourier* variando no tempo como função da freqüência cíclica normalizada (f) ou da freqüência cíclica analógica convencional (F – em Hertz) respectivamente.

O fato é que, para um dado valor de t , $X_t(e^{j\omega})$ tem as mesmas propriedades como a transformada de *Fourier* normal, onde tem-se uma prova simples de que a sequência de entrada $x(m)$ pode ser recuperada exatamente da transformada de *Fourier* variando no tempo. Relembrando que $X_t(e^{j\omega})$ é a transformada normal de *Fourier* de $w(t-m)x(m)$, podemos escrever:

$$\omega(t-m)x(m) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} X_t(e^{j\omega}) e^{j\omega m} d\omega \quad (4.41)$$

Note que a integração da equação acima poderia estar sobre qualquer intervalo de comprimento 2π , por exemplo, de 0 a 2π , desde que todo integrando seja periódico com período de 2π . Agora se $w(0) \neq 0$, a equação (4.41) pode ser avaliada para $m = t$, portanto obtendo:

$$x(t) = \frac{1}{2\pi w(0)} \int_{-\pi}^{\pi} X_t(e^{j\omega}) e^{j\omega t} d\omega \quad (4.42)$$

assim, com $w(0) \neq 0$, a sequência $x(t)$ pode ser exatamente reconstituída de $X_t(e^{j\omega})$, se $X_t(e^{j\omega})$ é conhecido para todos os valores de ω sobre um período completo. Este é um resultado teórico importante, o qual tem um significado prático com a imposição de uma simples limitação adicional na janela.

Uma propriedade importante de $X_t(e^{j\omega})$ relaciona tal função com a função de auto-correlação de tempo curto. Dado que $X_t(e^{j\omega})$ é a transformada de *Fourier* normal de $w(t-m)x(m)$ para cada valor de t , então pode-se perceber que :

$$S_t(e^{j\omega}) = |X_t(e^{j\omega})|^2 = X_t(e^{j\omega})X_t^*(e^{j\omega}) \quad (4.43)$$

é a transformada de *Fourier* de:

$$R_t(k) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} w(t-m)x(m)w(t-k-m)x(m+k) \quad (4.44)$$

As equações (4.43) e (4.44) servem para relatar a representação do espectro de tempo curto da função em análise.

A transformada de *Fourier* de curto tempo, $X_t(e^{j\omega})$, pode ser expressa em uma variedade de formas alternativas. Uma, particularmente, é em termos de suas partes real e imaginária, isto é:

$$X_t(e^{j\omega}) = a_t(\omega) - jb_t(\omega) \quad (4.45)$$

Para o caso quando $x(m)$ e $w(t-m)$ forem ambos reais então $a_t(\omega)$ e $b_t(\omega)$ podem ser mostradas para satisfazer certas relações de simetria e periodicidade. Outra representação para $X_t(e^{j\omega})$ é em termo de magnitude e fase como:

$$X_t(e^{j\omega}) = |X_t(e^{j\omega})|e^{j\theta_t(\omega)} \quad (4.46)$$

As quantidades de $|X_t(e^{j\omega})|$ e $\theta_t(\omega)$ podem facilmente ser relacionadas com $a_t(\omega)$ e $b_t(\omega)$ e vice versa.

O modelo de uma seqüência da janela tem um efeito importante na natureza da transformada de *Fourier* dependente do tempo. Se $X_t(e^{j\omega})$ for pensado como uma transformada de *Fourier* normal de seqüência $w(t-m)x(m)$, e se assumirmos que a transformada de *Fourier* normal das equações (4.47) e (4.48), a seguir, existem,

$$X(e^{j\omega}) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x(m)e^{-j\omega m} \quad (4.47)$$

e,

$$W(e^{j\omega}) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} w(m)e^{-j\omega m} \quad (4.48)$$

Então a transformada de *Fourier* normal de $w(t-m)x(m)$ (para t fixo) é a convolução das transformadas de $w(t-m)$ e $x(m)$. Desde que, para t fixo, a transformada de *Fourier* de $w(t-m)$ é $W(e^{-j\omega})e^{-j\omega t}$, então,

$$X_t(e^{j\omega}) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} W(e^{-j\theta})e^{-j\theta t} X(e^{j(\omega-\theta)})d\theta \quad (4.49)$$

Mudando θ por $-\theta$ na equação (4.49) acima, temos:

$$X_t(e^{j\omega}) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} W(e^{j\theta})e^{j\theta t} X(e^{j(\omega+\theta)})d\theta \quad (4.50)$$

Assim, observamos que a transformada de *Fourier* de seqüência $x(m)$, $-\infty < m < \infty$ é convolvida com a transformada de *Fourier* de uma seqüência de janelas deslocadas. Desta forma a equação (4.50) é significativa se assumirmos que $X_t(e^{j\omega})$ permanece para a transformada de *Fourier* de um sinal cuja propriedade básica continua fora da janela ou para qual é zero fora da janela.

Uma análise mais detalhada dos efeitos da janela sobre as estimativas espectrais nos leva ao estudo dos efeitos da convolução entre o espectro da janela e o espectro do sinal em análise. O espectro das janelas tem duas características principais: a largura do lóbulo principal e a atenuação do lóbulo secundário. Quanto

mais largo o lóbulo principal, mais largo será o pico da senóide, o que diminui a capacidade de discriminar frequências próximas. Além disso, quanto maior a amplitude do lóbulo secundário, menor será a capacidade de detectar-se senóides mais fracas. A melhoria de qualquer um desses fatores deteriora o outro, sendo a escolha de janelas uma solução de compromisso [34].

Boas funções janelas exibem baixos picos dos lóbulos secundários, declínio do lóbulo secundário, e largura de banda mínima. Os picos e o declínio dos níveis dos lóbulos secundários indicam a habilidade da janela em encontrar pequenos transitórios na presença de um sinal extenso enquanto a largura de banda indica a perda na resolução em frequência. Algumas janelas são mostradas na Tabela 3, as quais são comumente avaliadas juntamente com a utilização da TRF [35].

Tabela 3 – Características de algumas janelas no domínio da frequência.

Janela	Ganho	Pico do Lóbulo secundário (dB)	Queda do Lóbulo secundário dB/OCT	3 dB BW (BINS)
Retangular	1.0	-13	-6	0.89
Hamming	0.54	-43	-6	1.30
Hanning $\alpha=2.0$	0.50	-32	-18	1.44
Hanning $\alpha=4$	0.38	-47	-30	1.86
Blackman	0.42	-58	-18	1.68
Kaiser $\alpha=2.0$	0.49	-46	-6	1.43
Kaiser $\alpha=2.5$	0.44	-57	-6	1.57

Desta forma, veremos adiante, alguns tipos de janelas utilizadas neste trabalho para o janelamento do sinal em análise.

4.5.2.1. Espalhamento Espectral (Leakage)

Quando, para o cálculo da Transformada Discreta de *Fourier* (TDF), se tomam N amostras para compor uma interpolação aproximada do sinal representado, gera-se uma descontinuidade nas extremidades da seqüência de tamanho finito devido à propriedade da periodicidade da TDF. Isto ocorre para todas as componentes dos sinais que não pertençam exatamente a um dos pontos discretos da série. A Figura 20 demonstra este fenômeno, mostrando as amostragens resultantes se estas fossem obtidas diretamente do sinal versus a descontinuidade resultante da extensão periódica do sinal. Esta descontinuidade exerce uma contribuição espectral (como um espalhamento de freqüências, de onde se origina o nome) através de todo o conjunto de valores de freqüência.

Figura 20. Descontinuidade resultante da extensão do sinal através do processo da TDF. (a) sinal contínuo; (b) sinal mostrando a descontinuidade assumida pelo processo da TDF.

A Figura 21 apresenta uma senóide de freqüência de 2 Hz, cuja extensão periódica no tempo não gera pontos de descontinuidade, e uma senóide de freqüência 2.25 Hz cuja extensão periódica no tempo gera um ponto de descontinuidade a cada 2.25 ciclos. Logo abaixo de cada senóide está representada a magnitude espectral da TDF de cada sinal. Notamos que a magnitude das componentes laterais do sinal de 2.25 Hz estão mais pronunciadas que as componentes laterais para o sinal de 2 Hz.

Figura 21. Análise dos dois sinais mostrando o espalhamento espectral.

Janelas são funções de ponderação aplicadas às informações para reduzir o espalhamento espectral associado com intervalos de observação finitos. Basicamente tais janelas reduzem a contribuição das amostragens próximas dos pontos limítrofes, e desta maneira reduzem a descontinuidade e seus efeitos na resposta em frequência [16].

4.5.2.2. Janela Retangular

A janela retangular é unitária sobre um intervalo em observação, e pode ser pensada como um conjunto de sequência finitas aplicadas ao um sinal em análise.

Tal janela é definida como:

$$w(n) = \begin{cases} 1, & n = 0, 1, \dots, M-1 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (4.51)$$

A Figura 22 mostra a janela retangular e sua respectiva resposta em frequência.

Figura 22. (a) Janela Retangular (b) Resposta em frequência – magnitude (dB)

O lóbulo secundário está 13 dB abaixo do lóbulo principal, indicando um espalhamento espectral significativo para a janela retangular. A janela retangular nada mais é que um termo para designar o fato de que um sinal contínuo no tempo deve ser amostrado durante um intervalo de tempo finito, desprezando-se os valores do sinal fora deste intervalo. Os pontos assim amostrados são ponderados uniformemente com uma função unitária, que é a janela retangular, de forma a manter seus valores originais inalterados.

4.5.2.3. Janela de Hanning

A janela de Hann, mais comumente chamada de janela de Hanning, oferece grandes melhorias em relação a algumas janelas. A mesma pode ser escrita como segue:

$$w(n) = \begin{cases} 0.5 - 0.5 \cos\left(\frac{2\pi n}{M-1}\right), & 0 \leq n \leq M-1 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (4.52)$$

A janela de Hanning e sua respectiva resposta em frequência são ilustradas como mostra a Figura 23.

Figura 23. (a) Janela de Hanning (b) Resposta em frequência – magnitude (dB)

A Figura acima mostra que o lóbulo secundário está aproximadamente a 32 dB abaixo do lóbulo principal.

4.5.2.4. Janela de Kaiser

O compromisso existente entre a largura do lóbulo principal e a área do lóbulo secundário é pela procura de uma função janela que seja concentrada o máximo possível em torno de $w=0$ no domínio da frequência. Kaiser (1974), encontrou que uma janela próxima ao ótimo poderia ser formada usando uma função Bessel de ordem zero modificada de primeiro tipo, a qual era mais fácil se calcular.

A janela de Kaiser é definida como:

$$w(n) = \begin{cases} \frac{I_0 \left[\beta \left(1 - \left[(n - \alpha) / \alpha \right]^2 \right)^{1/2} \right]}{I_0(\beta)}, & 0 \leq n \leq M \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (4.53)$$

A Figura 24 ilustra a janela de Kaiser e sua respectiva resposta em frequência.

Figura 24. (a) Janela de Kaiser (b) Resposta em frequência com $\beta=3.0$ – magnitude (dB)

onde $\alpha = M/2$, e $I_0(\cdot)$ representa a função Bessel de ordem zero modificada de primeiro tipo. A janela de Kaiser tem dois parâmetros: o comprimento $(M+1)$ e o parâmetro de curva β . Variando $(M+1)$ e β , o comprimento da janela e a curva podem ser ajustados para estabelecer um compromisso entre a amplitude do lóbulo secundário em relação à largura do lóbulo principal. A Figura 25(a) mostra envoltórias contínuas de comprimento $M+1=21$ para $\beta=0, 3, 6$. Note, da equação (4.53), que para o caso de $\beta=0$ reduz a uma janela retangular. A Figura 25 (b) mostra a correspondente transformada de *Fourier* das janelas de kaiser na Figura 25(a). A Figura 25(c) mostra a transformada de *Fourier* das janelas de kaiser com $\beta=6$ e $M=10, 20$ e 40 . Estas Figuras mostram claramente que o compromisso desejado pode ser executado.

Figura 25. (a) Janelas Kaiser para $\beta=0, 3$ e 6 com $M=20$. (b) Transformadas de Fourier correspondente as janelas em (a). (c) Transformada de Fourier correspondente a janela de Kaiser com $\beta=6$ e $M=10, 20$ e 40 .

4.5.3. Interpretação como Filtragem Linear

É óbvio da equação (4.36), que para cada valor de w , $X_t(e^{j\omega})$ é a convolução da sequência $w(t)$ com a sequência $x(t)(e^{j\omega t})$. Assim, para um valor particular de w , $X_t(e^{j\omega})$ pode ser pensado como a saída de um sistema descrito na Figura 26.a onde $w(t)$ representa a regra para resposta ao impulso de um sistema de deslocamento invariante linear. Note que na Figura 26.a, a entrada e saída do sistema linear são complexas. Expressando $X_t(e^{j\omega})$ como:

$$X_t(e^{j\omega}) = a_t(\omega) - jb_t(\omega) \quad (4.54)$$

Então as operações requeridas para obter $a_t(w)$ e $b_t(w)$ são mostradas na Figura 26.b, onde todas as seqüências são reais.

Figura 26. Interpretação da análise do espectro de tempo curto como filtragem linear

(a) operações complexas (b) apenas operações reais.

Para ver como o sistema da Figura 26.a opera para formar a transformada de *Fourier* de tempo curto para frequência ω , é útil novamente assumir que a transformada de *Fourier* normal de $x(t)$ exista. Para evitar confusão de frequências variáveis, nós denotamos a transformada de *Fourier* de $x(t)$ por $X(e^{j\theta})$. Então, como resultado de um processo de modulação, a transformada de *Fourier* da entrada para um sistema de um filtro linear é $X(e^{j(\theta+\omega)})$. Assim o espectro de $x(t)$ para frequência ω é deslocado para frequência zero. Desde que a transformada de *Fourier* da saída de um filtro é $X(e^{j(\theta+\omega)})W(e^{j\theta})$, então se o filtro é um filtro passa-baixa com uma banda de passagem muito estreita, a saída do filtro dependerá essencialmente de $X(e^{j\theta})$. Assim, como uma interpretação previa, $W(e^{j\theta})$ deve ser diferente de zero sobre uma banda muito estreita em volta da frequência zero e tão pequena quanto possível fora desta banda. É interessante notar que a equação (4.50) é exatamente a transformada inversa de *Fourier* de $X(e^{j(\theta+\omega)})W(e^{j\theta})$.

V. O SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO SIMULADO

Uma vez que já definimos alguns exemplos típicos de distúrbios que se relacionam com a Qualidade da Energia Elétrica, tais como: afundamentos e elevações de tensão, distorções harmônicas, transitórios decorrentes da energização de bancos de capacitores, dentre outros, buscamos agora, a caracterização de tais fenômenos sobre um determinado sistema de distribuição. A caracterização de tais distúrbios foi possível com a utilização do *software* ATP (*Alternative Transients Program*), uma poderosa ferramenta computacional que permite a simulação do sistema elétrico em estudo e a obtenção de resultados bem próximos do sistema elétrico real. O sistema de distribuição primária a ser analisado, é mostrado na Figura 27 através do seu diagrama unifilar característico.

Figura 27. Diagrama unifilar do sistema elétrico de distribuição em análise.

Nas simulações desenvolvidas foi utilizada uma taxa amostral de 7,68 kHz devido à existência de instrumentos de medição e obtenção de dados que empregam uma frequência de amostragem similar, como por exemplo, o BMI (*Basic Measuring Instrument*) Modelo 7100, cujo valor está próximo a 7,7 kHz.

No diagrama unifilar mostrado anteriormente, o transformador da subestação (138/13,8 kV), os transformadores de distribuição 3 e 13 (T3 e T13) e o transformador particular 4 (Tp4), foram modelados considerando-se suas curvas de saturação, de acordo com dados obtidos da Cia Paulista de Força e Luz (CPFL). Já para os demais, considerou-se somente seus pontos de ligação com o sistema. Os transformadores particulares 1, 2 e 3 (Tp1, Tp2 e Tp3) compreenderam as cargas particulares referidas ao primário com uma parcela RL em paralelo a um banco de capacitores para a devida correção do fator de potência. Para dimensionar o banco de capacitores, as cargas foram consideradas com fator de potência original de 0,75 para posterior correção até os desejados 0,92. Os demais transformadores de distribuição compreenderam somente as cargas RL referidas ao primário, considerando-se um fator de potência geral de 0,9538. Os conjuntos formados pelos transformadores 1 e 2 (T1 e T2), 4, 5, 6 e 7 (T4, T5, T6 e T7), 8, 9, e 10 (T8, T9 e T10), 11, 12 e 14 (T11, T12 e T14) representam as cargas equivalentes desses transformadores, cujo ponto de conexão com o sistema é como indicado na Figura 27. Relata-se ainda que tanto os transformadores de distribuição quanto os particulares apresentam ligações delta-estrela com resistência de aterramento de zero ohm. As Tabelas 4 e 5 apresentam dados tais como, carga nominal e fator de potência, referentes aos transformadores particulares e de distribuição respectivamente.

Tabela 4 – Dados dos transformadores particulares.

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

Três bancos de capacitores (um de 1200 kVAr, BC 1, situado no ponto Ch1, e dois de 600 kVAr cada, BC2 e BC3, situados nos pontos Ch1 e Ch3 respectivamente) estão instalados ao longo do sistema. O primeiro banco de capacitor é um banco de 1200 kVAr instalado a 476 metros da subestação. Os outros dois bancos, que são de 600 kVAr, situam-se a 476 e 1176 metros da subestação, respectivamente. O chaveamento do banco BC 3, realizou-se mantendo o banco BC 2 fixo para a obtenção de oscilações transitórias.

O alimentador principal é constituído por um cabo nu, modelo CA-477 MCM, em estrutura aérea convencional com comprimento total de 1576 metros, e seus trechos são representados por elementos RL acoplados mutuamente, de acordo com dados extraídos da referência [6]. O sistema também possui um ramal onde estão localizados os transformadores de distribuição 11, 12 e 14 e também o transformador particular 4. Neste ramal o modelo do cabo é 1/0 AWG, com comprimento de 233 metros.

Tabela 5 – Dados dos transformadores de distribuição.

<i>Transformadores Particulares</i>	<i>Carga Nominal</i>	<i>Carga Incidente</i>	<i>Fator de Potência da Carga</i>
1	75 kVA	40 kVA	0,9538
2	75 kVA	31 kVA	0,9538
3	45 kVA	32 kVA	0,9538
4	45 kVA	22 kVA	0,9538
5	112,5 kVA	19 kVA	0,9538
6	225 kVA	89 kVA	0,9538
7	150 kVA	27 kVA	0,9538
8	150 kVA	29 kVA	0,9538
9	45 kVA	9 kVA	0,9538
10	225 kVA	19 kVA	0,9538
11	30 kVA	26 kVA	0,9538
12	150 kVA	86 kVA	0,9538
13	75 kVA	19 kVA	0,9538
14	75 kVA	7 kVA	0,9538

5.1 Dados de Entrada para o Software ATP

Nesta seção apresentamos o arquivo utilizado como entrada de dados para o *software* ATP. Tal arquivo consta de todos os dados do sistema elétrico simulado onde todas as conexões do sistema estão representadas. Estas condições caracterizam o tipo de falta aplicada (localização, resistência e ângulo de incidência da falta) e chaveamentos de bancos de capacitores sobre o sistema, bem como as demais considerações adotadas.

```

BEGIN NEW DATA CASE
$PREFIX,C:\ATPDRAW\LIB\
$SUFFIX, .LIB
$DUMMY, XYZ000
C Miscellaneous Data Card ....
C POWER FREQUENCY          6.0E+01
1.3E-04 2.5E-01
      1      1      1      1      1      1
/BRANCH

C *****

C Impedancia equivalente do Sistema referida em 138 kV.
51FONTA ATA1      3.56394  9.013
52FONTB ATB1      1.19741  8.133
53FONTC ATC1

C *****

C IMPEDÂNCIAS DAS LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO
C Impedancia do trecho entre a SE e os trafos 1 e 2 (T12)
51SEA  T12A      .183  1.321
52SEB  T12B      .045  .35
53SEC  T12C

C *****

C BANCOS DE CAPACITORES
C BANCO DE CAPACIORES 1 - BC1
C BC1A
BC1A NEUT1      16.71      0
C BC1B
BC1B NEUT1      16.71      0
C BC1C
BC1C NEUT1      16.71      0

```

C Resistencia infinita para terra - BC1

NEUT1 1.0E+6

•
•
•

C *****

C CONJUNTOS DE TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO

C CONJ. DE TRAFOS 1 E 2

T12A	2514.	2100.	0
T12B	2514.	2100.	0
T12C	2514.	2100.	0

C RESISTÊNCIA DE FALTA SEA/B/C1 E TERRA

SEA1	0.05	0
SEB1	0.05	0
SEC1	0.05	0

C *****

C CONJUNTOS DE TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO PARTICULARES

C TRAF0 PARTICULAR 1 (03 trafos)

TP1A	45.81	107.2	0
TP1B	45.81	107.2	0
TP1C	45.81	107.2	0
TP1A		15.00	0
TP1B		15.00	0
TP1C		15.00	0

•
•
•

C *****

C TRANSFORMADOR DA SUBESTAÇÃO

C TRANSFORMADOR DA SE - 138/13.68 kV - 25 MVA

TRANSFORMER	3.019326.899TSUB1 63000.	0
3.04585138E+00	2.66654561E+01	
7.68117963E+00	2.96282846E+01	
1.57373247E+01	3.25911130E+01	
1.63732353E+04	3.85167699E+01	
9999		
IBTA2 NEUT4	.01751.51377.8981	
2ATA1 ATB1	1.7462151.37 138.	
TRANSFORMER TSUB1	TSUB2	

```

1BTB2 NEUT4
2ATB1 ATC1
TRANSFORMER TSUB1      TSUB3
1BTC2 NEUT4
2ATC1 ATA1

```

```

•
•
•

```

```

C *****

```

```

/SWITCH

```

```

C CHAVES (DISJUNTORES) DO ALIMENTADOR

```

```

BTA2 SEA -1.00E+00 1.000E+01 0.000E+00 1
BTB2 SEB -1.00E+00 1.000E+01 0.000E+00 1
BTC2 SEC -1.00E+00 1.000E+01 0.000E+00 1

```

```

•
•
•

```

```

C *****

```

```

/SOURCE

```

```

C FONTE EQUIVALENTE DO SISTEMA de 138 kV.

```

```

14FONTA 0 112676.53 60. -1. 2.
14FONTB 0 112676.53 60. -120. -1. 2.
14FONTC 0 112676.53 60. 120. -1. 2.

```

```

C

```

```

BLANK BRANCH

```

```

BLANK SWITCH

```

```

BLANK SOURCE

```

```

C *****

```

```

SEA SEB SEC

```

```

BLANK OUTPUT

```

```

BLANK PLOT

```

```

BEGIN NEW DATA CASE

```

```

BLANK

```

Uma vez gerado os arquivos de dados de entrada para o ATP, podemos obter os valores amostrados de tensão e corrente medidos na subestação. Por exemplo, apresentando o arquivo de entrada ilustrado anteriormente, o qual refere-se a uma falta fase-terra (AT) aplicada próxima ao banco de capacitores Ch1, com uma resistência de falta de $0,05\Omega$ e ângulo de incidência da falta de 0° , obtemos as seguintes formas de ondas de tensões e correntes (Figuras 28 e 29).

Figura 28. Formas de ondas das tensões originadas por uma falta fase-terra (AT).

Figura 29. Formas de ondas das correntes originadas por uma falta fase-terra (AT).

Conforme ilustra a Figura 28, em decorrência da falta fase-terra (AT) aplicada próxima ao banco de capacitores Ch1, a fase (A) sofreu um decréscimo de aproximadamente 0.8 p.u. em relação a sua amplitude em regime permanente. Percebe-se ainda, que a mesma fase envolvida apresentou uma certa oscilação transitória na ocorrência da extinção da falta. Um acréscimo de aproximadamente 0.6 p.u., em relação a sua amplitude em regime permanente, foi observado na fase (C) durante o tempo em que o sistema ficou submetido à falta. A fase (B) praticamente não sofreu nenhuma alteração significativa com relação a sua forma de onda em regime permanente. Na Figura 29, observa o comportamento das correntes envolvidas, onde se percebe claramente uma elevação significativa da amplitude, na fase (A), quando comparada as demais amplitudes correspondentes às fases (B) e (C). De maneira análoga à análise das tensões, verificou-se a ocorrência de uma pequena oscilação transitória nas três fases envolvidas no momento da extinção da falta.

5.2. Caracterização dos Distúrbios Através de Simulações no ATP Para o Sistema em Estudo

Inúmeros testes foram realizados no *software* ATP para o sistema de distribuição em estudo, as Tabelas 6 e 7 apresentam os resultados das simulações de faltas (fase - A terra) para obtenção de afundamentos e elevações de tensão, ocorridos nas fases A e C, respectivamente, considerando para tal, ângulos de incidência da falta de 0° e 90° . Salienta-se que foram obtidos os mesmos resultados em se tratando das amplitudes dos distúrbios para os ângulos de incidência de falta simulados, tanto para 0° como para 90° . Para todos os casos simulados as grandezas em análise foram obtidas tomando-se como referência a subestação. Nestas Tabelas, os locais de aplicação das faltas estão abreviados segundo apresentado na Figura 27.

Tabela 6 – Resultado das simulações do sistema para afundamentos de tensão.

Número de casos	Localização da Falta	Ângulo de Incidência (°)	Resistência de Falta (Ω)	Afundamento de Tensão Obtido (%)
1	T13	0 e 90	9	10
2	Ch3	0 e 90	6	14
3	Ch3	0 e 90	4	20
4	Ch3	0 e 90	3	25
5	T13	0 e 90	2	31
6	Subestação	0 e 90	2	35
7	T13	0 e 90	1	40
8	T13	0 e 90	0,5	46
9	Ch1	0 e 90	1	50
10	Ch1	0 e 90	0,8	55
11	Ch1	0 e 90	0,6	60
12	Subestação	0 e 90	0,6	65
13	Subestação	0 e 90	0,5	70
14	Subestação	0 e 90	0,4	75
15	Subestação	0 e 90	0,3	80
16	Subestação	0 e 90	0,2	85

Tabela 7 – Resultado das simulações do sistema para elevação de tensão.

Número de casos	Localização da Falta	Ângulo de Incidência(°)	Resistência de Falta(Ω)	Elevação de Tensão Obtida(%)
1.	Subestação	0 e 90	5	10
2.	Tp4	0 e 90	3	16
3.	Tp4	0 e 90	2	20
4.	Tp4	0 e 90	1	26
5.	Tp4	0 e 90	0,5	30
6.	BC1	0 e 90	1	35
7.	BC1	0 e 90	0,7	40
8.	BC1	0 e 90	0,5	45
9.	Subestação	0 e 90	0,5	50
10.	Subestação	0 e 90	0,4	54
11.	BC1	0 e 90	0,05	56
12.	Subestação	0 e 90	0,1	67
13.	Subestação	0 e 90	0,04	69

Foram gerados ainda, oito casos característicos de interrupção momentânea, já definidos anteriormente. Tais casos foram obtidos através de faltas aplicadas diretamente na subestação, com resistência variando entre 0,01 e 0,1 ohms e com ângulo de incidência da falta de 0° e 90°. A Tabela 8 apresenta os resultados das simulações para a obtenção dos casos descritos.

Tabela 8 – Interrupções momentâneas geradas através de situações de faltas.

<i>Número de casos</i>	<i>Ponto de aplicação da falta</i>	<i>Ângulo de incidência (°)</i>	<i>Resistência de Falta (Ω)</i>	<i>Amplitude da Interrupção obtida (%)</i>
1	Subestação	0 e 90	0,10	92
2	Subestação	0 e 90	0,08	94
3	Subestação	0 e 90	0,05	96
4	Subestação	0 e 90	0,01	99

Para a obtenção de condições representando oscilações transitórias, foram utilizados os bancos BC2 e BC3 situados nos pontos Ch1 e Ch3, respectivamente. O chaveamento foi realizado no ponto Ch3 (banco BC3) estando o banco BC2 energizado (regime permanente). A Tabela 9 apresenta os 12 casos considerados, lembrando que o banco foi chaveado com ângulos de incidência de 0° e 90°.

Tabela 9 – Casos simulados para obtenção de oscilações transitórias

<i>Número de Casos</i>	<i>Banco Chaveado</i>	<i>Ângulo de Incidência (°)</i>	<i>Local da medição</i>
1	BC3	0 e 90	Tp4
2	BC3	0 e 90	T8
3	BC3	0 e 90	T3
4	BC3	0 e 90	T13
5	BC3	0 e 90	T1
6	BC3	0 e 90	Subestação

Para a obtenção dos casos caracterizando situações de “ruídos” sobre o sistema, foram utilizados o *software* Matlab e uma forma de onda característica do sistema em regime permanente. Através do *software* mencionado, formas de ondas foram superpostas ao sinal em regime. As formas de ondas superpostas são constituídas de ruído branco com amplitude variando entre 0,1 e 1,2% da amplitude máxima do sinal em regime. Formaram-se um total de 12 diferentes casos de ruídos para submissão da análise.

VI. O ALGORITMO IMPLEMENTADO PARA ANÁLISE DA QUALIDADE DA ENERGIA VIA TRANSFORMADA DE FOURIER JANELADA

6.1. Detecção e Localização do Distúrbio

Para a tarefa de detecção do distúrbio, realizou-se o janelamento do sinal em análise por períodos de um ciclo, com um avanço da janela à passos de meio ciclo (Figura 30, forma de onda em vermelho). De maneira análoga, um sinal em regime permanente, representado pela forma de onda em azul, também foi janelado, com janelas de um ciclo e passos de meio ciclo, conforme mostra a Figura 30 abaixo.

Figura 30. Janelamento dos sinais em regime permanente e sob análise, nas cores azul e vermelha respectivamente.

Com o janelamento de ambos os sinais (em análise e em regime permanente), pôde-se efetuar uma comparação entre as respectivas amplitudes de cada amostra nas janelas consideradas. Sendo assim, quando da ocorrência de um determinado distúrbio sobre o sistema, o mesmo poderá ser identificado pela diferença entre as amostras consideradas, quando esta for superior ao limiar de 160 Volts, determinado empiricamente. Portanto, o algoritmo, nesta etapa da análise, acusa o momento inicial de tal evento, realizando assim a sua detecção e conseqüente localização no tempo, sendo automaticamente direcionado para o próximo passo, que trata da classificação.

6.2. Classificação dos Distúrbios

Após a detecção do início dos distúrbios, tem-se a etapa seguinte que trata da classificação dos mesmos. A classificação é realizada por meio da Transformada de *Fourier* Janelada com a utilização das Janelas Retangular, de Hanning e de Kaiser. O sinal em análise é agora janelado com janelas de 2 ciclos e passos de 1 ciclo, conforme a Figura 31 abaixo.

Figura 31. Esquema de Janelamento utilizando janelas de 2 ciclos.

Cada sinal em análise é submetido a uma avaliação de sua energia por meio da função *specgram*, utilizando-se novamente do *software* Matlab. As informações, no domínio do tempo e da frequência, são obtidas com a aplicação da TRF a cada segmento do sinal janelado pela própria função *specgram* [36]. Esse procedimento de avaliação, do conteúdo espectral de um dado sinal com conceito de janela móvel, é ilustrado na Figura 32.

Figura 32. Avaliação sucessiva das informações através da TRF.

Onde:

- $x[t]$ é o sinal a ser analisado;
- $w[t - t_i]$ é a janela, para um dado t fixo, a qual “deslizará” ao longo da sequência $x[t]$;
- $X[t_i, k]$ é o conteúdo espectral resultante da porção janelada do sinal em análise $x[t]$ obtida pela multiplicação da janela $w[t - t_i]$.

A função *specgram* utiliza-se de dados de entrada como: sinal a ser analisado, tamanho da janela, frequência de amostragem do sinal em análise, tipo da janela utilizada para obtenção do conteúdo espectral e sobreposição ou não da janela móvel. As informações retiradas desse processo são: O espectrograma do sinal analisado, ou seja, a magnitude desse sinal, as frequências e o tempo para qual o espectrograma foi calculado através da TRF [36].

Com a aplicação da função *specgram*, obtém-se a magnitude do sinal em análise, como dito anteriormente. Tais magnitudes são plotadas de maneira a corresponder a cada múltiplo da frequência fundamental do sistema, 60 Hz.

De situações práticas, tem-se que, apesar de poderem causar interferência em dispositivos eletrônicos de baixa potência, geralmente, as componentes harmônicas de ordens elevadas (acima da 25^a a 50^a ordem, dependendo do sistema) são desprezíveis para análises de sistemas de potência [7].

Serão consideradas, para fins de estudos neste trabalho, as componentes harmônicas até a 50^a ordem onde estas são normalizadas em relação ao maior pico, o qual ocorre na frequência fundamental do sistema.

Para visualizarmos o resultado da função *specgram* e suas respectivas magnitudes normalizadas, será apresentado como exemplo no que segue, uma situação caracterizada por um afundamento de tensão de 31% (Figura 33). Nesse exemplo foi utilizado uma janela retangular de 2 ciclos de largura e passos de 1 ciclo.

Figura 33. Afundamento de tensão de 31 %.

Figura 34. Espectrograma para um Afundamento de tensão de 31 %.

De acordo com a barra de cores, ao lado na Figura 34, tem-se que a cor vermelha representa uma maior concentração de energia enquanto a cor azul uma menor presença de energia nas devidas faixas de frequência correspondentes. Percebe-se que há uma maior concentração de energia na faixa de frequência de 60 Hz, na horizontal, e em outras faixas, essa energia é significativamente diminuída, mostrando assim, uma correta interpretação quanto ao conteúdo espectral de tal afundamento. A mesma análise pode ser feita com respeito ao tempo, onde se percebe claramente duas regiões com uma maior concentração de energia, na vertical, apontando os instantes inicial e final do distúrbio considerado.

As magnitudes obtidas da função *specgram* foram normalizadas, como mencionado anteriormente, e a Figura 35 mostrará essa normalização a qual caracteriza tal afundamento de tensão de 31%. Percebe-se que apenas se obteve informações da componente de frequência fundamental, 60 Hz, sendo que as demais componentes harmônicas, de 2^a a 50^a ordem, não são evidenciadas. Essas informações obtidas, juntamente com a diferença de amplitude entre as componentes de frequência fundamental do sinal em análise e do sinal em regime permanente, caracterizam perfeitamente o afundamento de tensão analisado.

Figura 35. Análise espectral para um Afundamento de tensão de 31%.

Ressalta-se que após a detecção do tempo inicial do distúrbio, é feito uma análise espectral das janelas subsequentes a este tempo, o que corresponde a informações reais do distúrbio. Desse modo, as componentes de frequência da janela 4, Figura 35, estão relacionadas com a primeira janela após o início do distúrbio, ou seja, estas componentes de frequência estão relacionadas apenas com a porção do sinal em análise que contém realmente o distúrbio.

Uma vez explicado todo o procedimento para obtermos as informações relativas as magnitudes espectrais do sinal em análise, a classificação dos distúrbios se baseia em suas próprias definições conforme será visto no que segue.

6.2.1. Classificação de uma Elevação de Tensão

Para classificarmos uma elevação de tensão, foram utilizadas informações que caracterizam tal distúrbio, como:

- A amplitude normalizada, relacionada com a frequência fundamental (60 Hz), devendo esta estar situada entre 1,1 e 1,8 p.u.;
- O conteúdo espectral, devendo este fornecer informações relevantes apenas com respeito à frequência fundamental, sendo que as harmônicas de 2ª a 50ª ordem devem possuir amplitudes desprezíveis.

6.2.2. Classificação de um Afundamento de Tensão

Na classificação de um afundamento de tensão utiliza-se também de informações intrínsecas a tal distúrbio, como:

- A componente de frequência fundamental, possuindo esta uma amplitude normalizada com valores entre 0,1 e 0,9 p.u.;
- As informações do conteúdo espectral das harmônicas de 2^a a 50^a ordem, apresentando estas amplitudes também desprezíveis, sendo consideradas então, somente as informações que dizem respeito à frequência fundamental.

6.2.3. Classificação de uma Interrupção de Tensão

A interrupção de tensão, um dos distúrbios mais sensíveis pelos consumidores, pode ser caracterizada mediante informações tais como:

- A amplitude normalizada, caracterizada por valores menores do que 0,1 p.u., sendo estes relacionados apenas com a frequência fundamental e as
- Informações com respeito às harmônicas de 2^a a 50^a ordem, assim como para as situações de elevação de tensão ou um afundamento de tensão, possuindo amplitudes insignificantes perante a amplitude relacionada a componente de frequência fundamental.

6.2.4. Classificação de um Transitório Oscilatório

A classificação de um transitório oscilatório de baixa frequência pode ser analisada com base no seu conteúdo espectral, o qual deve ser menor que 5 kHz.

SANTOS, C.J. [6], mostra que há duas faixas de frequências predominante nas ondas de tensão mediante a ocorrência de um transitório oscilatório. Uma na faixa 100 – 600, onde as mais significantes são as harmônicas de 7^a e 8^a ordem. A outra faixa de frequência corresponde ao intervalo de 2000 - 2400 Hz.

Na energização de bancos de capacitores, o qual geralmente resulta em oscilações de tensão com frequência entre 300 e 900Hz, com magnitude máxima próxima de 2,0 p.u., sendo valores típicos de 1,3 a 1,5 p.u. com uma duração entre 0,5 e 3 ciclos dependendo das características de amortecimento do sistema [10].

Com base nessas observações foi verificada que as harmônicas de 7^a e 8^a ordem, ou seja, as frequências de 420 e 480 Hz poderiam nos indicar a presença de um transitório oscilatório de baixa frequência como é típico em chaveamentos de bancos capacitivos.

6.2.5. Classificação de Ruídos

A caracterização de ruídos também foi fundamentada sobre a definição do mesmo, ou seja, sinais elétricos não desejáveis com um conteúdo espectral abaixo de 200 kHz, superpostos à tensão do sistema de distribuição de energia e possuindo uma amplitude máxima próxima de 1% da grandeza em análise. Sendo assim, como limitamos as componentes de frequência até a 50^a ordem, estabelecemos que, se pelo menos 45 destas componentes de frequências forem maior que zero, e sendo todas menores que um dado limiar determinado empiricamente, este sinal corresponderia a um ruído superposto ao sinal em análise.

6.3. Estimação da Duração dos Distúrbios

Uma vez realizada a **detecção**, a **localização** no tempo e a **classificação** do distúrbio, a próxima etapa refere-se à estimação da duração do distúrbio, considerando-se os casos de afundamentos, elevações e interrupções de tensão. Estes distúrbios apresentam tempos definidos de início e de permanência (tempo final) sobre os sinais em análise, ao contrário dos sinais de ruídos (que se mantêm constantes) ou de transitórios oscilatórios, os quais, após o seu pico inicial, caracterizam-se por um decaimento na sua amplitude em virtude das características de amortecimento do próprio sistema.

A estimação da duração de um afundamento, elevação ou interrupção de tensão ocorre através dos seguintes passos: após a detecção e localização do início de um determinado distúrbio com a conseqüente classificação do mesmo, busca-se a

informação que evidencia em qual janela de dados ocorreu o início do distúrbio. A partir desta janela de início, as demais janelas, considerando-se agora as mesmas com um ciclo de duração e avanços também de um ciclo, são utilizadas para localizar o tempo final do distúrbio, estimando assim a sua duração. A Figura 36 servirá como ilustração para explicitação do processo acima descrito.

Figura 36. Ilustração do processo de detecção do fim do distúrbio.

Uma vez que o início do distúrbio foi detectado, como no exemplo, pela janela 1, o algoritmo utilizará informações a partir da próxima janela (janela 2), para efetuar o cálculo da diferença de amplitude, amostra por amostra, entre uma janela subsequente e uma anterior como, por exemplo, comparando-se a amplitude da janela 3 com a da janela 2.

Assim, são obtidos valores os quais são comparados a um limiar de 800 Volts, determinado empiricamente. A ultrapassagem de um desses valores em relação ao limiar especificado indica a localização no tempo do fim do distúrbio.

O possível fim do distúrbio pôde ser observado na Figura 36 onde a comparação entre a amplitude das amostras envolvendo as janelas 4 e 3, indica uma diferença significativa em relação ao limiar especificado.

Após a detecção do fim do distúrbio, a estimação da duração do mesmo é efetuada mediante o cálculo da diferença entre os tempos final e inicial.

VII. RESULTADOS OBTIDOS UTILIZANDO O ALGORITMO IMPLEMENTADO

Com base no sistema elétrico apresentado no capítulo V, e na metodologia apresentada no capítulo VI, efetuou-se de forma automatizada a detecção, localização e classificação dos distúrbios pertencentes ao conjunto de teste formado por 90 diferentes situações. Destas situações, 32 referem-se a afundamentos de tensão de 0,1 a 0,85 p.u., 26 a elevações de tensão de 0,1 a 0,69 p.u., 8 a interrupções de energia, 12 a ruídos e 12 a oscilações transitórias devido ao chaveamento de bancos de capacitores. Os fenômenos, com exceção dos ruídos foram caracterizados tomando-se como ângulos de incidência dos distúrbios os valores de 0° e 90° .

Os resultados, dos 90 casos gerados submetidos à análise do algoritmo implementado, serão apresentados de maneira a mostrar a eficiência do mesmo.

7.1. Resultados do processo de detecção e localização dos Distúrbios

Durante a execução desta etapa, foi observado que para um mesmo tipo de distúrbio, referente a um dado ângulo de incidência, 0° ou 90° , não houve uma variação significativa dos tempos de início de tais distúrbios. Tais variações, apresentaram erros menores que 1 %, mesmo quando estes distúrbios foram simulados com magnitudes diferentes.

Sendo assim, de acordo conceito teórico apresentado no capítulo VI, na seção 6.1, obtemos os tempos de início dos diversos distúrbios envolvidos e os detalhamos de maneira sucinta como mostra a Tabela 10.

Tabela 10 – Tempos de detecção inicial dos distúrbios

Distúrbios Analisados		Ângulo de Incidência (°)	Início Real do Distúrbio (s)	Localização do Distúrbio (s)	Erro Absoluto (%)
Distúrbios Analisados	Elevação de Tensão	0	0,0445	0,0447	0,02
		90	0,0488	0,0489	0,01
	Afundamento de Tensão	0	0,0445	0,0447	0,02
		90	0,0485	0,0489	0,04
	Interrupção de Tensão	0	0,0445	0,0447	0,02
		90	0,0485	0,0489	0,04
	Transitório Oscilatório	0	0,0446	0,0447	0,01
		90	0,0488	0,0489	0,01
	Ruídos		0,0649	0,0650	0,01

Portanto, os resultados apresentados na Tabela 10, mostram que a técnica utilizada para detecção do momento inicial de tais distúrbios apresenta erros percentuais muito baixos em relação ao início real dos distúrbios.

7.2. Resultados do processo de Classificação dos Distúrbios

O processo de classificação dos distúrbios relacionados à QE foi ilustrado na seção 6.2, onde tal processo busca como informação principal, a obtenção da magnitude extraída do sinal em análise por meio da função *specgram*, contida no *software* Matlab. Como já mencionado, os distúrbios em análise serão analisados através da TFJ onde faremos uso de três tipos de janelas: retangular, de Hanning e de Kaiser.

Veremos a seguir um exemplo de uma elevação de tensão de 30%, Figura 37, para verificação do seu conteúdo de frequência. Tal elevação de tensão foi originada por uma falta fase-terra aplicada próximo ao transformador particular Tp4, a uma distância de 1.809 metros da subestação. A resistência de falta neste caso foi de 0,5 ohm e o ângulo de incidência da falta foi de 0°.

Figura 37. Elevação de tensão de 30%.

O resultado da aplicação da TFJ através da função *specgram*, com relação a tal elevação de tensão, será mostrado a seguir, evidenciando o comportamento de tal distúrbio de acordo com cada uma das três janelas utilizadas para análise.

Figura 38. Espectrograma para o caso de elevação de tensão utilizando a janela Retangular.

Figura 39. Espectrograma para o caso de elevação de tensão utilizando a janela de Hanning.

Figura 40. Espectrograma para o caso de elevação de tensão utilizando a janela de Kaiser.

Através das Figuras 38, 39 e 40, pôde-se analisar informações em ambos os domínios, tempo e frequência. Percebe-se que a janela retangular fornece uma concentração maior de energia em torno da frequência de 60 Hz, sendo que, nas demais janelas, de Hanning e de Kaiser, essa concentração de energia também é percebida, porém com menor intensidade.

Figura 41. Análise espectral para uma elevação de tensão de 30%.

A Figura 41, acima, mostra o comportamento espectral para o caso de uma elevação de tensão de 30%. Percebe-se um aumento na amplitude do espectro da componente fundamental enquanto as demais componentes de frequência, múltiplas da fundamental, apresentam amplitudes insignificantes.

Quanto às informações correspondentes ao domínio de tempo, a janela de Hanning evidência uma concentração de energia em duas faixas distintas no tempo, dando idéia do momento inicial e final do distúrbio em análise. O princípio da incerteza, descrito na seção 4.5, estabelece um compromisso entre a largura da janela e as correspondentes respostas nos domínios, tempo e frequência. Na Tabela II têm-se as amplitudes estimadas pelo algoritmo para os casos de elevações de tensão. Pode-se concluir também que este tipo de janela, entre as três apresentadas, seria a mais indicada para a análise do comportamento do sistema quando o fenômeno não está mais sobre o mesmo. Por este tipo de janela, evidencia-se os componentes de frequência resultantes quando da extinção do distúrbio original, até o amortecimento por completo do sistema.

Tabela 11 – Amplitudes estimadas pelo algoritmo para os casos de elevação de tensão.

Casos	Ângulo de Incidência (%)	Elevação de Tensão (%)	Amplitude (%) J. Retangular	Erro (%)	Amplitude (%) J. de Hanning	Erro (%)	Amplitude (%) J. de Kaiser	Erro (%)
1.	0	10	10,2191	2,1912	10,2450	2,4496	10,2082	2,0824
2.	0	16	15,5879	2,5758	15,5585	2,7595	15,5799	2,6256
3.	0	20	19,9312	0,3442	19,8694	0,6531	19,9224	0,3881
4.	0	26	26,3293	1,2666	26,1262	0,4855	26,3184	1,2248
5.	0	30	30,4711	1,5704	30,0578	0,1927	30,4563	1,5210
6.	0	35	34,7235	0,7901	34,6477	1,0065	34,7032	0,8479
7.	0	40	40,1614	0,4035	40,0251	0,0627	40,1397	0,3493
8.	0	45	44,5002	1,1106	44,2852	1,5885	44,4771	1,1619
9.	0	50	50,1394	0,2788	50,0222	0,0444	50,1083	0,2166
10.	0	54	53,5976	0,7452	53,4463	1,0253	53,5655	0,8047
11.	0	56	56,7143	1,2755	56,0233	0,0417	56,6817	1,2173
12.	0	67	66,3148	1,0227	65,9340	1,5910	66,2775	1,0784
13.	0	69	69,3389	0,4911	68,8696	0,1890	69,2996	0,4343
14.	90	10	10,2246	2,2455	10,2386	2,3856	10,2149	2,1491
15.	90	16	15,5775	2,6405	15,5834	2,6034	15,5715	2,6783
16.	90	20	19,8929	0,5356	19,8989	0,5057	19,8870	0,5650
17.	90	26	26,1522	0,5853	26,1556	0,5984	26,1488	0,5723
18.	90	30	30,0791	0,2638	30,0817	0,2723	30,0791	0,2638
19.	90	35	34,6707	0,9409	34,7035	0,8470	34,6539	0,9887
20.	90	40	40,0506	0,1266	40,0838	0,2095	40,0345	0,0862
21.	90	45	44,3124	1,5280	44,3448	1,4561	44,2974	1,5613
22.	90	50	50,0759	0,1518	50,1080	0,2159	50,0486	0,0972
23.	90	54	53,503	0,9203	53,5334	0,8640	53,4758	0,9708
24.	90	60	56,055	6,5750	56,0732	6,5447	56,0468	6,5887
25.	90	67	66,0032	1,4878	66,0208	1,4615	65,9782	1,5251
26.	90	69	68,9417	0,0845	68,9543	0,0662	68,9177	0,1192
Erro médio (%)				1,2366		1,1585		1,2353

Os resultados apresentados na Tabela 11 evidenciam a eficácia da aplicação da TFJ na estimação da amplitude e classificação dos casos de elevações de tensão. Os erros médios decorrentes do processo de comparação entre a amplitude real e a estimada pelo algoritmo mostraram-se pequenos. A janela de Hanning apresentou um menor erro médio em comparação com as outras duas janelas, retangular e de Kaiser.

O comportamento espectral para um caso de afundamento de tensão é semelhante ao de uma elevação de tensão. Tal comportamento, em se tratando de um afundamento de tensão de 31%, foi apresentado na Figura 35, seção 6.2.

A Tabela 12 ilustrará as amplitudes estimadas pelo algoritmo para os 32 casos de afundamentos de tensão.

Tabela 12 – Amplitudes estimadas pelo algoritmo para os casos de afundamento de tensão.

Casos	Ângulo de Incidência (%)	Afundamento de Tensão (%)	Amplitude (%) J. Retangular	Erro (%)	Amplitude (%) J. de Hanning	Erro (%)	Amplitude (%) J. de Kaiser	Erro (%)
1.	0	10	9,9494	0,5058	9,9422	0,5776	9,9586	0,4139
2.	0	14	14,3562	2,5442	14,0848	0,6059	14,3671	2,6219
3.	0	20	20,1393	0,6963	19,8041	0,9793	20,1510	0,7548
4.	0	25	25,0226	0,0903	24,6477	1,4090	25,0343	0,1374
5.	0	31	31,1276	0,4116	30,7632	0,7639	31,1364	0,4401
6.	0	35	34,8286	0,4896	34,3299	1,9145	34,8457	0,4408
7.	0	40	41,0113	2,5283	40,6471	1,6177	41,0145	2,5363
8.	0	46	46,6618	1,4386	46,3187	0,6928	46,6569	1,4279
9.	0	50	50,1626	0,3252	49,6228	0,7543	50,1745	0,3489
10.	0	55	54,8603	0,2541	54,3075	1,2591	54,8707	0,2350
11.	0	60	60,2205	0,3675	59,6506	0,5823	59,6506	0,5823
12.	0	65	65,7410	1,1400	65,7529	1,1583	65,2390	0,3678
13.	0	70	69,9191	0,1155	69,9298	0,1002	69,9298	0,1002
14.	0	75	74,5906	0,5459	74,5999	0,5335	74,5999	0,5335
15.	0	80	79,8339	0,2076	79,8416	0,1981	79,3799	0,7751
16.	0	85	85,7417	0,8726	85,7473	0,8792	85,3001	0,3531
17.	90	10	9,9558	0,4424	9,9416	0,5845	9,9656	0,3437
18.	90	14	14,3748	2,6773	14,3465	2,4753	14,3748	2,6773
19.	90	20	20,1475	0,7375	20,1300	0,6498	20,1596	0,798
20.	90	25	25,0334	0,1336	25,0159	0,0634	25,0454	0,1816
21.	90	31	31,1433	0,4621	31,1318	0,4252	31,1521	0,4908
22.	90	35	34,8426	0,4498	34,816	0,5258	34,8594	0,4016
23.	90	40	41,023	2,5575	41,0187	2,5468	41,0262	2,5656
24.	90	46	46,6562	1,4264	46,6584	1,4313	46,6524	1,4183
25.	90	50	50,1940	0,3881	50,1760	0,3521	50,205	0,4099
26.	90	55	54,8949	0,1911	54,8790	0,2199	54,9043	0,1740
27.	90	60	60,2541	0,4236	60,2416	0,4026	60,2613	0,4355
28.	90	65	65,7857	1,2087	65,7695	1,1838	65,7959	1,2244
29.	90	70	69,9687	0,0447	69,9547	0,0647	69,9775	0,0322
30.	90	75	74,6443	0,4743	74,6328	0,4896	74,6515	0,4646
31.	90	80	79,8896	0,1380	79,8809	0,1488	79,8951	0,1311
32.	90	85	85,794	0,9341	85,7883	0,9274	85,7977	0,9384
Erro médio (%)			0,9701		1,0199		0,9522	

De forma semelhante à análise dos casos de elevações de tensão, a TFJ pôde ser utilizada com sucesso na estimação das amplitudes dos afundamentos de tensão, conseqüentemente ajudando na classificação dos mesmos. Os erros médios, vistos na Tabela 12, mostraram que a janela de Kaiser estimou com maior precisão as amplitudes do distúrbio em análise quando comparados às janelas retangular e de Hanning respectivamente.

A interrupção de tensão, outro distúrbio associado à QE, foi também analisada. Os 8 casos gerados, com ângulos de incidência à 0 e 90 graus, foram submetidos a análise para estimação de suas amplitudes com a conseqüente classificação.

Vamos mostrar um exemplo de interrupção momentânea de tensão causada por uma falta AT ocorrida na subestação, com uma resistência de falta de 0,10 ohm e um ângulo de incidência da falta de 0°. A forma de onda simulada é mostrada abaixo.

Figura 42. Interrupção momentânea de tensão curta duração.

Na análise referente ao conteúdo espectral de uma interrupção de tensão, deve-se observar a diferença significativa de magnitude existente entre as componentes de frequência fundamental de um sinal em regime permanente e as de outro, típico do distúrbio em análise. Na Figura 43 se percebem as informações acima citadas.

A Tabela 13 exporá os resultados obtidos da estimação de tais amplitudes, referentes aos casos de interrupção de tensão, e os erros médios decorrentes do processo. Todos os erros médios foram menores que 0,5 %, evidenciando, portanto, a grande eficácia da ferramenta utilizada.

Figura 43. Análise espectral para o caso de uma interrupção de tensão.

Tabela 13 – Amplitudes estimadas pelo algoritmo para os casos de interrupção de tensão.

Casos	Ângulo de Incidência (%)	Interrupção de Tensão (%)	Amplitude (%) J. Retangular	Erro (%)	Amplitude (%) J. de Hanning	Erro (%)	Amplitude (%) J. de Kaiser	Erro (%)
1.	0	92	92,4221	0,4588	91,9734	0,0289	92,4253	0,4623
2.	0	94	93,8616	0,1473	93,4015	0,6367	93,8642	0,1445
3.	0	96	96,0904	0,0941	95,5982	0,4186	96,0921	0,0959
4.	0	99	99,1979	0,1999	98,4823	0,5229	99,1983	0,2003
5.	90	92	92,4596	0,4995	92,4568	0,4966	92,4614	0,5015
6.	90	94	93,8939	0,1129	93,8917	0,1152	93,8953	0,1114
7.	90	96	96,1129	0,1177	96,1116	0,1163	96,1138	0,1186
8.	90	99	99,2032	0,2052	99,2029	0,205	99,2033	0,2054
Erro médio (%)			0,2294		0,3175		0,2300	

Os doze casos de transitórios oscilatórios e as doze situações caracterizando sinais com ruídos foram corretamente classificadas, conforme o procedimento apresentado nas respectivas seções 6.2.4 e 6.2.5, o qual diz respeito à classificação dos mesmos.

A título de ilustração, mostraremos a seguir dois exemplos da utilização da TFJ para representação da energia do sinal de um transitório oscilatório e outro referente a ruídos.

Utilizando-se do sistema elétrico apresentado, foi simulado o chaveamento do banco de capacitores BC3, estando o banco BC2 energizado. A medição deste distúrbio foi feita próxima ao transformador de distribuição 1 (T1), situado a 338 metros da subestação. O ângulo de incidência do chaveamento foi de 90° alcançando um valor de pico máximo de 1,3 p.u.. A Figura 44 apresenta tal forma de onda.

Figura 44. Oscilação transitória provocada por um chaveamento de capacitores.

A Figura 45 mostra ruídos superpostos a um sinal de tensão em regime permanente. Os mesmos foram inseridos sobre o sistema a partir de um determinado instante, sendo a amplitude máxima considerada de 1,2%.

Figura 45. Ruídos de 1,2% superpostos a um sinal de tensão em regime permanente.

(a)

(b)

(c)

Figura 46. Espectrograma para o caso de transitório oscilatório com as janelas: (a) Retangular, (b) de Hanning e (c) de Kaiser

(a)

(b)

(c)

Figura 47. Espectrograma para o caso de ruído de 1,2% com as janelas: (a) Retangular, (b) de Hanning e (c) de Kaiser

Pelas Figuras 46 e 47, pode-se constatar o comportamento das repostas nos domínios da frequência e do tempo para situações que caracterizam um transitório oscilatório, oriundo do chaveamento de capacitores, e ruídos superpostos a um sinal de tensão em regime permanente com amplitude de 1,2%, respectivamente.

Percebe-se que a janela de Hanning apresentou de forma mais clara a concentração de energia de ambos distúrbios, ou seja, os respectivos conteúdos de frequências envolvidos, bem como a faixa correspondente ao tempo, sendo esta uma caracterização do momento inicial dos distúrbios. Nas demais janelas, retangular e de Kaiser, também são possíveis essas visualizações, porém de forma não tão destacada como quando utilizando a janela de Hanning.

Todas as três janelas, retangular, de Hanning e de Kaiser, envolvidas no processo de obtenção das amplitudes dos distúrbios para sua própria classificação, mostraram-se eficazes para tal função.

As respectivas respostas envolvendo a análise espectral de tais distúrbios, transitório oscilatório (Figura 44) e ruídos (Figura 45), são mostradas nas Figuras 48 e 49 respectivamente.

Figura 48. Análise espectral para um chaveamento de Banco de Capacitores.

Figura 49. Análise espectral para um caso de ruídos de 1,2%.

7.3. Resultados do processo de Estimação da Duração dos Distúrbios

A estimação da duração dos distúrbios elevação, afundamento e interrupção de tensão passa primeiro pelo processo de detecção do fim dos mesmos, conforme ilustrado na Figura 36, na seção 6.3. Mediante a obtenção dos tempos iniciais e finais de cada distúrbio, pode-se estimar sua respectiva duração. Como os tempos iniciais dos distúrbios foram mostrados na Tabela 10, seção 7.1, mostraremos adiante apenas as durações estimadas de tais distúrbios.

7.3.1. Afundamento de Tensão

A Tabela 14 apresentará os resultados obtidos para os casos de afundamento de tensão, os quais foram simulados com duração de três ciclos, ou seja, 0,05s. A duração dos distúrbios estimada pelo algoritmo é apresentada na quarta coluna e na coluna seguinte, os respectivos erros associados a cada distúrbio. Os casos com ângulo de incidência de falta a 0° apresentaram um erro médio de 2,56%, bastante inferior aos 9,89 % de média de erro dos distúrbios com ângulo de incidência a 90° . Sobre estes dados, obteve-se uma média total de erros para os casos de afundamentos de tensão de 6,31%.

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

Casos	Ângulo de Incidência (°)	Afundamento de Tensão (%)	Duração Estimada pelo Algoritmo (s)	Erro Encontrado (%)
1.	0	10	0,0508	1,57
2.	0	14	0,0508	1,57
3.	0	20	0,051	1,96
4.	0	25	0,0511	2,15
5.	0	31	0,0515	2,91
6.	0	35	0,0507	1,38
7.	0	40	0,0519	3,66
8.	0	46	0,0521	4,03
9.	0	50	0,0512	2,34
10.	0	55	0,0514	2,72
11.	0	60	0,0515	2,91
12.	0	65	0,0512	2,34
13.	0	70	0,0514	2,72
14.	0	75	0,0514	2,72
15.	0	80	0,0515	2,91
16.	0	85	0,0516	3,10
17.	90	10	0,055	9,09
18.	90	14	0,055	9,09
19.	90	20	0,0551	9,26
20.	90	25	0,0553	9,58
21.	90	31	0,0558	10,39
22.	90	35	0,0549	8,93
23.	90	40	0,056	10,71
24.	90	46	0,0563	11,19
25.	90	50	0,0555	9,91
26.	90	55	0,0555	9,91
27.	90	60	0,0556	10,07
28.	90	65	0,0554	9,75
29.	90	70	0,0555	9,91
30.	90	75	0,0555	9,91
31.	90	80	0,0556	10,07
32.	90	85	0,0558	10,39

7.3.2. Elevação de Tensão

A estimação da duração dos distúrbios de elevação de tensão, é mostrada na Tabela 15, apresentando também os erros associados a cada distúrbio. Assim como nos casos de afundamento de tensão, estes distúrbios também foram simulados com duração de 0,05s.

Os casos com ângulo de incidência da falta a 0° apresentaram uma média de erro de 4,09%. Já os casos com ângulo de incidência da falta a 90° apresentaram um erro médio na estimação da duração dos distúrbios de 11,16 %. Com estes dados foi obtida uma média total de erros para os casos de elevação de tensão, o qual corresponde a 7,62%.

A taxa de erro de estimação dos distúrbios é maior nos casos de ângulo de incidência da falta a 90° . Tal observação decorre da aplicação de faltas no ponto máximo do valor da tensão, resultando num alto índice de distorções, diferentemente das faltas aplicadas à tensão com um ângulo de incidência de 0° .

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

Casos	Ângulo de Incidência (°)	Elevação de Tensão (%)	Duração Estimada pelo Algoritmo (s)	Erro Encontrado (%)
1.	0	10	0,0514	2,72
2.	0	16	0,0523	4,40
3.	0	20	0,0524	4,58
4.	0	26	0,0528	5,30
5.	0	30	0,053	5,66
6.	0	35	0,0523	4,40
7.	0	40	0,0523	4,40
8.	0	45	0,0524	4,58
9.	0	50	0,0514	2,72
10.	0	54	0,0514	2,72
11.	0	56	0,0528	5,30
12.	0	67	0,0516	3,10
13.	0	69	0,0517	3,29
14.	90	10	0,0555	9,91
15.	90	16	0,0564	11,35
16.	90	20	0,0567	11,82
17.	90	26	0,0569	12,13
18.	90	30	0,0573	12,74
19.	90	35	0,0563	11,19
20.	90	40	0,0564	11,35
21.	90	45	0,0565	11,50
22.	90	50	0,0555	9,91
23.	90	54	0,0555	9,91
24.	90	60	0,0569	12,13
25.	90	67	0,0559	10,55
26.	90	69	0,0559	10,55

7.3.3. Interrupção de Tensão

Os resultados dos casos de interrupção de tensão tiveram suas durações estimadas conforme mostra a Tabela 16. Os erros de estimação de tais durações, associados a cada distúrbio, também são apresentados. Assim como nos casos de afundamento e elevação de tensão, estes distúrbios também foram simulados com duração de 0,05s. Porém a estimação feita pelo algoritmo apresentou para os casos com ângulo de incidência da falta a 0° , um erro médio de 2,96%, e quando da aplicação da falta com ângulo de incidência a 90° , o erro médio correspondente foi de 8,91%. Desta forma, foi obtida uma média total de erros de 5,93% para os casos de interrupções de tensão.

Tabela 16 – Análise da duração estimada pelo algoritmo para os casos de interrupção de tensão.

Casos	Ângulo de Incidência (°)	Interrupção de Tensão (%)	Duração Estimada pelo Algoritmo (s)	Erro Encontrado (%)
1.	0	92	0,0516	3,10
2.	0	94	0,0517	3,29
3.	0	96	0,0517	3,29
4.	0	99	0,0511	2,15
5.	90	92	0,0539	7,24
6.	90	94	0,0545	8,26
7.	90	96	0,0553	9,58
8.	90	99	0,0559	10,55

VIII. CONCLUSÕES

O crescente aumento do número de equipamentos eletrônicos, mais sensíveis a variações de tensões, tem exigido uma busca contínua pela Qualidade da Energia tanto a nível das concessionárias, como dos consumidores e fabricantes de equipamentos ou dispositivos empregados atualmente nos sistemas elétricos. A ocorrência de pequenos distúrbios que ocorrem nos sistemas elétricos de potência pode provocar inúmeras interferências indesejáveis no funcionamento destes equipamentos. O efeito econômico causado por tais distúrbios, dependendo basicamente das grandezas/magnitudes envolvidas e da duração dos mesmos, pode ser significativo tanto para as concessionárias como para os consumidores em geral.

Além das características intrínsecas a cada fenômeno, através de simulações realizadas, dispondo-se do *software* ATP, pode-se verificar a influência de alguns dos parâmetros, tais como, o ângulo de incidência da falta, a resistência de falta e o local de medição que possam a vir melhor representar determinados distúrbios, procurando sempre melhores alternativas para o seu entendimento e mitigação.

Em decorrência de uma melhor caracterização dos distúrbios que degradam a QE, faz-se necessário à utilização de alguma ferramenta ou abordagem alternativa que permita visualizar o comportamento de cada anomalia em específico, bem como, a resposta de um determinado sistema frente a mesma. Desta forma, justifica-se o interesse pela Transformada de *Fourier*, especificamente na sua forma Janelada, por esta ser uma ferramenta capaz de fornecer informações importantes na análise espectral de um dado sinal em análise.

Neste trabalho, todas as situações analisadas estão caracterizadas por 32 casos de afundamento de tensão, 26 de elevação de tensão, 8 de interrupções e 12 de oscilações transitórias. Foram também gerados, utilizando-se o *software* Matlab, 12 casos contendo ruído branco com amplitudes entre 0,1 e 1,2% da amplitude do sinal

em regime permanente. Os casos de ruídos foram gerados, somando-se ao “vetor” de um sinal senoidal puro, um vetor correspondente ao ruído branco. Sendo assim, um grupo composto por 90 diferentes situações foi submetido à análise espectral pela ferramenta exposta, sendo denotado desta, as características específicas de cada tipo de distúrbio.

O algoritmo desenvolvido mostrou uma excelente eficiência para análise dos distúrbios simulados. Todos os tipos de fenômenos analisados foram detectados e localizados no tempo corretamente, respeitando-se ótimos índices de precisão. Quanto à classificação, o algoritmo permitiu a correta diferenciação entre os cinco tipos de distúrbios analisados, com um índice de acerto de 100%. Em se tratando da estimação das amplitudes dos fenômenos relacionados as elevações, afundamentos e interrupções de tensão, a Tabela 17 abaixo, mostra os erros médios encontrados mediante a utilização das três janelas: retangular, de Hanning e de Kaiser. Pode ser verificado ainda que, quando a variação das janelas é feita para determinado tipo de distúrbio, a diferença entre o erro médio encontrado de uma janela em relação às outras são muito próximos.

Tabela 17 – Média dos erros obtidos através da comparação Janelas x distúrbios.

	Média dos Erros Referente aos Distúrbios		
	<i>Elevação de Tensão</i>	<i>Afundamento de Tensão</i>	<i>Interrupção de Tensão</i>
<i>Janela Retangular</i>	1,2366	0,9701	0,2294
<i>Janela de Hanning</i>	1,1585	1,0199	0,3175
<i>Janela de Kaiser</i>	1,2353	0,9522	0,2300

Quanto à estimação da duração dos distúrbios, o algoritmo implementado apresentou esporádicos erros na faixa de 12%, como vistos na seção 7.3. Porém, a maioria dos erros foram considerados aceitáveis uma vez que os mesmos não ultrapassam o valor de 5% do tempo real de permanência do distúrbio sobre o sistema em análise.

A visualização da energia dos distúrbios em análise, por meio da função *specgram*, no MatLab, contribui significativamente para o processo de discernimento de tais distúrbios. Com esse propósito, percebeu-se que dentre os três tipos de janelas analisadas neste trabalho, a janela de Hanning possibilitou uma melhor visualização da energia referente a cada tipo de distúrbio analisado.

Finalizando, a Transformada de *Fourier* Janelada permitiu a extração de informações importantes, tanto no domínio do tempo, dando a idéia de onde ocorreram os tempos iniciais e finais dos distúrbios, quanto no domínio da frequência. Informações estas que foram de fundamental importância na caracterização e posterior classificação dos distúrbios analisados.

8.1. Trabalhos Futuros

Com base no desenvolvimento desse trabalho, dispondo-se da ferramenta apresentada, a Transformada de *Fourier* Janelada, pode-se fazer as seguintes sugestões de continuidade da pesquisa:

- Analisar, dentre os vários tipos de janelas, qual teria uma melhor resposta para os distúrbios relacionados à qualidade da energia, objetivando também um estudo mais detalhado a respeito da escolha do tamanho da janela;
- Verificar e analisar a possibilidade da ocorrência, em forma isolada ou em conjunto, de outros tipos de distúrbios relacionados ao assunto delineado, dentre outras.
- Uma vez que o algoritmo implementado mostrou-se bastante eficaz no processo de detecção, localização e classificação dos distúrbios em análise, o próximo passo para verificação da eficiência do mesmo seria a utilização de dados reais de campo.

IX. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MAMEDE F. J. (1997) Proteção de Equipamentos Eletrônicos Sensíveis. São Paulo: Editora Érica.
- [2] DELGADO, J.D.B. et al. (1997). A Qualidade da Energia Elétrica na atualidade e o uso de novas tecnologias reparadoras. In: Seminário Brasileiro sobre Qualidade da energia Elétrica, 2. São Lourenço-MG.
- [3] ARSENEAU, R.; HEYDT, M. J.; KEMPKER, M. J. (1997). Application of IEEE standard 519-1992 harmonic limits for revenue billing meters. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v.12, n.1, p.346-352, Jan.
- [4] BELLEI, T.A.; O'LEARY, R.P.; CAMM, E.H. (1996). Evaluating capacitor-switching devices for preventing nuisance tripping of adjustable-speed drives due to voltage magnification. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v.11, n.3, p.1373-1378, Jul.
- [5] FULLER, J.F.; FUCHS, E.F.; ROESLER, D.J. (1997). Influence of harmonic on power distribution system protection. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v.3, n.2, p.549-556, Jan.
- [6] SANTOS, C.J. (2000). Transitórios originados pelo chaveamento de bancos de capacitores da concessionária em um sistema elétrico de distribuição. São Carlos. 107 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- [7] DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN, M. F.; BEATY, H. W. (1996). *Electrical power systems quality*. New York, McGraw-Hill.
- [8] ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA: Resolução Nº 24. (2000). p.15. Jan.

- [9] IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. (1995). *IEEE*, p.9, Jun.
- [10] OLIVEIRA, J. C. Projeto SIDAQEE - Capítulo II Qualidade de Energia Elétrica: Definição e Análise dos Itens de Qualidade. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia.
- [11] SILVA, V.F. (2001). *Condicionador de potência para aplicação em inversor de frequência de média tensão*. São Paulo. 140 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- [12] ABREU, J.P.; ARANJO, H.; OLIVEIRA, J.C.; BUENO, A.M.; SILVA, S.R. (1996) “Reflexões Sobre Qualidade da Energia”, SBQEE’96- Seminário Brasileiro de Qualidade da Energia Elétrica, Uberlândia, pp. 1-5, 10-13 Junho.
- [13] HUGHES, B. M.; CHAN, J.S.; KOVAL, D. O. (1993) “Distribution Customer Power Quality Experience”, *IEEE Transactions on Industry Applications* , Vol. 29, Nº 6 , pp 1204-1211, Nov./Dec.
- [14] STAUDT, V. (1988). Effects of window functions explained by signals typical to power electronics Harmonics And Quality of Power. Proceedings. 8th International Conference on, Volume: 2 , 14-18 Oct.
- [15] FUSHENG, Z.; ZHONGXING, G.; WEI Y.(2001). The Algorithm of Interpolating Windowed FFT for Harmonic Analysis of Electric Power System, *IEEE Transactions on Power Delivery* , Volume: 16, NO.2, April.
- [16] FREDRIC J. HARRIS, (1978). On the Use of Windows for Harmonic Analysis with the discrete *Fourier* Transform. Proceedings of the IEEE, Vol. 66, Nº 1, January.
- [17] SHERLOCK, B.G.; MONRO, D.M.(1992). Moving discrete *Fourier* transform Radar and Signal Processing, *IEE Proceedings F* , Volume: 139 Issue: 4 , Aug.
- [18] JARAMILLO, S.H.; HEYDT, G.T.; O'NEILL-CARRILLO, E.; MARISCOTTI, A. (2000). Discussion on “Power quality indices for aperiodic voltage and currents” *Power Delivery, IEEE Transactions on* , Volume: 15 Issue: 4 , Oct.

- [19] PORTNOFF, M. (1980) Time-frequency representation of digital signals and systems based on short-time *Fourier* analysis Acoustics, Speech, and Signal, IEEE Transactions on, Volume: 28 Issue: 1, Feb.
- [20] HENSLEY, G.; HEYDT, G.T.; FJELD, P.S.; LIU, C.C.; PIERCE, D.; TU, L. (1999) Applications of the windowed FFT to electric power quality assessment Power Delivery, IEEE Transactions on, Volume: 14 Issue: 4, Oct.
- [21] GU, Y.H.; BOLLEN, M.H.J.(2000) Time-frequency and time-scale domain analysis of voltage disturbances Power Delivery, IEEE Transactions on, Volume: 15 Issue: 4, Oct.
- [22] SANTOSO, S.; POWERS, E.; GRADY, W.; HOFFMANN, P.; SIDDHARTH C. B. (2000). Characterization of Distribution Power Quality Events With *Fourier* and Wavelet Transform. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, N° 1, Jan.
- [23] HUSSAIN, A.; SUKAIRI, M.H.; MOHAMED, A.; MOHAMED, R.(2001). Automatic detection of power quality disturbances and identification of transient signals. Signal Processing and its Applications, Sixth International, Symposium on. Vol.: 2.
- [24] LEE, C.H.; LEE, J.S.; KIM, J.O.; NAM,, S.W.; (1997). Feature Vector extraction for the Automatic Classification of Power Quality Disturbances. Circuits and Systems, ISCAS' 97. Proceedings of 1997 IEEE International Symposium on, vol. 4, 9-12, 2681-2684, Jun.
- [25] KEZUNOVIC, M. and LIAO, Y. (2002). A Novel Software Implementation Concept for Power Quality Study. IEEE Transactions on Power Delivery, 17, 2, 544-549, April.
- [26] GOMES, J., VELHO, L.; GOLDENSTEIN, S. (1997). 21° Colóquio Brasileiro de Matemática - Wavelets: Teoria, Software e Aplicações. IMPA Rio de Janeiro, Brasil: Impa, iv-216 p.
- [27] WEAVER, H. JOSEPH. (1983). Applications of Discrete and Continuous *Fourier* Analysis. John Wiley & Sons.

- [28] MICHELIN, C. (1998). Transformada de *Fourier* e Transformada de *Fourier* Rápida. Ribeirão Preto. 125 p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo.
- [29] MONOLAKIS, D. G.; PROAKIS, J. G. (1996). Digital Signal Processing, algorithms, and applications. Prentice-Hall. New Jersey.
- [30] J.W. COOLEY and J.W. TUKEY. (1965) “Algorithm for the machine calculation of Complex *Fourier* Series,” Math. Of Comput., vol. 19, pp. 297-301, April.
- [31] J.W. COOLEY, P.A.W. LEWIS, and P.D. WELCH, “Historical notes on the Fast *Fourier* Transform” this issue, p. 76-79.
- [32] RABINER, L. R. and SCHAFER, W. R. (1978). Digital Processing of Speech Signals. Bell Laboratories.
- [33] MISITI, M. et al.(1997). *Wavelet Toolbox*: User’s Guide. Natick, MA.
- [34] VIEIRA M. N., YEHIA H. C, (2002). Processamento de Sinais em Engenharia de Áudio. Anais do Primeiro Seminário Brasileiro de Engenharia de Áudio. Departamento de Engenharia Eletrônica da UFMG. Belo Horizonte – MG.
- [35] KEVIN GARD, (1997). FFT Windows for Intermodulation Analysis of Microwave Circuits From Transient Simulation. Microwave Symposium Digest, IEEE MTT-S International, Vol. 3, 8-13, Jun.
- [36] J.H. MCLELLAN; R.W. SCHAFER; M.A. YODER (1998). DSP First: a multimedia approach. Prentice-Hall, New Jersey.