

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS DE TENSÃO

**Davi Vidal Rola
Thompson Sobreira Rolim Júnior**

Brasília, agosto de 2006

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA
Departamento de Engenharia Elétrica

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Elétrica

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA
ANÁLISE DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS DE
TENSÃO**

**Davi Vidal Rola
Thompson Sobreira Rolim Júnior**

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro Eletricista

Banca Examinadora

Prof. Anésio de Leles, UnB / ENE (Orientador)

Prof. Fernando Figueiredo, UnB / ENE

Prof. Francisco Damasceno Freitas, UnB / ENE

DEDICATÓRIA(S)

À minha afilhada, Izabela.

Thompson Sobreira Rolim Júnior

*Para Marly e Danielle, por todo amor e
companheirismo dispensados nos momentos
difíceis da minha graduação.*

Davi Vidal Rola

AGRADECIMENTOS

A Deus em primeiro lugar, por ser minha razão de viver, e por me proporcionar a realização dos meus sonhos.

A toda minha família, pelo apoio irrestrito em minha vida acadêmica.

Ao amigo Thompson, companheiro neste trabalho, pelo esforço e dedicação.

Ao professor Anésio de Leles, pela atenção e paciência demonstradas.

Aos amigos de todas as horas: Marta, Leonardo, Danilo, André, João Paulo.

Aos amigos na Universidade: Ronaldo, Diogo, Ivo, Flávio, Lucas, Vivianne, Rafael, Bárbara e Karen.

Aos professores e funcionários do departamento de Engenharia Elétrica, que contribuíram para minha formação.

Davi Vidal Rola

Agradeço ao meu pai, Thompson S. Rolim, pelo exemplo de vida e assistência incondicional durante toda a minha vida.

À minha mãe, Maria Abadia R. Sobreira, pelo carinho e auxílio em tudo o que sempre precisei.

Aos amigos Marcos e Ewerton, considerados irmãos, com os quais estudo desde o início da graduação.

Ao amigo Davi, companheiro de projeto, pela dedicação e por propiciar um clima agradável para o desenvolvimento deste trabalho.

À todos os professores que de algum modo contribuíram para a realização deste projeto, em especial ao professor Anésio de Leles pelo incentivo e apoio concedido.

Por fim, agradeço aos amigos Alcides, Giancarlo, Luis e Thiago pela ajuda no trabalho.

Thompson S. Rolim Júnior

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 Aspectos Gerais	1
1.2 Estrutura do Trabalho	2
CAPÍTULO 2 - QUALIDADE DA ENERGIA.....	4
2.1 Aspectos gerais sobre a Qualidade da Energia	4
2.2 Itens de definição da Qualidade da Energia.....	6
2.2.1 Transitórios	7
2.2.2 Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD).....	8
2.2.3 Variações de Tensão de Longa Duração (VTLD)	10
2.2.4 Desequilíbrios de tensão	11
2.2.5 Distorção de forma de onda	11
2.2.6 Flutuação de tensão.....	13
2.2.7 Variação de frequência	14
2.3 Considerações Finais	14
CAPÍTULO 3 - DISTORÇÕES HARMÔNICAS	15
3.1 Definição.....	15
3.2 Características dos Ambientes Distorcidos.....	17
3.2.1 Valor Eficaz	18
3.2.2 Potência.....	18
3.2.3 Fator de Potência	20
3.2.4 Impedância.....	20
3.3 Quantificação das Distorções Harmônicas	20
3.3.1 Distorção Harmônica Individual.....	20
3.3.2 Distorção Harmônica Total.....	21
3.4 Fontes de Distorções Harmônicas.....	22
3.4.1 Cargas Residenciais	22
3.4.2 Cargas Comerciais	23
3.4.3 Cargas Industriais	24
3.5 Efeitos Causados por Distorções Harmônicas	24
3.5.1 Efeitos em Transformadores de Potência.....	24
3.5.2 Efeitos de Harmônicos em Cabos	25
3.5.3 Efeitos em motores elétricos de indução.....	25
3.5.4 Efeitos em Máquinas Síncronas.....	25
3.5.5 Efeitos em Bancos de Capacitores	26
3.5.6 Efeitos em dispositivos de proteção.....	27
3.5.7 Efeitos em medidores de energia elétrica	27
3.6 Normas e Recomendações	27
3.6.1 Normas e Recomendações Internacionais.....	27
3.6.2 Normas e Recomendações Nacionais	35
3.7 Considerações Finais	39
CAPÍTULO 4 - FERRAMENTA COMPUTACIONAL	40
4.1 Estrutura do Aplicativo	40
4.2 Banco de Dados	42
4.3 Iniciando o ProgramA.....	44
4.4 Módulo de Entrada – Leitura do Banco de Dados	46
4.5 Considerações Finais	48
CAPÍTULO 5 - ANÁLISE DE TENSÃO E CARGA	49
5.1 Estrutura do Módulo	49
5.2 Estudo de caso.....	50
5.2.1 Tensões de Linha	50
5.2.2 Correntes de Linha.....	52
5.2.3 Potências	54
5.3 Considerações Finais	57

CAPÍTULO 6 - ANÁLISE DA FREQUÊNCIA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.....	58
6.1 Estrutura do Módulo	58
6.2 Estudo de Caso.....	59
6.3 Considerações Finais	62
CAPÍTULO 7 - ANÁLISE DA SIMILARIDADE ENTRE FASES	63
7.1 Estrutura do Módulo	63
7.2 Estudo de Caso.....	64
7.2.1 Comparação Gráfica	64
7.2.2 Análise estatística.....	65
7.3 Considerações Finais	66
CAPÍTULO 8 - ANÁLISE DA SIMILARIDADE ENTRE DIAS E ENTRE PERÍODOS DO DIA	67
8.1 Módulo de Análise de Similaridade entre Dias.....	67
8.2 Módulo de Análise de Similaridade entre Períodos.....	68
8.3 Estudo de Caso.....	69
8.3.1 Comparação gráfica	69
8.3.2 Análise estatística.....	70
8.3.3 Similaridade entre Períodos de um Dia.....	72
8.4 Considerações Finais	73
CAPÍTULO 9 - ANÁLISE DE DISTRIBUIÇÃO NO TEMPO	74
9.1 Módulo de Análise de Distribuição no Tempo	74
9.2 Estudo de Caso.....	75
9.2.1 Valores Estatísticos de dht.....	76
9.2.2 Análise considerando-se o valor P95%	76
9.2.3 Análise considerando-se o valor P99%	79
9.2.4 Análise considerando-se o valor médio quadrático como referência.....	81
9.3 Considerações Finais	84
CAPÍTULO 10 - QUALIFICAÇÃO.....	85
10.1 Estrutura do Módulo	85
10.2 Estudo de caso.....	88
10.3 Considerações Finais	91
CAPÍTULO 11 - COMPARAÇÃO ENTRE LOCAIS.....	92
11.1 Estudo de Caso.....	93
11.1.1 Similaridade entre Fases	93
11.1.2 Similaridade entre Dias e Períodos	95
11.1.3 Análise de Distribuição no Tempo	98
11.1.4 Qualificação	102
11.2 Considerações Finais	108
CAPÍTULO 12 - CONCLUSÃO	109
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	113

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Evolução das vendas de eletrodomésticos no Brasil (1990 - 2000).....	5
Figura 2.2 – Transitório em uma onda de tensão.....	7
Figura 2.3 – Interrupção transitória de tensão.....	8
Figura 2.4 – Afundamento de tensão.....	9
Figura 2.5 – Elevação momentânea de tensão.....	10
Figura 2.6 – Onda de corrente com presença de inter-harmônicos.....	11
Figura 2.7 – Corte de tensão.....	12
Figura 2.8 – Ruídos na onda de tensão.....	13
Figura 2.9 – Ocorrência de flutuação de tensão.....	14
Figura 3.1 – À esquerda: onda perfeitamente senoidal; à direita: onda com 10% de 3o harmônico.....	15
Figura 3.2 – Onda de corrente em um reator de alta distorção harmônica.....	23
Figura 3.3 – Onda de corrente em uma fonte chaveada de um microcomputador.....	23
Figura 3.4 – Vida útil de um transformador em função da distorção harmônica de corrente.....	24
Figura 3.5 – Perdas elétricas de um motor de indução trifásico em função da distorção total da tensão.....	25
Figura 3.6 – Perda de vida útil versus sobretemperatura em capacitores.....	26
Figura 4.1 – Medidor ION 7600.....	43
Figura 4.2 – Exemplo de banco de dados no Microsoft Excel.....	44
Figura 4.3 – Tela de apresentação.....	45
Figura 4.4 – Tela inicial.....	45
Figura 4.5 – Opção por tipo de banco de dados.....	46
Figura 4.6 – Aviso de banco carregado.....	46
Figura 4.7 – Janela do módulo de entrada do programa (Banco de Dados).....	47
Figura 4.8 – Localização da subestação SE02.....	48
Figura 5.1 – Janela do módulo de análise de tensão e carga.....	50
Figura 5.2 – Tensões de linha no intervalo de uma semana de medição.....	50
Figura 5.3 – Gráfico de barras com os dados da Tabela 5.1.....	51
Figura 5.4 – Correntes de linha no intervalo de uma semana de medição.....	52
Figura 5.5 – Gráfico de barras com os dados da Tabela 5.2.....	53
Figura 5.6 – Gráfico de barras com os dados da Tabela 5.3.....	54
Figura 5.7 – Correntes de linha no intervalo de uma semana de medição.....	55
Figura 5.8 – Gráfico de barras com os dados da Tabela 5.4.....	56
Figura 5.9 – Gráfico de barras com os dados da Tabela 5.5.....	57
Figura 6.1 – Janela do módulo de análise da frequência de aquisição de dados.....	59
Figura 6.2 – DHTV na fase b para três intervalos de aquisição.....	60
Figura 6.3 – DHTV na fase b para a primeira semana de medição.....	60
Figura 6.4 – Gráfico de barras com os dados da Tabela 6.2.....	61
Figura 7.1 – Módulo de Análise de Similaridade entre Fases.....	63
Figura 7.2 – Escolha da frequência de aquisição dos dados.....	64
Figura 7.3 – DHT _v ponto a ponto para cada fase.....	65
Figura 7.4 – Gráfico de barras com os dados da Tabela 7.1.....	65
Figura 8.1 – Módulo de Análise da Similaridade entre Dias.....	67
Figura 8.2 – Módulo de Análise da Similaridade entre Períodos.....	68
Figura 8.3 – Comportamento das DHT _{vb} durante a primeira semana.....	69
Figura 8.4 – Comportamento das DHT _{vb} durante a segunda semana.....	70
Figura 8.5 – Gráfico de barras com as estatísticas para análise de similaridade entre dias.....	71
Figura 8.6 – DHT _{vb} ponto a ponto para o dia 20 de julho de 2006.....	72
Figura 8.7 – Gráfico de barras.....	73
Figura 9.1 – Módulo de Análise de Distribuição no Tempo.....	75
Figura 9.2 – Valores com DHT _v ≥ 2,956% versus tempo total de medição em minutos.....	76
Figura 9.3 – Intervalos ininterruptos de tempo com valores de DHT _v ≤ 2,956%.....	77
Figura 9.4 – Intervalos ininterruptos de tempo com valores de DHT _v ≥ 2,956 %.....	78

Figura 9.5 – Probabilidades de ocorrência dos intervalos ininterruptos de tempo com $DHT_v \geq 2,956\%$	78
Figura 9.6 – Probabilidades de ocorrência dos intervalos ininterruptos de tempo com $DHT_v \leq 2,956\%$	78
Figura 9.7 – Zoom na faixa de 0 a 760 minutos da Figura 9.6.....	78
Figura 9.8 – Valores com $DHT_v \geq 3,0649\%$ versus tempo total de medição em minutos.....	79
Figura 9.9 – Valores com $DHT_v \leq 3,0649\%$ versus tempo total de medição em minutos.....	79
Figura 9.10 – Intervalos ininterruptos de tempo com valores de $DHT_v \geq 3,0649\%$	80
Figura 9.11 – Probabilidades de ocorrência dos intervalos ininterruptos de tempo com $DHT_v \geq 3,0649\%$	80
Figura 9.12 – Probabilidades de ocorrência dos intervalos ininterruptos de tempo com $DHT_v \leq 3,0649\%$	81
Figura 9.13 – Valores com $DHT_v \geq 2,302\%$ versus tempo total de medição em minutos.....	81
Figura 9.14 – Intervalos ininterruptos de tempo com valores de $DHT_v \leq 2,302\%$	82
Figura 9.15 – Intervalos ininterruptos de tempo com valores de $DHT_v \geq 2,302\%$	82
Figura 9.16 – Probabilidades de ocorrência dos intervalos ininterruptos de tempo com $DHT_v \geq 2,302\%$	83
Figura 9.17 – Probabilidades de ocorrência dos intervalos ininterruptos de tempo com $DHT_v \leq 2,302\%$	83
Figura 10.1 – Janela do módulo de qualificação.....	85
Figura 10.2 – Especificação da tensão nominal do barramento.....	86
Figura 10.3 – Especificação da tensão nominal.....	86
Figura 10.4 – Padronização da Grandeza escolhida.....	87
Figura 10.5 – Escolha dos dias de medição.....	87
Figura 10.6 – Aviso que aparece se o usuário não obedecer a metodologia da norma em estudo.....	87
Figura 10.7 – Distribuição de Probabilidades.....	89
Figura 10.8 – Probabilidade acumulada inversa em minutos.....	89
Figura 10.9 – Distribuição de Probabilidades (segunda semana de medição).....	90
Figura 10.10 – Probabilidade acumulada inversa em minutos (segunda semana de medições).....	90
Figura 11.1 – Gráfico ponto a ponto das três fases da DHT_v (Subestação SEAC).....	93
Figura 11.2 – Gráfico ponto a ponto das três fases da DHT_v (Subestação SEBN).....	93
Figura 11.3 – Gráfico ponto a ponto das três fases da DHT_v (Subestação SEMJ).....	94
Figura 11.4 – Estatísticas das DHT_v das três fases na SEAC.....	94
Figura 11.5 – Estatísticas das DHT_v das três fases SEBN.....	94
Figura 11.6 – Estatísticas das DHT_v das três fases na SEMJ.....	95
Figura 11.7 – Gráfico dos comportamentos diários das DHT_{va} na SEAC.....	95
Figura 11.8 – Gráfico dos comportamentos diários das DHT_{va} na SEBN.....	96
Figura 11.9 – Gráfico dos comportamentos diários das DHT_{vc} na SEMJ.....	96
Figura 11.10 – Comparação entre as DHT_{va} em diferentes períodos do dia 28/06/06 (SEAC).....	97
Figura 11.11 – Comparação entre as DHT_{va} em diferentes períodos do dia 28/06/06 (SEBN).....	97
Figura 11.12 – Comparação entre as DHT_{vc} em diferentes períodos do dia 28/06/06 (SEMJ).....	97
Figura 11.13 – Probabilidades de ocorrência dos intervalos ininterruptos de tempo com $DHT_{va} \geq 1,4666\%$..	99
Figura 11.14 – Probabilidades de ocorrência dos intervalos ininterruptos de tempo com $DHT_{va} \geq 1,7536\%$..	99
Figura 11.15 – Probabilidades de ocorrência dos intervalos ininterruptos de tempo com $DHT_{vc} \geq 4,7151\%$..	99
Figura 11.16 – Probabilidades de ocorrência dos intervalos ininterruptos de tempo com $DHT_v \leq 1,4666\%$..	100
Figura 11.17 – Probabilidades de ocorrência dos intervalos ininterruptos de tempo com $DHT_v \leq 1,7536\%$..	101
Figura 11.18 – Probabilidades de ocorrência dos intervalos ininterruptos de tempo com $DHT_v \leq 4,7151\%$..	101
Figura 11.19 – Distribuição de Probabilidades (SEAC).....	103
Figura 11.20 – Distribuição de Probabilidades (SEBN).....	104
Figura 11.21 – Distribuição de Probabilidades (SEMJ).....	104
Figura 11.22 – Probabilidade acumulada inversa (SEAC).....	105
Figura 11.23 – Probabilidade acumulada inversa (SEBN).....	105
Figura 11.24 – Probabilidade acumulada inversa (SEMJ).....	105
Figura 11.25 – Gráfico ponto a ponto das correntes de linha medidas na SEMJ.....	105
Figura 11.26 – Comportamento das DHI_{v17} na SEMJ.....	107
Figura 11.27 – Comportamento das DHI_{v19} na SEMJ.....	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Fenômenos da QEE.....	6
Tabela 3.1 – Níveis de tensões harmônicas (expressos como porcentagem da tensão nominal) para sistemas de potência de baixa e média tensão.....	28
Tabela 3.2 – Níveis de tensões harmônicas (expressos como porcentagem da tensão nominal) para sistemas de potência de baixa e média tensão.....	29
Tabela 3.3 – Limites de distorção harmônica de tensão em % da nominal.....	30
Tabela 3.4 – Valores para as tensões harmônicas individuais e total nos terminais de suprimento (para ordens até 25) – Níveis para Média e Baixa Tensão.....	31
Tabela 3.5 – Níveis de tensões harmônicas (expressos como porcentagem da tensão real) para sistemas de potência de baixa e média tensão.....	32
Tabela 3.6 – Níveis de tensões harmônicas (expressos como porcentagem da tensão real) para sistemas de potência de alta e extra – alta tensão.....	32
Tabela 3.7 – Limites e Tolerâncias para as ordens harmônicas e DHT.....	34
Tabela 3.8 – Limites de referência globais das distorções harmônicas (em porcentagem da tensão fundamental).....	37
Tabela 3.9 – Valores de referência globais das distorções harmônicas totais.....	38
Tabela 3.10 – Valores de referência globais das distorções harmônicas individuais.....	39
Tabela 4.1 – Formato do banco de dados (tipo 1).....	44
Tabela 4.2 – Dados do banco medido na subestação SE02.....	47
Tabela 5.1 – Dados estatísticos das tensões medidas.....	51
Tabela 5.2 – Dados estatísticos das correntes medidas nos dias úteis.....	53
Tabela 5.3 – Dados estatísticos das correntes medidas no fim de semana.....	53
Tabela 5.4 – Dados estatísticos das potências medidas nos dias úteis.....	55
Tabela 5.5 – Dados estatísticos das potências medidas no fim de semana.....	55
Tabela 6.1 – Dados de DHT_V para as três fases do sistema.....	60
Tabela 6.2 – Dados estatísticos das DHT_V para cada frequência de aquisição.....	61
Tabela 7.1 – Dados estatísticos das DHT_V	65
Tabela 8.1 – Dados estatísticos dos sete dias em estudo.....	70
Tabela 8.2 – Discrepância entre dias correspondentes das duas semanas.....	71
Tabela 8.3 – Similaridade entre períodos.....	72
Tabela 9.1 – Valores de distorção medidos.....	76
Tabela 10.1 – Análise qualitativa.....	88
Tabela 11.1 – P95% de cada subestação.....	98
Tabela 11.2 – Análise qualitativa das DHT_V medidas na SEAC.....	102
Tabela 11.3 – Análise qualitativa das DHT_V medidas na SEBN.....	102
Tabela 11.4 – Análise qualitativa das DHT_V medidas na SEMJ.....	103
Tabela 11.5 – Análise das DHI_c da SEMJ.....	106

LISTA DE SÍMBOLOS

SÍMBOLOS LATINOS

D	Potência elétrica de distorção	[var]
DDI	Distorção de demanda individual	[%]
DDT	Distorção de demanda total	[%]
DHI	Distorção harmônica individual	[%]
DHT	Distorção harmônica total	[%]
I	Corrente elétrica	[A]
P	Potência elétrica ativa	[W]
Q	Potência elétrica reativa	[var]
S	Potência elétrica aparente	[VA]
V	Tensão elétrica	[V]
Z	Impedância elétrica	[Ω]

SÍMBOLOS GREGOS

ϕ	Ângulo de tensão ou corrente	[rad]
θ	Ângulo do fator de potência	[rad]
ω	Frequência angular	[rad/s]
μ	Média aritmética	
φ	Média quadrática	
σ	Desvio padrão	

GRUPOS ADIMENSIONAIS

$f.p.$	Fator de potência
--------	-------------------

SUBSCRITOS

F	fase
h	ordem harmônica
I	corrente
L	linha
V	tensão

SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CEB	Companhia Energética de Brasília
CENELEC	Comité Européen de Normalisation Electrotechnique
CIGRÉ	Conseil International des Grands Réseaux Électriques
DNAEE	Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica
Eletrobrás	Centrais Elétricas Brasileiras SA
GCOI	Grupo Coordenador para a Operação Interligada
GCPS	Grupo Coordenador do Planejamento dos Sistemas Elétricos
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
NTCSE	Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
QEE	Qualidade da Energia Elétrica
SIN	Sistema Interligado Nacional



CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 ASPECTOS GERAIS

Nos últimos anos, com a evolução da eletrônica e especialmente dos microprocessadores, tem surgido uma nova geração de equipamentos elétricos, trazendo enormes benefícios como maior controlabilidade, aumento da eficiência dos processos industriais e capacidade de execução de tarefas praticamente impossíveis anteriormente. No entanto, estes dispositivos se caracterizam pelo comprometimento com a deterioração da energia elétrica.

Em decorrência desse fato, a Qualidade da Energia Elétrica (QEE) tem se tornado um fator muito mais relevante e necessário ao desenvolvimento do setor elétrico (GOMES; BRASIL; MEDEIROS, 2002).

Diante de um mercado globalizado e cada vez mais competitivo, onde há incessante procura por maior produtividade, redução de custos e qualidade nos serviços, torna-se indispensável a busca pelo desenvolvimento e melhoria da energia provida aos usuários, reduzindo-se as supressões econômicas advindas da poluição elétrica. (OLIVEIRA, M., 2005; AFONSO; MARTINS, 2004).

Considerando-se que a deterioração da QEE causa ineficiências técnicas e econômicas com significativas perdas para a comunidade, o assunto tem se tornado alvo de pesquisas e estudos em todo o mundo. Já em 8 de Abril de 1991, a revista *Business Week* informava que a poluição elétrica estava custando cerca de US\$ 26 bilhões por ano em danos e atitudes preventivas, só nos Estados Unidos. (GAMA; ADILSON, 1999).

Neste propósito, internacionalmente, têm-se buscado instrumentos e indicadores para a avaliação dos diversos aspectos que envolvem a qualidade da energia elétrica. Dentre estes, merecem especial destaque as distorções harmônicas, intimamente ligadas ao grande aumento no número de cargas não-lineares nos sistemas de potência. (OLIVEIRA, M., 2005).

Apesar dos esforços enveredados até então, não há consenso sobre os parâmetros adotados



para a quantificação e qualificação adequada das harmônicas. Embora tenham sido estabelecidos limites para as distorções, as normas e recomendações mundialmente conhecidas que tratam do assunto não determinam com clareza os procedimentos para a medição das grandezas, tampouco trazem ferramentas que permitem ao usuário aplicá-las. Pesa também o grande volume de dados a serem tratados. As análises requeridas pelas normas necessitam que um número considerável de grandezas seja medido, para comparação com os limites estabelecidos.

Dessa maneira, faz-se necessária uma busca por mecanismos de auxílio ao estudo deste distúrbio. Este trabalho tem como objetivo apresentar uma contribuição para a análise e avaliação das distorções harmônicas de tensão, através do desenvolvimento de um “*software*” para a quantificação da distorção harmônica equivalente, possibilitando ao usuário um tratamento estatístico e probabilístico imprescindível ao se analisar grandezas de caráter aleatório. O aplicativo permite a interpretação e comparação dos valores encontrados com os limites adotados nas principais normas e recomendações nacionais e internacionais, fornecendo informações relevantes sobre a adequação destes limites à realidade, tendo em vista algumas deficiências relacionadas aos procedimentos que levaram à sua definição.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho apresenta-se convencionalmente desenvolvido, seguindo a estrutura:

- **Capítulo 2:** Destina-se a apresentar os principais fundamentos relacionados aos distúrbios de qualidade da energia elétrica, salientando a importância de se conhecer bem estes fenômenos que a afetam.
- **Capítulo 3:** Orientado a destacar os principais conceitos associados às distorções harmônicas nos sistemas elétricos de potência, trazendo também um resumo das principais normas e recomendações nacionais e internacionais sobre o assunto.
- **Capítulo 4:** Dirigido a introduzir a ferramenta computacional para análise das distorções harmônicas de tensão, exibindo sua estrutura e definições matemáticas utilizadas. Também é apresentado o banco de dados analisado nos estudos de caso realizados nos capítulos seguintes.
- **Capítulo 5:** Voltado à exposição do módulo de análise de tensão e carga, que objetiva fornecer ao usuário informações relevantes sobre possíveis causas de distorções.



- **Capítulo 6:** Visa apresentar o módulo de análise da frequência de aquisição dos dados, bem como um estudo de caso, avaliando se há descaracterização dos dados.
- **Capítulo 7:** Orientado a expor o módulo de análise de similaridade entre fases, realizando uma comparação entre as três fases do banco de dados medido, verificando a possibilidade de equivalência entre elas.
- **Capítulo 8:** Dirigido a apresentar os módulos de similaridade entre dias e entre períodos do dia. Realiza-se também um estudo de caso, com vistas a inferir sobre a representatividade de um dia ou período do dia frente à totalidade das amostras.
- **Capítulo 9:** Destinado a apresentar o módulo de análise de distribuição no tempo das distorções medidas para o banco de dados avaliado, valendo-se de recursos estatísticos/probabilísticos.
- **Capítulo 10:** Objetiva mostrar o módulo de qualificação, onde o banco de dados tem seus valores de distorção comparados aos valores de referência adotados como limites nas principais normas e recomendações nacionais e internacionais.
- **Capítulo 11:** Realiza um estudo de caso para três subestações da CEB – Companhia Energética de Brasília, utilizando-se dos módulos de análise desenvolvidos no aplicativo.
- **Capítulo 12:** Apresenta conclusões a respeito deste trabalho.



CAPÍTULO 2

QUALIDADE DA ENERGIA

Neste capítulo são abordados conceitos e definições básicas para o entendimento da Qualidade da Energia Elétrica (QEE) e dos distúrbios que a compõem. Reconhecendo a relevância do assunto, será dedicado um capítulo à parte para análise das distorções harmônicas, inclusive com um tratamento das principais normas e recomendações que versam sobre este importante distúrbio.

2.1 ASPECTOS GERAIS SOBRE A QUALIDADE DA ENERGIA

Nesse início de século XXI, com consumidores mais conscientes e exigentes, vive-se, mais do que nunca, a era da qualidade.

O assunto Qualidade da Energia Elétrica ganhou maior enfoque com a evolução tecnológica dos equipamentos eletro-eletrônicos, hoje largamente utilizados nos diversos segmentos de atividades, sejam eles industriais, comerciais ou residenciais.

Até o final da década de 70, no Brasil o consumidor residencial, por exemplo, possuía uma carga plenamente resistiva, salvo raras exceções. Vive-se hoje numa realidade diferente onde os consumidores (de diversas classes sociais) possuem vários tipos de cargas comandadas eletronicamente, tais como fornos de microondas, computadores, aparelhos de TV e de áudio, em uma gama bastante vasta de eletrodomésticos. (MEHL, 2002).

A Figura 2.1 revela a evolução das vendas dos chamados “eletrodomésticos de linha branca” (Dispositivos elétricos destinados ao uso doméstico / residencial), no Brasil (1990 – 2000). Observa-se que na última década houve um acentuado aumento do número de eletrodomésticos nos lares brasileiros. Nos anos 1996 e 1997 foram vendidas mais de 24 milhões de unidades. (CUNHA, 2003).

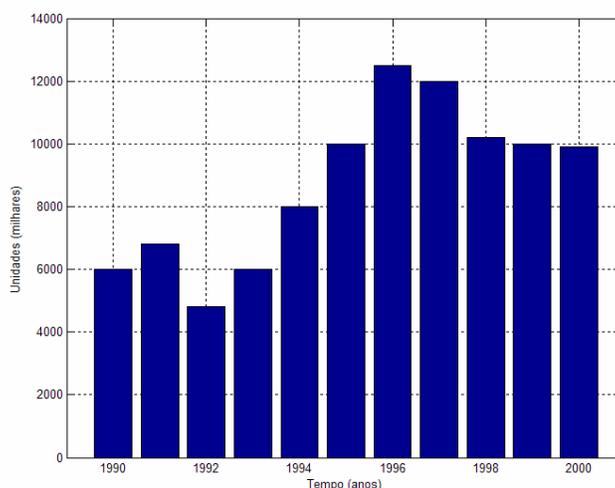


Figura 2.1 – Evolução das vendas de eletrodomésticos no Brasil (1990 - 2000)

Neste trabalho, considera-se um serviço de fornecimento de energia elétrica como de boa qualidade aquele que “garante, a custos viáveis, o funcionamento adequado, seguro e confiável de equipamentos e processos, sem afetar o meio ambiente e o bem estar das pessoas”. (BRONZEADO, 2000).

Existem várias definições para a expressão Qualidade da Energia. Trata-se de um termo relativamente recente, tendo sido mais difundido a partir do final da década de 80. Dentre muitos apontamentos da literatura, pode-se definir uma falha de qualidade como “qualquer problema manifestado através de desvios na tensão, na corrente ou na frequência que resulta na falha ou operação indevida de um equipamento consumidor”. (DUNGAN; MCGRANAGHAN; BEATY, 2002).

É importante ressaltar que a QEE está relacionada não com a qualidade do produto da tensão pela corrente, como sugere o nome, mas sim com a combinação da qualidade da tensão com a da corrente. São os desvios da tensão e/ou corrente em relação à sua forma ideal que caracterizam problemas na QEE.

A maior parte das normas e padronizações, no entanto, definem limites apenas para as características da tensão. Isso porque, em sistemas elétricos pode-se controlar apenas a qualidade da tensão. Nenhum controle pode ser exercido sobre a corrente, uma vez que ela é determinada pela solicitação das cargas. (OLIVEIRA, M., 2005).

Nos últimos anos, vários esforços foram feitos com o intuito de se determinar os custos provenientes das interrupções de fornecimento e dos distúrbios da qualidade da energia. No



início da década de 1990, o EPRI (*Electric Power Research Institute*) contabilizou um gasto de US\$ 26 bilhões por ano nos Estados Unidos. Várias outras estimativas semelhantes foram realizadas em todo o mundo. Recentemente, o EPRI em conjunto com o *Electricity Innovation Institute* fez uma nova pesquisa nos EUA que constatou um custo de US\$ 52,5 bilhões por ano. (CEIDS, 2001).

Evidencia-se, portanto, que a questão da Qualidade da Energia é de suma importância nos dias de hoje. Assim, desperta-se a necessidade de se conhecer bem os fenômenos que a afetam, como as possíveis soluções para minimizá-los, colaborando no desenvolvimento de normas, limites e procedimentos adequados ao setor elétrico nacional.

2.2 ITENS DE DEFINIÇÃO DA QUALIDADE DA ENERGIA

Dentre os fenômenos que contribuem para a perda da qualidade de um determinado suprimento elétrico destacam-se os mostrados na Tabela 2.1. São evidenciadas as categorias e características típicas dos principais itens de qualidade. (DELMONT, 2003).

Tabela 2.1 – Fenômenos da QEE

CATEGORIAS	DURAÇÃO	AMPLITUDE DA TENSÃO
Transitórios		
Impulsivos	50 ns – 1 ms	
Oscilatórios	5 μ s – 50 ms	0 – 8 pu
Variações de curta duração		
Interrupção transitória	0,5 ciclo – 1 min	< 0,1 pu
Afundamento de tensão	0,5 ciclo – 1 min	0,1 – 0,9 pu
Elevação de tensão	0,5 ciclo – 1 min	1,1 – 1,8 pu
Variações de longa duração		
Interrupção sustentada	> 1 min	0,0 pu
Subtensão	> 1min	0,8 – 0,9 pu
Sobretensão	> 1min	1,1 – 1,2 pu
Desequilíbrios	Reg. permanente	0,02 – 0,05 pu
Distorção de forma de onda		
Harmônicas	Reg. permanente	0 – 0,2 pu
Inter-harmônicos	Reg. permanente	0 – 0,02 pu
Corte de tensão	Reg. permanente	
Ruído	Reg. permanente	0 – 0,01 pu
Nível CC	Reg. permanente	0 – 0,01 pu
Flutuação de tensão	Intermitente	0,001 – 0,07 pu
Variação de frequência	< 10 s	



A seguir será apresentado um resumo sobre cada um dos fenômenos supracitados. É importante ressaltar que ainda não há um consenso sobre todas as definições, mas elas representam o que há de principal na literatura atinente.

2.2.1 TRANSITÓRIOS

São eventos indesejáveis de natureza momentânea. Os fenômenos transitórios ocorrem em função de diversas condições. Muitos são decorrentes de variações instantâneas na corrente, que interagem com a impedância do sistema, resultando em elevadas tensões instantâneas. Podem ser causados por cargas com operação intermitente, chaveamentos de bancos de capacitores, faltas à terra, operação de dispositivos de semicondutores, falhas em condutores e descargas atmosféricas. A Figura 2.2 (AFONSO; MARTINS, 2004) ilustra um evento transitório.

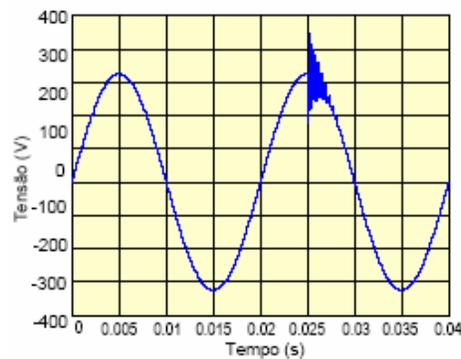


Figura 2.2 – Transitório em uma onda de tensão

Como pode ser notado na Figura 2.2, a duração de um transitório é pequena, porém de grande importância, uma vez que os equipamentos do sistema elétrico estarão sujeitos a uma grande solitação de tensão e/ou corrente. De modo geral, os transitórios podem ser divididos em duas categorias: impulsivos e oscilatórios. (DELMONT, 2003).

2.2.1.1 Transitórios impulsivos

O transitório impulsivo é súbito, não provoca alterações nas condições de regime permanente da tensão, corrente ou ambas, caracterizando-se por apresentar impulsos unidirecionais de polaridade (positivo ou negativo) e com frequência bastante diferente daquela da rede elétrica. São causados por descargas atmosféricas. Geralmente os transitórios impulsivos mantêm-se próximos ao ponto onde foram gerados. Eles podem, no entanto, excitar ressonâncias naturais do sistema elétrico e provocar outros tipos de transitórios como os oscilatórios.



2.2.1.2 Transitórios Oscilatórios

São caracterizados por variações de tensão e de corrente cujos valores instantâneos mudam de polaridade rapidamente. Filtros de alta frequência e transformadores isoladores podem ser usados para proteger as cargas contra esse tipo de transitório. São decorrentes de energização de linhas, cortes de cargas indutivas, eliminação de faltas, chaveamento de bancos de capacitores e transformadores. Eles podem ser causados também, por uma resposta do sistema a um transitório impulsivo. Como principal provável efeito está a degradação imediata dos isolamentos de equipamentos e fontes eletrônicas. (DELMONT, 2003).

2.2.2 VARIAÇÕES DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO (VTCD)

As Variações de Tensão de Curta Duração tem duração típica de 0,5 ciclo a 1 minuto. São principalmente causadas por curtos-circuitos, energização de equipamentos que demandam elevadas correntes de partida e por intermitentes falhas nas conexões dos cabos do sistema. A falta pode causar, dependendo do local onde ocorrer e das condições do sistema, tanto um afundamento de tensão, como uma elevação de tensão, ou mesmo uma interrupção completa do sistema elétrico. (OLIVEIRA, M., 2005).

2.2.2.1 Interrupção transitória

Ocorre quando há um decréscimo na tensão de suprimento para um valor inferior a 0,1 pu, por um período de tempo não superior a 1 minuto. Esse tipo de interrupção pode ser consequência de faltas no sistema de energia, falhas de equipamentos e mau funcionamento de sistemas de controle. A Figura 2.3 (AFONSO; MARTINS, 2004) mostra uma interrupção transitória de tensão.

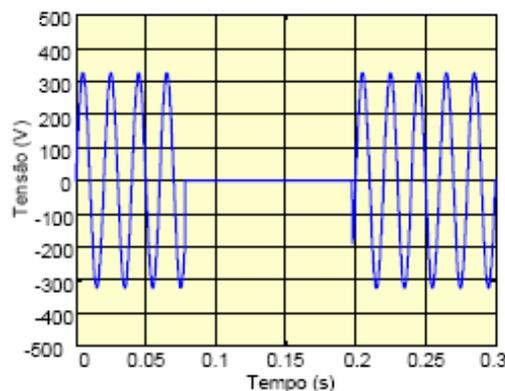


Figura 2.3 – Interrupção transitória de tensão



Observe-se que na interrupção mostrada na Figura 2.3 a tensão caiu para 0 p.u. durante 0,145 segundo. Interrupções desta natureza podem causar defeitos em chaves estáticas e desligamentos de equipamentos eletro-eletrônicos.

2.2.2.2 Afundamentos de tensão

É definido como uma subtensão caracterizada por uma redução no valor eficaz da tensão, entre 0,1 e 0,9 pu, na frequência fundamental, com duração entre 0,5 ciclo a 1 minuto. Estão associados, principalmente, a faltas em sistemas de transmissão e distribuição, à energização de grandes cargas e a partidas de grandes motores. Pode provocar a parada de equipamentos eletro-eletrônicos e interrupções de processos produtivos. A Figura 2.4 (AFONSO; MARTINS, 2004) apresenta um afundamento de tensão.

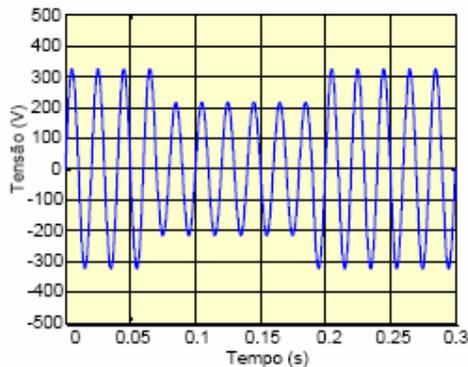


Figura 2.4 – Afundamento de tensão

Observe-se que a onda de tensão ilustrada na Figura 2.4 sofre uma redução para 66% da nominal durante um intervalo de 0,15 segundos, caracterizando um afundamento de tensão.

2.2.2.3 Elevação Momentânea de Tensão

É definida como um aumento entre 1,1 e 1,8 pu na tensão eficaz, na frequência fundamental, com duração entre 0,5 ciclo e 1 minuto. Geralmente são causados por faltas no sistema elétrico, principalmente por curtos-circuitos fase-terra. Estão associados, também, com a saída súbita de grandes cargas e com a energização de grandes bancos de capacitores. Esse fenômeno pode provocar falha dos isolamentos de equipamentos e a queima de varistores e de diodos zener. A Figura 2.5 (AFONSO; MARTINS, 2004) mostra uma elevação momentânea de tensão.

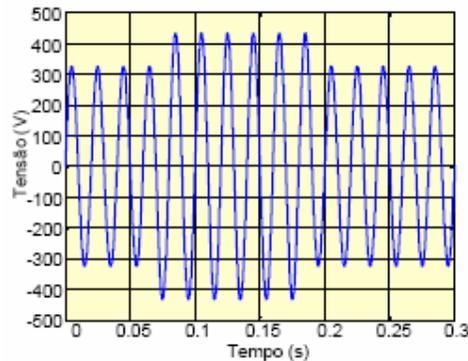


Figura 2.5 – Elevação momentânea de tensão

Note-se que a Figura 2.5 exemplifica uma elevação momentânea de tensão, uma vez que a mesma se eleva para 133% da nominal no decurso de um intervalo de 0,15 segundos.

2.2.3 VARIAÇÕES DE TENSÃO DE LONGA DURAÇÃO (VTLD)

As variações de tensão de longa duração são caracterizadas por variações da tensão eficaz, na frequência do sistema, por um período maior do que 1 minuto. São causadas por variações de carga e operações de chaveamento no sistema, podendo ser classificadas como subtensões, sobretensões ou interrupções sustentadas. (OLIVEIRA, M., 2005).

2.2.3.1 Interrupções Sustentadas

Ocorrem quando a tensão de suprimento permanece em zero por um período superior a 1 minuto. As principais causas são falhas nos disjuntores, queima de fusíveis e falhas de componentes do circuito alimentador. São permanentes e requerem intervenção manual para restabelecer a energia elétrica no sistema.

2.2.3.2 Subtensões Sustentadas

É caracterizada por uma redução na tensão eficaz de suprimento para um valor menor do que 0,9 pu, com duração superior a 1 minuto. As subtensões sustentadas são decorrentes da energização de grandes blocos de carga, da saída de bancos de capacitores e do carregamento excessivo dos circuitos alimentadores. Podem causar o aumento das perdas por aquecimento em motores de indução, parada de operação de dispositivos eletrônicos e desligamento de sistemas de comando de motores.



2.2.3.3 Sobretensões Sustentadas

São caracterizadas por um aumento no valor eficaz da tensão acima de 1,1 pu, com duração superior a 1 minuto. As sobretensões sustentadas podem ser causadas pelo desligamento de grandes cargas, energização de bancos de capacitores e pelo ajuste incorreto do *tap* de transformadores. Dentre algumas opções para prevenção da ocorrência desse fenômeno destaca-se a troca de bancos de capacitores fixos por automáticos, possibilitando um controle maior do nível da tensão e a instalação de compensadores estáticos de reativos.

2.2.4 Desequilíbrios de Tensão

Em um sistema trifásico ideal, as tensões nas três fases possuem a mesma amplitude e estão defasadas entre si de 120 graus. O desequilíbrio de tensão se manifesta de três formas distintas: amplitudes diferentes, assimetrias nas fases e assimetria conjunta de amplitudes e fases. Uma das formas de se caracterizar os desequilíbrios é a partir da relação entre a magnitude da tensão de seqüência negativa pela magnitude da tensão de seqüência positiva. As principais causas de desequilíbrio de tensão são o emprego de cargas desequilibradas, a conexão desigual de cargas monofásicas em circuitos trifásicos, a ausência de transposição completa de linhas de transmissão e anomalias em bancos de capacitores. (CARVALHO, 1997).

2.2.5 Distorção de Forma de Onda

A distorção na forma de onda é caracterizada como um desvio, em regime permanente, da forma de onda da tensão e/ou corrente em relação ao sinal senoidal puro. Os principais tipos de distorção na forma de onda são os Harmônicos, os inter-harmônicos, o Nível CC e os Ruídos (DELMONT, 2003). No próximo capítulo será realizado um estudo mais detalhado a cerca das Distorções Harmônicas.

2.2.5.1 Inter-harmônicos

Os inter-harmônicos são componentes da tensão ou corrente, que não são múltiplos inteiros da frequência fundamental na qual opera o sistema supridor de energia elétrica. Podem aparecer como frequências discretas ou como uma larga faixa espectral. Suas principais fontes são os conversores estáticos de potência, os cicloconversores, os motores de indução e equipamentos a arco. A Figura 2.6 (AFONSO; MARTINS, 2004) mostra uma onda de tensão distorcida pela presença de inter-harmônicas.

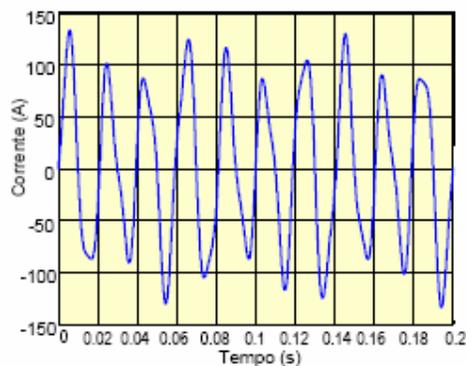


Figura 2.6 – Onda de corrente com presença de inter-harmônicos

O formato da onda de corrente apresentada na Figura 2.6 evidencia a existência de inter-harmônicos na rede.

2.2.5.2 Corte de tensão

Trata-se de um distúrbio periódico da tensão, causado durante a operação normal de equipamentos eletrônicos de potência, quando a corrente é comutada de uma fase para outra. No decorrer da comutação da corrente, ocorre um curto-circuito momentâneo entre duas fases, causando a redução súbita da tensão. A Figura 2.7 (AFONSO; MARTINS, 2004) ilustra um corte de tensão.

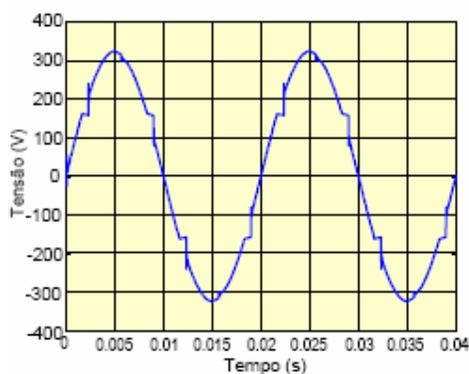


Figura 2.7 – Corte de tensão

Este fenômeno representa um caso especial que se enquadra entre transitórios e distorção harmônica. A principal fonte que provoca o corte de tensão são os conversores trifásicos.



2.2.5.3 Nível CC

A presença de tensão CC ou corrente CC em sistemas CA é denominado desvio no Nível CC. Este fenômeno ocorre, principalmente, devido ao efeito da retificação de meia onda, mas é causado também por outros conversores da eletrônica de potência operando em condições não ideais. Esse distúrbio pode provocar acréscimo de saturação em equipamentos com material ferromagnético, como transformadores, resultando em aumento da temperatura e diminuição da vida útil.

2.2.5.4 Ruídos

O ruído é um sinal elétrico indesejado, contendo uma ampla faixa espectral com frequência inferior a 200 kHz, superposto à corrente ou tensão tanto nos condutores de fase quanto no condutor neutro. Basicamente, são distorções nos sinais elétricos que não podem ser classificadas como distorção harmônica nem transitórios. A Figura 2.8 (AFONSO; MARTINS, 2004) revela a presença de ruídos na tensão.

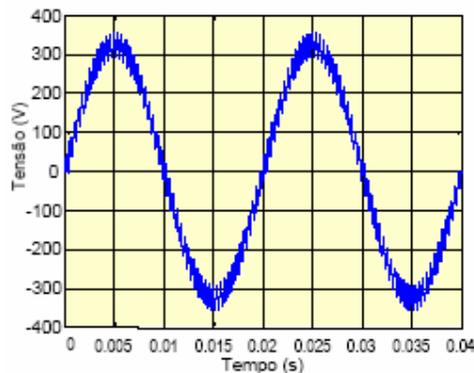


Figura 2.8 – Ruídos na onda de tensão

As principais fontes de ruídos são equipamentos eletrônicos de potência, circuitos de controle, equipamentos a arco (e.g. máquinas de solda) e fontes chaveadas. Em algumas situações os ruídos estão relacionados a aterramentos impróprios. Podem se propagar até atingir cargas susceptíveis em algum ponto do sistema, tais como microcomputadores e controladores programáveis.

2.2.6 FLUTUAÇÃO DE TENSÃO

São caracterizadas por variações regulares ou aleatórias de baixa frequência no valor eficaz da tensão, as quais normalmente não excedem o limite especificado de 0,95 a 1,05 pu. Qualquer



carga que apresentar rápida variação da corrente, principalmente da componente reativa, pode causar flutuações na tensão (CARVALHO, 1997). A Figura 2.9 (AFONSO; MARTINS, 2004) ilustra a ocorrência deste distúrbio.

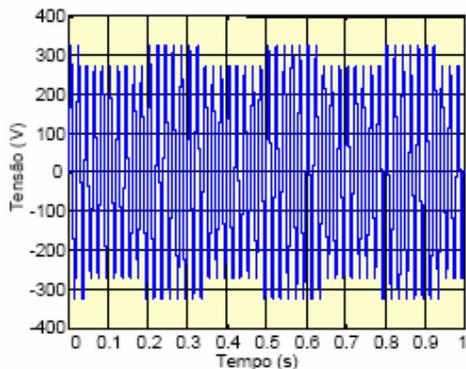


Figura 2.9 – Ocorrência de flutuação de tensão

As principais cargas geradoras desse distúrbio são os fornos a arco, os laminadores e as máquinas de solda. Destaca-se como principal efeito das flutuações de tensão a cintilação luminosa (*flicker*), que pode ser observada pelo olho humano no sistema de iluminação e pode provocar, além do incômodo visual, problemas de saúde como dores de cabeça.

2.2.7 VARIAÇÃO DE FREQUÊNCIA

São desvios na frequência fundamental do sistema elétrico. A frequência está diretamente relacionada com a rotação dos geradores e com o balanço entre a carga e a geração disponível. Quando este equilíbrio é alterado pequenas variações de frequência deverão ocorrer. (DELMONT, 2005).

As principais fontes desse fenômeno são faltas no sistema de transmissão, desconexão de grandes blocos de cargas e saída de grandes parques de geração. As variações de frequência são mais fáceis de ocorrer em sistemas de consumidores que possuem geração própria, ou seja, que fazem parte de sistemas isolados.

2.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Até aqui foram apresentados conceitos básicos a respeito dos itens de definição da Qualidade da Energia. O próximo capítulo será dedicado a uma apreciação minuciosa a respeito das Distorções Harmônicas.



CAPÍTULO 3

DISTORÇÕES HARMÔNICAS

No capítulo anterior fez-se um apanhado geral dos principais tipos de distúrbios associados à qualidade da energia elétrica. Como as distorções harmônicas são a motivação para este trabalho, este capítulo trata especificamente desse tipo de distúrbio, sua definição, quantificação, fontes de harmônicas e seus efeitos, além de um resumo das principais normas e recomendações que estabelecem limites para os níveis de distorção.

3.1 DEFINIÇÃO

As distorções harmônicas são alterações na forma de onda de tensão ou corrente elétrica, devido à inserção de componentes múltiplas da frequência fundamental da onda. Essas componentes harmônicas são geradas pela operação de cargas não-lineares nos sistemas de potência. Ao se aplicar uma tensão perfeitamente senoidal em uma carga não-linear, obtém-se uma corrente distorcida fluindo pelo circuito, isto é, a corrente não é proporcional à tensão aplicada (OLIVEIRA, M., 2005). Para exemplificar o que ocorre com a presença de distorção, a Figura 3.1 a seguir representa duas ondas de tensão. A primeira onda é perfeitamente senoidal. A segunda representa a mesma onda com a presença de 10% de distorção harmônica individual de terceira ordem.

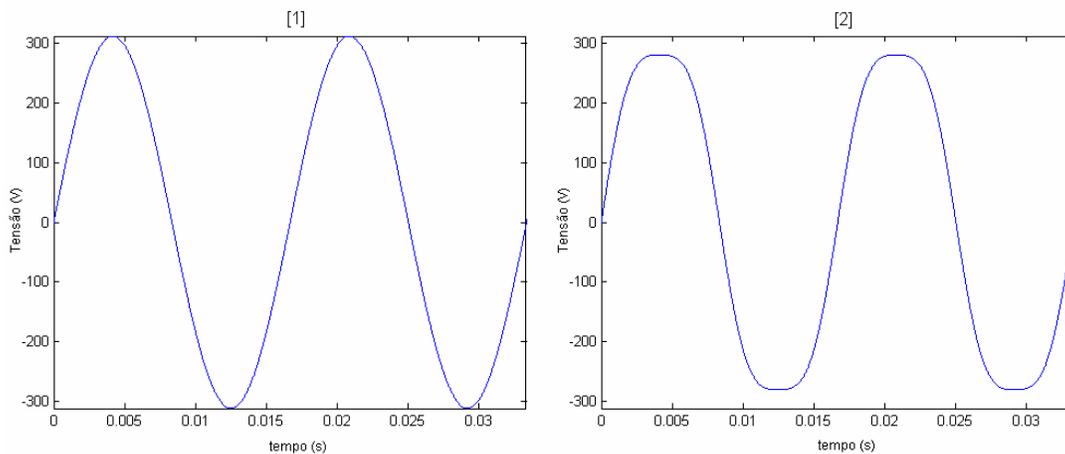


Figura 3.1 – À esquerda: onda perfeitamente senoidal; à direita: onda com 10% de 3º harmônico.



Para o entendimento das distorções harmônicas é fundamental a utilização da Análise de Fourier. De acordo com Fourier, todo sinal periódico pode ser decomposto em uma soma de sinais senoidais formada por uma componente fundamental e uma série de componentes cujas frequências são múltiplos inteiros da frequência fundamental do sinal. Se o sinal é periódico e contínuo, a análise de Fourier permite conhecer as amplitudes e fases de todas as componentes do mesmo, obtendo a sua série de Fourier, de acordo com a equação a seguir (OLIVEIRA, M., 2005; BOYCE; DIPRIMA, 2002):

$$f(t) = a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} [a_h \cos(h\omega t) + b_h \text{sen}(h\omega t)] \quad (3.1)$$

Na equação acima, a_0 representa o valor médio do sinal periódico, a_h e b_h representam os coeficientes da série de Fourier, ou componentes da harmônica de ordem h . Utilizando representação fasorial, podemos definir (IRWIN, 1995):

$$A_h \angle \phi_h = a_h + jb_h \quad (3.2)$$

$$A_h = \sqrt{a_h^2 + b_h^2} \quad (3.3)$$

$$\phi_h = \tan^{-1} \left(\frac{b_h}{a_h} \right) \quad (3.4)$$

A partir das equações (3.2) a (3.4), pode-se definir a chamada forma compacta da série de Fourier, dada por (IRWIN, 1995):

$$f(t) = a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} A_h \cos(h\omega t + \phi_h) \quad (3.5)$$

Os coeficientes da série podem ser calculados pelas expressões a seguir, onde T é o período do sinal (BOYCE; DIPRIMA, 2002):

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (3.6)$$



$$a_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(h\omega t) dt \quad (3.7)$$

$$b_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(h\omega t) dt \quad (3.8)$$

Na grande maioria dos ambientes não senoidais, isto é, na presença de distorção harmônica, os fenômenos podem ser considerados periódicos, não variando ou variando muito pouco entre um ciclo e outro. Nesses casos, a onda de tensão ou corrente pode ser representada pela sua série de Fourier. Em grande parte dos casos, a onda distorcida apresenta valor médio diferente de zero. Representando-se tensão e corrente pelos seus respectivos desenvolvimentos em série de Fourier tem-se, a partir da equação (3.5) (OLIVEIRA, M., 2005):

$$v(t) = V_0 + \sum_{h=1}^{\infty} v_h \cos(h\omega t + \phi_h) \quad (3.9)$$

$$i(t) = I_0 + \sum_{h=1}^{\infty} i_h \cos(h\omega t + \phi_h) \quad (3.10)$$

Onde:

V_0 – valor médio da tensão;

I_0 – valor médio da corrente;

v_h – valor máximo da tensão harmônica individual de ordem h ;

i_h – valor máximo da corrente harmônica individual de ordem h ;

h – ordem harmônica.

3.2 CARACTERÍSTICAS DOS AMBIENTES DISTORCIDOS

A presença de distorção harmônica em um determinado sistema elétrico altera significativamente suas características. Atualmente, muitos têm considerado as distorções harmônicas como o principal problema associado à qualidade da energia elétrica. Em um projeto de um sistema elétrico, feito para um ambiente onde cargas não-lineares estarão



presentes, é fundamental a observância dos efeitos causados em equipamentos e instalações pela presença das harmônicas, visto que as correntes harmônicas geradas nas cargas são transmitidas à rede de alimentação. Este cuidado intensifica-se à medida que cada vez mais se difunde o uso de equipamentos de eletrônica de potência e cargas não-lineares em instalações residenciais, comerciais e industriais. As definições clássicas utilizadas em ambientes puramente senoidais não se aplicam inteiramente aos ambientes distorcidos. A seguir serão apresentadas as equações aplicadas aos sistemas onde há a presença de harmônicas.

3.2.1 VALOR EFICAZ

O valor eficaz de um sinal qualquer distorcido $a(t)$ pode ser calculado a partir da seguinte definição, onde A é o valor eficaz do sinal e T é o seu período (IRWIN, 1995):

$$A = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) dt} \quad (3.11)$$

Se for conhecida a amplitude de todas as componentes harmônicas do sinal, tem-se:

$$A = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} A_h^2} \quad (3.12)$$

onde A_h representa o valor eficaz de cada componente harmônica de ordem h . Para sinais de tensão e corrente tem-se, respectivamente (OLIVEIRA, M., 2005):

$$V = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2} \quad (3.13)$$

$$I = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \quad (3.14)$$

3.2.2 POTÊNCIA

A definição de potência instantânea não se altera na presença de harmônicas. Utilizando as equações (3.9) e (3.10), define-se:



$$p(t) = \left[V_0 + \sum_{h=1}^{\infty} v_h \cos(h\omega t + \phi_h) \right] \left[I_0 + \sum_{h=1}^{\infty} i_h \cos(h\omega t + \phi_h) \right] \quad (3.15)$$

A partir do desenvolvimento da equação (3.15) definem-se as potências aparente, ativa e reativa, analogamente aos sistemas puramente senoidais. No entanto, surge uma nova parcela de potência conhecida como potência de distorção, definida apenas para ambientes não senoidais. A potência aparente é definida pela equação (3.16) a seguir, onde V e I são os valores eficazes de tensão e corrente (ALMEIDA; FREITAS, 1995):

$$S = VI \quad (3.16)$$

No caso das potências ativa e reativa, devemos considerar todos as componentes harmônicas, de mesma frequência, resultantes do produto efetuado na equação (3.15). Desse modo, tem-se (OLIVEIRA, M., 2005):

$$P = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos \phi_h \quad (3.17)$$

$$Q = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \sin \phi_h \quad (3.18)$$

Da potência instantânea, restou apenas a parcela entre tensões e correntes de frequências diferentes entre si. Esta parte da potência não se conserva, e é conhecida como potência de distorção:

$$D = \sum_{h,k=1}^{\infty} V_h I_k, \text{ com } h \neq k \quad (3.19)$$

A partir das equações (3.16) a (3.19), tem-se:

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad (3.20)$$



3.2.3 FATOR DE POTÊNCIA

A definição de fator de potência é a mesma para um ambiente sem distorção, ou seja, a razão entre a potência ativa e a potência aparente, definidas nas expressões (3.17) e (3.16), respectivamente. No entanto, deve-se notar que a expressão não é igual ao fator de deslocamento $\cos \theta$, equivalente ao fator de potência em regime perfeitamente senoidal. Tem-se assim (ALMEIDA; FREITAS, 1995):

$$f.p. = \frac{P}{S} \neq \cos \theta \quad (3.21)$$

3.2.4 IMPEDÂNCIA

A impedância complexa em um sistema não-senoidal define-se da mesma forma que nos sistemas sem distorção. No entanto, a impedância deve ser definida para cada uma das harmônicas presentes no sistema (OLIVEIRA, M., 2005):

$$Z(h\omega) = \frac{V(h\omega)}{I(h\omega)} \quad (3.22)$$

Nota-se que para cada valor de frequência presente será definido um valor de reatância. A presença de harmônicas também intensifica o efeito pelicular ou efeito *skin*, aumentando então o valor da resistência dos componentes.

3.3 QUANTIFICAÇÃO DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS

Tem-se buscado nos últimos anos, através de diversos estudos que levaram à publicação das principais normas e recomendações nacionais e internacionais, estabelecer parâmetros e limites para os distúrbios de qualidade da energia elétrica. Para a quantificação das distorções harmônicas de tensão e corrente, são comumente utilizados índices conhecidos como distorção harmônica individual (*DHI*) e distorção harmônica total (*DHT*).

3.3.1 DISTORÇÃO HARMÔNICA INDIVIDUAL

A distorção harmônica individual (*DHI_h*) de ordem *h* é definida como a razão entre o valor eficaz da harmônica de determinada ordem (*M_h*) e o valor eficaz da harmônica fundamental (*M₁*), expressa em porcentagem:



$$DHI_h = \frac{M_h}{M_1}(100\%) \quad (3.23)$$

Para tensão e corrente, tem-se, respectivamente:

$$DHI_{vh} = \frac{V_h}{V_1}(100\%) \quad (3.24)$$

$$DHI_{ih} = \frac{I_h}{I_1}(100\%) \quad (3.25)$$

Na expressão para distorção harmônica de tensão pode-se atribuir à V_1 o valor real de operação obtido no instante da medição, utilizar a tensão nominal do barramento considerado ou ainda um valor de referência constante e definido pelo usuário, de acordo com a conveniência. Do mesmo modo, na expressão (3.25) para distorção harmônica de corrente, pode-se definir como referência o valor nominal para o ponto de medição ou, alternativamente, a corrente de carga para a demanda máxima (I_L). Estas opções visam contornar os problemas oriundos quando baixos carregamentos são impostos aos pontos de medição. Nesses casos, uma carga não-linear de porte considerável no sistema teria um efeito amplificado na medição das distorções harmônicas. Quando é escolhida a corrente de carga para demanda máxima (I_L) como referência, obtém-se a chamada distorção de demanda individual (DDI):

$$DDI_h = \frac{I_h}{I_L}(100\%) \quad (3.26)$$

3.3.2 DISTORÇÃO HARMÔNICA TOTAL

A distorção harmônica total é um indicador representativo do efeito de todas as tensões ou correntes harmônicas presentes no sistema. É uma medida do valor eficaz dessas componentes harmônicas, em relação ao valor eficaz da harmônica fundamental. Para tensão e corrente, tem-se (OLIVEIRA, M., 2005):

$$DHT_V = \frac{1}{V_1} \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2} (100\%) \quad (3.27)$$



$$DHT_I = \frac{1}{I_1} \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2} (100\%) \quad (3.28)$$

Onde:

V_h – tensão harmônica individual de ordem h ;

I_h – corrente harmônica individual de ordem h ;

h – ordem harmônica;

V_1 – tensão fundamental ou de referência;

I_1 – corrente fundamental ou de referência.

Nas expressões (3.27) e (3.28) valem as mesmas considerações para os valores de referência de tensão ou corrente utilizados para o cálculo da distorção harmônica individual. Quando a corrente de carga para demanda máxima (I_L) é adotada como referência, obtém-se a distorção de demanda total (DDT) (OLIVEIRA, M., 2005):

$$DDT = \frac{1}{I_L} \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2} (100\%) \quad (3.29)$$

3.4 FONTES DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS

As fontes de distorção harmônica são as cargas não-lineares conectadas ao sistema elétrico. A tendência é que haja crescimento de cargas não-lineares em todas as áreas da sociedade, fato que tem ocorrido naturalmente com o desenvolvimento tecnológico e a automatização e desenvolvimento cada vez maior dos equipamentos elétricos, sejam eles de uso residencial, comercial ou industrial.

3.4.1 CARGAS RESIDENCIAIS

As fontes de distorção mais comuns em residências são os aparelhos eletro-eletrônicos, que contém fontes chaveadas, e as lâmpadas fluorescentes, acionadas por reatores eletrônicos. Para ilustrar o efeito destes equipamentos no sistema, as Figuras 3.2 e 3.3 a seguir ilustram as ondas de corrente observadas em uma lâmpada fluorescente alimentada por um reator de alta distorção harmônica e em uma fonte chaveada comum de um microcomputador,



respectivamente. Mesmo alimentando-se os equipamentos com uma onda de tensão puramente senoidal, nota-se o forte conteúdo harmônico nos dois casos.

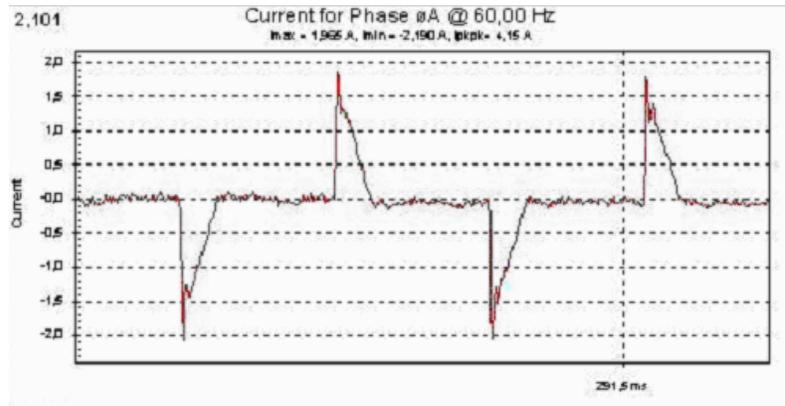


Figura 3.2 – Onda de corrente em um reator de alta distorção harmônica

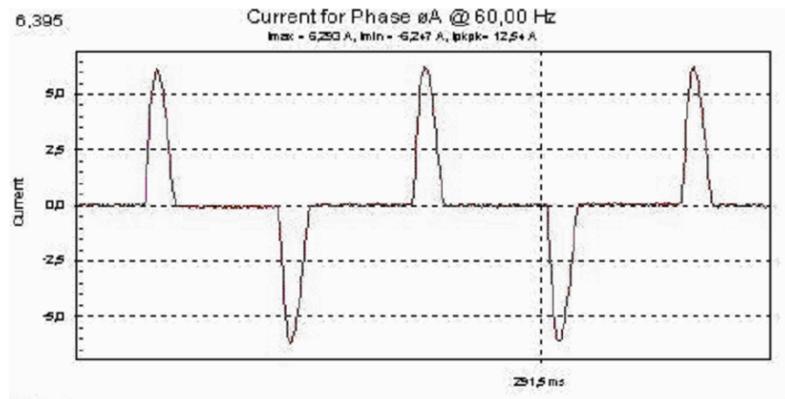


Figura 3.3 – Onda de corrente em uma fonte chaveada de um microcomputador

3.4.2 CARGAS COMERCIAIS

Em instalações comerciais, as cargas não-lineares mais comuns são os conversores de eletrônica de potência. Lâmpadas fluorescentes com reatores eletrônicos, acionadores a velocidade variável para cargas de aquecimento, ventilação e climatização, como os aparelhos de ar condicionado, fontes chaveadas para eletrônicos e acionadores para elevadores estão entre as fontes harmônicas mais importantes nesse tipo de instalação. Como há intensa utilização de fontes de potência baseadas em retificadores monofásicos, deve-se ter cuidado com o efeito das correntes geradas por elas nos fios e cabos da instalação. Muitas vezes as correntes geradas por estes dispositivos possuem forte presença de 3º harmônico em seu conteúdo, causando sobreaquecimento, e conseqüentemente aumento das perdas e redução da vida útil dos mesmos.



3.4.3 CARGAS INDUSTRIAIS

A presença de cargas não-lineares em instalações industriais é bastante significativa. Muitas vezes estes equipamentos representam grande parte da carga instalada em uma indústria, resultando em níveis de distorção harmônica bastante elevados. A instalação de bancos de capacitores para correção do fator de potência nessas instalações também pode agravar as distorções em equipamento não-lineares, aumentando também a probabilidade de ocorrência de ressonância na instalação. As fontes de harmônicas mais comuns em indústrias são os conversores de potência trifásicos, como os acionadores CC e CA, dispositivos saturáveis, como transformadores e motores, e fornos e máquinas de soldar a arco elétrico.

3.5 EFEITOS CAUSADOS POR DISTORÇÕES HARMÔNICAS

Dentre os principais efeitos causados por distorções harmônicas, pode-se citar as sobrecargas e elevados aquecimentos em equipamentos causando a redução de sua vida útil. Apresentam-se, a seguir, algumas conseqüências das distorções harmônicas de tensão e corrente nos dispositivos habitualmente encontrados nas redes elétricas.

3.5.1 EFEITOS EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

A existência de sinais distorcidos provoca sobreaquecimento nos transformadores e intensificação das fugas tradicionalmente manifestadas nos isolamentos. Tais fatos ocasionam, como mostra a figura 3.4 (LELES, 1997), a redução da vida útil deste equipamento.

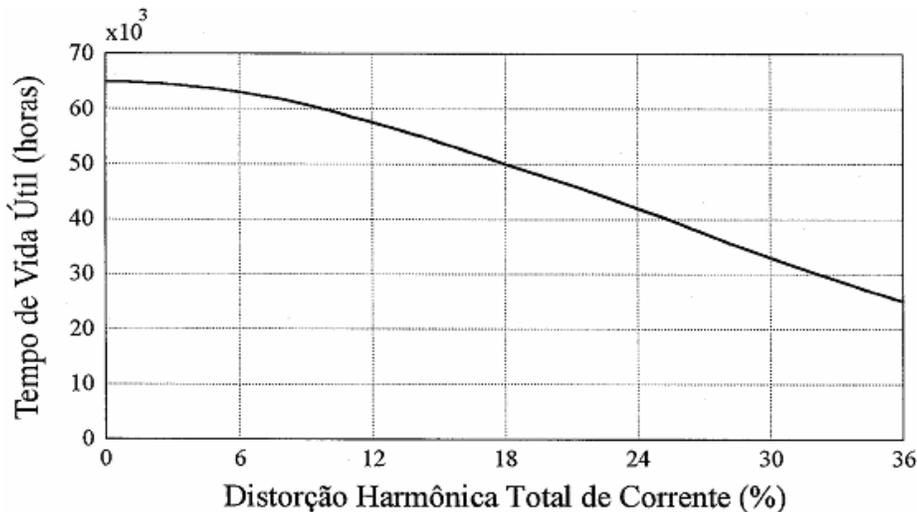


Figura 3.4 – Vida útil de um transformador em função da distorção harmônica de corrente



A Figura 3.4 ilustra o perfil da vida útil de um transformador de 150 kVA em função do nível de distorção harmônica de corrente.

3.5.2 EFEITOS DE HARMÔNICOS EM CABOS

A presença de harmônicos acarreta uma maior solicitação do isolamento seguida de uma possível deterioração do material isolante do cabo. Isso ocorre em consequência de um aumento das perdas Joule e das capacitâncias de fuga. (LELES, 1997).

3.5.3 EFEITOS EM MOTORES ELÉTRICOS DE INDUÇÃO

Distorções harmônicas de tensão ou corrente implicam em redução da vida útil e perda de rendimento de motores de indução trifásicos. Isso porque elas provocam sobreaquecimento nos enrolamentos do motor, surgimento de torques pulsantes no eixo da máquina, alterações das condições de partida, mudanças dos pontos de operação em regime permanente e variações do torque médio. A Figura 3.5 revela uma estimativa do acréscimo das perdas elétricas em um motor de indução em função da DHT_V . (LELES, 1997).

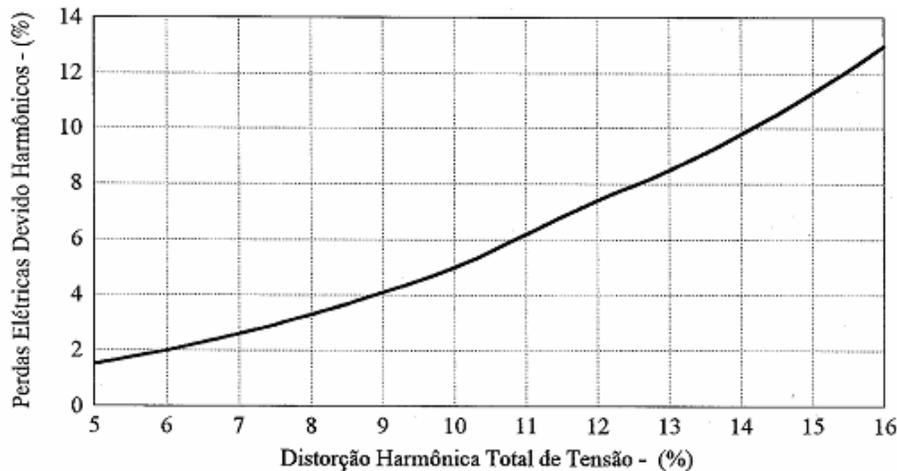


Figura 3.5 – Perdas elétricas de um motor de indução trifásico em função da distorção total da tensão

Observa-se da Figura 3.5 que para uma distorção de tensão de 5%, há um acréscimo de cerca de 2% nas perdas. Entretanto, para 16% da mesma distorção, as perdas alcançam 13%. Evidencia-se o quanto são consideráveis as perdas no MIT advindas da presença de harmônicas.

3.5.4 EFEITOS EM MÁQUINAS SÍNCRONAS

As máquinas síncronas encontram-se, normalmente afastadas dos grandes centros consumidores, fato que muitas vezes condiciona a análise a desconsiderar efeitos de



harmônicos nestas unidades. Em sistemas com geração própria, no entanto, têm-se verificado irregularidades quanto à operação das máquinas síncronas, graças às distorções (LELES, 1997):

- Sobreaquecimento das sapatas polares, causado pela circulação de correntes harmônicas nos enrolamentos amortecedores;
- torques pulsantes no eixo da máquina;
- indução de tensões harmônicas no enrolamento de campo, comprometendo a qualidade da tensão gerada.

É, portanto, importante a monitoração da intensidade destas anomalias, garantindo a operação contínua das máquinas síncronas.

3.5.5 EFEITOS EM BANCOS DE CAPACITORES

A instalação de bancos de capacitores em ambientes distorcidos pode conduzir a efeitos negativos, dos quais se destaca a ocorrência de ressonâncias. Ademais, a impedância capacitiva, inversamente proporcional à frequência, torna-se um caminho atrativo para correntes harmônicas, de modo que tal dispositivo é um dos mais afetados por distorções harmônicas. Tais correntes provocam um sobreaquecimento nos condutores e conexões entre as unidades capacitivas, acarretando na diminuição da vida útil do capacitor, como mostra a Figura 3.6. (LELES, 1997).

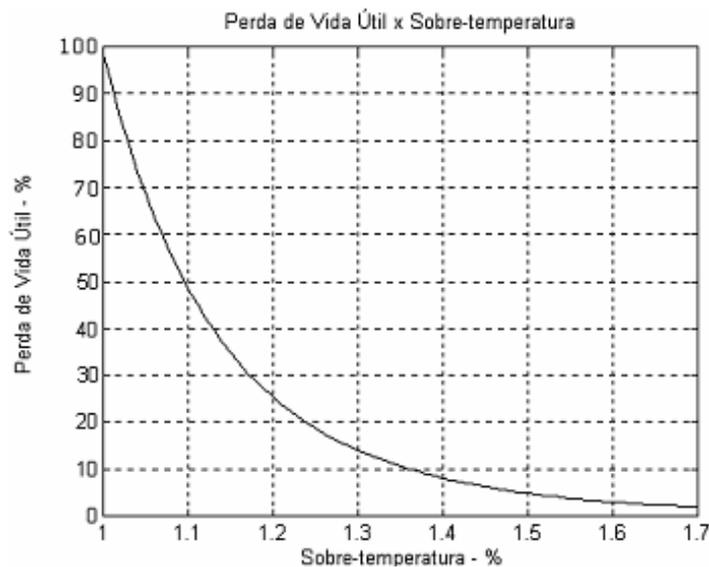


Figura 3.6 – Perda de vida útil versus sobre-temperatura em capacitores



Nota-se que com uma sobretemperatura de 1,4%, a vida útil cai para 10% da nominal. Assim, para se assegurar a operação adequada destes dispositivos, são fabricados por norma, capacitores de potência que toleram níveis fixados de distorção harmônica. (LELES, 1997).

3.5.6 EFEITOS EM DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO

Dispositivos de proteção, em geral, quando submetidos a sinais distorcidos, apresentam funcionamento incorreto. Um relé estático de sobrecorrente, por exemplo, embora ajustado para atuar com 1,8 pu da corrente nominal, poderá, em um ambiente cujo nível de distorção de corrente alcança 40%, acionar o disjuntor. Deste modo, a incidência de interrupções avolumar-se-á, prejudicando a qualidade do fornecimento de energia. (LELES, 1997).

3.5.7 EFEITOS EM MEDIDORES DE ENERGIA ELÉTRICA

O medidor de energia de indução tem sua operação fundamentada no fenômeno da interação eletromagnética. O disco do medidor, se submetido a tensões e correntes distorcidas, poderá acelerar ou desacelerar, ocasionando erros de medição. Os harmônicos podem implicar, portanto, em expressivos erros nos resultados das medições, muitas vezes, inconcebivelmente superiores as faixas de tolerâncias. (LELES, 1997).

3.6 NORMAS E RECOMENDAÇÕES

Este tópico tem por objetivo expor, em síntese, as principais normas e recomendações reconhecidas nacional e internacionalmente, considerando os índices de conformidade e a metodologia para obtenção do valor de referência a ser comparado com os limites estabelecidos.

3.6.1 NORMAS E RECOMENDAÇÕES INTERNACIONAIS

Apresenta-se, a seguir, um levantamento das principais normas internacionais cujos procedimentos são destinados ao controle da Qualidade da Energia Elétrica com relação aos indicativos de aceitabilidade das harmônicas de tensão.

3.6.1.1 International Electrotechnical Commission – IEC

A IEC é uma organização mundial de normatização que visa promover a cooperação internacional em questões relativas a normas / recomendações / orientações no contexto elétrico e eletrônico. Com esta finalidade, a IEC publica documentos para uso internacional,



os quais são publicados em forma de normas, relatórios técnicos e manuais. No que tange às questões de harmônicos, de modo geral, correspondem a uma extensão da IEC 555-2.

- **Índices de Conformidade**

A Tabela 3.1 apresenta os índices de conformidade relacionados aos níveis de tensões harmônicas para sistemas de potência de baixa e média tensão.

Tabela 3.1 – Níveis de tensões harmônicas (expressos como porcentagem da tensão nominal) para sistemas de potência de baixa e média tensão

Harmônicas Ímpares não Múltiplas de 3		Harmônicas Ímpares Múltiplas de 3		Harmônicas Pares	
Ordem h	Tensão Harmônica (%)	Ordem h	Tensão Harmônica (%)	Ordem h	Tensão Harmônica (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,3	6	0,5
13	3	21	0,2	8	0,5
17	2	>21	0,2	10	0,5
19	1,5			12	0,2
23	1,5			>12	0,2
25	1,5				
>25	0,2+1,3 x (25/h)				

NOTA – DISTORÇÃO HARMÔNICA TOTAL (DHT): 8%

Os limites ilustrados na Tabela 3.1 são provenientes da IEC 1000-3-6. Esta recomendação estabelece ainda os níveis de planejamento, ilustrados na Tabela 3.2, os quais são usados com o propósito de avaliar o impacto de todos os consumidores no sistema supridor.

Os níveis ilustrados na Tabela 3.2 são estabelecidos pela IEC para todas as classes de tensão e podem ser considerados como objetivos internos de qualidade. Os níveis de planejamento são iguais ou menores que os índices de conformidade, sendo somente valores indicativos, pois estes serão diferentes para cada caso, dependendo da estrutura e circunstância da rede elétrica em planejamento. (UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA – UFU, 2000a).



Tabela 3.2 – Níveis de tensões harmônicas (expressos como porcentagem da tensão nominal) para sistemas de potência de baixa e média tensão.

Harmônicas Ímpares Não Múltiplas de 3			Harmônicas Ímpares Múltiplas de 3			Harmônicas Pares		
Ordem H	Tensão Harmônica %		Ordem H	Tensão Harmônica %		Ordem H	Tensão Harmônica %	
	MT	AT-EAT		MT	AT-EAT		MT	AT-EAT
5	5	2	3	4	2	2	1,6	1,5
7	4	2	9	1,2	1	4	1	1
11	3	1,5	15	0,3	0,3	6	0,5	0,5
13	2,5	1,5	21	0,2	0,2	8	0,4	0,4
17	1,6	1	>21	0,2	0,2	10	0,4	0,4
19	1,2	1				12	0,2	0,2
23	1,2	0,7				>12	0,2	0,2
25	1,2	0,7						
>25	0,2+0,5 x (25/h)	0,2+0,5 x (25/h)						

NOTA – DISTORÇÃO HARMÔNICA TOTAL (DHT): 6,5% em MT e 3% em AT

- **Metodologia para Obtenção do Valor Representativo**

Recomenda-se que a frequência de aquisição do medidor seja de 10 minutos e que o tempo total de observação seja de uma semana. O maior dentre os 1008 valores medidos no decurso do intervalo semanal, será o valor de referência a ser comparado com os limites das Tabelas 3.1 e 3.2. (UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA – UFU, 2000b).

3.6.1.2 Recomendação IEEE Std. 519 – 1992

A IEEE Standard 519-1992 - *IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*, estabelece procedimentos para o controle de harmônicos em sistemas de potência, juntamente com os limites recomendados para injeções de corrente harmônica.

- **Índices de Conformidade**

A responsabilidade de manter a qualidade da tensão em todo o sistema fica atribuída à concessionária. Nesse sentido, a Tabela 3.3 resume os limites de distorção de tensão estabelecidos para diferentes níveis de tensão.



Tabela 3.3 – Limites de distorção harmônica de tensão em % da nominal

Tensão Nominal do PAC (V_n)	Distorção Harmônica de Tensão Individual (%)	Distorção Harmônica de Tensão Total – DHT $_{V_n}$ (%)
$V_n \leq 69$ kV	3,0	5,0
69 kV < $V_n \leq 161$ kV	1,5	2,5
$V_n > 161$ kV	1,0	1,5

Os limites mostrados na Tabela 3.3 devem ser usados para operação normal, ou seja, durante condições que durem mais de uma hora. Para períodos menores, durante partidas ou condições não-usuais, esses limites podem ser excedidos em 50%. (UFU, 2000a).

- **Metodologia para Obtenção do Valor Representativo**

A norma IEEE 519 não traz, em seu conteúdo, qualquer abordagem quanto à metodologia para obtenção de um valor de referência. Apesar disso, é mencionada a importância de se realizar medições a fim de compará-las com os limites estabelecidos, bem como com aqueles obtidos em simulações computacionais. (UFU, 2000b).

3.6.1.3 Norma Européia – EN 50160

A EN50160 fornece as principais características da tensão no ponto de entrega ao consumidor em baixa e média tensão sob condições normais de operação. A norma objetiva definir e descrever as características da tensão com relação a frequência, amplitude, forma de onda e simetria.

- **Índices de Conformidade**

As distorções harmônicas limitadas pela norma EN50160 contemplam apenas os níveis de tensões, procurando restringir os valores de distorções individuais e totais. A Tabela 3.4 apresenta os níveis admissíveis para tais tensões harmônicas.

Nota-se, da Tabela 3.4, que nenhum valor é estipulado para as ordens harmônicas maiores que 25, uma vez que estas, normalmente, são muito pequenas. Todavia, deve-se ressaltar que, mesmo assim, os efeitos das componentes harmônicas são imprevisíveis devido aos efeitos de ressonância. (UFU, 2000a).



Tabela 3.4 – Valores para as tensões harmônicas individuais e total nos terminais de suprimento (para ordens até 25) - Níveis para Média e Baixa Tensão

Harmônicas Ímpares				Harmônicas Pares	
Não Múltiplos de 3		Múltiplos de 3		Ordem h	Tensão Relativa
Ordem h	Tensão Relativa	Ordem h	Tensão Relativa		
5	6%	3*	5%	2	2%
7	5%	9	1,5%	4	1%
11	3,5%	15	0,5%	6...24	0,5%
13	3%	21	0,5%	-	-
17	2%	-	-	-	-
19	1,5%	-	-	-	-
23	1,5%	-	-	-	-
25	1,5%	-	-	-	-
DHT ≤ 8%					
*Dependendo do projeto da rede, o valor para a terceira harmônica pode ser substancialmente menor.					

- **Metodologia para Obtenção do Valor Representativo**

Sob condições normais de suprimento, os trabalhos de medição deverão compreender um período total de observação de uma semana. Durante este tempo de registro, deverão ser observadas as amostragens e os tratamentos estatísticos para os intervalos de 10 (dez) minutos, conforme prevê parte das diretrizes estabelecidas pela IEC. Os níveis encontrados serão considerados aceitáveis desde que os mesmos não ultrapassem os valores constantes da Tabela 3.4, por um tempo maior que 5% do total de medição. (UFU, 2000a).

3.6.1.4 Norma Sul Africana – NRS 048

A fundamentação da norma Sul Africana NRS 048 está nas diretrizes estabelecidas pela IEC (*International Electrotechnical Commission*) e pela norma Européia (CENELEC). Adicionalmente, os termos da NRS 048 utilizaram, ainda, dos relatórios e dados locais disponíveis.

- **Índices de Conformidade**

A NRS 048, destinada a regulamentar a qualidade dos suprimentos elétricos, foi aprovada pelo *National Electricity Regulator* em 21 de novembro de 1996. A Tabela 3.5 define os níveis de harmônicas em redes de baixa e média tensão. (UFU, 2000a).



Tabela 3.5 – Níveis de tensões harmônicas (expressos como porcentagem da tensão real) para sistemas de potência de baixa e média tensão.

Harmônicas Ímpares Não Múltiplas de 3		Harmônicas Ímpares Múltiplas de 3		Harmônicas Pares	
Ordem	V[%]	Ordem	V[%]	Ordem	V[%]
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,3	6	0,5
13	3	21	0,2	8	0,5
17	2	>21	0,2	10	0,5
19	1,5			12	0,2
23	1,5			>12	0,2
25	1,5				
>25	0,2+ 1,3 x 25/h				
Distorção Harmônica Total – DHT ≤ 8%					

De acordo com a Tabela 3.5 observa-se que a distorção harmônica total de tensão para sistemas de potência de baixa e média tensão tem que ser menor ou igual a 8%. A Tabela 3.6 define os níveis de harmônicas em redes de alta e extra – alta tensão.

Tabela 3.6 – Níveis de tensões harmônicas (expressos como porcentagem da tensão real) para sistemas de potência de alta e extra – alta tensão

Harmônicas Ímpares Não Múltiplas de 3		Harmônicas Ímpares Múltiplas de 3		Harmônicas Pares	
Ordem	V[%]	Ordem	V[%]	Ordem	V[%]
5	2	3	2	2	1,5
7	2	9	1	4	1
11	1,5	15	0,3	6	0,5
13	1,5	21	0,2	8	0,4
17	1	>21	0,2	10	0,4
19	1			12	0,2
23	0,7			>12	0,2
25	0,7				
>25	0,2+ 0,5 x 25/h				
Distorção Harmônica Total – DHT ≤ 3% - Redes de Alta Tensão					

De acordo com a Tabela 3.6, observa-se que a distorção harmônica total de tensão para sistemas de potência de alta e extra alta tensão tem que ser menor ou igual a 3%.



- **Metodologia para Obtenção do Valor Representativo**

O período total de avaliação a ser utilizado é de sete dias consecutivos. O tipo de instrumento utilizado deve amostrar cada tensão harmônica em intervalos menores ou iguais a 3 segundos. Estas amostras são então tratadas a cada período de 10 minutos. O procedimento é executado para sucessivos intervalos de 24 horas até complementar o período total de 7 dias.

O maior, dentre os valores de distorção encontrado ao longo de cada período de 24 horas, que não exceda 95% do tempo total de medição, é aquele a ser armazenado e definido como o nível de distorção harmônica para o período total da amostragem diária. O valor a ser comparado com os níveis permitidos de compatibilidade, mostrados nas Tabelas 3.5 e 3.6, para o período total de 7 dias, será aquele que corresponda ao maior nível dentre aqueles medidos diariamente. (UFU, 2000b).

3.6.1.5 Norma Técnica de Qualidade de Energia – NTCSE

A norma NTCSE (*Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos*) foi implantada no Peru em 09 de Outubro de 1997, revisada em abril de 1999. Ela tem por objetivo estabelecer os aspectos, parâmetros e indicadores de qualidade da energia entregue aos consumidores pelas concessionárias, bem como a quantidade mínima e as condições de medição. Adicionalmente, o documento fixa as tolerâncias e as respectivas compensações e multas pelo não cumprimento das determinações. O documento se baseia em grande parte do seu conteúdo, nas recomendações IEC, contemplando todas as concessionárias e consumidores, e é aplicável a clientes alimentados por baixa, média, alta e extra alta tensão.

- **Índices de Conformidade**

As distorções harmônicas limitadas pela norma NTCSE contemplam apenas os níveis de tensões, procurando restringir os valores de distorções individuais e totais. A Tabela 3.7 apresenta os níveis admissíveis.

Observa-se na Tabela 3.7 que o órgão fiscalizador não verifica os níveis de correntes harmônicas. A norma ainda estabelece que se comprovado um fornecimento no qual a qualidade do produto entregue ao cliente não atende aos limites impostos para as harmônicas, o cliente é compensado financeiramente. (UFU, 2000a).



Tabela 3.7 – Limites e Tolerâncias para as ordens harmônicas e DHT

Ordem Harmônica e DHT	Tolerância - V_i e THD (% em relação à tensão nominal do ponto de medição)	
	Nível de tensão maior que 60 kV	Nível de tensão inferior ou igual a 60 kV
Harmônicas ímpares não múltiplas de 3		
5	2,0	6,0
7	2,0	5,0
11	1,5	3,5
13	1,5	3,0
17	1,0	2,0
19	1,0	1,5
23	0,7	1,5
25	0,7	1,5
maior que 25	$0,1 + 2,5/n$	$0,2 + 12,5/n$
Harmônicas ímpares Múltiplas de 3		
3	1,5	5,0
9	1,0	1,5
15	0,3	0,3
21	0,2	0,2
Maiores que 21	0,2	0,2
Pares		
2	1,5	2,0
4	1,0	1,0
6	0,5	0,5
8	0,2	0,5
10	0,2	0,5
12	0,2	0,2
Maiores que 12	0,2	0,2
DHT	3,0	8,0

- **Metodologia para Obtenção do Valor Representativo**

A norma em questão determina que, as monitorações para as áreas selecionadas para a verificação dos níveis dos itens de conformidade contemplados neste trabalho, sejam realizadas observando-se os seguintes períodos:

- Intervalo dos Registros de Medição – 10 minutos
- Período de Medição – 7 dias (no mínimo)
- Período de Controle – 1 mês



O conjunto dos valores obtidos formará um banco de dados semanal ou outro qualquer (compreendido entre 7 e 30 dias). Note-se que, nesta norma, não há a definição de um intervalo diário.

A partir desta amostragem procede-se ao tratamento estatístico que culminará pela definição do nível de distorção a ser comparado com os limites exigidos pela norma que, então, classifica o intervalo de medição como sendo de boa ou má qualidade. O procedimento estatístico compreende a determinação do percentual das amostras que ultrapassam os limites toleráveis. Estas não poderão exceder 5% do tempo total registrado. (UFU, 2000b).

3.6.2 NORMAS E RECOMENDAÇÕES NACIONAIS

Há menos de três décadas, “qualidade” do fornecimento de energia elétrica resumia-se às interrupções na tensão de alimentação dos consumidores. A partir de então, regulamentações e normas foram propostas (AMBONI, 2003):

- **1978:** Com o objetivo de regulamentar “as condições técnicas e a qualidade do serviço de energia elétrica”, o DNAEE lançou as Portarias N° 046 e 047.
- **1978:** Foi a partir deste momento que a ELETROBRÁS liderou um processo de discussão sobre critérios e metodologias para o atendimento de consumidores com cargas especiais.
- **1980:** A Portaria N° 031, neste ano lançada, considerava ser imprescindível: a conceituação de serviço adequado, o estabelecimento de método uniforme para apuração dos índices de continuidade de suprimento dos sistemas elétricos e a definição dos limites de variação das tensões.
- **1984:** Ano em que ocorreu uma revisão destes critérios e metodologias, com o objetivo de acrescentar a experiência operacional obtida pelas empresas de energia elétrica no que diz respeito às distorções harmônicas, flutuação e desequilíbrio de tensão.
- **1993:** A ELETROBRÁS realizou uma nova revisão dos documentos anteriores, levando em conta a experiência dos grupos de trabalho da CIGRÉ, UIE, IEC e IEEE, bem como as novas experiências das empresas brasileiras (IBS e ABRACE). Neste mesmo ano foi emitido o documento “Critérios e Procedimentos para o Atendimento a Consumidores com Cargas Especiais”, cuja autoria foi atribuída ao GCOI e GCPS.



Estabelecendo os critérios e procedimentos de planejamento e de operação para a avaliação e o controle das perturbações causadas por cargas não-lineares, intermitentes ou desequilibradas.

- **1997:** O documento supracitado foi complementado por outro, denominado por “Procedimentos de Medição para Aferição da Qualidade da Onda de Tensão Quanto ao Aspecto de Conformidade (Distorção Harmônica, Flutuação e Desequilíbrio de Tensão)”.
- **1998:** Foi criado o ONS (Operador Nacional do Sistema) responsável pela coordenação e controle da operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN), sob a fiscalização e regulação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).
- **1999:** O submódulo 3.8 integrante ao Módulo 3 – Acesso aos Sistemas de Transmissão – dos Procedimentos de Rede define os requisitos técnicos mínimos para a conexão de Agentes à Rede Básica.
- **2000:** Data na qual o submódulo 2.2, integrante ao Módulo 2, traçou como objetivo definir os padrões de desempenho da Rede Básica. Em janeiro deste mesmo ano, a ANEEL aprovou a Resolução 024, que estabelece as disposições relativas à continuidade da distribuição de energia elétrica às unidades consumidoras, e em novembro aprovou a Resolução 456, que estabelece, de forma atualizada e consolidada, as Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica.
- **2001:** Em novembro deste ano, a ANEEL aprovou a Resolução 505, que estabelece, de forma atualizada e consolidada, as disposições relativas à conformidade dos níveis de tensão de energia elétrica em regime permanente.
- **2002:** A elaboração dos Procedimentos de Distribuição, diferentemente dos Procedimentos de Rede, em elaboração pelo ONS, requer um arranjo próprio e coordenação da ANEEL, uma vez que não existe entidade subordinada a ANEEL com a atribuição de elaborá-los.

Hoje, dentre as principais normas/recomendações aplicadas a QEE no Brasil, destacam-se os Procedimentos de Rede do Operador Nacional do Sistema Elétrico (Submodulo 2.2) e os Procedimentos de Distribuição (Módulo 08), em fase de elaboração pela ANEEL.



3.6.2.1 Procedimentos de Rede – Submódulo 2.2

O Módulo 2 dos Procedimentos de Rede trata dos “Requisitos Mínimos para Instalações e Gerenciamento de Indicadores de Desempenho da Rede Básica e de seus Componentes”. De forma a estabelecer os padrões de desempenho da Rede Básica e os requisitos mínimos para suas instalações, o módulo 2 foi segmentado em seis submódulos.

De maior relevância no que tange ao objetivo do trabalho, o submódulo 2.2 - “Padrões de Desempenho da Rede Básica”, age de forma a garantir o desempenho da Rede Básica de acordo com os padrões globais estabelecidos para os indicadores de flutuação de tensão, desequilíbrio de tensão e distorção harmônica. Apresenta ainda diversos indicadores, cujos valores serão acompanhados pelo ONS, de forma a garantir o desempenho da Rede Básica. (ONS, 2002).

- **Índices de Conformidade**

O indicador para avaliar o desempenho global quanto a harmônicas, em regime permanente, nos barramentos da Rede Básica, corresponde à distorção harmônica de tensão. Os padrões globais de tensões harmônicas da 2ª a 50ª ordem, bem como o padrão para a DHT, são apresentados na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 – Limites de referência globais das distorções harmônicas (em porcentagem da tensão fundamental)

V < 69 kV				V ≥ 69 kV			
Ímpares		Pares		Ímpares		Pares	
Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)
3, 5, 7	5 %			3, 5, 7	2 %		
		2, 4, 6	2 %			2, 4, 6	1 %
9, 11, 13	3 %			9, 11, 13	1,5 %		
		≥ 8	1 %			≥ 8	0,5 %
15 a 25	2 %	-	-	15 a 25	1 %	-	-
≥ 27	1 %	-	-	≥ 27	0,5 %	-	-
DHT = 6%				DHT = 3%			

Os limites da Tabela 3.8 não devem ser aplicados a fenômenos transitórios que resultem em injeção de correntes harmônicas, como ocorre na energização de transformadores.



- **Metodologia para Obtenção do Valor Representativo**

Recomenda-se que a frequência de aquisição do medidor seja de 10 minutos. Determina-se o valor que foi superado em apenas 5% dos registros obtidos no período de 1 dia (24 horas), ao longo de 7 (sete) dias consecutivos. O valor do indicador a ser comparado com o valor padrão será o maior dentre os sete valores obtidos, anteriormente, em base diária. (ONS, 2002).

3.6.2.2 PRODIST – Módulo 08

Objetiva estabelecer os procedimentos relativos à qualidade da energia elétrica - QEE, abordando a qualidade do produto, perdas técnicas e a qualidade do serviço prestado. Para a qualidade do produto, este módulo define os conceitos e os parâmetros envolvidos e estabelece mecanismos que possibilitem a ANEEL fixar valores-limite para os indicadores de QEE. Os instrumentos de medição devem observar o atendimento aos protocolos de medição e às normas técnicas vigentes. O espectro harmônico a ser considerado para fins do cálculo da distorção total deve compreender uma faixa de frequências que considere desde a componente fundamental até, no mínimo, a 25ª ordem harmônica ($h_{min} = 25$). Ressalta-se que esta norma ainda não foi outorgada, podendo ainda ser alterada. (ANEEL, 2006).

- **Índices de Conformidade**

Os valores de referência para as distorções harmônicas totais devem ser iguais ou inferiores aos valores fornecidos na Tabela 3.9 a seguir. Devem ser obedecidos também os valores das distorções harmônicas individuais indicados na Tabela 3.10.

Tabela 3.9 – Valores de referência globais das distorções harmônicas totais

(em porcentagem da tensão fundamental)

Tensão Nominal do Barramento	Distorção Harmônica Total de Tensão (DHT)
$V_N \leq 1kV$	10
$1kV < V_N \leq 13,8kV$	8
$13,8kV < V_N \leq 69kV$	6
$69kV < V_N \leq 138kV$	3

É importante ressaltar que uma das premissas do PRODIST foi “trabalhar muito forte nas definições e estabelecer limites brandos, durante a fase de transição, para compreender bem os



fenômenos”. Nota-se pelas Tabelas 3.9 e 3.10 que os limites estabelecidos nesta norma são, de fato, mais amenos que os índices estipulados por outras normas.

Tabela 3.10 – Valores de referência globais das distorções harmônicas individuais

(em porcentagem da tensão fundamental)

Ordem Harmônica	Distorção Harmônica Individual de Tensão [%]				
	$V_n \leq 1 \text{ kV}$	$1 < V_n \leq 13.8 \text{ kV}$	$13.8 < V_n \leq 69 \text{ kV}$	$69 < V_n \leq 138 \text{ kV}$	
Ímpares não múltiplas de 3	5	7,5	6	4,5	2,5
	7	6,5	5	4	2
	11	4,5	3,5	3	1,5
	13	4	3	2,5	1,5
	17	2,5	2	1,5	1
	19	2	1,5	1,5	1
	23	2	1,5	1,5	1
	25	2	1,5	1,5	1
Ímpares múltiplas de 3	>25	1,5	1	1	0,5
	3	6,5	5	4	2
	9	2	1,5	1,5	1
	15	1	0,5	0,5	0,5
	21	1	0,5	0,5	0,5
Pares	>21	1	0,5	0,5	0,5
	2	2,5	2	1,5	1
	4	1,5	1	1	0,5
	6	1	0,5	0,5	0,5
	8	1	0,5	0,5	0,5
	10	1	0,5	0,5	0,5
	12	1	0,5	0,5	0,5
	>12	1	0,5	0,5	0,5

- **Metodologia para obtenção do Valor Representativo**

Recomenda-se que a frequência de aquisição do medidor seja de 10 minutos. Define-se um intervalo diário compreendendo um período de 00:00 horas às 24:00 horas, utilizado para o cálculo do valor da distorção harmônica obtida para 95% das 144 amostras armazenadas durante o dia (P95%). Determina-se também que o período total de medição seja de 7 dias consecutivos. O valor representativo, a ser comparado com os índices das Tabelas 3.9 e 3.10 será o maior P95% diário. (ANEEL, 2006).

3.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou os fundamentos básicos das distorções harmônicas, bem como um resumo das principais normas e recomendações internacionais sobre esse distúrbio. Nos capítulos seguintes será apresentada a ferramenta computacional para análise e qualificação das distorções harmônicas de tensão.



CAPÍTULO 4

FERRAMENTA COMPUTACIONAL

O presente capítulo se presta a apresentar o objeto deste trabalho, a saber, o aplicativo intitulado PROGRAMA DE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA – MÓDULO DE ANÁLISE DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS. O *software* consiste em uma ferramenta para auxiliar a quantificação e qualificação das distorções harmônicas presentes no sistema elétrico, valendo-se de recursos gráficos e análises simples e objetivas. Sua motivação está baseada em três questões fundamentais:

- A necessidade de um tratamento estatístico / probabilístico dos dados colhidos nas medições de distorções harmônicas;
- a possibilidade de uma análise das distorções harmônicas em qualquer ambiente, observando e comparando os resultados com os limites estabelecidos pelas principais normas e recomendações nacionais e internacionais;
- o grande volume de dados gerado pelas medições.

4.1 ESTRUTURA DO APLICATIVO

O aplicativo ou *software* que será apresentado a seguir foi desenvolvido em linguagem “MATLAB 6.5”, licença nº 242255. Mais que um *software* líder na área de computação numérica/científica, o MATLAB é um ambiente integrado de computação numérica e modelagem de sistemas, adotado como ferramenta de desenvolvimento padrão pelas principais universidades e empresas, no Brasil e no mundo.

O MATLAB é o núcleo de um ambiente de computação numérica baseado em matrizes que integra:

- Funções de tratamento numérico de alta performance;
- sofisticados recursos de geração de gráficos para visualização de dados;
- linguagem de programação de alto nível.



Para a execução do aplicativo, e até mesmo para a instalação do MATLAB 6.5 recomenda-se um microcomputador PC Pentium III – 1.0 GHz ou superior e com no mínimo 128 MB de RAM.

O aplicativo é constituído por oito módulos, descritos sucintamente a seguir:

- **Módulo de Entrada (Leitura do Banco de Dados):** a partir dele tem-se acesso aos outros módulos do programa, onde serão realizadas as análises. Neste módulo carrega-se o banco de dados desejado para análise. Também são mostradas informações sobre o banco.
- **Análise de Tensão e Carga:** aqui é feita uma análise estatística e gráfica do perfil de tensão, corrente e potência, caso o banco de dados disponibilize essas grandezas para análise. O módulo tem o objetivo de verificar a influência que algumas perturbações no sistema exercem nos valores de distorção medidos.
- **Freqüência de Aquisição dos Dados:** este módulo permite a comparação entre diferentes freqüências de aquisição de dados, através de ferramentas estatísticas, concluindo a respeito da descaracterização ou não dos dados.
- **Similaridade entre fases:** neste módulo é realizada uma análise comparativa entre as diferentes fases do sistema trifásico medido, verificando se há similaridade entre elas através de uma análise estatística em todo o período de medição.
- **Similaridade entre Dias:** módulo que caracteriza o banco de dados com relação à ocorrência de similaridade entre os diversos dias de medição, permitindo também a observância das curvas características de distorção para cada dia de medição.
- **Análise de Períodos:** neste módulo, é possível analisar as diferenças nos perfis de distorção harmônica entre os diversos períodos de um determinado dia de medição.
- **Análise de Distribuição no Tempo:** Módulo que permite ao usuário investigar o ambiente fazendo a comparação do banco de dados com um determinado nível de distorção escolhido como parâmetro. É realizada uma análise temporal e probabilística da distribuição das distorções medidas com relação ao parâmetro escolhido.
- **Qualificação:** objetiva comparar os valores de distorção medidos com os valores de referência adotados como limites nas principais normas e recomendações internacionais. Apresenta também uma análise probabilística da grandeza escolhida.

Em todos os módulos de análise são disponibilizadas estatísticas das grandezas em avaliação, a saber, valores máximos, mínimos, médias aritméticas e quadráticas, desvio padrão, e valores de P95% e P99%, de acordo com as definições a seguir (MEYER, 1983):



- **Máximo:** Valor máximo de um vetor de dados numéricos;
- **Mínimo:** Valor mínimo de um vetor de dados numéricos;
- **Média Aritmética:** A média aritmética, μ , de um conjunto de N elementos x_1, x_2, \dots, x_N , é definida como a soma dos valores do grupo de dados dividida pelo número de elementos, equação 4.1:

$$\mu = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_N}{N} \quad (4.1)$$

- **Média Quadrática:** A média quadrática de um conjunto de N elementos x_1, x_2, \dots, x_N , é definida como a razão entre a raiz quadrada da soma dos quadrados dos valores do grupo de dados e a raiz quadrada do número de elementos, equação 4.2:

$$\varphi = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i)^2}{N}} \quad (4.2)$$

- **Desvio Padrão:** O desvio padrão de N variáveis aleatórias x_1, x_2, \dots, x_N , é definido conforme a equação 4.3 abaixo:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}{N}} \quad (4.3)$$

- **P95%:** Indica, para um dado conjunto de dados, o valor com probabilidade de 95% de não ser excedido.
- **P99%:** Indica, para um dado conjunto de dados, o valor com probabilidade de 99% de não ser excedido.

A seguir será apresentada a estrutura do banco de dados e o módulo de entrada do programa.

4.2 BANCO DE DADOS

Para a captura das amostras de distorção harmônica é necessário dispor de instrumentos de medição específicos, como analisadores espectrais ou analisadores de harmônicas. No caso do banco de dados analisado neste trabalho, utilizou-se o medidor ION 7600. Trata-se de um



medidor trifásico composto de quatro entradas de tensão e cinco entradas de corrente. A Figura 4.1 ilustra o display frontal deste equipamento:



Figura 4.1 – Medidor ION 7600

Colhidos os dados, é necessário gerar o banco de dados no formato “*.xls”. O arquivo pode ser gerado manualmente no Microsoft Excel, desde que obedeça ao padrão estabelecido pelo aplicativo: seu tamanho poderá ser variável, dependendo do número de grandezas medidas pelo equipamento. Há dois tipos de banco de dados aceito pelo programa: os que possuem grandezas para análise de carga (tipo 1) e os que não disponibilizam essas grandezas (tipo 2).

- A primeira linha informará as grandezas medidas: tempo, tensões, correntes, potências, valores de distorção harmônica.
- A primeira coluna deverá ser a do tempo. O arquivo gerado a partir do medidor já traz as informações de data e hora da medição.
- Após a coluna do tempo, estarão as colunas com valores de tensão, corrente e potência, se o arquivo gerado pelo medidor contiver essas grandezas (banco de dados tipo 1). A ordem deverá ser tensões de linha, tensões de fase, correntes de linha, correntes de fase, potência ativa, reativa e aparente. Caso não contenha (banco de dados tipo 2), as próximas colunas deverão ser as das amostras de distorções harmônicas.
- É conveniente que o arquivo traga primeiramente as colunas com os valores de distorção harmônica total, seguidas pelas de distorção individual. Para facilitar a análise de similaridade entre fases, os valores de distorção de cada ordem devem estar juntos, para as três fases medidas.

A Tabela 4.1 a seguir resume o formato de banco de dados (tipo 1) aceito pelo programa e a Figura 4.2 ilustra esse tipo de banco. O banco tipo 2 não terá as medições de tensão, corrente e potência.



Tabela 4.1 – Formato do banco de dados (tipo 1)

Tempo	V _L	V _F	I _L	I _F	KW	KVAr	KVA	DHT (%)	DHI (%)
Data e Hora	Colunas: tensões de linha ab, bc, ca	Colunas: tensões de fase a, b, c	Colunas: correntes de linha ab, bc, ca	Colunas: correntes de fase a, b, c	Colunas: potências ativa, reativa e aparente			Colunas: DHT nas fases a, b, c	Colunas: DHI de ordem 2 até n nas fases a, b, c

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Local Time	VL ab	VL bc	VL ca	Vf a	Vf b	Vf c	I(a)
2	2006-jun-20 00:00:00,000	34044,8	34048	34125,26	19686,87	19634,86	19694,05	101,733
3	2006-jun-20 00:10:00,000	33767,93	33757,8	33831,07	19523,03	19473,4	19522,1	100,346
4	2006-jun-20 00:20:00,000	33992,61	33983,62	34061,71	19654,33	19603,34	19654,08	98,5734
5	2006-jun-20 00:30:00,000	34056,79	34056,16	34131,43	19692,08	19642,53	19696,33	97,6952
6	2006-jun-20 00:40:00,000	33997,66	33985,11	34061,8	19656,22	19606	19653,35	95,5938
7	2006-jun-20 00:50:00,000	34043,09	34031,54	34104,32	19680,68	19633,47	19679,02	94,4245
8	2006-jun-20 01:00:00,000	33747,75	33737,22	33813,77	19512	19462,51	19510,45	92,3809
9	2006-jun-20 01:10:00,000	33740,19	33728,23	33805,18	19507,61	19457,97	19504,87	92,344
10	2006-jun-20 01:20:00,000	33950,57	33944,13	34018,95	19629,07	19581,14	19629,79	91,5289
11	2006-jun-20 01:30:00,000	33997,6	33989,82	34065,03	19656,14	19607,91	19656,04	90,3190
12	2006-jun-20 01:40:00,000	34018,96	34015,7	34085,71	19667,17	19622,41	19669,72	90,4710
13	2006-jun-20 01:50:00,000	33783,71	33778,32	33847,81	19530,95	19486,12	19532,03	91,1426
14	2006-jun-20 02:00:00,000	33756,55	33757,27	33823,3	19515,48	19471,76	19519,86	90,0371
15	2006-jun-20 02:10:00,000	33845,96	33843,95	33910,38	19566,97	19522,68	19569,45	89,5207
16	2006-jun-20 02:20:00,000	34041,68	34046,51	34110,86	19680,66	19637,52	19686,59	89,1681
17	2006-jun-20 02:30:00,000	34030,16	34042,98	34100,68	19673,08	19633,83	19683,31	87,7110

Figura 4.2 – Exemplo de banco de dados no Microsoft Excel

4.3 INICIANDO O PROGRAMA

O programa deve ser aberto dentro do MatLab 6.5. Após este ser iniciado, escolhe-se o diretório que contém a pasta do aplicativo no menu “*Current Directory*”. O próximo passo é digitar o nome do arquivo de inicialização, “MADH”, na janela “*Command Window*”. Aparecerá uma tela de apresentação do programa, mostrada na Figura 4.3, que se fecha após 6 segundos. Segue-se a essa a tela inicial, onde há o botão “Iniciar Programa” ilustrada pela Figura 4.4. Ao se clicar sobre este botão inicia-se o módulo de entrada, onde é feita a leitura do banco de dados.

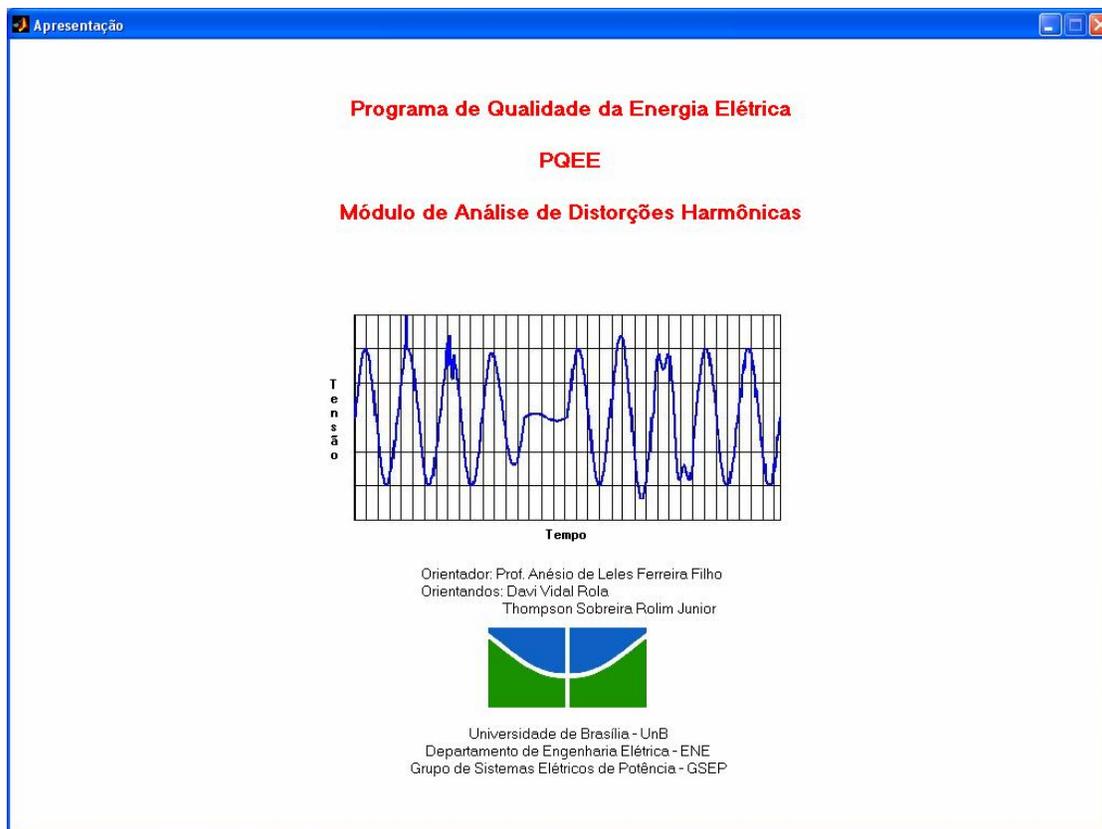


Figura 4.3 – Tela de apresentação



Figura 4.4 – Tela inicial



4.4 MÓDULO DE ENTRADA – LEITURA DO BANCO DE DADOS

O módulo de entrada é responsável por carregar os dados medidos e dar acesso aos módulos de análise. Os botões de entrada ficam inativos até que o banco seja carregado. Há ainda a possibilidade de acesso a partir do menu superior “Análises”. Na mesma tela encontra-se disponível um botão denominado de “Normas”, que traz um arquivo com um resumo das principais recomendações sobre o assunto no mundo.

Para que o *software* leia o banco de dados, é necessário clicar sobre o botão “Leitura dos Dados”. Abrir-se-á uma janela que pergunta se o Banco de Dados possui grandezas para análise de tensão e carga, isto é, se foram medidos tensão, corrente e potência, como mostra a Figura 4.5. Caso não haja estas medições a opção “Análise de Tensão e Carga” ficará desativada.

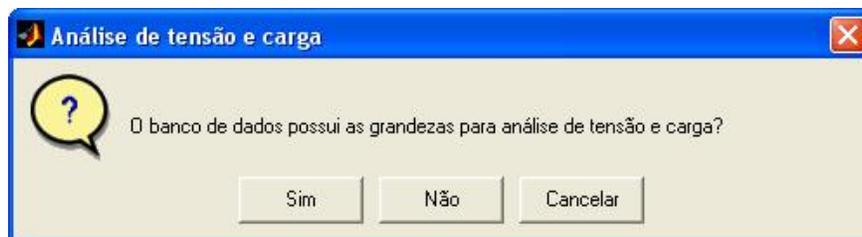


Figura 4.5 – Opção por tipo de banco de dados

Após a escolha do tipo de banco de dados, seleciona-se o arquivo desejado. Se carregado corretamente, um aviso será mostrado em uma janela com a mensagem “Dados Colhidos com Sucesso”, como ilustra a Figura 4.6.

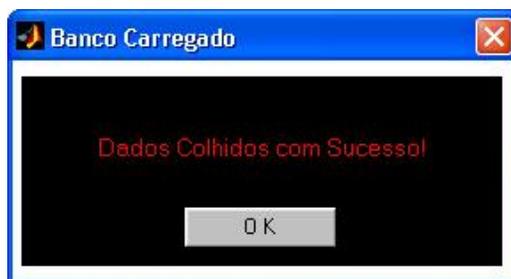


Figura 4.6 – Aviso de banco carregado

A partir deste momento, as seguintes informações sobre o banco utilizado estarão disponíveis na janela do módulo de entrada: nome do arquivo, data e hora de início e fim da medição, frequência de aquisição em minutos, número de horas, minutos e dias de medição. A Figura 4.7 mostra a janela deste módulo.



Figura 4.7 – Janela do módulo de entrada do programa (Banco de Dados)

Nos capítulos subseqüentes os módulos da ferramenta computacional serão detalhadamente apresentados. Primeiramente são expostas suas respectivas telas e funções de análise, e em seguida são feitos estudos de caso que mostram a aplicação de cada módulo.

Os dados utilizados são procedentes da subestação de subtransmissão “SE02” da CEB – Companhia Energética de Brasília, localizada na via W/5 Sul - Entrequadras 704/904 - Área Especial. A subestação é abaixadora, com tensões de 34,5 / 13,8 kV. Os dados foram colhidos na sua entrada, o lado de alta tensão. A Tabela 4.2 resume as características do banco de dados medido. A Figura 4.8 traz a sua localização.

Tabela 4.2 – Dados do banco medido na subestação SE02

Banco de Dados	Campanha CEB SE_02.xls
Data de Início da Medição	20 de junho de 2006
Hora de Início da Medição	00:00 hs
Data do Fim da Medição	03 de julho de 2006
Hora do Fim da Medição	23:50 hs
Frequência de Aquisição (minutos)	10
Número de Horas de Medição	336
Número de Minutos de Medição	20160
Número de Dias de Medição	14

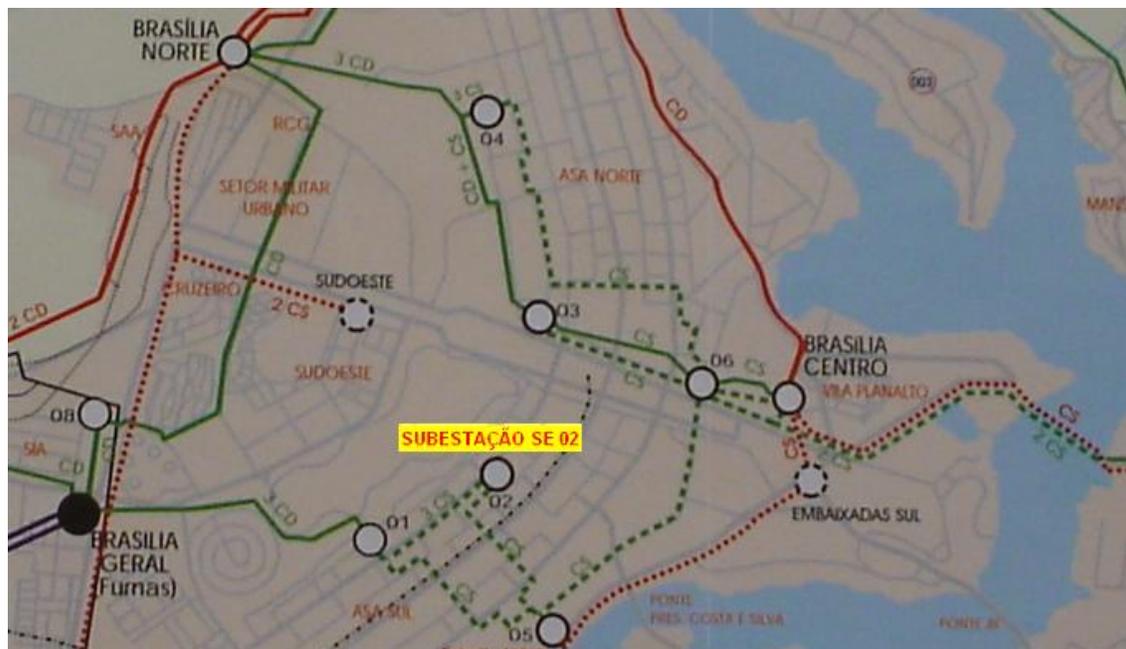


Figura 4.8 – Localização da subestação SE02

4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente capítulo apresentou a ferramenta computacional para análise de distorções harmônicas de tensão, trazendo uma visão geral sobre sua estrutura, bem como sobre o formato do banco de dados utilizado. Nos capítulos seguintes serão descritos cada módulo do programa, trazendo sempre uma análise do banco de dados da subestação SE02, e comprovando sua relevância para o estudo das DHT_v.



CAPÍTULO 5

ANÁLISE DE TENSÃO E CARGA

Este capítulo apresentará o módulo de análise de tensão e carga. Com esta ferramenta é possível traçar os perfis de tensão, corrente e potência do local analisado, através de recursos gráficos e estatísticos. Seu objetivo principal é permitir ao usuário verificar se possíveis perturbações ou anomalias nessas grandezas alteram significativamente as medições de distorções harmônicas de tensão.

Para que o módulo esteja disponível para análise, é necessário que o banco de dados do usuário contenha as medições de tensões de linha e fase e correntes de linha e fase, para as três fases do sistema, além de potências aparente, ativa e reativa totais, nesta ordem. O formato do banco de dados ilustrado no capítulo 4 deve ser rigorosamente respeitado, tendo as colunas 2 a 16 reservadas para essas grandezas.

5.1 ESTRUTURA DO MÓDULO

O módulo pode ser acessado do botão “Análise de Tensão e Carga”, na tela do módulo de entrada, ou a partir do menu superior “Análises”. Abrir-se-á a janela mostrada pela Figura 5.1. À esquerda ficam disponíveis as grandezas para análises: tensões de linha e fase, correntes de linha e fase e potências. Basta selecionar uma delas e proceder clicando no botão OK abaixo das mesmas. Selecionam-se então os dias desejados, do mesmo modo. O usuário tem liberdade de escolher o número de dias que quiser.

Após a seleção das grandezas e dias para análise, os dados estatísticos são calculados automaticamente pelo software, para as três fases do sistema, e mostrados em uma Tabela. Estão disponíveis valores máximo e mínimo, média, média quadrática, desvio padrão, P95% e P99%. Ficam habilitadas também as análises gráficas, em dois botões abaixo da Tabela, onde há opção de gráfico ponto a ponto das amostras e gráfico de barras dos valores estatísticos.

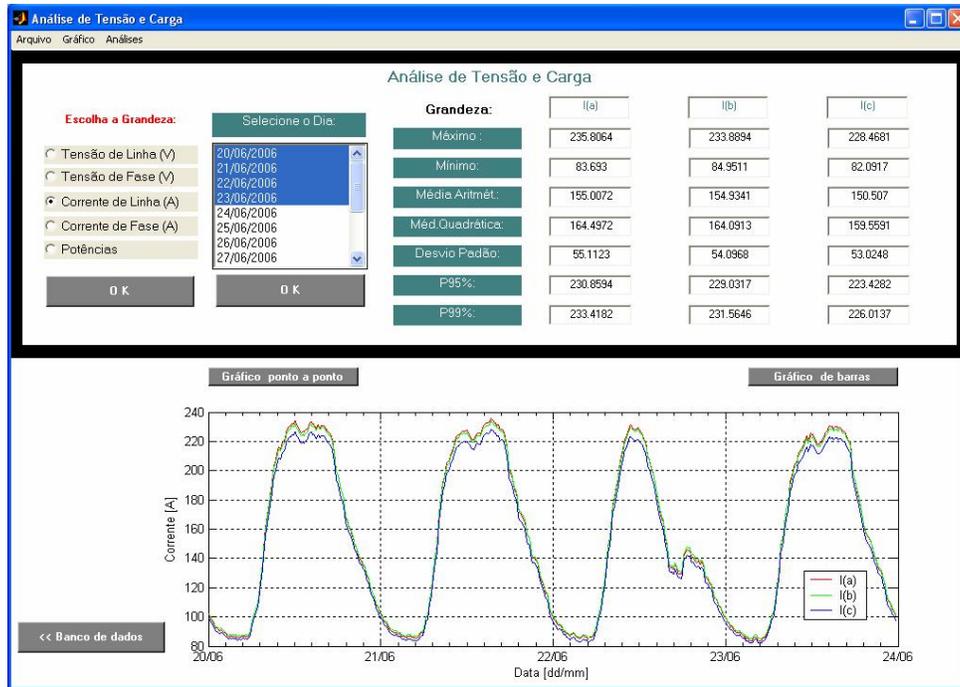


Figura 5.1 – Janela do módulo de análise de tensão e carga

5.2 ESTUDO DE CASO

Objetivando exemplificar a utilização do módulo, será feita uma análise gráfica e estatística das amostras obtidas para tensões de linha, correntes de linha e potências. O banco de dados utilizado é o da subestação SE02 da CEB.

5.2.1 TENSÕES DE LINHA

A Figura 5.2 apresenta o gráfico ponto a ponto das tensões de linha para as três fases captadas na primeira semana de monitoração.



Figura 5.2 – Tensões de linha no intervalo de uma semana de medição



A tensão nominal na entrada da subestação é 34,5 kV. Ressalta-se que para esta análise, escolheram-se os sete primeiros dias do banco de dados; de 20 de junho de 2006, uma terça-feira, a 26 de junho de 2006, uma segunda-feira.

Nota-se que a tensão permanece abaixo do valor nominal em praticamente todo o intervalo de medição. A resolução 505 da ANEEL, de 26 de novembro de 2001, estabelece como nível de tensão adequado para essa faixa valores entre 93% e 105% da tensão de referência. A Tabela 5.1 traz os dados estatísticos para as três fases medidas.

Tabela 5.1 – Dados estatísticos das tensões medidas

Tensões de Linha	V_{ab} (V)	V_{bc} (V)	V_{ca} (V)
Máximo	34707	34669	34790
Mínimo	32784	32782	32865
Média Aritmética	33752	33729	33837
Média Quadrática	33753	33730	33839
Desvio Padrão	290,62	294,25	295,24
P95%	34226	34213	34323
P99%	34474	34449	34564

A partir da Tabela 5.1 percebe-se que as tensões se mantêm bem equilibradas com respeito à magnitude, sendo que a medida entre as fases b e c apresenta-se um pouco abaixo das demais. A variação máxima entre as médias aritméticas é de apenas 0,32%, mesmo valor calculado para as médias quadráticas.

A Figura 5.3 ilustra um gráfico de barras com os dados da Tabela 5.1.

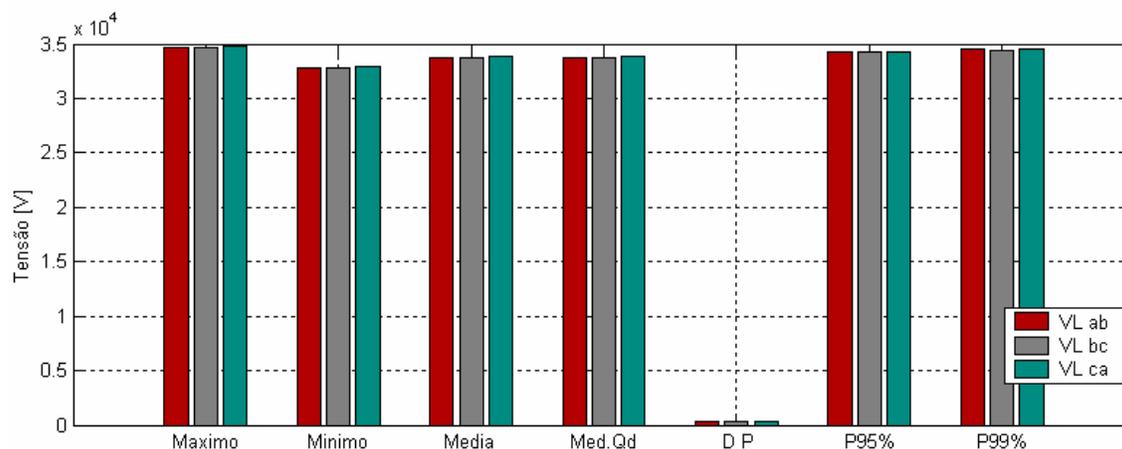


Figura 5.3 – Gráfico de barras com os dados da Tabela 5.1



O desvio padrão máximo foi calculado entre as fases c e a, sendo 295,24 V. Esse valor representa apenas 0,87% da média aritmética desta tensão. Conclui-se que as amostras variam muito pouco em relação a esta medida estatística. Ressaltando ainda mais o equilíbrio entre as magnitudes das fases, os valores de P95% e P99% apresentam variação máxima de 0,32% e 0,33%, respectivamente.

O valor de 93% da tensão de referência representa 32085 V, enquanto 105% é igual a 36225 V. Conclui-se que a tensão medida encontra-se dentro da faixa adequada em todo o período de medição.

5.2.2 CORRENTES DE LINHA

A Figura 5.4 apresenta o gráfico ponto a ponto das correntes de linha para as três fases no intervalo de uma semana de medição. A partir dela nota-se a grande variação da carga ao longo do dia. Fica clara também a diferença entre os dias úteis e o fim de semana, correspondente aos dias 24/06 e 25/06, quando a carga máxima é muito inferior à computada nos anteriores.

O dia 22/06, uma quinta-feira, apresenta um perfil diferenciado em relação aos outros dias úteis, devido ao terceiro jogo da seleção brasileira de futebol na Copa do Mundo 2006. Vê-se nele uma queda brusca na carga a partir do meio-dia (final do expediente para grande parte dos trabalhadores nessa data).

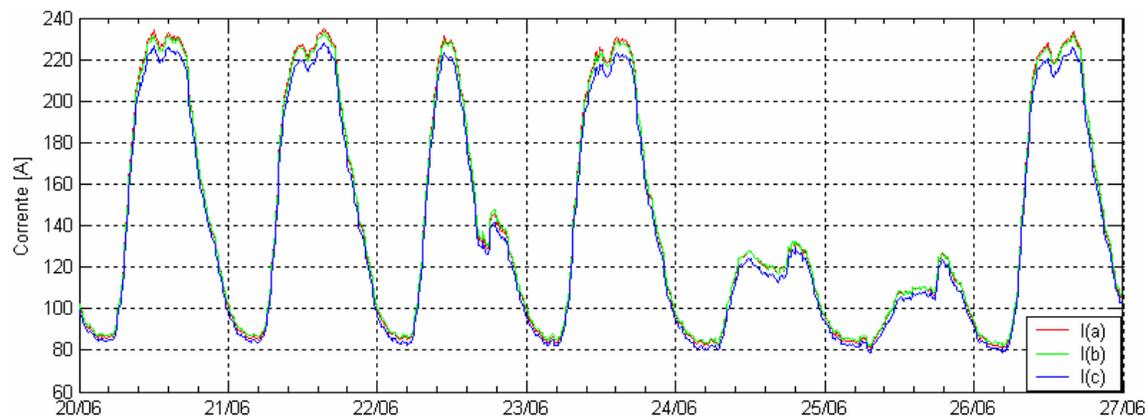


Figura 5.4 – Correntes de linha no intervalo de uma semana de medição

É coerente fazer a separação entre os dias úteis e o fim de semana, para efeito de análise. Para tanto, o dia 22/06 será excluído por se tratar de uma exceção aos demais, sendo substituído pelo dia 27/06. As Tabelas 5.2 e 5.3 mostram os dados estatísticos obtidos para dias úteis e



fim de semana. As Figuras 5.5 e 5.6 ilustram os gráficos de barras com os dados dessas Tabelas.

Tabela 5.2 – Dados estatísticos das correntes medidas nos dias úteis

Correntes de Linha	I_a (A)	I_b (A)	I_c (A)
Máximo	235,81	233,90	228,47
Mínimo	80,75	82,14	78,94
Média Aritmética	148,07	148,08	143,98
Média Quadrática	157,64	157,32	153,10
Desvio Padrão	54,12	53,15	52,07
P95%	229,20	227,88	222,10
P99%	232,99	231,43	225,66

Tabela 5.3 – Dados estatísticos das correntes medidas no fim de semana

Correntes de Linha	I_a (A)	I_b (A)	I_c (A)
Máximo	132,72	132,78	129,30
Mínimo	81,08	82,29	78,94
Média Aritmética	104,41	104,99	101,61
Média Quadrática	105,61	106,15	102,76
Desvio Padrão	15,92	15,69	15,34
P95%	127,79	128,14	124,35
P99%	131,06	131,78	127,51

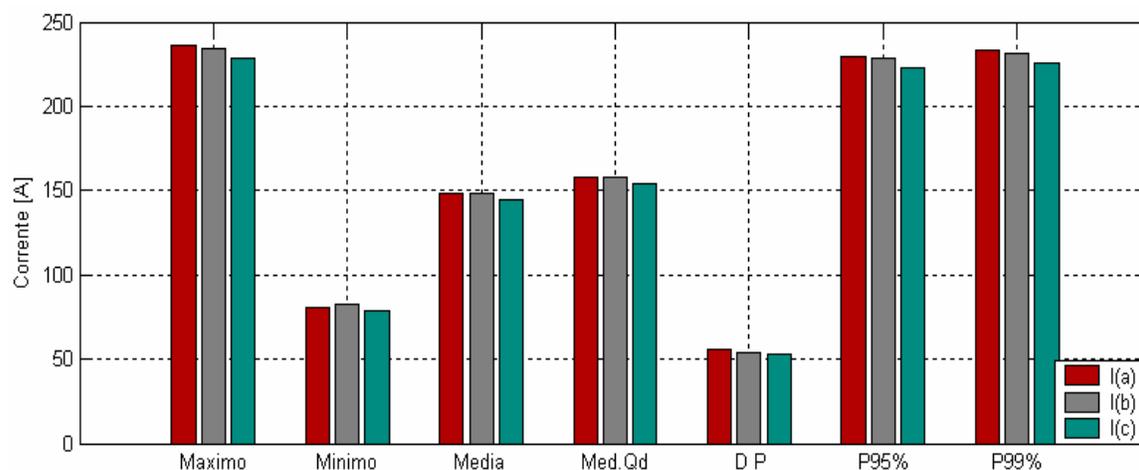


Figura 5.5 – Gráfico de barras com os dados da Tabela 5.2

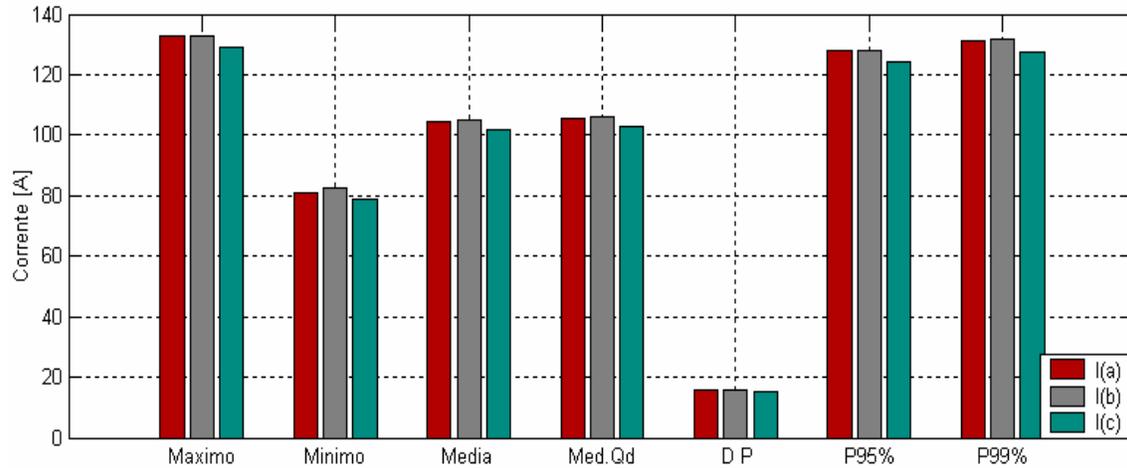


Figura 5.6 – Gráfico de barras com os dados da Tabela 5.3

Fazendo-se a comparação entre os valores calculados nas Tabelas anteriores, verifica-se a grande diferença entre os valores máximos de corrente medidos, fato que se reflete nos valores de P95% e P99%. O máximo de corrente no fim de semana é apenas 56,3% do pico verificado em dias úteis. O desvio padrão também apresenta uma variação significativa. Para dias úteis, seu máximo representa 36,6% da média aritmética, enquanto para o fim de semana esse valor cai para 15,2%, mostrando como a carga sofre grandes variações ao longo de um dia útil.

Os valores mínimos medidos foram idênticos para os dois casos, 78,94 A, sempre registrados nas madrugadas. A variação máxima das médias aritméticas entre as fases foi de 2,85% para dias úteis e 3,33% para o fim de semana. Para as médias quadráticas registrou-se variação de 2,97% e 3,30%, nos mesmos períodos. Para P95% e P99% observou-se 3,20% e 3,25% para dias úteis, e 3,05% e 3,35% para o fim de semana. Conclui-se que há uma boa distribuição de carga entre as fases, apesar da corrente na fase c apresentar sempre os mais baixos valores.

5.2.3 POTÊNCIAS

A Figura 5.7 apresenta o gráfico ponto a ponto das potências ativa, reativa e aparente totais no intervalo de uma semana de medição. Nota-se que o gráfico das potências ativa e aparente tem o mesmo perfil do gráfico da corrente. As mesmas considerações para análise da seção anterior serão feitas aqui.

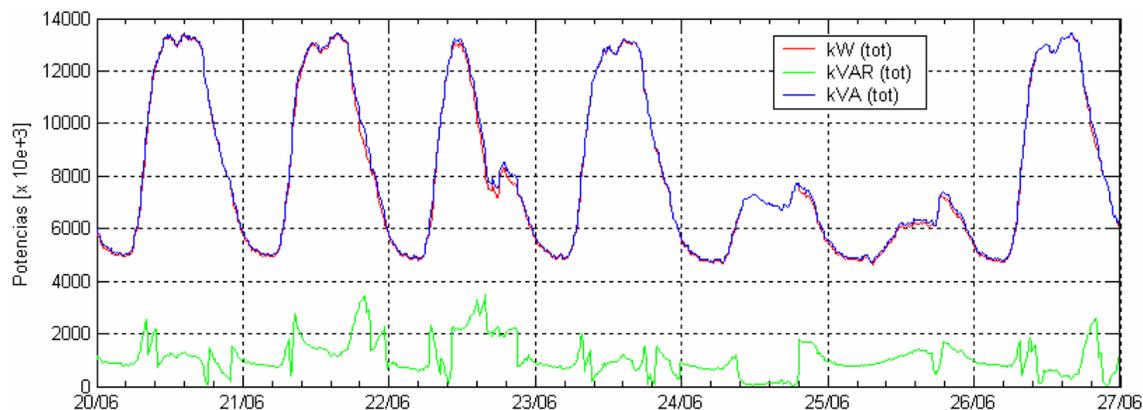


Figura 5.7 – Correntes de linha no intervalo de uma semana de medição

As Tabelas 5.4 e 5.5 mostram os dados estatísticos obtidos para dias úteis, incluindo o dia 27/06 no lugar do dia 22/06, e fim de semana. As Figuras 5.8 e 5.9 ilustram os gráficos de barras com os dados dessas Tabelas.

Tabela 5.4 – Dados estatísticos das potências medidas nos dias úteis

Potências	P (kW)	Q (kVAr)	S (kVA)
Máximo	13445	3472	13487
Mínimo	4643	36	4712
Média Aritmética	8531	996	8610
Média Quadrática	9103	1135	9173
Desvio Padrão	3177	544	3166
P95%	13214	2083	13252
P99%	13349	2847	13410

Tabela 5.5 – Dados estatísticos das potências medidas no fim de semana

Potências	P (kW)	Q (kVAr)	S (kVA)
Máximo	7714	1778	7718
Mínimo	4643	32	4712
Média Aritmética	5957	853	6036
Média Quadrática	6028	973	6106
Desvio Padrão	918	468	923
P95%	7308	1660	7428
P99%	7481	1714	7674

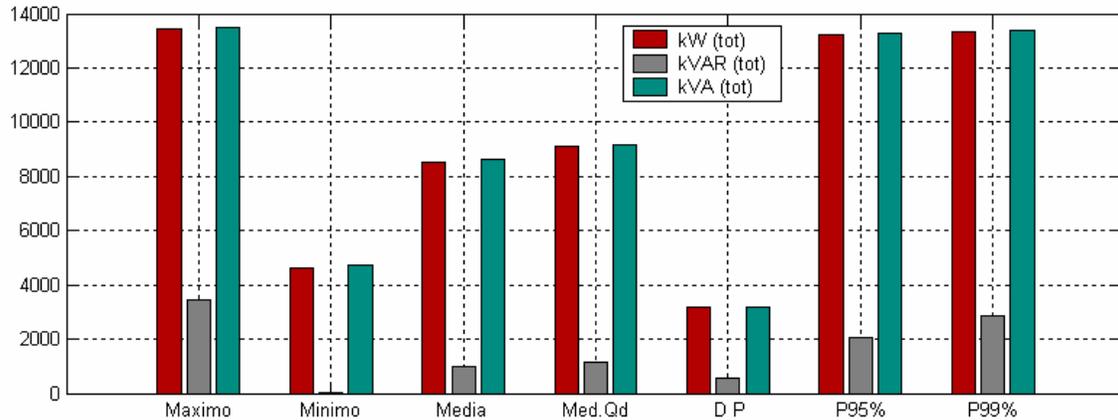


Figura 5.8 – Gráfico de barras com os dados da Tabela 5.4

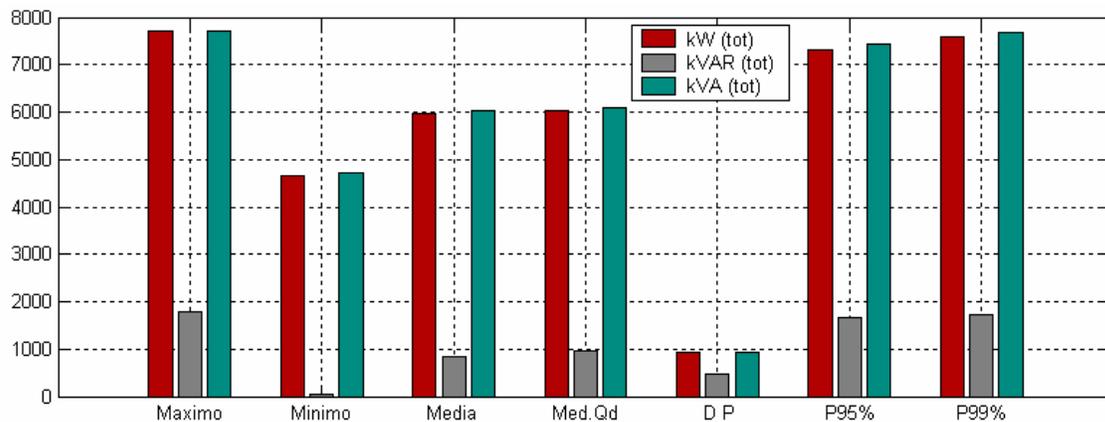


Figura 5.9 – Gráfico de barras com os dados da Tabela 5.5

Como ocorre com a corrente, verifica-se uma diferença significativa entre os valores máximos de potência. O máximo de potência aparente no fim de semana é apenas 57,22% do pico verificado em dias úteis. O desvio padrão também apresenta uma variação significativa para esta grandeza. Nos dias úteis, seu máximo representa 36,8% da média aritmética, enquanto no fim de semana esse valor cai para 12%. Os valores mínimos medidos foram idênticos para os dois casos, 4712 kVA, registrados nas madrugadas.

Através dos dados obtidos pode-se estimar o fator de potência na entrada da subestação. Utilizando-se a média aritmética das potências ativa e aparente chega-se a um fator de potência de 0,9908 em dias úteis e 0,9869 no fim de semana. Tendo a média quadrática como base esses valores são 0,9924 e 0,9872. Conclui-se que o fator de potência da instalação mostrou-se adequado, bem próximo da unidade.



5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através das análises realizadas neste capítulo verificou-se que a subestação SE02 apresentou-se com tensão dentro da faixa adequada em todo o período de medição, sem grandes variações entre os valores medidos para cada fase. Na análise de carga, observou-se a grande diferença entre a carga medida nos dias úteis e no fim de semana, verificando-se também que esta se mostrou bem distribuída nas três fases. O capítulo seguinte trará uma análise do módulo de frequência de aquisição dos dados, para o mesmo local aqui analisado.



CAPÍTULO 6

ANÁLISE DA FREQUÊNCIA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

O presente capítulo apresentará o módulo de análise da frequência de aquisição de dados. Esta ferramenta permite, com o auxílio das ferramentas estatísticas de análise, uma comparação entre diferentes intervalos de aquisição de dados, a saber: de um em um, de cinco em cinco, de 10 em 10, de 15 em 15, de 30 em 30 e de 60 em 60 minutos, concluindo-se a respeito da descaracterização ou não dos dados, sobretudo, quantificando-se os erros cometidos quanto às diferentes amostragens.

6.1 ESTRUTURA DO MÓDULO

Esta etapa de análise pode ser acessada pelo botão “Frequência de Aquisição de Dados”, na tela do módulo de entrada, ou a partir do menu superior “Análises”. Abrir-se-á a janela mostrada pela Figura 6.1. Acima à esquerda ficam disponíveis as grandezas para análises: valores de distorções harmônicas totais (DHT_V) e individuais (DHI_V) de tensão. Basta selecionar uma delas e proceder clicando no botão OK abaixo das mesmas.

Após a seleção da grandeza para análise, os dados estatísticos são calculados automaticamente pelo software, para cada intervalo de frequência de aquisição, e mostrados em uma Tabela. Estão disponíveis valores máximo e mínimo, média, média quadrática, desvio padrão, P95% e P99%.

Ficam habilitadas também as análises gráficas, em dois botões abaixo da Tabela, onde há opção de gráfico ponto a ponto das amostras e gráfico de barras dos valores estatísticos. Ao se clicar sobre o primeiro, seleciona-se o dia desejado, sendo que todos os dias do banco podem ser visualizados através da barra de rolagem acima do gráfico. Há também opção de escolha de todo o banco.

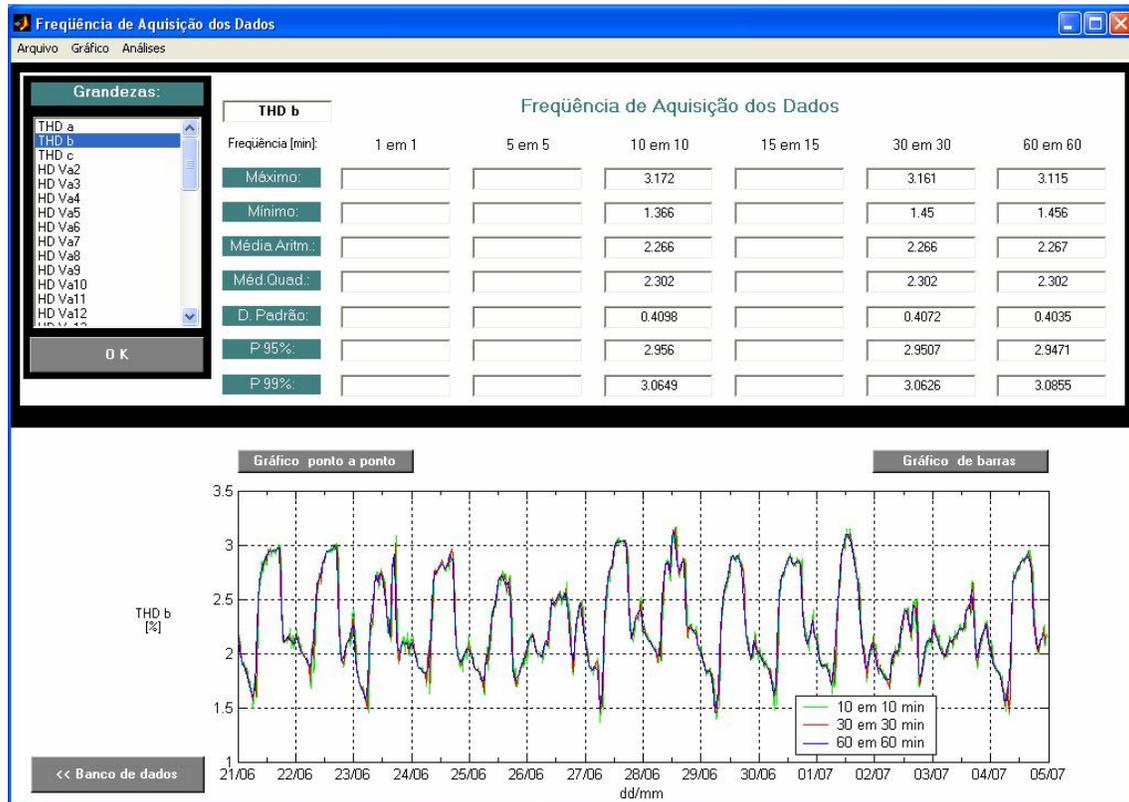


Figura 6.1 – Janela do módulo de análise da frequência de aquisição de dados

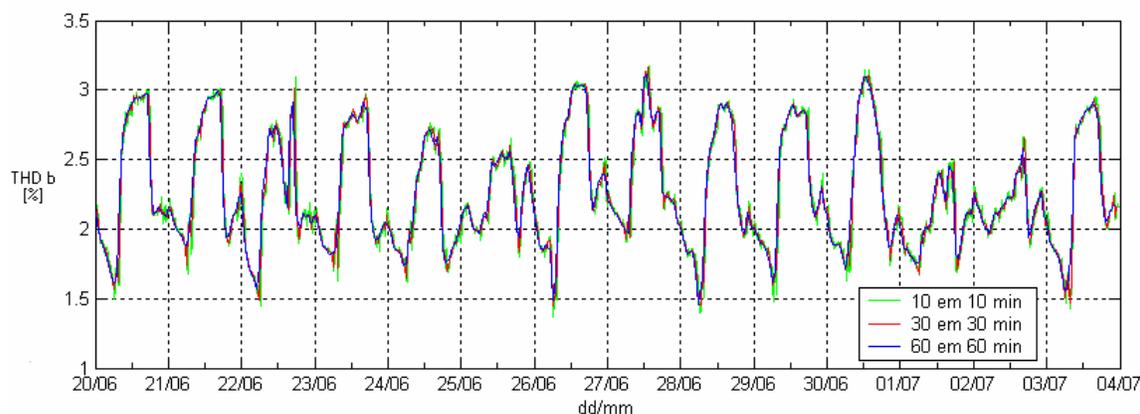
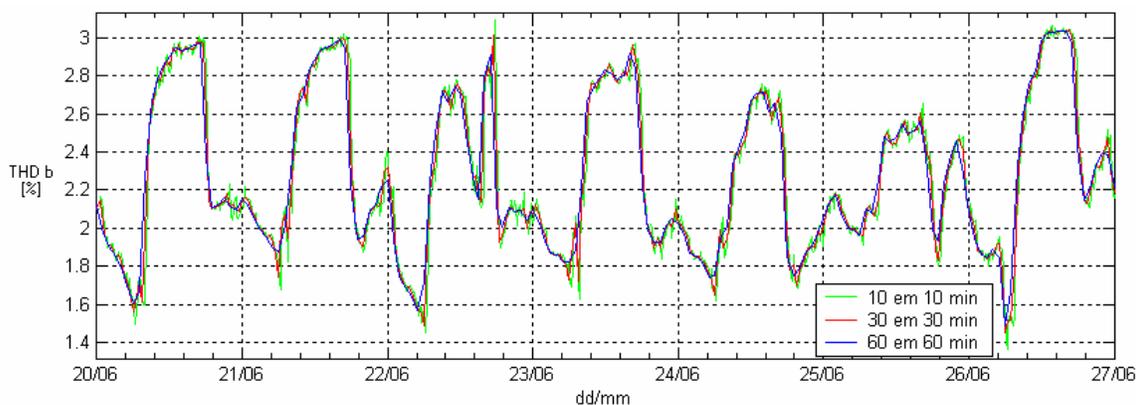
6.2 ESTUDO DE CASO

Tendo em vista a avaliação da aplicabilidade deste módulo, será feita uma análise gráfica e estatística das amostras de distorções harmônicas totais de tensão (DHT_V), para diferentes intervalos de aquisição. O banco de dados utilizado é o da subestação SE02 da CEB, medido durante 14 dias, de 20 de junho de 2006 a 3 de julho de 2006, e com amostras adquiridas a cada 10 minutos. Para este banco, comparar-se-ão estas amostras com as tomadas de 30 em 30 e 60 em 60 minutos.

Para efeito de análise, é conveniente utilizar a fase onde o nível de distorção é mais elevado. Em uma análise preliminar, verifica-se que o máximo valor da DHT_{Vb} é superior ao das outras fases. A Figura 6.2 traz o comportamento desta fase durante todo o período de medição, para os diferentes intervalos de aquisição de dados. A Figura 6.3 ilustra o mesmo gráfico ampliado para a primeira semana de medição. No próximo capítulo será feita uma análise mais precisa para verificar se, de fato, a DHT_{Vb} pode ser utilizada em representação às demais.

Tabela 6.1 – Dados de DHT_V para as três fases do sistema

Distorção	DHT_{Va} (%)	DHT_{Vb} (%)	DHT_{Vc} (%)
Máximo	3,040	3,172	3,025
Mínimo	1,339	1,366	1,205
Média Aritmética	2,203	2,266	2,123
Média Quadrática	2,230	2,302	2,159
Desvio Padrão	0,346	0,410	0,393
P95%	2,772	2,956	2,795
P99%	2,863	3,065	2,869

Figura 6.2 – DHT_V na fase b para três intervalos de aquisiçãoFigura 6.3 – DHT_V na fase b para a primeira semana de medição

Pode-se observar da Figura 6.3 que as curvas para as frequências de aquisição de 30 e 60 minutos assemelham-se entre si, detectando-se alguns pequenos desvios quando da comparação das mesmas com as amostras colhidas de 10 em 10 minutos. Porém, os perfis são bastante próximos. Desta análise gráfica infere-se que para a reprodução do perfil das DHT_V



pode ser utilizada qualquer uma das taxas de aquisição apresentadas. A Tabela 6.2 apresenta, para cada frequência de aquisição, os valores estatísticos referentes às DHT_V de todo o período medido. A Figura 6.4 dispõe esses dados num gráfico de barras.

Tabela 6.2 – Dados estatísticos das DHT_V para cada frequência de aquisição

Frequência de Aquisição	10 minutos DHT_V (%)	30 minutos DHT_V (%)	60 minutos DHT_V (%)
Máximo	3,172	3,161	3,115
Mínimo	1,366	1,450	1,456
Média Aritmética	2,266	2,266	2,267
Média Quadrática	2,302	2,302	2,302
Desvio Padrão	0,410	0,407	0,404
P95%	2,956	2,951	2,947
P99%	3,065	3,063	3,086

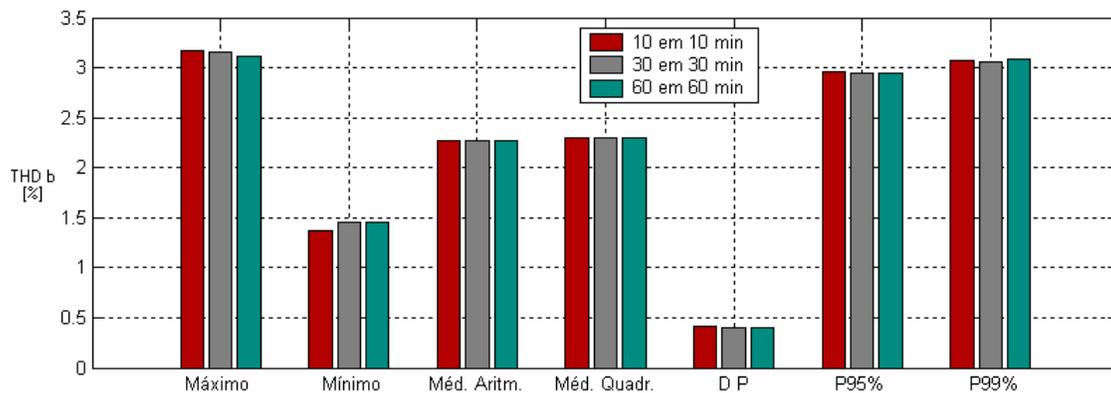


Figura 6.4 – Gráfico de barras com os dados da Tabela 6.2

Fica claro, ao se analisarem os dados da Tabela 6.2 e o gráfico da Figura 6.4, que há uma grande semelhança entre as estatísticas calculadas para as três frequências de aquisição. A maior diferença notada é entre os valores de máximo e mínimo, que não representam o comportamento geral das amostras em todo o período de medição. Os valores encontrados para média aritmética foram praticamente idênticos nos três intervalos de aquisição, tendo entre eles a variação máxima de 0,04%. A média quadrática foi exatamente a mesma nas frequências analisadas.

Para os valores de desvio padrão observou-se uma variação pequena, de 1,49%, entre as frequências de aquisição de 10 e 60 minutos. Analisando-se os valores de P95% e P99% fica



evidente mais uma vez a semelhança entre os dados: variações máximas de 0,31% e 0,69%, respectivamente. Conclui-se da análise da frequência de aquisição que, para a reprodução do perfil e dos valores estatísticos das DHT_v , as medições podem ser feitas com qualquer um dos intervalos de aquisição apresentados.

6.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo descreveu o módulo de análise da frequência de aquisição de dados, realizando um estudo com dados da subestação SE02 da CEB. Constatou-se que qualquer um dos intervalos de medição pode ser utilizado, sem prejuízo para a caracterização do banco de dados. No capítulo seguinte será descrito o módulo de análise da similaridade entre fases, para o mesmo banco de dados.



CAPÍTULO 7

ANÁLISE DA SIMILARIDADE ENTRE FASES

As principais normas / recomendações internacionais determinam que as DHT_V de todas as fases de tensão devem ser monitoradas. Busca-se aqui, a partir da aplicação de métodos de análise, comprovar a existência ou não de similaridade entre as distorções harmônicas das três fases de tensão, no decorrer de todo o grupo de dias. Deseja-se verificar a possibilidade de se adotar uma fase como representativa às demais. Como consequência ter-se-á uma redução do volume de dados a serem processados.

7.1 ESTRUTURA DO MÓDULO

A Figura 7.1 mostra o aplicativo para análise de similaridade entre fases.

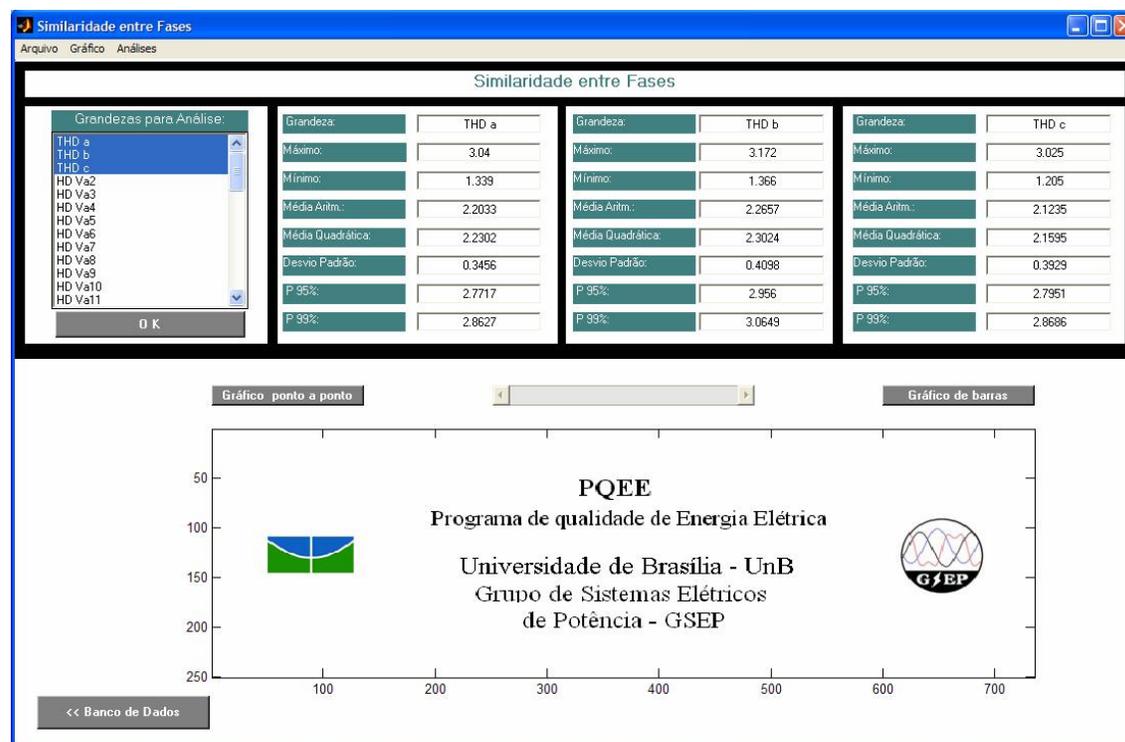


Figura 7.1 – Módulo de Análise de Similaridade entre Fases



A análise da similaridade entre fases pode ser iniciada por meio do botão “Similaridade entre Fases” ou pelo menu “Análises”, ambos localizados na tela de entrada. A avaliação se inicia com a seleção das três fases da grandeza a ser examinada. O aplicativo permite que o usuário escolha exatamente três variáveis disponíveis na janela “Grandezas para Análise”. A seguir, após clicar-se no botão OK, há a opção de escolha da frequência de aquisição na janela “Frequência de Aquisição”, mostrada na Figura 7.2. Para conclusão a respeito da similaridade entre as fases disponibilizam-se dados estatísticos em uma Tabela, além das opções de análises gráficas ponto a ponto e de barras, localizadas em dois botões abaixo da Tabela.



Figura 7.2 – Escolha da frequência de aquisição dos dados

7.2 ESTUDO DE CASO

A fim de se examinar a similaridade ou não entre fases, analisar-se-á as amostras medidas por três diferentes métodos: comparação gráfica, estudo dos valores médios e desvios padrão e o P95%. São considerados nesse estudo os dados coletados com uma frequência de aquisição de 10 minutos, durante 14 dias, constituindo 2 semanas: de 20/06/06 a 03/07/06.

7.2.1 COMPARAÇÃO GRÁFICA ENTRE AS FASES DA SE 02

A Figura 7.3 exibe o comportamento das DHT_V medidas nas três fases, no decorrer do período completo de monitoração. Diante dela, observa-se que a maior parte dos valores de DHT_V encontram-se abaixo de 3%. Verifica-se que para quase todo o período de medição as distorções harmônicas de tensão das três fases ilustram valores próximos entre si. As distorções das fases a e c se sobrepõem na maior parte dos pontos. A fase b, no entanto, apresenta um perfil de DHT_V um pouco mais elevado no decurso de todo o intervalo de



medição, de modo que em nenhum momento os valores de DHT_{V_b} são superados pelos valores de DHT_{V_a} e DHT_{V_c} , apesar de serem próximos.

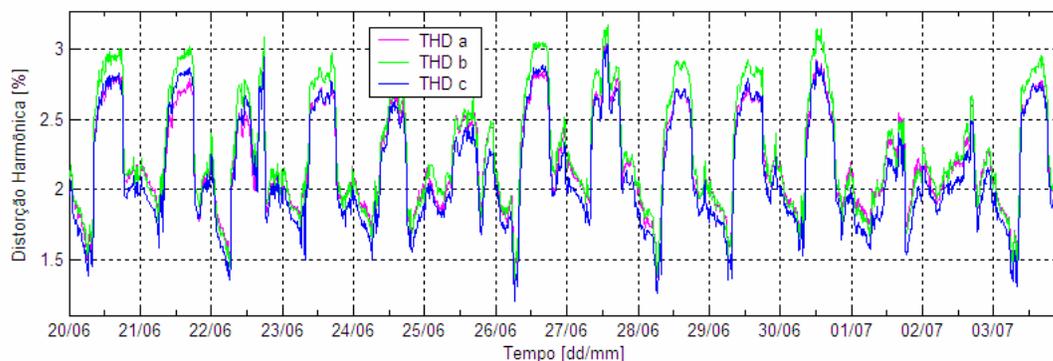


Figura 7.3 – DHT_V ponto a ponto para cada fase

7.2.2 ANÁLISE DOS VALORES MÉDIOS E DESVIOS PADRÃO ENTRE AS FASES DA SE 02

A Tabela 7.1 apresenta os valores estatísticos referentes às distorções harmônicas de tensão para as três fases. A Figura 7.4 dispõe esses dados num gráfico de barras.

Tabela 7.1 – Dados estatísticos das DHT_V

Grandeza:	DHT_{V_a}	DHT_{V_b}	DHT_{V_c}
Máximo	3,04	3,172	3,025
Mínimo	1,339	1,366	1,205
Média Aritmética	2,2033	2,2657	2,1235
Média Quadrática	2,2302	2,3024	2,1595
Desvio Padrão	0,3456	0,4098	0,3929
P 95%	2,7717	2,956	2,7951
P 99%	2,8627	3,0649	2,8686

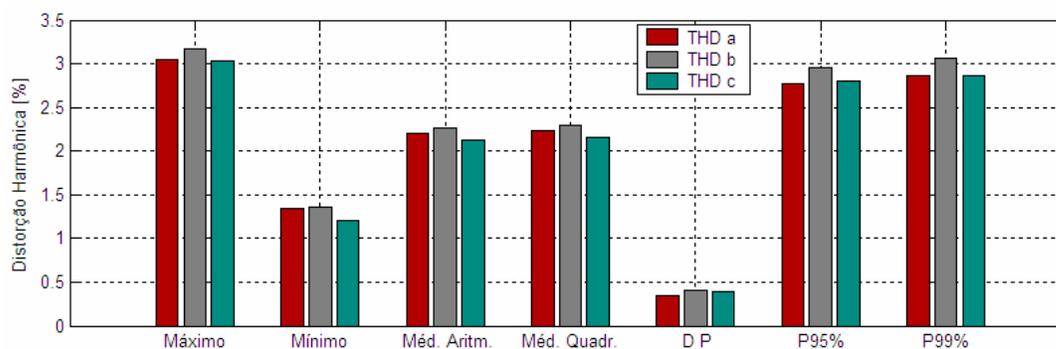


Figura 7.4 – Gráfico de barras com os dados da Tabela 7.1



Observa-se, a partir da Tabela 7.1 e da Figura 7.4, que a variação máxima da média aritmética entre as fases é 6,2%, detectada quando da avaliação das fases b e c. Logo, pode-se concluir, a partir da análise das médias das DHT_V , que há semelhança entre as fases.

Ainda da Tabela 7.1, verifica-se a existência de um desvio padrão máximo na fase b com o valor de 0,4098%, representando 18,08% do seu respectivo valor médio. Entende-se, portanto, que há uma variação significativa das amostras em questão em relação à média aritmética. Isto não exclui a semelhança do comportamento entre as três fases, já que as mesmas denotam valores próximos entre si de desvio padrão e média aritmética, o que pode ser visualizado com a Figura 7.4.

Tem-se também da Tabela 7.1 que a P95% de cada fase apresenta valores próximos de 2,8% e a sua variação máxima entre as três fases é da ordem de 6%. Desta forma, destaca-se a semelhança dos valores de P95% entre as três fases de todos os dias em estudo. Outro ponto que merece ressalva concentra-se no fato dos valores de P95% estarem distantes das médias aritméticas e quadráticas e mais próximos do valor máximo apresentado.

7.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da análise executada e com o auxílio da Figura 7.4, pode-se concluir que, mesmo com os valores elevados de desvios padrão, tem-se um comportamento semelhante entre as três fases. Durante quase todo o horário de medição, as DHT_V das fases a e c apresentam valores próximos entre si, e na maioria dos pontos elas se sobrepõem. Nota-se a partir da Figura 7.3, que apesar do gráfico ponto a ponto da DHT_{Vb} ser similar ao das DHT_{Va} e DHT_{Vc} , em nenhum momento os valores da primeira são superados pelas outras. Empregar-se-á, portanto, a fase b para as demais análises deste estudo. O próximo capítulo trará uma análise da similaridade entre dias e períodos de um dia, valendo-se dos módulos correspondentes do aplicativo.



CAPÍTULO 8

ANÁLISE DA SIMILARIDADE ENTRE DIAS E ENTRE PERÍODOS DO DIA

As principais normas e recomendações, nacionais ou internacionais, adotam um intervalo de medição semanal como período total de monitoramento. Tenciona-se nesta etapa constatar se um intervalo menor de mensuração é suficiente para a tomada de conclusões acertadas. Busca-se ainda comprovar a existência ou não da similaridade entre os períodos de um único dia. Este estudo se presta, portanto, para determinação do período mínimo de medições, com o intuito de se possibilitar rapidez e segurança no processamento dos dados.

8.1 MÓDULO DE ANÁLISE DE SIMILARIDADE ENTRE DIAS

A análise da similaridade entre dias pode ser iniciada por meio do botão “Similaridade entre Dias” ou pelo menu “Análises” ambos localizados na tela de entrada. A Figura 8.1 apresenta a estrutura e disposição do módulo em estudo.

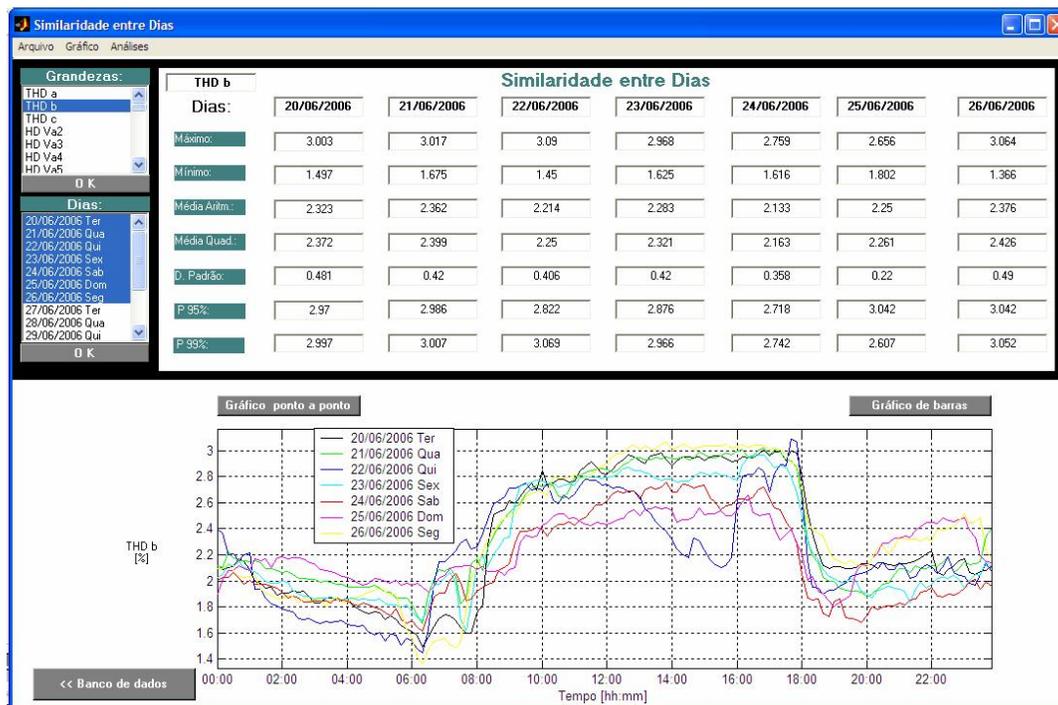


Figura 8.1 – Módulo de Análise da Similaridade entre Dias



Conforme a Figura 8.1, na janela “Grandezas” seleciona-se uma única variável, confirmando-a no botão “OK”. Segue-se escolhendo sete dias a serem utilizados para análise. Em seguida, a janela “Frequência de Aquisição” aparecerá, e uma das opções deverá ser escolhida para que se inicie a execução dos processos de cálculo das estatísticas.

8.2 MÓDULO DE ANÁLISE DE SIMILARIDADE ENTRE PERÍODOS

Este módulo permite o tratamento estatístico das amostras de distorção dentro de diferentes períodos de 8 horas de um mesmo dia. Durante a sua execução, o usuário pode efetuar análises dos intervalos de 00:00 às 08:00 horas, de 08:00 às 16:00 horas e das 16:00 às 24:00 horas de um mesmo dia. Há também a opção de se fornecer um intervalo distinto dos já disponíveis. Este deverá ser informado conforme formatação padrão (10 às 18) na Figura 8.2, ou seja, inserem-se somente valores inteiros de 0 a 24.



Figura 8.2 – Módulo de Análise da Similaridade entre Períodos

Seguindo a execução seleciona-se uma opção das contidas na janela “Grandezas”, confirmando-a no botão “OK”. Sucessivamente, na janela “Dias”, escolhe-se o dia a ser analisado, pressionando o respectivo botão “OK”. Imediatamente após, na janela “Frequência



de Aquisição”, escolhe-se uma opção para que se realize o cálculo dos índices estatísticos. São gerados gráficos ao se clicar nos botões “gráfico ponto a ponto” e “gráfico de barras”, que permitem uma comparação mais precisa do perfil da distorção em cada faixa de intervalo.

8.3 ESTUDO DE CASO

O propósito agora é caracterizar a similaridade entre dias da Subestação SE02 da CEB. Para constatar a similaridade ou não entre os dias, recorre-se a dois métodos: análise gráfica da similaridade entre os dias e discussão das médias, dos desvios padrão e da análise de P95%. Ao todo, são considerados nesta análise, 14 dias, constituindo 2 semanas: de 20/06/06 a 26/06/06 e de 27/06/06 a 03/07/06.

8.3.1 COMPARAÇÃO GRÁFICA ENTRE OS DIAS DA SUBESTAÇÃO SE 02

A Figura 8.3 apresenta o comportamento da Distorção Harmônica Total de Tensão da fase b (DHT_{V_b}) durante a primeira semana de medição.

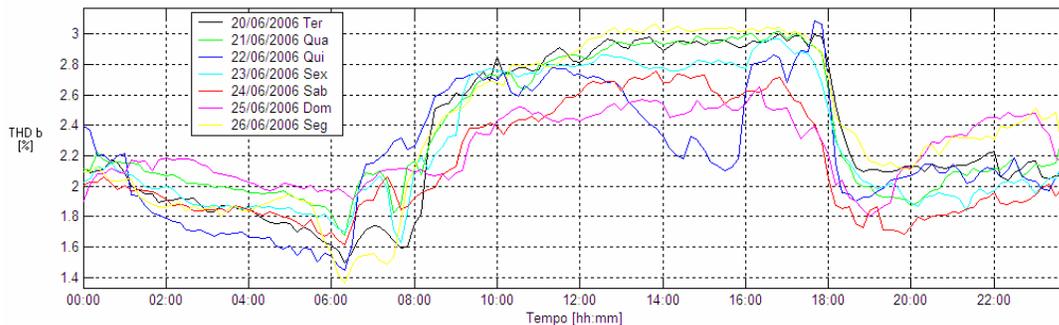


Figura 8.3 – Comportamento das DHT_{V_b} durante a primeira semana

A partir da Figura 8.3 pode-se observar que os valores da DHT_{V_b} estão, na maior parte do tempo, compreendidos entre 1,6% e 3%. Detecta-se uma semelhança significativa quando da análise dos dias úteis em relação ao fim de semana no período em estudo.

Nota-se, ainda, que as DHT_{V_b} possuem um padrão semelhante de desempenho para os sete dias em estudo, com exceção ao dia 22/06. Neste dia houve a terceira partida da seleção Brasileira de futebol na Copa do Mundo, às 16:00 horas, o que explica a ocorrência do notável desvio de comportamento desta curva. Repara-se que neste dia a DHT_{V_b} sofre uma apreciável diminuição a partir das 13:00 horas devido ao término antecipado do expediente de grande parte dos trabalhadores. Às 16:00 horas, quando começa o jogo, ocorre um acentuado aumento da DHT_{V_b} sem, no entanto, ultrapassar os valores de outros dias típicos dado que a



grande quantidade de televisores ligados foi compensada pelo desligamento de equipamentos, como computadores, utilizados no horário de serviço. A Figura 8.4 apresenta o comportamento da DHT_{vb} durante a segunda semana de medição.

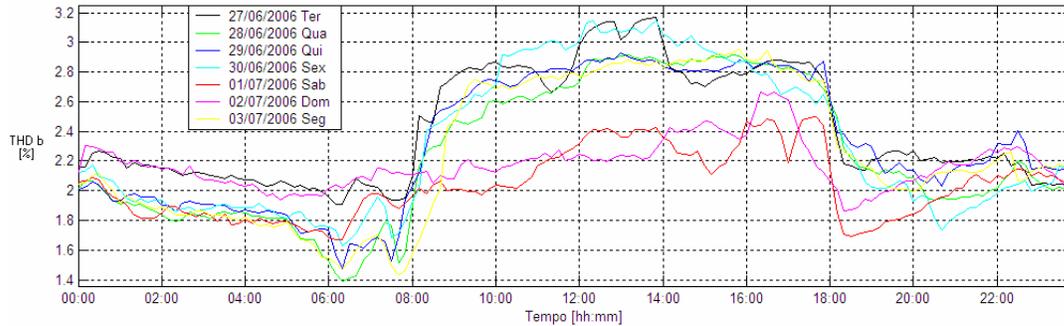


Figura 8.4 – Comportamento das DHT_{vb} durante a segunda semana

Nota-se a partir da Figura 8.4 que, assim como ocorreu na primeira semana, os valores da DHT_{vb} estão, na maior parte do tempo, compreendidos entre 1,6% e 3%. Percebe-se neste período uma semelhança menor entre o comportamento das curvas dos dias de fim de semana com a dos dias úteis. Os maiores valores de DHT_{vb} , da ordem de 3,1%, ocorreram nos dias 27/06 e 30/06.

8.3.2 ANÁLISE DOS VALORES MÉDIOS, DESVIOS PADRÃO E P95% ENTRE OS DIAS NA SE 02

A Tabela 8.1 apresenta o valor máximo, a média quadrática e aritmética, o desvio padrão e os valores equivalentes com probabilidade de 95% e 99% de não serem excedidos, para a primeira semana de medição. A Figura 8.5 dispõe estes valores em um gráfico de barras.

Tabela 8.1 - Dados estatísticos dos sete dias em estudo

Similaridade entre dias							
Dias:	20/06/2006	21/06/2006	22/06/2006	23/06/2006	24/06/2006	25/06/2006	26/06/2006
Máximo	3,003	3,017	3,09	2,968	2,759	2,656	3,064
Mínimo	1,497	1,675	1,45	1,625	1,616	1,802	1,366
Méd.arit.	2,323	2,362	2,214	2,283	2,133	2,25	2,376
Méd.quad.	2,372	2,399	2,25	2,321	2,163	2,261	2,426
D. Padrão	0,481	0,42	0,406	0,42	0,358	0,22	0,49
P 95%	2,97	2,986	2,822	2,876	2,718	3,042	3,042
P 99%	2,997	3,007	3,069	2,966	2,742	2,607	3,052

Observa-se da Tabela 8.1 e da Figura 8.5 que a variação máxima entre as médias aritméticas está entre os dias 26 (2,376%) e 06 de junho (2,133%). Esta diferença representa um desvio de 10,22% em relação ao primeiro valor citado. No que diz respeito ao desvio padrão tem-se 0,481% para o dia 20 de junho como o maior valor encontrado entre os sete dias em análise (o



que representa 20,7% da média aritmética apresentada nesta data). Logo, constata-se mais uma vez a existência de similaridade entre os dias em estudo.

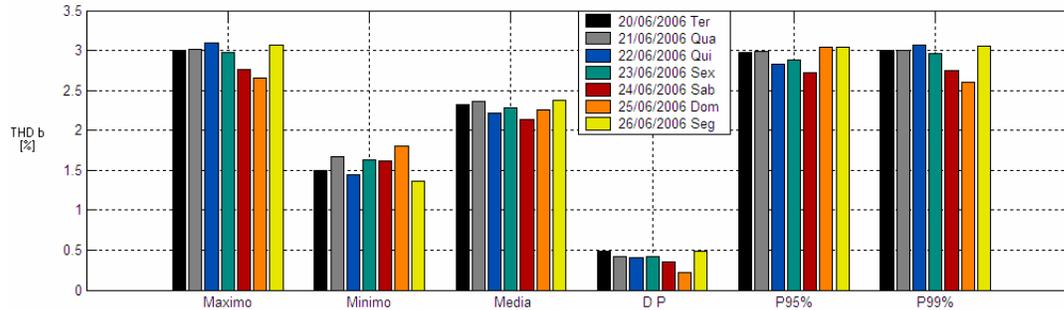


Figura 8.5 – Gráfico de barras com as estatísticas para análise de similaridade entre dias

Da análise dos valores de P95% verifica-se uma discrepância máxima de 10,65% quando da consideração dos dias 24 e 25 de junho. Imediatamente e mais uma vez, comprova-se a existência de similaridade entre dias.

É relevante realizar comparações entre os dias correspondentes das duas semanas, ou seja, comparar os valores estatísticos da segunda-feira da primeira semana com os da segunda-feira da segunda semana e assim por diante. A Tabela 8.2 mostra a discrepância (%) entre os referidos dias em relação aos valores da primeira semana.

Tabela 8.2 – Discrepância entre dias correspondentes das duas semanas

Similaridade entre dias							
Dias:	Segundas	Terças	Quartas	Quintas	Sextas	Sábados	Domingos
Máximo	7,26	2,54	7,23	6,87	5,70	0,22	2,28
Mínimo	29,27	18,49	0,55	0,12	4,50	0,54	27,61
Méd.arit.	5,41	4,44	5,36	1,58	2,63	2,98	2,64
Méd.quad.	4,70	3,91	5,34	1,87	3,21	3,32	5,76
D. Padrão	19,85	19,50	6,00	14,66	33,33	36,77	4,75
P 95%	7,51	1,39	1,50	5,35	6,41	2,75	2,75
P 99%	8,03	2,33	7,38	6,69	6,26	1,79	2,18

A partir da Tabela 8.2 nota-se que, para o período em estudo, os máximos, as médias aritméticas, as médias quadráticas, os P95% e os P99% das DHT_{vb} dos correspondentes dias são semelhantes entre si, sendo o máximo desvio obtido igual a 8%. A comparação dos mínimos e dos desvios padrão, no entanto, revelam grandes discrepâncias, sendo que o desvio máximo foi de 36,77%. Constata-se mais uma vez uma similaridade entre os dias, uma vez que as estatísticas mais representativas no que tange à obtenção de um valor de referência para as DHT_V são os valores máximos e os P95%.



8.3.3 SIMILARIDADE ENTRE PERÍODOS DE UM DIA

Com o intuito de se identificar um intervalo mínimo de medição no qual se possa obter um valor representativo aos dados em análise, tem-se a Figura 8.6 que apresenta o comportamento da $DHTv_b$ durante o dia 20 de junho de 2006 (terça-feira), um dia típico.

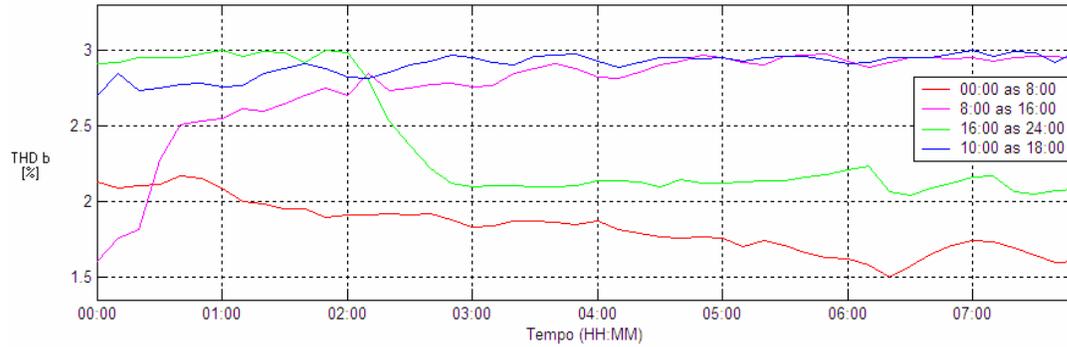


Figura 8.6 – $DHTv_b$ ponto a ponto para o dia 20 de junho de 2006

Nota-se da Figura 8.6 que o nível de $DHTv_b$ permanece mais elevado no período de 10:00 às 18:00 horas. Nesse período as $DHTv_b$ mantêm-se em torno de 2,8% enquanto no restante do dia os valores concentram-se por volta de 2%, sendo que no intervalo de 01:00 às 08:00 horas ocorrem os menores valores, na faixa de 1,5 a 2%.

A Tabela 8.3 e a Figura 8.7 apresentam os valores estatísticos e o respectivo gráfico de barras para os períodos em estudo.

Tabela 8.3 – Similaridade entre períodos

Similaridade entre períodos				
Período	00:00 às 08:00	8:00 às 16:00	16:00 às 24:00	10:00 às 18:00
Máximo	2,17	2,98	3,003	3,003
Mínimo	1,497	1,601	2,042	2,699
Méd.arit.	1,827	2,755	2,377	2,904
Méd.quad.	1,835	2,772	2,407	2,905
D. Padrão	0,171	0,309	0,381	0,0768
P 95%	2,126	2,967	2,989	2,989
P 99%	2,17	2,98	3,003	3,003

Da Tabela 8.3 e da Figura 8.7 nota-se que os períodos com a maior e a menor média de $DHTv_b$ são de 10:00 às 18:00 horas e de 00:00 às 08:00 horas, respectivamente. A média salta de 1,827% (período de 00:00 às 08:00 horas) para aproximadamente 2,755% (período de 08:00 às 16:00 horas). A variação entre as médias quadráticas também é da mesma ordem, o que pode ser visto na Figura 8.7. Tem-se que, para os períodos de 00:00 às 08:00, 08:00 às 16:00, 16:00 às 00:00 e 10:00 às 18:00 horas o desvio padrão é 0,171%, 0,309%, 0,381% e



0,0768% respectivamente, representando 9,35%, 11,21%, 16,02% e 2,64% em relação à média aritmética.

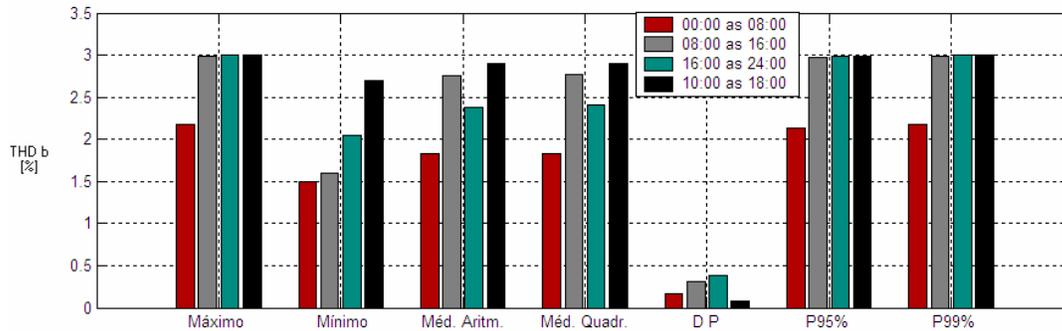


Figura 8.7 – Gráfico de barras

Percebe-se que não há um padrão de comportamento entre os valores apresentados neste tópico e que as amostras de distorção no período de 09:00 às 18:00 horas atingem os maiores valores.

8.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Buscou-se neste capítulo observar a similaridade entre os dias em estudo com vistas a constatar se o intervalo semanal, recomendado pela maior parte das normas, é, de fato, o mais adequado. A partir dos resultados obtidos das análises gráficas e dos valores estatísticos comprovou-se a similaridade entre os dias, o que possibilita a utilização de apenas um dia de medição. Investigou-se, ainda, a similaridade entre períodos de um dia de modo que, apesar de haver disparidade entre os valores de $DHTv_b$ nos diferentes intervalos, verificou-se que os valores máximos ocorrem no período de 09:00 às 18:00 horas. Assim, para o local em estudo, o período mais recomendado para análises onde se determinam os indicadores para a comparação com os limites estabelecidos nas normas é de 09:00 às 18:00 horas de um único dia útil. O capítulo seguinte apresenta o módulo de análise de distribuição no tempo, verificando o comportamento das amostras para o banco de dados da subestação SE02.



CAPÍTULO 9

ANÁLISE DE DISTRIBUIÇÃO NO TEMPO

Este estudo propõe uma metodologia para análise da distribuição no tempo das amostras com valores superiores a média quadrática e aos indicadores com probabilidade de 95% e 99% de não serem excedidos, respectivamente P95% e P99%. Fazendo-se uso de tais resultados, será possível aos fabricantes e interessados, a partir dos limites de suportabilidade de cada equipamento frente às distorções harmônicas de tensão, determinar se o seu equipamento suporta ou não os níveis detectados, em função do tempo de exposição.

Da metodologia, pode-se ainda avaliar quão representativos são os índices de média, P95% e P99% não serem excedidos, quando das suas utilizações em representação aos demais valores medidos. Esses patamares caracterizam-se como os indicadores comumente presentes nas recomendações / normas mundialmente conhecidas. Logo, considerando-se os resultados deste trabalho, tem-se a possibilidade de se reconhecer a eficácia ou não dos indicadores praticados pelos supra mencionados documentos, frente aos dados oriundos de medições de interesse do usuário. A seguir, será apresentado o módulo de análise de distribuição no tempo.

9.1 MÓDULO DE ANÁLISE DE DISTRIBUIÇÃO NO TEMPO

Este módulo, ilustrado na Figura 9.1, pode ser iniciado pelo botão “Análise de Distribuição no Tempo” ou pelo menu “Análises” ambos localizados na tela de entrada. Inicia-se a execução selecionando uma grandeza para análise.

Depois de confirmada a escolha da grandeza, deve-se proceder a especificação de um valor limite (VL) para se investigar o ambiente em estudo com relação aos limites impostos pelas principais Normas e Recomendações, limites de suportabilidade de equipamentos elétricos do local em estudo, níveis de distorção em função do seu tempo de exposição, etc.

Nota-se da Figura 9.1 que há uma análise numérica que disponibiliza:

- Total da medição em minutos
- Tempo no qual a grandeza fica acima do Valor Limite especificado (VL)
- Máximo intervalo de tempo ininterrupto com um valor acima de VL



- Máximo tempo (em minutos) que depois de surgir um valor superior a VL, um outro valor superior a VL aconteça.

Há também uma análise gráfica que revela:

- Valores acima de VL
- Valores abaixo de VL
- Intervalos de tempo ininterruptos com valor acima de VL
- Probabilidade de ocorrência de intervalos ininterruptos com valor acima de VL
- Intervalos de tempo ininterruptos com valores abaixo de VL
- Probabilidade de ocorrência de intervalos ininterruptos com valores abaixo de VL

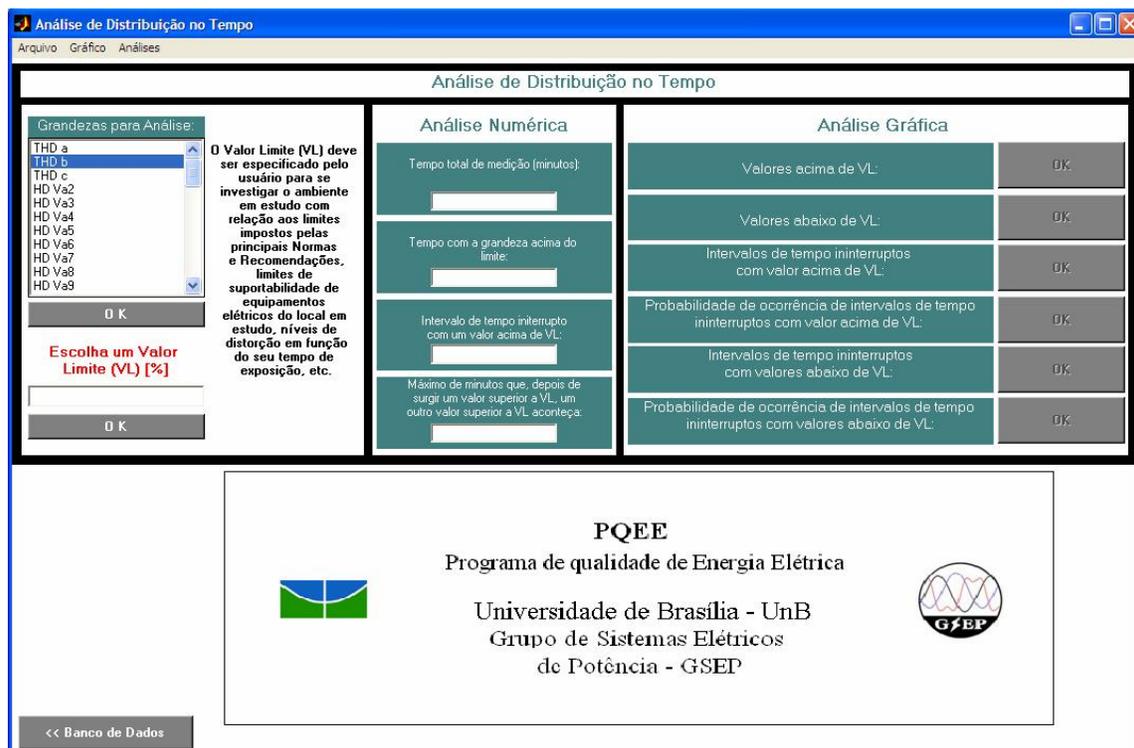


Figura 9.1 – Módulo de Análise de Distribuição no Tempo

9.2 ESTUDO DE CASO

As informações contidas no banco de dados serão processadas, culminando-se, dentre outros, em gráficos de intervalos ininterruptos de tempo com valores acima e abaixo dos valores médios quadráticos, P95% e P99%. Analisar-se-á amostras de Distorsão Harmônica Total de Tensão da fase b provenientes das medições de 14 dias consecutivos.



9.2.1 VALORES ESTATÍSTICOS DE DISTORÇÃO HARMÔNICA TOTAL

A Tabela 9.1 ilustra os resultados estatísticos calculados a partir das amostras coletadas no período citado. Para as análises a seguir, estes indicadores serão empregados como referência para os estudos aqui propostos.

Tabela 9.1 – Valores de distorção medidos

Valores Estatísticos (DHT_V)	Valor Medido
Máximo	3,172
Mínimo	1,366
Média Aritmética	2,266
Média Quadrática	2,302
Desvio Padrão	0,4098
P95%	2,956
P99%	3,0649

9.2.2 ANÁLISE CONSIDERANDO-SE O VALOR DE P95% COMO REFERÊNCIA

O valor de P95% calculado a partir dos dados em estudo foi de 2,956%. A Figura 9.2 apresenta o gráfico de $DHT_{V_b} \geq 2,956\%$ versus tempo total de medição em minutos.

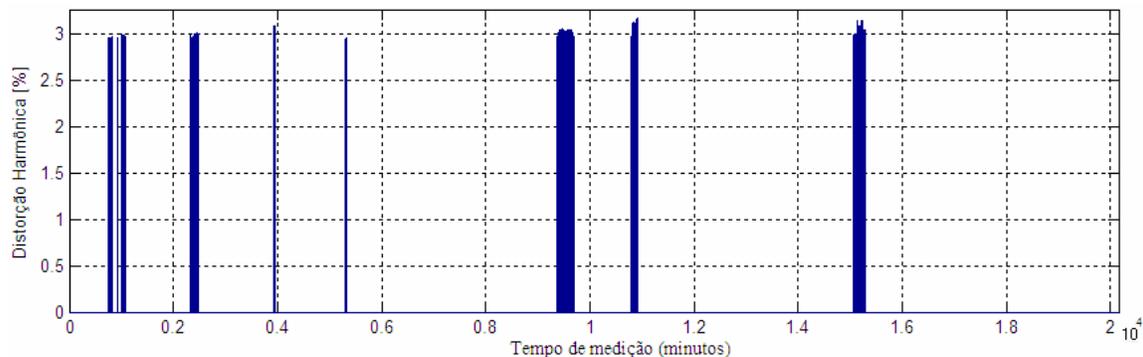


Figura 9.2 – Valores com $DHT_V \geq 2,956\%$ versus tempo total de medição em minutos

Da Figura 9.2 e com a análise numérica disponível no programa, observa-se que, de todo o período de medição em análise, aproximadamente 20160 minutos, cerca de 1010 minutos (5% do tempo total de medição), apresentam $DHT_V \geq 2,956\%$. Nota-se da mesma Figura que os valores de $DHT_V \geq 2,956\%$ concentram-se basicamente em 4 grupos. O primeiro grupo corresponde aproximadamente ao período de 14:30 às 17:00 horas do dia 21 de junho. O segundo grupo ocorre por volta de 11:50 às 17:10 horas do dia 26 de junho. O terceiro grupo localiza em torno das 11:20 até as 13:40 do dia 27 de junho. O quarto grupo, por sua vez, corresponde aproximadamente ao período de 10:40 às 14:30 do dia 30 de junho. A Figura 9.3



apresenta o gráfico com os intervalos ininterruptos de tempo com valores de $DHT_V \leq 2,956\%$.

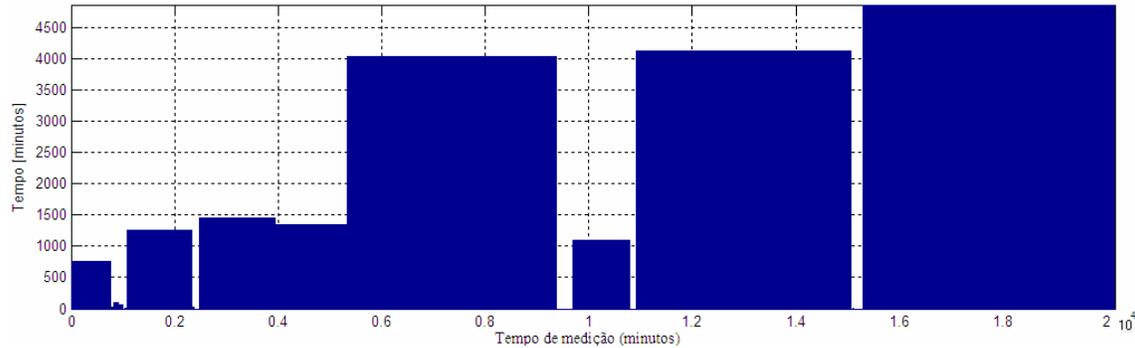


Figura 9.3 – Intervalos ininterruptos de tempo com valores de $DHT_V \leq 2,956\%$

Da Figura 9.3, tem-se que o maior intervalo ininterrupto de tempo com $DHT_V \leq 2,956$ é de aproximadamente 4800 minutos, ou seja, 80 horas, de um total de 20160 minutos de medição. Nota-se da mesma Figura cinco grupos nos quais não se tem $DHT_V \leq 2,956\%$. Destes destacam-se dois intervalos com duração mais acentuada.

A Figura 9.4 apresenta o gráfico com os intervalos ininterruptos de tempo com valores de $DHT_V \geq 2,956\%$.

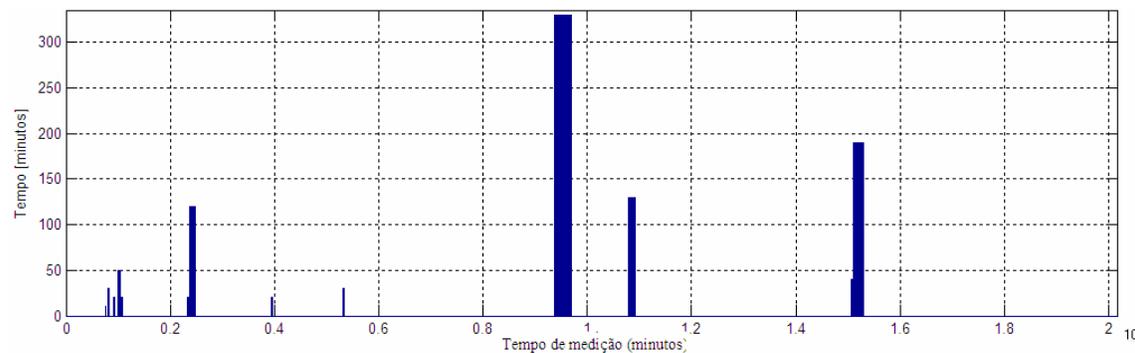


Figura 9.4 – Intervalos ininterruptos de tempo com valores de $DHT_V \geq 2,956\%$

Da Figura 9.4, tem-se que o máximo intervalo ininterrupto de tempo com $DHT_V \geq 2,956\%$ é de aproximadamente 330 minutos (5,5 horas) de um total de 20160 minutos de medição. A Figura 9.5 ilustra o gráfico com as probabilidades de ocorrência dos intervalos ininterruptos de tempo com $DHT_V \geq 2,956\%$.

A partir da Figura 9.5 obtêm-se que cerca de 53% dos intervalos ininterruptos de tempo com $DHT_V \geq 2,956\%$, possuem até 30 minutos de duração. Ressalta-se a existência de intervalos ininterruptos de tempo com $DHT_V \geq 2,956\%$ com 120, 130 e 330 minutos de duração.

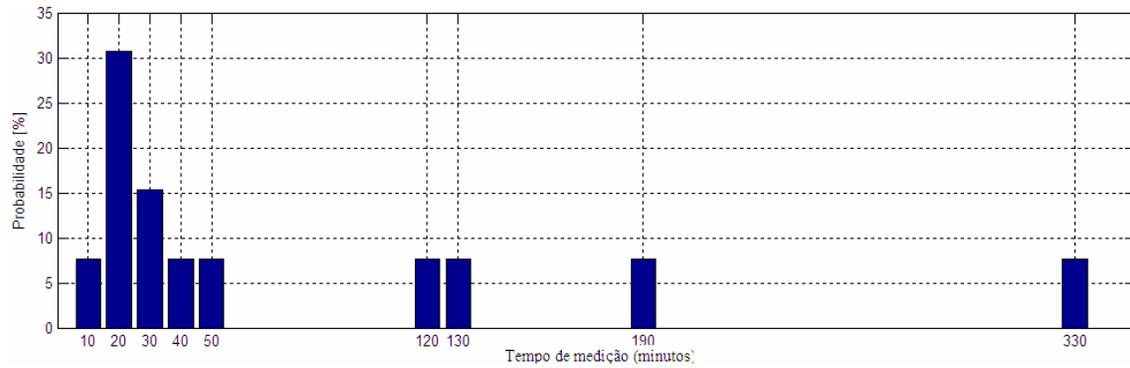


Figura 9.5 – Probabilidades de ocorrência dos intervalos ininterruptos de tempo com $DHT_V \geq 2,956\%$

A Figura 9.6 ilustra o gráfico com as probabilidades de ocorrência dos intervalos ininterruptos de tempo com $DHT_V \leq 2,956\%$. A Figura 9.7 mostra o resultado da utilização do zoom para obter uma melhor visualização da faixa de 0 a 760 minutos.



Figura 9.6 – Probabilidades de ocorrência dos intervalos ininterruptos de tempo com $DHT_V \leq 2,956\%$

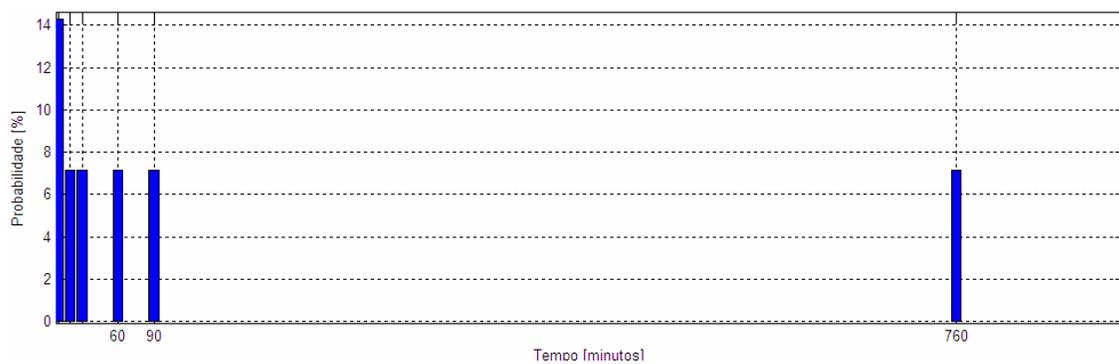


Figura 9.7 – Zoom na faixa de 0 a 760 minutos da Figura 9.6

Da Figura 9.7 tem-se que cerca de 42% dos intervalos ininterruptos de tempo com $DHT_V \leq 2,956\%$, possuem até 90 minutos de duração. Observando-se a Figura 9.6 ressalta-se a existência de sete intervalos ininterruptos de tempo com $DHT_V \leq 2,956\%$ com mais de 1000 minutos de duração, sendo que um deles atinge a duração de 4860 minutos.



Evidencia-se, portanto, que para os 14 dias em estudo, os diversos valores de $DHT_V \geq 2,956\%$ estão, predominantemente, concentrados em intervalos de 30 minutos de duração, espaçados por longos intervalos. Contudo, das análises gráficas dos valores destaca-se a existência de intervalos ininterruptos com $DHT_V \geq 2,956\%$ com 120, 130 e 330 minutos de duração.

9.2.3 ANÁLISE CONSIDERANDO-SE O VALOR DE P99% COMO REFERÊNCIA

O valor de P99% calculado a partir dos dados em estudo foi de 3,0649%. A Figura 9.8 apresenta o gráfico de $DHT_V \geq 3,0649\%$ versus tempo total de medição em minutos.



Figura 9.8 – Valores com $DHT_V \geq 3,0649\%$ versus tempo total de medição em minutos

Da Figura 9.8 e com o auxílio da análise numérica disponível no programa observa-se que, de todo o período de medição em análise, aproximadamente 20160 minutos, cerca de 200, apresentam $DHT_V \geq 3,0649\%$. Nota-se da mesma Figura que os valores de $DHT_V \geq 3,0649\%$ concentram-se acentuadamente em dois grupos de um total de três. O primeiro grupo corresponde aproximadamente ao período de 12:00 às 13:40 horas do dia 27 de junho. O segundo grupo ocorre por volta de 11:50 às 13:30 horas do dia 30 de junho. A Figura 9.9 apresenta o gráfico com os intervalos ininterruptos de tempo com valores de $DHT_V \leq 3,0649\%$.

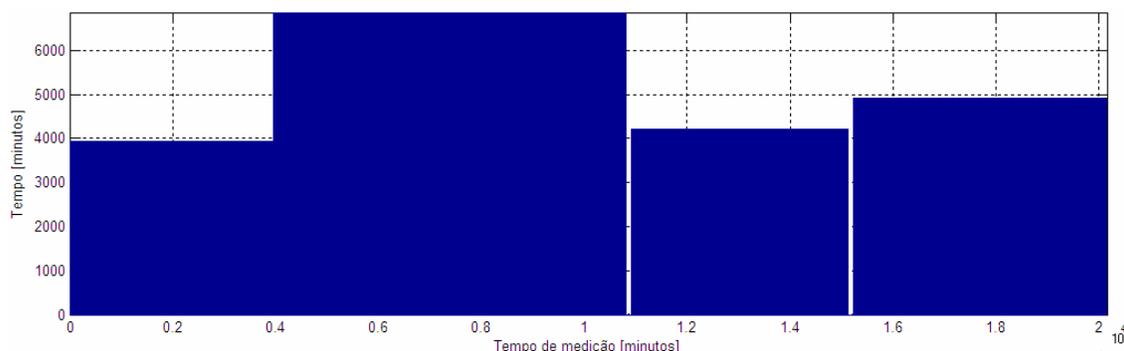


Figura 9.9 – Valores com $DHT_V \leq 3,0649\%$ versus tempo total de medição em minutos



Da Figura 9.9, tem-se que o máximo intervalo ininterrupto de tempo com $DHT_V \leq 3,0649\%$ é de aproximadamente 6800, ou seja, 113,33 horas, de um total de 20160 minutos de medição. Observa-se da mesma Figura que existem fundamentalmente dois grupos nos quais não se tem $DHT_V \leq 3,0649\%$.

A Figura 9.10 apresenta o gráfico com os intervalos ininterruptos de tempo com valores de $DHT_V \geq 3,0649\%$.

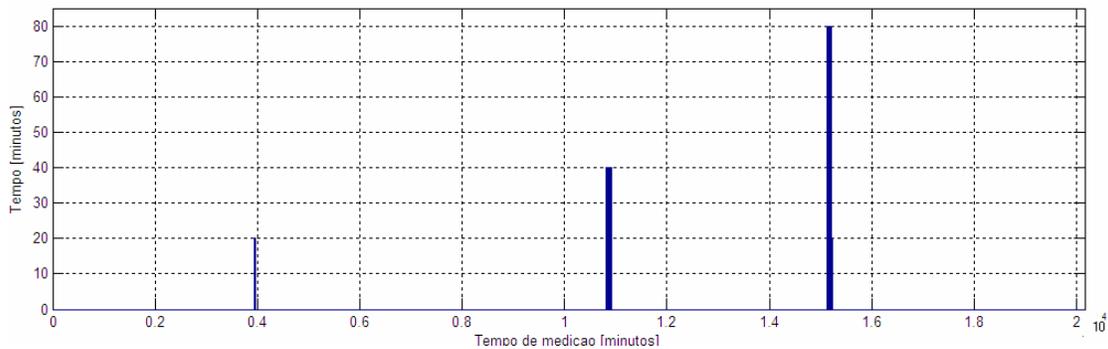


Figura 9.10 – Intervalos ininterruptos de tempo com valores de $DHT_V \geq 3,0649\%$

Da Figura 9.10, tem-se que o máximo intervalo ininterrupto de tempo com $DHT_V \geq 3,0649\%$ é de 80 minutos. A Figura 9.11 ilustra o gráfico com as probabilidades de ocorrência dos intervalos ininterruptos de tempo com $DHT_V \geq 3,0649\%$.

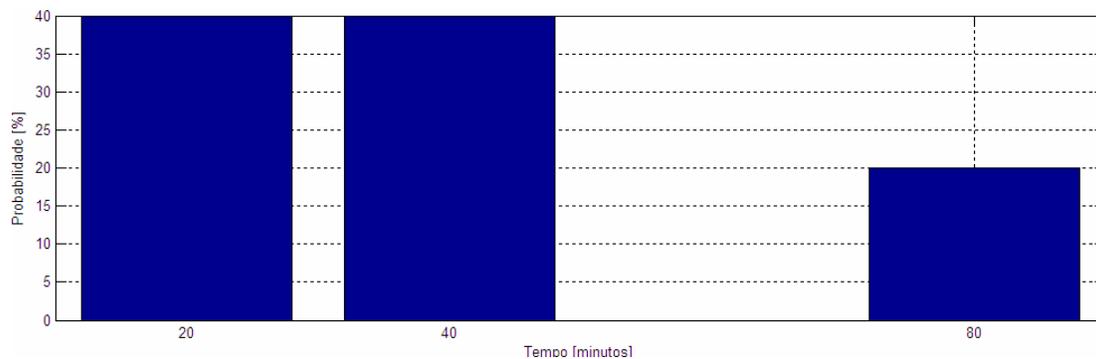


Figura 9.11 - Probabilidades de ocorrência dos intervalos ininterruptos de tempo com $DHT_V \geq 3,0649\%$.

Nota-se da Figura 9.11 que dos intervalos ininterruptos de tempo com $DHT_V \geq 3,0649\%$ tem-se a mesma probabilidade de 40% para ocorrência de um intervalo com 20 ou 40 minutos de duração e uma probabilidade de 20% para a ocorrência de um intervalo ininterrupto de 80 minutos. Percebe-se que durante todo o intervalo de medição há apenas três intervalos com $DHT_V \geq 3,0649\%$, sendo que a duração desses é de 20, 40 e 80 minutos. A Figura 9.12 ilustra



o gráfico com as probabilidades de ocorrência dos intervalos ininterruptos de tempo com $DHT_V \leq 3,0649\%$.

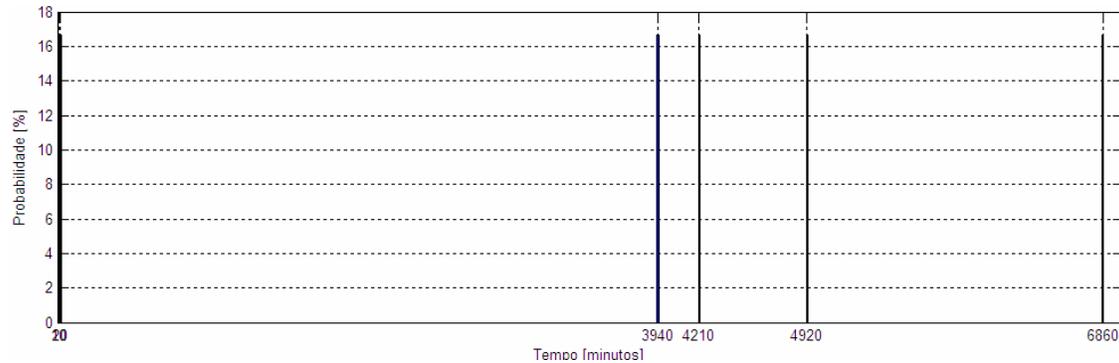


Figura 9.12 – Probabilidades de ocorrência dos intervalos ininterruptos de tempo com $DHT_V \leq 3,0649\%$.

Observa-se na Figura 9.12 a existência de quatro intervalos ininterruptos de tempo com $DHT_V \leq 3,0649\%$ com mais de 3900 minutos de duração.

Para os 14 dias em estudo, os diversos valores de $DHT_V \geq 3,0649\%$ estão divididos em intervalos de curta duração espaçados por intervalos longos. Esses dois fatos culminaram na geração de três agrupamentos durante todo o período de medição.

9.2.4 ANÁLISE CONSIDERANDO-SE O VALOR MÉDIO QUADRÁTICO COMO REFERÊNCIA

O valor médio quadrático calculado a partir dos dados em estudo foi de 2,302%. A Figura 9.13 apresenta o gráfico de $DHT_V \geq 2,302\%$ versus tempo total de medição em minutos.

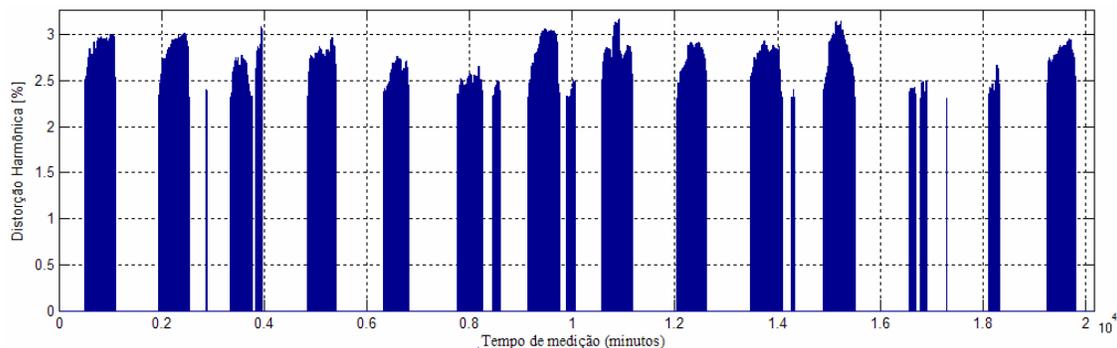


Figura 9.13 – Valores com $DHT_V \geq 2,302\%$ versus tempo total de medição em minutos.

Da Figura 9.13 e da análise numérica do programa, observa-se que, de todo o período de medição em análise, aproximadamente 20160 minutos, cerca de 7780 minutos (129,67 horas),



apresentam $DHT_V \geq 2,302\%$. Isso representa cerca de 38,6% do tempo total de medição. Nota-se da mesma Figura que os valores de $DHT_V \geq 2,302\%$ concentram-se em vários grupos.

A Figura 9.14 apresenta o gráfico com os intervalos ininterruptos de tempo com valores de $DHT_V \leq 2,302\%$.

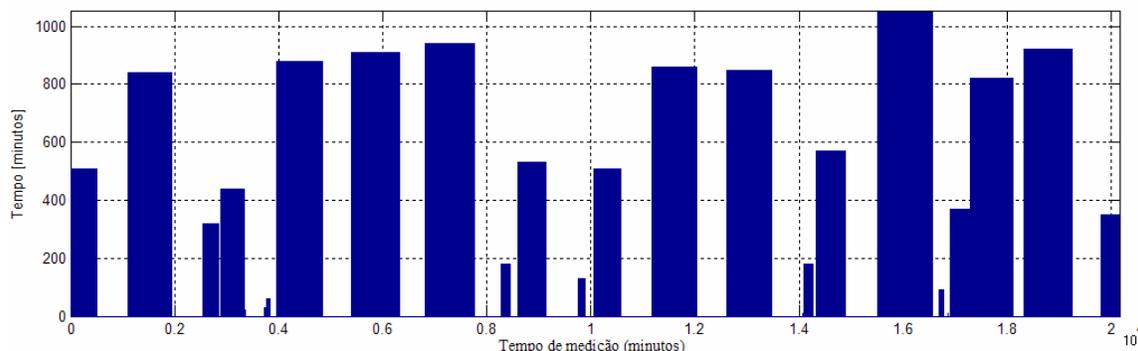


Figura 9.14 – Intervalos ininterruptos de tempo com valores de $DHT_V \leq 2,302\%$

Da Figura 9.14 tem-se que o máximo intervalo ininterrupto de tempo com $DHT_V \leq 2,302\%$ é de aproximadamente 1050 minutos, ou seja, 17,5 horas, de um total de 20160 minutos de medição. Observa-se da mesma Figura a existência de vários grupos com $DHT_V \leq 2,302\%$.

A Figura 9.15 apresenta o gráfico com os intervalos ininterruptos de tempo com valores de $DHT_V \geq 2,302\%$.

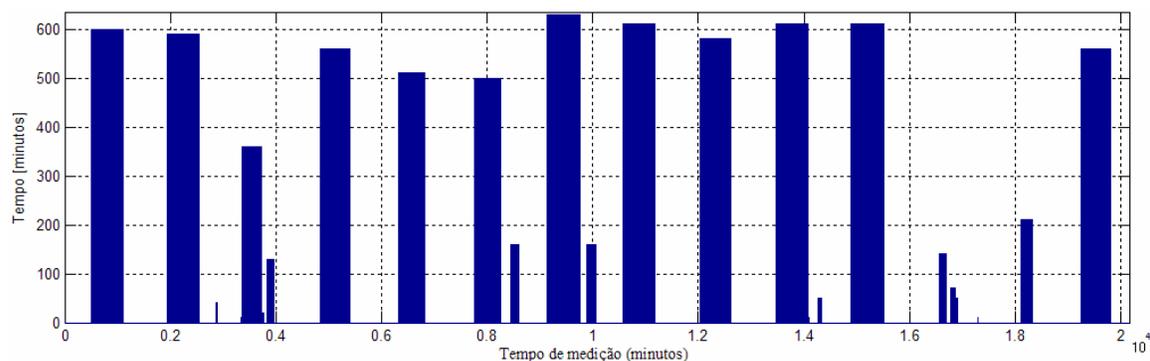


Figura 9.15 – Intervalos ininterruptos de tempo com valores de $DHT_V \geq 2,302\%$

Da Figura 9.15 tem-se que o máximo intervalo ininterrupto de tempo com $DHT_V \geq 2,302\%$ é de aproximadamente 630 minutos, ou seja, 10,5 horas, de um total de 20160 minutos de medição. Trata-se de um valor bem acima aos apresentados nas análises vinculadas a P95% e P99%. Nota-se da mesma Figura que há vários grupos de valores com $DHT_V \geq 2,302\%$.



A Figura 9.16 ilustra o gráfico com as probabilidades de ocorrência dos intervalos ininterruptos de tempo com $DHT_V \geq 2,302\%$.

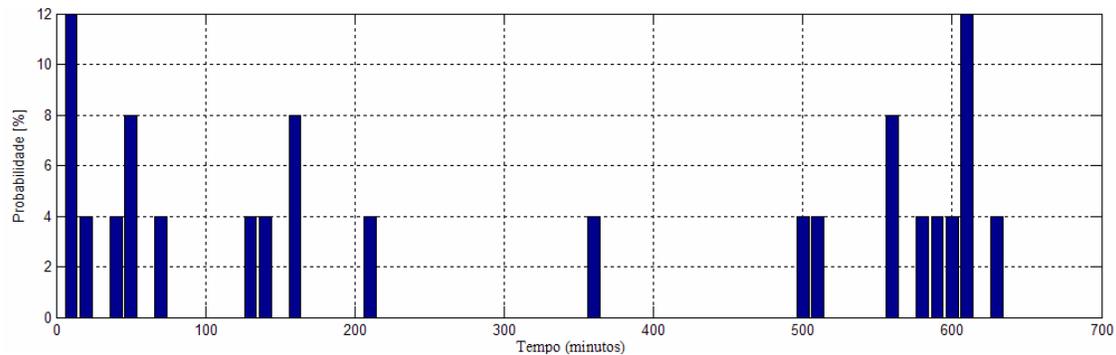


Figura 9.16 – Probabilidades de ocorrência dos intervalos ininterruptos de tempo com $DHT_V \geq 2,302\%$

Nota-se da Figura 9.16 que cerca de 32% dos intervalos ininterruptos de tempo com $DHT_V \geq 2,302\%$ têm até 70 minutos de duração. Atenta-se para a existência de intervalos ininterruptos de tempo com $DHT_V \geq 2,302\%$ distribuídos entre 500 e 700 minutos de duração, com probabilidade de ocorrência de 44%.

A Figura 9.17 ilustra o gráfico com as probabilidades de ocorrência dos intervalos ininterruptos de tempo com $DHT_V \leq 2,302\%$.

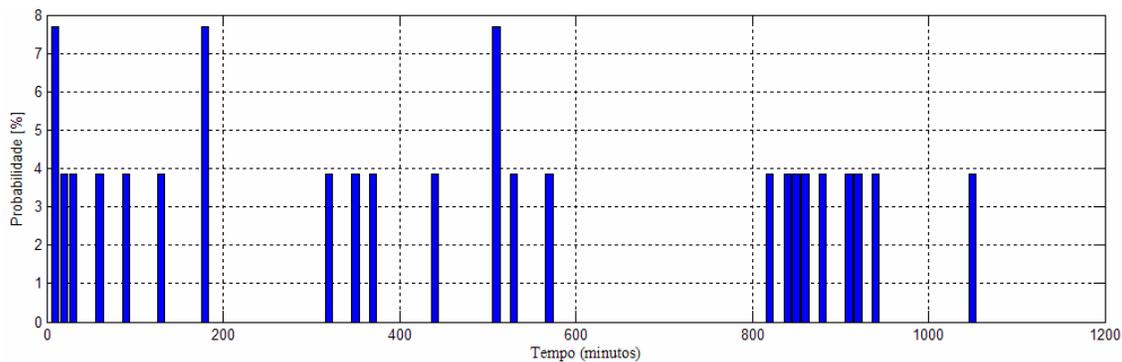


Figura 9.17 – Probabilidades de ocorrência dos intervalos ininterruptos de tempo com $DHT_V \leq 2,302\%$

Nota-se da Figura 9.17 que cerca de 34% dos intervalos ininterruptos de tempo com $DHT_V \leq 2,302\%$ têm até 200 minutos de duração. Ressalta-se a existência de intervalos ininterruptos de tempo com $DHT_V \leq 2,302\%$ com intervalos maiores que 800 minutos.

O estudo indica portanto que, para os 14 dias em estudo, os diversos valores de $DHT_V \geq 2,302\%$ estão na maior parte do tempo distribuídos em intervalos de média duração, cerca de 70 minutos, e longa duração, da ordem de 600 minutos.



9.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Das análises executadas neste trabalho, pode-se concluir que em se tratando dos valores acima de P95% e de P99% tem-se comportamentos semelhantes no que diz respeito à distribuição no tempo das amostras. Entretanto, uma grande diferença é comprovada quando a referência torna-se o valor da média quadrática. No próximo capítulo será apresentado o módulo de qualificação, através de uma análise dos dados da subestação SE02, verificando se estes se encontram dentro dos limites estabelecidos pelas principais normas e recomendações internacionais e nacionais.



CAPÍTULO 10

QUALIFICAÇÃO

Objetiva-se neste módulo efetuar uma avaliação qualitativa dos dados oriundos da medição. Para tanto, busca-se compará-los com os limites estabelecidos pelas normas / recomendações:

- IEC 555 - 2
- IEEE Std. 519
- Norma Européia EN50160
- Norma Sul-Africana NRS 048
- Norma Peruana NTCSE
- Procedimentos de Rede do ONS, Submodulo 2.2
- Procedimentos de Distribuição da ANEEL, Módulo 08

10.1 ESTRUTURA DO MÓDULO

O módulo de qualificação, mostrado na Figura 10.1, é acessado por meio do botão “Qualificação” presente na tela de entrada ou a partir do menu “Análises”.

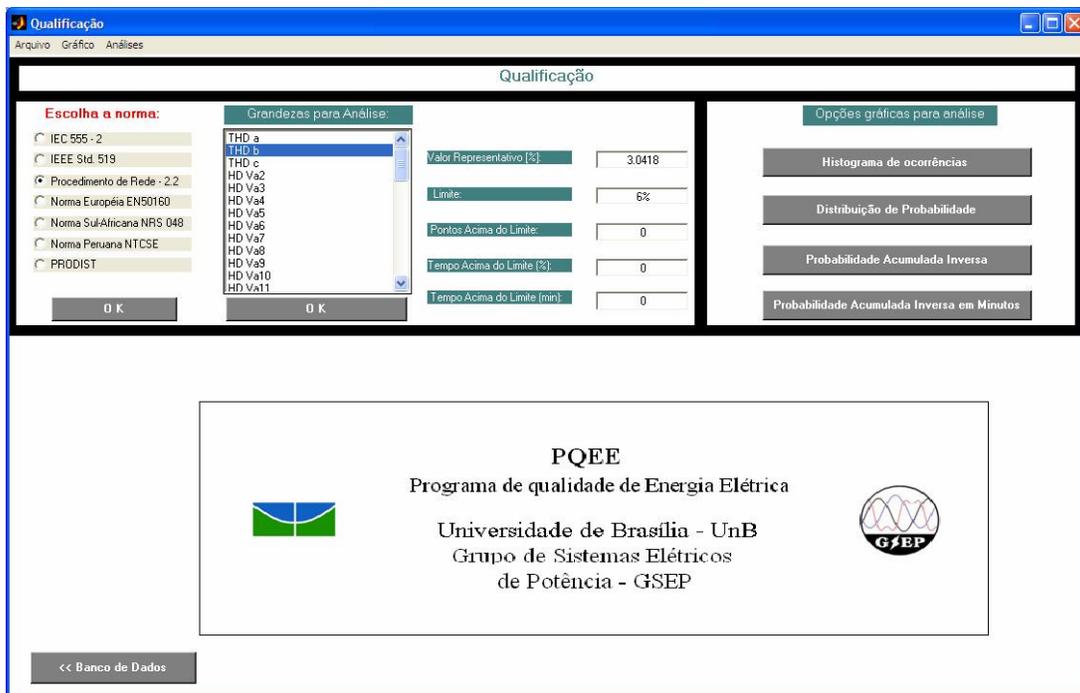


Figura 10.1 – Janela do módulo de qualificação



O primeiro passo na execução deste módulo é a escolha da norma a ser apreciada. Assim que a escolha é confirmada no botão “OK”, aparece a caixa de mensagem mostrada na Figura 10.2.



Figura 10.2 – Especificação da tensão nominal do barramento

Especifica-se, então, como mostra a Figura 10.2 a tensão nominal do barramento, que pode ser classificada como Baixa Tensão ($V_N \leq 1\text{kV}$), Média Tensão ($1\text{kV} \leq V_N \leq 35\text{kV}$) ou Alta Tensão ($35\text{kV} \leq V_N \leq 230\text{kV}$). Se na norma selecionada houver uma maior quantidade de faixas de tensão com limites distintos de distorção, uma nova janela aparecerá. Suponha, por exemplo, que se escolha o PRODIST e a tensão nominal seja de 13,8 kV. Assim, ao clicar no botão “Média Tensão ($1\text{kV} \leq V_N \leq 35\text{kV}$)”, aparece a janela mostrada na Figura 10.3.

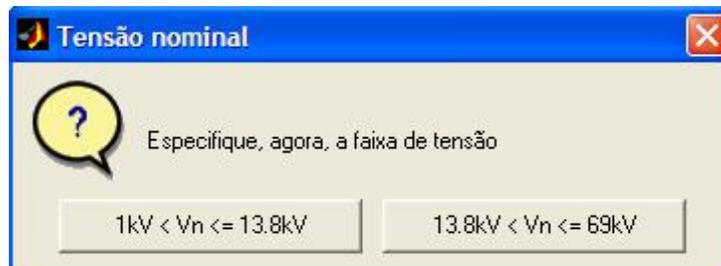


Figura 10.3 – Especificação da tensão nominal

Note a partir da Figura 10.3, que o PRODIST define diferentes limites de distorção para $1\text{kV} \leq V_N \leq 13.8\text{kV}$ e $13.8\text{kV} \leq V_N \leq 69\text{kV}$. O próximo passo é eleger uma única grandeza a ser analisada no campo “Grandezas para Análise”, mostrado na Figura 10.1. A seguir surgirá a janela ilustrada na Figura 10.4, onde o usuário deve informar a grandeza escolhida em um padrão que o programa reconheça. Isso porque os nomes que aparecem na janela “Grandezas para Análise” são provenientes do banco de dados e dependem da configuração do medidor.

Observa-se na Figura 10.4 que se a grandeza escolhida for a DHT_V , o usuário deve digitar “DT” no campo disponível. Imediatamente após a confirmação “OK” surge a janela mostrada na Figura 10.5 onde é informado o período de monitoração que se deseja analisar.

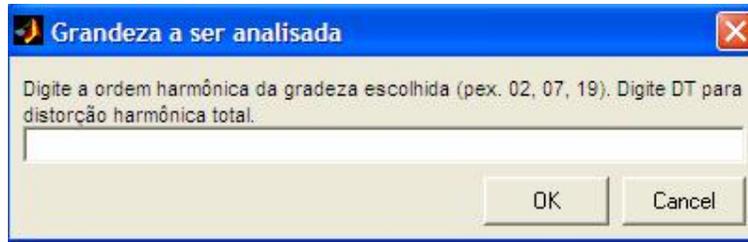


Figura 10.4 – Padronização da Grandeza escolhida

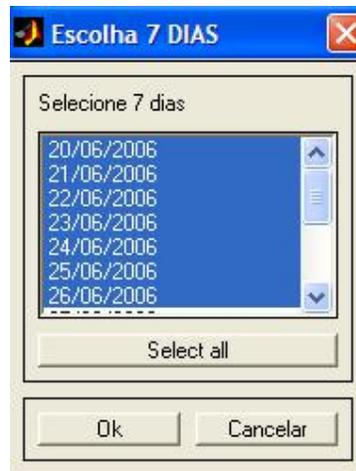


Figura 10.5 – Escolha dos dias de medição

A escolha dos dias conforme a Figura 10.5 obedece à metodologia imposta por cada norma, de modo que se o usuário estiver fazendo a análise de acordo com a IEC 555-2, por exemplo, e escolher mais do que sete dias, aparece o aviso mostrado na Figura 10.6.

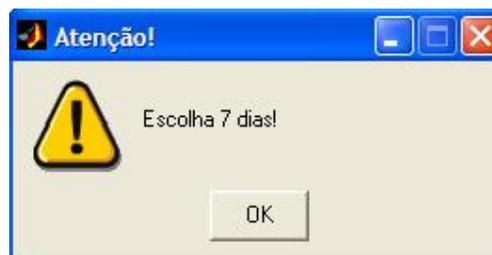


Figura 10.6 – Aviso que aparece se o usuário não obedecer a metodologia da norma em estudo

Depois de efetuar as etapas acima será executada a rotina que revela:

- O valor representativo da grandeza em apreciação, obtido de acordo com a metodologia da norma selecionada, também chamado de indicador;
- O limite imposto pela norma;
- O número de pontos que ultrapassam o valor limite no decurso dos dias selecionados;



- Tempo em que ocorreram amostras de distorção superiores ao limite, em porcentagem do tempo total de medição;
- Tempo em que ocorreram amostras de distorção superiores ao limite, em minutos.

Neste módulo são disponibilizadas também as seguintes análises gráficas:

- Histograma de Ocorrências: levantamento das faixas de distorções harmônicas versus o tempo de suas permanências, em minutos, no sistema elétrico de potência em estudo;
- Distribuição de Probabilidade: levantamento das faixas de distorções harmônicas versus a probabilidade de suas ocorrências;
- Probabilidade Acumulada Inversa
- Probabilidade Acumulada Inversa em Minutos

Essas análises serão detalhadas durante o estudo de caso.

10.2 ESTUDO DE CASO

Deseja-se agora realizar uma análise qualitativa a cerca das DHT_{vb} medidas na Subestação SE02 da CEB. A Tabela 10.1 mostra o resultado disponibilizado no módulo de qualificação quando da avaliação da primeira semana de medições. O indicador, cuja obtenção resulta da aplicação da metodologia de cada norma, é o parâmetro a ser comparado com os limites.

Tabela 10.1 – Análise qualitativa

Norma ou Recomendação	Indicador (%)	Limite (%) estabelecido	Pontos acima do Limite	Tempo acima do limite (%)	Tempo acima do limite (min)
IEC 555-2	3,0899	8	0	0	0
IEEE 519	Cada valor medido	5	0	0	0
Européia EN50160	2,9683	8	0	0	0
Africana NRS 048	3,0418	8	0	0	0
Peruana NTCSE	2,9683	8	0	0	0
PR Submódulo 2.2	3,0418	6	0	0	0
PRODIST	3,0418	6	0	0	0

A partir da Tabela 10.1 verifica-se que em nenhum momento foram encontrados valores de DHT_{vb} superiores aos limites estabelecidos pelas normas/recomendações em apreciação. O



limite estipulado pela maior parte das normas foi de 8%. O menor deles é de 5%, determinado pela IEEE 519. É interessante notar as diferenças entre os indicadores propostos pelas normas. Eles formam quatro grupos distintos:

- “3,0899” prescrito pela IEC 555-2. Este foi o maior dentre os 1008 valores medidos no decorrer do intervalo semanal.
- “3,0418” estabelecido pela Norma Sul-Africana NRS 048, pelos Procedimentos de Rede (Submódulo 2.2) e pelos Procedimentos de Distribuição (módulo 08). Este valor foi o maior dentre os sete P95% calculados em base diária.
- “2,9683” recomendado pela norma Peruana NTCSE e pela norma Européia EN 50160. Este valor é o P95% dos 1008 valores medidos no decurso do intervalo semanal.
- “Cada valor medido”. A IEEE 519 não traz qualquer abordagem quanto à metodologia para obtenção de um valor de referência.

As Figuras 10.7 e 10.8 apresentam, respectivamente, os gráficos com a distribuição de probabilidade e a distribuição acumulada inversa no tempo dos valores de $DHTv_b$ calculados a partir dos dados da primeira semana de medições da Subestação SE02.

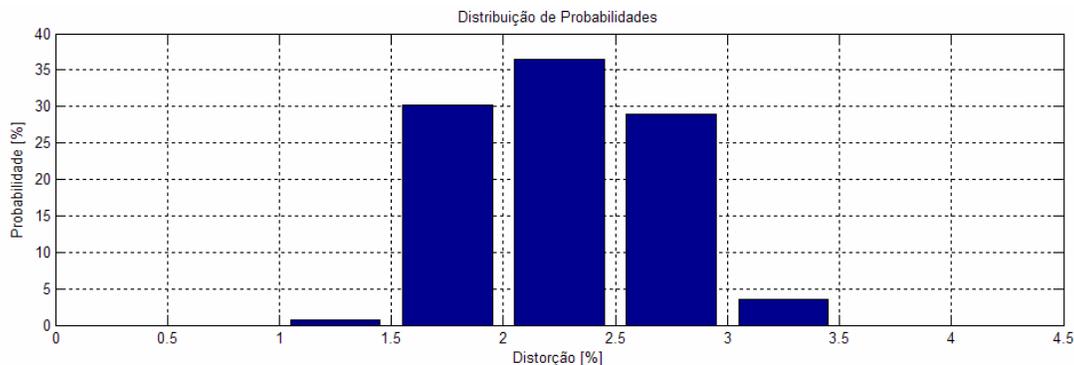


Figura 10.7 – Distribuição de Probabilidades

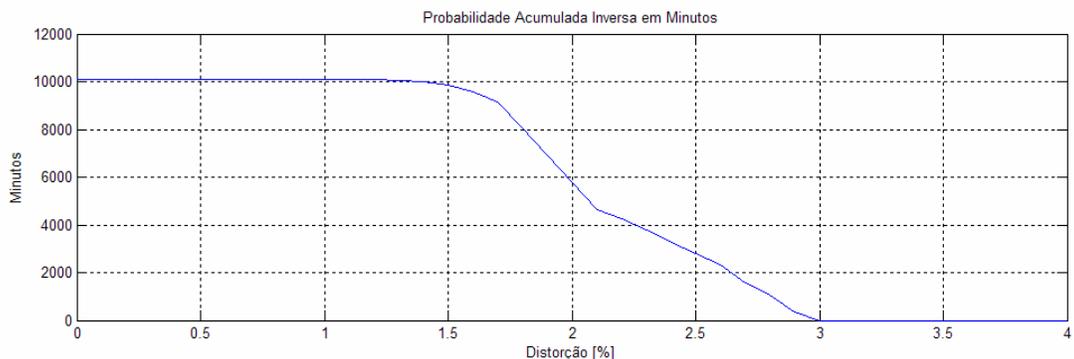


Figura 10.8 – Probabilidade acumulada inversa em minutos



Observa-se da Figura 10.7 uma distribuição simétrica das probabilidades de ocorrência das distorções harmônicas em torno do valor entre 2% e 2.5%. A partir das Figuras 10.7 e 10.8 observa-se que a maior probabilidade de ocorrência encontra-se entre 2% e 2,5%, o que significa que na maior parte do tempo os valores de DHT_{V_b} se mantiveram abaixo de 2,5%.

As Figuras 10.9 e 10.10 revelam, respectivamente, os gráficos com a distribuição de probabilidade e a distribuição acumulada inversa no tempo dos valores de DHT_{V_b} medidos no decorrer da segunda semana de medições.

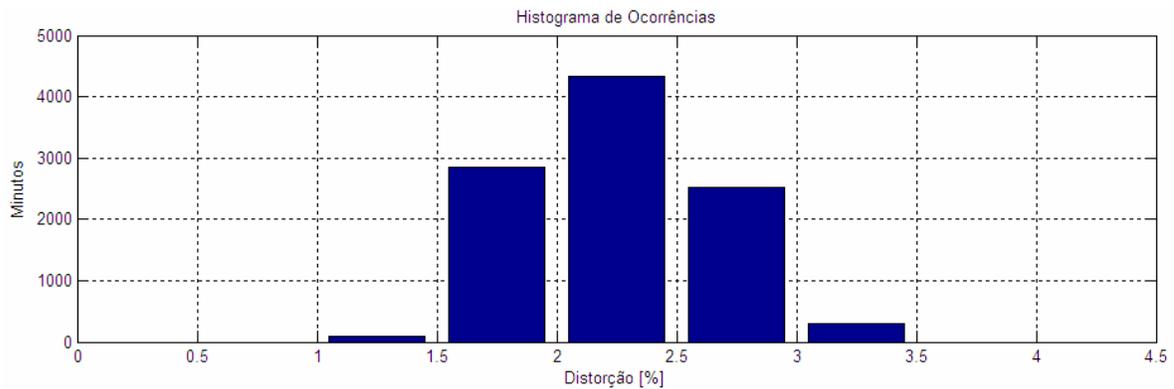


Figura 10.9 – Distribuição de Probabilidades (segunda semana de medição)

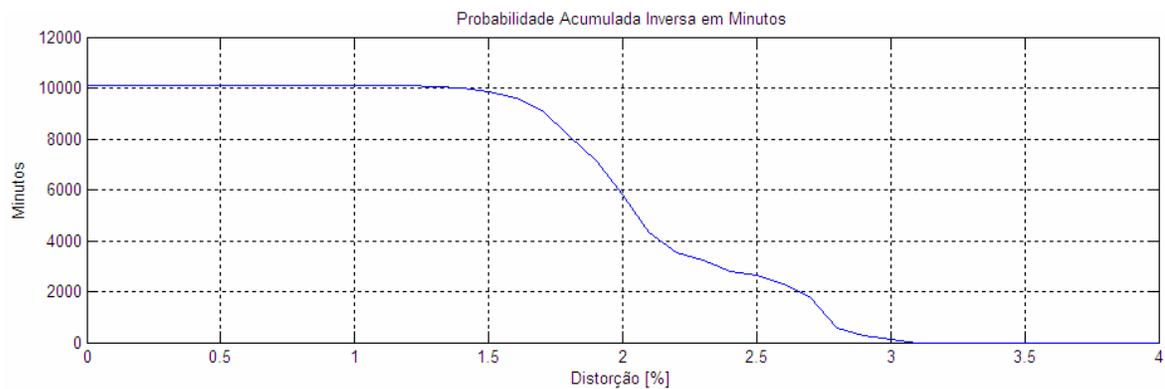


Figura 10.10 – Probabilidade acumulada inversa em minutos (segunda semana de medições)

De acordo com a Figura 10.9, observa-se novamente a ocorrência de uma distribuição de probabilidades aproximadamente simétrica em torno de 2% e 2.5%. A partir das Figuras 10.9 e 10.10 detecta-se que a maior probabilidade concentra-se na ocorrência de valores entre 2% e 2,5%.



10.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foi apresentado o módulo de qualificação do programa. Evidencia-se, a partir da análise qualitativa elaborada, que a tensão medida na Subestação SE02 da CEB obedece aos requisitos exigidos por todas as recomendações e normas apresentadas neste trabalho. No capítulo seguinte será apresentada uma análise das distorções harmônicas para três subestações da CEB, fazendo-se uma comparação entre elas.



CAPÍTULO 11

COMPARAÇÃO ENTRE LOCAIS

Neste tópico objetiva-se analisar, quantificar e qualificar aspectos relacionados à Distorção Harmônica de Tensão em redes de 138 kV da Companhia Energética de Brasília – CEB. Será efetuada uma apreciação simultânea dos níveis e perfis das DHT_V de três subestações do sistema CEB:

- SEAC (Águas Claras) de 138 / 13,8kV, localizada na Avenida Sibiruna nº 23, Águas Claras. A principal carga desta subestação é o Metrô, cujo funcionamento é em corrente contínua. A presença de equipamentos eletrônicos de potência na alimentação do metrô demanda a utilização de filtros de harmônicas na subestação.
- SEBN (Brasília Norte) de 138 / 34,5 / 13,8 kV, localizada na SAIN – Estação de Abastecimento – ao lado dos Transmissores da rádio Educadora do Ministério da Educação. Trata-se de uma das principais subestações do sistema CEB.
- SEMJ (Monjolo) de 138 / 13,8 kV, localizada nas margens da rodovia que liga Samambaia ao Gama e Recando das Emas. Dentre as cargas alimentadas por esta subestação destacam-se uma fábrica da Coca-Cola e uma estação de tratamento da CAESB.

O estudo será realizado a partir de medições de sete dias consecutivos, do dia 28 de junho ao dia 04 de julho de 2006. Os dados foram captados com uma frequência de aquisição de 10 minutos. A comparação dos resultados é feita por meio de Tabelas, gráficos e ferramentas estatísticas. Serão avaliadas questões como a existência ou não de similaridade no comportamento das distorções entre as fases do sistema e os diversos dias de monitoramento. Será executada, ainda, uma análise comparativa dos valores mensurados com os patamares estabelecidos pelas principais normas e recomendações mundialmente reconhecidas.

Esta etapa é de importância evidente, tendo considerado que o conhecimento do comportamento de fenômenos como a distorção harmônica de tensão culmina em ações que poderão minimizar os danosos efeitos dos mesmos sobre os sistemas de distribuição, bem como sobre os diversos tipos de equipamentos. Além disto, os gráficos expostos se prestam



para formação de um banco de dados contendo valiosas informações quanto ao perfil das distorções harmônicas nos locais supramencionados.

11.1 ESTUDO DE CASO

Serão apresentadas, agora, as análises das amostras colhidas concomitantemente nos três locais em estudo. Inicialmente, serão ilustrados os resultados das análises de similaridades entre fases, entre dias e entre períodos de um dia dos valores de distorção medidos no decorrer do intervalo total de monitoração. Em seguida, será exposta a análise de distribuição no tempo das DHT_V . Por final, efetuar-se-á uma avaliação qualitativa dos dados provenientes das medições.

11.1.1 SIMILARIDADE ENTRE FASES

As Figuras 11.1, 11.2 e 11.3 exibem, respectivamente, o comportamento ponto a ponto das DHT_V das três fases da tensão de fornecimento das subestações SEAC, SEBN e SEMJ no decurso do período completo de mensuração, 10080 minutos.

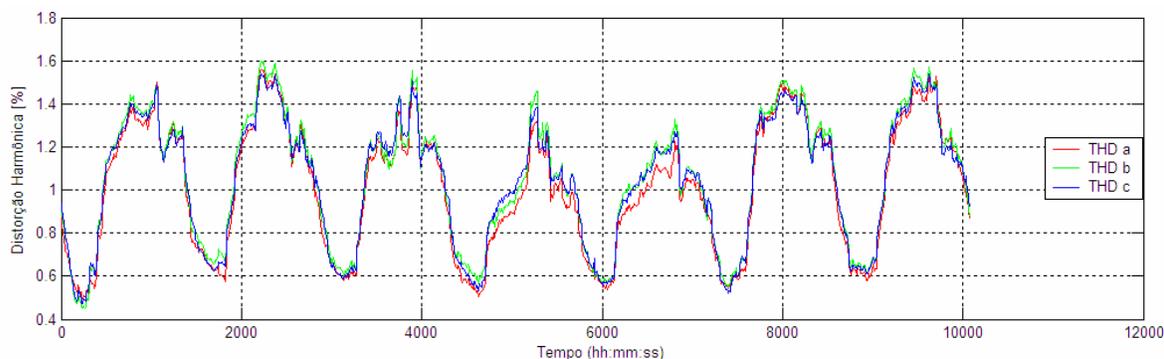


Figura 11.1 – Gráfico ponto a ponto das três fases da DHT_V (Subestação SEAC)

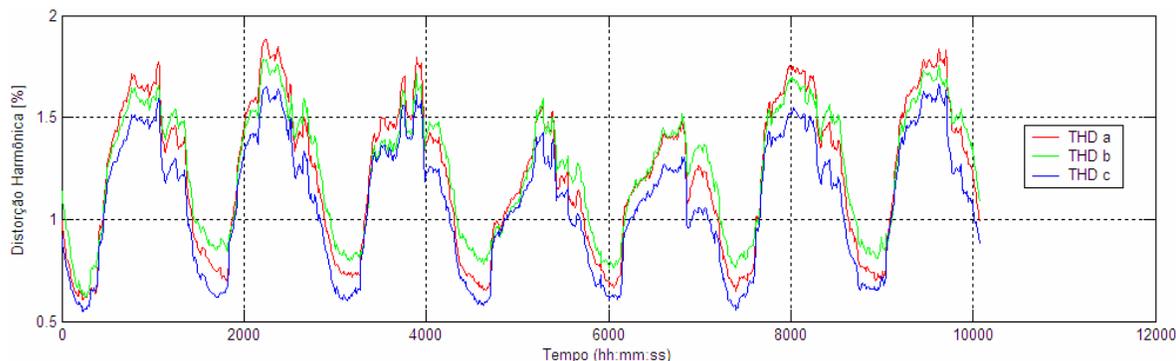


Figura 11.2 – Gráfico ponto a ponto das três fases da DHT_V (Subestação SEBN)

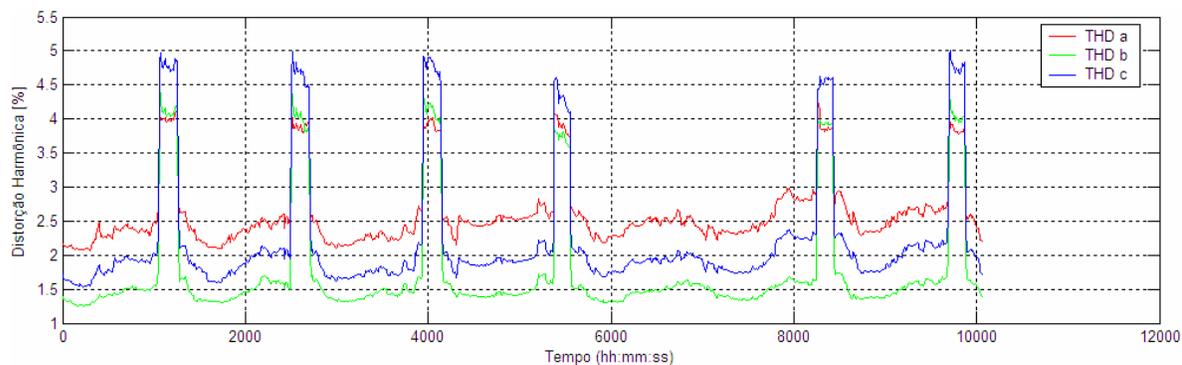


Figura 11.3 – Gráfico ponto a ponto das três fases da DHT_V (Subestação SEMJ)

A partir das Figuras 11.1, 11.2 e 11.3 nota-se uma significativa proximidade entre o comportamento das distorções nas subestações SEAC e SEBN. O perfil da SEMJ, no entanto, é completamente distinto dos demais. As Figuras 11.4, 11.5 e 11.6 ilustram gráficos de barra comparando as três fases das DHT_V medidas respectivamente nas subestações SEAC, SEBN e SEMJ.

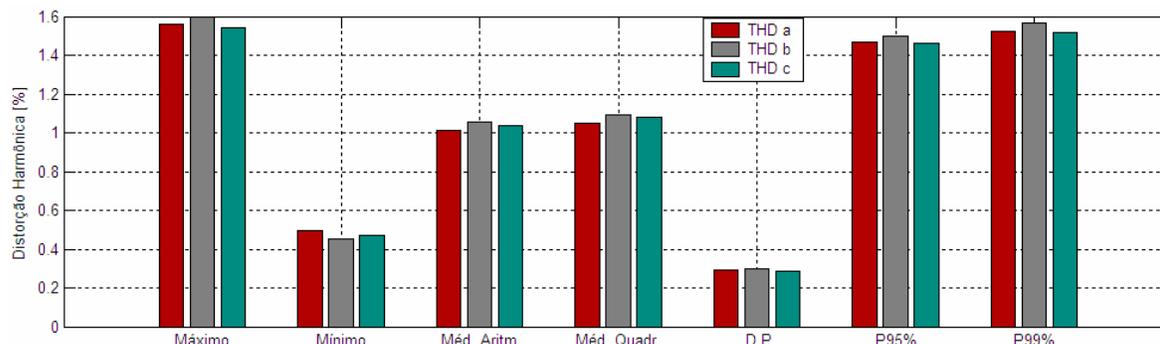


Figura 11.4 – Estatísticas das DHT_V das três fases na SEAC

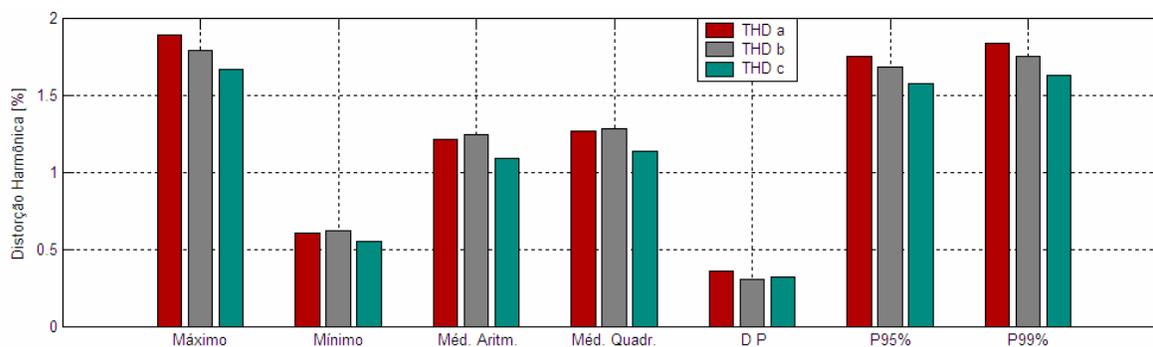


Figura 11.5 – Estatísticas das DHT_V das três fases SEBN

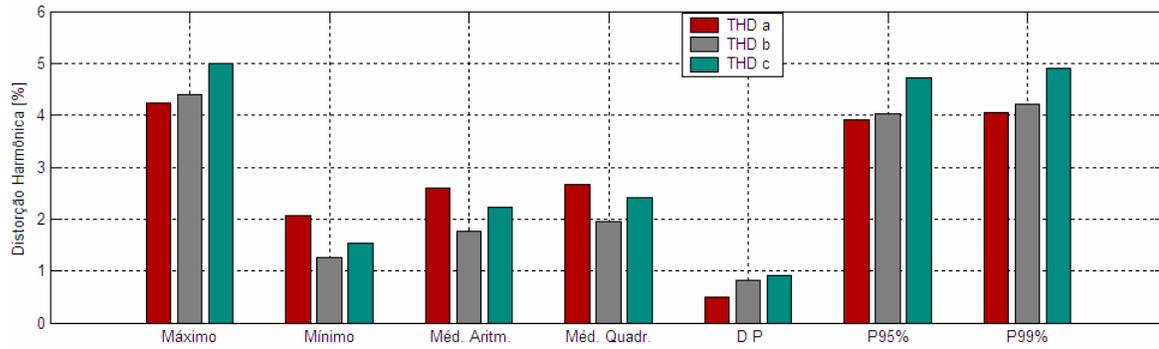


Figura 11.6 – Estatísticas das DHT_V das três fases na SEMJ

A partir das Figuras 11.4 e 11.5 nota-se que os valores de DHT_V na SEAC e na SEBN, encontram-se, na maior parte do tempo, abaixo de 1,7%. Na SEMJ, conforme Figura 11.6, os valores estão na faixa de 1,5% a 5%. Consta-se que nesta subestação os valores de DHT_V estão elevados, tendo em vista os demais locais de mesmo nível de tensão.

Observa-se, porém, que para quase todo o período de medição as distorções harmônicas de tensão das três fases, verificadas em cada subestação separadamente, ilustram valores próximos entre si. As três fases denotam valores de desvio padrão e média aritmética similares. Pode-se concluir que há semelhança entre as fases. Empregar-se-á, para as subestações SEAC e SEBN a fase a como representativa às demais. Para a SEMJ adotar-se-á a fase c.

11.1.2 SIMILARIDADE ENTRE DIAS E PERÍODOS

As Figuras 11.7, 11.8 e 11.9 ilustram, respectivamente, os comportamentos diários das DHT_V medidas nas subestações SEAC, SEBN e SEMJ. Considerou-se os 7 dias em apreciação.

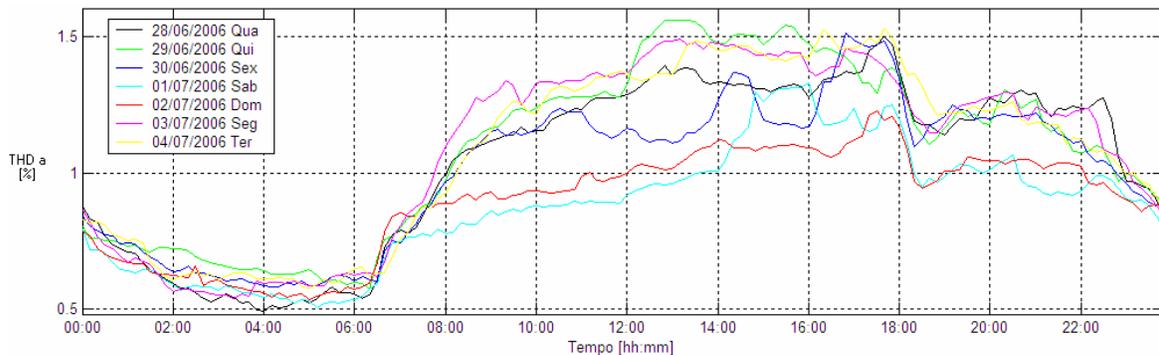
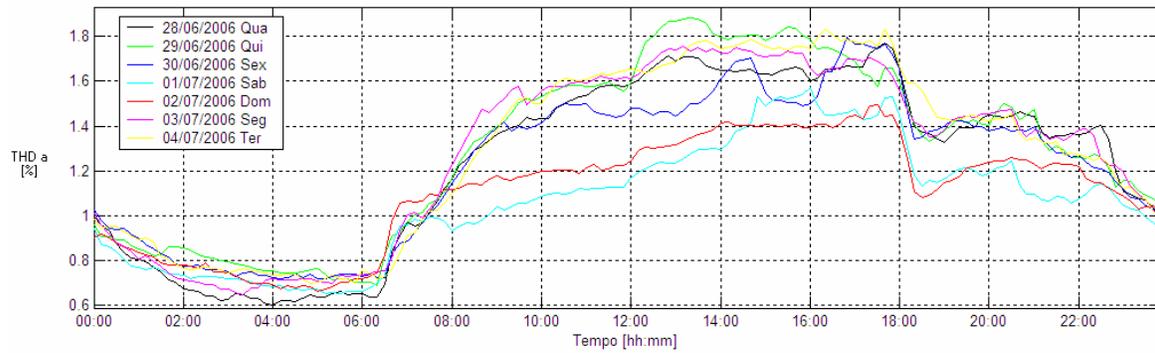
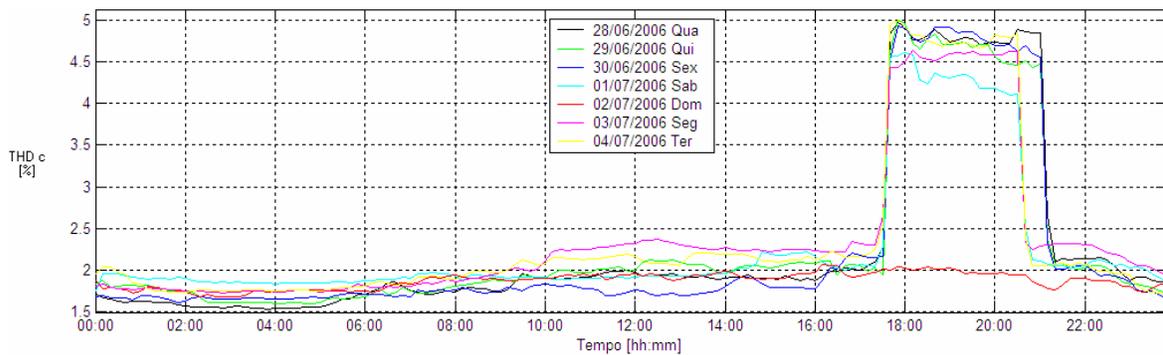


Figura 11.7 – Gráfico dos comportamentos diários das DHT_{Va} na SEAC

Figura 11.8 – Gráfico dos comportamentos diários das DHT_{Va} na SEBNFigura 11.9 – Gráfico dos comportamentos diários das DHT_{Vc} na SEMJ

Com base nas Figuras 11.7 e 11.8 ratifica-se a semelhança entre os perfis das DHT_V medidas nas subestações SEAC e SEBN. Pode-se observar que nestes locais os valores da DHT_{Va} estão, na maior parte do tempo, compreendidos entre 0,5% e 1,7%. Detecta-se um padrão semelhante de DHT_{Va} para os sete dias em estudo. A partir da Figura 11.9 verifica-se que na SEMJ, apesar do comportamento distinto em relação às demais subestações, também há, com exceção do domingo, similaridade entre os dias. Pode-se adotar, portanto, para os locais em estudo, um dia útil como representativo aos demais.

É interessante notar que de segunda a sábado a DHT_{Vc} , medida na SEMJ, atinge valores bastante elevados no período de 17:30 às 22:00 horas. Para melhor visualizar tal fato recorre-se à análise de similaridade entre períodos. As Figuras 11.10, 11.11 e 11.12 mostram o comportamento das DHT_V nos três locais em estudo, em diferentes períodos do dia 28 de junho (quarta-feira).

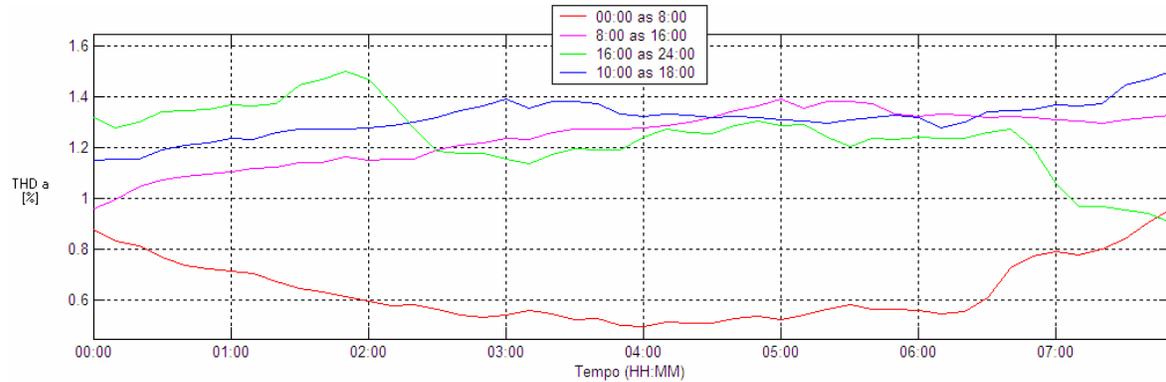


Figura 11.10 – Comparação entre as DHT_{Va} em diferentes períodos do dia 28/06/06 (SEAC)

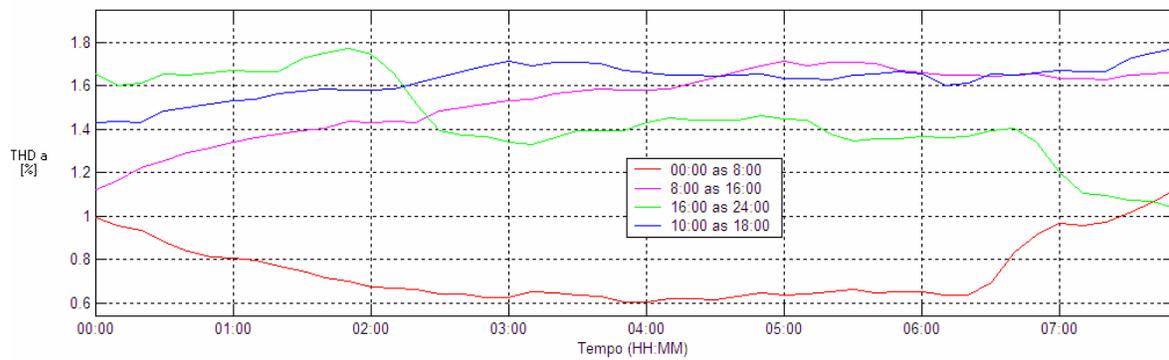


Figura 11.11 – Comparação entre as DHT_{Va} em diferentes períodos do dia 28/06/06 (SEBN)

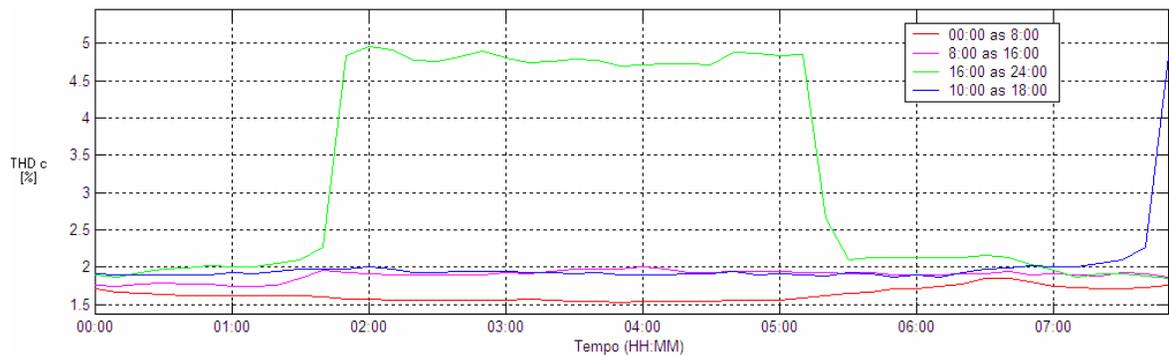


Figura 11.12 – Comparação entre as DHT_{Vc} em diferentes períodos do dia 28/06/06 (SEMJ)

De acordo com as Figuras 11.10 e 11.11 observa-se que os valores da DHT_{Va} , na SEAC e na SEBN, permanecem entre 1,2 e 1,7 % na maior parte do tempo, sendo que apenas no intervalo de 00:00 às 08:00 horas as distorções não atingem valores superiores à 1%. Percebe-se, mais uma vez, que há um padrão de comportamento da DHT_{Va} , nestas duas subestações. No intervalo de 08:00 às 16:00 há um crescimento da distorção, ao contrário do que ocorre das 16:00 às 23:00 horas.



O perfil da DHT_{V_c} medida na SEMJ é completamente diferente. Nota-se que na maior parte do dia as distorções encontram-se na faixa de 1,5 a 2%. Por volta das 17:30 horas, porém, ocorre um aumento abrupto para aproximadamente 4,7%, perdurando até as 21:30 horas. Ressalta-se que este acréscimo ocorre neste mesmo horário, periodicamente, de segunda-feira a sábado. Verifica-se, desta análise, que há dois padrões de comportamento da DHT_{V_c} na SEMJ, sendo que um deles ocorre de 17:30 às 21:30 horas e o outro no restante do dia.

Nota-se que para as DHT_V captadas na SEAC e na SEBN, há similaridade entre os períodos em análise, com exceção do intervalo de 00:00 às 08:00 horas. Na SEMJ, por outro lado, não se constata a existência de similaridade entre os períodos.

11.1.3 ANÁLISE DE DISTRIBUIÇÃO NO TEMPO

Neste item serão apresentados os resultados da análise da distribuição no tempo das amostras de distorção com valores superiores ao P95%. Aspira-se, a partir dos resultados gerados, concluir quanto à representatividade dos índices P95% quando das suas utilizações em representação aos demais valores medidos. Caberá aos fabricantes, de posse dos limites de suportabilidade de cada um dos seus equipamentos frente às distorções harmônicas de tensão, entender se o seu equipamento suporta ou não os níveis apresentados, em função do tempo de exposição.

A Tabela 11.1 ilustra os P95% das DHT_V de cada local em estudo.

Tabela 11.1 – P95% de cada subestação

Local	P95%
SEAC	1,4666
SEBN	1,7536
SEMJ	4,7151

Da análise numérica contida no programa constata-se que:

- O maior intervalo ininterrupto com $DHT_{V_a} \leq 1,4666\%$ (SEAC) é de 4010 minutos.
- O maior intervalo ininterrupto com $DHT_{V_a} \leq 1,7536\%$ (SEBN) é bem maior, de 5490 minutos.
- O maior intervalo ininterrupto de tempo com $DHT_{V_c} \leq 4,7151\%$ (SEAC), por sua vez, é da ordem de 5620 minutos.
- O maior intervalo ininterrupto de tempo com $DHT_{V_a} \geq 1,4666\%$ (SEAC) é de 230 minutos.



- O maior intervalo ininterrupto com $DHT_{Va} \geq 1,7536\%$ (SEBN) é de 230 minutos.
- O maior intervalo ininterrupto de tempo com $DHT_{Vc} \geq 4,7151\%$ (SEMJ) é de 130 minutos.

As Figuras 11.13, 11.14 e 11.15 ilustram os gráficos com as probabilidades de ocorrência dos intervalos ininterruptos de tempo com $DHT_V \geq P95\%$ de cada um dos três locais.

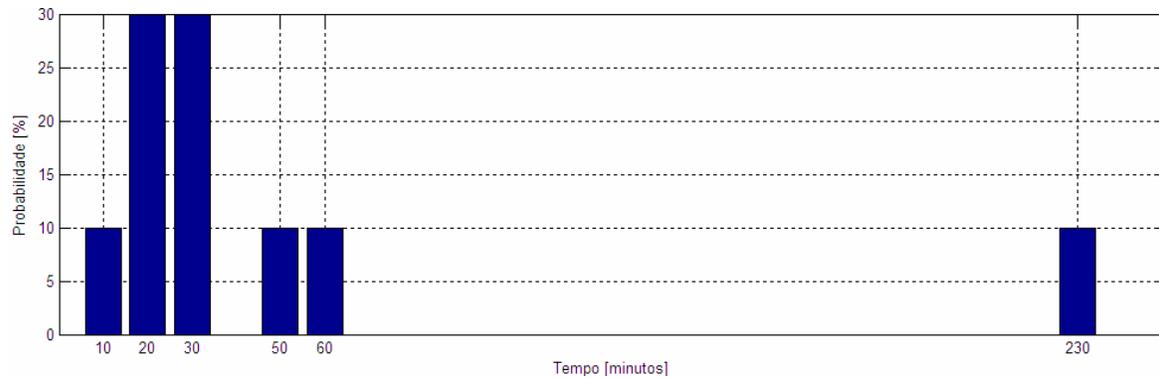


Figura 11.13 – Probabilidades de ocorrência dos intervalos ininterruptos de tempo com $DHT_{Va} \geq 1,4666\%$ (SEAC)

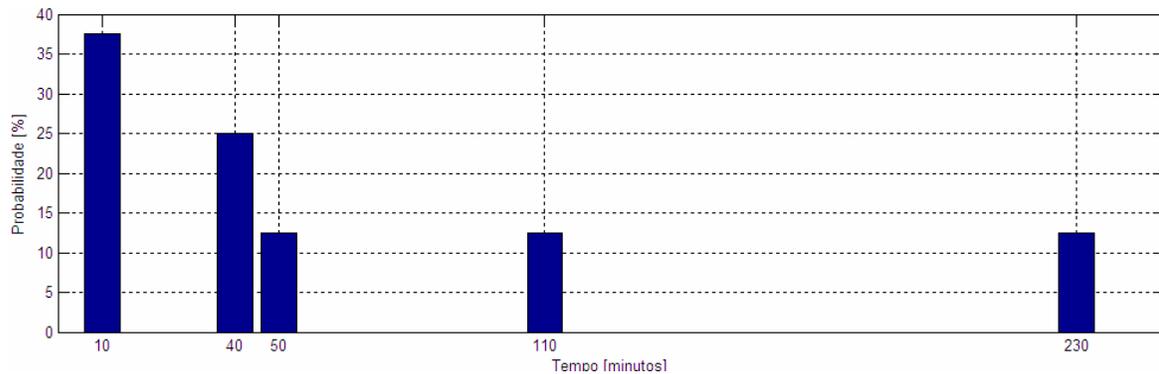


Figura 11.14 – Probabilidades de ocorrência dos intervalos ininterruptos de tempo com $DHT_{Va} \geq 1,7536\%$ (SEBN)

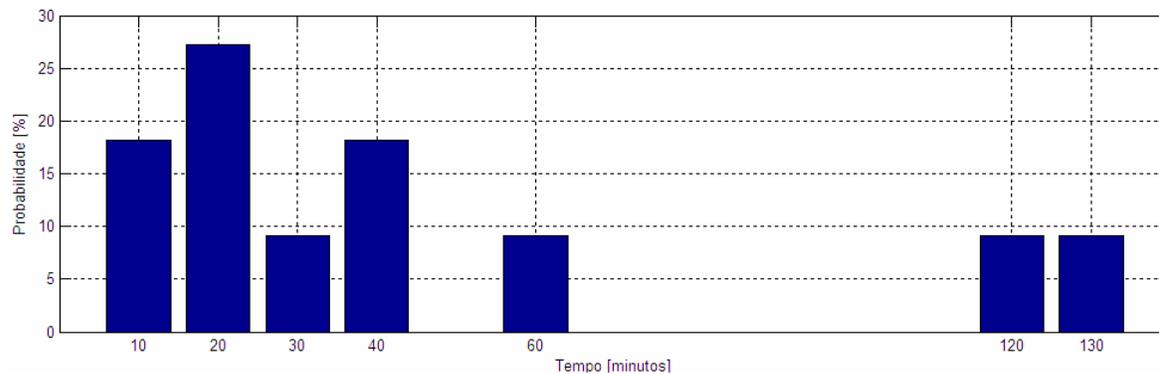


Figura 11.15 – Probabilidades de ocorrência dos intervalos ininterruptos de tempo com $DHT_{Vc} \geq 4,7151\%$ (SEMJ)



Nota-se a partir das Figuras 11.13, 11.14 e 11.15, que:

- Da Figura 11.13, obtêm-se que cerca de 70% dos intervalos ininterruptos de tempo com $DHT_V \geq 1,4666\%$ (SEAC), possuem até 30 minutos de duração. Ressalta-se a existência de um intervalo ininterrupto de 230 minutos com a $DHT_V \geq 1,4666\%$.
- A Partir Figura 11.14 observa-se que cerca de 60% dos intervalos ininterruptos de tempo com $DHT_V \geq 1,7536\%$, possuem até 40 minutos de duração. Nota-se também a existência de intervalos ininterruptos com a $DHT_V \geq 1,7536\%$ com cerca de 110 e 230 minutos de medição.
- A Partir Figura 11.15 observa-se que cerca de 70% dos intervalos ininterruptos de tempo com $DHT_V \geq 4,7151\%$, possuem até 40 minutos de duração. Ressalta-se se a existência de intervalos ininterruptos com a $DHT_V \geq 4,7151\%$ de 120 e 130 minutos.

As Figuras 11.16, 11.17 e 11.18 ilustram os gráficos com as probabilidades de ocorrência dos intervalos ininterruptos de tempo com $DHT_V \leq P95\%$. Nas três Figuras, utilizou-se um zoom para melhorar a visualização. Deste modo os máximos intervalos ininterruptos com $DHT_V \leq P95\%$, para cada uma das três subestações em estudo, não apareceram nos gráficos. São eles:

- Na SEAC: 4010 minutos com aproximadamente 10% probabilidade de ocorrência
- Na SEBN: 5490 minutos com aproximadamente 10% probabilidade de ocorrência
- Na SEMJ: 5620 minutos com aproximadamente 10% probabilidade de ocorrência

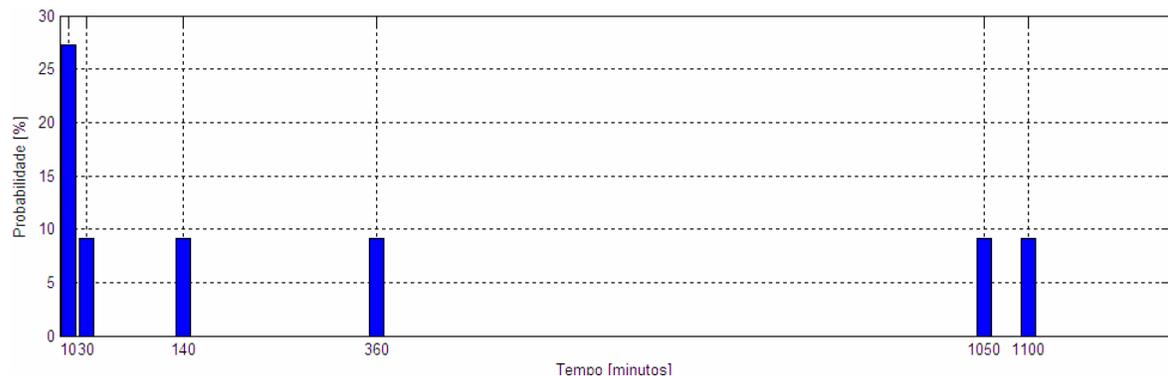


Figura 11.16 – Probabilidades de ocorrência dos intervalos ininterruptos de tempo com $DHT_V \leq 1,4666\%$ (SEAC)

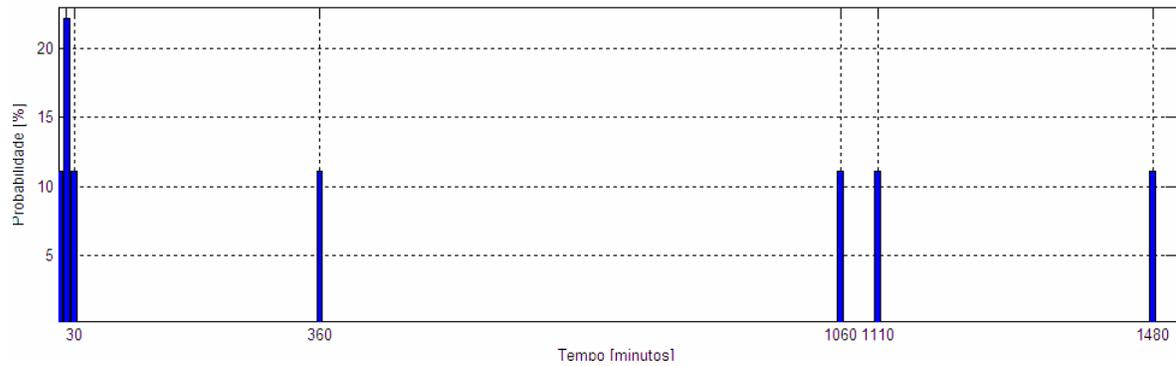


Figura 11.17 – Probabilidades de ocorrência dos intervalos ininterruptos de tempo com $DHT_V \leq 1,7536\%$ (SEBN)

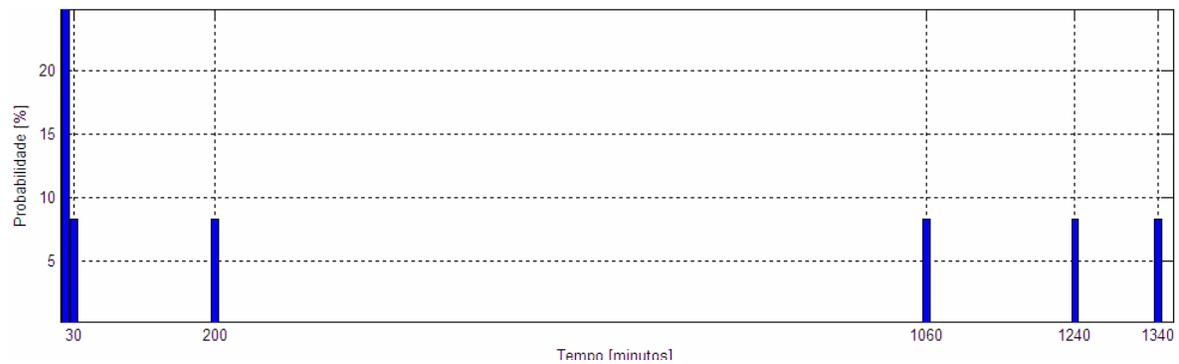


Figura 11.18 – Probabilidades de ocorrência dos intervalos ininterruptos de tempo com $DHT_V \leq 4,7151\%$ (SEMJ)

- Da Figura 11.16 (SEAC) tem-se que cerca de 35% dos intervalos ininterruptos de tempo com $DHT_V \leq 1,4666\%$, possuem até 30 minutos de duração. Ressalta-se a existência de três intervalos ininterruptos de tempo com $DHT_V \leq 1,4666\%$ com mais de 1000 minutos de duração. Um deles de cerca de 4000 minutos de duração, não foi mostrado por causa do zoom aplicado para melhorar a visualização.
- Da Figura 11.17 (SEBN) tem-se que cerca de 40% dos intervalos ininterruptos de tempo com $DHT_V \leq 1,7536\%$, possuem até 30 minutos de duração. Ressalta-se a existência de quatro intervalos ininterruptos de tempo com $DHT_V \leq 1,7536\%$ com mais de 1000 minutos de duração. Um deles de aproximadamente 5500 minutos de duração não foi mostrado por causa do zoom.
- Da Figura 11.18 (SEMJ) tem-se que cerca de 35% dos intervalos ininterruptos de tempo com $DHT_V \leq 4,7151\%$, possuem até 30 minutos de duração. Ressalta-se a existência de quatro intervalos ininterruptos de tempo com $DHT_V \leq 4,7151\%$ com



mais de 1000 minutos de duração. Um deles da ordem de 5500 minutos de duração, não foi mostrado por causa do zoom.

Evidencia-se, portanto, que para os 7 dias em estudo, os diversos valores de $DHT_V \geq P95\%$, para as três subestações em estudo, estão predominantemente, concentrados em intervalos com até 30 minutos de duração, espaçados por longos intervalos. Contudo, das análises gráficas dos valores destaca-se a existência de alguns intervalos longos e ininterruptos com $DHT_V \geq P95\%$.

11.1.4 QUALIFICAÇÃO

Deseja-se agora efetuar uma análise qualitativa a cerca das DHT_V medidas nas subestações SEAC, SEBN, e SEMJ. As Tabelas 11.2, 11.3 e 11.4 mostram os resultados disponibilizados no módulo de qualificação quando da análise dos sete dias de monitoração. A norma Européia EN 50160 não define limites para alta tensão.

Tabela 11.2 – Análise qualitativa das DHT_V medidas na SEAC

Norma ou Recomendação	Indicador (%)	Limite (%) estabelecido	Pontos acima do Limite	Tempo acima do limite (%)	Tempo acima do limite (min)
IEC 555-2	1,5592	3	0	0	0
IEEE 519	Cada valor medido	2,5%	0	0	0
Européia EN50160	-	-	-	-	-
Africana NRS 048	1,5295	3	0	0	0
Peruana NTCSE	1,4666	3	0	0	0
PR Submódulo 2.2	1,5295	3	0	0	0
PRODIST	1,5295	3	0	0	0

Tabela 11.3 – Análise qualitativa das DHT_V medidas na SEBN

Norma ou Recomendação	Indicador (%)	Limite (%) estabelecido	Pontos acima do Limite	Tempo acima do limite (%)	Tempo acima do limite (min)
IEC 555-2	1,8847	3	0	0	0
IEEE 519	Cada valor medido	2,5%	0	0	0
Européia EN50160	-	-	-	-	-
Africana NRS 048	1,8395	3	0	0	0
Peruana NTCSE	1,7536	3	0	0	0
PR Submódulo 2.2	1,8395	3	0	0	0
PRODIST	1,8395	3	0	0	0

Tabela 11.4 – Análise qualitativa das DHT_V medidas na SEMJ

Norma ou Recomendação	Indicador (%)	Limite (%) estabelecido	Pontos acima do Limite	Tempo acima do limite (%)	Tempo acima do limite (min)
IEC 555-2	5,0011	3	117	11,6071	1170
IEEE 519	Cada valor medido	2,5	121	12,004	1210
Européia EN50160	-	-	-	-	-
Africana NRS 048	4,8428	3	117	11,6071	1170
Peruana NTCSE	4,7151	3	117	11,6071	1170
PR Submódulo 2.2	4,8428	3	117	11,6071	1170
PRODIST	4,8428	3	117	11,6071	1170

A partir das Tabelas 11.2 e 11.3 observa-se que, nas subestações SEAC e SEBN, em nenhum momento foram encontrados valores de DHT_{Va} superiores aos limites estabelecidos pelas normas / recomendações em apreciação. Nota-se da Tabela 11.4 que a tensão medida na SEMJ apresenta nível de distorção harmônica elevado, não obedecendo aos requisitos exigidos por nenhuma das normas / recomendações em estudo. Em cerca de 12% do intervalo semanal encontram-se DHT_{Vc} acima dos limites estabelecidos. As Figuras 11.19, 11.20 e 11.21 apresentam, respectivamente, os gráficos com a distribuição de probabilidade para as DHT_V medidas nos locais em estudo.

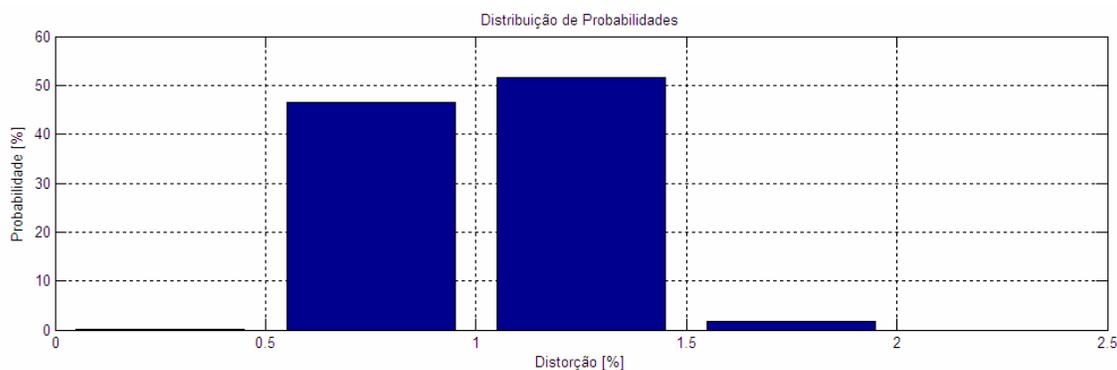


Figura 11.19 – Distribuição de probabilidades (SEAC)

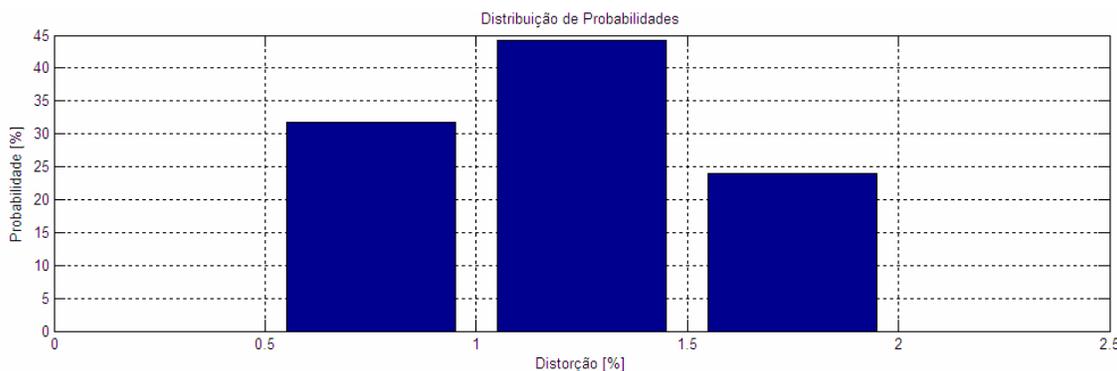


Figura 11.20 – Distribuição de probabilidades (SEBN)

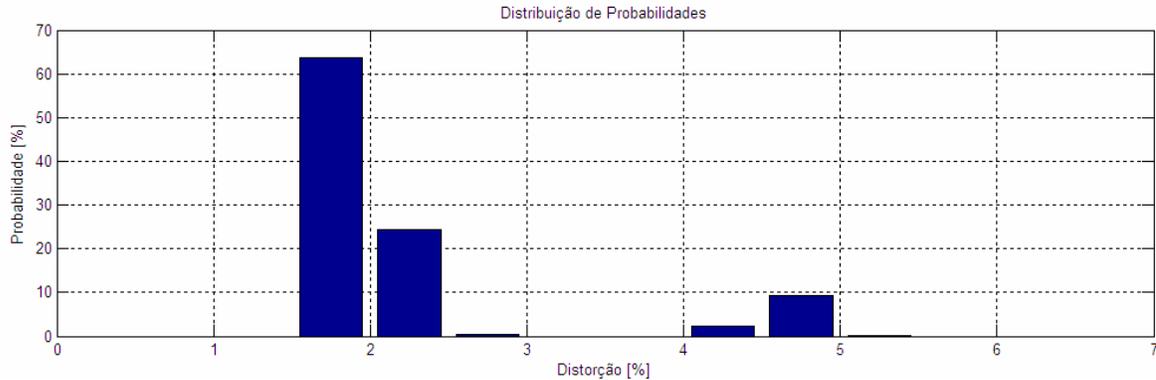


Figura 11.21 – Distribuição de probabilidades (SEMJ)

Nota-se das Figuras 11.19 e 11.20 que a distribuição de probabilidades das distorções medidas na SEAC e na SEBN são semelhantes. Ambas são aproximadamente simétricas e concentram a maior parte das distorções na faixa de 1 a 1,5%. A Figura 11.21 mostra uma distribuição de probabilidades atípica para as DHT_{Vc} captadas na SEMJ. A maior faixa de valores é de 1,5 a 2%, com probabilidade de ocorrência de aproximadamente 60%. Ressalta-se que cerca de 12% das distorções medidas ocorrem entre 4 e 5%, sendo esta a faixa onde se encontram os valores acima dos limites. É interessante notar que não há valores de DHT_{Vc} na porção de 3 a 4%, indicando que o aumento no valor das distorções ocorre de forma abrupta.

As Figuras 11.22, 11.23 e 11.24 apresentam os gráficos com a distribuição acumulada inversa das DHT_V mensuradas nas três subestações.

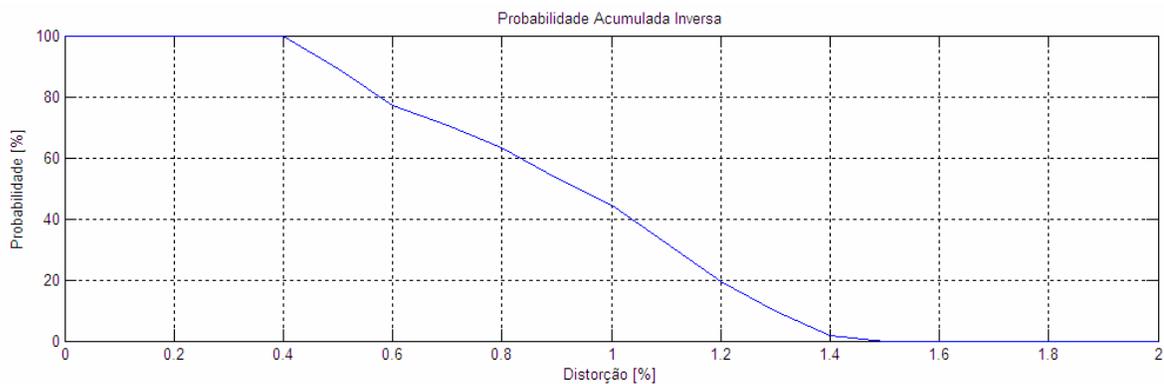


Figura 11.22 – Probabilidade acumulada inversa (SEAC)

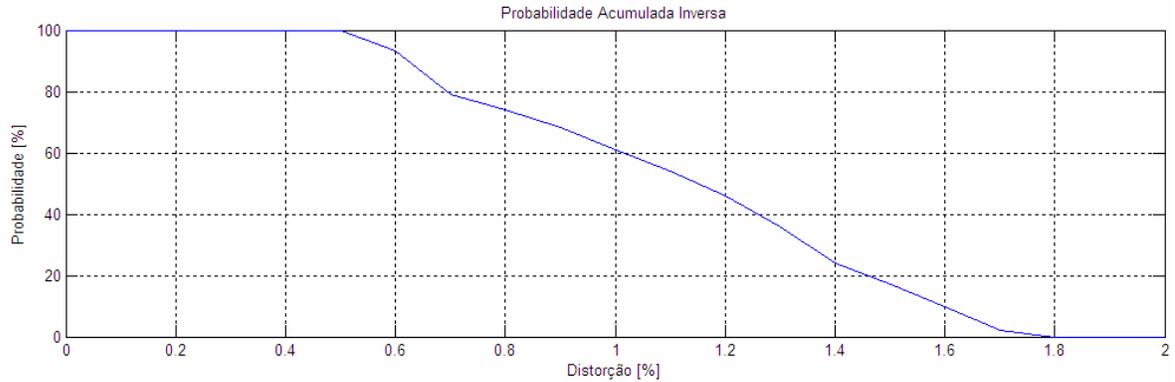


Figura 11.23 – Probabilidade acumulada inversa (SEBN)

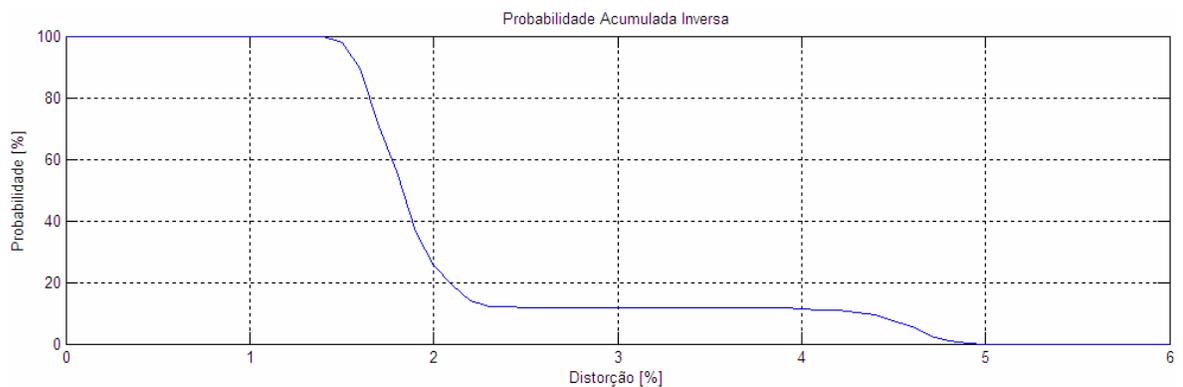


Figura 11.24 – Probabilidade acumulada inversa (SEMJ)

As Figuras 11.22 e 11.23 mostram curvas de distribuição acumulada inversa com comportamentos correspondentes. Elas se diferem no fato de que a primeira curva ilustra uma ocorrência mínima de distorções com valor acima de 1,4% e na segunda verifica-se que 20% dos valores medidos superam 1,4%. O perfil de probabilidade acumulada inversa ilustrado na Figura 11.24 (SEMJ) é incomum, de modo que a probabilidade de ocorrer valores de DHT_{Vc} superiores a aproximadamente 2,3% é praticamente igual à de ocorrer valores acima de 4%. Nota-se ainda uma ocorrência praticamente nula de distorções com valor maior do que 5%.

Dado o comportamento atípico das DHT_{Vc} mensuradas na SEMJ, é relevante analisar as Distorções Harmônicas Individuais de Tensão (DHI_V). Na campanha de medição efetuada, mediu-se até a 25ª DHI_V de cada fase. A Tabela 11.5 mostra resultados disponíveis no módulo de Qualificação do aplicativo quando da análise das DHI_{Vc} . Na Tabela, “Ind.” significa indicador e “Lim.”, Limite.

Tabela 11.5 – Análise das DHI_c da SEMJ

DHI_c	IEC 555 - 2		Sul-Africana NRS 048		Peruana NTCSE		P.R. Sub. 2.2		PRODIST Mod. 08	
	Ind.	Lim.	Ind.	Lim.	Ind.	Lim.	Ind.	Lim.	Ind.	Lim.
2	0,09	1,5	0,08	1,5	0,07	1,5	0,08	1	0,08	1
3	0,28	2	0,25	2	0,21	1,5	0,25	2	0,25	2
4	0,08	1	0,07	1	0,06	1	0,07	1	0,07	0,5
5	1,15	2	1,10	2	1,08	2	1,10	2	1,10	2,5
6	0,02	0,5	0,02	0,5	0,01	0,5	0,02	1	0,02	0,5
7	0,34	2	0,30	2	0,29	2	0,30	2	0,30	2
8	0,02	0,4	0,01	0,4	0,01	0,2	0,01	0,5	0,01	0,5
9	0,02	1	0,01	1	0,01	1	0,01	1,5	0,01	1
10	0,02	0,4	0,01	0,4	0,01	0,2	0,01	0,5	0,01	0,5
11	0,25	1,5	0,19	1,5	0,16	1,5	0,19	1,5	0,19	1,5
12	0,02	0,2	0,01	0,2	0,01	0,2	0,01	0,5	0,01	0,5
13	0,33	1,5	0,21	1,5	0,17	1,5	0,21	1,5	0,21	1
14	0,02	0,2	0,01	0,2	0,01	0,2	0,01	1	0,01	0,5
15	0,09	0,3	0,08	0,3	0,08	0,3	0,08	0,5	0,08	0,5
16	0,02	0,2	0,01	0,2	0,01	0,2	0,01	1	0,01	0,5
17	4,61	1	4,41	1	4,30	1	4,41	0,5	4,41	1
18	0,02	0,2	0,01	0,2	0,01	0,2	0,01	1	0,01	0,5
19	1,81	1	1,68	1	1,63	1	1,68	0,5	1,68	1
20	0,02	0,2	0,01	0,2	0,2	0,2	0,01	0,5	0,01	0,5
21	0,02	0,2	0,01	0,2	0,2	0,2	0,01	1	0,01	0,5
22	0,02	0,2	0,01	0,2	0,2	0,2	0,01	0,5	0,01	0,5
23	0,03	0,7	0,01	0,7	0,7	0,7	0,01	1	0,01	1
24	0,02	0,2	0,01	0,2	0,2	0,2	0,01	0,5	0,01	0,5
25	0,02	0,7	0,02	0,7	0,7	0,7	0,02	1	0,02	1

A Tabela 11.5 revela que a distorção harmônica de ordem 19 e, em especial, a de ordem 17 encontram-se acima dos limites impostos. Nota-se que os indicadores das DHI_{V17} e DHI_{V19} são superiores aos limites estipulados. Da análise numérica contida no programa constata-se que a DHI_{V17} encontra-se acima do limite da norma IEEE – 552 durante 84% do tempo total de medição e a DHI_{V19} ultrapassa o limite em 11% do tempo.

Assim, faz-se necessária a adequação da tensão de fornecimento da SEMJ às normas / recomendações. Para tanto, pode-se, por exemplo, instalar um filtro de harmônicas de ordem 17 (1020 Hz) e 19 (1140 Hz), ou interromper uma possível carga geradora das distorções. A



Figura 11.25 apresenta o gráfico ponto a ponto das correntes de linha medidas na SEMJ. As Figuras 11.26 e 11.27 mostram, respectivamente, o comportamento das DHI_{V17} e DHI_{V19} .

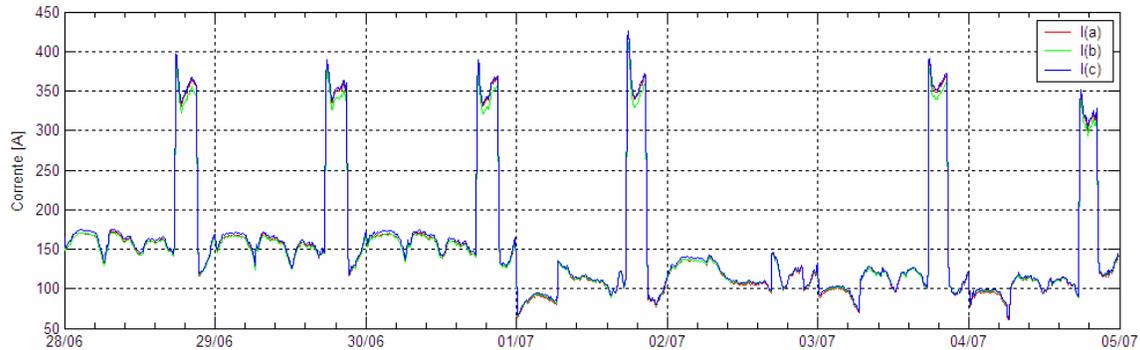


Figura 11.25 – Gráfico ponto a ponto das correntes de linha medidas na SEMJ

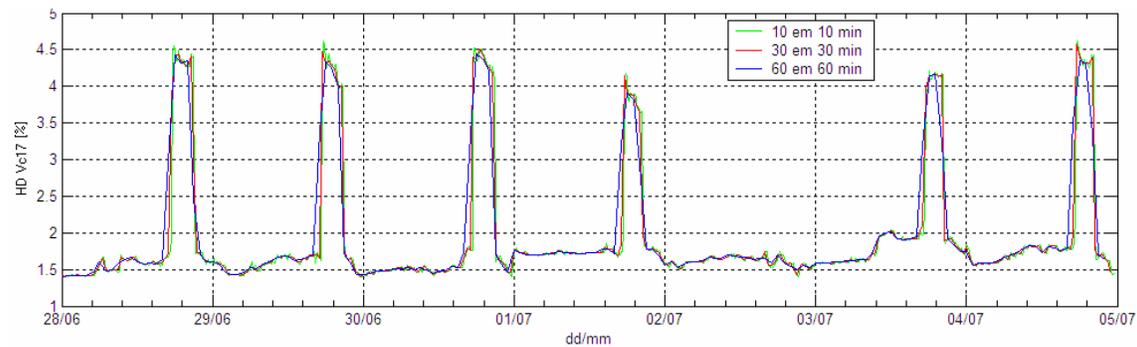


Figura 11.26 – Comportamento das DHI_{V17} na SEMJ

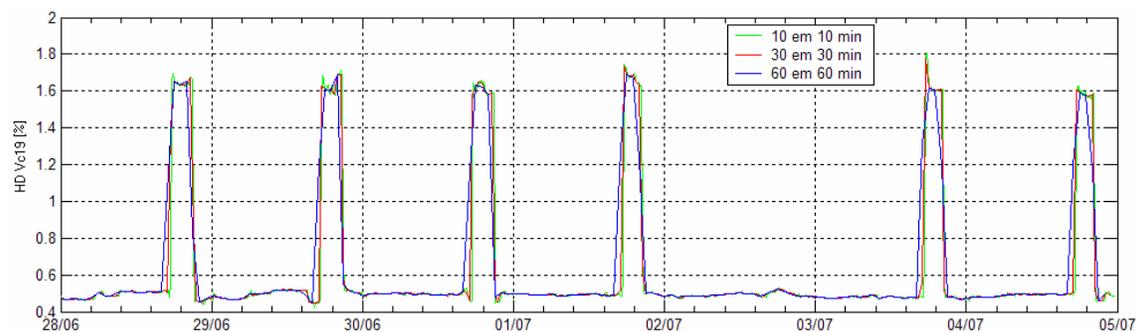


Figura 11.27 – Comportamento das DHI_{V19} na SEMJ

Nota-se das Figuras 11.25, 11.26 e 11.27 que há uma relação direta entre alguma carga que entra no final do dia, e o surgimento das distorções harmônicas individuais de ordem 17 e 19, que são as responsáveis pela deterioração da tensão. Somente no dia 02/07, um domingo, quando não ocorre o aumento da corrente, as DHI_{V17} e DHI_{V19} permaneceram, respectivamente, na faixa de 1,5% e 0,5%. Vale ressaltar que uma nova campanha de medições deve ser realizada na SEMJ para verificar se, de fato, a tensão fornecida encontra-se distorcida.



11.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir das análises efetuadas, percebe-se que o comportamento das distorções harmônicas de tensão medidas nas subestações SEAC e SEBN são semelhantes. Constatou-se, nessas subestações, a ocorrência de similaridade entre as fases, entre os dias e entre períodos de um dia. Assim, pode-se adotar, por exemplo, os valores de DHT_V da fase a, medidos de 10 às 18:00 horas do dia 28 de junho como representativos de todo o banco de dados. As DHT_V captadas na SEMJ apresentam um perfil completamente distinto das DHT_V medidas nas outras duas subestações. Verificou-se na SEMJ a ocorrência de similaridades entre as fases e entre os dias de medição e a inexistência entre similaridade entre períodos de um dia.

Analisou-se também a distribuição no tempo das amostras com valores superiores ao indicador P95%. A metodologia utilizada na análise, permite ao fabricante, de posse dos níveis máximos de suportabilidade às DHT_V e em função do tempo de exposição às mesmas, atestar se o seu produto pode ou não ser utilizado, sem riscos de danos, causados por um sistema como o em estudo.

Quanto à qualificação dos dados medidos, utilizaram-se os limites das principais normas / recomendações nacionais e internacionais, e verificou-se que a subestação SEMJ esteve com valores de distorção acima dos limites aceitos, fato que não foi verificado nas demais.

No próximo capítulo será efetuada a conclusão deste trabalho como um todo.



CAPÍTULO 12

CONCLUSÃO

O presente capítulo pretende tecer as conclusões obtidas ao longo deste trabalho, que apresentou uma ferramenta computacional para análise, quantificação e qualificação das distorções harmônicas de tensão.

O capítulo 1 contextualizou a questão da qualidade da energia, destacando a real importância da preocupação que atualmente tem sido dedicada ao assunto. Verificou-se, devido ao surgimento de uma nova geração de equipamentos eletrônicos, a necessidade de se estabelecerem padrões e limites para os fenômenos relacionados a QEE, tendo em vista as implicações técnicas e econômicas de um fornecimento de energia inadequado. Em especial, com relação às distorções harmônicas, frisou-se que mesmo com a normatização vigente, há questões a serem debatidas, quanto aos procedimentos para medição e à adequação dos limites impostos. Evidenciou-se também a importância de mecanismos que auxiliem no tratamento dos dados oriundos de medições.

No capítulo 2, foram abordados os aspectos gerais sobre os distúrbios relacionados à qualidade da energia elétrica. Destacaram-se não somente os fundamentos teóricos de cada tipo de transtorno, mas também suas causas e efeitos.

Para as distorções harmônicas foi dedicado o capítulo 3, onde foram descritos os fundamentos matemáticos relevantes para o entendimento deste distúrbio. Foram abordados aspectos práticos do fenômeno, como fontes geradoras e prejuízos causados em equipamentos. Apresentaram-se também os índices utilizados para qualificação das distorções harmônicas de tensão, definidos pelas normas vigentes. Foi feito ainda um apanhado dessas normas e recomendações mundialmente conhecidas, ressaltando os procedimentos para obtenção do indicador a ser comparado com seus respectivos limites. Dentro do exposto, consignou-se que, nestes documentos, nada se tem registrado quanto aos fundamentos e definições estatísticas relacionadas aos métodos utilizados para o estabelecimento dos limites. Observou-se também a real necessidade de uma ferramenta computacional, que baseada nos conceitos estatísticos, permita o cálculo do indicador representativo a todas as amostras.



O capítulo 4 introduziu o objeto deste trabalho, denominado “Programa de Qualidade da Energia Elétrica – Módulo de Análise de Distorções Harmônicas”, um aplicativo simples e objetivo, valendo-se de recursos gráficos e estatísticos. Os fundamentos matemáticos utilizados no programa também foram descritos, bem como uma visão geral sobre cada módulo constituinte. Percebeu-se a necessidade de um estudo de caso para atestar a aplicabilidade do *software*, tendo sido escolhida a subestação SE02 da CEB, para as análises realizadas nos capítulos de 5 a 10.

Prosseguindo-se na descrição do aplicativo, o módulo de análise de tensão e carga foi exposto no quinto capítulo. O estudo da tensão na SE02 apresentou resultados satisfatórios, com a tensão permanecendo dentro dos limites adequados em todo o período de medição. Verificou-se que as tensões se mantiveram bem equilibradas com respeito à magnitude, com variação máxima entre as médias aritméticas de apenas 0,32%, mesmo valor calculado para as médias quadráticas. Da análise do desvio padrão concluiu-se que a tensão apresenta pouca variação em torno da média.

No estudo do perfil de corrente e potência, constatou-se a grande diferença de carga entre os dias úteis e o fim de semana. O máximo de corrente registrado no fim de semana foi de apenas 56,3% do pico verificado em dias úteis. Notou-se também a grande variação de carga ao longo de um dia útil, com o desvio padrão representando 36,6% da média aritmética. Percebe-se com isso a boa estabilidade da tensão na subestação, capaz de suportar essas variações sem sair em momento algum da faixa de valores adequados. Apurou-se que o fator de potência da instalação mostrou-se bem próximo da unidade. Conclui-se, das análises realizadas no módulo, que este constitui um instrumento importante, visto que fornece informações relevantes sobre as características gerais do sistema analisado, podendo indicar possíveis causas de distorções harmônicas.

O capítulo 6 exibiu o módulo de análise da frequência de aquisição de dados, realizando uma comparação entre as amostras tomadas em três diferentes frequências: 10, 30 e 60 minutos. Os perfis mostrados na análise gráfica mostraram-se muito semelhantes, fato confirmado na análise estatística. Os valores encontrados para média aritmética foram praticamente idênticos nas três taxas de aquisição, tendo entre eles a variação máxima de 0,04%. A média quadrática foi exatamente a mesma nas frequências analisadas. Os valores de desvio padrão, P95% e P99% apresentaram pouca variação, concluindo-se que qualquer uma das três frequências de aquisição pode ser utilizada para reproduzir o banco de dados. O módulo mostrou-se útil por



oferecer ao usuário, em caso de necessidade, a possibilidade de trabalhar com menos dados, sem contudo descaracterizar o local em estudo.

No Capítulo 07 apresentaram-se as características do módulo de Similaridade entre Fases. Buscou-se avaliar no estudo de caso a semelhança ou não entre as três fases de DHT_V medidas na subestação SE02 da CEB. A variação máxima da média aritmética e do P95%, entre as fases foi, respectivamente, de 6,2% e 6%. Observou-se um comportamento correspondente entre as três fases. A partir da verificação de que a DHT_{V_b} , apesar de similar, se manteve superior às outras, decidiu-se empregá-la como representativa às demais.

O Capítulo 08 abordou a estrutura dos módulos de Similaridade entre Dias e entre Períodos de um Dia. Comprovou-se a semelhança entre as DHT_V medidas diariamente a partir de análises gráficas e discussões das médias, dos desvios padrão e da análise de P95% entre os dias na SE02. Notou-se ainda a inexistência de similaridade entre diferentes intervalos de um dia. Percebeu-se que o período de 10:00 às 18:00 horas apresentou os valores máximos de DHT_V . Assim, caso esteja-se buscando obter o perfil das DHT_V do ambiente em estudo, a captação das DHT_V da fase b em um dia útil é suficiente.

A estrutura do módulo de Análise de Distribuição no Tempo foi exposta no Capítulo 09. Apresentou-se uma metodologia para análise da distribuição no tempo das amostras da SE02, com valores superiores à média quadrática e aos indicadores P95% e P99%. Constatou-se para os 14 dias em estudo que:

- Os diversos valores de $DHT_V \geq P95\%$ (2,956%) encontraram-se, predominantemente, concentrados em períodos de 30 minutos de duração, espaçados por longos intervalos. Verificou-se a existência de intervalos ininterruptos com $DHT_V \geq 2,956\%$ com 120, 130 e 330 minutos de duração.
- Durante todo o intervalo de medição observou-se apenas três intervalos com $DHT_V \geq P99\%$ (3,0649%), sendo que a duração desses foi de 20, 40 e 80 minutos.
- Os valores de DHT_V maiores do que a média quadrática (2,302%) encontraram-se em 32% do tempo total em intervalos de média duração, cerca de 70 minutos. Destacou-se a ocorrência de intervalos ininterruptos com $DHT_V \geq 2,302\%$ distribuídos entre 500 e 700 minutos de duração.



Conclui-se que este tipo de análise pode ser usada por fabricantes de equipamentos que, de posse dos níveis máximos de suportabilidade às DHT_V em função do tempo de exposição às mesmas, atestar se o seu produto pode ou não ser utilizado em sistemas como o estudado.

No Capítulo 10 apresentou-se o módulo de Qualificação do aplicativo. A partir dele efetuou-se uma avaliação dos dados oriundos das medições na SE02, quanto à adequação aos limites estabelecidos pelas principais normas e recomendações nacionais e internacionais. Constatou-se que a tensão medida nesta subestação é adequada no que tange às DHT_V . O módulo mostrou sua relevância, por permitir uma avaliação imediata da conformidade do banco de dados com as normas, sem que o usuário precise fazer qualquer tipo de programação ou cálculo.

No Capítulo 11 utilizou-se a ferramenta desenvolvida para analisar a distorção harmônica de tensão em três subestações do sistema CEB, sendo elas a SEAC, a SEBN e a SEMJ. Verificou-se:

- A existência de similaridade entre as fases de DHT_V e entre dias em todas as Subestações.
- Similaridade entre períodos de um dia apenas para as DHT_V medidas nas SEAC e SEBN.
- Analisou-se a distribuição no tempo das amostras com valores superiores ao indicador P95% nos três locais em estudo.
- A partir da análise qualitativa, constatou-se que apenas a tensão medida na SEMJ não se mostrou adequada em relação aos requisitos exigidos pelas principais normas e recomendações.

Através das facilidades implementadas, este programa computacional se constitui em uma significativa contribuição para a adequada qualificação dos sistemas sob avaliação. O conhecimento do comportamento de fenômenos como distorções harmônicas culmina em ações que poderão minimizar os danosos efeitos dos mesmos sobre o sistema de potência. Neste propósito, o trabalho revela-se um instrumento de grande utilidade nos processos de monitoração e acompanhamento da rede, cada vez mais necessários graças ao aparecimento de uma legislação voltada para a qualidade da energia elétrica.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST – Módulo 08: Qualidade da Energia Elétrica.** Documento: PND1A-DE8-0880. Brasília, 2006.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução Nº 505.** Brasília, 26 de novembro de 2001.

ALMEIDA, W. G.; FREITAS, F. D. **Circuitos Polifásicos.** 1. ed. Brasília: FINATEC – Fundação de Empreendimentos Científicos e Tecnológicos, 1995.

AMBONI, G. P. M.; **Ferramenta Computacional para Quantificação e Qualificação das Distorções Harmônicas.** Projeto Final de Graduação – Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, 2003.

BOYCE, W. E.; DIPRIMA, R. C. **Equações Diferenciais Elementares e Problemas de Valores de Contorno.** 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

BRONZEADO, H. **Qualidade da Energia Elétrica – Conceitos, Problemas e Soluções.** Maio. 2000.

CARVALHO, P. L. **Uma Contribuição ao Estudo da Depressão de Tensão.** Dissertação de Mestrado – Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Itajubá, 1997.

CONSORTIUM FOR ELECTRIC INFRASTRUCTURE TO SUPORT A DIGITAL SOCIETY – CEIDS. **The Cost of Power Disturbances to Industrial and Digital Economy Companies.** Palo Alto, Califórnia, E.U.A., June. 2001.

CUNHA, A. M. **As Novas Cores da Linha Branca: os Efeitos da Desnacionalização da Indústria Brasileira de Eletrodomésticos nos Anos 1990.** Tese de Doutorado – Instituto de Economia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

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

DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN, M. F.; BEATY, H. W. **Electrical Power Systems Quality.** McGraw-Hill, New York, E.U.A., 1996.



GAMA, P. H. R.; OLIVEIRA, A. **Conservação de Energia e sua Relação com a Qualidade da Energia**. In: XV SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, Foz do Iguaçu, 1999.

GOMES, R.J.R.; BRASIL, D.O.C.; E MEDEIROS, J. R. **Power Quality Management Issues over the Brazilian Transmission System**. In: 10TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON HARMONICS AND QUALITY OF POWER. On pages: 582 – 586 vol.2, 2002.

IRWIN, J. D. **Análise de Circuitos em Engenharia**, 4. ed. São Paulo: Pearson Education, 2000.

LELES, A. **Uma Contribuição Estatística para a Qualificação e Quantificação da Distorção Harmônica Equivalente em Sistemas Elétricos de Potência**. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 1997.

MARTINS, J. S.; AFONSO, J. L. Qualidade da Energia Elétrica. **Revista o Electricista**, n. 9 p. 66-71, 2004.

MEHL, E. L. M. **Qualidade da Energia Elétrica**. Curso de pós-graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

MEYER, P. L. **Probabilidade: Aplicações à Estatística**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1983.

OLIVEIRA, M. A. **Qualidade da Energia Elétrica**. Departamento de Engenharia Elétrica, Faculdade de Tecnologia – Universidade de Brasília, 2005.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO – ONS. **Procedimentos de Rede, Sub Módulo 2.2: Padrões de Desempenho da Rede Básica e Requisitos Mínimos para suas Instalações**, 2002.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA – UFU. **Contribuições para a Normalização da Qualidade da Energia Elétrica. Harmônicos e Desequilíbrios nas Redes Elétricas**. Relatório Parcial 2 – Estado da Arte, 2000.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA – UFU. **Contribuições para a Normalização da Qualidade da Energia Elétrica. Harmônicos e Desequilíbrios nas Redes Elétricas**. Relatório Parcial 3 – Protocolos de Medição, 2000.