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

*ANÁLISE DA QUALIDADE DA ENERGIA
EM UM SISTEMA ELÉTRICO
DE DISTRIBUIÇÃO*

Pio Antonio de Figueiredo

DEDALUS - Acervo - EESC

*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. Titular Denis Vinicius Coury*

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço... 07 / 12 / 04

Ass: *[Signature]*

**São Carlos
2004**

TESE EESC ✓
N. 2591
T 300/04
1412876

ANÁLISE DA QUALIDADE DA ENERGIA
EM UM SISTEMA ELÉTRICO
DE DISTRIBUIÇÃO

Pio Antônio de Figueiredo

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia
de São Carlos da Universidade de São Paulo
como parte dos requisitos para obtenção do título

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

F475a Figueiredo, Pio Antônio de
Análise da qualidade da energia em um sistema
elétrico de distribuição / Pio Antônio de Figueiredo.
-- 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 rápida
de Fourier janelada. 3. Afundamento de tensão.
4. Elevação de tensão. 5. Oscilação transitória.
I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **PIO ANTONIO DE FIGUEIREDO**

Dissertação defendida e julgada em 18-11-2004 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Titular **DENIS VINICIUS COURY (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO

Prof. Dr. **PAULO MAZZONCINI DE AZEVEDO MARQUES**
(Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto/USP)

APROVADO

Prof. Associado **JOSÉ FRANCISCO RODRIGUES**
(UNESP/Bauru)

APROVADO

Prof. Associado **HOMERO SCHIABEL**
Vice-Coordenador em exercício do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica

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

Dedico este trabalho à minha querida mãe,
Rosa Garcia de Figueiredo, a pessoa mais sábia
que conheço, e a quem devo tudo o que sou.
Meu eterno agradecimento e sua bênção.

Lembrança e respeito ao meu sempre presente e querido pai, Geraldo Justino de Figueiredo (*in memoriam*), pessoa digna, correta e que é a minha referência de vida.

Saudades!

Aos meus irmãos, Milva - Edivaldo; Célia - Antonio;
Olivier - Solange, a base familiar que sempre dá
sustentação em tudo na minha vida, e foi fundamental
para que eu realizasse este trabalho.
Obrigado por estarmos sempre unidos.
Abraços.

Um carinho especial à pessoa que sempre está ao meu
lado, que me apóia, torce por mim e me faz feliz.
Sara, eu te amo!

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Titular Denis Vinicius Coury, meu orientador, o meu muito obrigado pela dedicação e paciência e, principalmente, por acreditar em mim.

Ao meu grande amigo e irmão Cláudio, que definitivamente foi o maior encorajador e responsável por eu ter conduzido este trabalho até o fim. Minha eterna gratidão e respeito.

Às amigas Isabel Bordini e Luciana Alecrim, que permitiram que eu pudesse iniciar e desenvolver este trabalho, durante o período que foram minhas Diretoras no DAERP e HCFMRPUSP, cuja convivência me fez ser grande admirador e seguidor de seus ensinamentos.

À amiga Natache, pessoa competente e que contribuiu grandemente no desenvolvimento do trabalho computacional, com muita paciência e colaboração, não medindo esforços para atender aos meus pedidos.

Aos Professores, Funcionários e amigos do Departamento de Engenharia Elétrica da EESC/USP, e em especial aos Professores Doutores Manoel, Azauri, Diógenes e Mário que além de meus mestres foram grandes amigos e à Marisa que sempre colaborou com eficiência, boa vontade e companheirismo.

Ao Prof. Dr. Milton Roberto Laprega, Superintendente do HCFMRPUSP, que, com sua serenidade e competência, tem me ensinado a conduzir e vencer grandes obstáculos. Sua compreensão e permissão para eu continuar este estudo foram fundamentais para alcançar o objetivo final.

E agradeço sempre, sobretudo a Deus.

RESUMO

FIGUEIREDO, P. A. (2004). *Análise da Qualidade da Energia em um sistema elétrico de distribuição. 150p. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2004.*

O trabalho ressalta a importância do tema Qualidade da Energia (QE) e apresenta alguns dos diversos distúrbios responsáveis pelo seu comprometimento. Tais distúrbios, quando presentes em um dado sistema elétrico, podem causar sérios danos tanto aos equipamentos de medição e controle pertencentes ao fornecedor de energia, como também aos equipamentos mais sensíveis pertencentes aos usuários deste sistema. Os fenômenos mais frequentes no estudo da QE foram destacados, bem como suas definições. Conhecidos estes fenômenos, implementou-se um algoritmo computacional, utilizando como ferramenta a Transformada Rápida de Fourier Janelada (*Windowed Fast Fourier Transform - WFFT*) - TRFJ, para identificar e classificar estas perturbações em um dado sistema elétrico de distribuição. Para que o resultado fosse o mais próximo possível de uma situação real, utilizou-se para análise, um sistema elétrico real de distribuição da CPFL (Companhia Paulista de Força e Luz). Sobre o referido sistema elétrico foram simulados casos de afundamentos, elevações e oscilações de tensão, criando assim, um banco de dados para, posteriormente, podermos testar e validar o algoritmo computacional implementado, na identificação destes fenômenos. Este algoritmo permite variarmos tanto o tamanho da janela, quanto a frequência amostral do sinal. Neste estudo em particular, utilizamos tamanhos de janelas de 1 ciclo e $\frac{1}{2}$ ciclo, e frequência amostral do sinal, de 7,68 kHz (inicialmente utilizada para obtenção do banco de dados), e 0,769 kHz, aproximadamente. Como resultados, obtivemos que o tamanho da janela de dados para esta implementação, não apresentou diferenças significativas na análise, quando comparados com os dados iniciais. Entretanto, observa-se um comportamento contrário com a variação da taxa amostral, ou seja, quanto menor a frequência amostral empregada, maior a perda de informações importantes em relação ao sinal inicial.

Palavras chave: Qualidade da Energia, Transformada Rápida de Fourier Janelada, afundamento e elevação de tensão, oscilação transitória.

ABSTRACT

FIGUEIREDO, P. A. (2004). *Power Quality analysis in an electrical system distribution. 150p. M.Sc. Dissertation – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2004.*

The present work at lines the importance of Power Quality (PQ) and it presents some of the many disturbances related to it and its implications. Such disturbances, as presented in an electrical system, can cause serious damages in the measurements, in the control of power utility equipments, as well as in sensitive equipments. The most frequent phenomena in the study of PQ had been emphasized, as well as its definitions. Once these phenomena are known, a computational algorithm was implemented, using the Windowed Fast Fourier Transform - WFFT as a tool to identify and classify these disturbances, considering electrical distribution system. In order to have the best situation for the test, a real electrical distribution system from CPFL (Companhia Paulista de Força e Luz) utility was simulated. Some cases of voltage sag, voltage swell and oscillatory transient were simulated, creating a data base to test and validate the computational algorithm implemented. This algorithm allows changing the window length as the sample rate. For the proposed study, 1 cycle and ½ cycle as window length was analyzed with sample rate of 7,68 kHz (initially used for obtaining the data base), and 0,769 kHz. It was observed that the window length studied did not influence significantly the proposed analysis concerning PQ. However, concerning the sample rate, it was observed a deterioration of the analysis with the 0,769 kHz rate.

Key words: Power Quality, Windowed Fast Fourier Transform, voltage sag, voltage swell, oscillatory transient.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Tolerâncias típicas de tensão para computadores (curva ITI revisada em 2000).	6
Figura 2	Alguns dos distúrbios típicos que ocorrem na forma de onda da tensão.	8
Figura 3	Corrente transitória impulsiva oriunda de uma descarga atmosférica.	10
Figura 4	Transitório oscilatório de baixa frequência, causado pelo fenômeno da ferroressonância em um transformador a vazio.	11
Figura 5	Interrupção momentânea, devido a um curto-circuito e subsequente religamento.	13
Figura 6	Áreas de vulnerabilidade de um sistema de transmissão para uma determinada carga.	14
Figura 7	Faixa de sensibilidade dos equipamentos sujeitos à afundamento de tensão.	15
Figura 8	Transformador ferroressonante.	16
Figura 9	Elevação de tensão, devido a uma falta Fase-Terra.	17
Figura 10	Forma de distorção harmônica.	19
Figura 11	Forma de onda com componentes harmônicos.	20
Figura 12	Exemplo de “notching” causado por operação de conversor.	23
Figura 13	<i>Flicker</i> ou cintilação luminosa.	24
Figura 14	Principais aspectos da Qualidade da Energia.	29
Figura 15	Limites de tolerância de variação de tensão, comparados com a curva CBEMA.	31
Figura 16	Chaveamento de capacitores.	43
Figura 17	Algoritmo da Transformada Rápida de Fourier.	44
Figura 18	A Transformada de Fourier utilizada para localizar distúrbios.	48
Figura 19	Transformada de Fourier Janelada.	49
Figura 20	Transformada Rápida de Fourier Janelada (WFFT) com diferentes tamanhos de janela.	50
Figura 21	Sinal harmônico.	51

Figura 22	Frequência de amostragem igual à frequência do sinal em análise.	52
Figura 23	Frequência de amostragem superior à frequência do sinal em análise, mas inferior ao seu dobro.	52
Figura 24	Frequência de amostragem igual ao dobro da frequência do sinal em análise.	52
Figura 25	Frequência de amostragem igual a 16 vezes a frequência do sinal em análise.	53
Figura 26	Período de amostragem coincidente com um número inteiro de ciclos.	53
Figura 27	Período de amostragem não coincidente com um número inteiro de ciclos.	54
Figura 28	Período de amostragem não coincidente com um número inteiro de ciclos da harmônica de maior frequência.	54
Figura 29	Período de amostragem não coincidente com um número inteiro de ciclos da harmônica de maior frequência. Utilização da janela Hanning.	55
Figura 30	Amostragem de um sinal com uma janela Hanning em comparação com a janela retangular.	56
Figura 31	Exemplo do fenômeno das bordas.	57
Figura 32	Diagrama unifilar do sistema elétrico de distribuição da CPFL	61
Figura 33	Forma de onda de tensão, sem perturbações, medida na subestação do sistema elétrico de distribuição em estudo.	64
Figura 34	Representação de um afundamento de tensão de 25%.	66
Figura 35	Representação da elevação de tensão de 25%.	67
Figura 36	Caracterização das simulações do sistema para oscilações transitórias.	69
Figura 37	Diagrama de blocos da lógica computacional desenvolvida para detecção de distúrbios.	73
Figura 38	Diagnóstico do sinal.	76
Figura 39	Ondas do sinal original e do sinal analisado.	77
Figura 40	Análise do espectro da frequência do sinal analisado.	78
Figura 41	Barra de cores, segundo a frequência (Hz) característica.	78
Figura 42	Componentes da frequência.	79

Figura 43	Diagnóstico do sinal referente ao Caso 1, afundamento de tensão e ângulo de incidência de 0°.	83
Figura 44	Representação gráfica do Caso 1 - afundamento de tensão.	85
Figura 45	Diagnóstico do sinal referente ao Caso 3, afundamento de tensão e ângulo de incidência de 0°.	86
Figura 46	Representação gráfica do Caso 3 - afundamento de tensão.	88
Figura 47	Diagnóstico do sinal referente ao Caso 17 – interrupção de tensão.	91
Figura 48	Diagnóstico do sinal referente ao Caso 1, elevação de tensão e ângulo de incidência de 0°.	93
Figura 49	Representação gráfica do Caso1 – elevação de tensão.	95
Figura 50	Diagnóstico do sinal referente ao Caso 8, elevação de tensão e ângulo de incidência de 0°.	96
Figura 51	Representação gráfica do Caso 8 – elevação de tensão.	98
Figura 52	Diagnóstico do sinal referente ao Caso 1 – oscilação de tensão.	101
Figura 53	Representação gráfica do Caso1 – Oscilação de tensão.	103
Figura 54	Diagnóstico do sinal referente ao Caso 8 – oscilação de tensão.	104
Figura 55	Representação gráfica do Caso 8 – oscilação de tensão.	106
Figura 56	Representação gráfica do Caso 5 – oscilação de tensão, com frequência amostral de 769 Hz.	117
Figura 57	Representação gráfica do Caso 1 – Afundamento de tensão, com frequência amostral de 7,68 kHz.	120
Figura 58	Representação gráfica do Caso 1 – Afundamento de tensão, com frequência amostral de 769 Hz.	122
Figura 59	Representação gráfica do Caso 1 – Elevação de tensão, com frequência amostral de 7,68 kHz.	123
Figura 60	Representação gráfica do Caso 1 – Elevação de tensão, com frequência amostral de 769 Hz.	125
Figura 61	Representação gráfica do Caso 5 – Oscilação transitória, com frequência amostral de 7,68 kHz e medição no lado de baixa do Trafo T3 (200V).	127
Figura 62	Representação gráfica do Caso 5 – Oscilação transitória, com frequência amostral de 769 Hz e medição no lado de baixa do Trafo T3 (200V).	128

- Figura 63 Representação gráfica do Caso 7 – Oscilação transitória, com frequência amostral de 7,68 kHz e medição no lado de alta do Trafo (13,8 kV). 130
- Figura 64 Representação gráfica do Caso 7 – Oscilação transitória, com frequência amostral de 769 Hz e medição no lado de alta do Trafo (13,8 kV). 132

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Categorias e características típicas de fenômenos eletromagnéticos nos sistemas elétricos.	9
Tabela 2	Causa de falhas em computadores <i>USA – 1976</i> .	28
Tabela 3	Faixas de tensão consideradas na pesquisa.	32
Tabela 4	Frequência de ocorrência dos distúrbios de tensão, monitoradas nos diversos tipos de consumidores.	32
Tabela 5	Dados dos transformadores particulares.	62
Tabela 6	Dados dos transformadores de distribuição.	63
Tabela 7	Caracterização das simulações do sistema para afundamento de tensão.	65
Tabela 8	Caracterização das simulações do sistema para elevações de tensão.	67
Tabela 9	Caracterização das simulações do sistema para oscilações transitórias.	68
Tabela 10	Dados de referência para análise do distúrbio <i>IEEE Standard 1159-995</i> .	75
Tabela 11	Resultado das simulações do sistema para afundamento de tensão, para ângulo de incidência de falta de 0° .	89
Tabela 12	Resultado das simulações do sistema para afundamento de tensão, para ângulo de incidência de falta de 90° .	90
Tabela 13	Resultado das simulações do sistema para elevação de tensão, para ângulo de incidência de falta de 0° .	99
Tabela 14	Resultado das simulações do sistema para elevação de tensão, para ângulo de incidência de falta de 90° .	99
Tabela 15	Resultado das simulações do sistema para oscilações transitórias, realizadas pelo programa computacional desenvolvido.	107
Tabela 16	Resultado das simulações do sistema para afundamento de tensão, com ângulo de falta de 0° , porém com janela de $\frac{1}{2}$ ciclo.	108
Tabela 17	Resultado das simulações do sistema para afundamento de tensão, com ângulo de falta de 90° , porém com janela de $\frac{1}{2}$ ciclo.	109
Tabela 18	Resultado das simulações do sistema para elevação de tensão, com ângulo de falta de 0° , porém com janela de $\frac{1}{2}$ ciclo.	110

Tabela 19	Resultado das simulações do sistema para elevação de tensão, com ângulo de falta de 90° , porém com janela de $\frac{1}{2}$ ciclo.	110
Tabela 20	Resultado das simulações do sistema para oscilações transitórias, porém com tamanho da janela de $\frac{1}{2}$ ciclo.	111
Tabela 21	Resumo dos dados obtidos, para tamanhos da janela de 1 e $\frac{1}{2}$ ciclo.	112
Tabela 22	Resultado das simulações do sistema para afundamento de tensão, com ângulo de falta de 0° , porém com frequência amostral de 769 Hz.	113
Tabela 23	Resultado das simulações do sistema para afundamento de tensão, com ângulo de falta de 90° , porém com frequência amostral de 769 Hz.	114
Tabela 24	Resultado das simulações do sistema para elevação de tensão, com ângulo de falta de 0° , porém com frequência amostral de 769 Hz.	115
Tabela 25	Resultado das simulações do sistema para elevação de tensão, com ângulo de falta de 90° , porém com frequência amostral de 769 Hz.	115
Tabela 26	Resultado das simulações do sistema para oscilações transitórias, porém com frequência amostral de 769 Hz.	116
Tabela 27	Resumo dos dados obtido, para diferentes frequências amostradas.	118

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANEEL	– Agência Nacional de Energia Elétrica
ASD	– <i>Adjustable Speed Motor Drives</i>
AMR	– Análise com Múltiplas Resoluções
ANSI	– <i>American National Standard Institute</i>
ATP	– <i>Alternative Transients Program</i>
AWG	– <i>American Wire Gauge</i>
BC	– Banco de Capacitores
BMI	– <i>Basic Measuring Instrument</i>
CA	– Corrente Alternada
CBEMA	– <i>Computer and Business Equipment Manufacturers Association</i>
CC	– Corrente Contínua
CLP	– Controlador Lógico Programável
CPFL	– Cia Paulista de Força e Luz
CVT	– <i>Constant Voltage Transformers</i>
DC	– <i>Direct Current</i>
DEC	– Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
DFT	– Transformada Discreta de Fourier
DHT	– Distorção Harmônica Total
DIC	– Duração de Interrupção por Unidade Consumidora
DMIC	– Duração Máxima de Interrupção por Unidade Consumidora
DNAE	– Departamento Nacional de Águas e Energia
DNAEE	– Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica
EPRI	– <i>Electric Power Research Institute.</i>
FDT	– Função Distribuição de Tensão
FEC	– Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
FFT	– Transformada Rápida de Fourier
FIC	– Frequência de Interrupção por Unidade Consumidora
HI	– Harmônica Individual
IEEE	– <i>Institute of Electrical and Electronic Engineering</i>
ITIC	– <i>Information Technology Institute Council</i>

kV	– Quilo Volts
kVA	– Quilo Volt Ampere
kVAr	– Quilo Volt Ampere Reativo
MCM	– Mil Circular Mil
p.u.	– Por unidade
T	– Transformador de Distribuição
TC	– Transformador de Corrente
TP	– Transformador de Potencial
Tp	– Transformador Particular
USA	– <i>United States of America</i>
UPS	– <i>Uninterruptible Power Supply</i>
WFFT	– Transformada Rápida de Fourier Janelada

LISTA DE SÍMBOLOS

Ch	- Ponto de Chaveamento
$f(x)$	- Função em x
$\{f(x)\}$	- Seqüência da função $f(x)$
$F(w)$	- Transformada da função (w)
F_n	- Transformada de Fourier do harmônico de ordem n
$HI_{(i,v)}$	- Distorção harmônica individual da corrente e/ou tensão
N	- Número par e inteiro
t	- Variável tempo
$DHT_{(i,v)}$	- Distorção harmônica total da corrente e/ou tensão
x	- Variável correspondente a tempo ou espaço
w	- Índice que indica o uso da Transformada Janelada de Fourier
W_M	- Peso de Kernel
$\Delta\Omega$	- Resolução no domínio da frequência
ΔT	- Tempo entre as amostras de $f(t)$
$ $	- Módulo de uma função

SUMÁRIO

	Pag.
Resumo	vi
<i>Abstract</i>	vii
Lista de Figuras	viii
Lista de Tabelas	xii
Lista de siglas e abreviaturas	xiv
Lista de símbolos	xvi
Sumário	xvii
1 Apresentação do trabalho	01
2 Qualidade da Energia	03
2.1 Fenômenos que afetam a Qualidade da Energia	07
2.1.1 Transitórios	10
2.1.2 Variações na tensão de curta duração	11
2.1.2.1 Interrupção de curta duração	12
2.1.2.2 Afundamento de tensão	12
2.1.2.3 Elevação de tensão	16
2.1.3 Variações na tensão de longa duração	18
2.1.4 Desequilíbrio na tensão	18
2.1.5 Distorção na forma de onda da tensão	18
2.1.5.1 Nível CC	19
2.1.5.2 Harmônicos	19
2.1.5.3 Inter-harmônicos	22
2.1.5.4 <i>Notching</i>	22
2.1.5.5 Ruídos	23

2.1.6	Flutuação da tensão	24
2.1.7	Variações da frequência do sistema	25
2.2	Observações finais	25
3	Revisão bibliográfica	26
3.1	O interesse pela Qualidade da Energia	26
3.2	Ferramentas utilizadas no estudo da Qualidade da Energia	36
3.3	Comentários finais	38
4	Transformada de Fourier	40
4.1	História	40
4.2	Transformada Discreta de Fourier (DFT)	42
4.3	Transformada Rápida de Fourier (FFT)	44
4.4	Transformada Rápida de Fourier Janelada (WFFT)	47
4.5	Erros devidos à utilização da Transformada “Janelada” no tempo	51
4.5.1	Superposição (<i>Aliasing</i>)	51
4.5.2	Janela (<i>Windowing</i>)	53
4.5.3	Outros problemas no uso da Transformada Rápida de Fourier Janelada	56
4.6	Observações gerais	58
5	O sistema de distribuição analisado	59
5.1	Ferramentas ATP e MATLAB	60
5.2	Sistema de distribuição utilizado	60
5.3	Simulação dos distúrbios	64
5.3.1	Simulação da falta Fase-Terra	65
5.3.2	Simulação do chaveamento do banco de capacitores	68
5.4	Comentários gerais	69

6	A Transformada Rápida de Fourier Janelada, aplicada na classificação do distúrbio	71
6.1	A lógica computacional desenvolvida	72
6.2	Estrutura do programa	72
6.2.1	Entrada de dados	74
6.2.2	Análise no tempo	74
6.2.3	Análise na frequência	75
6.3	Resultados do programa	75
6.3.1	Visualização na tela	76
6.3.2	Visualização gráfica	77
6.4	Considerações sobre o programa	80
7	Análise da Qualidade da Energia para o sistema de distribuição considerado	81
7.1	Análise dos casos de afundamento de tensão	82
7.2	Análise dos casos de elevação de tensão	92
7.3	Análise dos casos de oscilações transitórias	100
7.4	Análise dos casos de afundamento e elevação de tensão e oscilações transitórias, porém com tamanho da janela de $\frac{1}{2}$ ciclo	107
7.5	Análise dos casos de afundamento de tensão, elevação de tensão e oscilações transitórias, variando a frequência de amostragem	112
7.6	Apresentação gráfica de alguns casos de afundamento e elevação de tensão e oscilação transitória, com as frequências amostrais estudadas	119
8	Conclusão final	133
	Referências bibliográficas	137
	Anexo I	141
	Anexo II	147

CAPÍTULO 1

Apresentação do Trabalho

O estudo dos fenômenos, que interferem na Qualidade da Energia, tem atraído cada vez mais pessoas interessadas em detectar e esclarecer estes distúrbios, que, de forma significativa, prejudicam o bom funcionamento dos equipamentos pertencentes a um dado sistema elétrico. Já é de conhecimento geral, que estes equipamentos possuem sistemas microprocessados, ou seja, são considerados equipamentos mais sensíveis e, portanto, susceptíveis a danos mais freqüentes em seus componentes, o que vem a ressaltar a importância da análise e do entendimento dos fenômenos relacionados à Qualidade da Energia.

O presente trabalho busca apresentar inicialmente, no Capítulo 2, um breve histórico do tema referente à Qualidade da Energia no Brasil, mostrando o surgimento das primeiras ações, com a criação de Comissões e Departamentos governamentais, cujo objetivo era e é o de buscar uma regulamentação e maior disciplina, junto às concessionárias fornecedoras de energia elétrica. Posteriormente, relacionamos uma série de fenômenos, podendo considerá-los como os mais importantes, e procuramos, em conformidade com as normas técnicas de reconhecimento internacional, classificá-los em relação ao tempo de duração e amplitude da forma de onda, e, também destacar suas principais características. Desta forma, apresentando estas definições, estes fenômenos poderão ser identificados mais facilmente no decorrer do trabalho.

O Capítulo 3 é constituído por uma revisão sobre o assunto, passando por uma variedade de artigos escritos por estudiosos, sobre Qualidade da Energia, bem como, de trabalhos apresentados em congressos nacionais e internacionais. Podemos, assim, verificar o destaque que é dado, desde há muito tempo, quanto à importância de se ter uma padronização dos termos utilizados, fato este atualmente já bastante difundido e utilizado por todos, inclusive no Brasil, com legislação pertinente ao assunto.

Conhecido um pouco da história da Qualidade da Energia, das definições dos fenômenos característicos deste estudo, e alguns trabalhos de pesquisadores deste tema, busca-se então uma ferramenta matemática específica, para implementar um algoritmo, que venha a localizar e identificar estes distúrbios, e que possa ser aplicada em um dado sistema de distribuição de energia elétrica. A ferramenta escolhida foi a Transformada de Fourier, que será detalhada no Capítulo 4.

O Capítulo 5 é dedicado à apresentação do sistema elétrico de distribuição, cedido pela empresa concessionária de energia elétrica CPFL (Companhia Paulista de Força e Luz), portanto um sistema real, para efetuarmos as simulações das situações que provocam os distúrbios na forma de onda de tensão, característicos no estudo da Qualidade da Energia.

E, finalmente, nos Capítulos 6 e 7, temos a apresentação do algoritmo, que se propõe a identificar os afundamentos de tensão, elevação de tensão e oscilações ocorridas no sistema, com a demonstração das formas de onda de tensão, referentes ao banco de dados obtido da simulação do sistema elétrico estudado, bem como as conclusões finais.

Também, faz parte deste trabalho as Referências bibliográficas, e anexos pertinentes ao estudo da Qualidade da Energia.

Desta forma, o trabalho foi dedicado ao tema Qualidade da Energia, buscando contribuir com os demais estudos existentes, no sentido de destacar os diversos tipos de fenômenos, e, também, apresentando mais uma opção de identificação do problema, mediante a aplicação do programa computacional desenvolvido.

CAPÍTULO 2

Qualidade da Energia

A preocupação com a Qualidade da Energia, no Brasil, inicia-se em 1920 com a criação de uma Comissão de Estudos de Forças Hidráulicas vinculada ao Ministério da Agricultura, Indústria e Comércio. Após diversas reformas e mudanças de nomenclaturas, surge em 1940, por Decreto Lei nº 6.402, a Divisão de Águas do Departamento Nacional da Produção Mineral. Posteriormente, a Lei nº 3.782, de 22 de julho de 1960, criou o Ministério das Minas e Energia, transformando a Divisão de Águas, em 1965, no Departamento Nacional de Águas e Energia – DNAE e alterando esta denominação para Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica – DNAEE em dezembro de 1968, pelo Decreto nº 63.951.

Faz-se necessário, todavia, para efeito de entendimento da evolução do órgão fiscalizador dos serviços de energia elétrica no País, mencionar o Conselho Nacional de Águas e Energia Elétrica – CNAEE, criado em maio de 1939, também com a finalidade de supervisão, fiscalização e controle dos serviços de eletricidade, sendo extinto somente em 1969, passando suas atribuições ao então DNAEE. A lei nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996, institui a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL com a finalidade de regular e fiscalizar a produção, transmissão e comercialização de energia elétrica, em conformidade com as políticas e diretrizes do Governo Federal. Constituída a Agência, com a publicação de seu Regimento Interno, fica, então, extinto o DNAEE [1].

Há três décadas atrás, as reclamações da “qualidade” do fornecimento de energia elétrica eram basicamente associadas às interrupções na tensão de alimentação dos consumidores. Para regulamentar as condições técnicas e a qualidade do serviço de energia elétrica, o DNAEE publicou as Portarias nº 046 e nº 047 de 17 de abril de 1978 e a Portaria nº 031 de 11 de abril de 1980, por considerar ser imprescindível a conceituação de serviço adequado de energia elétrica, bem como o estabelecimento de

um método uniforme para apuração dos índices de continuidade do suprimento elétrico [2].

A Qualidade da Energia Elétrica é um importante termo utilizado atualmente no setor elétrico, apresentando significados diferentes dependendo do tipo de usuário.

Para as empresas fornecedoras de energia elétrica, as concessionárias, a Qualidade da Energia é monitorada através de indicadores específicos de continuidade, denominados de DEC e FEC. O DEC, Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora, exprime o número de horas, que em média, um consumidor fica sem energia elétrica durante um período, geralmente mensal. Outro índice também utilizado é o FEC, Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora, que indica quantas vezes, em média, houve interrupção na unidade consumidora (residência, comércio, indústria, etc.). As metas de DEC e FEC, a serem observadas pelas concessionárias, estão definidas em Resolução específica da ANEEL. Até o momento, o processo de monitoração da qualidade do serviço oferecido pela concessionária baseou-se, principalmente, na coleta e no processamento dos dados de DEC e FEC, informados periodicamente pelas empresas à ANEEL. Agora, está em implantação o Sistema ANEEL de Monitoração da Qualidade da Energia Elétrica, que dará à Agência acesso direto e automático às informações sobre a qualidade do fornecimento, sem que dependa de dados encaminhados pelas empresas [1].

A ANEEL implantou no ano de 2000 mais três indicadores destinados a aferir esta qualidade prestada diretamente ao consumidor, sendo eles: DIC, FIC e DMIC. O DIC (Duração de Interrupção por Unidade Consumidora) e FIC (Frequência de Interrupção por Unidade Consumidora) indicam por quanto tempo e o número de vezes, respectivamente, que uma unidade consumidora ficou sem energia elétrica durante um período considerado. O DMIC (Duração Máxima de Interrupção por Unidade Consumidora) é um indicador que limita o tempo máximo de cada interrupção, impedindo que a concessionária deixe o consumidor sem energia elétrica durante um período muito longo [1].

As metas para os indicadores DIC, FIC e DMIC estão publicadas na Resolução ANEEL n.º 024 de 27 de janeiro de 2000, sendo informados na conta de energia elétrica do consumidor as metas do DIC e FIC.

Já para os fabricantes de equipamentos, a expressão Qualidade da Energia pode ser definida como sendo as características do fornecimento de energia que atendam aos requisitos necessários para que seus equipamentos operem satisfatoriamente [1,2].

Ao consumidor final interessa apenas o uso contínuo e eficiente do produto/serviço energia elétrica.

O cuidado com Qualidade da Energia é um tema que tem sido discutido e analisado não só no Brasil. 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% dos casos, de duração inferior a 200 milissegundos [3]. A maioria dos cortes é quase imperceptível para certos tipos de receptores e inofensivos para muitos outros. Tais cortes são suficientes e responsáveis por causar grandes danos em cargas mais sensíveis. Sabe-se que uma interrupção de curta duração pode causar danos gravíssimos aos consumidores, como desprogramar toda uma linha de montagem com custos elevados para se restaurar o sistema. As conseqüências destes problemas para as indústrias e consumidores em geral, envolvem grandes valores econômicos. Como exemplo, temos: cinco interrupções em uma indústria de vidro equivalem a perdas no valor de US\$ 200.000,00; dois segundos sem energia em um centro de computação tem custo aproximado de US\$ 600.000,00. Problemas relacionados com a Qualidade da Energia, nos Estados Unidos, induzem a prejuízos da ordem de US\$ 13,3 bilhões de dólares por ano [4].

O setor de energia elétrica encontra-se, atualmente, passando por profundas mudanças devido a um considerável número de fatores. Dentre estas mudanças, algumas das que mais interessam à Qualidade da Energia dizem respeito à alteração da natureza das cargas consumidoras com o aumento significativo das cargas mais sensíveis (dispositivos eletrônicos), a proliferação de auto produtores de energia elétrica, o aparecimento de novas tecnologias de geração e, ainda, o peso crescente das questões ambientais.

Estima-se que, em 2003, cerca de 60% de toda energia elétrica produzida foi consumida por cargas não lineares, destacando-se que nos setores de serviços este valor está atualmente muito próximo dos 100% [3].

Os problemas relacionados com a Qualidade da Energia existem, hoje, devido à incompatibilidade entre certas cargas ditas “especiais” ou mais “sensíveis” e o fornecimento típico de energia por parte das concessionárias. Computadores, equipamentos eletrônicos, terminais de dados, entre outros, são particularmente vulneráveis a distúrbios transitórios e ou interrupções de curtíssima duração. A Figura 1 ilustra um conjunto de curvas, representando a capacidade de resistência dos computadores, em relação à intensidade e à duração de distúrbios na tensão de

alimentação, elaborada pela ITI (*Information Technology Institute Council*), que desde 1994 substituiu a CBEMA (*Computer and Business Equipment Manufacturers Association*), associações estas que representam os fabricantes de equipamentos de alta tecnologia [5].

Hoje em dia, as fontes dos computadores têm suportabilidade maior que a determinada pela CBEMA original (1977) levando, portanto, a sua revisão em 2000. Cabe ressaltar, que a curva CBEMA se tornou um padrão bastante utilizado no projeto das redes de alimentação para cargas sensíveis [5,6].

Figura 1: Tolerâncias típicas de tensão para computadores (curva ITI revisada em 2000).

O espaço delimitado entre as duas curvas, associado à letra “A”, região de imunidade, e destacado em cinza na Figura 1, representa os limites de tensão que um computador típico pode resistir, sem sofrer danos. A área associada à letra “B”, região proibida, representa a faixa de operação em que vários computadores se tornam susceptíveis a problemas de variação da tensão, com possibilidade de ruptura de isolamento dos equipamentos (perda de *hardware*), devido à ocorrência de sobretensões transitórias e elevação de tensão. E, finalmente, a região associada à letra “C”, região de sensibilidade, representa uma região com possibilidade de parada de operação dos equipamentos, em virtude da ocorrência de afundamentos de tensão, juntamente com as interrupções momentâneas [5,6].

Podemos agora definir a energia elétrica de boa qualidade como aquela que garante o funcionamento contínuo, seguro e adequado dos equipamentos elétricos e processos associados, sem afetar o meio ambiente e o bem estar das pessoas [2].

Diante deste cenário, é importante conhecer cada fenômeno que afeta a Qualidade da Energia em um sistema elétrico, para que possamos identificá-los e assim elaborar projetos, de modo a atenuar ou mesmo eliminar estes problemas.

2.1 Fenômenos que afetam a Qualidade da Energia

O termo Qualidade da Energia refere-se a uma ampla variedade de fenômenos eletromagnéticos que influenciam as formas de onda de tensão e corrente, em um dado tempo e local, em um sistema elétrico de potência.

A Figura 2 identifica, de uma forma geral, uma série de perturbações na forma de onda de tensão, tais como afundamento de tensão, elevação de tensão, interrupções da tensão, distorções harmônicas, transitórios, entre outras, que serão objeto de estudo mais detalhado neste capítulo.

As denominações e definições para cada evento serão aquelas utilizadas pelo *IEEE - Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality* [7], cuja norma foi editada pelo *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*, com o objetivo de facilitar a comunicação entre os diversos pesquisadores da área de Qualidade da Energia.

Figura 2: Alguns dos distúrbios típicos que ocorrem na forma de onda da tensão.

Uma forma de apresentação destes fenômenos indicadores de Qualidade da Energia é classificá-los em categorias, conforme seu tempo típico de duração e intensidade padrão. A Tabela 1, extraída da referência [7], nos dá uma visão global dos eventos a serem analisados com suas características e valores típicos. Nesta tabela, os fenômenos estão subdivididos em categorias, ou seja, em fenômenos transitórios (impulsivos e oscilatórios), de curta duração (instantânea, momentânea e temporária), de longa duração (interrupção sustentada, subtensão sustentada e sobretensão sustentada), desequilíbrios de tensão, quanto à distorção da forma de onda, quanto à flutuação de tensão e, finalmente, referente às variações da frequência do sistema.

Tabela 1 - Categorias e características típicas de fenômenos eletromagnéticos nos sistemas elétricos [7].

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	0,3 - 50 ms	0 - 4 pu
1.2.2 - Média Frequência	5 – 500 kHz	20 μ s	0 - 8 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 - Interrupção		0.5 - 30 ciclos	< 0.1 pu
2.1.2 – Afundamento de tensão		0.5 - 30 ciclos	0,1 – 0,9 pu
2.1.3 – Elevação de tensão		0.5 - 30 ciclos	1,1 – 1,8 pu
2.2 - Momentânea			
2.2.1 - Interrupção		30 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 - Sobreensão 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 ^a harmônica	regime permanente	0 – 20%
5.3 – Inter-harmônicos	0 - 6 kHz	regime permanente	0 – 2%
5.4 - Notching		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

Transitórios eletromagnéticos são as manifestações elétricas locais ou nas adjacências, oriundas de alterações súbitas nas condições operacionais de um sistema de energia elétrica, e geralmente de duração muito pequena.

Os fenômenos transitórios podem ser classificados em dois grupos, os chamados transitórios impulsivos e oscilatórios.

Os transitórios impulsivos têm como característica básica um tempo de subida e descida do impulso extremamente rápido como, por exemplo, uma variação de zero a um valor de pico de 2.000 Volts em apenas 1,2 μ s. A Figura 3 apresenta a curva característica de um efeito transitório impulsivo, causado por descarga atmosférica. Nota-se que em, aproximadamente, 2 μ s a corrente alcança valores da ordem de 23 kA [7,8].

Figura 3 - Corrente transitória impulsiva oriunda de uma descarga atmosférica.

Já o transitório oscilatório, tem como causa principal a alteração repentina nas condições de regime permanente da tensão e ou corrente, possuindo valores de polaridade negativa e positiva. Os transitórios oscilatórios são decorrentes de energização de linhas, corte de corrente indutiva, eliminação de faltas, chaveamento de bancos de capacitores, transformadores, entre outros [7,8].

Como ilustração, na Figura 4, a curva caracteriza uma situação de oscilação transitória devido ao fenômeno da ferroressonância, associado à energização de transformadores.

Figura 4 - Transitório oscilatório de baixa frequência, causado pelo fenômeno da ferroressonância em um transformador em vazio.

2.1.2 Variações na tensão de curta duração

As variações de curta duração ocorrem quando a tensão de suprimento sofre variações na sua amplitude, conforme valores apresentados na Tabela 1, por um período de tempo não superior a 1 minuto. Estas variações de curta duração são subdivididas, para melhor análise, em variações instantâneas de tensão, quando a duração do efeito é menor que 30 ciclos, variações momentâneas de tensão, quando a duração do efeito está entre 30 ciclos e 3 segundos e, finalmente, variações temporárias quando a duração do efeito está entre 3 segundos e 1 minuto [7,8].

Dentre as variações de curta duração encontramos situações que são muito importantes para análise dos problemas da Qualidade da Energia, a saber: interrupção de curta duração, afundamento de tensão e elevação de tensão.

2.1.2.1 Interrupção de curta duração

As interrupções são causadas por falha no sistema de energia, falhas de equipamentos ou mau funcionamento dos sistemas de controle. Normalmente, são classificadas por seu tempo de duração e pela diminuição da tensão de suprimento para um valor abaixo de 10% do seu valor nominal. Podemos ainda, classificar estas interrupções em momentâneas e temporárias.

Uma interrupção de curta duração é dita momentânea quando ocorre por um período de tempo entre 30 ciclos e 3 segundos. Já em uma interrupção de curta duração do tipo temporária, o período de duração está compreendido entre 3 segundos e 1 minuto [7,8].

2.1.2.2 Afundamento de tensão

O afundamento de tensão é caracterizado por uma redução no valor eficaz da tensão de 0,1 a 0,9 pu, com duração entre 30 ciclos e 3 segundos, para variações de curta duração do tipo momentânea, e com duração de 3 segundos a 1 minuto, para variações de curta duração do tipo temporária [7,8].

O afundamento de tensão é considerado um dos mais importantes problemas relacionados com a Qualidade da Energia, tendo em vista, a grande quantidade de equipamentos eletrônicos existentes em um sistema, como os computadores, controladores lógicos programáveis, controladores de velocidade, robôs, enfim, cargas/equipamentos muito sensíveis às variações da tensão.

É importante distinguir entre uma interrupção de tensão e um afundamento de tensão. A interrupção de tensão, geralmente, ocorre, quando um equipamento de proteção interrompe um dado circuito, principalmente devido a uma falta ou curto circuito no sistema. Já o afundamento de tensão, dentre outras causas, pode ser caracterizado no período de tempo entre o início de uma falta e a operação do dispositivo de proteção do sistema [9].

A Figura 5, retirada da referência [7], mostra uma interrupção momentânea devido a um curto circuito, sendo precedida por um afundamento de tensão. Pode-se notar a diminuição da tensão (20%) e em seguida, a perda total do suprimento durante 1,8 segundo.

Faltas em circuitos alimentadores paralelos podem causar afundamento de tensão e não necessariamente causar uma interrupção do sistema. Afundamento de tensão é um fenômeno que ocorre com maior frequência do que as interrupções, e, devido à considerável quantidade de equipamentos eletrônicos sensíveis a estas variações de tensão instalados no sistema, a probabilidade de danos nestes equipamentos é maior.

Figura 5 - Interrupção momentânea, devido a um curto-circuito e subsequente religamento.

O afundamento de tensão é, normalmente causado, pela ocorrência de curto-circuito em um ponto próximo onde se localiza uma determinada carga sensível. Porém as faltas devido a descargas atmosféricas, também, podem ocasionar este fenômeno, bastante prejudicial a estas cargas.

O conceito de área de vulnerabilidade tem sido utilizado para auxiliar na avaliação dos pontos que estão sujeitos a afundamentos de tensão. A Figura 6 apresenta uma delimitação de áreas vulneráveis para uma determinada carga industrial, suprida por um dado sistema de transmissão, mostrando assim as distâncias críticas entre uma falta e os equipamentos eletrônicos sensíveis (carga) que realmente podem vir a danificar-se. Ainda com relação à Figura 6, podemos notar que a área de vulnerabilidade é dependente da sensibilidade do equipamento, ou seja, os contadores do

painel/circuito de comando e ou proteção dos motores, têm uma área de vulnerabilidade menor que os equipamentos eletrônicos, por exemplo, ou cargas mais sensíveis presentes naquela indústria em particular [8,9].

Figura 6 – Áreas de vulnerabilidade de um sistema de transmissão para uma determinada carga.

Diferentes categorias de equipamentos, muitas vezes provindos de diversos fabricantes apresentam diferenças significativas de sensibilidade para suportar um determinado nível de afundamento de tensão, ficando difícil a determinação de um nível de resistência padrão, para estas variações, a fim de garantir a segurança dos equipamentos industriais.

O documento mais próximo deste objetivo é a curva de tolerância ITI-CBEMA 2000, mostrada na Figura 1, que sugere um limite padrão de sensibilidade ao fenômeno de afundamento de tensão para os computadores.

Porém, fabricantes de outros equipamentos também apresentam suas curvas de sensibilidade a afundamentos de tensão, como por exemplo, um fabricante de relés e contadores ao informar que seu equipamento sofrerá danos a partir do decréscimo de 50% da tensão. Se a tensão persistir por mais de 1 ciclo, o sistema de controle de velocidade de motores (*Adjustable Speed Motor Drives – ASD*) e os controladores lógicos programáveis (CLP) poderão sofrer problemas, dependendo do fabricante, com 90% de subtenção de curta duração por 50 ms.

A Figura 7 apresenta a faixa de sensibilidade de alguns equipamentos para afundamentos de tensão [9].

Figura 7 – Faixa de sensibilidade dos equipamentos sujeitos à afundamento de tensão.

A interrupção de um processo industrial, devido a afundamentos de tensão, pode resultar em elevados custos para o consumidor, sendo, portanto, necessária a tomada de providências, no sentido de minimizar estes efeitos.

Tais medidas podem ser [8]:

- ❖ Utilização de transformadores ferroressonantes, (*CVT – Constant Voltage Transformers*), que são transformadores de relação de transformação 1:1, altamente excitados em suas curvas de saturação, fornecendo assim uma tensão de saída que não é significativamente afetada pelas variações da tensão de entrada. O esquema típico de um transformador ferroressonante é mostrado na Figura 8, a seguir.

Figura 8: Transformador ferroressonante.

- ❖ Utilização de *UPS (Uninterruptible Power Supply)* na linha a ser protegida, de forma que na ocorrência de perturbações o sistema passa a ser alimentado pela *UPS*.
- ❖ Utilização de conjuntos motor-gerador.
- ❖ Utilização de métodos de partidas de motores, a fim de suavizar as variações de tensão, tais como: partidas suaves (*soft started*), autotransformadores, partida estrela-triângulo, entre outros.
- ❖ Adotar medidas junto às concessionárias de energia, no sentido de diminuir ou prever as manobras entre os alimentadores, conhecer os dispositivos de segurança utilizados (relés de proteção), solicitar medidas preventivas de falta fase-terra (podas de árvores, manutenção em isoladores), etc.

2.1.2.3 Elevação de tensão

A elevação de tensão é caracterizada por uma elevação no valor eficaz da tensão entre 1,1 e 1,4 p.u., com duração entre 30 ciclos e 3 segundos para variações de curta duração do tipo momentânea, e elevação no valor eficaz da tensão entre 1,1 e 1,2 p.u., com duração entre 3 segundos e 1 minuto para variações de curta duração do tipo temporária [7,8].

Assim como o afundamento de tensão, a elevação de tensão está normalmente associada com as condições de falta no sistema, principalmente no que diz respeito à falta Fase-Terra, onde os níveis de tensão se elevam, consideravelmente [7,8].

A Figura 9 ilustra uma elevação de tensão, causada por uma falta Fase-Terra. Este fenômeno pode, também, estar associado à saída de grandes blocos de cargas ou à energização de grandes bancos de capacitores [8].

Figura 9: Elevação de tensão, devido a uma falta Fase-Terra.

Mais uma vez a preocupação com danos em equipamentos recai, principalmente, sobre os equipamentos eletrônicos, que podem sofrer sérios danos de operação, até a sua inutilização completa. Contudo, cabos, transformadores, barramentos, dispositivos de chaveamento, Transformador de Potencial (TP), Transformador de Corrente (TC) e máquinas rotativas, entre outros, podem ter sua vida útil reduzida. Vale ressaltar que a suportabilidade de um equipamento não depende apenas da magnitude da elevação da tensão, mas também do seu tempo de duração [7,8].

2.1.3 Variações na tensão de longa duração

As variações na tensão de longa duração ocorrem quando são apresentados desvios no valor eficaz da tensão, com duração superior a 1 minuto.

A variação de longa duração também pode ser subdividida em interrupção sustentada, onde a tensão de suprimento de um dado sistema cai a zero por um período superior a 1 minuto, subtensão sustentada, caracterizada por um decréscimo no valor eficaz da tensão a valores menores que 0,9 p.u., por um período de tempo maior que 1 minuto, e sobretensão sustentada, cuja característica é o aumento do valor da tensão eficaz acima de 1,1 p.u. por períodos superiores a 1 minuto [7,8].

2.1.4 Desequilíbrio na tensão

Os desequilíbrios na tensão podem ser definidos como o desvio máximo da média das correntes ou tensões trifásicas, dividido pela média das correntes ou tensões trifásicas, expresso em porcentagem. Mas podem ser, também, caracterizados como a relação entre a componente de seqüência zero ou negativa pela componente de seqüência positiva. A existência da componente de seqüência zero ou negativa da tensão em um sistema de potência, geralmente, é resultado de uma carga desbalanceada.

Por exemplo, com tensões entre fases de 230 V, 232 V e 225 V, a média é 229 V. O desvio máximo entre a média e as três leituras é 4 (quatro). Sendo assim, o percentual de desequilíbrio neste caso é de $100 \times (4/229) = 1,7\%$. Para valores superiores a 5% considera-se que o sistema possui graves desequilíbrios [7,8].

2.1.5 Distorção na forma de onda da tensão

É definido como um desvio em regime permanente da forma de onda puramente senoidal na frequência fundamental, e caracterizada principalmente pelo seu conteúdo espectral. Os principais tipos de distorção de forma de onda são: Nível CC, Harmônicos, Inter-harmônicos, *Notching* e Ruídos [7,8].

2.1.5.1 Nível CC

A presença de tensão ou corrente CC em um sistema CA é denominado *DC offset*. Este fenômeno pode ocorrer como resultado da operação de retificadores de meia-onda. O aparecimento de nível CC em sistemas CA pode ser devido ao aumento de saturação de transformadores, resultando em perdas adicionais e redução da sua vida útil [7,8].

2.1.5.2 Harmônicos

Harmônicas são tensões ou correntes senoidais de frequências múltiplas inteiras, da frequência fundamental, na qual opera o sistema de energia elétrica. Estes harmônicos distorcem formas de onda da tensão e corrente e são oriundos de equipamentos e cargas com características não lineares, instalados no sistema de energia.

Como exemplo temos a Figura 10, onde se percebe as distorções na forma de onda da tensão.

Figura 10: Forma de distorção harmônica.

Para a quantificação do grau de distorção presente na corrente, e/ou tensão, utiliza-se a ferramenta matemática conhecida por série de Fourier.

Há duas maneiras básicas de se obter a Transformada de Fourier de uma forma de onda de corrente ou tensão. Uma maneira é utilizar um analisador de espectro e medir os harmônicos diretamente no sistema. O espectro é a distribuição das amplitudes

das várias harmônicas em função do seu número harmônico, freqüentemente ilustrado na forma de um histograma [10].

A Figura 11 apresenta uma forma de onda com componentes harmônicos e seu respectivo histograma, onde se notam à esquerda a onda de tensão no domínio do tempo com interferências harmônicas e à direita a série de Fourier da tensão com amplitude das harmônicas em % da tensão de linha, com a componente do 3º harmônico em destaque.

Figura 11: Forma de onda com componentes harmônicos.

Outro método é analisar uma amostragem de dados contidos numa janela temporal de observação (*time window*) e aplicar a Transformada Discreta de Fourier [10,11], dada pela equação:

$$F_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} f_k e^{-j2\pi kn/N} \quad (1)$$

Onde:

- F_n Transformada de Fourier do harmônico de ordem n ;
- f_k função periódica;
- N período da função / número de amostras;
- n ordem da componente harmônica;
- k ordem da função periódica.

As relações de harmônicas individuais (HI) e a distorção harmônica total (DHT) quantificam as perturbações harmônicas presentes numa rede de alimentação de energia.

A relação de harmônica individual (HI), ou porcentagem harmônica, expressa a magnitude de cada harmônica em relação à fundamental. E a distorção harmônica total (DHT) é a relação entre o valor eficaz de todas as harmônicas em relação à harmônica fundamental, sendo expressa por:

$$HI_{(i,v)} = \frac{|F_n|}{|F_1|} \quad (2)$$

$$DHT_{(i,v)} = \frac{1}{|F_1|} \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} |F_n|^2} \quad (3)$$

Onde:

F_n	Transformada de Fourier do harmônico de ordem n ;
$DHT_{(i,v)}$	Distorção harmônica total da tensão e/ou corrente;
$HI_{(i,v)}$	Distorção harmônica individual da tensão e/ou corrente.

Correntes e tensões harmônicas, sobrepostas na fundamental, produzem efeitos combinados em equipamentos e dispositivos ligados à rede de alimentação. Estes efeitos danosos dependem do tipo de carga e se dividem em efeitos instantâneos e efeitos de longo prazo, devido ao aquecimento em cabos, equipamentos, etc. [10,11].

Os efeitos instantâneos ocorrem:

- ❖ No chaveamento de tiristores, devido ao deslocamento do ponto de passagem por zero da onda de tensão, em receptores de *ripple control*;
- ❖ Devido à presença dos relés utilizados por companhias elétricas para controle remoto centralizado, levando ao aparecimento de vibrações e ruídos produzidos pelas forças eletrodinâmicas associadas às correntes harmônicas que ocorrem em dispositivos eletromagnéticos (transformadores, reatores, etc.);

- ❖ Interferência em circuitos de comunicação e controle (telefonia, controle e supervisão).

Além da fadiga mecânica causada pelas vibrações é o aquecimento nos cabos e equipamentos, que constitui o principal efeito de longo prazo. As perdas que causam aquecimento são decorrentes de dois fenômenos: a condução e histerese dielétrica [10,11].

Como fonte de harmônicas temos os conversores estáticos, fornos a arco, sistemas de iluminação, reatores saturados, máquinas rotativas, entre outros.

Para reduzir ou eliminar os efeitos harmônicos, utiliza-se a instalação no sistema de filtros passivos (construído basicamente dos componentes R-L-C), filtros ativos (tem a função de gerar e injetar correntes harmônicas com defasagem oposta àquelas produzidas pela carga não linear), componentes eletromagnéticos e moduladores de CC [10].

2.1.5.3 Inter-harmônicos

O efeito inter-harmônico pode ser encontrado em redes elétricas de todas as classes de tensão. Inter-harmônicos são componentes de frequência, em tensão ou corrente, que não são múltiplos inteiros da frequência fundamental do sistema supridor (50 ou 60 Hz). As suas principais fontes são conversores estáticos de potência, cicloconversores, motores de indução e equipamentos a arco. Os efeitos dos inter-harmônicos não são bem conhecidos, mas admite-se que os mesmos podem afetar a transmissão de sinais *carrier* e induzir oscilação visual no visor de equipamentos como tubos de raios catódicos [7,8].

2.1.5.4 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. Durante este período há um momentâneo curto circuito entre as duas fases.

As componentes de frequência associados aos *notching* são de alto valor, o que impede a utilização de equipamentos normalmente utilizados para análise harmônica. A Figura 12 mostra uma curva característica com a presença de *notching* [7,8].

Figura 12: Exemplo de “notching” causado por operação de conversor.

2.1.5.5 Ruídos

Ruído é definido como um sinal elétrico indesejado que não pode ser classificado como distorção harmônica ou transitório. Contém uma larga faixa espectral com frequências menores que 200 kHz, as quais são superpostas às tensões ou correntes de fase, e também podem ser encontrados em condutores de neutro.

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.

A faixa de frequência e o nível de amplitude dependem da fonte que produz o ruído. A amplitude típica é menor que 1% da tensão fundamental, e pode causar distúrbios em equipamentos eletrônicos como microcomputadores e controladores programáveis. Minimiza-se o problema utilizando filtros, transformadores isoladores e alguns condicionadores de linha [7,8].

2.1.6 Flutuação da tensão

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

Estes distúrbios podem até se situar dentro dos limites normais de tensão, porém produzem desagradáveis variações na iluminação ou distúrbios na operação de equipamentos sensíveis em razão das variações rápidas da tensão.

As flutuações de tensão são alterações aleatórias ou cíclicas de tensão, resultante de chaveamentos ou variações de cargas muito grandes, quando comparadas à capacidade de curto circuito no local.

Dentre os principais efeitos nos sistemas elétricos, resultados destas flutuações de tensão, podemos citar as oscilações de potência e torque das máquinas elétricas, queda de rendimento dos equipamentos elétricos, interferência nos sistemas de proteção e o efeito *flicker*.

Entretanto, o fenômeno *flicker*, ou cintilação luminosa, mostrado na Figura 13, consiste no efeito mais comum provocado pelas oscilações de tensão, uma vez que o desconforto visual associado à perceptibilidade do olho humano às variações da intensidade luminosa é, em toda sua extensão, indesejável.

Figura 13: *Flicker* ou cintilação luminosa.

As principais fontes de flutuações de tensão e *flicker* são cargas industriais como, por exemplo, máquinas de soldar, laminadores, fornos a arco e unidades de solda a arco. As variações rápidas de tensão, também, podem ocorrer quando do chaveamento de bancos de capacitores [7,8].

2.1.7 Variações da frequência do sistema

A frequência de um sistema elétrico está diretamente relacionada com a velocidade de rotação do gerador de energia deste sistema. A todo o momento a frequência depende do balanceamento da carga e capacidade da disponibilidade de geração. Variações na frequência de um sistema elétrico são definidas como sendo desvios no valor da frequência fundamental deste sistema (50 ou 60 Hz). Pequenas variações de frequência podem ser observadas como resultado do balanço dinâmico entre carga e geração, variações estas na faixa de $60 \pm 0,5$ Hz.

Quando ocorrem variações neste equilíbrio dinâmico, a frequência, igualmente, sofre pequenas variações. Contudo, a amplitude da variação e sua duração dependem das características da carga e da resposta do regulador de velocidade de geração.

Variações da frequência do sistema que ultrapassam os limites para operação normal em regime permanente (60Hz), podem ser causados por faltas em sistemas de transmissão, pela saída de um considerável bloco de cargas ou saída de operação de uma fonte geradora [7,8].

2.2 Observações finais

Neste capítulo, iniciamos com um breve histórico da Qualidade da Energia no Brasil, apresentando os nomes e datas de criação de diversos órgãos reguladores, bem como alguns tipos de indicadores de qualidade utilizados pelas distribuidoras de energia elétrica no país.

Em seguida, foram apresentadas algumas definições sobre o tema Qualidade da Energia, relatando os fenômenos mais importantes ocorridos nos sistemas elétricos, e que podem afetar a qualidade do fornecimento de energia.

Conhecida estas definições, passaremos ao levantamento bibliográfico, passando por alguns dos trabalhos referentes ao tema Qualidade da Energia, com ênfase na padronização de termos e definições em geral.

CAPÍTULO 3

Revisão Bibliográfica

Qualidade da Energia é, atualmente, um dos tópicos de grande importância em todos os segmentos da engenharia elétrica, quer seja na geração, transmissão e distribuição de energia. Em todos os segmentos, os fenômenos a serem analisados praticamente são os mesmos, ou seja, queda de tensão, sobretensão, transitórios, distorções harmônicas, entre outros.

É de conhecimento geral a grande quantidade e o crescimento da utilização de equipamentos eletrônicos em todos os segmentos, e, portanto, da necessidade de uma maior uniformidade nos sistemas de alimentação destes equipamentos e, conseqüentemente, o fornecimento de energia com melhor qualidade.

Diante dos fatos, é primordial que se detecte as falhas que prejudicam o sistema e de uma forma prática, que se façam análises para proceder a prevenção. Apresentaremos trabalhos selecionados em ordem cronológica, que demonstram a preocupação, já há muito tempo, com a uniformização dos modos de medição, nomenclaturas e tipos de fenômenos que são mais relevantes para uma análise, e assim podermos classificar o nível de qualidade de um dado sistema.

3.1 O interesse pela Qualidade da Energia

Estudos de Qualidade da Energia, mesmo que não destacados claramente, sempre estiveram presentes quando da necessidade de se conectar equipamentos a um dado sistema. O trabalho desenvolvido por François D. Martzloff e Thomas M. Gruzis [12], no final de 1988, já demonstrava a preocupação de se padronizar as ações e métodos para um melhor entendimento dos resultados obtidos, bem como a troca de

informações por pesquisadores da área de qualidade. Nesta pesquisa são apresentados fatos, ficção e enganos relativos a conclusões, que são muitas vezes fruto de análises precipitadas. Os problemas apresentados são muitas vezes ocasionados pela forma incorreta de instalação dos equipamentos utilizados por um consumidor, ou também erros na escolha do tipo e local de medição dos distúrbios, levando assim à análise de dados, também, incorretos. Como exemplo, os autores citam fatos que demonstram a tendência de justificar problemas em máquinas/computadores de um determinado usuário como se o problema fosse da alimentação do sistema e, após estudos mais cuidadosos, verifica-se que, na realidade, os problemas foram decorrentes de um aterramento imperfeito e da operação incorreta dos próprios usuários daqueles equipamentos. Neste período, estes autores também perceberam a confusão acerca das definições dos termos determinantes do nível de qualidade, onde não havendo qualquer padronização, os efeitos, por exemplo, de sobretensão, foram confundidos com elevação de tensão (*voltage swell*) ou mesmo impulsos, já que as diferenças que hoje são definidas pelos tempos de ocorrência destes fenômenos não estavam ainda bem esclarecidas. Surgiram, então, termos que atualmente, estão melhores definidos como afundamento de tensão (*voltage sag*), elevação de tensão (*voltage swell*), fenômenos transitórios, entre outros. Historicamente, os problemas de sobretensão eram apontados como os mais freqüentes e danosos, principalmente devido às descargas atmosféricas. Porém, com estudos mais cuidadosos foi detectado, por estes mesmos pesquisadores, que os computadores sofriam danos, principalmente, devido a afundamento de tensão, considerado por diversos estudiosos no assunto como um dos mais importantes itens determinante da Qualidade da Energia. A seguir, apresentamos a Tabela 2, retirada da referência [12], que identifica os motivos que ocasionaram alterações na forma de onda de tensão, que tiveram, como consequência, danos ocorridos nos computadores, no ano de 1976, nos Estados Unidos. Na primeira coluna da Tabela 2, são apresentadas as causas mais comuns que foram responsáveis pelas perturbações na forma de onda de tensão, ou seja, fenômenos da natureza (ventos e raios), falhas nos equipamentos do sistema elétrico de transmissão/distribuição, acidentes que causaram danos nas estruturas de sustentação das linhas de transmissão, falhas, devido a curto-circuito provocados por animais e/ou galhos de árvores, entre outros. Na segunda coluna, estão as quantidades, em porcentagem, de computadores danificados, devido aos problemas acima destacados, e, a última coluna, subdividida para cada tipo de causa identificada, ressalta o tipo de distúrbio característico, ou seja, se foi afundamento de tensão ou

elevação de tensão. Fica claro, ao observarmos esta tabela, a influência dos efeitos de afundamento de tensão como o maior causador de problemas nos computadores naquela região.

Tabela 2: Causa de falhas em computadores - USA – 1976.

Possíveis causas dos distúrbios no sistema elétrico	Porcentagem de computadores danificados	Distúrbios	
		Afundamento de tensão	Elevação de tensão
Intempéries (ventos e raios)	51 %	37	14
Falhas dos equipamentos do sistema elétrico	8 %	8	0
Acidentes com as estruturas de transmissão	10 %	8	2
Animais	6 %	5	1
Galhos de árvores	2 %	1	1
Causas desconhecidas	23 %	21	2
	100%	80%	20%

Outra contribuição importante e interessante do trabalho apresentado na referência [12], foi a comparação dos dados obtidos por nove pesquisadores, referente a problemas de Qualidade da Energia, iniciado no ano de 1962, ainda com a utilização de medidores de tensão do tipo a vácuo, até o ano de 1984, onde já se utilizam de equipamentos de medições com tecnologias mais modernas. As conclusões foram bastante importantes, já que estudos diferentes mostraram que 62% dos problemas de Qualidade da Energia estão relacionados a afundamentos de tensão, 21% devido a impulsos mais severos, 17% devido a elevações de tensão ou ainda, surtos de tensão, itens estes não bem definidos pelos autores quanto às suas diferenças. Por fim, os autores concluíram a real necessidade da padronização de termos e metodologias de medição dos diversos tipos de distúrbios, para uma análise mais precisa e conclusiva da situação de um sistema elétrico.

Wilson E. Kazibwe, et al. [13] alertam para o crescente número de computadores instalados em consumidores residenciais. Salientam, ainda, que os estudos de Qualidade

da Energia se concentram em grande parte nas áreas industriais, sendo necessário e importante a definição de padrões dos valores e termos utilizados pelos estudiosos da área de qualidade. Por exemplo, o termo variação de tensão possui diferentes denominações (*sag*, *dip*, *overvoltage*, *outage*, *surge*, etc.), e a padronização viria facilitar o entendimento entre fabricantes e consumidores, necessidade esta já apresentada em 1990, data de seu artigo. Acreditam, também, que com isso, pode-se aumentar a procura por equipamentos de proteção para aparelhos eletrônicos, tanto para uso nas residências, comércio, como nas indústrias, tendo como resposta direta a proteção adequada de cargas mais sensíveis, e a diminuição dos custos de produção. Os autores crêem que o aumento da informação sobre os tipos de perturbações que estão sujeitos a cargas mais sensíveis implicará em ações que visam reduzir ou eliminar estes problemas, o que causaria a melhoria do sistema como um todo, pois haveria diminuição de perturbações na rede em geral.

Um fato importante destacado por G. T. Heydt, et al. [14] em seu trabalho é a preocupação em se fornecer energia com qualidade, entendendo-se por isso em fornecer energia, cuja forma de onda da tensão, seja sempre próxima do ideal, ou seja, senoidal. Como solução para os problemas da Qualidade da Energia, os autores destacam que não basta apenas a busca constante de solucionar este item, ou seja, a forma de onda da tensão, mas sim uma pesquisa mais profunda, considerando outros aspectos também relevantes, que são apresentados em forma de organograma, conforme a Figura 14, os quais estaremos abordando a seguir.

Figura 14: Principais aspectos da Qualidade da Energia.

Para análise das formas de onda não senoidais, o item *Modelagem e Análise* se destina à definição dos parâmetros a serem estudados, ou seja, as interferências harmônicas, tensões de fornecimento, *softwares* a serem aplicados, análise no domínio

do tempo ou o tipo de ferramenta matemática a ser utilizada, bem como a determinação do programa computacional a fim de efetuar as simulações necessárias para a detecção e identificação do distúrbio. Já o item *Instrumentação* se refere à escolha do tipo de aparelho mais adequado a ser utilizado, e quais medidas serão importantes para análise da forma de onda. Vale ressaltar que a escolha correta de equipamentos e procedimentos de medição pode diminuir os erros destas medidas, bem como o número de dados a serem armazenados. As *Fontes* geradoras dos problemas de Qualidade de Energia, geralmente, dividem-se em duas categorias, a saber: a primeira referente às cargas/equipamentos existentes no sistema, ou sejam, as máquinas rotativas, lâmpadas fluorescentes, conversores, circuitos eletromagnéticos, fornos a arco entre outras, e na segunda categoria, destacam-se aquelas que se referem ao sistema de transmissão e/ou distribuição de energia, destacando-se os sistemas de aterramento e problemas de ressonância eletromagnética. Os autores apontam que problemas relacionados ao aterramento dos sistemas foram responsáveis por 85% dos fenômenos da Qualidade da Energia na região oeste dos Estados Unidos (1993).

Devido, principalmente, à proliferação de cargas não lineares, a *Solução* para o problema da qualidade é a instalação, depois de detectado o problema, de equipamentos tais como os filtros passivos e/ou ativos, compensadores de reativos que venham compensar os efeitos das cargas não lineares presentes no circuito. Quanto ao termo, *Conceitos Fundamentais*, trata-se de uma fase do processo, segundo estes autores, que se refere ao estudo dos fenômenos que interferem na Qualidade da Energia, os quais devem ser amplamente divulgados, quer seja por meio de normas técnicas, periódicos, ou outras formas educacionais, a fim de que os mesmos conceitos possam ser discutidos tanto no âmbito da educação/universidades, como também, serem utilizados por outros profissionais, para a solução de problemas reais. O processo final do estudo da Qualidade da Energia é denominado de *Resultado*, que consiste na elaboração de manuais e procedimentos referentes aos resultados obtidos em todas as etapas anteriores do processo de estudo da Qualidade da Energia, para divulgação e, também, para a aplicação de equipamentos de proteção para o sistema estudado. Os autores concluem que os problemas de Qualidade da Energia devem aumentar cada vez mais, principalmente devido ao crescente aumento de cargas não lineares, e com isso somente uma maior integração e uniformização de metodologias entre as áreas técnicas operacionais e de pesquisa podem trazer resultados satisfatórios na solução dos problemas no contexto apresentado.

Brent M. Hughes, et al. [15] apresentam um estudo de uma companhia elétrica do Canadá que aplica um programa de monitoramento da Qualidade da Energia de fornecimento. O principal objetivo deste programa é o de criar padrões e informar aos consumidores as maiores causas dos distúrbios referentes aos principais problemas que afetam a qualidade da energia fornecida, tais como, as distorções harmônicas e variações de tensão. Neste sentido, criou-se um banco de dados com as variações de tensão e tempo da duração destes efeitos. O estudo inicial classificou os vários tipos de variação de tensão e suas durações e, do mesmo modo, comparou estes dados com a curva *CBEMA* (*Computer Business Manufacturers Association*), ainda na versão original de 1977, onde a suportabilidade, com relação à magnitude e duração das variações da tensão, era menor do que a atual curva ITI-CBEMA, revisada em 2000 (Figura 1). A Figura 15 representa os diversos tipos de distúrbios pesquisados, indicando os limites de tolerância das variações de tensão para os computadores, segundo o relato destes autores [15].

Figura 15: Limites de tolerância de variação de tensão, comparados com a curva CBEMA.

Para cada tipo de distúrbio os autores definem as faixas de tensão permitidas, conforme mostrado na Tabela 3, sendo que na faixa de 110 a 125 Volts, foi considerada a condição normal de tensão.

Tabela 3: Faixas de tensão consideradas na pesquisa.

Distúrbio	Faixa de tensão
Surto de tensão	>150 Volts (pico)
Distorção na forma de onda	> ± 25 Volts (pico)
Afundamento de tensão	< 110 Volts rms
Elevação de tensão	> 125 Volts rms

O estudo foi realizado entre consumidores residenciais, comerciais e industriais, e a conclusão final foi que cada local possuía características próprias e que a predominância de afundamento de tensão era comum a todos os locais pesquisados, conforme apresentado na Tabela 4, que mostra as frequências de ocorrências dos diversos distúrbios, no período de monitoração.

Tabela 4: Frequência de ocorrência dos distúrbios de tensão, monitoradas nos diversos tipos de consumidores.

Tipo do distúrbio	Cargas residenciais	Cargas comerciais	Cargas industriais
Surto de tensão	0	391	6
Distorção na forma de onda	1	26	0
Afundamento de tensão	5	28	829
Elevação de tensão	3	0	33
Duração da monitoração (horas)	1729	2074	125

Seguindo nesta mesma linha de pesquisa, Philip P. Barker, et al. [16], em meados de 1989, também realizaram estudo semelhante aos apresentados por Brent M. Hughes, et al. [15], acima citado, e, da mesma forma, buscaram criar um banco de dados para identificar e corrigir problemas de Qualidade da Energia de uma distribuidora americana do estado de Nova York, concentrando seus estudos nos consumidores residenciais. A preocupação constante e comum entre os pesquisadores da área de Qualidade da Energia, naquela época, era sobre a falta de padronização dos

termos utilizados, a fim de se poder analisar e comparar os dados de outras pesquisas, de forma precisa e confiável. Os autores, preocupados com esta padronização, destacam em seu trabalho as definições dos principais termos utilizados em seus estudos para melhor compreensão e facilidade de comparação entre as diversas pesquisas na área de Qualidade da Energia. Atualmente, podemos dizer que esta padronização já é uma realidade, contemplada na norma IEEE-1995 [7].

Em 1990, o Instituto de pesquisas americano *Electric Power Research Institute* (EPRI), entendendo a importância do termo Qualidade da Energia, promoveu um estudo para analisar a qualidade dos sistemas alimentadores e distribuidores de energia nos Estados Unidos. Erich W. Gunther e Harshad Mehta [17] publicaram os resultados deste projeto, que buscava monitorar e simular os fenômenos que geram problemas na Qualidade da Energia, além de elaborar um banco de dados relativos a estes fenômenos. O estudo teve a duração de dois anos e foi efetuado em 24 locais distintos, espalhados por todo o território americano. Foram monitorados cerca de 300 pontos e repetidos de forma semelhante três anos depois, em 1993, porém em menor escala, utilizando 100 pontos. Desta feita, fez-se uma monitoração adicional cujos resultados foram comparados entre si. O primeiro passo foi determinar os fenômenos a serem monitorados, sendo os escolhidos: transitórios impulsivos e oscilatórios, interrupções e variações de tensão de curta duração, interrupções e variações de tensão de longa duração e distorção da forma de onda. Outro ponto importante foi a escolha da norma IEEE -1159 [7] como referência para as definições dos termos utilizados.

O resultado deste trabalho de monitoração foi a confirmação de algumas conclusões já utilizadas e muitas vezes determinadas de forma estatística, a saber: uma operação comum que ocorre, diariamente, em muitos sistemas de distribuição é o chaveamento de capacitores. Outro evento, porém, não intencional, são as faltas devido às descargas atmosféricas, galhos de árvores, animais, falhas de equipamentos entre outras. Também foi detectado, o fenômeno da magnetização dos transformadores, devido ao aumento da tensão quando da ocorrência de faltas, e, ainda, a ocorrência dos problemas de influência harmônica. Todos estes eventos foram monitorados e identificados no decorrer dos trabalhos, levando a um resultado bastante interessante neste projeto, e que vem de encontro com as publicações da área de Qualidade de Energia. Verificou-se que as maiores dos afundamentos de tensão detectados, apresentaram redução de sua amplitude, em torno de 80% do valor nominal, durante 4 a 10 ciclos, tendo como causa, principalmente, as descargas atmosféricas. Vale ressaltar,

ainda, que estes afundamentos de tensão foram predominantes em relação às elevações de tensão. Outro dado importante, agora referente às variações harmônicas, foi que a taxa Total de Distorção Harmônica encontrada nos barramentos alimentadores de distribuição monitorados, foi em média de 1,5%.

José C. Oliveira, et al. [18] apresentaram os resultados de medições de tensão e corrente, detectando as variações das formas de ondas e identificando assim os problemas decorrentes da Qualidade da Energia em uma indústria têxtil no Brasil. R. Mienski et al. [19], também apresentaram estudos para uma indústria localizada na Polônia, e ambos os trabalhos apresentam casos reais onde são pesquisados problemas de Qualidade da Energia em plantas industriais distintas, porém com resultados semelhantes. Os parâmetros analisados foram comparados com padrões estabelecidos em normas americanas e européias. O fato importante a ser destacado é que os autores iniciam seus trabalhos definindo os itens de Qualidade da Energia a serem utilizados, possibilitando assim, a comparação dos dados obtidos e, conseqüentemente, propiciando um melhor aproveitamento das experiências adquiridas, bem como da melhoria dos sistemas em geral.

Também J. V. Milanovic e M. Negnevitsky [20] apresentam um estudo de qualidade, efetuado durante o ano de 1996, em uma companhia hidroelétrica da Tasmânia, tendo como seus principais usuários, indústrias, consumidores residenciais e hospitais. A primeira fase do projeto consistiu no envio de questionários, definindo os termos principais dos fenômenos que afetam a Qualidade da Energia, para melhor compreensão e identificação por parte dos usuários, e, em uma segunda fase, o monitoramento destes efeitos. O resultado apresentado foi que 50% dos problemas encontrados referentes a problemas no funcionamento dos computadores, estavam relacionados a afundamentos de tensão, elevação de tensão, interrupções do fornecimento de energia e perturbações harmônicas.

Outra importante contribuição foi a questão apresentada por A. Robert [21] que apresenta uma relação de termos bastante utilizada na área da Qualidade da Energia, tais como: Qualidade da Energia (*Power Quality*), confiabilidade de fornecimento (*Supply Reliability*), qualidade de fornecimento (*Supply Quality*), entre outros. Foi considerando essencial uma maior conscientização por parte dos fornecedores de energia, esclarecendo ao usuário quanto aos problemas da falta de qualidade que estão sujeitos em suas instalações, como também os próprios consumidores que devem tomar conhecimento da necessidade de usar novas tecnologias para prevenção e segurança de

suas instalações, já que estão, cada vez mais se utilizando de cargas especiais. O trabalho conjunto, entre fornecedor e usuário, é de fundamental importância para alcançar qualidade e confiabilidade em um sistema elétrico como um todo.

Alessandro M. Ferraro [22] discute o problema da Qualidade da Energia, propondo um modelo matemático para detectar distúrbios e comparar valores definidos como aceitáveis pelas normas existentes. Este estudo considera a grande proliferação de cargas monofásicas como importante geradora de distúrbios, tais como computadores, lâmpadas fluorescentes e equipamentos eletrônicos domésticos, entre outros, fato este comprovado e estudado por E. Acha et al. [23]. Os citados autores concordam que estas cargas em conjunto provocam distorções harmônicas importantes no sistema, como o desbalanceamento da tensão, causando assim sérios problemas para a instalação. Antony C. Parsons et al. [24], tal como Ferraro [22] detectam a existência de problemas que afetam a qualidade da energia gerada pelos fornecedores, como também pelos usuários, e apresentam um modelo matemático para localizar, identificar e comparar com valores previamente aceitáveis. Porém, acrescentam a necessidade de identificar o lado em que ocorre a causa deste distúrbio (o lado do consumidor ou do fornecedor de energia). Esta identificação é efetuada pelo exame das formas de onda de corrente e tensão registradas no circuito a ser analisado.

A importância e preocupação com os itens de qualidade foram e continuam sendo objeto de diversos estudos e conseqüente elaboração de normas, com o intuito de recomendar limites para os itens mais significativos, e assim proteger o sistema.

R. Arseneau, G. T. Heydt e M.J. Kempler [25] preocupados com o aumento de cargas não lineares e eletrônicas, que causam um aumento significativo da incidência de interferências harmônicas no sistema, em conjunto com a norma *IEEE Standard 519-1992* têm como objetivo em seu trabalho recomendar limites relacionados a tensões e correntes harmônicas em um sistema de potência. Desenvolveram métodos para aplicação em medidores de energia, de forma a evitar erros de leitura, e comprovaram que os limites impostos pela referida norma são ideais, e que sua aplicação promove efeitos de economia para os usuários de energia.

Ainda com relação às interferências harmônicas, I. M. Nejdawi et al. [26], destacam uma tendência de aumento dos problemas no âmbito da frequência, sendo as distorções harmônicas totais (*THD – Total Harmonic Distortion*) com um efeito negativo tanto para a área industrial como residencial, causando sérios danos em

equipamentos de um modo geral, contribuindo assim para piorar a qualidade do fornecimento de energia.

Conhecendo a existência dos efeitos causados pelas distorções harmônicas em um dado sistema, D. D. Sabin, D. L. Brooks e A. Sundaram [27] reforçam a importância do controle destes índices, desenvolvendo uma técnica que consiste em comparar amostras normais de formas de onda de tensão e corrente com as medições em situações reais. Após as necessárias operações computacionais, determina-se estatisticamente, a distorção harmônica do sistema, criando um banco de dados com valores aceitáveis, e assim contribuindo para uma melhor comparação entre os dados ideais e os medidos, para então promover as correções necessárias no sistema.

Mark McGranaghan [28], apresenta a complementação da norma IEEE 519, expondo o guia desenvolvido na norma IEEE P519, que fornece informações e procedimentos para avaliar o nível de harmônicas de uma instalação, de forma a não se cometer exageros na aplicação dos valores limites recomendados, evitando instalar equipamentos corretivos sem uma real necessidade. Na verdade, estas atitudes podem piorar as condições do sistema como um todo, e, como atitude mais correta, recomenda-se um estudo específico para cada caso e, então, aplicar os valores mais adequados.

3.2 Ferramentas utilizadas no estudo da Qualidade da Energia

O modelo matemático utilizado na maioria dos estudos pesquisados se concentra na caracterização das funções de tensão e corrente, utilizando os conceitos de Transformada de Fourier. Tal caracterização não implica na inexistência de outras ferramentas importantes e, também, bastante utilizadas, como, por exemplo, a mais recentemente, a Transformada Wavelet que, para determinados casos, mostra-se mais vantajosa que a anterior.

De fato sabemos que, normalmente, é necessário o armazenamento de grandes quantidades de dados para o estudo da Qualidade de Energia, o que pode se tornar um grave problema computacional. G.T. Heydt et al. [29] apresentam uma alternativa para análise das formas de onda de tensão, através da seleção de janelas, utilizando o método de Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform*), onde os distúrbios são localizados no tempo, mediante o deslizamento destas janelas, diminuindo assim

consideravelmente a quantidade de dados a serem analisados, uma vez que os sinais sem qualquer problema podem ser desprezados. A largura das janelas permite a análise de dados específicos, sendo utilizadas janelas estreitas para os sinais de rápidos transitórios e janelas mais largas para os sinais de baixa frequência. A grande vantagem do método é poder detectar os distúrbios rapidamente, mesmo quando são armazenadas grandes quantidades de dados. Verificou-se, também, que os resultados obtidos apresentaram relativa precisão. A principal dificuldade de se aplicar este método foi em determinar o tamanho ideal para estas janelas, de forma a não prejudicar a precisão e confiabilidade dos resultados.

Considerando que os problemas de afundamentos de tensão, sobretensões, distúrbios harmônicos e oscilações de tensão são os mais comuns relacionados com a Qualidade da Energia, os pesquisadores O. Poisson, P. Rioual e M. Meunier [30] apresentaram uma comparação entre os resultados obtidos no estudo destas perturbações, aplicando várias ferramentas, ou seja, Transformada de Fourier e Wavelet associada à Análise com Múltiplas Resoluções (MRA). Os dados obtidos demonstraram que a análise via Transformada de *Fourier* foi eficiente em detectar e medir as componentes harmônicas, porém apresentou erros tanto na determinação do tempo em que ocorreram os distúrbios, quanto na análise de transitórios. A Transformada Wavelet associada à Análise com Múltiplas Resoluções foi eficiente para determinar problemas na faixa de frequência de 50-60 Hz e na identificação de eventos transitórios de curta duração, não sendo um método preciso para a análise dos componentes harmônicos.

Surya Santoso et al. [31] também denotam, em seu trabalho, o crescente aumento de equipamentos eletrônicos instalados no sistema e, como consequência destes, a constante preocupação da utilização de fontes de energia isenta de ruídos. Para tanto apresentam novos meios e metodologias alternativas, utilizando a Transformada de Fourier e Transformada Wavelet como ferramentas tanto para análise das ondas de tensão, como para localização dos distúrbios e sua consequente eliminação. A Transformada de Fourier é por eles recomendada quando estão presentes fenômenos em estado permanente, sendo a Transformada Wavelet mais recomendada para análise dos fenômenos transitórios. No trabalho apresentado, é fácil de notar as oscilações na onda de tensão, quando efetuadas manobras no sistema de alimentação, energização dos transformadores na rede de distribuição de energia e quando ocorre o chaveamento dos bancos de capacitores do sistema. Para todos estes casos apresentados, os autores determinam as formas de onda e suas imperfeições, utilizando Transformadas de

Fourier e Transformadas Wavelet, sem, contudo se preocupar, especificamente, com a precisão dos resultados, mas sim em poder localizar no tempo, ou seja, determinar o exato instante em que se iniciaram as perturbações na forma de onda de tensão e/ou corrente. Desta forma é possível, além de identificar o problema, conhecer o instante e tempo de duração desta perturbação sobre o sistema, podendo assim avaliar a causa que gerou a perda da qualidade do sistema.

3.3 Comentários finais

Todos os trabalhos aqui estudados são unânimes em afirmar que os problemas relacionados à Qualidade da Energia são uma realidade e tendem a crescer à medida que novas tecnologias são desenvolvidas, principalmente com o elevado uso de computadores e equipamentos eletrônicos diversos.

Estes problemas não são mais de exclusividade das indústrias ou processos mais complexos, mas afetam todos os usuários de energia elétrica indistintamente.

Outro fator importante a ser destacado é a importância da utilização de nomenclaturas e definições padronizadas para os fenômenos causadores de distúrbios da Qualidade da Energia, como também a criação e divulgação de banco de dados como referência e avaliação de resultados obtidos de diferentes formas, para os estudiosos do assunto. Vale ressaltar que, em muitos trabalhos, foi destacado o afundamento de tensão, como um fenômeno importante a ser mais bem estudado e caracterizado, na busca da solução ou mitigação da grande maioria dos problemas relacionados com a Qualidade da Energia.

As metodologias apresentadas neste trabalho, para detectar, classificar e localizar os problemas de Qualidade da Energia foram bastante diversificadas, porém, a utilização da Transformada de Fourier foi a mais difundida e presente na grande maioria dos trabalhos da literatura estudada.

Sendo assim, iremos utilizar a Transformada de Fourier como ferramenta principal para identificar os fenômenos típicos no estudo da Qualidade da Energia. Mais precisamente, estaremos utilizando o método da Transformada Rápida Janelada de Fourier (*Window Fast Fourier Transform – WFFT*).

No próximo capítulo, estaremos abordando a teoria básica da Transformada de Fourier, sua história e suas diversas formas de aplicação, tendo como objetivo final, a aplicação da Transformada Rápida Janelada de Fourier na elaboração de um programa computacional que possa localizar (no tempo) e identificar os fenômenos relativos ao estudo da Qualidade da Energia de um sistema elétrico.

CAPÍTULO 4

Transformada de Fourier

A Transformada de Fourier é uma das principais ferramentas matemática, implementável computacionalmente, que é utilizada no processamento digital da informação. Nos dias de hoje é difícil acreditar que houve um tempo em que não se conhecia a tecnologia digital. Como exemplo de sua grande utilização atual, podemos citar fatos comuns de nosso “dia-a-dia”, como os dados recebidos e enviados via *Internet* utilizando *modem*, ou mesmo as transmissões em nossos aparelhos celulares que são resultados de uma sequência de zeros e 1's, ou seja, uma sequência digital [32].

A Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform – FFT*) é um dos algoritmos mais utilizados para analisar e manipular estes dados digitais. Sua grande aplicabilidade atende a diversas áreas do conhecimento, tais como processamento de sinais de áudio e músicas eletroacústicas, processamento de imagens médicas, reconhecimento de paternidade, aplicações em química computacional, solução de problemas matemáticos, entre outras [32]. No contexto deste trabalho, para a análise da Qualidade da Energia, a Transformada de Fourier tem se mostrado como uma importante ferramenta para detectar as variações que ocorrem nas ondas de tensão e corrente, e, após análises e comparações com sinais padrões, nos permite determinar a gravidade ou não destas distorções ocorridas no sistema.

4.1 História

Podemos datar que os primeiros registros da Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform – FFT*), que leva o nome de seu criador, o matemático francês Jean Baptiste Joseph Fourier (1768-1830), ocorreram antes de Gauss (1777-1855). O interesse da utilização desta ferramenta estava ligado, principalmente, a certos cálculos

de astronomia. Uma vez que estes projetos promoviam grandes e laboriosos cálculos matemáticos, motivou o desenvolvimento de um algoritmo mais rápido. A diminuição de cálculos implicaria em diminuição de erros e, conseqüentemente, uma estabilidade numérica dos resultados.

O estatístico Frank Yates publicou uma simples, mas também importante versão da *FFT* em 1932. O algoritmo desenvolvido por Yates é uma técnica rápida para análise computacional de variâncias, descrita na maioria dos textos de estatísticas para análises de experimentos.

Outro importante predecessor é o trabalho desenvolvido por G.C. Danielson e Corneliu Lanczos, no ano de 1942, desenvolvido com o propósito de efetuar análise em cristais, com uso de Raios-X. Foi quando os mesmos apresentaram também técnicas para reduzir uma Transformada de Fourier Discreta (DFT) de $2N$ pontos para duas Transformadas de Fourier Discretas de N pontos, utilizando somente N operações extras. O tempo aproximado para as análises de Fourier era de 10 minutos para 8 coeficientes, 25 minutos para 16 coeficientes, 60 minutos para 32 coeficientes e 140 minutos para 64 coeficientes.

Embora tenha sido descoberto há mais tempo, a Transformada Rápida de Fourier somente ganhou notoriedade com os trabalhos publicados por James W. Cooley e John W. Tukey em 1965. Estes trabalhos foram desenvolvidos nos Estados Unidos com o objetivo de detectar os experimentos nucleares ocorridos na então União Soviética, a despeito da grande distância entre estes dois países. A idéia a ser desenvolvida foi baseada em análise de dados sismográficos, cujos comprimentos e números de ondas deveriam ser rapidamente analisados pela Transformada de Fourier Discreta (*DFT*).

Richard Garwin, técnico da empresa IBM, ao conhecer os trabalhos de Tukey, percebeu o grande potencial de aplicabilidade deste rápido algoritmo que estava sendo implementado. Então, Garwin solicitou a Cooley que desenvolvesse um algoritmo também rápido, que pudesse determinar a orientação rotacional em um cristal de Hélio. Após muita insistência, o algoritmo Cooley-Tukey *FFT* foi desenvolvido e publicado em tempo considerado recorde de apenas 6 meses.

Simultaneamente, houve o desenvolvimento dos conversores de sinais analógico-digital, capazes de produzir sinais digitalizados na faixa de 300.000 amostras por segundo, quando se iniciava então uma verdadeira revolução digital [32].

4.2 Transformada Discreta de Fourier (DFT)

Podemos considerar a Série de Fourier como uma operação que toma uma função $f(x)$ e a retorna a uma seqüência (de coeficientes) C_k . Da mesma forma, a Transformada de Fourier pode ser considerada uma operação que mapeia uma função $f(x)$ para outra função $F(w)$. Para determinar a Série de Fourier ou a Transformada de Fourier de uma função, devemos avaliar o valor de sua integral. Isto somente é possível, se considerado para funções que podem ser descritas, analiticamente, e ainda assim serem funções não muito complicadas. Na verdade, o que nós encontramos não são funções com estas condições e, portanto, é necessária a aplicação de um sistema digital para nos ajudar. Entretanto, os sistemas digitais não operam com estas funções, mas sim com seqüências de números que representam estas funções. Em outras palavras, nós digitalizamos uma determinada função para obter uma seqüência de números, de modo que possa ser operacionalizada pelo computador.

A Transformada Discreta de Fourier é uma operação que mapeia uma seqüência $\{f(x)\}$ para outra seqüência $\{F(j)\}$, e, para uma determinada amostra de um sinal é definida como:

$$F(j) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} f(k) \exp\left(\frac{-2\pi i k j}{N}\right) \quad (4)$$

Onde $f(k)$ é uma seqüência de amostras de um sinal $f(t)$ contínuo no tempo tomada a cada T_s segundos por N amostras, ou seja:

$$f(k), k=0, 1, 2, \dots, N-1$$

A Transformada Discreta de Fourier produz uma seqüência de valores complexos $F(j)$ cujas magnitudes correspondem à freqüência discreta dos componentes em $f(k)$. Como é evidente na equação (4), a derivada da Transformada Discreta de Fourier requer, estritamente, um sinal de entrada $f(k)$ para ser periódica, isto é, o sinal se repete a cada N amostras.

Para prevenir erros, devido à superposição de sinais, que estaremos melhor detalhando no item 4.6, a taxa amostral do sinal no tempo $f(t)$ precisa ser no mínimo duas vezes a maior frequência existente neste sinal, conforme o critério de Nyquist.

As limitações de uma Transformada Discreta de Fourier de um sinal não periódico podem ser mais bem ilustradas, considerando uma forma de onda de uma tensão típica, associada a chaveamento de capacitores em sistemas de potência, como mostrado na Figura 16 (a).

Figura 16: Chaveamento de capacitores – (a) Sinais transitórios e (b) sua Transformada Discreta de Fourier.

A análise do sinal transitório pela Transformada Discreta de Fourier, Figura 16 (b), mostra uma maior componente, de aproximadamente 750 Hz, ladeada por frequências entre 700 Hz e 800 Hz. Estes dois últimos componentes surgiram como consequência direta da não periodicidade da forma de onda de entrada.

A presença de significativa energia ao redor da componente de 750 Hz pode frustrar uma precisa detecção da frequência de ressonância do sistema composto pelo capacitor, que poderia ajudar a encontrar a causa do transitório ocorrido.

A representação de um sinal por Transformada Discreta de Fourier é mais bem aplicada para sinais verdadeiramente periódicos.

Os problemas acima mencionados, associados com a análise de sinais não periódicos, podem ser superados por uma adaptação da Transformada Discreta de Fourier, analisando somente uma pequena porção do sinal no tempo, técnica esta conhecida como “janelar” o sinal; esta técnica é comumente referida como

Transformada Discreta de Fourier Janelada (*Windowed Discrete Fourier Transform – WDFT*) [33].

4.3 Transformada Rápida de Fourier (FFT)

O algoritmo desenvolvido por J.W. Tukey e J.W. Cooley (1965) conhecido por Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform – FFT*) é considerado uma das mais significantes contribuições para a análise numérica. Basicamente, a Transformada Rápida de Fourier é uma inteligente técnica computacional para reduzir significativamente o tempo de operação. Uma transformada de N pontos pode ser computada pela divisão da expressão original em 2 partes. Cada uma dessas partes pode ser subdividida em duas outras partes, e assim sucessivamente. Este algoritmo requer uma ordenação especial dos dados de entrada. A Figura 17 apresenta um exemplo de execução do algoritmo de desdobramentos sucessivos para um vetor de oito elementos.

Figura 17: Algoritmo da Transformada Rápida de Fourier.

Seja uma sequência $\{f(k)\}$ de ordem N com uma Transformada Discreta de Fourier $\{F(j)\}$. Além disso, consideraremos que N é um número par e inteiro, e, portanto poderemos formar duas novas sequências:

$$f_1(k) = f(2k),$$

$$f_2(k) = f(2k+1), \quad k=0, \dots, M-1, \text{ onde } M = N/2$$

Por exemplo, se $\{f(k)\} = \{0,1,2,14,16,20\}$, então

$$\{f_1(k)\} = \{0,2,16\}$$

$$\{f_2(k)\} = \{1,14,20\}$$

Nota-se que:

$$f_1(k + M) = f(2(k + M)) = f(2k + N) = f(2k) = f_1(k),$$

$$f_2(k + M) = f(2(k + M) + 1) = f(2k + N + 1) = f(2k + 1) = f_2(k),$$

Ambas as funções $\{f_1(k)\}$ e $\{f_2(k)\}$ são seqüências periódicas com periodicidade M e sua Transformada Discreta de Fourier é dada por:

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

$$j = 0, \dots, M-1 \quad (5)$$

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

onde

$$W_M = e^{2\pi i / M} \quad \text{Conhecido como peso de Kernel } W_M$$

Vamos agora considerar a Transformada Discreta de Fourier de uma seqüência $\{f(k)\}$ de ordem N :

$$F(j) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} f(k) W_N^{-kj} \quad (6)$$

Dividindo a somatória, podemos reescrever a equação como:

$$F(j) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{M-1} f(2k) W_N^{-2kj} + \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{M-1} f(2k+1) W_N^{-(2k+1)j} \quad (7)$$

Contudo, podemos observar que:

$$W_N^{-2kj} = e^{-2\pi i k j / (N/2)} = W_M^{-kj} \quad (8)$$

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

Então, substituindo estes valores, a equação (7) se torna:

$$F(j) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{M-1} f_1(k) W_M^{-kj} + \frac{W_N^{-j}}{N} \sum_{k=0}^{M-1} f_2(k) W_M^{-kj} \quad (9)$$

$j = 0, \dots, N-1$

Comparando com a equação (5), teremos:

$$F(j) = \frac{F_1(j)}{2} + \frac{W_N^{-j} F_2(j)}{2} \quad j = 0, \dots, N-1 \quad (10)$$

Devido $\{F_1(j)\}$ e $\{F_2(j)\}$ serem periódicas (com período M), temos:

$$F(j) = \frac{1}{2} [F_1(j) + F_2(j) W_N^{-j}] \quad j = 0, \dots, M-1 \quad (11)$$

$$F(j+M) = \frac{1}{2} [F_1(j) - F_2(j) W_N^{-j}]$$

Atente-se que para calcular a Transformada Discreta de Fourier de $\{f(k)\}$ foram necessários N^2 operações complexas (adição e multiplicação), entretanto para calcular a Transformada Discreta de Fourier de $\{f_1(k)\}$ ou $\{f_2(k)\}$ foram necessários somente M^2 ou $(N^2)/4$ operações complexas.

Quando utilizamos a equação (11) para obter $\{F(j)\}$ a partir de $\{F_1(j)\}$ e $\{F_2(j)\}$, foram necessárias $N + 2(N^2/4)$ operações complexas.

Em outras palavras, nós primeiramente necessitamos de $2(N^2/4)$ operações para calcular as duas Transformadas de Fourier $\{F1(j)\}$ e $\{F2(j)\}$ e então de N adicionais operações prescritas pela equação (11).

Portanto, reduzimos o número de operações de N^2 para $N + (N^2/2)$. Quando o valor de N é pequeno (por exemplo, $N = 4$) isto resulta em um fator de redução igual a 0,75. Porém, quando N é grande, este fator de redução aproxima-se de 0,5.

A essência do algoritmo de Cooley-Tukey, ou Transformada Rápida de Fourier é a escolha de uma sequência com $N = 2^p$, onde p é um número inteiro e positivo [34].

4.4 Transformada Rápida de Fourier Janelada (WFFT)

Para avaliar a Qualidade da Energia de um determinado sistema, geralmente utiliza-se uma grande quantidade de dados, medidos neste sistema, por intermédio de modernos instrumentos. A ordem de processamento destes dados pode variar de acordo com a metodologia a ser utilizada. Por exemplo, o método da análise estatística efetua um pré-processamento destes dados, armazenando os mais interessantes e eliminando os de menor interesse. Este volume de dados pode causar problemas de armazenamento, quando forem feitas medições por longos períodos, mas o fator relevante a ser considerado é a dificuldade de utilização destes dados, devido a sua grande quantidade.

Dentre as metodologias utilizadas para análise da Qualidade da Energia, é mais interessante escolher a que não requer grande volume de dados para serem processados, como por exemplo, a conhecida técnica da “janela”. Esta técnica consiste em fazer com que uma “janela” deslize sobre os dados obtidos do sistema, e é utilizada a Transformada Rápida de Fourier, transformando estes dados, no domínio do tempo, para o domínio da frequência. Para cada “janela” são analisados os dados e identificados os que possuem seus valores alterados. A Figura 18 representa bem este conceito, mostrando inicialmente um sinal com um dado distúrbio, ocorrido em um intervalo de tempo, e posteriormente a “janela” retangular que será utilizada para determinar estas distorções, tendo por fim o sinal janelado, onde se aplicará a Transformada Rápida de Fourier [29].

Figura 18: A Transformada de Fourier utilizada para localizar distúrbios.

A idéia básica da Transformada Rápida de Fourier Janelada (WFFT) consiste em multiplicar o sinal de entrada $f(t)$ por uma função janelada $w(t)$ cuja posição varia no tempo. Este sinal é fracionado em pequenos segmentos de tempo, onde é aplicada a Transformada Rápida de Fourier para cada um destes segmentos de tempo. Desta forma cada espectro de frequência representa a frequência existente durante cada pequeno espaço de tempo. A definição de Transformada Rápida de Fourier Janelada (WFFT) é apresentada a seguir.

Seja a Transformada de Fourier de um sinal $f(t)$ definido como:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (12)$$

A Transformada de Fourier é então, um mapeamento do sinal $f(t)$ no domínio do tempo para o domínio da frequência $F(\omega)$. A forma digital da equação (12) é a Transformada Discreta de Fourier,

$$F(k\Delta\Omega) = \sum_{-\infty}^{\infty} f(i\Delta T) e^{-j k \Delta\Omega \Delta T} \quad (13)$$

Onde $\Delta\Omega$ é a resolução no domínio da frequência e ΔT é o tempo entre as amostras de $f(t)$. Normalmente, a função $f(t)$ é considerada periódica e a somatória indicada na equação (13) é considerada sobre um período de $f(t)$, denominado T .

$$F(k\Delta\Omega) = \sum_{i=0}^{N-1} f(i\Delta T) e^{-jik\Delta\Omega\Delta T} \quad (14)$$

Onde $N\Delta T = T$. A resolução da frequência $\Delta\Omega$ é dada por $2\pi / N\Delta T$. Quando a equação (14) é utilizada, assume-se que o sinal $f(t)$ seja periódico e o ciclo de amostras de $[0, T]$ se repete fora desta janela de amostras. Para este caso, $F(k\Delta\Omega)$ é também periódico com período N .

A equação (14) representa a conhecida Transformada Rápida de Fourier (*FFT*), que é uma representação exata da Transformada Discreta de Fourier assumindo uma periodicidade de $f(t)$, com período T sobre N amostras. A Figura 19 apresenta uma janela retangular deslizando ao longo do eixo do tempo, no sentido indicado, ou seja, para a direita.

Figura 19: Transformada de Fourier Janelada.

A Transformada Rápida de Fourier (*FFT*) aplicada nos dados cobertos por esta janela é avaliada, assumindo a periodicidade de $f(t)$. Matematicamente, a Transformada Rápida de Fourier Janelada é uma avaliação da Transformada Discreta de Fourier, no tempo, utilizando o algoritmo da Transformada Rápida de Fourier.

$$F_w(k\Delta\Omega) = \sum_{i=A}^B f(i\Delta T) e^{-j k \Delta\Omega \Delta T} \quad (15)$$

Onde $B - A$ é a largura da janela utilizada para deslizar no tempo, e o índice w significa a aplicação da Transformada de Fourier Janelada.

O problema destacado, anteriormente, referente ao grande volume de dados, para a análise da Qualidade da Energia, sugere o uso de janelas grandes para análise de dados de tensão e corrente. Mas se $B - A$ (janela) é muito larga, e o período N modesto, o tempo entre as amostras ΔT pode ser muito grande para captar eventos de alta frequência. Isto sugere a necessidade de se ajustar o tamanho da janela que desliza para a direita, na qual é aplicada a Transformada Rápida de Fourier. Este conceito é denominado de Transformada Rápida de Fourier Janelada (WFFT), e adota-se um tamanho da janela pequeno, para captar os fenômenos relativos a altas frequências, e uma largura maior da janela, quando não há distúrbios no sinal analisado. A Figura 20 ilustra bem este conceito [29].

Figura 20: Transformada Rápida de Fourier Janelada (WFFT) com diferentes tamanhos de janela.

4.5 Erros devido à utilização da Transformada “Janelada” no tempo

A Transformada Rápida de Fourier FFT, pelo fato de se aplicar a sinais temporais discretos, introduz alguns erros que de alguma forma deturpam a verdade dos valores obtidos no espectro de frequência. A compreensão destes erros é fundamental para percebermos o verdadeiro significado do espectro obtido. Dois deles nos parecem mais importantes na definição do tipo de janela a ser utilizada, a saber:

- Superposição (*Aliasing*)
- Janela (*Windowing*)

4.5.1 Superposição (*Aliasing*)

Claude Shannon e Harry Nyquist provaram que, para não se perder a informação contida num sinal amostrado, é necessário que a frequência de leitura ou amostragem (nº de leituras/período de amostragem) seja pelo menos o dobro da maior frequência de interesse contida no sinal. A esta frequência é usual chamar-se frequência *de Nyquist*.

De fato, se pretendermos obter o respectivo sinal harmônico, apresentado na Figura 21 e a frequência de amostragem escolhida for igual a do sinal, acontecerá que seremos levados a pensar estar perante um sinal contínuo (frequência = 0) de amplitude dependente do instante em que se iniciou a aquisição, mostrada na Figura 22.

Figura 21 – Sinal harmônico.

Figura 22 – Frequência de amostragem igual à frequência do sinal em análise.

Se a frequência de amostragem for maior que a do sinal, mas inferior ao seu dobro, obterá um sinal de frequência inferior à verdadeira, conforme Figura 23.

Figura 23 – Frequência de amostragem superior à frequência do sinal em análise, mas inferior ao seu dobro.

Finalmente, se a frequência de amostragem for maior ou igual ao dobro da frequência do sinal (frequência de *Nyquist*) já se obtém o valor correto, conforme mostrado nas Figuras 24 e 25.

Figura 24 – Frequência de amostragem igual ao dobro da frequência do sinal em análise.

Figura 25 – Frequência de amostragem igual a 16 vezes a frequência do sinal em análise.

Ao fenômeno de confundir uma frequência com outra menor, situação que se verifica quando a frequência de amostragem é inferior ao dobro da frequência em análise, é costume chamar-se superposição (*aliasing*).

4.5.2 Janela (*Windowing*)

A Figura 26 apresenta um sinal amostrado durante um período de tempo (T – período de amostragem) que por acaso coincidiu exatamente com um número inteiro de ciclos. Assim, o espectro obtido pela Transformada Rápida de Fourier (*FFT*) é bastante preciso, e é representado por uma única barra. Mas, na prática, nada nos garante que, quando medimos uma oscilação, o período de amostragem escolhido coincida com um número inteiro de ciclos. Além disso, a oscilação real é normalmente composta por variadas contribuições a diferentes frequências e fases.

Figura 26 – Período de amostragem coincidente com um número inteiro de ciclos (harmônica de amplitude 1, fase 0 radianos e frequência 8 Hz).

Na Figura 27, podemos constatar o que acontece ao espectro de frequência. A não existência de um número inteiro de ciclos no sinal amostrado provoca no espectro FFT o aparecimento de falsos componentes de frequência assim como a amplitude da frequência verdadeira surgirá mais pequena.

Figura 27 – Período de amostragem não coincidente com um número inteiro de ciclos (harmônica de amplitude 1, fase 0 radianos e frequência 8 Hz).

Já a Figura 28 representa um sinal composto por um maior número de oscilações, e período de amostragem não coincidente com um número inteiro de ciclos, indicando no espectro de frequência o aparecimento de uma maior quantidade de frequências que podem estar presentes neste sinal.

Figura 28 – Período de amostragem não coincidente com um número inteiro de ciclos da harmônica de maior frequência.

Este efeito chama-se *windowing*, ou efeito de janela [35]. A razão deste nome deve-se a que a parte amostrada do sinal seja como a parte do sinal real que vimos através de uma janela.

O erro verificado nas análises, quando utilizado o método de Janela (*windowing*), pode ser reduzido se escolhermos a janela adequada. Até aqui utilizamos a janela retangular, mas existem outras janelas que, conforme o tipo de sinal, são aconselhadas, pois reduzem, substancialmente, os erros de Janela (*windowing*) [35].

Uma das janelas mais usadas na medição de oscilações periódicas é a janela *Hanning*, apresentada na Figura 29.

Figura 29 – Período de amostragem não coincidente com um número inteiro de ciclos da harmônica de maior frequência. Utilização da janela Hanning.

O objetivo desta janela é conseguir que as amplitudes do espectro sejam mais próximas dos seus valores verdadeiros e reduzir o número de componentes falsas deste espectro. Tomando como exemplo a Figura 28, e, se aplicarmos ao sinal a janela *Hanning*, verificamos que em referência ao tempo, há uma atenuação do sinal amostrado nos extremos, e na frequência, se compararmos a Figura 29 com a Figura 28, podemos constatar que a amplitude da maior frequência se aproximou mais do seu valor real ($X=2$) e o número de falsas componentes diminuiu, apesar das que restaram aumentarem em amplitude. No entanto, será sempre fácil verificar se estas componentes são ou não verdadeiras bastando para tal, mudar a escala de frequências de modo a aumentar a resolução ou fazendo um *zoom*. A Figura 30 ilustra bem a comparação com os dois tipos de janelas.

Figura 30 – Amostragem de um sinal com uma janela Hanning em comparação com a janela retangular.

4.5.3 Outros problemas no uso da Transformada Rápida de Fourier Janelada

Testes utilizando Transformada de Fourier Rápida Janelada (*WFFT*) para análise da Qualidade da Energia indicam o aparecimento dos seguintes problemas:

- Velocidade x precisão: a técnica de deslizamento da janela no tempo faz com que a *WFFT* seja rápida em detectar os distúrbios com grandes quantidades de dados. Sempre deve haver um compromisso entre velocidade e precisão dos resultados desejados.
- Descarte dos dados limítrofes: existe sempre uma transição entre a amplitude normal do sinal e a amplitude do sinal com distúrbio. Como a janela desliza ao longo do sinal, em um determinado tempo esta janela irá conter ambos os sinais. Devido a esta ocorrência, os dados das bordas do distúrbio deverão ser descartados no cálculo da amplitude média. A Figura 31 ilustra este fenômeno.

Figura 31: Exemplo do fenômeno das bordas.

- Vazamento (*leakage*): devido à análise do sinal ser gradual em relação ao domínio do tempo, algumas informações irão se perder (“vazar”) quando transferidas para o domínio da frequência, válido para qualquer tipo de Transformada Rápida de Fourier. Quando a energia de uma dada frequência se espalha para a outra frequência, o erro resultante é chamado de *leakage*. Este erro é devido à dificuldade que é encontrada para se analisar duas transformadas no domínio do tempo, sendo uma o próprio sinal e a outra uma função janelada. Quanto menor o tamanho da janela a ser analisada no domínio do tempo, mais energia de uma frequência será espalhada para outra, e maior será o vazamento resultante. Contudo, se considerarmos um número inteiro de ciclos em cada janela, este vazamento não irá ocorrer devido a esta periodicidade.

Os principais elementos para seleção e ajuste do tamanho da janela são:

- 1- Quantidade dos dados;
- 2- Espaçamento de tempo típico entre os distúrbios e;
- 3- Precisão desejada para detecção do distúrbio.

Uma prática básica que pode ser utilizada à problemas relacionados a Qualidade da Energia é programar o tamanho da janela para atender a uma faixa de 1 a 100 segundos, para análise de grandes quantidades de dados, onde não se esteja muito preocupado com o erro que possa ocorrer. No momento em que qualquer perturbação é

notada, a janela é reduzida para uma largura de 25 a 250 ms (para um sistema em 60 Hz). A janela é novamente alterada após a ocorrência e término do distúrbio. Vale observar que esta prática é utilizada quando não há real necessidade e grande preocupação com a precisão na identificação do fenômeno ocorrido, somente será verificado que um dado distúrbio ocorreu no sistema monitorado. Porém, recomenda-se que o tamanho da janela seja em torno de 17 ms, para se conseguir uma melhor precisão e velocidade na análise dos dados e conseqüente apresentação de melhores resultados [29].

4.6 Observações gerais

Estaremos utilizando, neste trabalho, a Transformada Rápida de Fourier Janelada (WFFT) para análise dos sinais de tensão de um determinado sistema elétrico de potência. Tal análise busca critérios para detectarmos a distorção ocorrida na forma de onda e seu tempo de duração, para então podermos comparar com os valores fornecidos em norma e, assim, classificar se houve ou não quebra da Qualidade da Energia consumida/utilizada no sistema.

O tipo de janela escolhido para desenvolvimento do programa computacional, a ser demonstrado nos próximos capítulos, será a Janela de *Hanning*, por apresentar menores índices de erros na análise final. As larguras das janelas a serem utilizadas, também, serão variadas a fim de obtermos comparações entre os resultados.

No próximo capítulo, apresentaremos o sistema a ser estudado, sua característica e a obtenção dos dados que descreverão problemas relacionados com a Qualidade da Energia.

CAPÍTULO 5

O sistema de distribuição analisado

O sistema elétrico de potência é, geralmente, bastante complexo. A grande quantidade de circuitos e equipamentos com características diferentes implicam em grandes variedades de expressões e modelos matemáticos responsáveis pela identificação de cada um destes elementos.

O estudo da Qualidade da Energia requer os monitoramentos dos fenômenos eletromagnéticos causadores de distúrbios que possam vir a perturbar as formas de onda de corrente e tensão de um determinado sistema elétrico. Para tanto se faz necessário uma série de considerações que nos levarão a adotar procedimentos corretos e, conseqüentemente, obteremos dados confiáveis para que nossa análise seja o mais próximo do que ocorre na realidade.

Primeiramente, devemos atentar para a escolha do tipo de equipamento que será utilizado nas medições/monitoramentos, uma vez que estes não poderão sofrer influências dos efeitos eletromagnéticos presentes no sistema, fornecendo assim dados incorretos e/ou até mesmo danificar-se por completo, causando sérios prejuízos financeiros. Outro fator importante a ser considerado é a localização destes instrumentos, já que as características de alguns sistemas de potência sofrerão variações, dependendo da proximidade do equipamento de monitoração da fonte de tensão, da distribuição da impedância do sistema e da dinâmica da carga [7].

A localização inicial de um determinado instrumento dependerá, principalmente, do objetivo da pesquisa. É importante conhecer o sistema como um todo, pois os problemas podem ter suas causas em pontos muitas vezes distantes do local onde se manifesta o distúrbio principal a ser analisado e, assim, prejudicar a análise dos dados obtidos.

Percebe-se, claramente, a dificuldade técnica e econômica em se monitorar um sistema que apresente problemas referentes à Qualidade da Energia, independentemente

de seu tamanho, uma vez que deverá ser monitorado tanto em pontos próximos do problema, quanto em pontos distantes do mesmo.

5.1 Ferramentas ATP e *MATLAB*

Para o estudo dos distúrbios responsáveis pelo comprometimento da Qualidade da Energia, foi utilizado o *software* ATP (*Alternative Transients Program*) para a simulação dos fenômenos e o *software* MATLAB para a conseqüente implementação do algoritmo computacional.

O sistema analisado é um sistema de distribuição real, da CPFL – Companhia Paulista de Força e Luz, a qual forneceu todos os parâmetros necessários para que pudéssemos obter dados mais próximos da realidade [36,37]. O *software* ATP foi utilizado para propiciar um determinado número de simulações computacionais, em diversas localizações do sistema, visto que não seria possível realizar um trabalho de campo para obtenção de dados suficientes para este estudo.

O *software* MATLAB foi o escolhido para a implementação do algoritmo, e será apresentado no próximo capítulo, devido, principalmente, à facilidade de implementação (funções pré-definidas) e visualização dos resultados obtidos em forma gráfica, e, também, por sua confiabilidade já comprovada em diversos trabalhos científicos.

Sendo assim, utilizando parâmetros reais de um sistema de distribuição, simulamos diversas ocorrências que pudessem causar o aparecimento de fenômenos perturbadores da Qualidade da Energia, por intermédio do *software* ATP, e, posteriormente com este banco de dados, foi possível validar o programa computacional desenvolvido no *software* MATLAB, para detectar e identificar as ocorrências de perturbações em um dado sistema elétrico.

5.2 O sistema de distribuição utilizado

Utilizando o sistema de distribuição fornecido pela CPFL, e conforme diagrama unifilar apresentado na Figura 32, é possível termos uma visão global do sistema, localizando os diversos componentes que constituem o mesmo. 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 frequência amostral similar, como por exemplo, o *BMI (Basic Measuring Instrument)* modelo 7100, cuja frequência é em torno de 7,7 kHz [38].

Figura 32: Diagrama unifilar do sistema elétrico de distribuição da CPFL

Neste circuito, 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 CPFL, mostrados em cinza no diagrama acima. Já para os demais, considerou-se somente o seu ponto 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 o indicado na Figura 32. Cabe, ainda, destacar que tanto os transformadores de distribuição, quanto os particulares apresentam ligações delta-estrela aterrado. A característica dos transformadores particulares é mostrada pela Tabela 5, que representa as potências (carga nominal) e os respectivos fatores de potências.

Tabela 5 – Dados dos transformadores particulares.

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

Os transformadores de distribuição apresentam as características como mostrado na Tabela 6, e seus fatores de potência, em geral, são considerados como 0,9538 para se definir a carga RL no lado secundário. Deve-se lembrar que todos os transformadores de distribuição são do tipo delta-estrela aterrado, com resistência de aterramento de zero ohm e tap ajustado de 13.200/220 Volts.

Com relação aos bancos de capacitores presentes no sistema, estes são em numero de três, e estão instalados ao longo do sistema (BC1, BC2 e BC3). Sendo assim, o primeiro banco de capacitor (BC1), é um banco fixo de 1200 kVAr, instalado na prática a 476 metros da subestação, no ponto Ch1, como pode ser visto na Figura 32. Os outros dois bancos (BC2 e BC3) situados nos pontos Ch1 e Ch3 são de 600 kVAr cada um, distanciados de 476 e 1.176 metros da subestação, respectivamente.

Os bancos de capacitores (BC2 e BC3) não existem na prática, apenas foram simulados neste sistema para analisar as respostas e igualmente, obter dados de oscilações transitórias. Vale ressaltar que os três bancos de capacitores nunca estarão em operação ao mesmo tempo e eles só serão utilizados neste estudo para gerar dados de oscilações transitórias, embora estes bancos tenham funções importantes em um sistema de distribuição. Para a simulação dos dados de oscilação transitória o banco BC2 se manteve ligado (obtendo-se a condição de regime na presença do banco) e, em seguida, efetuou-se o chaveamento apenas do banco BC3 para a obtenção dos dados. Desta forma o BC1 não foi utilizado nesta situação.

Tabela 6 – Dados dos transformadores de distribuição.

Transformadores de distribuição	Carga Nominal	Carga Incidente	Fator de Potência da Carga
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

O alimentador principal é constituído por um cabo nu, modelo CA-477 MCM, em estrutura aérea convencional com comprimento total de 1.576 metros, e seus trechos são representados por elementos RL mutuamente acoplados. O sistema também possui um alimentador secundário, onde estão localizados os transformadores de distribuição 11, 12 e 14 e o transformador particular 4. Neste alimentador secundário, o modelo do cabo é 1/0 AWG, com comprimento de 233 metros [36, 37].

5.3 Simulação dos distúrbios

Utilizando o *software* ATP, foram realizadas diversas simulações para o sistema de distribuição mostrado na Figura 32, obtendo um conjunto de casos que representam as diversas situações que podem ocorrer no sistema elétrico em questão.

Estes dados serão aplicados no programa computacional desenvolvido, para detectar os problemas de Qualidade da Energia nos diversos pontos do sistema estudado.

Para melhor identificação destes distúrbios, estaremos simulando casos de afundamento de tensão, elevação de tensão e oscilações transitórias. A Figura 33 apresenta a forma de onda sem qualquer tipo de perturbação, medida na subestação, para o sistema a ser simulado e estudado neste trabalho (Figura 32).

Figura 33: Forma de onda de tensão, sem perturbações, medida na subestação do sistema elétrico de distribuição em estudo.

5.3.1 Simulação de falta Fase-Terra

O primeiro caso a ser estudado foi a simulação de falta Fase-Terra para caracterizar o aparecimento de afundamentos e elevações de tensão, considerando os ângulos de incidência de falta de 0° e 90° .

Para todos os casos simulados a medição foi realizada na subestação. São apresentados na Tabela 7, os casos de afundamento de tensão, e a Tabela 8, com os casos de elevação de tensão, caracterizando os mesmos em função da localização e resistência da falta e amplitudes da forma de onda resultante.

Tabela 7 – Caracterização das simulações do sistema para afundamento de tensão.

<i>Casos</i>	<i>Localização da Falta</i>	<i>Ângulo de Incidência (°)</i>	<i>Resistência de Falta (Ω)</i>	<i>Afundamento de tensão obtida (%)</i>
1	T13	0 e 90	9	10
2	Ch3	0 e 90	6	15
3	Ch3	0 e 90	4	20
4	Ch3	0 e 90	3	25
5	T13	0 e 90	2	30
6	Subestação	0 e 90	2	35
7	T13	0 e 90	1	40
8	T13	0 e 90	0,5	45
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
17	Subestação	0 e 90	0,1	90

Ressaltamos que foram obtidos os mesmos resultados, em se tratando de amplitude dos distúrbios, para os ângulos de incidência de falta de 0° e 90° .

O fenômeno de afundamento de tensão, apresentado na Figura 34, tomado como exemplo o caso 4 da Tabela 7, escolhido de forma aleatória, está representando o sinal

medido na subestação (vide Figura 32), para uma situação de falta Fase-Terra, aplicado no ponto Ch3, a 1.176 metros da subestação, com ângulo de incidência de 0° e resistência de falta de 3Ω . Neste caso especificamente, teremos um afundamento de tensão da ordem de 25% em relação à amplitude do sinal em regime. Os demais casos apresentados na Tabela 7, igualmente apresentarão formas de ondas semelhantes ao da Figura 34, modificando-se apenas a amplitude do afundamento da tensão.

Figura 34: Representação de um afundamento de tensão de 25%.

Da mesma forma, apresentamos a Tabela 8, a seguir, com as simulações que caracterizam o fenômeno de elevação de tensão.

E para ilustrarmos o fenômeno de elevação de tensão, escolheremos o Caso 4 da Tabela 8, também escolhido aleatoriamente, que representa o sinal medido na subestação (vide Figura 32), para uma situação de falta Fase-Terra, aplicado no transformador particular Tp4, com ângulo de incidência de 0° e resistência de falta de 1Ω . A Figura 35 apresenta a elevação de tensão ocorrida, da ordem de 25% em relação à amplitude do sinal em regime.

Tabela 8 – Caracterização das simulações do sistema para elevações de tensão.

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	15
3	Tp4	0 e 90	2	20
4	Tp4	0 e 90	1	25
5	Tp4	0 e 90	0,5	30
6	Ch1	0 e 90	1	35
7	Ch1	0 e 90	0,7	40
8	Ch1	0 e 90	0,5	45
9	Subestação	0 e 90	0,5	50
10	Subestação	0 e 90	0,4	55
11	Ch1	0 e 90	0,05	60
12	Subestação	0 e 90	0,1	65
13	Subestação	0 e 90	0,04	70

Os demais casos apresentados na Tabela 8, possuem características semelhantes ao da Figura 35, variando apenas a amplitude da onda de tensão referente ao fenômeno da elevação de tensão.

Figura 35: Representação da elevação de tensão de 25%.

5.3.2 Simulação do chaveamento de banco de capacitores

Para a obtenção de dados referentes a oscilações transitórias, foram utilizados os bancos de capacitores BC2 e BC3, situados nos pontos Ch1 e Ch3, respectivamente. O chaveamento foi realizado no ponto Ch3 (banco BC3), estando o banco BC2 ligado em regime permanente. Todos estes pontos e elementos estão identificados e localizados na Figura 32. A Tabela 9 apresenta 12 casos de oscilações transitórias, simulados no sistema estudado, sendo que os casos de 1 a 6 foram medidos no lado de baixa tensão (200 V) do transformador particular Tp4, e transformadores de distribuição T13 e T3. E os outros 6 casos, de 7 a 12, foram medidos no lado de alta dos transformadores (13,8 kV). Nestes casos, variou-se também o ângulo de incidência, 0° e 90°.

Tabela 9 – Caracterização das simulações do sistema para oscilações transitórias.

	<i>Casos</i>	<i>Banco Chaveado</i>	<i>Ângulo de Incidência</i>	<i>Local da medição</i>
<i>Lado de baixa do trafo (200V)</i>	1	BC3	0°	Tp4
	2	BC3	90°	Tp4
	3	BC3	0°	T13
	4	BC3	90°	T13
	5	BC3	0°	T3
	6	BC3	90°	T3
<i>Lado de alta do trafo (13,8 kV)</i>	7	BC3	0°	Subestação
	8	BC3	90°	Subestação
	9	BC3	0°	T1 e T2
	10	BC3	90°	T1 e T2
	11	BC3	0°	T8 e T9
	12	BC3	90°	T8 e T9

A Figura 36 apresenta o Caso 6 da Tabela 9, referente ao chaveamento do banco de capacitor BC3, no ponto Ch3 do sistema mostrado na Figura 32, estando o banco BC2 ligado em regime permanente. O ângulo de inserção para este caso foi de 90°. Os demais casos, não serão apresentados, por apresentarem características semelhantes ao da Figura 36.

Figura 36: Representação de oscilação transitória, devido ao chaveamento do banco de capacitores BC3.

5.4 Comentários gerais

No sistema estudado, quer seja com a ocorrência de uma falta Fase-Terra ou a energização de banco de capacitores, foi possível identificar as distorções ocorridas nas formas de onda de tensão.

Do mesmo modo foi possível verificar que o local de monitoramento/medição e distância da ocorrência dos distúrbios em relação a este ponto de medição foram dados importantes para uma análise dos resultados. A intensidade dos distúrbios é maior à medida que se aproxima do local da falta ou do local onde é efetuada a manobra de chaveamento do banco de capacitores. Neste caso específico, do chaveamento de bancos de capacitores, esta informação é importante, pois podemos prevenir a ocorrência de danos em equipamentos, tanto pertencentes às concessionárias, quanto aos usuários, simplesmente evitando a instalação de equipamentos mais sensíveis nas proximidades destes bancos de capacitores.

De forma geral, é importante destacar que a presença das perturbações nas formas de onda de tensão presente no sistema, dentre outros distúrbios, é também importante, e, deve merecer uma atenção especial dos engenheiros responsáveis pelo gerenciamento de um sistema elétrico. A preocupação com a Qualidade da Energia propicia um sistema mais regulado e sujeito à diminuição de danos nos equipamentos, prevalecendo assim uma maior economia com os processos de manutenção e reposição destes equipamentos.

Com estas simulações, o objetivo foi demonstrar algumas perturbações ocorridas nas formas de onda da tensão, quer seja por manobras previsíveis, como o chaveamento de banco de capacitores, bem como por fenômenos não esperados, como por exemplo, uma falta Fase-Terra.

Portanto, conhecendo os prováveis problemas que afetam a qualidade do fornecimento de energia em um dado sistema, devemos então nos precaver das conseqüências, que podem afetar seriamente o seu funcionamento normal. Porém é de igual importância, além de conhecer, profundamente, os fenômenos e seus efeitos, identificar o local da ocorrência do mesmo e o tempo em que estes ocorreram. Com isso poderemos estabelecer um plano de prevenção e, com as devidas providências tomadas a tempo, minimizar ou mesmo eliminar seus efeitos que, certamente, tenderão a danificar os equipamentos, circuitos alimentadores e até a colocar em situação de risco as pessoas que trabalham neste sistema em específico.

No próximo capítulo, dispondo destes dados, e de ferramentas matemáticas, no caso a Transformada Rápida de Fourier Janelada, buscaremos a apresentar a lógica computacional implementada, que vem identificar o tempo de início do distúrbio, sua duração e classificação, ou seja, determinando se o distúrbio que ocorreu foi um afundamento de tensão, elevação de tensão ou, ainda, uma oscilação transitória.

CAPÍTULO 6

A Transformada Rápida de Fourier Janelada, aplicada na classificação do distúrbio

Considerando toda a base teórica apresentada e as simulações dos dados obtidos, a partir de um sistema elétrico de distribuição da CPFL, Figura 32 – Capítulo 5, apresentaremos, agora, o algoritmo computacional implementado para detectar os distúrbios causadores da falta da Qualidade da Energia em um sistema elétrico.

A lógica computacional desenvolvida teve por base os estudos apresentados por G. T. Heydt [29], onde de forma semelhante, os dados obtidos, através de medições no sistema, são submetidos à análise e posteriormente classificados os tipos de distúrbios ocorridos.

Inicialmente, estaremos concentrando estas análises para detectar os afundamentos e elevações de tensão e as oscilações que tenham ocorrido em um dado conjunto de medições, porém, ressaltamos que o programa permite futuras implementações a fim de que outros fenômenos referentes à Qualidade da Energia possam ser estudados.

Para validação dos resultados apresentados pelo programa computacional, estaremos comparando com os resultados já, previamente, apresentados nas Tabelas 7, para afundamento de tensão, Tabela 8 para elevação de tensão e, finalmente, Tabela 9 para as oscilações transitórias. Cumpre lembrar que estes dados foram obtidos de simulações efetuadas, por intermédio do *software* ATP, no sistema de distribuição real da CPFL.

6.1 A lógica computacional desenvolvida

O algoritmo a ser utilizado para análise dos dados referentes à Qualidade da Energia de um sistema elétrico foi desenvolvido na linguagem de programação MATLAB, principalmente por esta ferramenta possuir as funções pré-definidas que serão utilizadas para detecção do tipo de distúrbio que está ocorrendo em um dado sinal. Destas funções, a principal é a Transformada Rápida de Fourier Janelada, e dentre as demais, as rotinas de representação gráfica das formas de onda, as análises no tempo e na frequência.

A Figura 37 mostra um diagrama de blocos do programa computacional implementado para detecção dos distúrbios relacionados com a Qualidade da Energia de um determinado conjunto de dados. Os blocos preenchidos na cor cinza são os tipos de distúrbios que foram implementados neste programa, e os demais podem ser posteriormente incluídos.

Os tipos de distúrbios a serem estudados neste primeiro momento, ou seja, afundamento e elevação de tensão e ainda as oscilações transitórias, foram escolhidos por serem de grande ocorrência, conforme encontrado na literatura e, também, por terem sido simulados, a partir de dados reais fornecidos pela CPFL. Desta forma, uma vez que possuímos um banco de dados com simulações destes fenômenos, quais sejam, afundamento e elevação de tensão e oscilações transitórias, e ao utilizarmos os mesmos para a validação da lógica computacional desenvolvida, certamente estaremos buscando resultados e análise mais confiáveis sobre os fenômenos que interferem na Qualidade da Energia de um sistema elétrico.

6.2 Estrutura do programa

Como já apontado, o programa computacional implementado traz como objetivo uma lógica de análise dos sinais em condições normais ou não de operação, sendo o mesmo desenvolvido no MATLAB.

Figura 37 – Diagrama de blocos da lógica computacional desenvolvida para detecção de distúrbios.

A detecção do distúrbio é feita através de uma comparação entre o sinal original (sem distúrbio) e o sinal com distúrbio, comparando os sinais rms dos respectivos sinais. A detecção do início do distúrbio se dá no momento em que o nível rms dos sinais se altera. Já a detecção do instante final é mais complexa, visto que há uma resposta do próprio sistema, cujo valor rms é elevado em comparação com o sinal original, sendo, portanto necessário o estabelecimento de um limitante superior, que pode ser especificado, dependendo da resposta do sistema em estudo.

O programa possui a seguinte estrutura básica:

6.2.1 Entrada dos dados

A entrada de dados consiste na separação do sinal de entrada: definição do eixo do tempo, do sinal de origem e do sinal com distúrbio e definição do tamanho da janela a ser utilizada. O programa permite a análise de diversos tipos de sinais, desde que sigam a estrutura básica de declaração de vetores do MATLAB e com as seguintes restrições:

- a) O vetor de tempo tem que ser fornecido para análise;
- b) A análise em frequência é realizada via algoritmo de computação da Transformada Rápida de Fourier Janelada, logo o parâmetro “taxa amostral” e “números de amostras do sinal” são necessários;
- c) O vetor do sinal de origem, ou seja, o sinal sem distúrbio tem que ser fornecido e o mesmo pode fazer parte de um banco de dados para vários níveis de tensão.

6.2.2 Análise no tempo

A análise no tempo consiste na comparação entre o sinal original e o sinal com distúrbio, identificando possíveis variações de curta duração. Nesta versão, os distúrbios estudados são: afundamento e elevação de tensão e oscilações transitórias. No caso das oscilações transitórias, a análise dos resultados dependerá também do usuário, visto que, as amplitudes de variações deste tipo de distúrbio podem resultar uma redução ou aumento no nível rms do sinal de tensão.

Os valores da duração típica do fenômeno, amplitude da tensão e conteúdo espectral considerados no algoritmo computacional para determinar o tipo característico do distúrbio, foram implementados de acordo com a norma *IEEE Standard 1159-1995* [7] e resumidos na Tabela 10.

*Tabela 10 – Dados de referência para análise do distúrbio
IEEE Standard 1159-1995.*

Categoria	Conteúdo Espectral Típico	Duração Típica	Amplitude de Tensão Típica
1.0 - Transitórios			
1.2 – Oscilatórios			
1.2.1 - Baixa Frequência	< 5 kHz	0,3 - 50 ms	0 - 4 pu
1.2.2 - Média Frequência	5 – 500 kHz	20 μ s	0 - 8 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

6.2.3 Análise na frequência

A análise na frequência consiste na análise espectral do sinal com distúrbio, com o objetivo de verificar as variações do conteúdo de frequência do sinal dois ciclos antes e dois ciclos depois do início e do fim do distúrbio, respectivamente. No caso das análises de sinais com distúrbios decorrentes de elevação ou afundamento de tensão, o conteúdo de frequência do sinal analisado não apresenta grandes variações, resultando a maior contribuição na frequência fundamental.

Cabe comentar que, pode-se variar a largura da janela usada na FFT com o intuito de identificar conteúdo de frequência diferente da fundamental, sendo este tipo de análise indicado para caracterizar, por exemplo, harmônicas.

6.3 Resultados do Programa

Os resultados do programa computacional, implementado para análise dos sinais, são apresentados de duas maneiras para o usuário: por visualização na tela dos dados resultantes, e por visualização gráfica.

6.3.2 Visualização gráfica

Os seguintes gráficos serão apresentados pela lógica computacional implementada, a cada situação em análise. Por exemplo, a Figura 39 apresenta a comparação entre o sinal original e o sinal com distúrbio, incluindo o erro, ou seja, a diferença entre estes dois sinais.

Figura 39 – Ondas do sinal original e do sinal analisado.

A Figura 40 representa a análise do espectro de frequência do sinal com distúrbio, dois ciclos antes do início do distúrbio e dois ciclos depois do fim do distúrbio. Esta é a segunda figura que é apresentada pelo programa computacional desenvolvido.

Figura 40 – Análise do espectro da frequência do sinal analisado.

Uma ferramenta interessante que é desenvolvida pelo *software* MATLAB, e utilizada neste programa, é o espectro de cores. Esta representação nos permite perceber visualmente as componentes de frequência em um certo intervalo de tempo, identificando assim qual frequência é a predominante, em Hz. Para melhor entendermos o significado das cores, a Figura 41 representa a barra de cores com a respectiva frequência, segundo sua tonalidade.

Figura 41 – Barra de cores, segundo a frequência (Hz) característica.

Observando a Figura 40, e comparando a janela que contém a onda senoidal do sinal e a janela onde é representado o espectro de cores, no instante em que iniciou e finalizou o distúrbio, percebe-se claramente a alteração da forma de onda senoidal (diminuição e depois aumento da amplitude, bem como o aparecimento de

perturbações), e uma variação nas tonalidades da cor, indicando a presença de frequências, diferente de 60 Hz (representada pela cor mais avermelhada) conforme a barra de cores apresentada na Figura 41. Desta forma, com este tipo de figura, facilita a detecção visual da presença de outras frequências diferentes da frequência fundamental 60 Hz.

E, finalmente, a Figura 42, representa as componentes de frequência presentes no sinal, indicando a amplitude e os valores das frequências. Esta é a terceira figura a ser apresentada pelo programa computacional implementado.

Figura 42 – Componentes da frequência.

6.4 Considerações sobre o programa

O programa computacional, desenvolvido em linguagem do MATLAB, utilizando as ferramentas disponíveis neste aplicativo, principalmente a Transformada Rápida de Fourier Janelada, permite uma avaliação com bastante precisão, de um dado sinal de tensão, caracterizando tanto de forma numérica quanto gráfica, o tipo de distúrbio ocorrido (afundamento de tensão, elevação de tensão, e oscilação transitória), o tempo de duração em segundos e em ciclos, e a porcentagem máxima de variação da amplitude de tensão, sempre em relação ao sinal original sem distúrbio.

Os gráficos apresentam formas da onda de tensão e barras de frequência, que são bastante utilizados em análises deste tipo, além de permitir uma maior facilidade visual na verificação das diferentes componentes de frequência presentes no sinal, quando utilizado o espectro de cores.

Outro dado interessante fornecido graficamente pela lógica computacional desenvolvida neste trabalho é a diferença entre o sinal original sem distúrbio e o sinal com distúrbio, demonstrando, claramente, que tanto no início quanto no final de uma dada perturbação ocorrem oscilações importantes, sendo mais acentuada no final do distúrbio. Esta oscilação detectada no final do distúrbio representa uma recuperação do sistema, através de uma resposta natural do mesmo, o que vem dificultar a determinação precisa do tempo final do distúrbio. Devido a estes fenômenos, o programa considera o tempo final do distúrbio, aquele em que a amplitude da onda analisada alcance 82% da amplitude do sinal original, sem distúrbio. Lembramos que este índice pode ser ajustado, sendo escolhido este valor por verificarmos que apresentou menores erros quando comparados com a situação simulada.

No próximo Capítulo, a fim de melhor demonstrarmos estes resultados, e a validade da utilização deste programa computacional ora desenvolvido, estaremos elaborando tabelas comparativas com os resultados obtidos e, ainda, procedendo as análises, devido à variações da largura da janela e frequência de amostragem destes sinais.

CAPÍTULO 7

Análise da Qualidade da Energia para o sistema de distribuição considerado

Neste Capítulo, estaremos efetivamente utilizando os conceitos inicialmente apresentados, bem como da lógica computacional desenvolvida especialmente para o estudo das perturbações e sua classificação em um sistema elétrico. Este programa contempla apenas os fenômenos de afundamento e elevação de tensão e oscilações transitórias. Estes eventos são considerados por muitos autores, como sendo de grande importância e de bastante incidência nos sistemas elétricos, motivo pelo qual concentramos esforços no desenvolvimento de um algoritmo que permita este estudo.

As análises serão efetuadas a partir dos dados obtidos na simulação feita com o *software* ATP, em um sistema real de distribuição fornecido pela CPFL e já apresentado em detalhes no Capítulo 5 deste trabalho.

Os casos a serem analisados neste Capítulo, serão os mesmos casos de afundamento e elevação de tensão e oscilação transitória detalhados nas Tabelas 7, 8 e 9, respectivamente. Nestas Tabelas, estão representadas as simulações e os níveis de afundamentos e elevações, em porcentagem, comparados com o sinal sem distúrbio. Foram identificados afundamentos de 10% (Caso 1), variando-se os mesmos em intervalos de 5 pontos percentuais, até 90 % (Caso 17). Para os casos de elevação de tensão, foi adotado procedimento idêntico ao de afundamento, na identificação do valor percentual de variação da amplitude do sinal de tensão, porém foram utilizados do banco de dados inicialmente simulado, 13 casos. Quanto ao fenômeno da oscilação transitória, foi utilizado os dados de 12 casos obtidos da simulação de chaveamento do banco de capacitores BC3.

Além destas análises, o programa permite, ainda, o estudo da variação do tamanho da janela a ser utilizada, bem como a resposta do programa para diferentes frequências de amostragem.

7.1 Análise dos casos de afundamento de tensão

Conforme apresentado no Capítulo 5, os casos de afundamento de tensão foram simulados com as medições/obtenção dos dados medidos na subestação de energia, considerando os ângulos de incidência de falta Fase-Terra de 0° e de 90° .

Os dados de afundamento de tensão obtidos foram relacionados em 34 casos, sendo 17 casos com ângulo de incidência de 0° e 17 casos com ângulo de incidência de 90° , sendo que cada caso representa as diversas localizações da falta Fase-Terra no sistema elétrico em questão, e, também, com diferentes variações nos valores da resistência de falta.

Todos estes casos foram direcionados ao algoritmo computacional implementado, possibilitando o diagnóstico final da perturbação. Para melhor ilustrar como é o desenvolvimento deste programa, estaremos escolhendo de forma aleatória alguns destes casos para demonstrar os resultados, e, em seguida, uma Tabela completa com todos os demais resultados, comparando as amplitudes e tempos de início e fim do distúrbio, com os dados inicialmente simulados pelo *software* ATP.

A Figura 43 apresenta como é classificado o sinal para uma situação de falta Fase-Terra, a ser aplicada no transformador de distribuição T13 (Figura 32), com ângulo de incidência de 0° e resistência de falta de 9Ω (Caso 1 – Tabela 7). O diagnóstico apresentado foi de afundamento de tensão com redução da amplitude da onda de tensão em torno de 12% (valor máximo).

O tamanho da janela utilizada foi de 1 ciclo (16,677 ms), com frequência amostral de 7.692 kHz.

No relatório final, estão indicados:

- a) O número de pontos do sinal;
- b) A taxa amostral do sinal;
- c) O tempo de início do distúrbio;
- d) O tempo de fim do distúrbio;
- e) O intervalo de duração do distúrbio em segundos e em ciclos;
- f) O percentual máximo do distúrbio, ou seja, a variação da amplitude do sinal e finalmente,
- g) O resultado/diagnóstico da análise.

```

$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
DIAGNÓSTICO DO SINAL
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
>> Dados dos Sinais de Entrada <<

- número de pontos do sinal:

N = 1924

- taxa amostral do sinal [Hz]:

Fs = 7.6923e+003

>> início do distúrbio <<

t_ini = 0.0450

>> fim do distúrbio <<

t_fim = 0.0913

>> intervalo de duração do distúrbio <<

td = 0.0463

>> no. ciclos de duração do distúrbio (1 ciclo = 16.677ms) <<

ciclos = 2.7768

>> percentual máximo do distúrbio <<

p100_max = 11.4415

>> resultado da análise <<
-----
>> AFUNDAMENTO <<
-----

```

Figura 43: Diagnóstico do sinal referente ao Caso 1, afundamento de tensão e ângulo de incidência de 0° .

A Figura 44 apresenta as três formas de representação gráfica resultantes do algoritmo, sendo o item “a” a forma de onda senoidal, comparando o sinal original e o sinal com distúrbio, incluindo ainda o erro, ou seja, a diferença entre estes dois sinais. O

item “b” apresenta a análise do espectro de frequência do sinal com distúrbio, dois ciclos antes e dois ciclos depois do fenômeno ter ocorrido, bem como o espectro de cores para melhor identificarmos as diferentes frequências existentes. Finalmente no item “c”, temos o gráfico de barras das componentes de frequência do sinal.

a) Comparação entre os sinais.

b) Espectro de frequência.

c) Componentes da frequência.

Figura 44: Representação gráfica do Caso 1 - afundamento de tensão.

Dando continuidade à apresentação dos resultados obtidos da análise computacional, estaremos demonstrando agora, o Caso 3 – Tabela 7, também selecionado de forma aleatória, que representa uma situação de falta Fase-Terra, com as mesmas características do caso anterior. O que diferencia é que a falta foi aplicada na localização do banco de capacitores Ch3 (Figura 32), com uma resistência de falta de 4Ω . Os resultados estão ilustrados na Figura 45 a seguir. A Figura 46 apresenta os três tipos de gráficos obtidos, decorrentes da análise dos distúrbios que se refere ao caso escolhido, ou seja, o Caso 3.

Podemos destacar neste caso, a facilidade de visualização e identificação de diferentes frequências que estão presentes neste evento, tanto pelo espectro de cores, que apresenta variações no início e fim do distúrbio, quanto pelo gráfico de barras, que indica as diferentes componentes de frequência existentes neste evento.

```

$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
          DIAGNÓSTICO DO SINAL
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
>> Dados dos Sinais de Entrada <<
- número de pontos do sinal:

N = 1924

- taxa amostral do sinal [Hz]:

Fs = 7.6923e+003

>> inicio do distúrbio <<

t_ini = 0.0447

>> fim do distúrbio <<

t_fim = 0.1026

>> intervalo de duração do distúrbio <<

td = 0.0578

>> no. ciclos de duração do distúrbio (1 ciclo = 16.677ms) <<

ciclos = 3.4710

>> percentual máximo do distúrbio <<

p100_max = 22.1803

>> resultado da análise <<
-----
>> AFUNDAMENTO <<
-----

```

Figura 45: Diagnóstico do sinal referente ao Caso 3, afundamento de tensão e ângulo de incidência de 0°.

a) Comparação entre os sinais.

b) Espectro de frequência.

c) Componentes da frequência.

Figura 46: Representação gráfica do Caso 3 - afundamento de tensão.

Foram realizadas análises semelhantes a estes dois casos apresentados, para todos os demais casos de afundamento de tensão apresentados anteriormente, tanto para ângulo de incidência de 0° como 90° , sendo os resultados obtidos conforme apresentado na Tabela 11, para casos cujo ângulo de incidência foi de 0° e na Tabela 12, para os casos cujo ângulo de incidência foi de 90° . Nestas tabelas, cada caso é identificado, o tempo em que se deu o início do distúrbio, o tempo final, o número de ciclos de duração do distúrbio, a porcentagem de afundamento de tensão ocorrida e, finalmente, na última coluna, a diferença percentual entre o valor referente ao afundamento de tensão obtido com o algoritmo computacional desenvolvido, utilizando a Transformada Rápida de Fourier Janelada, em relação ao valor simulado pelo programa ATP.

Os tempos programados na simulação inicial (programa ATP), foram de 0,0445 segundo para tempo de início do distúrbio e 0,0945 segundo para o tempo final da simulação.

Considerando que utilizaremos os dados apresentados na Tabela 1 (*IEEE Standard 1159-1995*) como referência para análise dos distúrbios, e que a duração típica tanto para afundamento de tensão quanto para elevação de tensão, possuem intervalos

de 0,5 a 30 ciclos, será, portanto, neste estudo, caracterizado o tipo de fenômeno ocorrido comparando a variação da amplitude do sinal no intervalo de tempo em que ocorreu o distúrbio.

Tabela 11 – Resultado das simulações do sistema para afundamento de tensão, para ângulo de incidência de falta de 0°.

<i>Casos</i>	<i>Localização da Falta</i>	<i>Tempo início distúrbio (seg)</i>	<i>Tempo final distúrbio (seg)</i>	<i>Número de ciclos de duração distúrbio</i>	<i>Afundamento de tensão obtida (%)</i>	<i>Relação entre as amplitudes simuladas (ATP) e obtida no programa computacional</i>
1	T13	0,0449	0,0913	2,7768	11,4415	14,4%
2	Ch3	0,0449	0,0961	3,0732	16,3038	8,6%
3	Ch3	0,0447	0,1026	3,4710	22,1803	10,9%
4	Ch3	0,0447	0,1101	3,9234	26,8891	7,5 %
5	T13	0,0449	0,1160	4,2666	31,8855	6,2%
6	Subestação	0,0447	0,2500	12,3162	40,6330	16,1%
7	T13	0,0449	0,1219	4,6254	41,1583	2,8%
8	T13	0,0449	0,1231	4,6956	48,4865	7,7%
9	Ch1	0,0447	0,1452	6,0294	52,0196	4,0%
10	Ch1	0,0447	0,1793	8,0730	56,1141	2,0%
11	Ch1	0,0447	0,2033	9,5160	60,9626	1,6%
12	Subestação	0,0447	0,2500	12,3162	71,1128	9,4%
13	Subestação	0,0447	0,2500	12,3162	75,0725	7,2%
14	Subestação	0,0447	0,2500	12,3162	79,0829	5,4%
15	Subestação	0,0447	0,2500	12,3162	83,5611	4,4%
16	Subestação	0,0447	0,2500	12,3162	88,6081	4,2%
17	Subestação	0,0447	0,2500	12,3162	94,0186	4,4%

Tabela 12 – Resultado das simulações do sistema para afundamento de tensão, para ângulo de incidência de falta de 90°.

<i>Casos</i>	<i>Localização da Falta</i>	<i>Tempo início distúrbio (seg)</i>	<i>Tempo final distúrbio (seg)</i>	<i>Número de ciclos de duração distúrbio</i>	<i>Afundamento de tensão obtida (%)</i>	<i>Relação entre as amplitudes simuladas (ATP) e obtida no programa computacional</i>
1	T13	0,0489	0,0996	3,0420	11,4912	14,9 %
2	Ch3	0,0489	0,1044	3,3306	16,5618	10,4 %
3	Ch3	0,0489	0,1110	3,7284	22,4064	12,0 %
4	Ch3	0,0489	0,1175	4,1184	27,2245	8,9 %
5	T13	0,0489	0,1243	4,5240	31,8400	6,1 %
6	Subestação	0,0489	0,2500	12,0666	40,6511	16,1 %
7	T13	0,0489	0,1283	4,7658	41,0321	2,6 %
8	T13	0,0489	0,1314	4,9530	49,7350	10,5 %
9	Ch1	0,0489	0,2500	12,0666	51,9700	3,9 %
10	Ch1	0,0489	0,1630	6,8484	56,1112	2,0 %
11	Ch1	0,0489	0,1732	7,4568	60,8562	1,4 %
12	Subestação	0,0489	0,2500	12,0666	71,1114	9,4 %
13	Subestação	0,0489	0,2500	12,0666	74,9180	7,0 %
14	Subestação	0,0489	0,2500	12,0666	79,0318	5,4 %
15	Subestação	0,0489	0,2500	12,0666	83,5940	4,5 %
16	Subestação	0,0489	0,2500	12,0666	88,6129	4,2 %
17	Subestação	0,0489	0,2500	12,0666	93,9908	4,4 %

Os resultados obtidos foram bastante satisfatórios, tendo sido detectado um desvio médio menor que 1%, referente ao tempo em que se deu o início dos distúrbios, comparado aos valores inicialmente definidos pelo programa ATP (tempo de início de 0,0445 segundo) e o tempo de início detectado por este algoritmo (0,0448 segundo em média), valores estes para ângulo de incidência de 0° e 90°.

Quanto ao tempo final do distúrbio, os valores encontrados, que em média foram de 0,1788 segundos, considerando os ângulos de incidência de 0° e 90°, vale ressaltar que esta diferença significativa entre o valor definido pelo programa ATP (0,0945 seg) e o valor medido por este algoritmo se deve, principalmente, à dificuldade real de se determinar quando termina o distúrbio e se inicia o processo de amortecimento natural

do sistema. Este efeito pode ser observado nas representações gráficas apresentadas referentes aos casos de afundamento de tensão 1 e 3, escolhidos como exemplo, especificamente na Figura 44 (a) e Figura 46 (a).

Quanto às amplitudes da forma de onda de tensão, também comparando com o banco de dados, obtido através do programa ATP, houve uma diferença entre estes valores, da ordem de 7,0% em média.

Considerando que a determinação do tipo de distúrbio que ocorreu no sistema, foi definido mediante a comparação dos valores estabelecidos na Tabela 1 (*IEEE Standard 1159-1995*), podemos então identificar o Caso 17 como interrupção de tensão. Neste caso, a amplitude da onda alcançou o valor de afundamento de, aproximadamente, 94% (Caso 17 da Tabela 11 e 12), valor este que indica que a amplitude da onda de tensão é menor que 0,1 pu o que caracteriza uma variação instantânea de curta duração do tipo Interrupção.

A Figura 47 apresenta graficamente o diagnóstico do sinal referente ao Caso 17, para ângulo de incidência de 0° , que é semelhante ao encontrado para ângulo de incidência de 90° .

Figura 47: Diagnóstico do sinal referente ao Caso 17
interrupção de tensão.

Quanto ao afundamento de tensão, e comparando os dados gerados (simulados) pelo programa ATP, o algoritmo computacional implementado classificou como afundamento de tensão 32 dos 34 casos analisados (considerando os ângulos de incidência de 0° e 90°), apresentando uma concordância de 94% em relação ao banco de dados utilizado.

7.2 Análise dos casos de elevação de tensão

Da mesma forma que no item anterior (7.1), apresentaremos a seguir os casos referentes à elevação de tensão. Estes casos, igualmente, foram obtidos através das simulações realizadas no sistema fornecido pela CPFL, apresentado do Capítulo 5, considerando os ângulos de incidência de falta Fase-Terra de 0° e 90° .

Os dados de elevação de tensão alcançados foram caracterizados em 26 casos, sendo 13 casos simulados com ângulo de incidência de 0° e 13 casos com ângulo de incidência de 90° . Da mesma forma que no item anterior, todos os casos representam as diversas localizações da falta Fase-Terra no sistema elétrico em questão, com diferentes valores de resistência de falta.

Estaremos ilustrando os resultados da análise computacional para dois casos de elevação de tensão, escolhidos também de forma aleatória, como no caso anterior.

A Figura 48 apresenta o diagnóstico do sinal para uma situação de falta Fase-Terra, aplicada na subestação (Figura 32), com ângulo de incidência de 0° e resistência de falta de 5Ω (Caso 1- Tabela 8). O diagnóstico apresentado foi de elevação de tensão com aumento da amplitude da onda de tensão, em torno de 15%.

O tamanho da janela utilizada foi de 1 ciclo (16,677 ms), com frequência amostral de 7.692 Hz.

A Figura 49 apresenta as três formas de saída gráfica desenvolvidas neste programa, sendo o item “a” a forma de onda senoidal, comparando o sinal original e o sinal com distúrbio, incluindo o erro, ou seja, a diferença entre estes dois sinais. O item “b” apresenta a análise do espectro de frequência do sinal com distúrbio, dois ciclos antes e dois ciclos depois do fenômeno ocorrido, bem como o espectro de cores para melhor identificarmos a variedade de frequência existente. Finalmente, o item “c” o gráfico de barras das componentes de frequência do sinal é apresentado.

\$

DIAGNÓSTICO DO SINAL

\$

>> Dados dos Sinais de Entrada <<

- número de pontos do sinal:

N = 1924

- taxa amostral do sinal [Hz]:

$$F_s = 7.6923e+003$$

>> inicio do distúrbio <<

$$t_{ini} = 0.0447$$

>> fim do distúrbio <<

$$t_{\text{fim}} = 0.0935$$

>> intervalo de duração do distúrbio <<

$$td = 0.0487$$

>> no. ciclos de duração do distúrbio (1 ciclo = 16.677ms) <<

ciclos = 2.9250

>> percentual máximo do distúrbio <<

p100_max = 15.4216

>> resultado da análise <<

>> ELEVAÇÃO <<

Figura 48: Diagnóstico do sinal referente ao Caso 1, elevação de tensão e ângulo de incidência de 0° .

A seguir a Figura 49, apresenta os três tipos de representações gráficas, para o Caso 1 de elevação de tensão.

a) Comparação entre os sinais.

b) Espectro de frequência.

c) Componentes da frequência.

Figura 49: Representação gráfica do Caso1 – elevação de tensão.

Continuando na demonstração das formas de apresentação dos resultados quando utilizamos a lógica computacional desenvolvida, apresentamos agora, o Caso 8 – Tabela 8, que também representa uma situação de falta Fase-Terra, com as mesmas características do caso anterior, porém, para uma falta aplicada no banco de capacitores Ch1 (Figura 32) e com uma resistência de falta de $0,5 \Omega$.

Os resultados apresentados nas Figuras 50 e 51 representam os dados e gráficos obtidos respectivamente para este caso.

\$

DIAGNÓSTICO DO SINAL

\$

>> Dados dos Sinais de Entrada <<

- número de pontos do sinal:

N = 1924

- taxa amostral do sinal [Hz]:

$$F_s = 7.6923e+003$$

>> início do distúrbio <<

$$t_{ini} = 0.0456$$

>> fim do distúrbio <<

$$t_{\text{fim}} = 0.1245$$

>> intervalo de duração do distúrbio <<

 td = 0.0789 |

>> no. ciclos de duração do distúrbio (1 ciclo = 16.677ms) <<

ciclos = 4.7346

>> percentual máximo do distúrbio <<

p100_max = 46.8229

>> resultado da análise <<

2010 2011 2012 2013 2014 2015 2016 2017 2018 2019 2020 2021 2022 2023 2024 2025 2026 2027 2028 2029 2030

>> ELEVAÇÃO <<

Full text available at www.ijerph.org

Figura 50: Diagnóstico do sinal referente ao Caso 8, elevação de tensão e ângulo de incidência de 0° .

De forma análoga ao item anterior, apresentaremos a seguir os gráficos característicos da situação caracterizada sobre o sistema.

a) Comparação entre sinais.

b) Espectro de frequência.

c) Componentes da frequência.

Figura 51: Representação gráfica do Caso 8 – elevação de tensão.

Foram realizadas análises semelhantes a estes dois casos apresentados, para todos os demais casos de elevação de tensão apresentados anteriormente, tanto para ângulo de incidência de 0° como 90° , sendo os resultados obtidos conforme apresentado na Tabela 13, para casos cujo ângulo de incidência foi de 0° e na Tabela 14, para os casos cujo ângulo de incidência foi de 90° .

Tabela 13 – Resultado das simulações do sistema para elevação de tensão, para ângulo de incidência de falta de 0°.

<i>Casos</i>	<i>Localização da Falta</i>	<i>Tempo início distúrbio (seg)</i>	<i>Tempo final distúrbio (seg)</i>	<i>Número de ciclos de duração distúrbio</i>	<i>Elevação da tensão obtida (%)</i>	<i>Relação entre as amplitudes simuladas (ATP) e obtida no programa computacional</i>
1	Subestação	0,0447	0,0935	2,8704	15,2676	52,6 %
2	Tp4	0,0450	0,0984	3,1512	17,7962	18,6 %
3	Tp4	0,0450	0,0988	3,1824	21,6181	8,0 %
4	Tp4	0,0450	0,1056	3,5880	27,0678	8,2 %
5	Tp4	0,0450	0,1058	3,6426	30,5045	1,7 %
6	Ch1	0,0454	0,1069	3,6738	38,3725	9,6 %
7	Ch1	0,0454	0,1208	4,5084	43,0127	7,5 %
8	Ch1	0,0456	0,1245	4,7346	46,8229	4,5 %
9	Subestação	0,0447	0,2500	12,3162	55,0237	10,0 %
10	Subestação	0,0447	0,2500	12,3162	57,9963	5,4 %
11	Ch1	0,0452	0,1249	4,7580	62,0821	3,4 %
12	Subestação	0,0447	0,1642	7,1682	68,9129	6,0 %
13	Subestação	0,0447	0,2500	12,3162	74,9639	7,0 %

Tabela 14 – Resultado das simulações do sistema para elevação de tensão, para ângulo de incidência de falta de 90°.

<i>Casos</i>	<i>Localização da Falta</i>	<i>Tempo início distúrbio (seg)</i>	<i>Tempo final distúrbio (seg)</i>	<i>Número de ciclos de duração distúrbio</i>	<i>Elevação da tensão obtida (%)</i>	<i>Relação entre as amplitudes simuladas (ATP) e obtida no programa computacional</i>
1	Subestação	0,0489	0,1018	3,1746	15,7216	57,2%
2	Tp4	0,0489	0,1058	3,4164	17,9608	19,7 %
3	Tp4	0,0489	0,1091	3,6114	22,0395	10,2%
4	Tp4	0,0489	0,1139	3,9000	27,7810	11,1%
5	Tp4	0,0489	0,1141	3,9156	31,6219	5,4%
6	Ch1	0,0489	0,1290	4,8048	40,6511	16,1%
7	Ch1	0,0489	0,1291	4,8126	44,0157	10,0%
8	Ch1	0,0489	0,1292	4,8204	48,4345	7,6%
9	Subestação	0,0489	0,2500	12,0666	56,5696	13,1%
10	Subestação	0,0489	0,2217	10,3662	59,6597	8,5%
11	Ch1	0,0489	0,1296	4,8438	63,2449	5,4%
12	Subestação	0,0489	0,2500	12,0666	70,7461	8,8%
13	Subestação	0,0489	0,2500	12,0666	73,3664	4,8%

Os dados apresentados nas Tabelas 12 e 13 apresentam desvios médios referentes ao tempo de início dos distúrbios, menor que 1%, quando comparados com os dados inicialmente aplicados, utilizando o programa ATP, valores estes semelhantes aos identificados quando analisamos afundamento de tensão. O tempo final do distúrbio apresentou diferenças maiores, pelo fato de existir um processo de amortecimento natural do sistema antes da estabilização total, o que acarretou em variação nesta definição entre o fim do distúrbio propriamente a ser analisado e início deste processo de amortecimento.

Referente à amplitude das ondas de tensão, o programa também se comportou de forma semelhante à que ocorreu com afundamento de tensão, ou seja, valores bastante próximos do previamente simulado pelo *software* ATP (a diferença entre amplitude simulada e a obtida pelo programa desenvolvido foi de 12 % em média). Nota-se que principalmente nos Casos 1 e 2, relativos à elevação de tensão, com ângulo de incidência tanto de 0° como de 90°, os valores das amplitudes se apresentaram com uma diferença bastante significativa em relação ao simulado pelo *software* ATP. Tal fato foi devido ao sinal original, também, possuir valores não uniformes, ou seja, foi simulado para que ocorresse o fenômeno da elevação de tensão em 10%, e na realidade obteve-se um valor acima do pretendido, por contingências dos próprios dados do sistema.

Para os casos analisados de elevação de tensão, todos apresentaram diagnósticos idênticos ao caracterizado inicialmente pelo programa ATP.

7.3 Análise dos casos de oscilações transitórias

Os casos de oscilações transitórias analisadas pelo algoritmo computacional implementado, do mesmo modo foram obtidos a partir de simulações no sistema elétrico fornecido pela CPFL (Figura 32), porém, promovendo manobras nos bancos de capacitores existentes. O chaveamento destes bancos de capacitores foi realizado no ponto Ch3 (banco de capacitores BC3) estando o banco de capacitores BC2 ligado em regime permanente. Todos estes pontos e elementos estão identificados e localizados na Figura 32.

Da mesma forma que apresentado para os fenômenos de elevação e afundamento de tensão, estaremos apresentando o diagnóstico do sinal, bem como os respectivos gráficos de comparação entre o sinal sem oscilação e com oscilação, o espectro de

frequência e as componentes da frequência. Além destas informações, o instante em que ocorreu o chaveamento do banco de capacitores igualmente, será acusado. Os dados obtidos para os casos de oscilação transitória, foram tomados na subestação, contudo, variando o local de medição, ora no lado de alta tensão do transformador ora no lado de baixa tensão deste mesmo transformador.

As Figuras 52 e 53 apresentam os resultados referentes ao Caso 1 – Tabela 9, onde foi efetuado o chaveamento no banco de capacitores BC3, considerando um ângulo de 0° , sendo os dados referidos ao lado de baixa tensão do transformador particular Tp4 (200V) (Figura 32).

\$

DIAGNÓSTICO DO SINAL

\$

>> Dados dos Sinais de Entrada <<

- número de pontos do sinal:

N = 1924

- taxa amostral do sinal [Hz]:

$$F_s = 7.6923e+003$$

>> inicio do distúrbio <<

$$t_{ini} = 0.0447$$

>> fim do distúrbio <<

$$t_{\text{fim}} = 0.2500$$

>> intervalo de duração do distúrbio <<

$$td = 0.2053$$

>> no. ciclos de duração do distúrbio (1 ciclo = 16.677ms) <<

ciclos = 12.3162

>> percentual máximo do distúrbio <<

p100 max =

16.6078

>> resultado da análise <<

>> OSCILAÇÃO <<

Figura 52: Diagnóstico do sinal referente ao Caso 1 - oscilação de tensão.

A seguir expomos as representações gráficas pertinentes ao Caso 1 de oscilação de tensão.

a) Comparação entre sinais.

b) Espectro de frequência.

c) Componentes da frequência.

Figura 53: Representação gráfica do Caso1 – Oscilação de tensão.

Estaremos agora repetindo os passos anteriores, porém para o Caso 8 – Tabela 9, onde foi simulado o chaveamento do banco de capacitores BC3, com ângulo de incidência de 90° , com os dados medidos na subestação, referenciados ao lado de alta tensão (13,8 kV) do transformador (Figura 32).

As Figuras 54 e 55 apresentam o diagnóstico do sinal e seus gráficos, respectivamente.

a) Comparação entre sinais.

b) Espectro de frequência.

c) Componentes da frequência.

Figura 55: Representação gráfica do Caso 8 – oscilação de tensão.

Foram realizadas análises semelhantes a estes dois casos apresentados, para todos os outros 10 casos de oscilação transitória, tendo como resultado final a Tabela 15, onde estão relacionados os parâmetros de análise.

No caso das oscilações transitórias estudadas, os resultados obtidos foram similares aos valores previamente aplicados ao *software* ATP, sendo visualizado o fenômeno de oscilação transitória nas formas de onda de tensão e espectro de cores apresentadas, e também no diagrama de barras onde se caracterizou a incidência de baixas frequências (menor que 5 kHz).

O instante em que ocorreu o chaveamento do banco de capacitores, foi o item considerado relevante para se efetuar a comparação entre os eventos simulados pelo *software* ATP (0,0445 segundos) e aquele acusado pelo algoritmo computacional desenvolvido, que foi de 0,0471 segundos em média, obtendo resultados bastante satisfatórios, com desvio médio menor que 1% .

Tabela 15 – Resultado das simulações do sistema para oscilações transitórias, realizadas pelo programa computacional desenvolvido.

	Casos	Banco Chaveado e Ângulo de Incidência	Local da medição	Tempo início distúrbio (seg)	Tempo final distúrbio (seg)	Tempo duração distúrbio (seg)	Número de ciclos de duração distúrbio
Lado de baixa do trafo (200V)	1	BC3 – 0°	Tp4	0,0447	0,2500	0,2053	12,3162
	2	BC3 – 90°	Tp4	0,0489	0,2500	0,2011	12,0660
	3	BC3 – 0°	T13	0,0448	0,2477	0,2475	14,8512
	4	BC3 – 90°	T13	0,0487	0,2490	0,2488	14,9292
	5	BC3 – 0°	T3	0,0487	0,2496	0,2495	14,9682
	6	BC3 – 90°	T3	0,0487	0,2497	0,2496	14,9760
Lado de alta do trafo (11kV)	7	BC3 – 0°	Subestação	0,0449	0,0846	0,0398	2,3868
	8	BC3 – 90°	Subestação	0,0489	0,1119	0,0630	3,7830
	9	BC3 – 0°	T1 e T2	0,0447	0,0928	0,0481	2,8860
	10	BC3 – 90°	T1 e T2	0,0489	0,1123	0,0634	3,8064
	11	BC3 – 0°	T8 e T9	0,0448	0,2477	0,2451	14,7030
	12	BC3 – 90°	T8 e T9	0,0489	0,1725	0,1699	10,1946

7.4 Análise dos casos de afundamento e elevação de tensão e oscilações transitórias, porém com tamanho da janela de ½ ciclo

Para podermos avaliar a influência do tamanho da janela nos resultados finais, utilizando o algoritmo computacional desenvolvido, manteremos a frequência amostral em 7.692 Hz. Desta maneira, o tamanho da janela empregada será de 8,3385 segundos, ou seja, o equivalente a ½ ciclo. Sendo assim, passaremos a analisar novamente todos os casos.

As Tabelas 16, 17, 18 19 e 20, contêm os 72 casos subdivididos em afundamento e elevação de tensão e oscilação transitória, com ângulo de incidência de 0° e 90 °, em todos estes casos simulados foram utilizados o tamanho da janela de ½ ciclo.

Tabela 16 – Resultado das simulações do sistema para afundamento de tensão, com ângulo de falta de 0° , porém com janela de $\frac{1}{2}$ ciclo.

<i>Casos</i>	<i>Localização da Falta</i>	<i>Tempo de início do distúrbio (seg)</i>	<i>Tempo final do distúrbio (seg)</i>	<i>Número de ciclos de duração do distúrbio</i>	<i>Afundamento da tensão obtida (%)</i>	<i>Relação entre as amplitudes simuladas (ATP) e obtida no programa computacional</i>
1	T13	0,0449	0,0913	2,7768	11,4415	14,4%
2	Ch3	0,0449	0,0961	3,0732	16,3830	9,2 %
3	Ch3	0,0447	0,1026	3,4632	22,1803	10,9%
4	Ch3	0,0447	0,1101	3,9234	26,8891	7,5 %
5	T13	0,0449	0,1160	4,2666	31,8855	6,2%
6	Subestação	0,0447	0,2500	12,3162	40,6330	16,1%
7	T13	0,0449	0,1219	4,6254	41,1583	2,8%
8	T13	0,0449	0,1231	4,6956	48,4865	7,7%
9	Ch1	0,0447	0,1452	6,0294	52,0196	4,0%
10	Ch1	0,0447	0,1793	8,0730	56,1141	2,0%
11	Ch1	0,0447	0,2033	9,5160	60,9626	1,6%
12	Subestação	0,0447	0,2500	12,3162	71,1128	9,4%
13	Subestação	0,0447	0,2500	12,3162	75,0725	7,2%
14	Subestação	0,0447	0,2500	12,3162	79,0829	5,4%
15	Subestação	0,0447	0,2500	12,3162	83,5611	4,4%
16	Subestação	0,0447	0,2500	12,3162	88,6081	4,2%
17	Subestação	0,0447	0,2500	12,3162	94,0186	4,4%

Tabela 17 – Resultado das simulações do sistema para afundamento de tensão, com ângulo de falta de 90°, porém com janela de $\frac{1}{2}$ ciclo.

<i>Casos</i>	<i>Localização da Falta</i>	<i>Tempo de início do distúrbio (seg)</i>	<i>Tempo final do distúrbio (seg)</i>	<i>Número de ciclos de duração do distúrbio</i>	<i>Afundamento da tensão obtida (%)</i>	<i>Relação entre as amplitudes simuladas (ATP) e obtida no programa computacional</i>
1	T13	0,0489	0,0996	3,0420	11,4912	14,9 %
2	Ch3	0,0489	0,1044	3,3306	16,5618	10,4 %
3	Ch3	0,0489	0,1110	3,7284	22,4064	12,0 %
4	Ch3	0,0489	0,1175	4,1184	27,2245	8,5 %
5	T13	0,0489	0,1243	4,5240	31,8400	6,1 %
6	Subestação	0,0489	0,2500	12,0666	40,6511	16,1 %
7	T13	0,0489	0,1283	4,7658	41,0321	2,6 %
8	T13	0,0489	0,1314	4,9530	49,7350	10,5%
9	Ch1	0,0489	0,2500	12,0666	51,9700	3,9 %
10	Ch1	0,0489	0,1630	6,8484	56,1112	2,0 %
11	Ch1	0,0489	0,1732	7,4568	60,8562	1,1 %
12	Subestação	0,0489	0,2500	12,0666	71,1114	9,4 %
13	Subestação	0,0489	0,2500	12,0666	74,9180	7,0 %
14	Subestação	0,0489	0,2500	12,0666	79,0318	5,4 %
15	Subestação	0,0489	0,2500	12,0666	83,5940	4,5 %
16	Subestação	0,0489	0,2500	12,0666	88,6129	4,2 %
17	Subestação	0,0489	0,2500	12,0666	93,9908	4,4 %

Tabela 18 – Resultado das simulações do sistema para elevação de tensão, com ângulo de falta de 0°, porém com janela de ½ ciclo.

<i>Casos</i>	<i>Localização da Falta</i>	<i>Tempo de início distúrbio (seg)</i>	<i>Tempo final distúrbio (seg)</i>	<i>Número de ciclos de duração do distúrbio</i>	<i>Elevação da tensão obtida (%)</i>	<i>Relação entre as amplitudes simuladas (ATP) e obtida no programa computacional</i>
1	Subestação	0,0456	0,0935	2,8704	15,2676	52,6 %
2	Tp4	0,0459	0,0984	3,1512	17,7962	18,6 %
3	Tp4	0,0458	0,0988	3,1824	21,6181	8,1 %
4	Tp4	0,0458	0,1056	3,5880	27,0678	8,3 %
5	Tp4	0,0451	0,1058	3,6426	30,5045	0,8 %
6	Ch1	0,0456	0,1069	3,6738	38,3725	9,6 %
7	Ch1	0,0454	0,1208	4,5240	43,0127	7,5 %
8	Ch1	0,0454	0,1245	4,7502	46,8229	4,0 %
9	Subestação	0,0447	0,2500	12,3162	55,0237	10,0 %
10	Subestação	0,0447	0,2500	12,3162	57,9963	5,4 %
11	Ch1	0,0452	0,1249	4,7814	62,0821	3,4%
12	Subestação	0,0447	0,1642	7,1682	71,9099	10,6%
13	Subestação	0,0447	0,2500	12,3162	74,9639	7,0%

Tabela 19 – Resultado das simulações do sistema para elevação de tensão, com ângulo de falta de 90°, porém com janela de ½ ciclo.

<i>Casos</i>	<i>Localização da Falta</i>	<i>Tempo de início distúrbio (seg)</i>	<i>Tempo final distúrbio (seg)</i>	<i>Número de ciclos de duração do distúrbio</i>	<i>Elevação da tensão obtida (%)</i>	<i>Relação entre as amplitudes simuladas (ATP) e obtida no programa computacional</i>
1	Subestação	0,0489	0,1018	3,1746	15,7216	57,2 %
2	Tp4	0,0489	0,1058	3,4164	17,9608	19,7 %
3	Tp4	0,0489	0,1091	3,6114	22,0395	10,1 %
4	Tp4	0,0489	0,1139	3,9000	27,7810	11,1 %
5	Tp4	0,0489	0,1141	3,9156	31,6219	5,4 %
6	Ch1	0,0489	0,1290	4,8048	38,5940	10,2 %
7	Ch1	0,0489	0,1291	4,8126	44,0157	10,0 %
8	Ch1	0,0489	0,1292	4,8204	48,4345	7,6 %
9	Subestação	0,0489	0,2500	12,0666	56,5696	13,1 %
10	Subestação	0,0489	0,2217	10,3662	59,6597	8,5 %
11	Ch1	0,0489	0,1296	4,8438	63,2449	5,4 %
12	Subestação	0,0489	0,2500	12,0666	70,7461	8,8 %
13	Subestação	0,0489	0,2500	12,0666	73,3664	4,8 %

Tabela 20 – Resultado das simulações do sistema para oscilações transitórias, porém com tamanho da janela de $\frac{1}{2}$ ciclo.

	Casos	Banco Chaveado e Ângulo de Incidência	Local da medição	Tempo início distúrbio (seg)	Tempo final distúrbio (seg)	Tempo duração distúrbio (seg)	Número de ciclos de duração distúrbio
<i>Lado de baixa do trafo (200V)</i>	1	BC3 – 0°	Tp4	0,0447	0,2500	0,2053	12,3162
	2	BC3 – 90°	Tp4	0,0489	0,2500	0,2011	12,0660
	3	BC3 – 0°	T13	0,0487	0,2477	0,2475	14,8512
	4	BC3 – 90°	T13	0,0487	0,2490	0,2488	14,9292
	5	BC3 – 0°	T3	0,0487	0,2496	0,2495	14,9682
	6	BC3 – 90°	T3	0,0487	0,2497	0,2496	14,9760
<i>Lado de alta do trafo (13,8 kV)</i>	7	BC3 – 0°	Subestação	0,0449	0,0846	0,0398	2,3868
	8	BC3 – 90°	Subestação	0,0489	0,1119	0,0630	3,7830
	9	BC3 – 0°	T1 e T2	0,0447	0,0928	0,0481	2,8860
	10	BC3 – 90°	T1 e T2	0,0489	0,1123	0,0634	3,8064
	11	BC3 – 0°	T8 e T9	0,0447	0,1209	0,0762	4,5708
	12	BC3 – 90°	T8 e T9	0,0489	0,1725	0,1236	7,4178

Para todos os 72 casos analisados, quer seja afundamento e elevação de tensão, e oscilações transitórias, considerando ângulo de incidência de 0° e ou 90°, não foi alcançado resultado com diferenças significativas em relação aos obtidos anteriormente, quando utilizamos o tamanho da janela de 1 ciclo.

Desta forma, podemos entender que, para este algoritmo computacional desenvolvido e dispondo da Transformada Rápida de Fourier Janelada como ferramenta, o tamanho da janela somente afeta a análise em altas frequências, validando com isto os resultados observados para afundamento e elevação de tensão, visto que ocorrem na frequência fundamental.

A Tabela 21 mostra um resumo dos dados obtidos, comparando a utilização de janela de 1 ciclo e janela de $\frac{1}{2}$ ciclo.

Tabela 21 – Resumo dos dados obtidos, para tamanhos da janela de 1 e ½ ciclo.

Tipo do distúrbio	Tamanho da janela	Ângulo de incidência da falta	Tempo de início do distúrbio (segundos)	Tempo final do distúrbio (segundos)	Variação percentual média da amplitude medida, em comparação com a simulada (ATP)
Aplicação no software ATP			0,0445	0,0945	
Afundamento de tensão	1 ciclo	0°	0,0448	0,1788	7,0 %
		90°	0,0489	0,1854	
	½ ciclo	0°	0,0448	0,1788	
		90°	0,0489	0,1854	
Elevação de tensão	1 ciclo	0°	0,0449	0,1456	12,3 %
		90°	0,0489	0,1564	
	½ ciclo	0°	0,0449	0,1456	
		90°	0,0489	0,1564	
Oscilação transitória	1 ciclo	-----	0,0476	0,1823	-----
	½ ciclo		0,0476	0,1823	

Observando a Tabela 21, podemos comprovar que o tamanho da janela, quando utilizamos este algoritmo computacional, especificamente, não foi parâmetro significativo para determinar e identificar o tipo de fenômeno que cause perturbação em um sistema elétrico. Porém, quanto à identificação do tempo de início e tempo final do distúrbio, bem como as amplitudes do sinal, que foi o fator determinante da classificação do distúrbio, o algoritmo se comportou satisfatoriamente, quando comparado com os valores aplicados no *software* ATP.

7.5 Análise dos casos de afundamento de tensão, elevação de tensão e oscilação transitória, variando a frequência de amostragem

Neste item, estaremos variando a frequência amostral e mantendo constante o tamanho da janela em 1 ciclo, para, então, avaliarmos a influência da frequência amostral nos resultados obtidos.

O valor da nova frequência amostral estudado, foi de 769 Hz. Como o banco de dados foi simulado a partir de uma taxa amostral de 7,68 kHz, que representou 1924 pontos medidos, e com o objetivo de manter os mesmos dados e condições em que foi caracterizado este banco de dados pelo *software* ATP, reduzimos o número de pontos

por uma reamostragem para 192, a qual representa uma frequência amostral de 769 Hz. Desta forma, teremos condições de verificar o comportamento das formas de onda da tensão, espectro de cores e componentes das frequências para a nova taxa amostral, obtida através dos dados inicialmente simulados. Neste estudo também foram efetuadas simulações para todos os casos de afundamento e elevação de tensão e oscilação transitória utilizando frequências amostrais de 3,85 kHz; 1,92 kHz; 1,54 kHz; 1,28 kHz e 962 Hz, porém os resultados obtidos foram bem próximos aos simulados com frequência amostral de 7,68 kHz. A escolha de uma frequência amostral bem menor que a principal (7,68 kHz), foi para verificar a real influência da frequência amostral nos resultados finais, bem como o comportamento do algoritmo computacional desenvolvido. As Tabelas 22, 23, 24, 25 e 26 apresentam os dados obtidos por estas novas simulações.

Tabela 22 – Resultado das simulações do sistema para afundamento de tensão, com ângulo de falta de 0°, porém com frequência amostral de 769 Hz.

<i>Casos</i>	<i>Localização da Falta</i>	<i>Tempo de início do distúrbio (seg)</i>	<i>Tempo final do distúrbio (seg)</i>	<i>Número de ciclos de duração do distúrbio</i>	<i>Afundamento da tensão obtida (%)</i>	<i>Relação entre as amplitudes simuladas (ATP) e obtida no programa computacional</i>
1	T13	0,0454	0,0909	2,7300	11,4414	14,4%
2	Ch3	0,0454	0,0961	3,0420	16,2928	8,6%
3	Ch3	0,0460	0,0950	2,9406	22,1855	14,1%
4	Ch3	0,0460	0,1028	3,4086	26,8211	7,2%
5	T13	0,0460	0,1122	3,9702	31,7780	5,9%
6	Subestação	0,0460	0,2486	12,1524	40,6426	16,1%
7	T13	0,0460	0,1200	4,4382	40,6594	1,6%
8	T13	0,0460	0,1231	4,6254	48,4979	7,7%
9	Ch1	0,0460	0,1434	5,8422	51,8505	3,7%
10	Ch1	0,0460	0,1793	7,9950	55,8854	1,6%
11	Ch1	0,0460	0,1949	8,9310	60,2349	0,3%
12	Subestação	0,0460	0,2486	12,1524	70,9933	9,2%
13	Subestação	0,0460	0,2486	12,1524	74,7431	6,7%
14	Subestação	0,0460	0,2486	12,1524	78,7751	5,0%
15	Subestação	0,0460	0,2486	12,1524	83,0881	3,8%
16	Subestação	0,0460	0,2486	12,1524	87,6633	3,1%
17	Subestação	0,0460	0,2486	12,1524	92,4529	2,7%

Tabela 23 – Resultado das simulações do sistema para afundamento de tensão, com ângulo de falta de 90°, porém com frequência amostral de 769 Hz.

<i>Casos</i>	<i>Localização da Falta</i>	<i>Tempo de início do distúrbio (seg)</i>	<i>Tempo final do distúrbio (seg)</i>	<i>Número de ciclos de duração do distúrbio</i>	<i>Afundamento da tensão obtida (%)</i>	<i>Relação entre as amplitudes simuladas (ATP) e obtida no programa computacional</i>
1	T13	0,0494	0,0988	2,9640	11,4105	14,1%
2	Ch3	0,0494	0,1001	3,0420	16,6016	10,7%
3	Ch3	0,0494	0,1001	3,0420	22,3395	11,7%
4	Ch3	0,0494	0,1157	3,9780	26,8088	7,2%
5	T13	0,0494	0,1235	4,4460	31,8127	6,0%
6	Subestação	0,0494	0,2496	12,0120	40,5691	15,9%
7	T13	0,0494	0,1274	4,6800	41,3429	3,4%
8	T13	0,0494	0,1287	4,7580	47,1512	4,8%
9	Ch1	0,0494	0,2496	12,0120	51,6621	3,3%
10	Ch1	0,0494	0,1612	6,7080	55,9744	1,8%
11	Ch1	0,0494	0,1677	7,0980	61,0022	1,7%
12	Subestação	0,0494	0,2496	12,0120	71,0168	9,3%
13	Subestação	0,0494	0,2496	12,0120	74,9425	7,1%
14	Subestação	0,0494	0,2496	12,0120	79,1919	5,6%
15	Subestação	0,0494	0,2496	12,0120	83,7707	4,7%
16	Subestação	0,0494	0,2496	12,0120	88,6649	4,3%
17	Subestação	0,0494	0,2496	12,0120	93,9719	4,4%

Tabela 24 – Resultado das simulações do sistema para elevação de tensão, com ângulo de falta de 0°, porém com frequência amostral de 769 Hz.

<i>Casos</i>	<i>Localização da Falta</i>	<i>Tempo de início distúrbio (seg)</i>	<i>Tempo final distúrbio (seg)</i>	<i>Número de ciclos de duração do distúrbio</i>	<i>Elevação da tensão obtida (%)</i>	<i>Relação entre as amplitudes simuladas (ATP) e obtida no programa computacional</i>
1	Subestação	0,0468	0,0920	2,7144	15,1229	51,2%
2	Tp4	0,0468	0,0936	2,8080	17,7383	18,2%
3	Tp4	0,0452	0,0952	2,9952	21,6995	8,5%
4	Tp4	0,0452	0,0998	3,2760	27,4513	9,8%
5	Tp4	0,0452	0,1030	3,4632	31,4721	4,9%
6	Ch1	0,0468	0,1014	3,2770	38,0867	8,8%
7	Ch1	0,0468	0,1123	3,9312	43,0788	7,7%
8	Ch1	0,0468	0,1154	4,1184	47,0038	4,4%
9	Subestação	0,0468	0,2487	12,1134	55,9119	11,8%
10	Subestação	0,0468	0,2487	12,1134	59,2671	7,7%
11	Ch1	0,0452	0,1186	4,3992	58,6033	2,3%
12	Subestação	0,0468	0,1576	6,6456	71,6660	10,2%
13	Subestação	0,0468	0,2487	12,1134	74,6595	6,6%

Tabela 25 – Resultado das simulações do sistema para elevação de tensão, com ângulo de falta de 90°, porém com frequência amostral de 769 Hz.

<i>Casos</i>	<i>Localização da Falta</i>	<i>Tempo de início distúrbio (seg)</i>	<i>Tempo final distúrbio (seg)</i>	<i>Número de ciclos de duração do distúrbio</i>	<i>Elevação da tensão obtida (%)</i>	<i>Relação entre as amplitudes simuladas (ATP) e obtida no programa computacional</i>
1	Subestação	0,0493	0,1013	3,1200	15,2668	52,7 %
2	Tp4	0,0493	0,1026	3,1980	17,7265	18,2 %
3	Tp4	0,0493	0,1091	3,5880	21,7012	8,5 %
4	Tp4	0,0493	0,1065	3,4320	27,8188	11,3 %
5	Tp4	0,0493	0,1078	3,5100	31,6649	5,5 %
6	Ch1	0,0493	0,1208	4,2900	38,2784	9,4 %
7	Ch1	0,0493	0,1234	4,4460	42,9860	7,5 %
8	Ch1	0,0493	0,1247	4,5240	47,2575	5,0 %
9	Subestação	0,0493	0,2495	12,0120	54,7244	9,4 %
10	Subestação	0,0493	0,2196	10,2180	57,6523	4,8 %
11	Ch1	0,0493	0,1260	4,6020	57,0764	-4,9 %
12	Subestação	0,0493	0,2495	12,0120	68,2993	5,1 %
13	Subestação	0,0493	0,2495	12,0120	71,3447	1,9 %

No caso de oscilação transitória, o dado considerado mais importante para comparação é a identificação do início do distúrbio, seguido pelo tempo final do distúrbio, sendo que o primeiro tempo deverá coincidir com o tempo de início do chaveamento do banco de capacitores. A Tabela 26 apresenta os resultados obtidos, indicando o tempo de início dos distúrbios, tempo final e número de ciclos em que ocorreu a oscilação.

Tabela 26 – Resultado das simulações do sistema para oscilações transitórias, porém com frequência amostral de 769 Hz.

	Casos	Banco Chaveado e Ângulo de Incidência	Local da medição	Tempo início distúrbio (seg)	Tempo final distúrbio (seg)	Tempo duração distúrbio (seg)	Número de ciclos de duração distúrbio
Lado de baixa do trafo (200V)	1	BC3 – 0°	Tp4	0,0455	0,2496	0,2041	12,2460
	2	BC3 – 90°	Tp4	0,0494	0,2496	0,2002	12,0120
	3	BC3 – 0°	T13	0,0013	0,2457	0,2444	14,6640
	4	BC3 – 90°	T13	0,0013	0,2457	0,2444	14,6640
	5	BC3 – 0°	T3	0,0026	0,2496	0,2470	14,8200
	6	BC3 – 90°	T3	0,0026	0,2470	0,2444	14,6640
Lado de alta do trafo (13,8 kV)	7	BC3 – 0°	Subestação	0,0452	0,0802	0,0350	2,0982
	8	BC3 – 90°	Subestação	0,0494	0,0922	0,0428	2,5662
	9	BC3 – 0°	T1 e T2	0,0452	0,0786	0,0334	2,0046
	10	BC3 – 90°	T1 e T2	0,0494	0,1091	0,0597	3,5802
	11	BC3 – 0°	T8 e T9	0,0507	0,0870	0,0363	2,1762
	12	BC3 – 90°	T8 e T9	0,0494	0,1442	0,0948	5,6262

Analisando a Tabela 26, podemos notar que houve uma variação bastante importante entre os dados detectados por este programa e os dados simulados anteriormente, principalmente quanto ao tempo de início do distúrbio, diferentes do detectado quando estávamos utilizando a mesma frequência amostral utilizada pelo programa ATP (7,68 kHz).

Para os Casos 3, 4, 5 e 6, referentes à oscilação transitória, o algoritmo computacional implementado identificou o tempo de início da oscilação, bastante diferente do aplicado pelo *software* ATP. Porém, tal situação pode ser justificada,

considerando que devido à baixa frequência amostral, houve uma piora na qualidade do sinal analisado, sendo identificado pelo algoritmo como distúrbio devido à má representação do sinal à frequência de 769 Hz. Na Figura 56, que apresenta, como exemplo, o Caso 5 de oscilação transitória, com medição no lado de baixa tensão do transformador, compara o sinal analisado a 7,68 kHz com a sua respectiva representação a 769 Hz. Os Casos 3, 4 e 6 apresentaram formas de sinal semelhantes ao da Figura 56.

Figura 56: Representação gráfica do Caso 5 – oscilação de tensão, com frequência amostral de 769 Hz.

Para melhor avaliar os resultados obtidos, a Tabela 27 apresenta um resumo dos valores de tempo de início e fim do distúrbio e amplitudes da forma de onda de tensão para as diferentes frequências amostrais aplicadas neste estudo.

Tabela 27 – Resumo dos dados obtidos, para diferentes frequências amostrais estudadas.

Tipo do distúrbio	Frequência de amostragem Hz	Ângulo de incidência da falta	Tempo de início do distúrbio (segundos)	Tempo final do distúrbio (segundos)	Variação percentual média da amplitude medida, em comparação com a simulada (ATP).
Aplicação no software ATP			0,0445	0,0945	*****
Afundamento de tensão	7,68 kHz	0°	0,0448	0,1788	7,0 %
		90°	0,0489	0,1854	
	769 Hz	0°	0,0459	0,1718	7,0 %
		90°	0,0494	0,1794	
Elevação de tensão	7,68 kHz	0°	0,0449	0,1456	12,3 %
		90°	0,0489	0,1564	
	769 Hz	0°	0,0463	0,1412	11,0 %
		90°	0,0493	0,1531	
Oscilação transitória					
Lado de baixa tensão trafo (200V)		7,68 kHz	0,0476	0,2493	*****
		769 Hz	0,0171	0,2479	*****
Lado de alta tensão trafo (13,8kV)		7,68 kHz	0,0469	0,1370	*****
		769 Hz	0,0482	0,0986	*****

Pela Tabela acima, podemos notar que ao diminuirmos a frequência amostral, além de verificarmos as distorções nas formas de onda e aumento da presença de outras frequências no sistema, o tempo de início dos distúrbios apresenta um aumento de variação em relação ao, inicialmente, simulado pelo programa ATP, que originou os dados para este estudo.

Quanto à amplitude do sinal, não houve variação significativa entre as diversas amplitudes com a variação da frequência amostral.

De uma forma geral, os resultados numéricos obtidos foram bastante próximos dos resultados anteriores, para os dois tamanhos escolhidos de janela (1 e ½ ciclo), sendo, entretanto, mais interessante para este caso de variação da frequência amostral, os resultados gráficos. Neles podemos verificar distorções nas formas de onda de

tensão, quando diminuimos a frequência amostral, com o surgimento de superposição de frequências, ocasionando erros, pois aparecem frequências diferentes daquelas presentes no sinal com maior frequência amostral.

Já para o caso de oscilação transitória, a variação da frequência amostral foi bastante significativa quanto à detecção do início dos distúrbios, bem como na identificação de outras frequências existentes no sistema. Quanto menor a frequência amostral, pior foi a qualidade dos resultados.

7.6 Apresentação gráfica de alguns casos de afundamento e elevação de tensão e oscilação transitória, com as frequências amostrais estudadas

As Figuras a seguir, escolhidas de forma aleatória entre os diversos casos estudados, apresentam as formas gráficas de onda de tensão, espectro de cores e componentes de frequência, para os dois valores de frequências estudados, ou seja, 7,68 kHz e 769 Hz.

A Figura 57 apresenta o resultado gráfico da simulação do Caso 1, com afundamento de tensão de aproximadamente 10%, ângulo de incidência de 0° , utilizando uma frequência amostral de 7,68 kHz, onde podemos observar que no início e no fim do distúrbio foram detectadas perturbações na forma de onda de tensão, sendo, corretamente, caracterizadas pelo histograma de frequência. Para efeito de comparação, vamos repetir este mesmo caso, porém variando a frequência amostral para 769 Hz.

a) Comparação entre sinais.

b) Espectro de frequência.

c) Componentes da frequência.

Figura 57: Representação gráfica do Caso 1 – Afundamento de tensão, com frequência amostral de 7,68 kHz.

A Figura 58 também apresenta o mesmo Caso 1 de afundamento de tensão apresentado na Figura 57, porém com a frequência amostral de 769 Hz. Neste caso, podemos verificar um aumento nas distorções na forma de onda, principalmente quando avaliamos a figura referente a espectro de cores, e, igualmente, notamos um aumento das amplitudes e quantidades de frequência, destacado no histograma de frequência.

a) Comparação entre sinais.

b) Espectro de frequência.

c) Componentes da frequência.

Figura 58: Representação gráfica do Caso 1 – Afundamento de tensão, com frequência amostral de 769 Hz.

Estaremos, agora, repetindo os mesmos procedimentos acima descritos, para o Caso 1 de elevação de tensão, com ângulo de incidência de 0° , a fim de avaliarmos os resultados obtidos. A Figura 59 apresenta os gráficos de onda de tensão, espectros de cores e histograma de frequência para uma frequência amostral de 7,68 kHz.

a) Comparação entre sinais.

b) Espectro de frequência.

c) Componentes da frequência.

Figura 59: Representação gráfica do Caso 1 – Elevação de tensão, com frequência amostral de 7,68 kHz.

De modo semelhante ao procedimento para afundamento de tensão, estaremos agora diminuindo a frequência amostral para 769 Hz, e verificando os gráficos das formas de onda na Figura 60.

a) Comparação entre sinais.

b) Espectro de frequência.

c) Componentes da frequência.

Figura 60: Representação gráfica do Caso 1 – Elevação de tensão, com frequência amostral de 769 Hz.

Para todos os casos de elevação de tensão estudados, observamos comportamentos semelhantes ao ocorrido com os casos de afundamento de tensão, ou seja, à medida que diminuimos a frequência amostral, o sinal ficou mais distorcido, com a presença de grande quantidade de frequências diferentes da fundamental (60Hz).

Os casos escolhidos para caracterizar a variação da frequência amostral, quando da ocorrência de oscilações transitórias em um dado sistema, serão o Caso 5, referente ao chaveamento do banco de capacitores BC3, com medição no lado de baixa do transformador de distribuição T3 (200V), e o Caso 7, com medição no lado de alta (13,8 kV) na subestação de energia. Estas localizações estão apresentadas na Figura 32 (Capítulo 5), onde consta o diagrama unifilar do sistema elétrico de distribuição em estudo.

Na Figura 61, com frequência amostral de 7,68 kHz, no instante em que foi simulado o chaveamento do banco de capacitores BC3, localizado, aproximadamente, a 700 metros à frente do Trafo de distribuição T3, onde foram realizadas estas medições (lado de baixa tensão), observou-se oscilações na forma de onda de tensão com pouca interferência de outras frequências.

a) Comparação entre sinais

b) Espectro de frequência.

c) Componentes da frequência.

Figura 61: Representação gráfica do Caso 5 – Oscilação transitória, com frequência amostral de 7,68 kHz e medição no lado de baixa do Trafo T3 (200V).

Considerando agora o mesmo caso, Caso 5, porém diminuindo a frequência amostral para 769 Hz, vemos, na Figura 62, o aumento significativo da presença de outras frequências no sistema, bastante visível no espectrograma de cores e gráfico de barras, evidenciando maiores distorções na forma de onda de tensão.

a) Comparação entre sinais

b) Espectro de frequência.

a) Componentes da frequência.

Figura 62: Representação gráfica do Caso 5 – Oscilação transitória, com frequência amostral de 769 Hz e medição no lado de baixa do Trafo T3 (200V).

A Figura 62 mostra claramente que, com a diminuição da frequência amostral para 769 Hz, há um aumento das distorções na forma de onda de tensão e aumento, também, significativo da presença de outras frequências no sistema.

Prosseguindo na apresentação das interferências causadas pelo uso de diferentes frequências amostrais, as figuras a seguir irão representar as simulações de chaveamento do banco de capacitores BC3, referentes ao Caso 7, onde as medições foram feitas na subestação de energia e no lado de alta tensão do transformador (13,8 kV).

De maneira idêntica aos casos anteriores, iniciaremos a apresentação do Caso 7 com a frequência amostral original de 7,68 kHz que foi utilizada para gerar o banco de dados. Notamos na Figura 63, que no instante do chaveamento do banco de capacitores, ocorreu uma oscilação na forma de onda de tensão, bem como o aparecimento de grande variação de frequências diferentes da fundamental.

a) Comparação entre sinais

b) Espectro de frequência.

b) Componentes da frequência.

Figura 63: Representação gráfica do Caso 7 – Oscilação transitória, com frequência amostral de 7,68 kHz e medição no lado de alta do Trafo (13,8 kV).

A Figura 64 mostra uma perda de informações com uma frequência amostral menor, 769 Hz, o que vem comprovar a influência da frequência amostral na identificação dos distúrbios. Pode ser notada em todos os gráficos desta figura a baixa qualidade de informação.

a) Comparação entre sinais

b) Espectro de frequência.

c) Componentes da frequência.

Figura 64: Representação gráfica do Caso 7 – Oscilação transitória, com frequência amostral de 769 Hz e medição no lado de alta do Trafo (13,8 kV).

Desta forma, nas figuras mostradas, a influência da frequência amostral na qualidade dos sinais medidos, foi importante para a escolha adequada do valor da frequência a ser utilizada na medição de um dado sinal. A escolha correta implicará em melhoria na qualidade dos dados medidos, e, conseqüentemente, na análise e identificação do distúrbio presente no sistema.

No próximo Capítulo, estaremos encerrando o trabalho, apresentando as conclusões finais deste estudo.

CAPÍTULO 8

Conclusão final

O presente trabalho sobre a Qualidade da Energia teve como principal objetivo o de destacar a importância e atualidade deste assunto, bem como aplicar uma das muitas ferramentas existentes para detectar os distúrbios que ocorrem em um sistema elétrico típico. Todo o setor quer seja industrial, comercial ou residencial tem se preocupado em ter um fornecimento de energia elétrica com maior Qualidade, pois com o desenvolvimento tecnológico dos equipamentos que compõem estes setores, tem se a exigência de que a estabilidade do sistema seja cada vez maior.

Desta forma, procurou-se nos Capítulos iniciais apresentar um breve histórico sobre Qualidade da Energia. Verificou-se que já é de longa data a preocupação com a Qualidade no fornecimento da energia elétrica, inclusive com a criação de Departamentos Governamentais para regulamentar o uso da Energia, além da elaboração de normas e procedimentos que foram se desenvolvendo e se adaptando, através dos tempos. Também, destacamos as principais definições dos fenômenos que interferem na Qualidade da Energia de um sistema elétrico, baseado na norma americana *IEEE Standard 1159-1995*, que resume estas definições em uma tabela (Tabela 1 – Capítulo 2), onde a mesma apresenta os valores limites para cada tipo de fenômeno. Estes dados foram utilizados como referência para caracterizar os diferentes tipos de distúrbios analisados neste trabalho.

Apresentados os termos e definições referentes à Qualidade da Energia de um sistema elétrico, foi efetuada uma pesquisa bibliográfica, descrevendo a evolução dos estudos e procedimentos e a busca pela padronização de termos e definições dos diferentes distúrbios que possam afetar a Qualidade da Energia de um dado sistema, padronização esta, já bastante difundida e em corrente uso por todos os estudiosos deste tema. Nesta mesma pesquisa bibliográfica, além de destacarmos esta evolução no que se refere à identificação dos fenômenos pertinentes à Qualidade da Energia, também foi

possível verificar algumas ferramentas que são utilizadas neste contexto, tais como a Transformada de Fourier, Transformada Wavelet e Análises com Múltiplas Resoluções.

Diante das várias ferramentas que oferecem suporte para identificarmos os diferentes tipos de perturbações em um sistema elétrico, neste trabalho, optamos pela aplicação da Transformada de Fourier por ser esta uma ferramenta já consolidada e de grande utilização em trabalhos científicos, permitindo, do mesmo modo, o uso de técnicas que reduzam o tempo e o conjunto de dados de análise para o processamento dos sinais, como a Transformada Rápida de Fourier e a Transformada Rápida de Fourier Janelada. Neste sentido, dedicou-se um Capítulo, em especial deste trabalho, para o detalhamento dos conceitos teóricos relativos à Transformada de Fourier.

Apresentada a parte teórica, com as definições dos termos referentes à Qualidade da Energia e ferramenta utilizada, a Transformada de Fourier, foi desenvolvido um programa computacional tendo como algoritmo a Transformada Rápida de Fourier Janelada, com o intuito de detectar os distúrbios em um sistema elétrico.

Para podermos validar este programa computacional, foi utilizado um banco de dados, obtido através de simulações em um sistema elétrico real, pertencente à CPFL, gerado pelo emprego do *software ATP (Alternative Transients Program)*. Das situações de operações aplicadas sobre o sistema (chaveamento de capacitores) ou por situações faltosas (faltas Fase-Terra), foi possível gerar um banco de dados que veio caracterizar fenômenos de afundamentos e elevações de tensão, bem como de oscilações transitórias sobre o sistema. Com este banco de dados, foi possível aplicar a lógica computacional desenvolvida e, ainda, comparar os resultados obtidos com os resultados da simulação, inicialmente, efetuada pelo programa ATP.

O algoritmo computacional implementado foi desenvolvido para detectar e identificar apenas os fenômenos de afundamento e elevação de tensão e oscilação transitória, por serem estes fenômenos os mais frequentes e de maiores consequências em um sistema elétrico, podendo futuramente ser agregado a este mesmo programa os demais fenômenos pertinentes.

Os resultados obtidos foram bastante satisfatórios, sendo a maioria destes condizentes com as situações simulados no *software ATP*. O algoritmo tem como grande vantagem, o uso de janelas para análise dos fenômenos, podendo assim aumentar a precisão na identificação do início e fim dos distúrbios, inclusive verificando em detalhes o que ocorre na forma de onda de tensão, no instante da ocorrência do fenômeno.

Devido a este artifício, foi possível verificar que nos curtos Fase-Terra aplicados, com ângulo de incidência de 90° , há num primeiro momento uma elevação considerável na amplitude da onda de tensão, sendo, em seguida, mantida constante nos níveis de afundamento e ou elevação de tensão até o fim do distúrbio, diferentemente do que ocorre quando o ângulo de incidência foi de 0° . Outro ponto, também, importante que foi verificado, é que no final do distúrbio existe uma fase de transição entre o fim do distúrbio e o amortecimento do sistema até sua estabilização natural. Por estarmos utilizando dados reais de um sistema elétrico pertencente à CPFL, ou seja, potências e características técnicas dos transformadores, impedâncias das linhas, banco de capacitores, etc., os fenômenos embora tenham sido simulados, apresentaram resultado bastante próximo do que ocorre na realidade. Sendo assim, o programa apresentou um comportamento bastante eficiente.

Outro procedimento que o programa permitiu, foi o de podermos variar o tamanho da janela FFT de 1 ciclo para $\frac{1}{2}$ ciclo. Os resultados obtidos não apresentaram diferença nas identificações de tempos de início e fim dos distúrbios, bem como nas amplitudes das formas de onda de tensão. Considerando que as análises efetuadas não ocorreram em tempo real, não houve, portanto, preocupação quanto ao tempo para identificação do problema, onde o tamanho da janela teria influência, pois com uma janela menor, a análise dos dados, certamente, seria mais rápida. Por se tratar de um banco de dados obtidos previamente, não foi objeto deste programa uma análise das perturbações em tempo real.

A lógica computacional desenvolvida, além de permitir variar o tamanho da janela a ser aplicada à FFT, possibilitou ainda variar a frequência amostral dos sinais. O banco de dados, inicialmente, utilizado foi criado empregando uma frequência amostral de aproximadamente 7,68 kHz. Para podermos avaliar a influência da frequência amostral na precisão das medidas, alteramos seu valor para 3,85 kHz; 1,92 kHz; 1,54 kHz; 1,28 kHz; 962 Hz e finalmente para 769 Hz, simulando todos os casos de afundamento e elevação de tensão e oscilações transitórias, avaliando novamente os resultados obtidos, bem como as formas de onda de tensão, espectros de cores e componentes das frequências.

Os resultados se apresentaram de acordo com a teoria de frequência amostral, apresentada no Capítulo 4, ou seja, à medida que diminuímos a frequência amostral, diminuímos o número de pontos para análise e, portanto, as distorções nas formas de

onda de tensão aumentaram, e conseqüentemente apareceram ou às vezes foram omitidas freqüências diferentes daquelas que foram detectadas quando o sinal era original (freqüência amostral de 7,68 kHz). Vale ressaltar que somente a partir da freqüência de 769 Hz é que houve uma variação significativa dos resultados, quando comparados com os dados utilizando a freqüência amostral de 7,68 kHz. Todas estas variações foram perfeitamente identificadas pelo programa computacional, comprovando mais uma vez sua eficiência. Quando analisamos o fenômeno de oscilação transitória, foi possível verificar que a freqüência amostral, para estes casos estudados em particular, teve grande influência nos resultados finais, ou seja, ao utilizarmos a freqüência de menor valor, aumentaram os erros, quando comparados com as situações simuladas sobre o sistema.

Desta forma, podemos concluir e comprovar, através destes resultados, a importância da freqüência amostral no estudo de fenômenos que interferem na Qualidade da Energia em um dado sistema, e uma contribuição importante desta análise, é, que para os casos estudados, poderíamos ter adotado uma freqüência menor daquela utilizada inicialmente para obtenção dos dados (7,68 kHz), implicando em equipamento menos sofisticado e certamente de menor custo.

Este estudo permite sua continuidade, na implementação do programa computacional para identificar outros fenômenos relativos à Qualidade da Energia, além dos fenômenos contemplados, (afundamento e elevação de tensão e oscilação transitória), bem como destaca a necessidade de um maior aprofundamento na determinação mais precisa do tempo final dos distúrbios.

Finalmente, acreditamos que este trabalho teve seu objetivo alcançado. Ressaltamos a importância do tema Qualidade da Energia, apresentando suas definições mais importantes, desenvolvendo uma lógica computacional, dispondo de uma ferramenta bastante difundida, neste caso a Transformada Rápida de Fourier Janelada, com o intuito de analisar os problemas causados por alguns dos fenômenos que comprometem a qualidade do sistema.

O programa computacional utilizado para formar o banco principal de dados, através do *software* ATP e o algoritmo computacional implementado, na linguagem MATLAB, estão apresentados em anexo.

Referências Bibliográficas

- [1] ANEEL – Agencia Nacional de Energia Elétrica.(2004). Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: 14 de abr. 2004.
- [2] BRONZEADO, H.S. et al. (1997). Uma proposta de nomenclatura nacional de termos e definições associados à Qualidade da Energia Elétrica. Apresentado ao II Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica – SBQEE, São Lourenço – M.G., nov.
- [3] DELGADO, J. D. B.; SARAIVA, P. A.; ALMEIDA, A. T. (1997). A Qualidade da Energia Elétrica na atualidade e o uso de novas tecnologias reparadoras. Apresentado ao II Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica – SBQEE, São Lourenço – M.G., nov.
- [4] GAOUDA, A. M.; SALAMA, M. M. A.; SULTAN, M. R. (1998). Automated recognition system for classifying and quantifying the electric Power Quality. IEEE Transactions on Power Delivery, p. 244-248, vol.1, Oct.
- [5] SARAIVA FILHO, F. C. (2002). Proposta de Recuperador Dinâmico para correção de afundamentos de tensão. 77p. Dissertação de Mestrado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2002.
- [6] ITIC - INFORMATION TECHNOLOGY INSTITUTE COUNCIL (2004). Disponível em: <<http://www.itic.org>>. Acesso em: 14 de abr. 2004.
- [7] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (1995) - IEEE Standard 1159-1995: Recommended practice for monitoring electric Power Quality. New York, USA.
- [8] DUGAN, R. C.; McGRANAGHAN, M. F.; BEATY, H. W. (1996). Electrical Power Systems Quality. New York: MacGraw-Hill.
- [9] McGRANAGHAN, M. F.; MUELLER, D. R.; SAMOTYJ, M. J. (1993). Voltage sag in industrial systems. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 29, nº. 2, p. 397-403, Mar./Apr.
- [10] ROCCIA, P.; QUILLON, N. (1997). Harmônicas em redes industriais: causas, efeitos e soluções. Revista Eletricidade Moderna, São Paulo, p. 124-154, out.

- [11] PHIPPS, J. K.; NELSON, J. P.; SEM, P. K. (1994). Power Quality and harmonic distortion on distribution systems. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 30, n.º 2, p.476-484, Mar./Apr.
- [12] MARTZLOFF, F. D.; GRUZS, T. M. (1988). Power Quality site surveys: Facts, Fiction, and Fallacies. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 24, n.º 6, p.1005-1018, Nov./Dec.
- [13] KAZIBWE, W., E. et al. (1990). Power Quality: A Review. IEEE Computer Applications in Power, vol. 3, n.º 1, p. 39-42, Jan.
- [14] HEYDT, G. T. et al. (1993). Directions of research on electric Power Quality” IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 8 , n.º 1, p. 429-436, Jan.
- [15] HUGHES, B. M.; CHAN, J. S.; KOVAL, D.O. (1993). Distribution customer Power Quality. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 29, n.º 6, p. 1204-1211, Nov./Dec.
- [16] BARKER, P. P. et al. (1993). Power Quality monitoring of a distribution system IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 9 , n.º 2, p. 1136-1142, Apr.
- [17] GUNTHER, E. W.; MEHTA, H. (1995). A survey of distribution system Power Quality – Preliminary results. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 10, n.º 1, p. 322-329, Jan.
- [18] OLIVEIRA, J. C. et al. (1998). A practical case of Power Quality study. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 1, p. 382-387, Oct.
- [19] MIENSKI, R.; PAWELEK, R.; WASIAK, I. (1998). Examination of Power Quality in industry. IEEE Transactions on Power Delivery, vol.1, n.º 1, p. 94 - 98, Oct.
- [20] MILANOVIC, J. V.; NEGNEVITSKY, M. (1998). Power Quality problems and solutions: Current understanding. Apresentado ao 8th International Conference on Harmonic and Quality of Power ICHPQ’98, Athens - Greece, Oct.
- [21] ROBERT, A. (1998). Supply quality issues at the interface between Power System and industrial consumers. Apresentado ao 8th International Conference on Harmonic and Quality of Power ICHPQ’98, Athens - Greece. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 1, p. 182-189, Oct.
- [22] FERRARO, A. M. (1998). Umbalancing and distorting loads: Can they be detected and their detrimental effect be measured? Apresentado ao 8th International Conference on Harmonic and Quality of Power ICHPQ’98, Athens - Greece, Oct.
- [23] ACHA, E. et al. (1998). The impact of energy saving apparatus on Power Quality. Apresentado ao 8th International Conference on Harmonic and Quality of Power ICHPQ’98, Athens - Greece. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 1, p. 36-41, Oct.

- [24] PARSONS, A. C. et al. (2000). A direction finder for Power Quality disturbances based upon disturbance Power and Energy. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 15, n.º 3, p.1081-1086, July.
- [25] ARSENEAU, R.; HEYDT, G. T.; KEMPLER, M. J. (1997). Application of IEEE Standard 519-1992 harmonic limits for revenue billing meters. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 12, n.º.1, p. 346-353, Jan.
- [26] NEJDAWI, I. M. et al. (1999). Harmonic trend in the U.S.A.: A preliminary survey. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 14, n.º 4, p. 1488-1494, Oct.
- [27] SABIN, D. D.; BROOKS, D. L.; SUNDARAM, A. (1999). Indices for assessing harmonic distortion from Power Quality measurements: Definitions and benchmark data. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 14, n.º 2, p. 489-496, Apr.
- [28] McGRANAGHAN, M. (1998). Overview of the guide for applying harmonic limits on power Systems – IEEE P519A. Apresentado ao 8th International Conference on Harmonic and Quality of Power ICHQP'98, Athens – Greece. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 1, p. 462 - 469, Oct.
- [29] HEYDT, G. T. et al. (1999). Applications of the Windowed FFT to electric Power Quality assessment. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 14, n.º 4, p. 1411-1416, Oct.
- [30] POISSON, O.; RIOUAL, P.; MEUNIER, M. (1999). New signal processing tools applied to Power Quality analysis. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 14, n.º 2, p. 561-566, Apr.
- [31] SANTOSO, S. et al. (2000). Characterization of distribution Power Quality events with Fourier and wavelet transform. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 15, n.º 1, p. 247-254, Jan.
- [32] ROCKMORE, D.; N. (2000). The FFT: An Algorithm the whole family can use. Computing in Science & Engineering, p. 60-64, Jan/Feb.
- [33] KIM, C. H.; AGGARVAL, R. (2000). Wavelet transforms in Power Systems. Power Engineering Journal, p. 81-87, Apr.
- [34] WEAVER, H. J. (1983). Applications of discrete and continuous Fourier analysis. New York: A Wiley-Interscience publication.
- [35] HIDALGO, R. M. et al. (2002), A simple adjustable window algorithm to improve FFT measurements. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 51, n.º 1, p. 31-36, Feb.
- [36] OLESKOVICZ, M. et al. (2003). Análise da Qualidade da Energia utilizando transformadas Wavelet combinadas às redes neurais artificiais. Apresentado no XVII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica - SNPTEE, Uberlândia, MG, Brasil.

- [37] DELMONT FILHO, O. et al. (2003). Utilização da transformada Wavelet para a caracterização de distúrbios da qualidade da energia elétrica. Apresentado no Seminário Brasileiro sobre a Qualidade da Energia Elétrica - SBQEE, Anais do Congresso, v. 2, p. 381-386, Aracaju, SE, Brasil, ago.
- [38] ARRUDA, E. F. (2003). Análise de distúrbios Relacionados com a Qualidade da Energia elétrica utilizando a Transformada *Wavelet*. 130p. Dissertação de Mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

45

24

→

၄

```

52TP1B CH3B .037 0.286
53TP1C CH3C
C
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C Impedancia do trecho entre o BC3 e os trafos 4, 5, 6 e 7 (T45)
51CH3A T45A .0785 0.568
52CH3B T45B .019 0.149
53CH3C T45C
C
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C Impedancia do trecho entre os trafos T45 E o trafo particular 2 (TP2)
51T45A TP2A .092 0.663
52T45B TP2B .023 0.178
53T45C TP2C
C
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C Impedancia do trecho entre o trafo TP2 e o trafo 13 (T13)
51TP2A T13A1 .0379 0.273
52TP2B T13B1 .009 0.072
53TP2C T13C1
C
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C Impedancia do trecho entre o trafo T13 e os trafos 8, 9 e 10 (T89)
51T13A1 T89A .113 0.817
52T13B1 T89B .028 0.215
53T13C1 T89C
C
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C Impedancia do trecho entre os trafos T89 e o trafo particular 3 (TP3)
51T89A TP3A .027 0.195
52T89B TP3B .007 0.050
53T89C TP3C
C
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C Impedancia do trecho entre os trafos T89 e os trafos 11, 12 e 14 (T11)
51T89A T11A .100 0.407
52T89B T11B .060 0.119
53T89C T11C
C
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C Impedancia do trecho entre os trafos T11 e o trafo particular 4 (TP4)
51T11A TP4A1 .100 0.407
52T11B TP4B1 .060 0.119
53T11C TP4C1
C *****
C BANCOS DE CAPACITORES
C
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >
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
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >
NEUT1 1.0E+6
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C BANCO DE CAPACIORES 2 - BC2
C
C BC2A
BC2A NEUT2 8.36 0
C BC2B
BC2B NEUT2 8.36 0
C BC2C
BC2C NEUT2 8.36 0
C Resistencia infinita para terra - BC2
NEUT2 1.00E6 0
C
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >

```

```

C BANCO DE CAPACIORES 3 - BC3
C
C BC3A
  BC3A NEUT3 8.36 0
C BC3B
  BC3B NEUT3 8.36 0
C BC3C
  BC3C NEUT3 8.36 0
C
C Resistencia infinita para terra - BC3
  NEUT3 1.00E6 0
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >
  NEUT4 1.0 0
  NEUT5 1.0 0
  NEUT6 1.0 0
  NEUT7 1.0 0
C *****
C CONJUNTOS DE TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO
C
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C CONJ. DE TRAFOS 1 E 2
C
  T12A 2514. 2100. 0
  T12B 2514. 2100. 0
  T12C 2514. 2100. 0
C
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C CONJ. DE TRAFOS 4, 5, 6 E 7
C
  T45A 1137. 949.7 0
  T45B 1137. 949.7 0
  T45C 1137. 949.7 0
C
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C CONJ. DE TRAFOS 8, 9, E 10
C
  T89A 3132. 2616. 0
  T89B 3132. 2616. 0
  T89C 3132. 2616. 0
C
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C CONJ. DE TRAFOS 11, 12 E 14
C
  T11A 1500. 1253. 0
  T11B 1500. 1253. 0
  T11C 1500. 1253. 0
C CARGAS NOS SECUNDÁRIOS DOS TRAFOS MODELADOS
C
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C CARGA NO SECUNDÁRIO DO TRAFOS DE DISTRIBUIÇÃO 3 (AMARELO)
  T3A2 1.44261.2050 0
  T3B2 1.44261.2050 0
  T3C2 1.44261.2050 0
C
C CARGA NO SECUNDÁRIO DO TRAFOS DE DISTRIBUIÇÃO 13 (AMARELO)
  T13A2 2.42972.0310 0
  T13B2 2.42972.0310 0
  T13C2 2.42972.0310 0
C
C CARGA NO SECUNDÁRIO DO TRAFOS PARTICULAR DE DISTRIBUIÇÃO 4 (VERDE)
  TP4A2 0.15900.1800 0
  TP4B2 0.15900.1800 0
  TP4C2 0.15900.1800 0
  TP4A2 3343 0
  TP4B2 3343 0
  TP4C2 3343 0
C
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C RESISTÊNCIA DE FALTA SEA/B/C1 E TERRA
  SEA1 0.01 0
  SEB1 0.01 0

```



```

SEC1                      0.01                      0
C
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C RESISTÊNCIA DE FALTA CH1A/B/C1 E TERRA
CH1A1                      0.01                      0
CH1B1                      0.01                      0
CH1C1                      0.01                      0
C
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C RESISTÊNCIA DE FALTA CH3A/B/C1 E TERRA
CH3A1                      0.01                      0
CH3B1                      0.01                      0
CH3C1                      0.01                      0
C *****
C CONJUNTOS DE TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO PARTICULARES
C
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C TRAF0 PARTICULAR 1 (03 trafos)
C
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 < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C TRAF0 PARTICULAR 2 (04 trafos)
C
TP2A                      71.58 167.4                      0
TP2B                      71.58 167.4                      0
TP2C                      71.58 167.4                      0
TP2A                      10.00                      0
TP2B                      10.00                      0
TP2C                      10.00                      0
C
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C TRAF0 PARTICULAR 3 (02 trafos)
C
TP3A                      251.2 587.5                      0
TP3B                      251.2 587.5                      0
TP3C                      251.2 587.5                      0
TP3A                      3.00                      0
TP3B                      3.00                      0
TP3C                      3.00                      0
C
C TRANSFORMADOR DA SUBESTAÇÃO
C
C TRANSFORMADOR DA SE - 138/13.68 kV - 25 MVA
C 345678901234567890123456789012345678901234567890
C < > < >< >< >< >< >
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
1BTA2 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
C TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO
C
C MODELAGEM NOVA DO TRAF0 DE DISTR. 3 (AMARELO)
C TRAF0 DE DISTRIBUICAO DE 45 kVA - 13.2/0.22 kV
C 345678901234567890123456789012345678901234567890
C < > < >< >< >< >< >

```

```

TRANSFORMER          0.016435.712T3A    63000.
1.639800000E-02 3.571255000E+01
3.999200000E-02 4.017662000E+01
6.952500000E-02 4.464069000E+01
8.870100000E-02 4.687272000E+01
1.122290000E-01 4.910476000E+01
1.393680000E-01 5.133680000E+01
1.746230000E-01 5.356883000E+01
2.149780000E-01 5.580087000E+01
2.610490000E-01 5.803290000E+01
3.125260000E-01 6.026493000E+01
3.742520000E-01 6.249697000E+01
9999
C 345678901234567890123456789012345678901234567890
1T3A1 T3B1          81.819143.53 13.2
2T3A2 NEUT5         .0093 .0163 .127
TRANSFORMER T3A          T3B
1T3B1 T3C1
2T3B2 NEUT5
TRANSFORMER T3A          T3C
1T3C1 T3A1
2T3C2 NEUT5
C
C MODELAGEM NOVA DO TRAF0 DE DISTR. 13 (AMARELO)
C TRAF0 DE DISTRIBUICAO DE 45 kVA - 13.2/0.22 kV
C 345678901234567890123456789012345678901234567890
C < > < >< >< >< >
TRANSFORMER          .016435.712T13A    63000.
C 345678901234567890123456789012345678901234567890
1.639800000E-02 3.571255000E+01
3.999200000E-02 4.017662000E+01
6.952500000E-02 4.464069000E+01
8.870100000E-02 4.687272000E+01
1.122290000E-01 4.910476000E+01
1.393680000E-01 5.133680000E+01
1.746230000E-01 5.356883000E+01
2.149780000E-01 5.580087000E+01
2.610490000E-01 5.803290000E+01
3.125260000E-01 6.026493000E+01
3.742520000E-01 6.249697000E+01
9999
1T13A1 T13B1        81.819143.53 13.2
2T13A2 NEUT6        .0093 .0163 .127
TRANSFORMER T13A          T13B
1T13B1 T13C1
2T13B2 NEUT6
TRANSFORMER T13A          T13C
1T13C1 T13A1
2T13C2 NEUT6
C
C MODELAGEM NOVA DO TRAF0 DE DISTR. 4 (VERDE)
C TRAF0 DE DISTRIBUICAO DE 45 kVA - 13.2/0.22 kV
C 345678901234567890123456789012345678901234567890
C < > < >< >< >< >
TRANSFORMER          .016435.712T4A    63000.
C 345678901234567890123456789012345678901234567890
1.639800000E-02 3.571255000E+01
3.999200000E-02 4.017662000E+01
6.952500000E-02 4.464069000E+01
8.870100000E-02 4.687272000E+01
1.122290000E-01 4.910476000E+01
1.393680000E-01 5.133680000E+01
1.746230000E-01 5.356883000E+01
2.149780000E-01 5.580087000E+01
2.610490000E-01 5.803290000E+01
3.125260000E-01 6.026493000E+01
3.742520000E-01 6.249697000E+01
9999
1TP4A1 TP4B1        81.819143.53 13.2
2TP4A2 NEUT7        .0093 .0163 .127
TRANSFORMER T4A          T4B
1TP4B1 TP4C1

```

```

2TP4B2 NEUT7
  TRANSFORMER T4A                                T4C
1TP4C1 TP4A1
2TP4C2 NEUT7
C *****
/SWITCH
C
C CHAVES (DISJUNTORES) DO ALIMENTADOR
C
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP >< type >
  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
C CHAVES DE COMANDO DOS BANCOS DE CAPACITORES
C
C CHAVE DE COMANDO BC1
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP >< type >
  CH1A BC1A 1.000E+01 1.000E+01 0.000E+00 0
  CH1B BC1B 1.000E+01 1.000E+01 0.000E+00 0
  CH1C BC1C 1.000E+01 1.000E+01 0.000E+00 0
C
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP >< type >
C CHAVE DE COMANDO BC2
  CH1A BC2A 1.000E+01 1.000E+01 0.000E+00 0
  CH1B BC2B 1.000E+01 1.000E+01 0.000E+00 0
  CH1C BC2C 1.000E+01 1.000E+01 0.000E+00 0
C
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP >< type >
C CHAVE DE COMANDO BC3
  CH3A BC3A 1.000E+01 1.000E+01 0.000E+00 0
  CH3B BC3B 1.000E+01 1.000E+01 0.000E+00 0
  CH3C BC3C 1.000E+01 1.000E+01 0.000E+00 0
C
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP >< type >
C CHAVE DE FALTA SEA - SEA1
  SEA SEA1 4.450E-02 9.450E-02 0.000E+00 0
  SEB SEB1 1.000E+01 1.000E+01 0.000E+00 0
  SEC SEC1 1.000E+01 1.000E+01 0.000E+00 0
C
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP >< type >
C CHAVE DE FALTA CH1A - CH1A1
  CH1A CH1A1 1.000E+01 1.000E+01 0.000E+00 0
  CH1B CH1B1 1.000E+01 1.000E+01 0.000E+00 0
  CH1C CH1C1 1.000E+01 1.000E+01 0.000E+00 0
C
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP >< type >
C CHAVE DE FALTA CH3A - CH3A1
  CH3A CH3A1 1.000E+01 1.000E+01 0.000E+00 0
  CH3B CH3B1 1.000E+01 1.000E+01 0.000E+00 0
  CH3C CH3C1 1.000E+01 1.000E+01 0.000E+00 0
C *****
C
/SOURCE
C
C FONTE EQUIVALENTE DO SISTEMA de 138 kV.
C < n 1><> < Ampl. >< Freq. ><Phase/TO>< A1 >< T1 >< TSTART >< TSTOP >
14FONTA 0 112676.53 60. -1. 2.
14FONTB 0 112676.53 60. -120. 2.
14FONTC 0 112676.53 60. 120. -1. 2.
C
BLANK BRANCH
BLANK SWITCH
BLANK SOURCE
C *****
C < >< >< >< >< >< >
  SEA SEB SEC
BLANK OUTPUT
BLANK PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK

```


Anexo II

A seguir, o algoritmo computacional desenvolvido, para detectar e identificar os problemas relacionados à Qualidade da Energia.

Este algoritmo localiza e identifica os fenômenos de afundamento de tensão, elevação de tensão e oscilação transitória.

```
workspace
opção = menu ( 'ANÁLISE DE SINAIS', ...
               'Entrada de dados', ...
               'Análise no tempo', ...
               'Análise na frequência',...
               'Fechar todos os gráficos');

if opção == 1
    in_data
end
if opcao == 2
    an_time
end
if opcao == 3
    an_freq
end
if opcao == 4
    close all
end

function[F,Z]=w_fft(z,Lw,ti,tf)
% Calcula a FFT janelada e a FFT da parte do sinal com distúrbio.
%
% F, Z - são vetores que retornam os as frequência para compor o eixo das
% frequências e a FFT do sinal.
% z - pedaço do sinal com distúrbio
% Lw - comprimento da janela em ms
% ti - tempo do início do distúrbio no sinal completo
% tf - tempo do fim do distúrbio no sinal completo

N = length(z);
Fs = (N-1)/(tf-ti);
Nw = fix(Lw*N/(tf-ti));
w = hanning(Nw);

figure
subplot(211); plot(0:1/Fs:(tf-ti),z); ylabel('amplitude do sinal'); xlabel('intervalo de duração'); axis tight
subplot(212); specgram(z,1024,Fs,w); ylabel('componentes de frequência'); xlabel('intervalo de duração');
axis tight

FFT_z = fft(z);
```

```

FFT_z0 = 1/N*FFT_z(1);
Z = 2/N*abs(FFT_z(2:N));
F = Fs*(1:length(Z)/2)/length(Z);

```

% Rotina para análise na frequência

```

np = fix((1/60)/(t(2)-t(1)));
twocycle = 2*np;

```

```

if (ind_ini-twocycle) <= 0
    ti = t(1);
    ind_aux_ini = 1;
else
    ti = t(ind_ini-twocycle);
    ind_aux_ini = ind_ini-twocycle;
end

```

```

if (ind_fim+twocycle) >= length(t)
    tf = t(length(t));
    ind_aux_fim = length(t);
else
    tf = t(ind_fim+twocycle);
    ind_aux_fim = ind_fim+twocycle;
end

```

```

z = sd(ind_aux_ini:ind_aux_fim);

```

```

[F,Z] = w_fft(z,Lw,ti,tf);

```

```

figure
bar(F,Z(1:fix(length(Z)/2))); %axis([0 200 min(Z) 1.2*max(Z)])
title('componentes de frequência'); xlabel('frequência'); ylabel('amplitude do sinal analisado')

```

% Rotina para análise no tempo

```

erro = s - sd;
soma1 = 0; soma2 = 0; soma3 = 0;
for k = 1:length(t)
    soma1 = soma1 + s(k)^2;
    s_rms(k) = 1/sqrt(k)*sqrt(soma1);

    soma2 = soma2 + sd(k)^2;
    sd_rms(k) = 1/sqrt(k)*sqrt(soma2);

    soma3 = soma3 + erro(k)^2;
    e_rms(k) = 1/sqrt(k)*sqrt(soma3);

    sinal_e_rms(k) = s_rms(k) - sd_rms(k);

    if (sinal_e_rms(k) >= 0)
        flagsag(k) = 1;
        flagswell(k) = 0;
    else
        flagswell(k) = 1;
        flagsag(k) = 0;
    end
end

```

```

end

if (abs(erro(k)) > 2e-1)
    t_erro1(k) = t(k);
else
    t_erro1(k) = 0;
end
if (abs(erro(k)) > 82e-2)
    t_erro2(k) = t(k);
else
    t_erro2(k) = 0;
end
end

figure
subplot(211); plot(t,s,'r',t,sd,'b');
ylabel('[KV]'); xlabel('[s]'); legend('sinal original','sinal analisado'); grid
subplot(212); plot(t,erro,'g');
ylabel('[KV]'); xlabel('[s]'); legend('erro = diferença entre o sinal original e o sinal analisado'); grid

disp '%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%'
disp '                DIAGNÓSTICO DO SINAL'
disp '%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%'

disp '>> Dados dos Sinais de Entrada <<'
disp '- número de pontos do sinal: '
N = length(s)

disp '- taxa amostral do sinal [Hz]: '
Fs = (N-1)/(t(length(t))-t(1))

disp '>> inicio do distúrbio <<'
ind1 = find(t_erro1>0);
if isempty(ind1) == 0
    ind_ini = ind1(1);
    t_ini = t(ind_ini)
end

disp '>> fim do distúrbio <<'
ind2 = find(t_erro2>0);
if isempty(ind2) == 0
    ind_fim = ind2(length(ind2));
    t_fim = t(ind_fim)
else
    ind_fim = ind1(length(ind1));
    t_fim = t(ind_fim)
end

disp '>> intervalo de duração do distúrbio <<'
td = t_fim - t_ini

disp '>> no. ciclos de duração do distúrbio (1 ciclo = 16.677ms) <<'
ciclos = td*60

disp '>> percentual máximo do distúrbio <<'
np = fix((1/60)/(t(2)-t(1)));

```



```

p100_max = max(erro(ind_ini+np:ind_fim))/max(s(ind_ini+np:ind_fim))*100

nsag = length(find(flagsag == 1)); nswell = length(find(flagswell == 1));

disp '>> resultado da análise <<'
if (max(erro) > 9e-1*max(s))
    disp '-----'
    disp '>> ALERTA!!! INTERRUPÇÃO <<'
    disp '-----'
else
    if (nsag > nswell) & (ciclos < 30)
        disp '-----'
        disp '>> AFUNDAMENTO <<'
        disp '-----'
    elseif (nswell > nsag) & (ciclos < 30)
        disp '-----'
        disp '>> ELEVAÇÃO <<'
        disp '-----'
    elseif (nsag > nswell) & (nswell > nsag) & (ciclos < 30)
        disp '-----'
        disp '>> OSCILAÇÃO <<'
        disp '-----'
    end
end
end

```