

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**PROJETO E ANÁLISE DE UM FILTRO PASSIVO DE  
CORRENTES HARMÔNICAS  
PARA UM COMPUTADOR DE USO PESSOAL**

**RENATO ANTÔNIO DE OLIVEIRA  
TERCIUS MURILO QUITO**

**ORIENTADOR: MAURO MOURA SEVERINO**

**MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
ELÉTRICA**

**PUBLICAÇÃO: ENE-2/2005**

**BRASÍLIA / DF: MARÇO / 2006**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**PROJETO E ANÁLISE DE UM FILTRO PASSIVO DE  
CORRENTES HARMÔNICAS  
PARA UM COMPUTADOR DE USO PESSOAL**

**RENATO ANTÔNIO DE OLIVEIRA  
TERCIUS MURILO QUITO**

PROJETO FINAL DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

APROVADA POR:

---

**MAURO MOURA SEVERINO, Mestre, UNB  
(ORIENTADOR)**

---

**FRANCISCO DAMASCENO FREITAS, Doutor, UNB  
(EXAMINADOR INTERNO)**

---

**MARCO AURÉLIO GONÇALVES DE OLIVEIRA, Doutor, UNB  
(EXAMINADOR INTERNO)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 03 DE ABRIL DE 2006

## FICHA CATALOGRÁFICA

OLIVEIRA, RENATO ANTÔNIO DE &  
QUITO, TERCIUS MURILO

**Projeto e análise de um filtro passivo de correntes harmônicas para um computador de uso pessoal**  
[Distrito Federal] 2006.

xiv, ., 297 mm (ENE/FT/UnB, Engenharia Elétrica, 2006). Monografia de Graduação –  
Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Elétrica.

1. Filtro passivo  
I. ENE/FT/UnB.

2. correntes harmônicas  
II. Título

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

OLIVEIRA, RENATO ANTÔNIO DE e QUITO, TERCIUS MURILO (2006). Projeto e análise de um filtro passivo de correntes harmônicas para um computador de uso pessoal. (Projeto Final de Graduação), Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF,

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Renato Antônio de Oliveira & Tercius Murilo Quito

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Projeto e análise de um filtro passivo de correntes harmônicas para um computador de uso pessoal.

GRAU: Engenheiro Eletricista

ANO: 2006

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste Projeto Final de Graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de graduação pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

Renato Antônio de Oliveira  
Rua 19 Qd. 01 Lt. 01 Setor Norte  
CEP 72813-050 – Luziânia – GO - Brasil

---

Tercius Murilo Quito  
Condomínio Estância Jardim Botânico, conjunto C, casa 27. Lago Sul  
CEP 71680-365 – Brasília – DF – Brasil

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem ao orientador, Mestre Mauro Moura Severino, por todo o conhecimento transmitido e por toda a presteza e cordialidade ao longo do projeto. Aos professores Anésio de Leles Ferreira Filho, Francisco Assis de Oliveira Nascimento e Marco Aurélio Gonçalves de Oliveira, pelo apoio. Ao engenheiro Fritz Walter Mohn, pelo incentivo. Ao Cícero e Silmar, pela presteza e ajuda. Agradecem também aos amigos e companheiros Edson Mintsu, Marcos Garcia, Tiago Alves e Thompson Rolim pela ajuda prestada nas necessidades do projeto.

## **RESUMO**

O presente trabalho aborda a análise, o projeto e a fabricação de um filtro passivo de correntes harmônicas. Após um breve estudo dos principais conceitos de qualidade da energia elétrica, foram realizadas algumas medições das distorções harmônicas na rede elétrica de um edifício com grande quantidade de computadores.

Com a base de dados gerada nessas medições, foram realizados alguns ensaios no laboratório de qualidade da energia elétrica com a intenção de criar um modelo para análise computacional. A partir dos resultados encontrados e das simulações realizadas, foram definidas as características desejadas para o filtro passivo a ser construído como protótipo.

Os resultados encontrados durante o teste do filtro série não foram satisfatórios, levando a implementação de um filtro passivo em derivação. Os dados obtidos nesse caso foram mais próximos do esperado. Todos os procedimentos realizados, os resultados obtidos e suas análises estão devidamente explicadas ao longo deste trabalho.

## ÍNDICE

Capítulo	Página
<b>1 – INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>2</b>
<b>2.1–REVISÃO MATEMÁTICA</b>	2
2.1.1– <i>Séries de Fourier</i>	2
<b>2.2–NOÇÕES FUNDAMENTAIS</b>	3
2.2.1– <i>Regime Senoidal</i>	3
2.2.1.1–Valor Médio e Valor Eficaz	4
2.2.1.2–Potências (instantânea, ativa, reativa, de distorção)	4
2.2.1.3–Fator de potência	7
2.2.1.4–Impedância complexa	7
2.2.2– <i>Regime Não-Senoidal</i>	8
2.2.2.1– Harmônicas	8
2.2.2.2–Valor médio e Eficaz	9
2.2.2.3–Potências (instantânea, ativa, reativa, de distorção)	9
2.2.2.4–Fator de potência e fator de deslocamento	12
2.2.2.5–Seqüência de fases	13
2.2.2.6–Impedância	14
<b>2.3–QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA</b>	14
2.3.1– <i>Definição geral</i>	14
2.3.2– <i>Tipos de distúrbios</i>	15
2.3.2.1–Perturbações na amplitude do sinal	15
2.3.2.2 - Perturbações na frequência de onda do sinal	18
2.3.2.3–Desequilíbrios de tensão ou corrente nos sistemas trifásicos	17
2.3.2.4–Perturbações na forma de onda do sinal	17
2.3.3– <i>Cargas geradoras de distúrbios</i>	18
2.3.3.1–Cargas lineares	18
2.3.3.2–Cargas não-lineares	19
<b>2.4–DISTORÇÕES HARMÔNICAS</b>	21
2.4.1– <i>Conseqüências</i>	22
2.4.2– <i>Índices de distorção harmônica</i>	24
2.4.3– <i>Soluções</i>	25
<b>2.5–FILTROS</b>	26

2.5.1–Passivos	26
2.5.2–Ativos	28
<b>3 – IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA</b>	<b>32</b>
<b>4 – ENSAIOS E MEDIÇÕES</b>	<b>35</b>
4.1 – DADOS OBTIDOS	37
4.2 – ANÁLISE DOS DADOS	38
<b>5 – PROJETO DO FILTRO</b>	<b>43</b>
5.1 – DESENVOLVIMENTO DO CIRCUITO MODELO NO PSPICE	43
5.1.1 – Representação da carga-não-linear	43
5.1.2 – Representação da impedância da linha	44
5.1.3 – Representação da fonte geradora de tensão	46
5.2 – PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO E SELEÇÃO DO FILTRO DE HARMÔNICOS	46
5.2.1 – Projeto e análise de um filtro passa-baixo de 3° ordem	47
5.2.2 – Projeto e análise de um filtro passa-baixo de 7° ordem com um filtro em derivação sintonizado de 3° ordem	50
5.2.3 – Projeto e análise de um filtro passa-baixo de 7° ordem com filtros em derivação sintonizados de 3° e 5° ordem	52
5.2.4 – Projeto e análise de um filtro em derivação sintonizado em 3°, 5°, 7° e 9° ordem	54
5.2.5 – Projeto e análise de um filtro série sintonizado em 3° e 7° ordem	55
5.2.6 – Projeto e análise de um filtro série sintonizado em 3°, 5° e 7° ordem.	56
5.2.7 – Projeto e análise de um filtro série sintonizado em 3°, 5° e 7° ordem com capacitor em paralelo.	57
5.2.8 – Escolha da configuração do filtro a ser implementado.	59
5.3 – IMPLEMENTAÇÃO DOS FILTROS PASSIVOS DE CORRENTES HARMÔNICAS	60
5.3.1 – Implementação do filtro série sintonizado em 3°, 5° e 7° ordem com capacitor em paralelo	60
5.3.2 – Implementação do filtro em derivação sintonizados de 3° e 5° ordem com um indutor na entrada	65
<b>6 – RESULTADOS DA UTILIZAÇÃO DO FILTRO</b>	<b>69</b>
6.1- PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	69
6.2 – RESULTADOS OBTIDOS	71
6.3 – ANÁLISE DOS RESULTADOS	71
6.3.1 – ANÁLISE DO FILTRO SÉRIE	72
6.3.2 – ANÁLISE DO FILTRO EM DERIVAÇÃO	74
<b>7 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES</b>	<b>77</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>79</b>

<b>ANEXO A</b>	<b>81</b>
<b>ANEXO B</b>	<b>86</b>
<b>ANEXO C</b>	<b>129</b>
<b>ANEXO D</b>	<b>133</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
Figura 2.1: Representação gráfica das componentes da potência (Fonte: De Oliveira, Marco Aurélio. Apostila de Qualidade de Energia Elétrica)	12
Figura 2.2: Curva de classificação das perturbações na amplitude da tensão com o tempo de duração (Fonte: Harmônicas nas Instalações Elétricas. Causas, efeitos e soluções. PROCOBRE.)	16
Figura 2.3: Exemplos de distúrbios na amplitude do sinal (Fonte: Engcomp Tecnologia em Automação e Controle LTDA, <a href="http://www.engcomp.com.br/pow_qual.htm">http://www.engcomp.com.br/pow_qual.htm</a> )	16
Figura 2.4: Relação entre tensão e corrente em um circuito formado por cargas lineares	18
Figura 2.5: Circuito linear com controlador de tensão e corrente (Fonte: Harmônicas nas Instalações Elétricas. Causas, efeitos e soluções. PROCOBRE.)	20
Figura 2.6: Formas de onda da tensão da rede e na carga, e forma de onda da corrente na carga (Fonte: Harmônicas nas Instalações Elétricas. Causas, efeitos e soluções. PROCOBRE.)	20
Figura 2.7: Típico circuito de uma fonte chaveada (Fonte: Harmônicas nas Instalações Elétricas. Causas, efeitos e soluções. PROCOBRE.)	21
Figura 2.8: Ligação típica de um filtro passivo de harmônicas (Fonte: Qualidade de Energia. Harmônicas. PROCOBRE / SCHNEIDER.)	26
Figura 2.9: Ligação típica de um filtro passivo de harmônicas em série	27
Figura 2.10: Filtro passivo composto por indutor em série com o circuito retificador do equipamento poluidor (Fonte: Revista O ELETRICISTA, nº. 9, 3º trimestre de 2004, ano 3.)	28
Figura 2.11: Ligação típica de um filtro ativo de harmônicas (Fonte: Harmônicas nas Instalações Elétricas. Causas, efeitos e soluções. PROCOBRE.)	28
Figura 2.12: Esquema básico de um filtro ativo (Fonte: Qualidade na energia elétrica. Ricardo Aldabó.)	29
Figura 2.13: Exemplo de atuação de um filtro ativo (Fonte: Harmônicas nas Instalações Elétricas. Causas, efeitos e soluções. PROCOBRE.)	29
Figura 2.14: Processo de fabricação de filtro.	30
Figura 3.1: Adaptação da alimentação do computador para realizar a medição	32
Figura 3.2: Montagem para coleta de dados de distorção harmônica de corrente e tensão	33
Figura 4.1: Esquema de ligação para os ensaios monofásicos	36
Figura 4.2: Esquema de ligação para os ensaios monofásicos	37
Figura 4.3: Gráfico da DHTU em cada ensaio monofásico.	39
Figura 4.4: Gráfico da DHTI em cada ensaio.	39
Figura 5.1: Circuito modelo em Pspice que representa o sistema, fonte, linha e carga-não-linear.	46
Figura 5.2: Forma da onda de corrente que circula em rede elétrica que alimenta fontes chaveadas de microcomputador.	47

Figura 5.3: Comparação com os diferentes valores de indutor.	48
Figura 5.4: Comparação com os diferentes valores de capacitor.	48
Figura 5.5: Modelo Pspice do filtro passa baixa.	49
Figura 5.6: Forma de onda de corrente utilizando o filtro passa baixo com frequência de corte em 180Hz considerando a parte transitória.	49
Figura 5.7: Forma de onda de corrente utilizando o filtro passa baixo com frequência de corte em 180Hz.	49
Figura 5.8: Espectro da forma de onda de corrente com filtro passa baixa com frequência de corte em 180 Hz.	50
Figura 5.9: Filtro passa baixa com frequência de corte em 420Hz e filtro em derivação sintonizado em 180Hz	51
Figura 5.10: Forma de onda de corrente do circuito quando é utilizado um filtro passa baixa com frequência de corte em 420Hz e filtro em derivação sintonizado em 180Hz considerando os transitórios.	51
Figura 5.11: Forma de onda de corrente do circuito quando é utilizado um filtro passa baixa com frequência de corte em 420Hz e filtro em derivação sintonizado em 180Hz.	52
Figura 5.12: Espectro da forma de onda de corrente do circuito quando é utilizado um filtro passa baixa com frequência de corte em 420Hz e filtro em derivação sintonizado em 180Hz.	52
Figura 5.13: Filtro passa baixa com frequência de corte em 420Hz e filtros em derivação sintonizado em 180Hz e 300Hz	53
Figura 5.14: Forma de onda de corrente do circuito quando é utilizado um filtro passa baixa com frequência de corte em 420Hz e filtros em derivação sintonizados em 180Hz e 300Hz.	53
Figura 5.15: Espectro da forma de onda de corrente do circuito quando é utilizado um filtro passa baixa com frequência de corte em 420Hz e filtros em derivação sintonizados em 180Hz e 300Hz.	53
Figura 5.16: Filtro em derivação sintonizados em 3°, 5°, 7° e 9° ordem.	54
Figura 5.17: Forma de onda de corrente do circuito quando é utilizado filtro em derivação sintonizados em 3°, 5°, 7° e 9° ordem.	54
Figura 5.18: Espectro da forma de onda de corrente do circuito quando é utilizado filtro em derivação sintonizados em 3°, 5°, 7° e 9°.	55
Figura 5.19: Filtro harmônico série sintonizado em 3° e 7° ordem.	56
Figura 5.20: Forma de onda de corrente quando é utilizado um filtro série sintonizado nas frequências de 3° e 7° ordem.	56
Figura 5.21: Espectro da forma de onda de corrente quando é utilizado um filtro série sintonizado nas frequências de 3° e 7° ordem.	56
Figura 5.22: Filtro harmônico série sintonizado em 3°, 5° e 7° ordem.	57
Figura 5.23: Forma de onda de corrente quando é utilizado um filtro série sintonizado em 3°, 5° e 7° ordem.	57
Figura 5.24: Espectro da forma de onda de corrente quando é utilizado um filtro série sintonizado nas frequências de 3°, 5° e 7° ordem.	57
Figura 5.25: Filtro harmônico série sintonizado em 3°, 5° e 7° ordem com um capacitor de 2uF em paralelo com a carga.	58
Figura 5.26: Forma de onda de corrente quando é utilizado um filtro série sintonizado nas frequências de 3°, 5° e 7° ordem com capacitor de 2uF em paralelo com a carga.	58

Figura 5.27: Espectro da forma de onda de corrente quando é utilizado um filtro série sintonizado nas frequências de 3°, 5° e 7° ordem com capacitor de 2uF em paralelo com a carga.	58
Figura 5.28: Circuito do filtro passivo a ser projetado.	61
Figura 5.29: Forma de onda de corrente quando é utilizado o filtro mostrado na Figura 5.28).	61
Figura 5.30: Espectro da forma de onda de corrente quando é utilizado o filtro mostrado na Figura 5.28).	61
Figura 5.31: Varistor de óxido de zinco	62
Figura 5.32: Foto da chave filtro/by-pass.	63
Figura 5.33: Diagrama elétrico do filtro passivo.	64
Figura 5.34: Circuito do filtro.	64
Figura 5.35: Vista da caixa de proteção do filtro.	64
Figura 5.36: Filtro passa baixa com frequência de corte em 420Hz e filtros derivação sintonizados em 180Hz e 300Hz.	65
Figura 5.37: Forma de onda de corrente quando utiliza o filtro passa baixa com frequência de corte em 420Hz e filtros em derivação sintonizados em 180Hz e 300Hz.	66
Figura 5.38: Espectro da forma de onda de corrente quando utiliza o filtro passa baixa com frequência de corte em 420Hz e filtros em derivação sintonizados em 180Hz e 300Hz.	66
Figura 5.39: Filtro em derivação sintonizados em 300Hz e 420Hz com um indutor em série.	67
Figura 5.40: Forma de onda de corrente quando utiliza o filtro em derivação sintonizados em 300Hz e 420Hz com um indutor em série.	67
Figura 5.41: Espectro da forma de onda de corrente quando utiliza o filtro em derivação sintonizados em 300Hz e 420Hz com um indutor em série.	67
Figura 5.42: Diagrama elétrico do filtro em derivação sintonizado em 5° e 7° ordem com um indutor em série de 78mH.	68
Figura 5.43: Circuito do filtro derivação	66
Figura 6.1: Década resistiva utilizada para teste da rede de alimentação	69
Figura 6.2: Teste do filtro com o computador	70
Figura 6.3: Gráfico comparativo entre as ondas de corrente do computador sem o filtro, com o filtro série, o filtro em derivação e uma onda puramente senoidal com a amplitude da componente fundamental.	75
Figura A.1: Gráfico das médias das componentes harmônicas de tensão presente nos computadores	78
Figura A.2: Gráfico das médias das componentes harmônicas de corrente dos computadores	79
Figura A.3: Gráfico das médias das componentes harmônicas de tensão no QD do andar 19 – Fase A	80
Figura A.4: Gráfico das médias das componentes harmônicas de tensão no QD do andar 19 – Fase B	81
Figura A.5: Gráfico das médias das componentes harmônicas de tensão no QD do andar 19 – Fase	82
Figura B.1: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente no Micro 01 durante o Teste Senoidal	85
Figura B.2: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente no Micro 02 durante o Teste Senoidal	85
Figura B.3: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente no Micro 03 durante o Teste Senoidal	86
Figura B.4: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente no Micro 04 durante o Teste Senoidal	86
Figura B.5: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente no Micro 05 durante o Teste Senoidal	87

Figura B.6: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente no Micro 06 durante o Teste Senoidal	87
Figura B.7: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente no Micro 01 durante o Teste Médio	89
Figura B.8: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente no Micro 02 durante o Teste Médio	89
Figura B.9: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente no Micro 04 durante o Teste Médio	90
Figura B.10: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente no Micro 04 durante o Teste Médio	90
Figura B.11: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente no Micro 05 durante o Teste Médio	91
Figura B.12: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente no Micro 06 durante o Teste Médio	91
Figura B.13: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente no Micro 01 durante o Teste Máximo	93
Figura B.14: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente no Micro 02 durante o Teste Máximo	93
Figura B.15: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente no Micro 03 durante o Teste Máximo	94
Figura B.16: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente no Micro 04 durante o Teste Máximo	94
Figura B.17: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente no Micro 05 durante o Teste Máximo	95
Figura B.18: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente no Micro 06 durante o Teste Máximo	95
Figura B.19: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente no Micro 01 durante o Teste Absurdo	97
Figura B.20: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente no Micro 02 durante o Teste Absurdo	97
Figura B.21: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente no Micro 03 durante o Teste Absurdo	98
Figura B.22: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente no Micro 04 durante o Teste Absurdo	98
Figura B.23: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente no Micro 05 durante o Teste Absurdo	99
Figura B.24: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente no Micro 06 durante o Teste Absurdo	99
Figura B.25: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente nos Micros 1, 2 e 3 durante o Teste Senoidal	101
Figura B.26: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente nos Micros 1, 2 e 3 durante o Teste Médio	101
Figura B.27: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente nos Micros 1, 2 e 3 durante o Teste Máximo	102
Figura B.28: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente nos Micros 1, 2 e 3 durante o Teste Absurdo	102
Figura B.29: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente nos Micros 1, 2 e 3 durante o Teste 01	103
Figura B.30: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente nos Micros 1, 2 e 3 durante o Teste 02	103

Figura B.31: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente nos Micros 1, 2 e 3 durante o Teste 03	104
Figura B.32: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente nos Micros 1, 2 e 3 durante o Teste 04	104
Figura B.33: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente nos Micros 1, 2 e 3 durante o Teste 05	105
Figura B.34: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente nos Micros 1, 2 e 3 durante o Teste 06	105
Figura B.35: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente nos Micros 4, 5 e 6 durante o Teste Senoidal	107
Figura B.36: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente nos Micros 4, 5 e 6 durante o Teste Médio	107
Figura B.37: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente nos Micros 4, 5 e 6 durante o Teste Máximo	108
Figura B.38: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente nos Micros 4, 5 e 6 durante o Teste Absurdo	108
Figura B.39: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente nos Micros 4, 5 e 6 durante o Teste 01	109
Figura B.40: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente nos Micros 4, 5 e 6 durante o Teste 02	109
Figura B.41: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente nos Micros 4, 5 e 6 durante o Teste 03	110
Figura B.42: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente nos Micros 4, 5 e 6 durante o Teste 04	110
Figura B.43: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente nos Micros 4, 5 e 6 durante o Teste 05	111
Figura B.44: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente nos Micros 4, 5 e 6 durante o Teste 06	111
Figura B.45: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente nos Micros de 1 a 6 durante o Teste Senoidal	113
Figura B.46: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente nos Micros de 1 a 6 durante o Teste Médio	113
Figura B.47: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente nos Micros de 1 a 6 durante o Teste Máximo	114
Figura B.48: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente nos Micros de 1 a 6 durante o Teste Absurdo	114
Figura B.49: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente nos Micros de 1 a 6 durante o Teste 01	115

Figura B.50: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente nos Micros de 1 a 6 durante o Teste 02	115
Figura B.51: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente nos Micros de 1 a 6 durante o Teste 03	116
Figura B.52: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente nos Micros de 1 a 6 durante o Teste 04	116
Figura B.53: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente nos Micros de 1 a 6 durante o Teste 05	117
Figura B.54: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente nos Micros de 1 a 6 durante o Teste 06	117
Figura B.55: Gráfico de barras das componentes harmônicas de tensão durante todos os Testes Senoidais	119
Figura B.56: Gráfico de barras das componentes harmônicas de tensão durante todos os Testes Médios	119
Figura B.57: Gráfico de barras das componentes harmônicas de tensão durante todos os Testes Máximos	120
Figura B.58: Gráfico de barras das componentes harmônicas de tensão durante todos os Testes Absurdos	120
Figura B.59: Gráfico de barras das componentes harmônicas de tensão durante todos os Testes 01	121
Figura B.60: Gráfico de barras das componentes harmônicas de tensão durante todos os Testes 02	121
Figura B.61: Gráfico de barras das componentes harmônicas de tensão durante todos os Testes 03	122
Figura B.62: Gráfico de barras das componentes harmônicas de tensão durante todos os Testes 04	122
Figura B.63: Gráfico de barras das componentes harmônicas de tensão durante todos os Testes 05	123
Figura B.64: Gráfico de barras das componentes harmônicas de tensão durante todos os Testes 06	123
Figura B.65: Gráfico de barras das DHTU's em cada ensaio realizado	124
Figura B.66: Gráfico de barras das DHTI's para cada caso dos ensaios Senoidal, Médio, Máximo e Absurdo	125
figura C.1: foto do indutor de 300mH.	128
figura C.2: Vector Impedance Meter 4800A da HP.	128
figura C.3: forma que foi medida o valor da indutância .	129
Figura C.4: indutor de 78mH implementado no filtro de harmônic	129
Figura D.1: Gráfico das médias das Componentes Harmônicas de Tensão da rede	131
Figura D.2: Gráfico das médias das Componentes Harmônicas de Corrente na Década Resistiva	132
Figura D.3: Gráfico das médias das Componentes Harmônicas de Corrente no Computador sem o Filtro de Harmônicas	133
Figura D.4: Gráfico das Médias das Componentes Harmônicas no Computador com o Filtro Série em By Pass	134
Figura D.5: Gráfico das Médias das Componentes Harmônicas no Computador com o Filtro Série ativado	135
Figura D.6: Gráfico das Médias das Componentes Harmônicas no Computador com o Filtro em Derivação em By-Pass	136
Figura D.7: Gráfico das Médias das Componentes Harmônicas no Computador com o Filtro em Derivação ativado	137

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela	Página
Tabela 2.1: Ordem das correntes harmônicas e suas respectivas seqüências de fase.	13
Tabela 2.2: Limites para distorção harmônica de corrente em Sistemas de Distribuição (120V a 69kV). FONTE: IEEE 519 – 1992	25
Tabela 4.1: Panorama de tensão aplicada aos computadores nos ensaios monofásicos	35
Tabela 4.2: DHTU calculada em cada ensaio monofásico	38
Tabela 4.3: DHTI calculada em cada ensaio.	39
Tabela 4.4: Valores obtidos com uma Senóide pura em 60 Hz no Micro 01.	41
Tabela 4.5: Valores obtidos com uma Senóide pura em 60 Hz no Micro 02.	41
Tabela 4.6: Valores obtidos com uma Senóide pura em 60 Hz nos seis micros ligados a mesma fase.	42
Tabela 5.1: impedância, resistência e reatância máxima para transformador de 13,8KV/220-127V retirado do artigo operação conjunta: filtro e bloqueador eletromagnético para harmônicos de seqüência zero, publicado no IV SBQEE.	45
Tabela 5.2: resultados de DHTI, DHI-3° e I para a rede que alimenta a carga não-linear com a utilização de cada modelo de filtro passivo.	59
Tabela 5.3: Especificação do varistor. FONTE: <a href="http://www.tecwaybr.com/varistor%2010mm.htm">http://www.tecwaybr.com/varistor%2010mm.htm</a>	63
Tabela 5.4: resultados de DHTI, DHI-3° e I simulados quando utilizado os dois modelos alternativos do filtro.	68
Tabela 6.1: Análise das perdas na rede elétrica	76
Tabela A.1: Dados de tensão nos computadores	78
Tabela A.2: Dados de corrente nos computadores	79
Tabela A.3: Dados de tensão na fase A do quadro de distribuição do andar 19	80
Tabela A.4: Dados de tensão na fase B do quadro de distribuição do andar 19	81
Tabela A.5: Dados de tensão na fase C do quadro de distribuição do andar 19	82
Tabela B.1: Planilha das distorções harmônicas individuais produzidas pelos computadores durante o ensaio senoidal.	84
Tabela B.2: Planilha das distorções harmônicas individuais produzidas pelos computadores durante o ensaio médio.	88
Tabela B.3: Planilha das distorções harmônicas individuais produzidas pelos computadores durante o ensaio máximo.	92
Tabela B.4: Planilha das distorções harmônicas individuais produzidas pelos computadores durante o ensaio absurdo.	96

Tabela B.5: Planilha das distorções harmônicas individuais produzidas pelos computadores 1, 2 e 3 conectados na mesma fase em cada um dos ensaios.	100
Tabela B.6: Planilha das distorções harmônicas individuais produzidas pelos computadores 4, 5 e 6 conectados em série em cada um dos ensaios.	106
Tabela B.7: Planilha das distorções harmônicas individuais produzidas pelos seis computadores conectados na mesma em cada um dos ensaios.	112
Tabela B.8: Planilha das distorções harmônicas individuais de tensão produzidas pela fonte harmônica 3000iX da Califórnia Instruments durante todos os ensaios..	118
Tabela B.9: Valores calculados para as distorções harmônicas totais de tensão produzidas pelos computadores em cada um dos ensaios monofásicos realizados.	124
Tabela B.10: Valores calculados para as distorções harmônicas totais de corrente produzidas pelos computadores em cada um dos ensaios monofásicos realizados.	125
Tabela C.1: Tabela de fios esmaltados (FONTE: <a href="http://www.geoctys.com/projetoperiferiaV/proj8.htm">http://www.geoctys.com/projetoperiferiaV/proj8.htm</a> ).	127
Tabela D.1: Perfil de tensão da rede elétrica de alimentação do Laboratório	131
Tabela D.2: Perfil de corrente na Década Resistiva no Laboratório	132
Tabela D.3: Perfil de Corrente no Computador sem Filtro de Harmônicas	133
Tabela D.4: Perfil de Corrente no Computador com o Filtro Série em By Pass	134
Tabela D.5: Perfil de Corrente no Computador com o Filtro Série ativado	135
Tabela D.6: Perfil de Corrente no Computador com o Filtro em Derivação em By Pass	136
Tabela D.7: Perfil de Corrente no Computador com o Filtro em Derivação ativado	137



## 1 – INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, com o desenvolvimento da eletrônica de potência e com os avanços da microeletrônica, houve uma crescente utilização de cargas não-lineares nas instalações elétricas em geral. Esse tipo de carga tem a característica de absorver e injetar na rede elétrica uma forma de onda de corrente não-senoidal, devido à presença de correntes harmônicas na corrente fundamental.

A presença desse tipo de distúrbio na rede elétrica traz uma série de conseqüências, como aumento das perdas na rede elétrica, mau funcionamento e até queima de equipamentos ligados à rede, redução na vida útil de alguns equipamentos, entre outras que serão mencionadas adiante.

Dessa forma, a presença de correntes harmônicas na rede elétrica é um dos problemas relacionados à qualidade de energia que deve ser estudado com maior constância pelos profissionais com pretensão de atuar no ramo dos sistemas elétricos de potência, uma vez que esse tipo de problema pode afetar tanto os consumidores finais quanto as concessionárias de energia elétrica, acarretando prejuízos financeiros.

Com a ocorrência de diversos problemas de mau funcionamento de alguns computadores da Câmara dos Deputados e pela atração pelo tema Qualidade de Energia Elétrica, surgiu a oportunidade de se desenvolver um estudo teórico juntamente com uma atividade prática e presente na atividade desempenhada diariamente por engenheiros eletricitistas.

Assim, este estudo será direcionado para a análise das distorções harmônicas produzidas pelos computadores pessoais bem como para a interferência daquelas no funcionamento destes. Serão apresentados dados coletados com medidores de qualidade na Câmara dos Deputados e simulações realizadas em laboratório com a intenção de comprovar um problema de qualidade de energia.

Por fim, serão projetados diferentes filtros de correntes harmônicas, com a intenção de se reduzirem ao máximo os distúrbios provocados por esses equipamentos, sempre com uma relação de compromisso entre o investimento realizado e o benefício obtido.

## 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, será apresentada, de maneira sucinta, revisão das identidades matemáticas aplicadas na análise de sistemas de potência, além de revisão das grandezas elétricas que fazem parte desse sistema. Serão apresentados, também, aspectos relevantes para a análise da qualidade da energia elétrica, bem como os distúrbios, com a descrição de suas principais causas e efeitos. Por fim, serão oferecidos exemplos de soluções para se minimizarem os problemas causados pela poluição presente na rede elétrica.

### 2.1 – REVISÃO MATEMÁTICA

#### 2.1.1 – Séries de Fourier

A análise de Fourier é uma ferramenta matemática utilizada na análise de sinais periódicos não-senoidais e de sinais aperiódicos. Fourier propôs em seus trabalhos que uma função periódica  $f(t)$  em um intervalo  $T$  poderia ser expressa como o somatório de funções senoidais, ou seja, a soma de uma componente senoidal fundamental com uma série de componentes senoidais múltiplas inteiras da frequência fundamental.

A série resultante dessa soma é chamada de série de Fourier, a qual estabelece uma relação entre um sinal representado no domínio do tempo com sua representação no domínio da frequência. A seguir serão expressas as funções que permitem obter a série de Fourier.

Uma função periódica é aquela que satisfaz à seguinte relação:

$$f(t) = f(t + nT_o), n = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (2.1)$$

Para todo valor de  $t$  dentro do período  $T_o$ . A expressão  $f(t)$  para uma série de Fourier é expressa por:

$$f(t) = a_o + \sum_{n=1}^N [a_n \cos(n\omega_o t) + b_n \sin(n\omega_o t)] \quad (2.2)$$

em que  $\omega_o = 2\pi/T_o$ ,  $a_o$  é o valor médio da forma de onda e  $a_n$  e  $b_n$  são os coeficientes trigonométricos da série de Fourier. Logo, eles podem ser assim representados:

$$C_n = \sqrt{(a_n^2 + b_n^2)} \quad (2.3)$$

$$\theta_n = \tan^{-1}\left(\frac{b_n}{a_n}\right) \quad (2.4)$$

Com as expressões (2.3) e (2.4), surge uma nova representação para a expressão (2.2). Esta nova expressão é conhecida como a forma compacta da série de Fourier.

$$f(t) = a_o + \sum_{n=1}^N C_n \cos(n\omega_o t + \theta_n) \quad (2.5)$$

Os coeficientes da série são calculados pelas seguintes expressões:

$$a_o = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (2.6)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(n\omega_o t) dt, \quad n > 0 \quad (2.7)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(n\omega_o t) dt, \quad n > 0 \quad (2.8)$$

## 2.2 – NOÇÕES FUNDAMENTAIS

A transmissão de energia pode ser feita em corrente contínua ou em corrente alternada. No Brasil, a energia elétrica disponível para os consumidores é produzida sob forma de tensão alternada senoidal a uma frequência de 60 Hz, decorrente da maior eficiência na transmissão. Para tanto, pode-se falar em transmissão de energia em regime permanente senoidal (em que a tensão é livre de distorções) ou em regime não-senoidal (em que a tensão possui uma grande quantidade de distorções harmônicas). [2]

### 2.2.1 – Regime Senoidal

Quando se fala em regime senoidal, diz-se que a tensão e a corrente são transmitidas com uma forma de onda perfeitamente senoidal na frequência fundamental, ou seja, com frequência de 60 Hz.

Para um sistema em regime senoidal, as definições adotadas na análise de sistemas de potência sofrem simplificações, para facilitar sua compreensão. Conseqüentemente, pode-se dizer que os respectivos conceitos utilizados nas definições se fazem valer a partir de sistemas em regime senoidal. A seguir, serão revistas as definições de valor eficaz, de potência ativa,

reativa e aparente, de fator de potência, de impedância e de sequência de fase em regime senoidal.

#### 2.2.1.1 – Valor Médio e Valor Eficaz

Em sistemas de potência, na maioria das vezes a tensão e corrente com que se trabalha são variáveis no tempo. Uma maneira adotada de se expressar essas grandezas é por meio do seu valor médio, que é dado pela expressão abaixo.

$$F_{\text{médio}} = \frac{1}{(t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} f(t) dt \quad (2.9)$$

Para este caso esta não seria uma boa maneira de se expressar a tensão e a corrente. Esta expressão descreve a área sob a curva do sinal, e como trata-se de grandezas puramente senoidais o resultado dessa expressão para análise em um ciclo completo será zero.

A partir da dificuldade de se expressar estas grandezas, buscou-se junto à lei de Joule uma solução. A lei de Joule nos diz que em uma resistência percorrida por uma corrente senoidal de período (T), a potência dissipada durante o ciclo será:

$$P_{\text{média}} = RI_{\text{eficaz}}^2 = R \left[ \frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt \right] \quad (2.10)$$

Pela expressão (2.10), definimos que a corrente eficaz é dada por:

$$I_{\text{eficaz}}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt \quad (2.11)$$

A corrente eficaz representa uma corrente que provoca o mesmo aquecimento que uma corrente contínua de mesmo valor é capaz de provocar. O valor eficaz de uma forma de onda é muitas vezes representado como valor r.m.s.(do inglês, root mean square) [2].

#### 2.2.1.2 – Potências (instantânea, ativa, reativa, de distorção)

Está potência instantânea é expressa por:

$$p(t) = v(t)i(t) \quad (2.12)$$

De uma forma geral, corrente e tensão podem ser escritas como:

$$v(t) = V_m \text{sen}(\omega t) \quad (2.13)$$

$$i(t) = I_m \text{sen}(\omega t - \theta) \quad (2.14)$$

Então, substituindo as equações (2.13) e (2.14) na equação (2.12), chega-se a seguinte expressão para a potência:

$$p(t) = V_m \text{sen}(\omega t) * I_m \text{sen}(\omega t - \theta) \quad (2.15)$$

Em que:

$$\text{sen}(\omega t - \theta) = \text{sen}(\omega t) \cdot \cos(\theta) - \text{sen}(\theta) \cdot \cos(\omega t)$$

$$\text{sen}(\omega t) \cdot \cos(\omega t) = \frac{1}{2} \text{sen}(2\omega t)$$

$$\text{sen}^2(\omega t) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos(2\omega t)$$

$$\cos(2\omega t - \theta) = \cos(\theta) \cdot \cos(2\omega t) + \text{sen}(\theta) \cdot \text{sen}(2\omega t)$$

Utilizando as identidades trigonométricas citadas anteriormente, a expressão para a potência instantânea adquirirá uma nova forma.

$$p(t) = \frac{V_m I_m}{2} \cos(\theta) - \frac{V_m I_m}{2} \cos(2\omega t - \theta) \quad (2.16)$$

Observa-se, pela expressão (2.16), que a potência instantânea tem dois termos, a depender do ângulo de defasagem da corrente em relação à tensão. O primeiro é uma constante (independe do tempo); o segundo é uma função variável com o tempo que tem o dobro da frequência fundamental.

Como a potência tem valor diferente a cada momento, é mais conveniente trabalhar com seu valor médio. Por ser função periódica, seu valor médio é calculado da seguinte forma:

$$P_{media} = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T \left[ \frac{V_m I_m}{2} \cos(\theta) - \frac{V_m I_m}{2} \cos(2\omega t - \theta) \right] dt$$

Como a segunda parte da integral a ser calculada no período é igual a zero, temos que a potência média pode ser expressa por:

$$P_{media} = \frac{V_m I_m}{2} \cos(\theta) \quad (2.17)$$

Assim, para um ambiente puramente senoidal, os valores eficazes da tensão e da corrente são:

$$V = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad (2.18)$$

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad (2.19)$$

Substituindo as expressões (2.18) e (2.19) na expressão (2.17), encontra-se a seguinte expressão para a potência ativa.

$$P = VI \cos(\theta) \quad (2.20)$$

A potência ativa representa a taxa de energia consumida no circuito, ou seja, é a potência que de fato produz trabalho.

No estudo de potência, há outra grandeza que é necessário salientar: a potência complexa. A potência complexa que flui por uma rede é dada por:

$$\bar{S} = V \bar{I}^* \quad (2.21)$$

Onde  $\bar{I}^*$  é o complexo conjugado de  $\bar{I}$ . O módulo da expressão (2.21) é chamado de potência aparente, e é expresso por:

$$|\bar{S}| = S = VI \quad (2.22)$$

Na forma retangular, a potência complexa é expressa como:

$$\bar{S} = VI \cos(\phi) + jVI \sin(\phi) \quad (2.23)$$

O primeiro termo da expressão (2.23) é a potência ativa, cuja unidade no Sistema Internacional é o watt [W]. O segundo termo é a potência reativa, e sua unidade é o volt-ampère-reactivo[var]. Ao contrário do que ocorre com a potência ativa, é difícil associar significado físico à potência reativa. Ela não contribui para o trabalho efetivamente realizado e, em algumas situações, pode ser associada ao armazenamento de energia em campos elétricos e magnéticos de elementos reativos do sistema (indutores e capacitores). Deve ser dito que a potência reativa, num sistema, se conserva, ou seja, a potência reativa total fornecida (ou absorvida) pela fonte é igual à soma algébrica das potências reativas consumidas

(ou fornecidas) pelas diferentes cargas. A potência aparente é dada por volt-ampére [VA] e limita os valores da potência ativa e reativa.

### 2.2.1.3 – Fator de potência

O fator de potência é uma grandeza de muita importância nos sistemas elétricos, uma vez que o mesmo é capaz de informar a fração da potência aparente que foi utilizada para realizar trabalho. Assim sendo, é definido como sendo o quociente entre a potência ativa e a potência aparente.

$$f.p. = \frac{P}{S} = \cos(\phi) \quad (2.24)$$

O ângulo ( $\phi$ ) é grandeza adimensional. Seus limites extremos correspondem a carga puramente resistiva, em que  $\phi=0$  e f.p.=1, e a carga puramente reativa, em que  $\phi=\pm 90^\circ$  e f.p.=0. Por essa definição, é possível concluir que na maioria dos casos, que o ângulo de defasagem entre a corrente e a tensão se deve aos parâmetros do circuito (R, L, C), e varia de  $\left(-\frac{\pi}{2}\right)$  a  $\left(+\frac{\pi}{2}\right)$ .

### 2.2.1.4 – Impedância complexa

Impedância é um numero complexo que caracteriza um dispositivo que reflete tanto a oposição à passagem da corrente alternada quanto à defasagem total entre a tensão e a corrente fornecida a um circuito elétrico [1]. A impedância complexa é assim definida:

$$\bar{Z} = \frac{\bar{V}}{\bar{I}} = R + jX \quad (2.25)$$

A parte real é conhecida como resistência (R); e a parte imaginária é conhecida como reatância (X), que é formada por indutores e/ou capacitores. A reatância de cada elemento é:

$$X_L = j\omega L \quad (2.26)$$

$$X_c = \frac{1}{j\omega C} \quad (2.27)$$

### 2.2.2 – Regime Não-Senoidal

Quando se fala em regime não-senoidal, diz-se que a tensão e a corrente têm forma de onda distorcida pela presença de harmônicos. Distorções harmônicas são associadas à crescente quantidade de cargas não-lineares presente no sistema elétrico, o que se deve ao fato de estas cargas solicitarem da rede correntes deformadas.

Para ambiente com presença de harmônicos, as grandezas elétricas sofrem mudanças em seus conceitos. As mudanças devem-se ao fato de os harmônicos se sobrepor aos termos fundamentais da tensão e da corrente. Como será visto adiante, se os harmônicos de uma instalação elétrica não forem considerados, ela poderá apresentar graves problemas.

#### 2.2.2.1 – Harmônicos

A eletricidade gerada por um sistema de geração ligado a rede elétrica, possui a forma de onda senoidal. Quando uma carga é conectada a uma fonte de tensão, e esta drena correntes também na forma senoidal, dizemos que esta forma de onda não contém harmônicos. As cargas com esta característica são conhecidas como cargas lineares.

Ao contrário das cargas lineares, as cargas não-lineares solicitam uma corrente cuja forma de onda é diferente da forma de onda de tensão. Quando a forma de onda solicitada pela carga é distorcida, dizemos que a forma de onda contém harmônicos. Harmônico é uma componente senoidal de tensão ou corrente com uma frequência igual a um múltiplo da frequência fundamental (no Brasil, a frequência fundamental do sistema elétrico é de 60 Hz).

Matematicamente, uma forma de onda de tensão ou de corrente, pode ser decomposta numa somatória de infinitos termos senoidais, cujas frequências são múltiplas da frequência fundamental. Essas frequências múltiplas é que são conhecidas como frequências harmônicas, ou simplesmente, harmônicos. A série formada pelos somatórios do termo senoidal de cada frequência é uma série de Fourier, representado pela equação (2.2).

Para o ambiente onde o sistema elétrico funciona em regime não-senoidal, o conceito básico sobre as grandezas elétricas sofre algumas modificações. Para ambientes não senoidal, a tensão e a corrente são representadas por:

$$v(t) = V_o + \sum_{h=1}^{\infty} \hat{V}_h \cos(h\omega t + \phi_h) \quad (2.28)$$



$$i(t) = I_o + \sum_{h=1}^{\infty} \hat{I}_h \cos(h\omega t + \phi_h) \quad (2.29)$$

A partir das considerações feitas de tensão e corrente, é possível encontrar expressões para calcular as principais grandezas elétricas em regime não-senoidal.

#### 2.2.2.2 – Valor médio e eficaz

Diferentemente do que acontece em regime senoidal, em regimes não-senoidais, o valor médio dado pela expressão (2.9) é diferente de zero. Por análise de Fourier, pode-se calcular o valor médio do sinal por meio da expressão (2.9).

$$I = I_o \quad (2.30)$$

Para o cálculo do valor eficaz de um sinal em um ambiente distorcido, pode-se utilizar a equação (2.11). Substituindo a expressão analítica do sinal na equação (2.11) e fazendo alguns cálculos trigonométricos, podemos encontrar a seguinte equação.

$$V = \sqrt{V_o^2 + V_1^2 + \dots + V_h^2 + \dots + V_{\infty}^2} \quad (2.31)$$

A análise de Fourier de um sinal fornece as amplitudes das componentes harmônicas. Então o valor eficaz de tensão pode ser calculado a partir da equação acima [1]. Devido a pequena distorção harmônica de tensão, considera-se que a tensão dada pela equação (2.31) seja igual a tensão na frequência fundamental, ou seja, uma tensão senoidal. O cálculo do valor eficaz da corrente é feito por uma fórmula semelhante à anterior.

$$I = \sqrt{I_o^2 + I_1^2 + \dots + I_h^2 + \dots + I_{\infty}^2} \quad (2.32)$$

#### 2.2.2.3 – Potências (instantânea, ativa, reativa, de distorção)

Para o cálculo da potência instantânea continua-se utilizando a expressão (2.12). A única diferença para o cálculo desta grandeza elétrica é que a tensão e a corrente utilizadas são as expressas pelas equações (2.28) e (2.29), respectivamente. Então reescrevendo a expressão (2.12) e substituindo as equações, tem-se que:

$$p(t) = v(t)i(t) = \left[ V_o + \sum_{h=1}^{\infty} \hat{V}_h \cos(h\omega t + \phi_h) \right] \left[ I_o + \sum_{h=1}^{\infty} \hat{I}_h \cos(h\omega t + \phi_h) \right] \quad (2.33)$$

Resolvida a multiplicação, encontra-se a seguinte expressão para a potência instantânea:

$$\begin{aligned}
 p(t) = & V_o \sum_{h=1}^{\infty} \hat{I}_h \cos(h\omega t + \phi_h) + I_o \sum_{h=1}^{\infty} \hat{V}_h \cos(h\omega t + \phi_h) + \hat{V}_1 \cos(\omega t + \phi_1) \sum_{h=1}^{\infty} \hat{I}_h \cos(h\omega t + \phi_h) + \\
 & \hat{V}_2 \cos(2\omega t + \phi_2) \sum_{h=1}^{\infty} \hat{I}_h \cos(h\omega t + \phi_h) + \dots + \hat{I}_1 \cos(\omega t + \phi_1) \sum_{h=1}^{\infty} \hat{V}_h \cos(h\omega t + \phi_h) + \\
 & \hat{I}_2 \cos(2\omega t + \phi_2) \sum_{h=1}^{\infty} \hat{V}_h \cos(h\omega t + \phi_h) + \dots
 \end{aligned} \quad (2.34)$$

Dado que a equação (2.34) é variável com o tempo, é conveniente calcular o valor médio dessa expressão. Calculado o valor médio, chega-se à seguinte expressão:

$$P = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos \phi_h \quad (2.35)$$

De acordo com a expressão (2.35), o cálculo da potência ativa deve levar em conta além da frequência fundamental, as frequências harmônicas de corrente. Como foi citado anteriormente, a tensão é apenas a tensão na frequência fundamental, então a potência ativa se reduz a:

$$P = V_1 I_1 \cos \phi_1 \quad (2.36)$$

A potência ativa restringe-se à componente em fase da corrente fundamental. Consequentemente, pode-se dizer que a corrente harmônica não transporta potência ativa [11].

Com base no modelo de cálculo da potência ativa, pode-se definir a potência reativa quando existem harmônicos pela seguinte expressão:

$$Q = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \sin \phi_h \quad (2.37)$$

Fazendo as mesmas considerações de tensão para ambientes não senoidal, a expressão (2.37) pode ser expressa por:

$$Q = V_1 I_1 \sin \phi_1 \quad (2.38)$$

De maneira semelhante ao que ocorre em regime senoidal, em regime não-senoidal também é difícil associar um significado físico para a potência reativa. A unidade da potência reativa continua a ser o volt-ampère-reactivo (var).

Para o cálculo da potência aparente, a expressão (2.22) não se altera pela presença de distorções harmônicas. No entanto, o valor eficaz da tensão e da corrente é expresso pelas

equações (2.31) e (2.32), respectivamente. Logo, calcula-se a potência aparente com a seguinte expressão:

$$S = \left( \sqrt{V_o^2 + V_1^2 + \dots + V_\infty^2} \right) \left( \sqrt{I_o^2 + I_1^2 + \dots + I_\infty^2} \right) \quad (2.39)$$

A expressão anterior determina a capacidade requerida do sistema elétrico para transportar a potência ativa e a reativa. Algo muito interessante de se observar é que, quando se subtrai em quadratura a potência ativa (P) da potência aparente (S), o resultado não é a potência reativa, ou seja, não se conserva. Um exemplo seria: um circuito onde a potência reativa é igual a zero, a potência aparente é diferente da potência ativa. Para entender o que ocorre, a expressão para o cálculo da potência aparente foi desenvolvida de forma diferente.

Calculando os valores rms das expressões (2.28) e (2.29) e substituindo-os na equação da potência aparente, obtém-se:

$$S^2 = (V_{rms} I_{rms})^2 \quad (2.40)$$

$$S^2 = \left( V_o^2 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\hat{V}_k^2}{2} \right) \left( I_o^2 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\hat{I}_k^2}{2} \right) \quad (2.41)$$

separando as componentes de mesma frequência das componentes de frequências diferentes e chega-se à seguinte expressão:

$$S^2 = (V_o I_o)^2 + \left( \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{\infty} \hat{V}_k \hat{I}_k \right)^2 + \left( \frac{V_o^2}{2} \sum_{k=1}^{\infty} \hat{I}_k^2 + \frac{I_o^2}{2} \sum_{k=1}^{\infty} \hat{V}_k^2 + \frac{1}{4} \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{r=1}^{\infty} \hat{V}_k^2 \hat{I}_r^2 \right)_{(R \neq K)}^{1/2} \quad (2.42)$$

De acordo com a expressão acima, a potência aparente contém componentes CC, termos com tensões e correntes com a mesma frequência e termos com tensões e correntes com frequência diferentes. Da expressão (2.42), os termos referentes a tensões e correntes de frequências iguais representam as potências ativa e reativa, ou seja:

$$(V_o I_o)^2 + \left( \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{\infty} \hat{V}_k \hat{I}_k \right)^2 = \sum_{k=0}^{\infty} (P_k^2 + Q_k^2) \quad (2.43)$$

Substituindo o termo correspondente às tensões e às correntes de frequências diferentes por (D), temos:

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (2.44)$$

A componente (D) corresponde à potência que provém da interação dos harmônicos. Essa potência não se conserva e é conhecida como potência de distorção, expressa pela seguinte equação:

$$D = \sum V_{h1} I_{h2} \quad \text{com } h_1 \neq h_2 \quad (2.45)$$

A unidade da potência de distorção também é o Volt-ampère-reactivo (var). Deve-se dizer que essa grandeza não circula pelo circuito. Assim, a potência não é compensada por banco de capacitores, que só corrige o deslocamento, ou seja, só compensa a potência reativa (Q).

Um fato importante é que, mesmo em regime não-senoidal, a potência ativa (P), a potência reativa (Q) e a potência de distorção (D) são ortogonais entre si. Com base nessa conclusão, é possível fazer a seguinte representação gráfica:

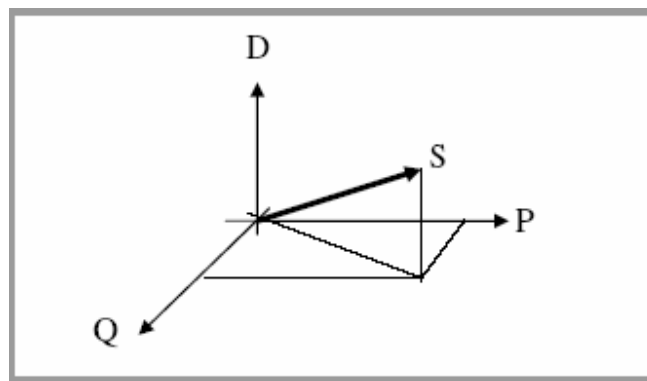


Figura 2.1: Representação gráfica das componentes da potência  
(Fonte: De Oliveira, Marco Aurélio. Apostila de Qualidade de Energia Elétrica)

#### 2.2.2.4 – Fator de potência e fator de deslocamento

O fator de potência por definição é dado pela relação entre a potência ativa e a potência aparente de um sinal periódico, ou seja:

$$fp = \frac{\text{potência\_ativa}(W)}{\text{potência\_aparente}(VA)} \quad (2.46)$$

Freqüentemente utiliza-se o fator de potência igual ao cosseno do ângulo entre a potência ativa e a potência aparente (referente ao triângulo de potências), e isso não passa de uma consideração equivocada. Essa relação é verdadeira apenas para regime senoidal. O

cosseno nada mais é do que a relação entre a potência ativa e aparente para cada componente harmônica.

$$\cos(\phi) = \frac{P_h(W)}{S_h(VA)} \quad (2.47)$$

Considerar o fator de potência igual ao cosseno do ângulo entre as potências ativa e aparente pode ser um erro grave se o ambiente for muito distorcido. Na presença de harmônicos, o fator de potência é menor que o valor do cosseno. Como o fator de potência traduz a fração da potência aparente utilizada para realizar trabalho, e considerando-se os dois termos iguais, o sistema pode ter capacidade menor que a necessária. Outro erro comum em ambientes com presença de harmônicos é a instalação de banco de capacitores para a correção do fator de potência. Esses bancos corrigem apenas o fator para a frequência fundamental.

#### 2.2.2.5 – Seqüência de fases

Este item trata do sentido das componentes harmônicas para suas diversas ordens. Para um sistema trifásico equilibrado e simétrico, o cálculo da corrente nas três fases fornece a seguinte tabela.

Tabela 2.1: Ordem das correntes harmônicas e suas respectivas seqüências de fase.

Ordem	Correntes			Seqüência
	Fase A	Fase B	Fase C	
1°	$I_1 \text{sen}(\omega t + \varphi_1)$	$I_1 \text{sen}(\omega t - 120 + \varphi_1)$	$I_1 \text{sen}(\omega t + 120 + \varphi_1)$	Positiva
2°	$I_2 \text{sen}(2\omega t + \varphi_2)$	$I_2 \text{sen}(2\omega t + 120 + \varphi_2)$	$I_2 \text{sen}(2\omega t - 120 + \varphi_2)$	Negativa
3°	$I_3 \text{sen}(3\omega t + \varphi_3)$	$I_3 \text{sen}(3\omega t + \varphi_3)$	$I_3 \text{sen}(3\omega t + \varphi_3)$	Zero
4°	$I_4 \text{sen}(4\omega t + \varphi_4)$	$I_4 \text{sen}(4\omega t - 120 + \varphi_4)$	$I_4 \text{sen}(4\omega t + 120 + \varphi_4)$	Positiva
5°	$I_5 \text{sen}(5\omega t + \varphi_5)$	$I_5 \text{sen}(5\omega t + 120 + \varphi_5)$	$I_5 \text{sen}(5\omega t - 120 + \varphi_5)$	Negativa
6°	$I_6 \text{sen}(6\omega t + \varphi_6)$	$I_6 \text{sen}(6\omega t + \varphi_6)$	$I_6 \text{sen}(6\omega t + \varphi_6)$	Zero
7°	$I_7 \text{sen}(7\omega t + \varphi_7)$	$I_7 \text{sen}(7\omega t - 120 + \varphi_7)$	$I_7 \text{sen}(7\omega t + 120 + \varphi_7)$	Positiva
8°	$I_8 \text{sen}(8\omega t + \varphi_8)$	$I_8 \text{sen}(8\omega t + 120 + \varphi_8)$	$I_8 \text{sen}(8\omega t - 120 + \varphi_8)$	Negativa
9°	$I_9 \text{sen}(9\omega t + \varphi_9)$	$I_9 \text{sen}(9\omega t + \varphi_9)$	$I_9 \text{sen}(9\omega t + \varphi_9)$	Zero

A soma das correntes de cada ordem harmônica de cada fase nos dá a corrente que circula pela respectiva fase. Note-se que a corrente total em cada fase é deformada. Ao se definir que as componentes fundamentais são de seqüência positiva, elas subtraem 120° de seus argumentos. As componentes de seqüência negativa somam 120° a seus argumentos. As

harmônicas de sequência zero estão totalmente em fase. Para um sistema perfeitamente equilibrado e simétrico, as correntes na frequência fundamental têm soma nula, mas as componentes de sequência zero não se cancelam e, dependendo da configuração do sistema, essas correntes somam-se no neutro.

#### 2.2.2.6 – Impedância

A impedância em regime não-senoidal continua a ser definida pela relação entre a tensão e a corrente, contudo a tensão e a corrente são funções da frequência e suas harmônicas. Referência [1]

$$Z(h\omega) = \frac{V(h\omega)}{I(h\omega)} = R + jX(h\omega) \quad [\Omega] \quad (2.48)$$

As expressões para o cálculo das reatâncias capacitivas e indutivas continuam as mesmas. De acordo com a expressão (2.48), para cada frequência harmônica, há um valor de impedância. Essa variação no valor da impedância deve-se ao fato de o valor das reatâncias expresso em (2.26) e (2.27) ser dependente da frequência e o valor da resistência aumentar com a frequência, por causa do efeito pelicular. Com base nessas conclusões, pode-se calcular um circuito para cada frequência e, depois, utilizar a superposição das grandezas calculadas.

## 2.3 – QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

### 2.3.1 – Definição geral

De forma geral, a qualidade da energia elétrica distribuída para os consumidores pode ser medida de diferentes formas, não somente quanto à continuidade do serviço prestado ou à aceitabilidade do padrão em que se encontra a frequência da rede. Pode-se dizer que a qualidade da energia está ligada fortemente a qualquer problema manifestado na tensão, corrente ou frequência que venha a resultar em falha ou mau funcionamento dos equipamentos dos consumidores.

Com o passar dos anos e o crescente avanço da tecnologia, as cargas conectadas à rede elétrica passaram a apresentar perfil de consumo de energia muito diferente. O funcionamento de equipamentos eletrônicos conectados à rede elétrica, a simples partida de motores elétricos, a utilização de equipamentos monofásicos de grande potência (fornos a arco, máquinas de

solda, controladores de velocidade de motores e etc.), entre outros, podem interferir consideravelmente na forma de onda da tensão ou da corrente em outro ponto da instalação elétrica.

O grande problema enfrentado na determinação da qualidade da energia distribuída aos consumidores reside na carência de normas técnicas a respeito. Ao mesmo tempo que o perfil das cargas tem sofrido alterações consideráveis nos últimos anos as determinações impostas pelos organismos internacionais e as portarias publicadas pela agência reguladora nacional, ANEEL, são extremamente recentes e superficiais.

Algumas normas internacionais, como a IEEE-519, a IEC 61000 e a EN 50160, impõem que equipamentos e instalações elétricas não produzam níveis harmônicos superiores a limites específicos e também indicam limites de distorção para as tensões das redes elétricas.

A seguir, são apresentadas as principais cargas não-lineares geradoras de distúrbios na rede elétrica, bem como as principais consequências da presença dessas cargas sem a utilização de dispositivos protetores contra surtos e filtros.

### **2.3.2 – Tipos de distúrbios**

Entre os distúrbios presentes na rede elétrica, é possível destacar os produzidos na amplitude da tensão e na frequência do sinal, os desequilíbrios produzidos na tensão ou na corrente de um sistema trifásico e as perturbações na forma de onda do sinal.

#### **2.3.2.1 – Perturbações na amplitude do sinal**

Os distúrbios na amplitude da tensão são os mais percebidos pelo consumidor residencial. São eles: o afundamento da tensão, também chamado de “*sag*” (redução brusca no valor nominal da tensão, que pode durar até um minuto), a interrupção do sinal (*blackout*, com duração mais longa), a sobretensão (responsável pela maioria dos danos de origem elétrica nos equipamentos eletrônicos), a sobretensão transitória (também chamada transitórios ou impulsos transitórios), a flutuação (variação no valor nominal da tensão, perceptível com a variação do brilho das lâmpadas) e a cintilação ou “*flicker*” (flutuação constante, em que é perceptível variação na intensidade luminosa com certa frequência).

A figura 2.2, a seguir, ilustra a classificação das perturbações na amplitude do sinal de tensão, e a figura 2.3 exemplifica cada forma de distúrbio.

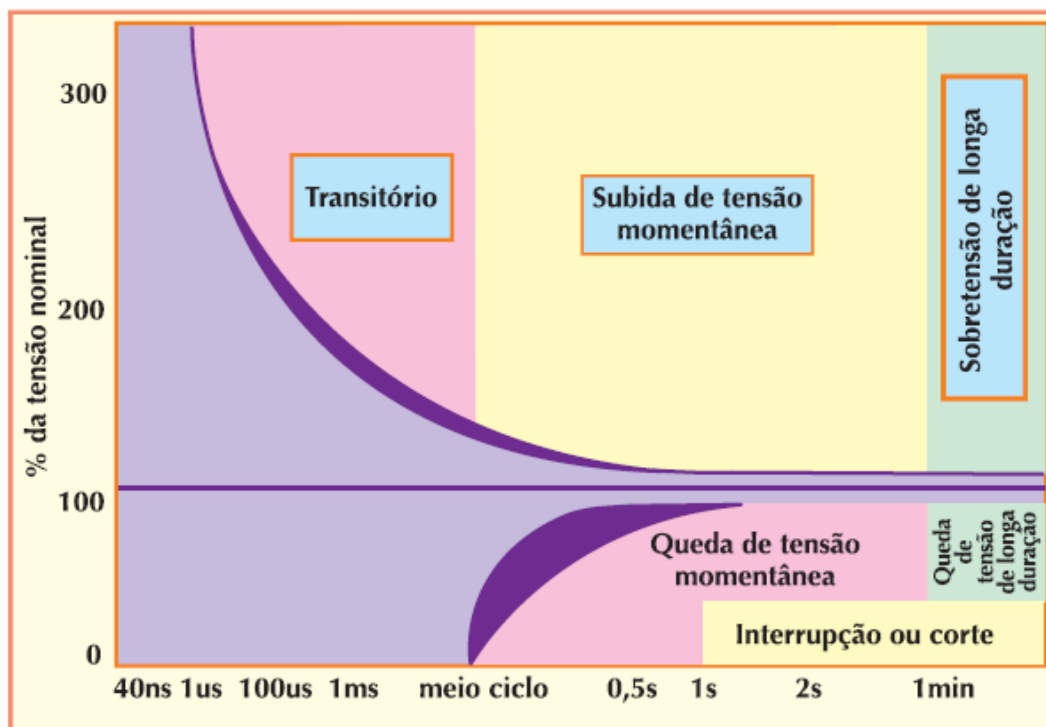


Figura 2.2: Curva de classificação das perturbações na amplitude da tensão com o tempo de duração (FONTE: Harmônicas nas Instalações Elétricas. Causas, efeitos e soluções. PROCOBRE.)

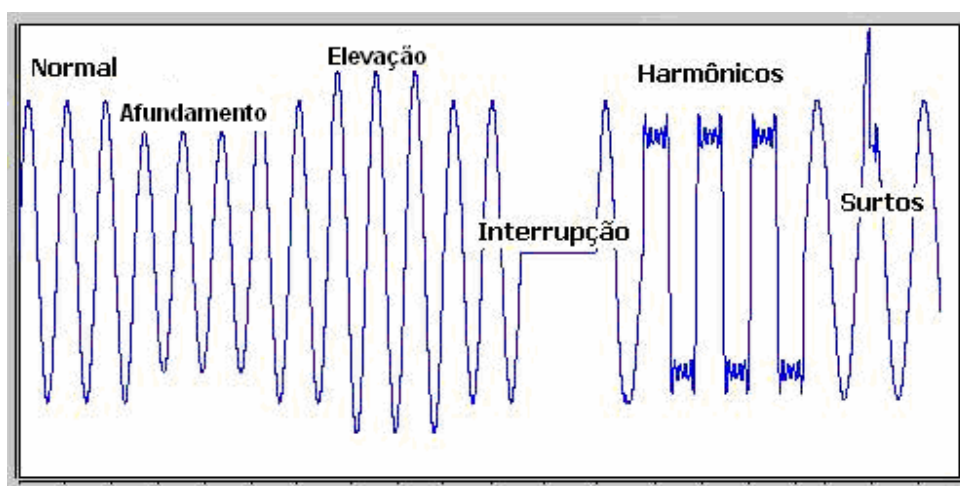


Figura 2.3: Exemplos de distúrbios na amplitude do sinal (FONTE: Engcomp Tecnologia em Automação e Controle LTDA, [http://www.engcomp.com.br/pow\\_qual.htm](http://www.engcomp.com.br/pow_qual.htm)) [5]



#### 2.3.2.2 – Perturbações na frequência do sinal

A perturbação na frequência do sinal muitas vezes não chega a ser perceptível para os consumidores e tende a ser imperceptível com o avanço do sistema. Porém, quando ultrapassa um valor limite, pode causar imensos danos.

Tais distúrbios são causados principalmente por problemas nos sistemas de geração e distribuição, quando um bloco gerador interrompe o fornecimento ou uma grande unidade consumidora é desligada.

Essa perturbação é responsável pela atuação de protetores de subfrequência (quando existentes) e pelo incorreto funcionamento de motores.

#### 2.3.2.3 – Desequilíbrios de tensão ou corrente nos sistemas trifásicos

Os desequilíbrios de tensão ocorrem quando as tensões apresentam módulos diferentes, ou defasagem diferentes de  $120^\circ$  entre as fases, ou os dois simultaneamente. De certa forma, obter um sistema equilibrado não é nada fácil, sendo tolerado desequilíbrio entre 2% e 3% entre as fases.

Esse desequilíbrio pode ser gerado desde pela simples instalação mal projetada (quando uma das fases possui carga maior que as outras), até pela interrupção no fornecimento em uma das fases da instalação (queima de fusíveis ou abertura de disjuntores mal posicionados), dentre outros.

Os desequilíbrios de corrente ocorrem de forma similar, quando a corrente que flui pelas fases não são iguais e resultam numa corrente diferente de zero a fluir pelo condutor neutro, provocando um sobreaquecimento dos componentes da instalação. Para esse distúrbio, de forma geral, são tolerados desequilíbrios de corrente de até 10%.

#### 2.3.2.4 – Perturbações na forma de onda do sinal

Dentre as diversas perturbações presentes na forma de onda, este estudo focará principalmente as harmônicas. Esse tipo de perturbação deve-se ao aparecimento de formas de onda de tensão ou corrente em frequências múltiplas da frequência fundamental, que, ao serem somadas a esta, distorcem a forma de onda significativamente.

As distorções harmônicas ocorrem principalmente pela inserção de cargas não-lineares nos circuitos elétricos, representadas em grande quantidade pelos dispositivos de eletrônica de potência, como reatores eletrônicos, controladores de velocidades, fontes chaveadas, inversores, entre outros mais bem exemplificados adiante.

### 2.3.3 – Cargas geradoras de distúrbios

Para se compreender melhor a forma como as cargas conectadas à rede elétrica podem interferir nos circuitos, elas devem ser analisadas em dois grupos diferentes, as cargas lineares e as não-lineares.

#### 2.3.3.1 – Cargas lineares

Pode-se dizer que em um sistema que só existam cargas lineares conectadas, tanto a forma de onda da tensão como a forma de onda da corrente seriam puramente senoidais. As cargas consideradas lineares são aquelas compostas principalmente por resistores, indutores e capacitores. Esses componentes eletrônicos são capazes, apenas, de causar um defasamento entre as duas formas de onda, mantendo, ainda assim, o sistema linear.

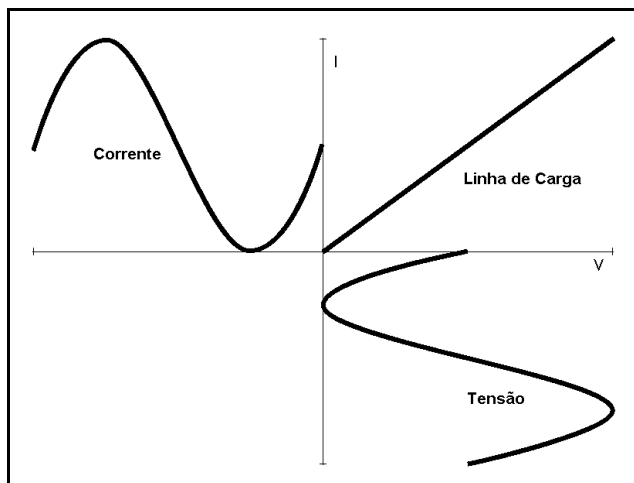


Figura 2.4: Relação entre tensão e corrente em um circuito formado por cargas lineares. FONTE: Qualidade de energia – Harmônicas. Schneider Electric e PROCOBRE [6]

### 2.3.3.2 – Cargas não-lineares

Os avanços da eletrônica fina e principalmente da eletrônica de potência são os principais responsáveis pela poluição com componentes harmônicas nos sistemas elétricos. À medida que a tecnologia proporcionou para o homem maior controle e aproveitamento da energia elétrica disponível, acabou por resultar na inserção de distorções harmônicas na rede.

Os equipamentos são constituídos não apenas de componentes lineares mas também de componentes eletrônicos, com a intenção de controlar a forma de onda e otimizar o consumo de energia. Assim, os componentes operam em modo de interrupção e condução, tais como os diodos, transistores, tiristores, e outros, resultando numa fonte de corrente distorcida. Os principais tipos de equipamentos que atuam como cargas não-lineares são:

- Variadores de velocidade para motores de corrente contínua e motores assíncronos;
- Retificadores, carregadores de bateria;
- Linhas a corrente contínua;
- Fontes chaveadas para computadores, televisores, videocassete, etc.;
- Reatores eletrônicos para lâmpadas fluorescentes e outros tipos de lâmpadas.

Diferentemente dos dois últimos grupos de equipamentos, os três primeiros, por fazerem parte de uma planta industrial, na maioria das vezes são levados em conta no momento da instalação, por causa da quantidade de harmônicos que estes são capazes de despejar na rede elétrica. Portanto, há quase sempre cuidado em se instalar filtros de harmônicos na entrada desse tipo de circuito.

Já os dois últimos grupos de cargas não-lineares, por produzirem distorções menos significativas, são instalados na rede elétrica sem a menor preocupação com o problema que podem acarretar, de acordo com a quantidade de equipamentos instalados. Problemas esses muitas vezes mal diagnosticados.

As figuras 2.5 e 2.6, a seguir, ilustram o funcionamento de dispositivo controlador de corrente e tensão, acoplado a carga composta por um resistor e um indutor, que poderia ser um motor monofásico, e as formas de onda da corrente e da tensão do circuito. Dessa forma, pode-se perceber como a atuação de cargas não-lineares pode ser prejudicial ao sistema elétrico.

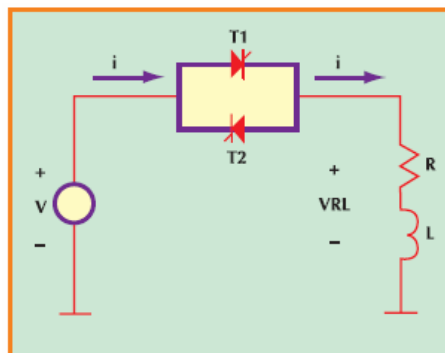


Figura 2.5: Circuito linear com controlador de tensão e corrente(Fonte: Harmônicas nas Instalações Elétricas. Causas, efeitos e soluções. PROCOBRE.)

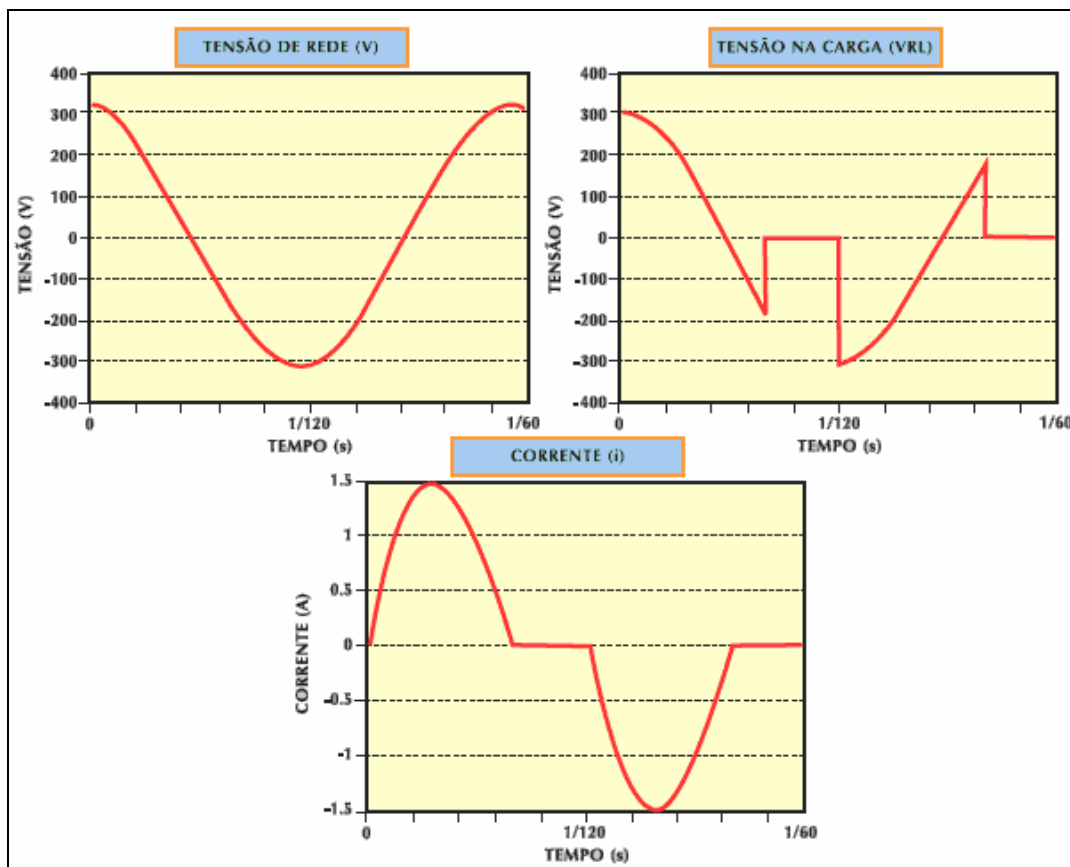


Figura 2.6: Formas de onda da tensão da rede e na carga, e forma de onda da corrente na carga (Fonte: Harmônicas nas Instalações Elétricas. Causas, efeitos e soluções. PROCOBRE.)

As fontes chaveadas, em especial, tornam-se as grandes vilãs das instalações elétricas em edifícios comerciais, uma vez que sua utilização ocorre de forma aleatória e

indiscriminada, ao mesmo tempo em que são imprescindíveis, por serem parte integrante da grande maioria dos equipamentos eletrônicos.

Uma vez que o fabricante não se preocupa em instalar filtros de harmônicos na entrada dessas fontes, a concentração de grande quantidade de equipamentos num mesmo circuito acaba por afetar seriamente o funcionamento dos componentes da instalação elétrica (cabos e transformadores), como também pode resultar em danos aos outros equipamentos eletrônicos (até mesmo iguais aos precursores do problema) conectados à mesma rede de alimentação.

A figura abaixo, retirada da apostila do Instituto Brasileiro do Cobre (PROCOBRE) [6], ilustra de forma simplificada como uma fonte chaveada monofásica opera e insere na rede elétrica uma grande quantidade de correntes harmônicas.

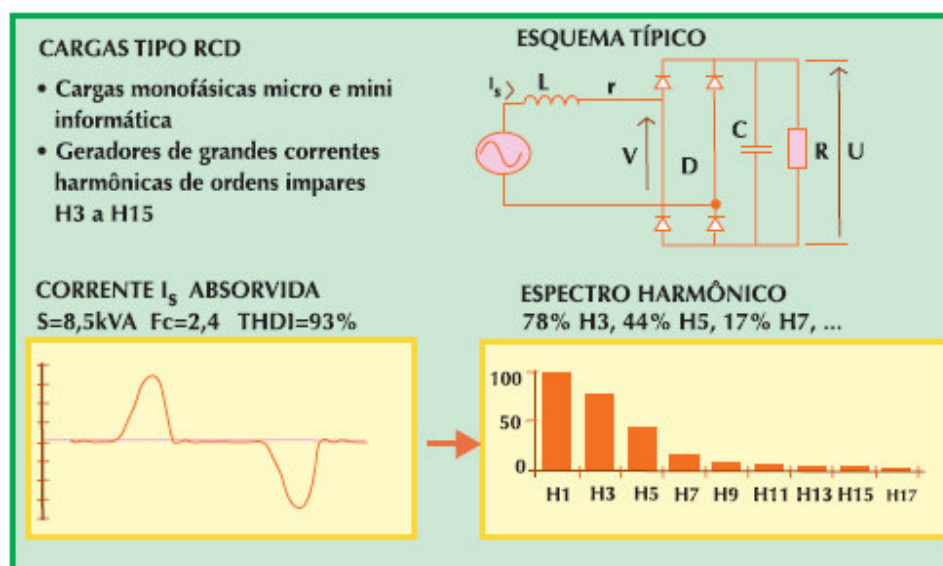


Figura 2.7: Típico circuito de uma fonte chaveada (Fonte: Harmônicas nas Instalações Elétricas. Causas, efeitos e soluções. PROCOBRE.)

## 2.4 – DISTORÇÕES HARMÔNICAS

Como mencionado anteriormente, as distorções harmônicas presentes na rede elétrica são injetadas de volta nos sistemas de suprimento pela introdução de cargas não-lineares nas instalações elétricas.

O órgão regulador da energia elétrica no Brasil, ANEEL, define distorção harmônica total da seguinte forma:

“Distorção harmônica total: composição das distorções harmônicas individuais que expressa o grau de desvio da onda em relação ao padrão ideal, normalmente referenciada ao valor da componente fundamental.” [7]

Dessa forma, com o correr dos anos, analisar a distorção harmônica passou a ser um item indispensável na especificação e na compra de um equipamento, ou no projeto de um sistema de distribuição de energia.

A maioria dos equipamentos eletrônicos que possuem uma fonte chaveada ou um sistema de controle (velocidade ou consumo), por se comportarem como cargas não-lineares, requisitam da rede elétrica correntes distorcidas. Como, muitas vezes, esses equipamentos são instalados muito próximos uns dos outros, um equipamento pode interferir no funcionamento de outro.

Conforme enunciado na revisão matemática, toda forma de onda pode ser representada por um somatório de formas de onda em senos e cossenos. Assim, a forma de onda da corrente pode ser decompostas em uma corrente fundamental em 60 Hz e uma série de formas de onda cuja frequência é um múltiplo inteiro da fundamental, chamadas de harmônica. De forma geral, as correntes harmônicas pares são desprezadas, pela baixa intensidade. Os harmônicos mais prejudiciais aos equipamentos e as instalações elétricas são, principalmente, o terceiro (180 Hz), o quinto (300 Hz), o sétimo (420 Hz) e o nono (540 Hz).

Portanto, a ausência de previsão da instalação de cargas não-lineares pode ser uma prática extremamente danosa que acarrete uma série de problemas nos equipamentos e nas instalações.

#### **2.4.1–Conseqüências**

A alteração do padrão da forma de onda de tensão, pela presença de múltiplos harmônicos e pela inserção de correntes harmônicas nas instalações, pode gerar impactos tanto nos equipamentos que produzem essas distorções, nos elementos da própria instalação, como também em equipamentos de uma instalação vizinha.

As conseqüências da presença de distorções harmônicas podem ser dividida em quatro grupos:

- Problemas com o isolamento das instalações, na medida em que os harmônicos de tensão podem vir a romper a rigidez dielétrica dos isolantes, provocando curtos-circuitos;
- Problemas com a condução de corrente nos condutores, uma vez que a sobreposição das correntes pode atingir níveis superiores ao limite dos condutores;
- Interferência no funcionamento de outros equipamentos, por conta da presença de harmônicas de tensão e/ou corrente, resultado do aparecimento de conjugados oscilatórios, falhas em equipamentos diversos e até na operação errônea de disjuntores, relés e fusíveis;
- Redução no fator de potência da instalação, má operação de disjuntores, relés e fusíveis e até erros na medição do consumo de energia.

À medida que as interferências harmônicas assumem níveis maiores, essa distorção pode incorrer em problemas nos equipamentos de potência da instalação, como os transformadores e capacitores.

Além das perdas nos enrolamentos por efeito joule, a presença de correntes harmônicas interfere na capacidade de condução dos fios, pois, com o aumento da frequência, os elétrons tendem a fluir pelas porções mais externas do condutor, reduzindo a área útil dele, que, por sua vez, acarreta aumento da resistência. Outras perdas no interior dos transformadores são atribuídas às distorções harmônicas. As correntes induzidas no interior dos enrolamentos pelas componentes de alta frequência resultam num sobreaquecimento do transformador. Para contornar o problema, ou o transformador acabará sendo subdimensionado, ou terá sua vida útil reduzida, caso não seja especificado para o local um transformador de isolamento (com blindagens que garantam o isolamento galvânico e protejam o secundário de eventuais picos de tensão).

Os capacitores também são muito atingidos pelas distorções impostas pelas cargas não-lineares. Quando ligados em paralelo com a rede (como um banco de capacitores), acabam por atuar como filtros, criando um caminho de baixa impedância para as componentes de alta frequência.

A sobreposição das correntes harmônicas à corrente fundamental aumenta a carga térmica dos capacitores reduzindo assim sua vida útil. Outro problema consiste na

possibilidade de serem produzidas ressonâncias em seu interior, que os submetem a sobretensões podendo danificar suas isolações.

O foco deste estudo está na interferência produzida pela fonte chaveada presente nos computadores pessoais, bem como na proposta de soluções viáveis para o problema. Assim, conforme enunciado na introdução, o mau funcionamento de alguns computadores pode vir a ser atribuído às interferências produzidas por eles mesmos.

Ao se alimentar um computador com tensão distorcida, o funcionamento dele pode estar comprometido. Isso se deve ao simples fato de sua fonte chaveada depender de sinais gerados pela passagem em zero da tensão de alimentação que passará a ocorrer em momentos indevidos, resultado da sobreposição da tensão fundamental com os harmônicos presentes.

Com o intuito de reduzir tais problemas, as normas internacionais (IEEE-519, IEC 61000, EN 50160) impõem que equipamentos e instalações elétricas não produzam níveis harmônicos superiores a limites específicos. Assim, um equipamento isolado não será problema para a instalação elétrica. Contudo, como muitas vezes há demanda muito grande por esse tipo de equipamento, as distorções que cada um produz acabam sobrepondo-se. Por isso, aquelas mesmas normas indicam limites de distorção para as tensões das redes elétricas.

## 2.4.2–Índices de distorção harmônica

Em face da necessidade de se determinarem numericamente as harmônicas presentes numa instalação elétrica, são definidos índices percentuais de distorção total de corrente e tensão, cuja magnitude expressa a deformação total de um sinal. Tais deformações podem ser expressas de duas formas distintas, uma em relação à intensidade da fundamental, outra em relação ao total de harmônicas existentes. Esses índices, conhecidos como DHT, são assim expressos:

$$DHT_{fundamental} = \frac{\sqrt{(h_2)^2 + (h_3)^2 + (h_4)^2 + \dots + (h_h)^2}}{h_1} \times 100\% \quad (2.49)$$

$$DHT_{total} = \frac{\sqrt{(h_2)^2 + (h_3)^2 + (h_4)^2 + \dots + (h_h)^2}}{\sqrt{(h_1)^2 + (h_2)^2 + (h_3)^2 + \dots + (h_h)^2}} \times 100\% \quad (2.50)$$

Em que  $h_1$  representa o valor máximo de corrente ou tensão na frequência fundamental e  $h_n$  representa os mesmos valores para os harmônicos [4]. Esses índices traduzem uma medida do valor eficaz das componentes harmônicas de uma forma de onda distorcida.



Essas duas maneiras de expressar a distorção harmônica presente numa rede, seja de tensão, seja de corrente, são válidas. Entretanto, vale ressaltar que a expressão representada na equação (2.48) é a mais utilizada, por comparar toda a intensidade de distorção presente no sinal com a intensidade da fundamental (parcela do sinal realmente desejada).

Dessa forma, para este trabalho, depois de breve discussão acerca de quais distorções utilizar, optou-se por priorizar as DHTs calculadas em relação à fundamental do sinal. Intuitivamente, pode-se perceber que, quão menores forem as intensidades dos harmônicos, menor será a DHT e mais próximo do ideal estará, a instalação elétrica do local.

No momento, não há norma em vigor para regulamentar os níveis de DHT permitidos no Brasil. No mundo, esse assunto ainda é tema de discussão, porém há recomendações (vide tabela 2.2), que servem como parâmetros de comparação, como a IEEE 519 – 1992.

Tabela 2.2: Limites para distorção harmônica de corrente em Sistemas de Distribuição (120V a 69kV).

FONTE: IEEE 519 – 1992 [9]

<b>Máxima corrente harmônica em % da corrente de carga (Io – corrente fundamental)</b>						
<b>Harmônicas Ímpares</b>						
Icc / Io	< 11	11 ≤ n < 17	17 ≤ n < 23	23 ≤ n < 35	35 < n	TDD (%)
< 20	4	2	1,5	0,6	0,3	5
20 < 50	7	3,5	2,5	1	0,5	8
50 < 100	10	4,5	4	1,5	0,7	12
100 < 1000	12	5	5	2	1	15
> 1000	15	6	6	2,5	1,4	20

Outra recomendação internacional é a constante da IEC 61000-3-2 [10], segundo a qual os equipamentos eletrônicos devem possuir DHTI máxima de 30% e terceira harmônica com máximo de 10% em relação à corrente fundamental, calculada como a equação (2.51).

$$DHI_{3^o} = \frac{I_{h3}}{I_{h1}} \times 100\% \quad (2.51)$$

### 2.4.3–Soluções

Embora a eliminação da fonte produtora de harmônicos fosse a melhor solução, outras menos radicais podem ser propostas. Concomitantemente à especificação de equipamentos que atendam às normas mencionadas anteriormente, pode-se recorrer a outros artifícios para buscar maior qualidade da energia, como a utilização de reatores de linha, a implantação de melhorias nas instalações elétricas (fiação e aterramento), o uso de transformadores de isolamento e de diversos tipos de filtros de harmônicos.

## 2.5–FILTROS

Os filtros são dispositivos que permitem a passagem da frequência fundamental (60 Hz) pela linha e bloqueia ou drenam as frequências indesejadas (harmônicos), com a intenção de reduzir ao mínimo os distúrbios na rede. Há, atualmente, dois tipos de filtros: os passivos e os ativos. Contudo, há quem considere a associação dos dois uma nova classe, a dos filtros híbridos.

### 2.5.1–Passivos

O filtro passivo é um dispositivo eletrônico, geralmente de componentes lineares e passivos (resistores, capacitores e indutores), cuja finalidade é retificar a forma de onda de tensão ou de corrente. Composto basicamente por um indutor e um capacitor, esses filtros são geralmente instalados em circuitos com grande distorção de corrente e com necessidade de correção do fator de potência.

Os filtros passivos de correntes harmônicas podem ser em derivação ou em série. O filtro passivo em derivação funciona drenando para a terra toda e qualquer corrente harmônica solicitada da rede ou emitida pelo equipamento de volta ao sistema pelo neutro. Um exemplo de ligação de um filtro passivo em derivação é mostrado na figura 2.8. O filtro passivo em série são dotados de um circuito paralelo ressonante LC que bloqueia a condução da frequência de ressonância do circuito, ficando livre a passagem das frequências superiores e inferiores à largura da banda do circuito. Um esquema de ligação desse filtro é mostrado na figura 2.9.

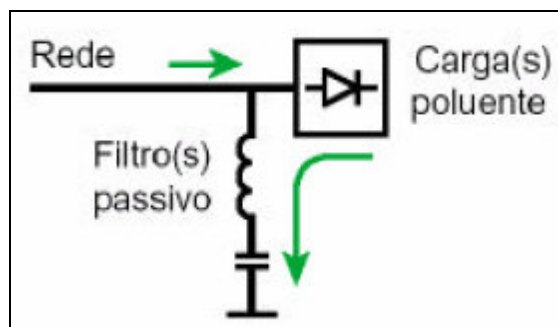


Figura 2.8: Ligação típica de um filtro passivo de harmônicas em derivação (Fonte: Qualidade de Energia. Harmônicas. PROCOBRE / SCHNEIDER.)

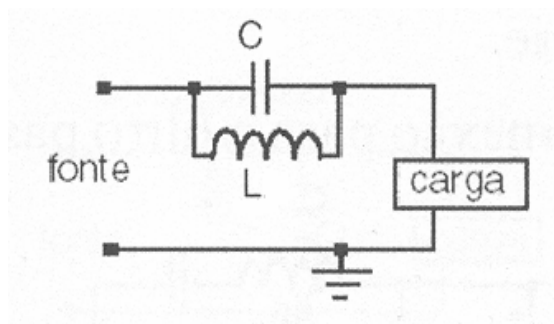


Figura 2.9: Ligação típica de um filtro passivo de harmônicas em série. [12]

Para que o filtro seja eficiente, é necessário dimensionar seus componentes, de forma que sua frequência de ressonância seja numericamente igual à frequência da corrente harmônica que se deseja drenar, ou muito próxima dela. Tal característica deve-se ao fato de que o filtro servirá como um curto-circuito para as correntes harmônicas e como uma impedância muito grande para a corrente fundamental.

O dimensionamento desses componentes deve obedecer a uma relação de compromisso entre a frequência da corrente que se deseja drenar e sua intensidade, uma vez que os capacitores e os indutores possuem limites de operação. Basicamente, deve-se atentar para a seguinte equação e posteriormente escolher adequadamente os componentes a serem utilizados:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.52)$$

A grande desvantagem desse tipo de filtro é que, para uma instalação com presença de várias harmônicas, será necessário um filtro para cada frequência indesejada, tornando-o demasiadamente grande. Dessa forma, dependendo da situação, deve-se priorizar a drenagem das componentes mais altas e nocivas ao sistema.

Para reduzir as distorções harmônicas logo na entrada da alimentação dos equipamentos, o filtro passivo a ser dimensionado é a solução mais viável economicamente nos dias atuais.

Entre as soluções mais simples, pode utilizar um indutor em série com a entrada do equipamento que gera as distorções indesejadas. Geralmente, esse equipamento possui uma

ponte de diodos com a função de retificador seguido de filtro capacitivo, como pode ser visto na figura 2.9, a seguir:

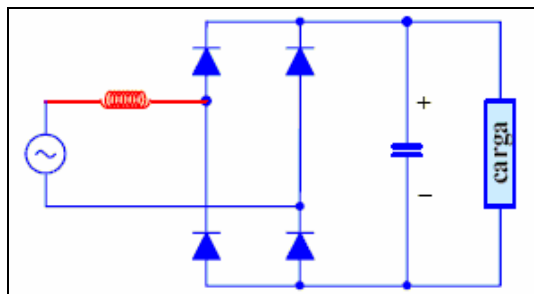


Figura 2.10: Filtro passivo composto por indutor em série com o circuito retificador do equipamento poluidor (Fonte: Revista O ELETRICISTA, nº. 9, 3º trimestre de 2004, ano 3.) [14]

A implementação da solução proposta acima limita-se a equipamentos de baixa potência (até 600 VA), em virtude do peso excessivo do indutor e do espaço que ele requer.

### 2.5.2–Ativos

O filtro ativo faz uso da eletrônica para produzir componentes que cancelem os harmônicos gerados pelas cargas não-lineares. Um circuito ativo gera e injeta correntes harmônicas com ângulo de fase oposta àquelas produzida pela carga não-linear, então, há uma redução considerável destas ordens harmônicas. Existem várias topologias de filtro ativo, mas a mais usada baseia-se na modulação PWM. Esse filtro é conectado em paralelo com a carga.



Figura 2.11: Ligação típica de um filtro ativo de harmônicas (Fonte: Harmônicas nas Instalações Elétricas. Causas, efeitos e soluções. PROCOBRE).

O filtro ativo gera uma corrente  $I_{FA}$  com as mesmas componentes harmônicas da corrente  $I_{CH}$ , defasadas de  $180^\circ$  da mesma. Com esse procedimento, a corrente  $I_{FA}$  cancelará as correntes harmônicas presentes na corrente  $I_{CH}$ . Conseqüentemente, a corrente  $I_s$  terá forma de onda senoidal, semelhante à fundamental. Um filtro ativo tem, em sua configuração, um inversor de tensão com modulação PWM, um filtro para interface entre a fonte e o sistema de potência e transistores IGBT, como pode ser mostrado pela figura abaixo:

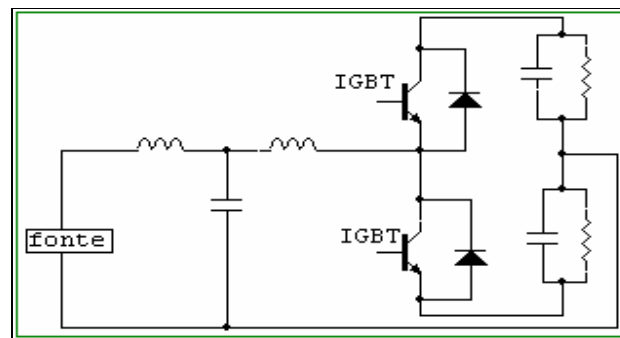


Figura 2.12: Esquema básico de um filtro ativo (Fonte: Qualidade na energia elétrica. Ricardo Aldabó.) [12]

A forma de onda de corrente usada para cancelar os harmônicos desejados é obtida pela fonte do inversor. O filtro tem como função converter em sinal de corrente o sinal de tensão gerado pelo inversor. Os componentes IGBT possibilitam que se obtenha a forma de onda da corrente. Uma idéia das formas de onda em cada trecho da figura 2.12 é mostrada na figura a seguir:

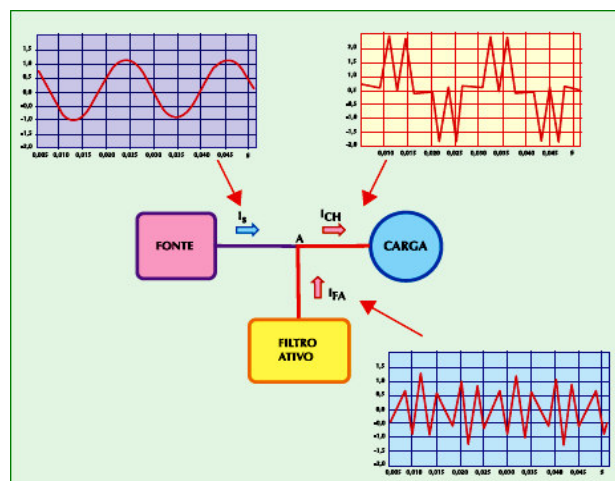


Figura 2.13: Exemplo de atuação de um filtro ativo (Fonte: Harmônicas nas Instalações Elétricas. Causas, efeitos e soluções. PROCOBRE.)

O filtro deve ter taxa de amostragem alta, a fim de que se possa ter precisão na caracterização dos harmônicos durante a monitoração da corrente e criar uma corrente adequada para o cancelamento dos harmônicos.

Existem algumas vantagens no uso de filtros ativos em relação à de filtros passivos. São elas:

- Larga faixa de espectro de frequência de atuação;
- Inexistência de ressonância;
- Independência quanto à carga e à fonte.

Apesar de bastante eficientes, esses dispositivos apresentam custos muito mais elevados que os filtros passivos, o que acaba limitando sua utilização.

### 2.5.3–PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO FILTRO

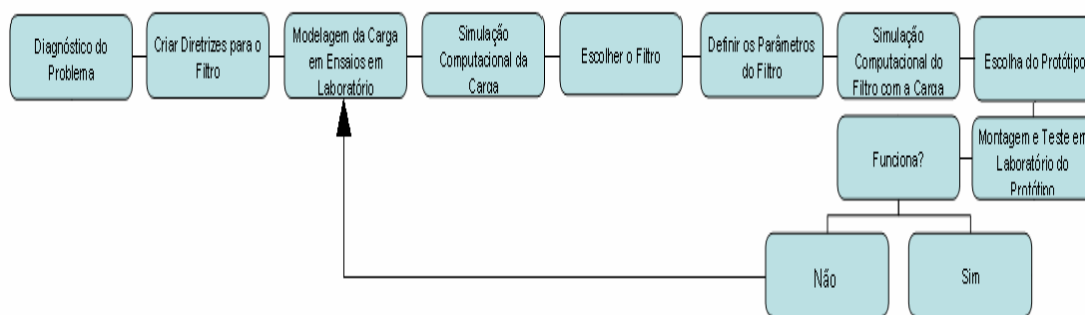


Figura 2.14: Processo de fabricação de filtro.

- **Diagnóstico do Problema:** verificar a ocorrência de distorções harmônicas na rede elétrica.
- **Criar Diretrizes para o Filtro:** determinar as distorções harmônicas máximas toleráveis na rede elétrica com base em referências normativas.
- **Modelagem da Carga em Ensaios em Laboratório:** analisar a carga emissora de harmônicos e criar um modelo computacional (fontes de corrente) confiável e coerente.
- **Simulação Computacional da Carga:** o modelo computacional deve ter um comportamento semelhante ao da carga emissora de harmônicos durante o teste.

- **Escolher o Filtro:** determinar as topologias de filtros a ser implementadas (filtro série ou em derivação).
- **Definir os Parâmetros do Filtro:** determinar os harmônicos que serão atenuados e com base nisso, calcular o valor dos componentes (indutores e capacitores) de acordo com os valores comerciais disponíveis para cada componente, criando assim uma série de configurações diferentes de protótipos computacionais.
- **Simulação Computacional do Filtro com a Carga:** teste de desempenho dos protótipos computacionais.
- **Escolha do Protótipo:** determinar o(s) protótipo(s) a ser montados de acordo com o desempenho computacional.
- **Montagem e Teste em Laboratório do(s) Protótipo(s):** teste de eficácia do protótipo montado. Caso seu desempenho não seja satisfatório, rever as etapas do projeto a partir da Modelagem da Carga emissora de harmônicos.

Ao longo deste trabalho, cada etapa do processo de fabricação do filtro será abordada de forma mais detalhada para o melhor entendimento por parte do leitor.

### 3 – IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA

De acordo com o que foi relatado no final do capítulo anterior, foram realizadas no edifício Anexo I da Câmara dos Deputados várias medições em lugares distintos com a finalidade de confirmar a suspeita de excesso de distorção harmônica presente na rede elétrica.

Para coletar os dados necessários para a análise do problema foi utilizado um analisador de qualidade modelo Primata P50 já existente na Câmara dos Deputados. Este equipamento, porém, não realiza medições com correntes de baixa intensidade. Para isso os condutores de alimentação dos computadores foram adaptados em uma espira de 40 (quarenta) voltas em um tubo de PVC de 50 mm de diâmetro, para que assim o analisador pudesse coletar os dados desejados. Tal adaptação pode ser observada na figura 3.1 logo abaixo.



Figura 3.1: Adaptação da alimentação do computador para realizar a medição



Já para as medições realizadas no quadro de distribuição do 19º Andar do edifício Anexo I da Câmara dos Deputados não foi preciso utilizar o esquema da figura 3.1, uma vez que a corrente circulante nos condutores estavam na faixa de operação do Primata P50.

Vale ressaltar que a adaptação criada para a realização das medições na Câmara dos Deputados com o analisador de qualidade Primata P50 foi devidamente testada e aferida no Laboratório de Qualidade de Energia Elétrica da Universidade de Brasília com o auxílio da Fonte Califórnia 3000iX.

Para uma melhor visualização da forma de onda da tensão durante as medições nos computadores, fez-se o uso de um osciloscópio Tektronics, modelo TDS 220, como pode ser visto na figura 3.2 abaixo.

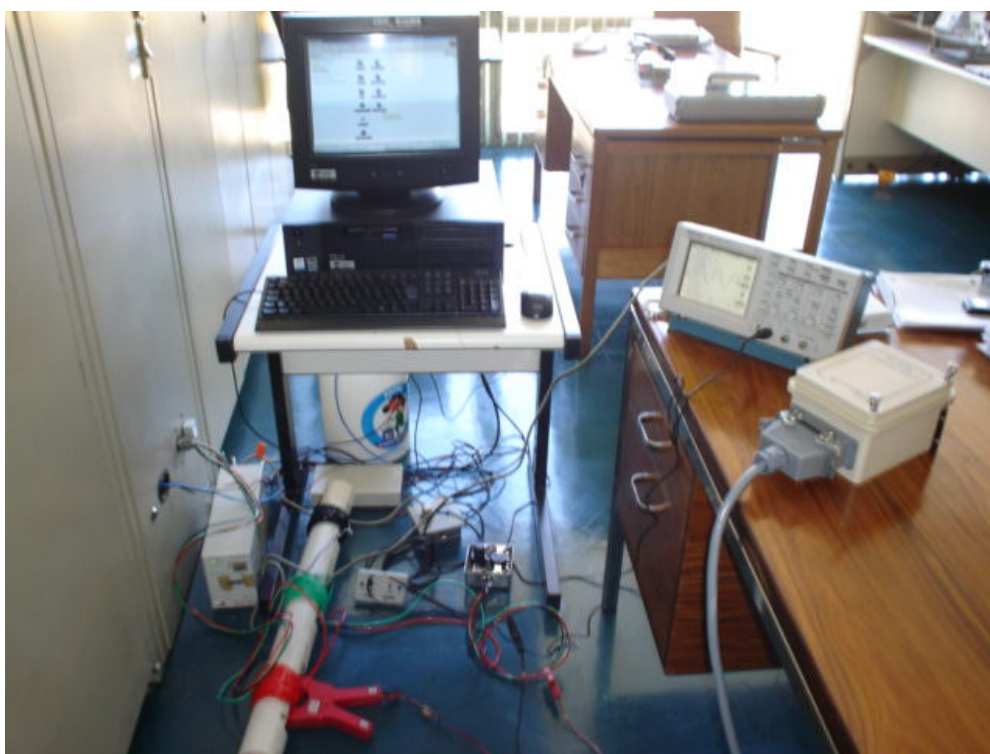


Figura 3.2: Montagem para coleta de dados de distorção harmônica de corrente e tensão

As medições realizadas nos andares 18, 19 e 20 do Anexo I da Câmara dos Deputados foram da seguinte forma:

- Medições no Quadro de Distribuição do andar 19;

- Medições em diversos pontos de tomada dos andares 18, 19 e 20 com um computador ligado, funcionando com e sem estabilizador de tensão.

Para analisar o suposto problema, o analisador de qualidade, durante as medições, coletava novos dados em intervalos de 3 (três) segundos com as seguintes características:

- Hora;
- Tensão (V), corrente (A) e fator de potência (%);
- Potências Ativa (kW), Reativa (kVAr) e Aparente (kVA);
- Distorção Harmônica Total de Tensão e Corrente, calculados em relação à fundamental;
- Tensão fundamental (valor eficaz) e suas harmônicas(em porcentagem) até a 31ª ordem;
- Corrente fundamental (valor eficaz) e suas harmônicas (em porcentagem) até a 31ª ordem;
- Corrente de Neutro.

Devido à grande quantidade de dados gerados durante as medições, estes dados foram cuidadosamente analisados e tratados estatisticamente, calculando-se a média e o respectivo desvio-padrão para cada série de dados, e anotando os valores mínimos e máximos de cada série. Dessa forma, algumas conclusões puderam ser obtidas com maior facilidade acerca do problema e as tabelas contendo estes dados, juntamente com os respectivos gráficos das médias de cada tipo de medição, estão disponíveis no Anexo A ao final deste trabalho.

## 4 – ENSAIOS E MEDIÇÕES

Inicialmente, de acordo com as medições realizadas na Câmara dos Deputados, foram criados perfis da forma de onda do circuito de alimentação de uma das redes de computadores da Câmara dos Deputados. Dessa forma, com a intenção de representar o mesmo panorama em laboratório, a Fonte Harmônica 3000iX (30 kVA) foi configurada para fornecer aos computadores ligados a ela tensões puramente senoidais e contendo uma grande variedade de distorções harmônicas, mostradas na tabela 4.1 abaixo.

Tabela 4.1: Panorama de tensão aplicada aos computadores nos ensaios monofásicos

Tensão fundamental = 220,00 V	Harmônicas de Tensão (%)									
	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	7ª	8ª	9ª	10ª	11ª
Ensaio Médio	0,07	3,85	0,07	4,20	0,04	0,53	0,02	0,79	0,02	0,37
Ensaio Máximo	0,40	4,69	0,23	5,21	0,10	0,98	0,13	1,80	0,12	1,17
Ensaio Absurdo	0,43	5,08	0,26	5,59	0,11	1,09	0,15	2,12	0,13	1,33
Ensaio Teste 1	-	3,85	-	-	-	-	-	-	-	-
Ensaio Teste 2	-	-	-	4,20	-	-	-	-	-	-
Ensaio Teste 3	-	-	-	-	-	0,53	-	-	-	-
Ensaio Teste 4	-	-	-	-	-	-	-	0,79	-	-
Ensaio Teste 5	-	3,85	-	4,20	-	-	-	-	-	-
Ensaio Teste 6	-	3,85	-	-	0,04	-	-	0,79	-	-

Os panoramas de tensão Ensaio Médio, Ensaio Máximo e Ensaio Absurdo, criados para os ensaios em laboratório, originaram-se a partir de um tratamento estatístico realizado nos dados das medições realizadas na Câmara dos Deputados.

Tais medições forneceram uma enorme base de dados para o perfil de tensão do local, e dessa forma, para cada ordem harmônica foi calculada uma média dentro das ocorrências, criando assim o que foi adotado como Ensaio Médio.

Para a criação do Ensaio Máximo, foram adotados os maiores valores observados na base de dados, visando assim analisar a resposta dos computadores com formas de onda mais severas.

Por fim, com a finalidade de supor uma condição adversa à rotina de uso diário de um computador, foi criado o ensaio denominado Ensaio Absurdo. Tal perfil de tensão foi

elaborado somando-se cada componente do Ensaio Máximo ao desvio-padrão calculado em cada harmônica de tensão presente.

Estes panoramas de tensão podem ser considerados os principais dentro dos ensaios realizados. Pois, com exceção do ensaio absurdo, refletem condições mais próximas da realidade a que os computadores são submetidos na Câmara dos Deputados. Assim sendo, os resultados destes ensaios serviram para analisar a resposta de cada computador em termos de distorções harmônicas de corrente produzidas pela fonte chaveada.

Por fim, os Ensaios Teste de 1 a 6 foram panoramas de tensão criados em conformidade com os estudos adotados pela equipe de Qualidade de Energia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia – UFU. De forma a trazê-los para a realidade da origem do problema, os valores adotados foram os obtidos com a média dos valores coletados na Câmara dos Deputados.

Para o estudo em circuitos trifásicos, os panoramas de tensão adotados seguiram as mesmas premissas dos ensaios monofásicos. A única diferença reside nos dados da medição que foram coletados diretamente de um quadro de distribuição no 19º andar do Anexo I da Câmara dos Deputados.

Finalizada a configuração da Fonte Harmônica 3000iX, os computadores foram dispostos nas bancadas disponíveis de forma a facilitar o experimento. Para isto foram utilizadas três extensões de tomadas, todas ligadas à mesma fase de saída da fonte. A imagem a seguir mostra a disposição dos computadores pelas bancadas.



Figura 4.1: Esquema de ligação para os ensaios monofásicos

Dessa forma, para não haver interferência da corrente solicitada por cada computador, os computadores que não estavam sendo testados permaneceram desconectados da tomada.

Os ensaios monofásicos foram realizados de acordo com a figura 4.2, aplicando, em cada um dos três casos, todas as formas de onda configuradas anteriormente, com a intenção de corroborar os dados coletados na Câmara dos Deputados, verificar o princípio da superposição das correntes harmônicas em uma mesma fase e analisar a resposta em cada um dos casos quanto às distorções impostas pela rede. Vale ressaltar que os computadores durante o ensaio estavam tocando um CD, com o objetivo de simular um ambiente de trabalho.

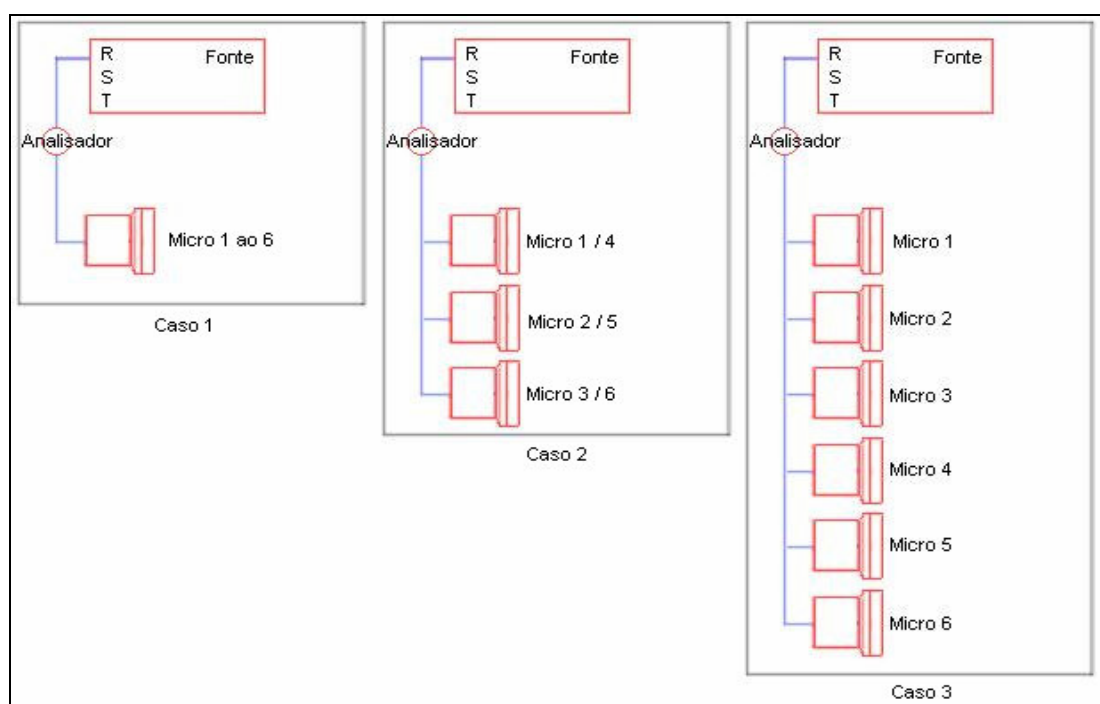


Figura 4.2: Esquema de ligação para os ensaios monofásicos

#### 4.1-DADOS OBTIDOS

Durante os testes para a elaboração de um modelo computacional e para a determinar as diretrizes para a implementação de um filtro de harmônicas foram coletados uma grande quantidade de dados com o auxílio do *software* CI 5005iX.

Para cada ensaio realizado no Laboratório de Qualidade foram coletadas tabelas com o perfil de tensão aplicado pela fonte e o perfil de corrente produzido pela carga. Tais tabelas foram então transcritas para um arquivo criado no *Excel*, para que fosse possível a manipulação

destes dados e o cálculo da Distorção Harmônica Total em cada ensaio realizado. Cada tabela era distribuída da seguinte forma:

- Linhas: representa cada componente (fundamental e harmônicas) presente no sinal;
- Colunas: representa respectivamente o valor eficaz, em porcentagem (em relação à fundamental), e o ângulo de fase.

De forma a tornar a leitura deste trabalho menos cansativa, as tabelas com as componentes da corrente solicitada pelos computadores foram também simplificadas em uma grande planilha contendo a resposta de cada micro (ou arranjo de micros) em cada ensaio.

Da mesma forma, as tabelas contendo o perfil da tensão de alimentação coletadas foram simplificadas e são apresentadas na tabela B.8.

Por fim, com as tabelas uniformizadas no *Excel*, foram criados gráficos de barras a partir dos dados obtidos que representam o perfil de corrente e tensão de cada ensaio realizado, para uma melhor visualização por parte do leitor dos dados contidos nas tabelas. As planilhas e os respectivos gráficos estão localizadas no Anexo B, no final deste trabalho.

## 4.2-ANÁLISE DOS DADOS

Com as tabelas obtidas nos ensaios, presentes no Anexo II, pode-se notar na última linha de cada planilha que foram calculados os valores de distorção harmônica de tensão e corrente (DHTU e DHTI) para cada um dos casos estudados. Para uma melhor visualização destes valores, tanto a Tabela 4.3 abaixo bem como o gráfico da Figura 4.3, trazem os valores calculados segundo a equação (2.49) para a distorção harmônica total de tensão produzida pela Fonte Califónia 3000 iX em cada um dos ensaios monofásicos realizados.

Tabela 4.2: DHTU calculada em cada ensaio monofásico

MONOFÁSICO TENSÃO										
Ensaio		Distorção Harmônica de Tensão, em relação a FUNDAMENTAL do alimentador								
		Micro 1	Micro 2	Micro 3	Micro 4	Micro 5	Micro 6	Micros 123	Micros 456	Micros 1a6
Senoidal		0,24%	0,24%	0,34%	0,34%	0,20%	0,19%	0,35%	0,36%	0,46%
Harmônicas	Médio	5,57%	5,57%	5,62%	5,61%	5,67%	5,67%	5,58%	5,59%	5,61%
	Máximo	6,46%	6,46%	6,48%	6,50%	6,57%	6,55%	6,46%	6,48%	6,48%
	Absurdo	6,72%	6,72%	6,77%	6,77%	6,84%	6,82%	6,74%	6,75%	6,77%

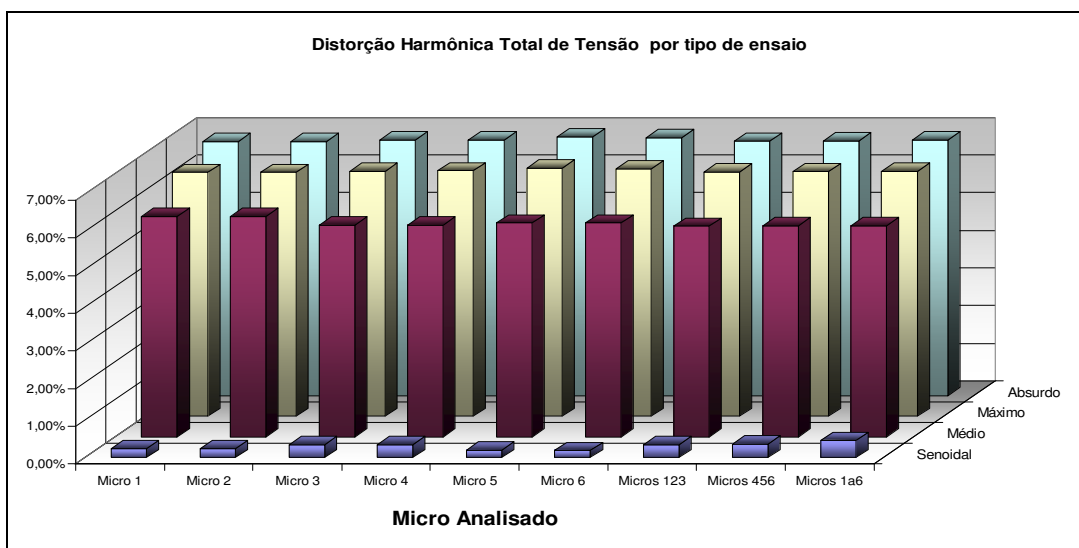


Figura 4.3: Gráfico da DHTU em cada ensaio monofásico.

O mesmo procedimento em relação à distorção harmônica total de corrente nos ensaios monofásicos foi realizado, obtendo assim a tabela 4.4 e o gráfico da figura 4.4, a seguir.

Tabela 4.3: DHTI calculada em cada ensaio.

MONOFÁSICO - CORRENTE									
Ensaio	Distorção Harmônica de Corrente, em relação a FUNDAMENTAL do alimentador								
	Micro 1	Micro 2	Micro 3	Micro 4	Micro 5	Micro 6	Micros 123	Micros 456	Micros 1a6
Senoidal	162,42%	155,82%	164,57%	147,44%	150,29%	150,28%	153,24%	140,77%	142,56%
Harmônicas	Médio	177,79%	168,18%	185,79%	157,27%	164,89%	182,20%	167,48%	157,21%
	Máximo	180,98%	175,51%	184,52%	157,48%	161,41%	179,19%	165,96%	154,06%
	Absurdo	181,64%	170,71%	175,53%	159,83%	163,15%	177,40%	165,61%	152,26%

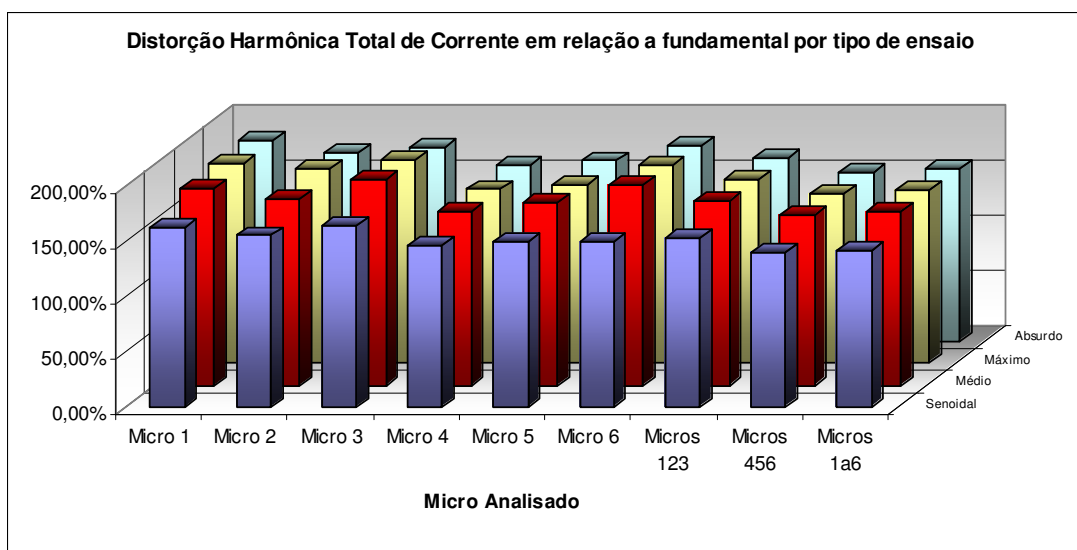


Figura 4.4: Gráfico da DHTI em cada ensaio.

Pode-se perceber tanto da tabela 4.3 quanto da figura 4.4 que cada computador, mesmo com configurações de *hardware* semelhantes, possui um comportamento diferente quando a inserção de harmônicos de corrente na rede elétrica. Mas mesmo assim, a distorção harmônica total de corrente produzida em cada um não sofreu alterações significativas.

Analisando as três últimas colunas da tabela 4.3, é possível notar que a distorção harmônica total de corrente produzida por uma suposta rede composta por três ou seis computadores gera harmônicos próximos aos produzidos individualmente por cada um dos computadores. Este fato se deve pela superposição, ou seja, harmônicos de mesma frequência possuem ângulos de fases diferentes, acarretando em uma redução do valor desses harmônicos.

Este fato pode ser facilmente explicado, uma vez que as componentes harmônicas de corrente produzidas por cada um dos computadores apresentam ângulos de fase muito próximos.

Dessa forma, comparando-se as últimas três colunas da tabela B.1, que mostra a média dos computadores no ensaio senoidal, e as colunas referentes ao ensaio senoidal da tabela B.7 (ensaio com seis micros conectados na mesma fase), pode-se notar que as componentes harmônicas presente no ensaio com a rede de seis computadores são aproximadamente proporcionais às produzidas pela média dos computadores.

Percebe-se também uma pequena redução no valor da DHTI obtida em cada computador e em cada arranjo de computadores.

As harmônicas produzidas em cada um dos computadores analisados possuem um ângulo de fase com uma pequena diferença dos demais. Este defasamento de apenas alguns graus é o responsável pelo fato de a soma vetorial das componentes harmônicas de cada computador possuir uma resultante com um módulo menor que a componente individual de cada computador.

Para melhor explicar o problema relatado acima, a seguir são apresentados os trechos das tabelas de dois micros diferentes, que se encontram na tabela B.1 do Anexo B.



Tabela 4.4: Valores obtidos com uma Senóide pura em 60 Hz no Micro 01.

Harmônica	Corrente_rms (A)	Relação com a fundamental (%)	Fase (°)
<b>Fundamental</b>	0,59	100	9,3
<b>2</b>	0	0	0
<b>3</b>	0,57	96,61	165,4
<b>4</b>	0	0	0
<b>5</b>	0,49	83,05	336,1
<b>6</b>	0	0	0
<b>7</b>	0,41	69,49	146,3
<b>8</b>	0	0	0
<b>9</b>	0,32	54,24	316,9
<b>10</b>	0	0	0
<b>11</b>	0,23	38,98	127,5
<b>12</b>	0	0	0
<b>13</b>	0,14	23,73	297,3
<b>14</b>	0	0	0
<b>15</b>	0,06	10,17	106
<b>16</b>	0	0	0
<b>17</b>	0,01	1,69	0
<b>18</b>	0	0	0
<b>19</b>	0,02	3,39	0
<b>20</b>	0	0	0

Tabela 4.5: Valores obtidos com uma Senóide pura em 60 Hz no Micro 02.

Harmônica	Corrente_rms (A)	Relação com a fundamental (%)	Fase (°)
<b>Fundamental</b>	0,63	100	11,3
<b>2</b>	0	0	0
<b>3</b>	0,6	95,24	158,6
<b>4</b>	0	0	0
<b>5</b>	0,51	80,95	325
<b>6</b>	0	0	0
<b>7</b>	0,42	66,67	131,3
<b>8</b>	0	0	0
<b>9</b>	0,32	50,79	297,2
<b>10</b>	0	0	0
<b>11</b>	0,21	33,33	103,1
<b>12</b>	0	0	0
<b>13</b>	0,11	17,46	271,1
<b>14</b>	0	0	0
<b>15</b>	0,03	4,76	0
<b>16</b>	0	0	0
<b>17</b>	0,01	1,59	0
<b>18</b>	0	0	0
<b>19</b>	0,04	6,35	0
<b>20</b>	0	0	0

Tabela 4.6: Valores obtidos com uma Senóide pura em 60 Hz nos seis micros ligados a mesma fase.

Harmônica	Corrente_rms (A)	Relação com a fundamental (%)	Fase (°)
<b>Fundamental</b>	3,66	100	6,9
<b>2</b>	0,01	0,27	0
<b>3</b>	3,32	90,71	166,5
<b>4</b>	0,02	0,55	0
<b>5</b>	2,83	77,32	337
<b>6</b>	0,02	0,55	0
<b>7</b>	2,19	59,84	147,1
<b>8</b>	0,01	0,27	0
<b>9</b>	1,52	41,53	316,4
<b>10</b>	0	0	0
<b>11</b>	0,91	24,86	123,7
<b>12</b>	0	0	0
<b>13</b>	0,43	11,75	285,6
<b>14</b>	0,01	0,27	0
<b>15</b>	0,13	3,55	59,8
<b>16</b>	0,01	0,27	0
<b>17</b>	0,12	3,28	144,2
<b>18</b>	0	0	0
<b>19</b>	0,14	3,83	291,5
<b>20</b>	0	0	0

Analisando a tabela 4.6 pode-se perceber que o princípio da superposição dos valores obtidos em cada um dos computadores realmente ocorre quando são instalados diversos computadores em uma mesma fase de um circuito, observando também, que há uma redução dos valores de algumas componentes. Como mencionado anteriormente, a superposição se dá devido a diferença dos ângulos de fase de cada uma das harmônicas geradas em cada um dos computadores.

## **5 – PROJETO DO FILTRO**

Após a realização dos ensaios com os microcomputadores no Laboratório de Qualidade de Energia Elétrica, a análise das harmônicas de corrente produzidas por cada computador quando submetido a uma forma de onda senoidal (ver tabela B.1 no anexo B) mostra que os harmônicos ímpares, que são os predominantes, possuem uma elevada distorção harmônica individual (até o 13º harmônico).

Para reduzir esses índices de distorção e conseqüentemente as correntes harmônicas que circulam pela rede elétrica, decidiu-se pelo projeto de um filtro passivo de harmônicas de corrente.

Este filtro deverá então reduzir a intensidade de cada harmônica, baixando a DHTI para um patamar abaixo de 30% (valor recomendado pela IEC). O projeto do filtro se fez em algumas etapas: simulação do filtro, fabricação do protótipo e teste do protótipo em laboratório.

### **5.1 – DESENVOLVIMENTO DO CIRCUITO MODELO NO PSPICE**

Para realizar a simulação computacional do filtro é necessário definir o *software* a ser utilizado. Pela facilidade no manuseio e da grande eficiência, optou-se pelo uso do programa *Pspice*. Para realizar as simulações com maior precisão e garantir a validade do estudo realizado, a partir dos dados coletados nos ensaios tornou-se possível o desenvolvimento de um modelo que representasse o sistema com fonte, linha e computador (carga não-linear).

#### **5.1.1 – Representação da carga não-linear**

Uma maneira encontrada de simular uma carga não-linear foi utilizar várias fontes de corrente em paralelo (simulando a corrente solicitada pela fonte chaveada) conectadas em paralelo com uma impedância constituída por um resistor e um capacitor (simulando a impedância do computador).

Os valores dos parâmetros das fontes de correntes e do valor da impedância foram escolhidos a partir dos resultados encontrados nos ensaios realizados em laboratório. Com o ensaio senoidal realizado em cada um dos micros no Laboratório de Qualidade de Energia

Elétrica, foi possível traçar um perfil médio do comportamento da corrente elétrica solicitada pela fonte chaveada de um computador.

Vale lembrar que para obter o perfil médio dos seis micros analisados foram calculadas no *Excel* as médias aritméticas dos fasores (módulo e fase transformados para pares ordenados) das componentes harmônicas de corrente produzidas em cada micro. Este perfil de corrente está destacado em amarelo na tabela B.1 no anexo B.

Contabilizar todas as harmônicas exigidas pela carga não-linear é muito difícil. Dessa forma as componentes harmônicas foram truncadas até um limiar a partir do qual as harmônicas restantes não influenciariam na análise.

Neste caso específico, preferiu-se utilizar as componentes ímpares da 3ª a 21ª ordem harmônica no modelo da carga. Os valores dos parâmetros das fontes de correntes foram extraídos da tabela B.1 de acordo com suas respectivas frequências e ângulos de fase.

Para o cálculo do valor da impedância da carga foi utilizado o módulo e a fase da corrente na frequência fundamental expressa na tabela B.1, e a tensão aplicada nos computadores, que foi de 220 V com fase de 0°. Com a expressão (2.48) e com os valores de corrente e tensão para a frequência de 60 Hz, foi possível calcular a impedância da carga.

$$Z_{carga} = \frac{V \angle \theta}{I \angle \phi} = \frac{220 \angle 0^\circ}{0,62 \angle 9,3} = 350,18 - j57,34(\Omega)$$

Com o valor da reatância capacitiva da impedância da carga, o valor do capacitor também foi calculado.

$$C = \frac{1}{\omega X_{carga}} = \frac{1}{377 * 57,34} = 46,26 \mu F$$

Portanto, no modelo desenvolvido para a simulação do filtro, o computador será representado por uma impedância com uma resistência de 350,18  $\Omega$  em série com um capacitor de 46,26  $\mu F$ , e esta impedância conectada em paralelo com dez fontes de correntes representando as dez primeiras componentes harmônicas ímpares.

### 5.1.2 – Representação da impedância da linha

Devido à complexidade no cálculo e o baixo valor, a impedância do fio é desconsiderada frente à impedância do transformador que está mais próximo da carga, ou seja,

a impedância da linha utilizada no modelo foi a impedância de um transformador trifásico de 500 kVA 13,8 kV / 380-220 V com 5% de impedância.

Para encontrar o valor da impedância do transformador, a primeira coisa a se fazer é calcular a impedância de base, que é dada pela fórmula a seguir.

$$Z_b = \frac{V_b^2}{S_b} = 0,2888 \Omega$$

Com o valor da impedância base calculado acima, a impedância do trafo (5%) é:

$$Z_{5\%} = 0,01444 \Omega$$

Para o cálculo da resistência e da reatância é necessário o valor do ângulo da impedância acima. Em uma pesquisa na *Internet* foi encontrada uma tabela no artigo *operação conjunta: filtro e bloqueador eletromagnético para harmônicos de seqüência zero*, publicado no IV SBQEE realizado de 21 a 24 de agosto de 2005 na cidade de Belém no estado do Pará. Nesta tabela estão expressos os valores de impedância, resistência e reatância para transformadores de 13,8 kV / 220-127 V para diferentes potencias. Os valores dos referidos parâmetros do transformador estão expressos na tabela abaixo.

Tabela 5.1: impedância, resistência e reatância máxima para transformador de 13,8 kV / 220-127 V. Operação Conjunta: Filtro e Bloqueador Eletromagnético para Harmônicos de Seqüência Sero. IV SBQEE, Belém – Pará - Brasil [5].

Potência do transformador (kVA)	Impedância $Z_{TR}$ ( $\Omega$ )	Resistência ( $\Omega$ )	Reatância de dispersão ( $\Omega$ )
15	0,11294	0,07314	0,07313
30	0,09780	0,03065	0,09287
45	0,08520	0,01864	0,06247
75	0,03912	0,00981	0,03787
112,5	0,02608	0,00593	0,02539
150	0,01956	0,00411	0,01912
225	0,01676	0,00258	0,01656
300	0,01257	0,00180	0,01244
500	0,00922	0,00193	0,00901

Com os valores da reatância e de resistência para o transformador de 500 kVA expresso na tabela acima, o ângulo da impedância para o referido transformador foi calculado da seguinte forma:

$$\theta_z = \arctg\left(\frac{0,00901}{0,00193}\right) = 77,91^\circ$$

Com este valor do ângulo, torna-se possível o cálculo do valor da resistência e da reatância para o transformador de 13,8 kV / 380-220 V.

$$R = Z * \cos(\theta_Z) = 0,01444 * \cos(77,91^\circ) = \underline{0,00303 \Omega}$$

$$X = Z * \sin(\theta_Z) = 0,01444 * \sin(77,91^\circ) = 0,01412(\Omega)$$

para a frequência fundamental temos que a indutância da linha é:

$$2 * 60 * \pi * L = 0,01412$$

$$\underline{L = 37,5 \mu H}$$

### 5.1.3 – Representação da fonte geradora de tensão

O gerador do sistema foi representado por uma fonte de tensão, com os seguintes parâmetros: amplitude 220 V, frequência de 60 Hz, fase de 0° e tensão de *offset* de 0 volts.

Foi desenvolvido um circuito que represente o sistema elétrico para a realização das simulações do filtro passivo. Este circuito é composto por uma fonte de tensão, por uma impedância da linha e uma carga não-linear representada por uma impedância e fontes de correntes em paralelo, todos calculados anteriormente. O modelo do circuito em *Pspice* é mostrado na figura abaixo.

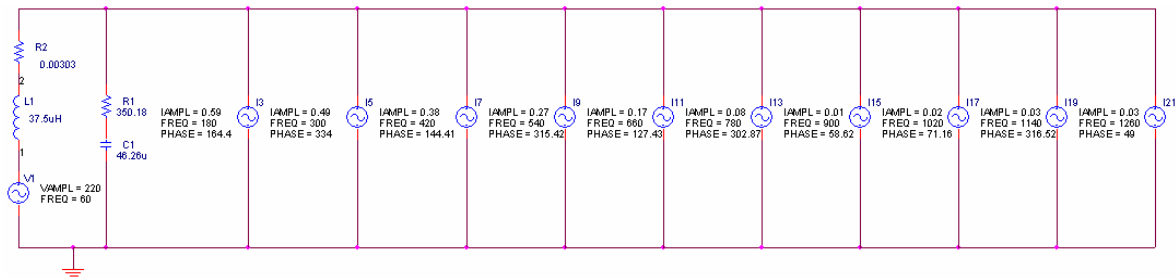


Figura 5.1: Circuito modelo em *Pspice* que representa o sistema, fonte, linha e carga não-linear.

## 5.2 – PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO E SELEÇÃO DO FILTRO DE HARMÔNICOS

Devido às várias configurações existentes de filtros passivos de harmônicas de corrente, definiu-se a seguinte metodologia para o desenvolvimento e seleção do filtro: com base nas equações citadas anteriormente, foram calculados os valores dos componentes para as diferentes configurações de filtro e os mesmos testados no programa *Pspice* utilizando o modelo do circuito elétrico definido anteriormente.

Com os resultados obtidos nas simulações, foram feitas comparações entre os filtros e então escolhida a configuração que melhor atende às características exigidas para o filtro. Por fim, será desenvolvido o protótipo do filtro com a melhor configuração e desempenho.

Com os dados expressos na tabela B.1, foi possível encontrar a forma de onda que circula pela rede elétrica no nó 1 entre a fonte de alimentação e o indutor da impedância do fio (figura 5.1). A respectiva forma de onda pode ser observada na figura 5.2.

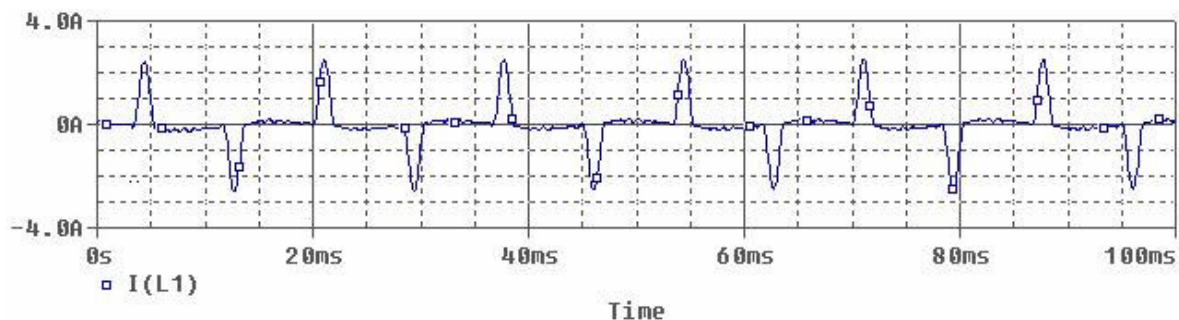


Figura 5.2: Forma da onda de corrente que circula em rede elétrica que alimenta fontes chaveadas de microcomputador.

Realizando uma análise dos dados expressos na tabela B.1, observou-se que a corrente que circula pela rede é de 1,11 ampéres, a distorção harmônica total de corrente é de aproximadamente 148%. As principais harmônicos que influenciam este índice são os de 3ª, 5ª, 7ª, 9ª e 11ª ordem.

Assim sendo, o filtro a ser projetado deverá atenuar ao máximo estes harmônicos, de modo a reduzir a distorção harmônica total de corrente (DHTI) e a distorção harmônica individual de corrente do 3º harmônico ( $DHI_3$ ) para baixo de 30% e 10% respectivamente (valores estes recomendados pela IEC), além de ter uma boa eficiência e baixo custo.

### 5.2.1 – Projeto e análise de um filtro passa-baixa de 3ª ordem

Inicialmente testou-se um filtro passa-baixa com uma frequência de corte em 180 Hz. O filtro é composto por um indutor em série de 390 mH e um capacitor em paralelo de 2  $\mu$ F. O valor de 390 mH para o indutor foi escolhido da seguinte maneira: utilizando a equação (2.52) foi calculado o valor do indutor para diferentes valores de capacitor. Como medida de

contenção de gastos e maior facilidade em encontrar os componentes no mercado, foram selecionados baixos valores de capacitância.

Abaixo é demonstrado o cálculo do indutor para um valor de capacitor, onde foram omitidos os outros cálculos por se tratar de uma simples repetição.

$$L = \frac{1}{(2\pi f_r)^2 C} = \frac{1}{(2\pi * 180)^2 * 2 * 10^{-6}} = 390mH$$

Utilizando o indutor em série com a carga, foi realizada a simulação com os diferentes valores de indutor, como pode ser visto na figura 5.3. O mesmo procedimento foi realizado com um capacitor em paralelo com a carga, cujo resultado pode ser visto na figura 5.4.

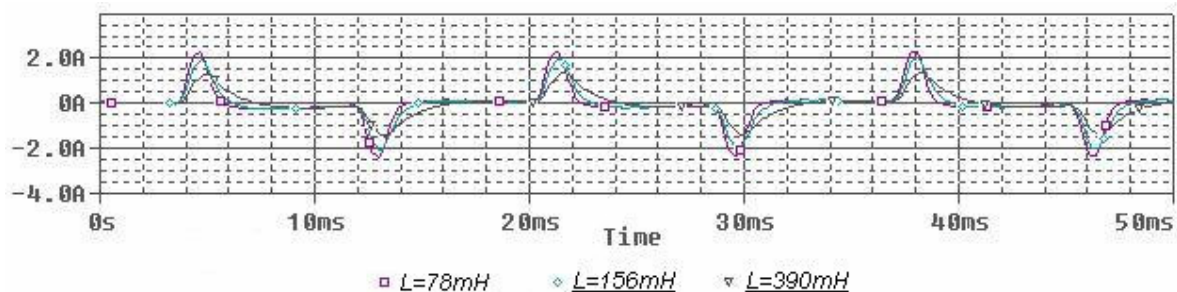


Figura 5.3: Comparação entre diferentes valores para o indutor em série.

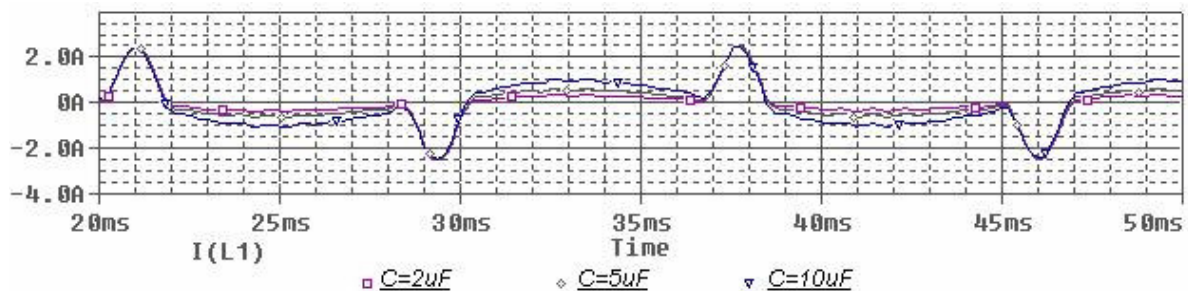


Figura 5.4: Comparação entre diferentes valores de capacitor em paralelo.

Realizando a análise das figuras 5.3 e 5.4, percebe-se que há uma maior eficiência quanto maior for o indutor e menor for o capacitor. Com esta análise decidiu-se pela utilização do indutor de 390 mH e o capacitor de 2  $\mu$ F.

Com os valores citados para os componentes do filtro passa baixa, foi desenvolvido o modelo em *Pspice* do filtro e com ele foi realizada a simulação. Os resultados estão demonstrados a seguir.



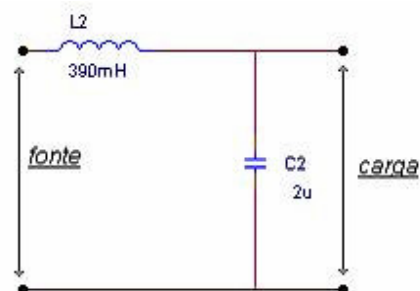


Figura 5.5: Modelo Pspice do filtro passa baixa.

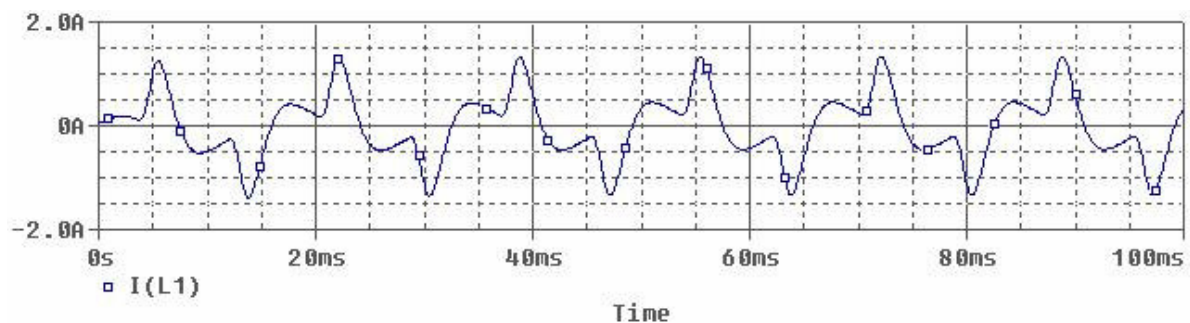


Figura 5.6: Forma de onda de corrente utilizando o filtro passa baixo com frequência de corte em 180 Hz considerando a parte transitória.

Considerando que a análise do filtro será feita em regime permanente, a forma de onda considerada é a mostrada na figura abaixo, desconsiderando o transitório.

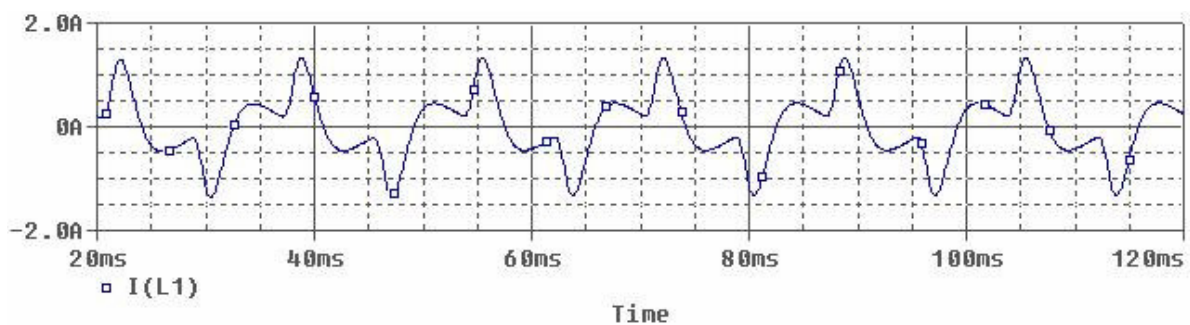


Figura 5.7: Forma de onda de corrente utilizando o filtro passa baixo com frequência de corte em 180 Hz.

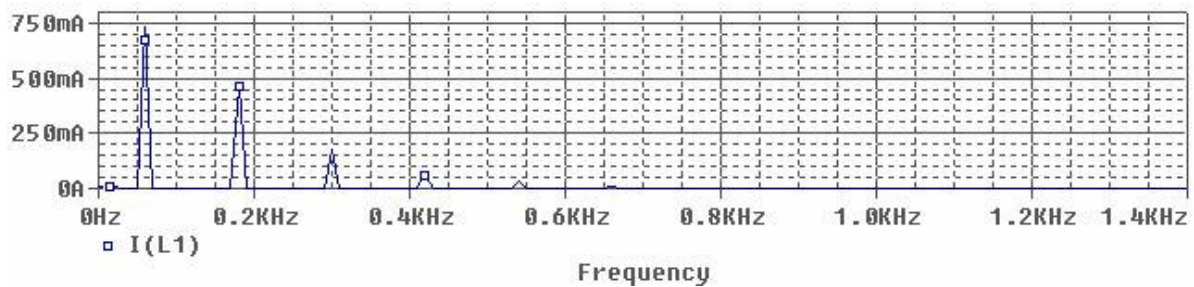


Figura 5.8: Espectro da forma de onda de corrente com filtro passa-baixa com frequência de corte em 180 Hz.

Com o espectro harmônico da forma de onda de corrente (figura 5.8) é possível encontrar o valor eficaz da harmônica para cada uma de suas frequência. Ao utilizar esses valores e a equação (2.32), encontrou-se um valor de 0,89 A para a corrente que circula na rede; já com a equação (2.49) encontrou-se um valor de 69,13% para a distorção harmônica total de corrente (DHTI); e, por fim, com a equação (2.51) encontrou-se um valor de 64% para a distorção harmônica individual da 3ª harmônica (DHI<sub>3</sub>).

Ao final das simulações com todos os modelos de filtro projetados, será feita uma comparação entre os resultados deste filtro com o dos outros e as características desejadas do filtro (DHTI < 30% e DHI<sub>3</sub> < 10%). A partir de então será selecionado a configuração do filtro a ser fabricado.

### 5.2.2 – Projeto e análise de um filtro passa-baixo de 7ª ordem com um filtro em derivação sintonizado de 3º ordem

Com a intenção de obter resultados melhores, optou-se por trabalhar com os filtros sintonizados em uma determinada frequência e em paralelo. Na configuração de filtro sintonizado, o primeiro a ser projetado foi o filtro com um passa baixa com frequência de corte de 420 Hz e um sintonizado em 180 Hz.

Para o cálculo dos componentes deste filtro utilizou-se novamente a equação (2.52), mantendo a mesma metodologia de utilizar capacitores de baixo valor de capacitância devido a uma melhor eficiência e pelos mesmos terem custos menores. Para o filtro passa baixo com frequência de corte em 420 Hz, para um capacitor de 1μF, tem-se um indutor de:

$$L = \frac{1}{(2\pi f_c)^2 C} = \frac{1}{(2\pi * 420)^2 * 1 * 10^{-6}} = 260mH$$

E para o filtro em derivação sintonizado de 3º ordem:

$$C = \frac{1}{(2\pi f_r)^2 L} = \frac{1}{(2\pi * 180)^2 * 0,39} = 2\mu F$$

Desenvolvido um modelo do filtro nesta configuração, foi feita a simulação com o programa *Pspice*. Os resultados estão demonstrados abaixo.

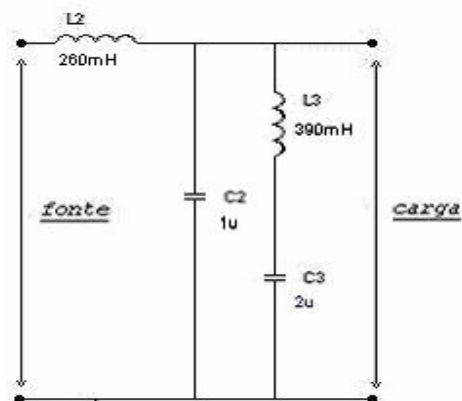


Figura 5.9: Filtro passa-baixa com frequência de corte em 420 Hz e filtro em derivação sintonizado em 180 Hz.

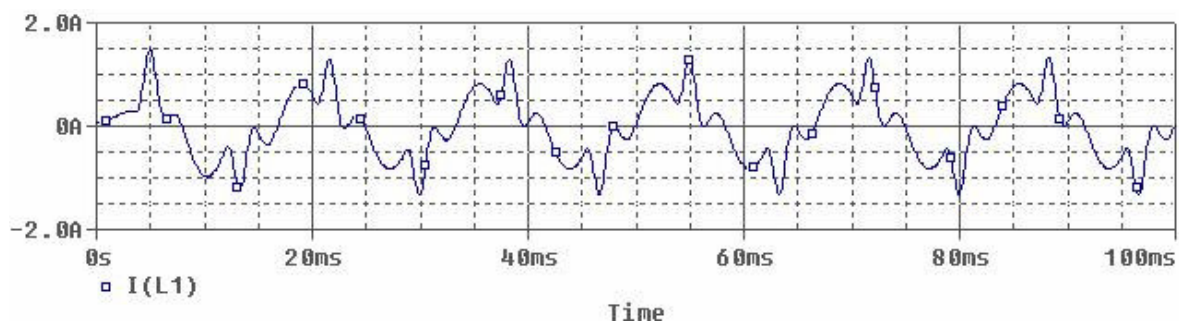


Figura 5.10: Forma de onda de corrente do circuito quando é utilizado um filtro passa-baixa com frequência de corte em 420 Hz e filtro em derivação sintonizado em 180 Hz considerando os transitórios.

Considerando que a análise a ser realizada do filtro só levará em conta o regime permanente, os resultados das simulações daqui para frente desconsiderarão a parte transitória.

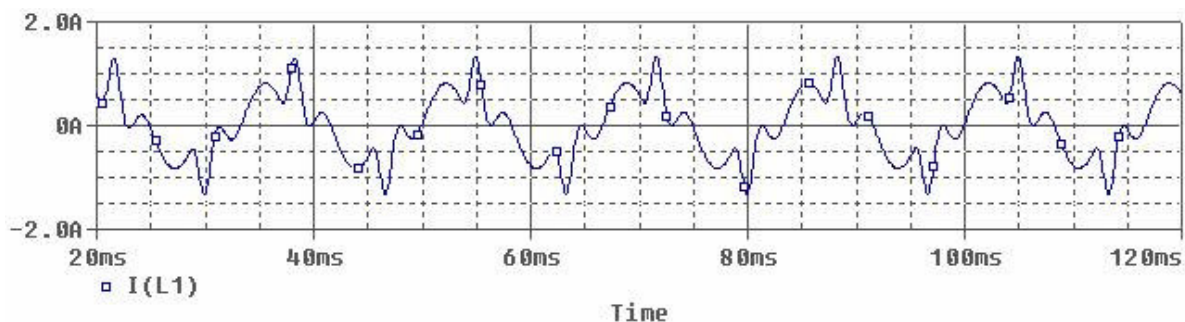


Figura 5.11: Forma de onda de corrente do circuito quando é utilizado um filtro passa baixa com frequência de corte em 420 Hz e filtro em derivação sintonizado em 180 Hz.

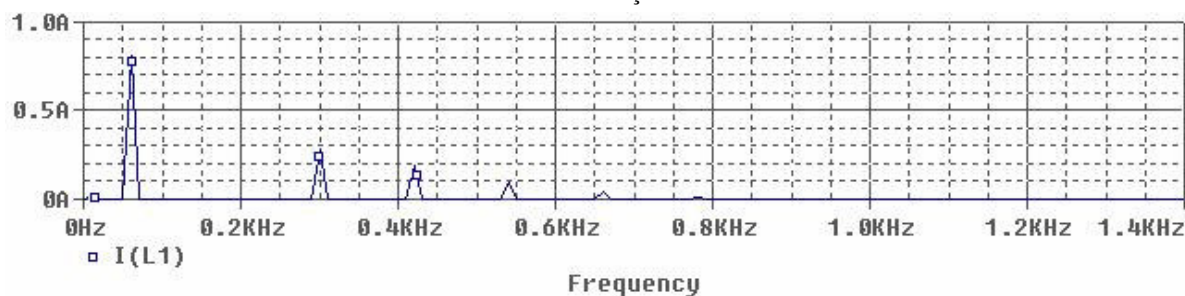


Figura 5.12: Espectro da forma de onda de corrente do circuito quando é utilizado um filtro passa baixa com frequência de corte em 420 Hz e filtro em derivação sintonizado em 180 Hz.

Com a utilização desta configuração do filtro passivo, foi encontrado um valor de 0,89 ampéres para a corrente que circula na rede, um DHTI de 43,3% e um DHI<sub>3</sub> de 0,13%.

### 5.2.3 – Projeto e análise de um filtro passa-baixo de 7ª ordem com filtros em derivação sintonizados de 3ª e 5ª ordem

Uma outra configuração testada é o filtro anterior acrescido de um filtro em derivação sintonizado em 5ª ordem. Devido à semelhança no modo de calcular os componentes desse filtro, os cálculos foram omitidos, expressando apenas os valores calculados. Mantendo o valor do capacitor em 2  $\mu\text{F}$ , pelos motivos já mencionados anteriormente, o valor obtido para o indutor foi de 140 mH. O circuito do filtro e os resultados das simulações estão demonstrados a seguir.

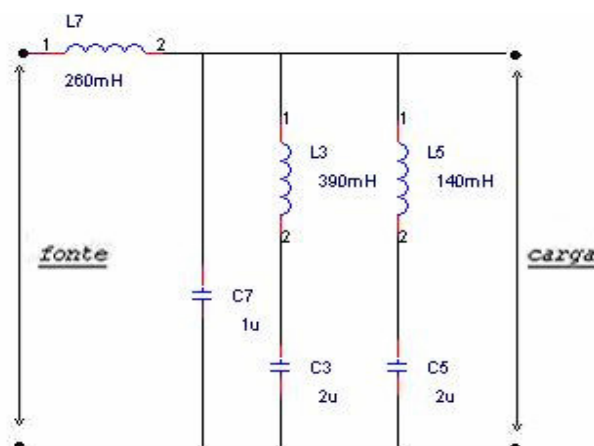


Figura 5.13: Filtro passa-baixa com frequência de corte em 420 Hz e filtros em derivação sintonizados em 180 Hz e 300 Hz.

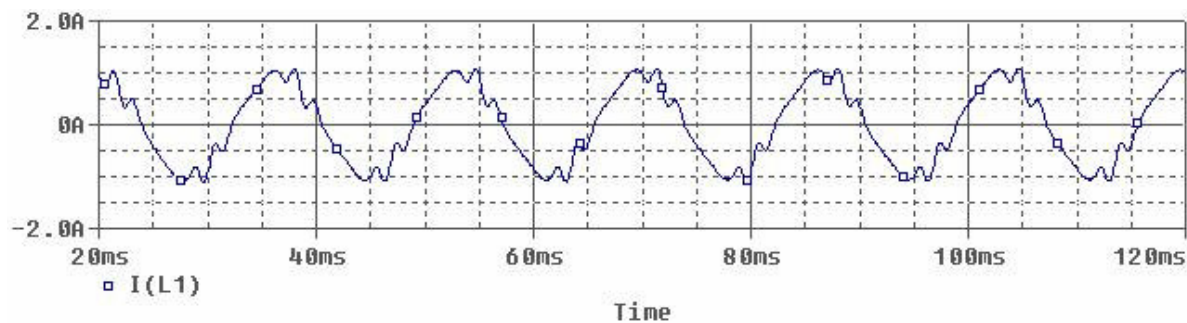


Figura 5.14: Forma de onda de corrente do circuito quando é utilizado um filtro passa-baixa com frequência de corte em 420 Hz e filtros em derivação sintonizados em 180 Hz e 300 Hz.

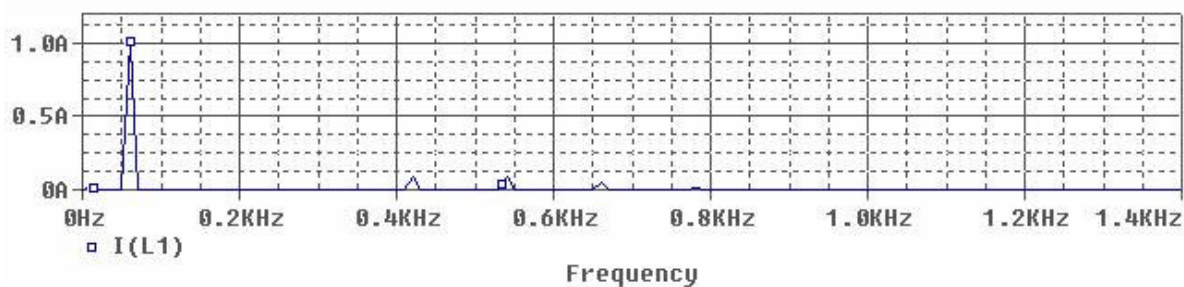


Figura 5.15: Espectro da forma de onda de corrente do circuito quando é utilizado um filtro passa-baixa com frequência de corte em 420 Hz e filtros em derivação sintonizados em 180 Hz e 300 Hz.

Com a utilização desta configuração do filtro passivo, encontra-se um valor de 1,03 A para a corrente que circula na rede, uma DHTI de 14% e uma  $DHI_3$  de 0,28%.

### 5.2.4 – Projeto e análise de um filtro em derivação sintonizado em 3ª, 5ª, 7ª e 9ª ordem

Uma configuração também testada foi a de utilizar somente filtros em derivação sintonizados nas frequências de 3ª, 5ª, 7ª e 9ª harmônicos. O cálculo dos componentes seguiu a metodologia utilizada anteriormente. Fixados os valores dos capacitores em  $2\mu\text{F}$  para todas as frequências, e utilizando a equação (2.48) encontrou-se os seguintes valores para os indutores: 390 mH para o filtro do terceiro harmônico, 140 mH para o quinto harmônico, 72 mH para o sétimo harmônico e 43 mH para o nono harmônico. O esquemático do filtro e os resultados das simulações são demonstrados a seguir.

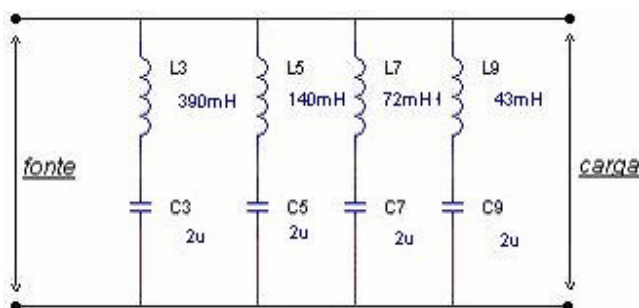


Figura 5.16: Filtro em derivação sintonizados em 3ª, 5ª, 7ª e 9ª ordem.

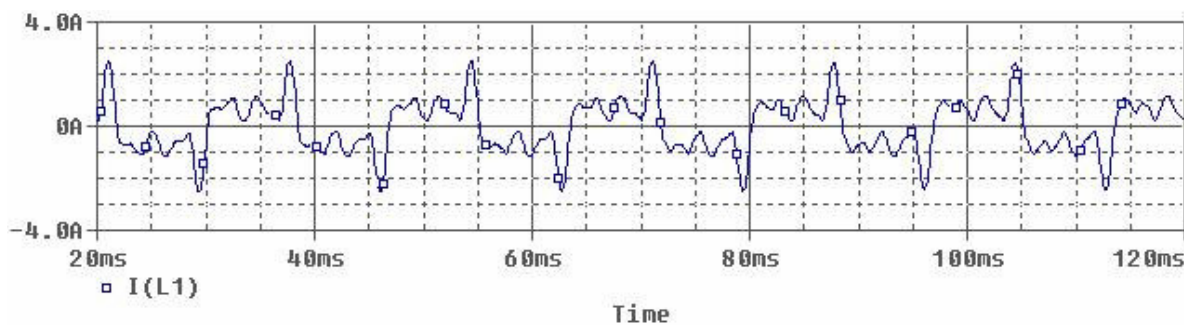


Figura 5.17: Forma de onda de corrente do circuito quando é utilizado filtro em derivação sintonizados em 3ª, 5ª, 7ª e 9ª ordem.



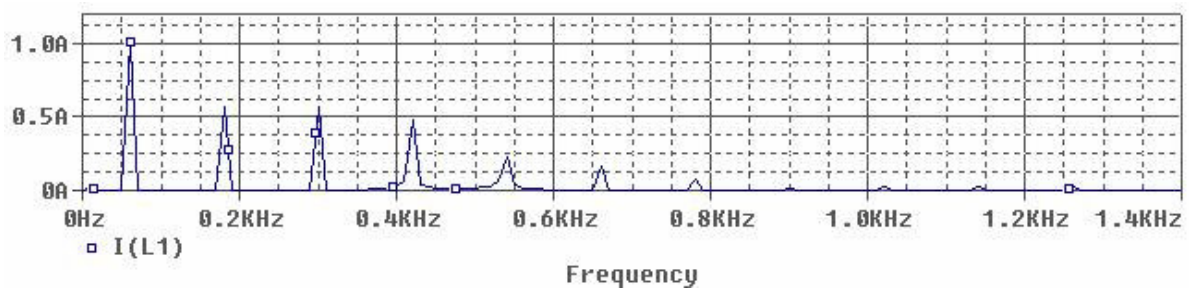


Figura 5.18: Espectro da forma de onda de corrente do circuito quando é utilizado filtro em derivação sintonizados em 3ª, 5ª, 7ª e 9ª.

Com a utilização desta configuração de filtro passivo, foram encontrados valores de 1,41 A para a corrente que circula na rede, um DHTI de 96% e um  $DH I_3$  de 56,42%.

Os filtros em derivação atenuaram uma parcela significativa dos harmônicos de corrente, mas em alguns casos isso não foi suficiente para obter as características desejadas de corrente. Apesar de ter sido encontrado apenas referências de projetos de filtros série, decidiu projetar e simular diversas configurações de filtros em série com a linha, na tentativa de melhorar os resultados.

Essa escolha foi feita pelo fato dos filtros passivos em derivação encontrados, não ser para potências baixas como a de um microcomputador. Segue abaixo o projeto e análise de diferentes configurações de filtros série.

### 5.2.5 – Projeto e análise de um filtro série sintonizado em 3ª e 7ª ordem

Esta configuração de filtro é composta por dois filtros em série com a carga, sintonizados em 3ª e 7ª ordem. O cálculo dos componentes que compõe o filtro é igual ao que já foi desenvolvido até agora, utilizando a equação (2.48), por isto continuaremos a omitir o cálculo dos mesmos.

Para o filtro sintonizado em 3ª ordem, o indutor é de 390 mH e o capacitor de 2  $\mu$ F, para o de 7ª ordem o indutor é de 72 mH com o mesmo capacitor de 2  $\mu$ F. O esquemático desse filtro e os resultados das simulações são demonstrados abaixo.

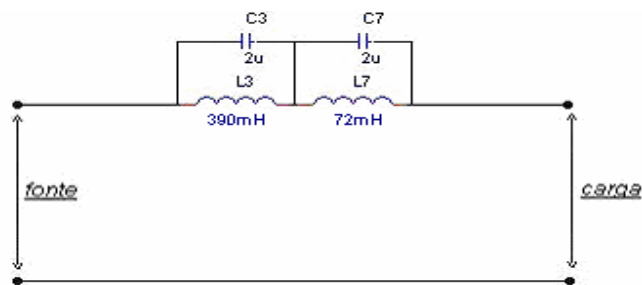


Figura 5.19: Filtro harmônico série sintonizado em 3ª e 7ª ordem.

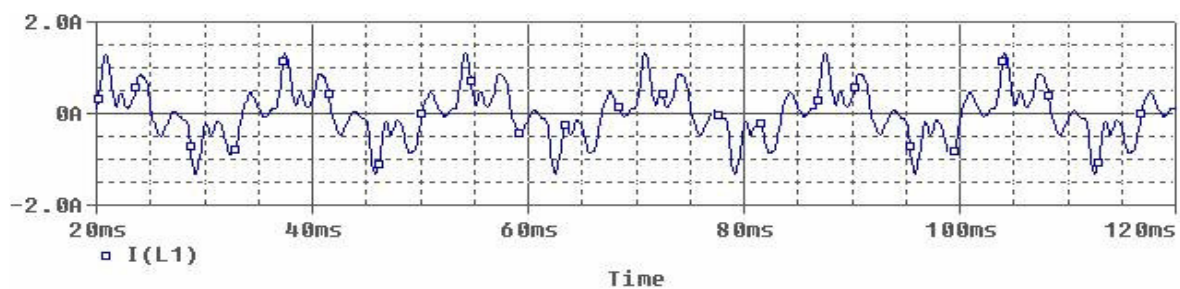


Figura 5.20: Forma de onda de corrente quando é utilizado um filtro série sintonizado nas frequências de 3ª e 7ª ordem.

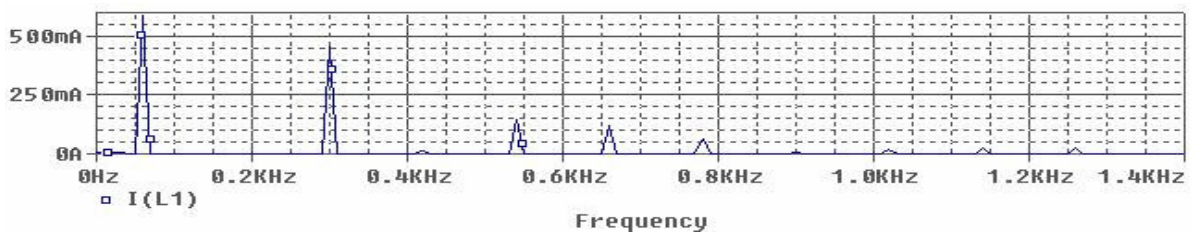


Figura 5.21: Espectro da forma de onda de corrente quando é utilizado um filtro série sintonizado nas frequências de 3ª e 7ª ordem.

Com a utilização desta configuração do filtro passivo, foram encontrados valores de 0,77 A para a corrente que circula na rede, um DHTI de 85,22% e um  $DHI_3$  de 0,13%.

### 5.2.6 – Projeto e análise de um filtro série sintonizado em 3ª, 5ª e 7ª ordem.

Nesta configuração do filtro foi acrescentado em relação à configuração anterior, um filtro em série sintonizado de 5º ordem, com um indutor de 140 mH e um capacitor de 2  $\mu$ F. O esquemático e os resultados das simulações são mostrados nas figuras abaixo.



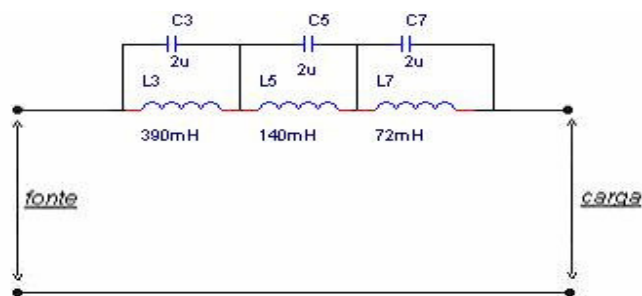


Figura 5.22: Filtro harmônico série sintonizado em 3ª, 5ª e 7ª ordem.

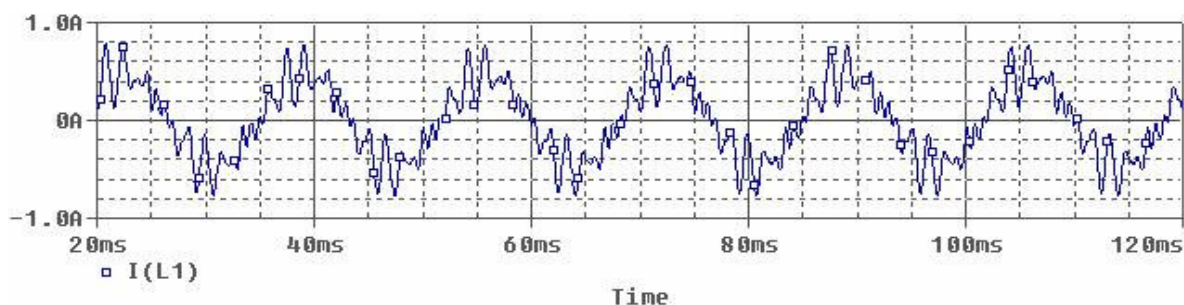


Figura 5.23: Forma de onda de corrente quando é utilizado um filtro série sintonizado nas frequências de 3ª, 5ª e 7ª ordem.

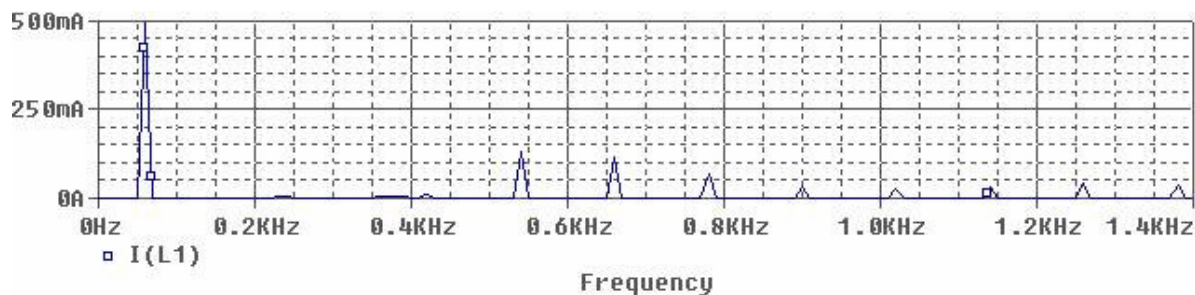


Figura 5.24: Espectro da forma de onda de corrente quando é utilizado um filtro série sintonizado nas frequências de 3ª, 5ª e 7ª ordem.

Com a utilização desta configuração do filtro passivo, foram encontrados valores de 0,54 A para a corrente que circula na rede, 41,26% de DHTI e 0,22% de DHI<sub>3</sub>.

### 5.2.7 – Projeto e análise de um filtro série sintonizado em 3ª, 5ª e 7ª ordem com capacitor em paralelo.

Fazendo uma análise dos resultados obtidos com o filtro série sintonizado em 3ª, 5ª e 7ª ordem, vê-se que os harmônicos destas ordens foram bastante reduzidos. Consequentemente os harmônicos que mais influenciam no valor de 41,26% de DHTI são os

de ordem superior a 9ª. Devido aos baixos valores de distorção harmônica individual para cada uma das ordens harmônicas superior a 9ª, preferiu-se a utilização de um capacitor em paralelo com a carga para reduzir os harmônicos presentes nestas frequências. O esquemático e os resultados das simulações são mostrados abaixo.

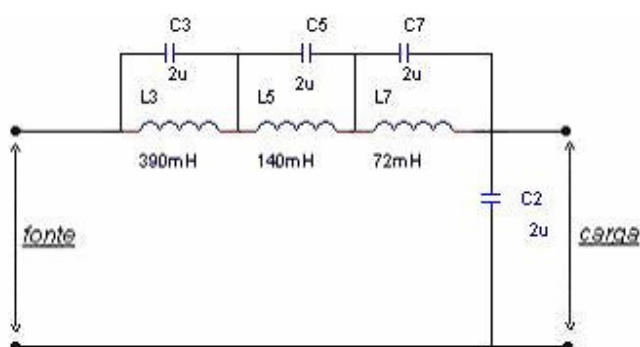


Figura 5.25: Filtro harmônico série sintonizado em 3ª, 5ª e 7ª ordem com um capacitor de 2  $\mu$ F em paralelo com a carga.

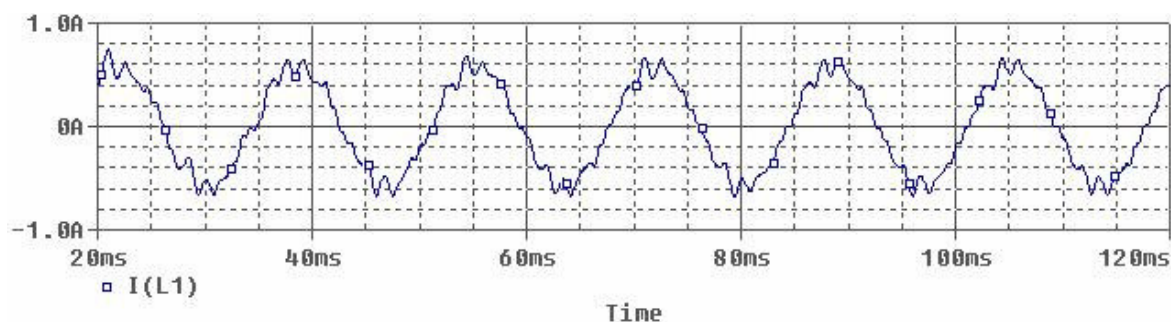


Figura 5.26: Forma de onda de corrente quando é utilizado um filtro série sintonizado nas frequências de 3ª, 5ª e 7ª ordem com capacitor de 2  $\mu$ F em paralelo com a carga.

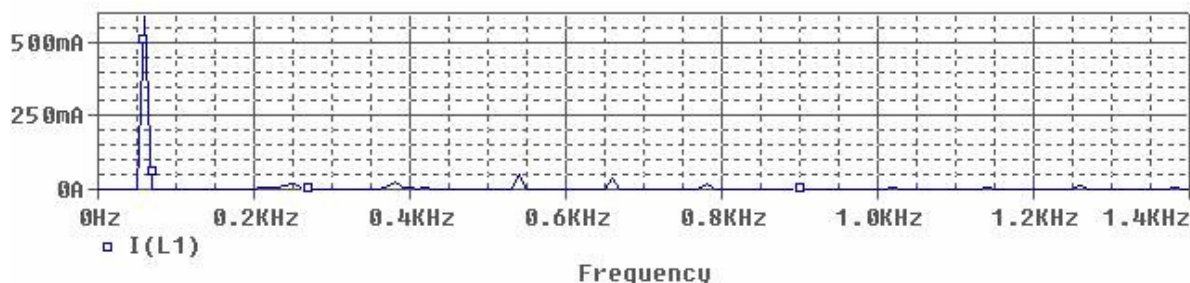


Figura 5.27: Espectro da forma de onda de corrente quando é utilizado um filtro série sintonizado nas frequências de 3ª, 5ª e 7ª ordem com capacitor de 2  $\mu$ F em paralelo com a carga.

Com a utilização desta configuração do filtro passivo, foram encontrados valores de 0,59 A para a corrente que circula na rede, 11,52% de DHTI e 0,36% de DHI<sub>3</sub>.

Obteve bons resultados nas simulações com os filtros série. A queda de tensão nestes filtros foi de aproximadamente 1 (V), não interferindo na característica da rede.

### 5.2.8 – Escolha da configuração do filtro a ser implementado.

Para a escolha da configuração do filtro passivo a ser implementado, foi feita uma análise dos resultados obtidos nas simulações com cada filtro. Os resultados de DHTI, DHI<sub>3</sub> e da corrente que circula pela rede elétrica em cada configuração. Estes dados foram transcritos para a tabela 5.2 abaixo.

Tabela 5.2: resultados de DHTI, DHI<sub>3</sub> e I para a rede que alimenta a carga não-linear com a utilização de cada modelo de filtro passivo.

	Configuração	DHTI(%)	DHI3(%)	I(A)
0	Corrente do computador sem filtro	148,00	95,05	1,11
1	Filtro passa-baixa de 3° ordem	69,13	64,00	0,89
2	Filtro passa-baixa de 7° ordem com um filtro em derivação sintonizado de 3° ordem	43,30	0,13	0,89
3	Filtro passa-baixa de 7° ordem com filtro em derivação sintonizado de 3° e 5° ordem	14,00	0,28	1,03
4	Filtro em derivação sintonizado de 3°, 5°, 7° e 9° ordem	96,00	56,42	1,41
5	Filtro série sintonizado em 3° e 7° ordem	85,22	0,13	0,77
6	Filtro série sintonizado em 3°, 5° e 7° ordem	41,26	0,22	0,54
7	Filtro série sintonizado em 3°, 5° e 7° ordem com capacitor em paralelo de 2uF	11,52	0,36	0,59

De acordo com os dados da tabela 5.2, apenas as configurações (3) e (7) atendem aos requisitos de DHTI e DHI<sub>3</sub>. A última configuração é a que melhor atende aos parâmetros exigidos do filtro, pois a mesma apresentou uma melhor eficiência comparando com a 3ª configuração.

Pelo fato de ter poucas referências de filtros série e nenhum projeto deste filtro, concluímos que esse filtro poderia funcionar, pois este era para pequenas potências.

### **5.3 – IMPLEMENTAÇÃO DOS FILTROS PASSIVOS DE CORRENTES HARMÔNICAS**

#### **5.3.1 – Implementação do filtro série sintonizado em 3ª, 5ª e 7ª ordem com capacitor em paralelo**

Depois da escolha da configuração do filtro passivo a ser utilizado, foi desenvolvido o protótipo do mesmo. Mesmo projetando o filtro com componentes com valores comerciais, não foi encontrado nas lojas especializadas do DF, componentes com esses valores. Devido à essa dificuldade, os valores dos indutores e capacitores foram recalculados de acordo com os componentes encontrados no mercado e os disponíveis para uso no SG-11.

No almoxarifado do SG-11, foi encontrado um indutor duplo de 29 mH cada, com uma corrente de 4(A). Com a equação (2.52) foi possível calcular os valores dos novos capacitores para os estágios de 5° e 7° ordem do filtro. Dessa forma, foram obtidos valores de capacitância de 10  $\mu$ F e 5  $\mu$ F para as respectivas ordens, para uma tensão de 250(V<sub>CA</sub>).

Já para o cálculo dos valores dos componentes do filtro sintonizado de 3° ordem o processo foi diferente. Definiu o valor do capacitor e a partir deste valor dimensionou o valor da indutância do indutor.

Uma análise na equação (2.52), permite concluir que quanto maior o valor do capacitor menor é o valor do indutor e menor é a dimensão. Estimando um valor de 10  $\mu$ F com tensão de 250(V<sub>CA</sub>), calculou uma indutância de 78mH para o indutor. Além da indutância calculada, o indutor foi projetado para suportar uma corrente de 2,5 (A). O processo de desenvolvimento e fabricação do indutor é descrito no anexo C.

Para melhorar a qualidade da corrente, um capacitor de 4  $\mu$ F foi instalado em paralelo com a saída do filtro. Com a utilização desse capacitor não houve uma mudança significativa na eficiência do filtro, mas houve uma grande melhora na qualidade da energia. O modelo do filtro e os resultados obtidos na simulação são mostrados a seguir.

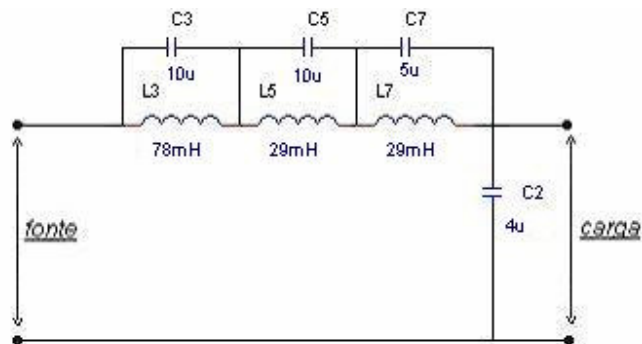


Figura 5.28: Circuito do filtro passivo a ser projetado.

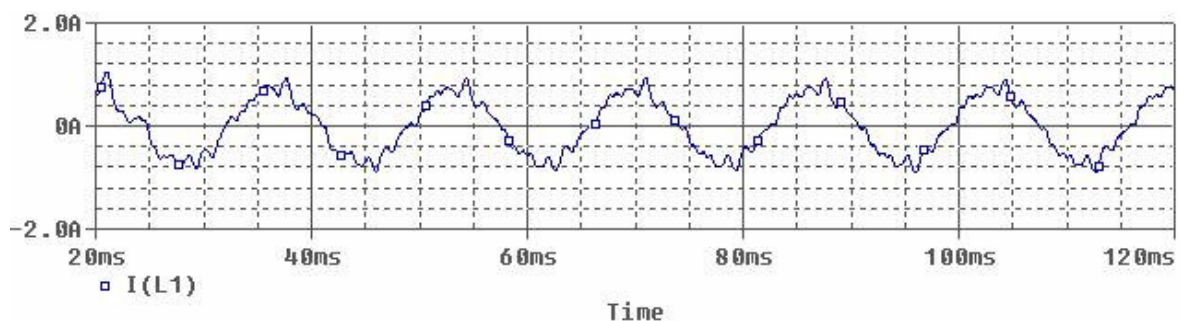


Figura 5.29: Forma de onda de corrente quando é utilizado o filtro mostrado na Figura 5.28).

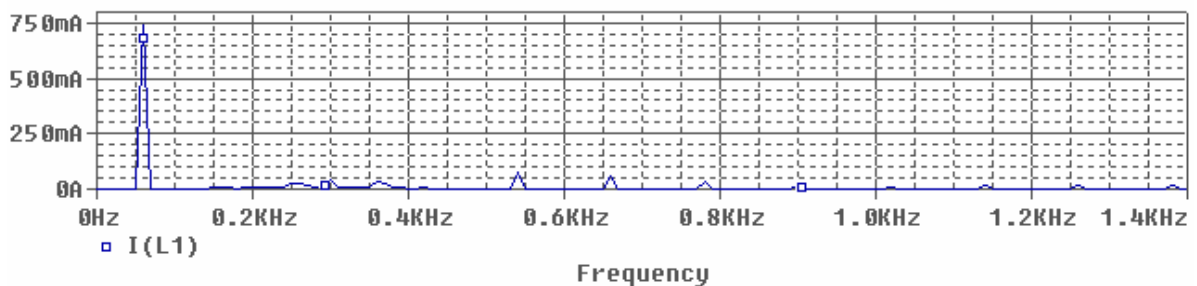


Figura 5.30: Espectro da forma de onda de corrente quando é utilizado o filtro mostrado na Figura 5.28).

Com a utilização do filtro passivo com os novos valores dos indutores e capacitores, foram encontrados valores de 0,75 A para a corrente que circula na rede, 16,17% de DHTI e 0,54% para o  $DHI_3$ . Observa-se que houve um aumento nos valores desses índices em comparação com o encontrado anteriormente, mas ainda continuam dentro das características desejadas.

Com base no circuito mostrado na figura 5.28, o protótipo do filtro passivo para correntes harmônicas foi implementado. Além dos capacitores e indutores já citados, foram adicionados à entrada do filtro um supressor de tensão, um fusível e uma chave.

Admitindo que a fonte do gabinete do microcomputador seja de 400 W, considerando um fator de potência de 0,75 para o mesmo, a corrente exigida pelo equipamento será:

$$I = \frac{P}{V * f.p.} = \frac{400}{220 * 0,75} = 2,42 \text{ A}$$

Concluindo, o fusível a ser instalado será de 2,5 ampéres.

Para conseguir uma maior proteção do equipamento ao qual o filtro esteja ligado, adicionou a entrada do filtro um supressor de surto, que para este caso foi utilizado um varistor de óxido de zinco.

*“O varistor é uma resistência não-linear, cuja resistência varia com a tensão aplicada sobre seus terminais oferecendo proteção, limitando as tensões e absorvendo energia.” [15]*



Figura 5.31: varistor de óxido de zinco

Para a escolha das características nominais do varistor foram adotadas as recomendações da Schneider Electric [16]. De acordo com a referência citada junto a cargas sensíveis são especificados supressores de surto de 2 a 4 kA.

Através de uma pesquisa na *Internet*, encontrou uma tabela de especificação de varistor. O varistor deverá ter uma corrente de surto entre 2 e 4 kA, para uma tensão de 230 volts. Analisando a tabela 5.3, para essas especificações o varistor será de 2,5 kA.

Tabela 5.3: Especificação do varistor (FONTE: <http://www.tecwaybr.com/varistor%2010mm.htm>)

Model Number	Maximum Allowable Voltage		Varistor Voltage	Clamping Voltage (Max)		Maximum Peak Current (80/20 $\mu$ s)(A)		Maximum Energy (Joule)		Rated Power (W)	Typical Capacitance (Reference) @1KHz (Pf)
	ACrms (V)	DC (V)	(V)	Vc (V)	1P (A)	1 Time	2 Time	10/1000 $\mu$ s	2ms		
VDR-10D180K	11	14	18(16-20)	36	5	500	250	2.1	1.5	0.05	16000
VDR-10D220K	14	18	22(20-24)	43	5	500	250	2.5	2.0	0.05	11000
VDR-10D270K	17	22	27(24-300)	53	5	500	250	3.0	2.5	0.05	8000
VDR-10D330K	20	26	33(30-36)	65	5	500	250	4.0	3.0	0.05	6300
VDR-10D390K	25	31	39(35-43)	77	5	500	250	4.6	3.5	0.05	5200
VDR-10D470K	30	38	47(42-52)	93	5	500	250	5.5	4.5	0.05	4600
VDR-10D560K	35	45	56(50-62)	110	5	500	250	8.0	5.5	0.05	3750
VDR-10D680K	40	56	68(61-75)	135	5	500	250	8.2	6.5	0.05	2800
VDR-10D820K	50	65	82(74-90)	135	25	2500	1250	12.0	8.0	0.4	1920
VDR-10D101K	60	85	100(90-110)	165	25	2500	1250	15.0	10.0	0.4	1800
VDR-10D121K	75	100	120(108-132)	200	25	2500	1250	18.0	12.0	0.4	1500
VDR-10D151K	95	125	150(135-165)	250	25	2500	1250	22.0	16.0	0.4	1200
VDR-10D181K	115	150	180(162-198)	300	25	2500	1250	27.0	18.5	0.4	690
VDR-10D201K	130	170	200(185-225)	340	25	2500	1250	30.0	20.0	0.4	570
VDR-10D221K	140	180	220(198-2420)	360	25	2500	1250	32.0	23.0	0.4	560
VDR-10D241K	150	200	240(216-264)	395	25	2500	1250	34.0	25.0	0.4	550
VDR-10D271K	175	225	270(243-297)	455	25	2500	1250	40.0	30.0	0.4	530
VDR-10D301K	190	250	300(270-3300)	500	25	2500	1250	40.0	32.0	0.4	510
VDR-10D331K	210	275	330(297-363)	550	25	2500	1250	43.0	34.0	0.4	480
VDR-10D361K	230	300	360(324-396)	595	25	2500	1250	47.0	35.0	0.4	450
VDR-10D391K	250	320	390(351-429)	650	25	2500	1250	60.0	40.0	0.4	430
VDR-10D431K	275	350	430(387-473)	710	25	2500	1250	65.0	45.0	0.4	400
VDR-10D471K	300	385	470(423-517)	775	25	2500	1250	70.0	45.0	0.4	300
VDR-10D561K	350	460	560(504-616)	925	25	2500	1250	70.0	45.0	0.4	310
VDR-10D621K	385	505	620(558-682)	1025	25	2500	1250	70.0	45.0	0.4	170
VDR-10D681K	420	560	680(612-748)	1120	25	2500	1250	70.0	45.0	0.4	160
VDR-10D751K	460	615	750(675-825)	1240	25	2500	1250	75.0	50.0	0.4	150
VDR-10D781K	485	640	780(702-858)	1290	25	2500	1250	80.0	50.0	0.4	150
VDR-10D821K	510	670	820(738-902)	1355	25	2500	1250	85.0	55.0	0.4	150
VDR-10D911K	550	745	910(819-1001)	1500	2525	2500	1250	93.0	60.0	0.4	140
VDR-10D102K	625	825	1000(900-1100)	1650	25	2500	1250	102.0	65.0	0.4	140
VDR-10D112K	680	895	1100(990-1210)	1815	25	2500	1250	115.0	70.0	0.4	130

A chave adicionada ao circuito do filtro tem a função de acionar um tipo de *by-pass*. Pela figura 5.32 e o diagrama elétrico da figura 5.33, observa-se que com a chave do filtro na posição (1), a chave (A) encontra-se aberta e as chaves (B) e (C) fechadas, conseqüentemente a corrente circula totalmente pelo filtro. Já com a chave na posição (0), a chave (A) encontra-se fechada e as chaves (B) e (C) abertas, desligando o filtro e fazendo a corrente circular pelo *by-pass*.



Figura 5.32: Foto da chave filtro/by-pass.

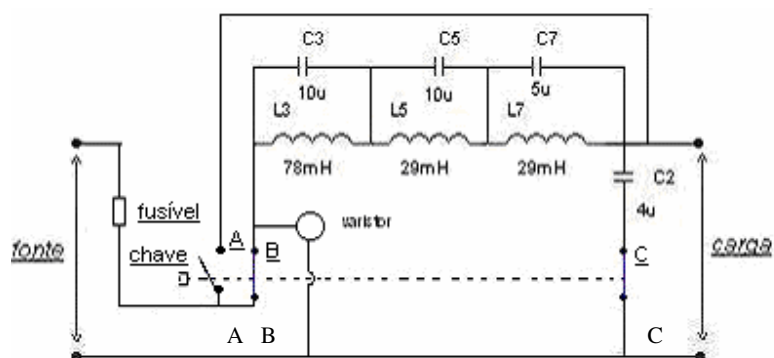


Figura 5.33: Diagrama elétrico do filtro passivo.

O circuito mostrado pelo diagrama elétrico da figura 5.33, foi montado em uma caixa, obtendo o protótipo mostrado pelas figuras 5.34 e 5.35.



Figura 5.34: Circuito do filtro série.



Figura 5.35: Vista da caixa de proteção do filtro.



Após a montagem do filtro, este foi testado em laboratório, utilizando o analisador de qualidade ION 7600. Os resultados encontrados no teste do filtro série não foram satisfatórios, e os resultados obtidos durante o teste do mesmo e a sua análise serão apresentados no próximo capítulo. Por esse motivo decidiu-se pela implementação do 3º filtro da tabela 5.2.

Os procedimentos dos testes realizados com o filtro no Laboratório de Qualidade da Energia Elétrica e os resultados obtidos serão demonstrados no tópico (6).

### 5.3.2 – Implementação do filtro em derivação sintonizados de 3º e 5º ordem com um indutor na entrada

Devido aos maus resultados encontrados com o filtro em série, foi decidido pela implementação do 3º filtro (filtro passa-baixo de 7º ordem com filtros em derivação sintonizados de 3º e 5º ordem). Para a fabricação do filtro nesta configuração, foram utilizados os mesmos componentes do filtro em série. Realizando a simulação deste filtro para os referidos componentes, obteve-se uma corrente de 2,75 A com um DHTI de 21% e um DHI<sub>3</sub> de 1,39%. O circuito do filtro, a forma de onda de corrente e o seu respectivo espectro são mostrados a seguir.

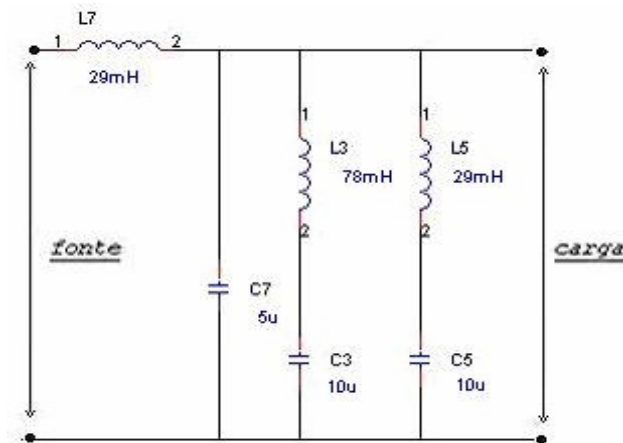


Figura 5.36: Filtro passa-baixa com frequência de corte em 420 Hz e filtros em derivação sintonizados em 180 Hz e 300 Hz.

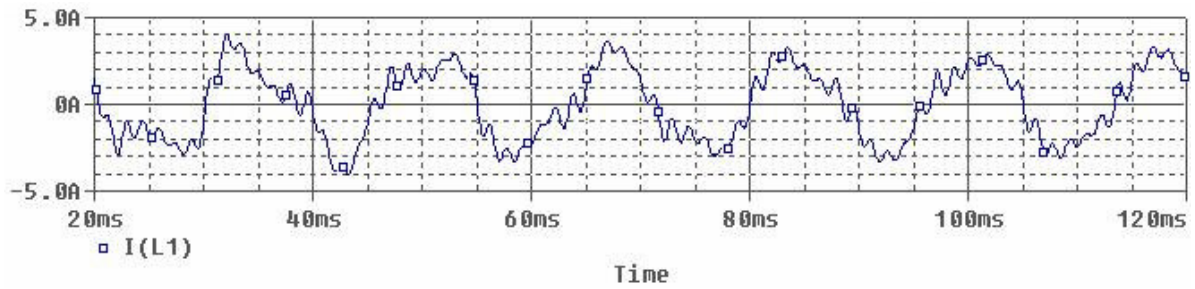


Figura 5.37: Forma de onda de corrente quando utiliza o filtro passa baixa com frequência de corte em 420 Hz e filtros em derivação sintonizados em 180 Hz e 300 Hz.

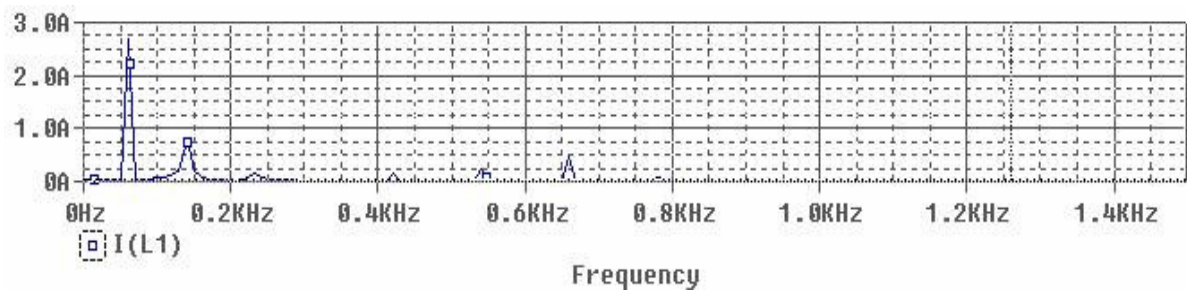


Figura 5.38: Espectro da forma de onda de corrente quando utiliza o filtro passa baixa com frequência de corte em 420 Hz e filtros em derivação sintonizados em 180 Hz e 300 Hz.

Pelo fato de que quanto maior for o valor do indutor em série com a entrada, melhor são os resultados, como pode ser constatado por uma análise da tabela 5.2. Foi simulada a configuração com o indutor de 78 mH em série, passando os filtros em derivação a ser sintonizados em 5° e 7° ordem. Com a simulação foi encontrada uma corrente de 1,92 A, com um DHTI de 24,7% e  $DHI_3$  de 24,5%. O circuito deste filtro, a forma de onda e o espectro de corrente são mostrados a seguir.

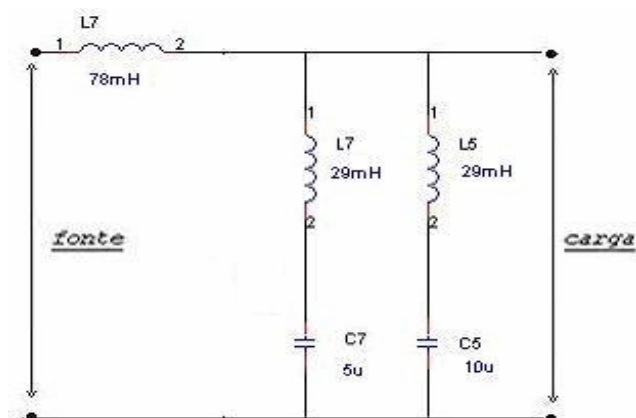


Figura 5.39: Filtro em derivação sintonizados em 300 Hz e 420 Hz com um indutor em série.

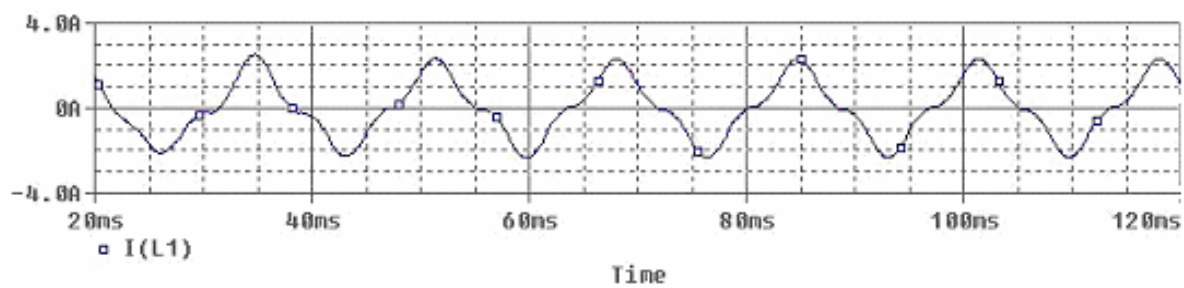


Figura 5.40: Forma de onda de corrente quando utiliza o filtro em derivação sintonizados em 300 Hz e 420 Hz com um indutor em série.

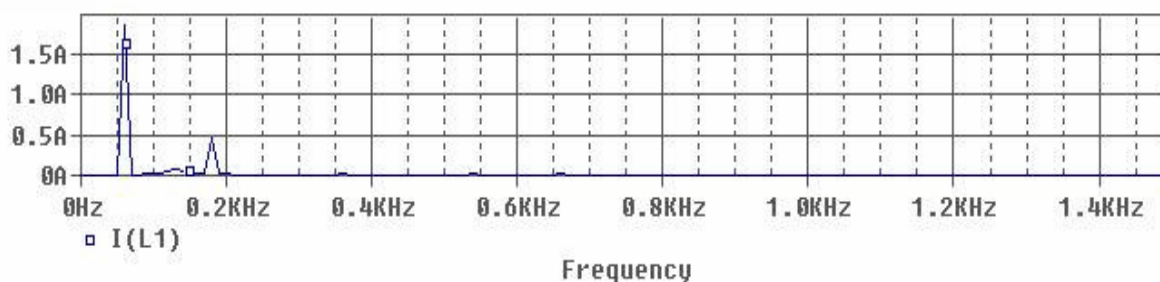


Figura 5.41: Espectro da forma de onda de corrente quando utiliza o filtro em derivação sintonizados em 300 Hz e 420 Hz com um indutor em série.

Após a realização das simulações com as duas últimas configurações de filtro, os resultados foram transcritos para a tabela 5.4. Na tentativa de conseguir um melhor equilíbrio entre a qualidade e a eficiência energética, preferiu-se a utilização do segundo filtro.

Tabela 5.4: resultados de DHTI,  $DHI_3$  e  $I$  simulados quando utilizado os dois modelos alternativos do filtro.

Configuração	DHTI(%)	$DHI_3$ (%)	$I$ (A)
filtro passa-baixo de 7° ordem com filtro em derivação sintonizado de 3° e 5° ordem	21	1,39	2,75
filtro em derivação sintonizados em 5° e 7° ordem com um indutor em série	24,7	24,5	1,92

Escolhida a configuração do filtro em derivação sintonizados em 5° e 7° com um indutor em série, o mesmo foi fabricado e testado no laboratório de qualidade da energia elétrica. Os resultados dos ensaios seguem no próximo tópico e na figura abaixo é mostrada o diagrama elétrico do filtro.

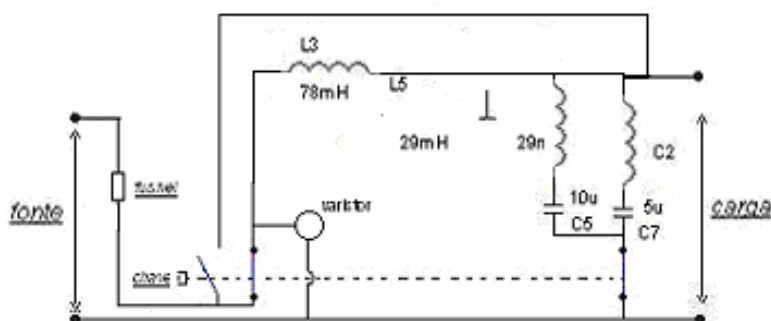


Figura 5.42: Diagrama elétrico do filtro em derivação sintonizado em 5° e 7° ordem com um indutor em série de 78 mH.



Figura 5.43: Circuito do filtro derivação.

## 6 – RESULTADOS DA UTILIZAÇÃO DO FILTRO

Com o protótipo do filtro implementado, a próxima etapa foi o teste de desempenho do filtro em laboratório. Com a intenção de garantir a eficiência do protótipo, foi estabelecido que os mesmos parâmetros utilizados para os ensaios com os micros seriam seguidos para o teste do filtro.

Porém, quando os testes no Laboratório de Qualidade de Energia Elétrica foram agendados, descobriu-se que a fonte de harmônicos 3000 iX da *Califórnia Instrumens* encontrava-se com problemas técnicos, e os métodos realizados tiveram que ser substituídos.

### 6.1- PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Como a utilização da fonte harmônica para os testes ficou inviabilizada, a rede elétrica de alimentação das tomadas do laboratório foi utilizada como fonte de alimentação do computador e do filtro. Para analisar a tensão da rede e a corrente solicitada pelos equipamentos, foi utilizado o analisador de qualidade *ION 7600*, armazenando informações sobre a forma de onda de corrente e tensão em intervalos de 10 segundos, permanecendo em cada teste por 10 minutos.

Portanto, para garantir a lisura do teste, medições preliminares foram realizadas com o intuito de anotar as distorções harmônicas de corrente e tensão presentes na rede do laboratório.

Dessa forma, uma década resistiva (vide figura 6.1) foi emprestada do Laboratório de Conversão de Energia com a intenção de anotar o perfil de tensão e corrente circulante na rede de alimentação quando uma carga linear solicita corrente da rede.



Figura 6.1: Década resistiva utilizada para teste da rede de alimentação

Em seguida, a década resistiva foi retirada e em seu lugar, conectado um computador com monitor para medir seu comportamento e poder comparar futuramente com o desempenho do filtro.

Os dois testes seguintes foram executados com o filtro conectado a rede elétrica e o computador conectado a ele, como pode ser visto na figura 6.2 a seguir.

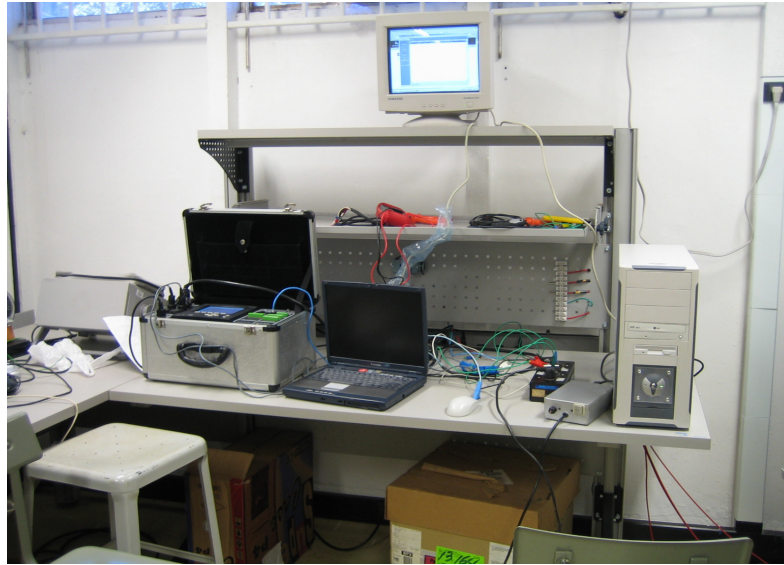


Figura 6.2: Teste do filtro com o computador

Inicialmente foram realizadas medições com o filtro conectado ao computador e a chave *by-pass* acionada, buscando verificar a eficácia da mesma. Em seguida o filtro foi ativado, e os dados referentes à distorção harmônica de corrente e tensão coletados.

É interessante ressaltar que estes procedimentos foram executados inicialmente para averiguar o desempenho do filtro série, que seria o único protótipo testado caso seu desempenho se aproximasse com os resultados da simulação computacional realizada previamente.

Porém, como será explicado mais adiante, os resultados obtidos no seu teste não foram nada satisfatórios, e a partir de então, optou-se em realizar um teste de desempenho do filtro em derivação sintonizado em 5ª e 7ª ordem, apresentado na figura 5.42.

Para o teste de desempenho do filtro em derivação, os procedimentos realizados foram os mesmos do filtro série, para tornar possível a realização de uma análise uniforme de desempenho dos dois filtros.

## 6.2 – RESULTADOS OBTIDOS

A seguir os procedimentos descritos para o teste do filtro série, os dados coletados pelo analisador de qualidade foram armazenados e transferidos para o computador sob forma de um relatório gerado pelo *software ION Enterprise 5.0*.

Todos os relatórios fornecidos foram apresentados em uma planilha no *Excel* com as seguintes informações:

- Dia e horário da medição;
- Porcentagem das componentes harmônicas de corrente e tensão (até a 15ª ordem);
- Distorção Harmônica Total de Corrente e Tensão em %, calculada em relação à componente fundamental.

Durante o ensaio com o filtro série verificou-se que o mesmo não estava atuando de forma eficaz no que diz respeito à filtragem das harmônicas de corrente, como pode ser verificado nas tabelas D.3, D.4 e D.5 do anexo D.

Neste momento decidiu-se por modificar a configuração do filtro série para o filtro em derivação como no esquema da figura 5.42 e analisar sua eficiência e desempenho.

Para tanto, os últimos dois procedimentos de ensaio do filtro série foram repetidos para o filtro em derivação.

Por fim, para cada um dos testes descritos anteriormente, nas planilhas fornecidas pelo *ION Enterprise 5.0* foram anotados os valores máximos e mínimos de cada medição, e calculada a média e o desvio padrão de cada amostra. Com estes valores foi possível transferir as informações contidas em uma grande planilha para algumas tabelas, denominadas tabelas-resumo, disponíveis no anexo D.

## 6.3 – ANÁLISE DOS RESULTADOS

O perfil de tensão da rede de alimentação do laboratório coletados pelo *ION 7600* durante todos os testes encontram-se resumidos na tabela D.1, expressos em porcentagem em relação à componente fundamental, juntamente com a DHTU, expressa na última linha da tabela. Em seguida é apresentado um gráfico de barras que ilustra as médias das componentes harmônicas de tensão.

Analisando a tabela B.8 referente ao perfil de tensão utilizado nos ensaios dos micros, e a tabela D.1, referente ao perfil de tensão da rede do laboratório, percebe-se que a DHTU da tensão aplicada durante o teste dos filtros (que foi de 3,22%) não ultrapassou a DHTU do ensaio médio durante o primeiro ensaio no Laboratório de Qualidade de Energia Elétrica (teve um valor de 5,61%). Pode-se notar também que o perfil de tensão da rede muito se aproxima do perfil de tensão adotado no teste 02.

Assim sendo, analisando as figuras B.46 e D.4 referentes às componentes harmônicas de corrente dos computadores tanto no Teste 02 realizado com a fonte harmônica quanto no ensaio realizado antes do teste dos filtros, que o comportamento dos computadores permaneceu aproximadamente constante. Deve ser ressaltado que durante os ensaios com os microcomputadores, os mesmos se encontravam tocando um CD. Este procedimento tinha o objetivo de simular um ambiente de trabalho que é colocado um computador.

O ensaio realizado com a década resistiva permitiu afirmar com convicção que as distorções harmônicas de corrente ( $DHTI = 3,4\%$ ) e tensão ( $DHTU = 3,22\%$ ) presentes na rede elétrica de alimentação do Laboratório de Qualidade de Energia Elétrica não se encontram em patamares elevados o suficiente para condenar os testes realizados, mas deixam dúvidas a respeito do funcionamento do filtro série em um ambiente com tensão já distorcida.

### **6.3.1 – Análise do filtro série**

Analisando as tabelas e figuras D.3 e D.4 pode-se perceber que a chave *by-pass* utilizada no filtro está funcionando corretamente, uma vez que a diferença entre os valores de cada componente harmônica de corrente em cada um dos casos são aproximadamente iguais.

Com o auxílio de um amperímetro-licate, verificou-se que, ao acionar o filtro de harmônicas mudando a chave *by-pass*, o condutor responsável pelo fluxo de corrente enquanto a chave *by-pass* estava acionada não conduzia corrente. Fato esse que corrobora a eficácia da chave utilizada.

Como pode ser visto na tabela D.5 e na figura D.5, as componentes harmônicas de corrente presentes na linha com o filtro acionado sofreram uma leve atenuação. Embora a DHTI presente na linha com o computador ligado com o filtro acionado tenha reduzido de 158,57% para 128,64%, essa redução está muito aquém do esperado diante das simulações computacionais executadas, onde o valor calculado foi de 11,52%.



Outra análise para o desempenho desejado do filtro está na atenuação obtida na componente harmônica de 3ª ordem, que caiu de 93,9% para 76,48%. Atenuação essa que ficou longe do valor esperado, que era uma distorção harmônica individual de corrente de 0,36%.

Para melhor compreender a ineficácia do filtro série implementado, deu-se início a uma série de investigações.

De início, suspeitou-se de o varistor, por ser um componente que é um componente não-linear e está localizado imediatamente na entrada do filtro. Este componente podia estar poluindo a rede elétrica com harmônicos. Dessa forma, como medida de emergência, o varistor foi retirado do protótipo, e um novo teste realizado. Novamente percebeu-se que a ausência do varistor não alterou o perfil de corrente aferido no analisador de qualidade.

Em um dado momento, a suspeita do problema recaiu sobre uma possível ressonância entre o filtro e a impedância da linha. Para tentar verificar essa possível suspeita, o estágio responsável pela filtragem da componente de 3ª ordem foi retirado, visando assim alterar a impedância do filtro e eliminar a ressonância do conjunto.

Mais uma vez a atitude tomada não surtiu o devido efeito, uma vez que sem o estágio responsável pela atenuação da componente de 3ª ordem o filtro não teve alterações visíveis nas componentes harmônicas de maior ordem.

Portanto, não se pode afirmar com convicção que a ressonância nesse caso estaria descartada, uma vez que comprovar a existência ou não da mesma durante o teste realizado é praticamente inviável tendo somente as manobras realizadas. A real comprovação da ressonância na utilização de filtros série pode ser fruto de outras pesquisas futuras.

A última das suspeitas levantadas acerca do problema recaiu sobre a eficácia dos componentes utilizados no filtro série. Tanto o indutor construído quando os capacitores de 10 $\mu$ F passaram a ser o alvo de uma análise minuciosa na busca de uma explicação.

Os componentes utilizados no protótipo podem sim ser uma das possíveis fontes de erros. Talvez pela configuração do filtro série, o simples fato de o indutor estar conectado em paralelo com o capacitor pode estar forçando a passagem de corrente apenas pelos indutores, ao invés de serem bloqueadas e retidas no filtro. Uma possível solução para este problema seria a inserção de uma resistência em série com os indutores, de forma a aumentar a resistência nesse ramo. Poderia também aumentar os indutores utilizados, conseqüentemente

reduzir os capacitores. Com este procedimento estaria também aumentando o valor da resistência do ramo do indutor e reduzindo a do ramo do capacitor.

Com estes procedimentos a corrente que circula pela rede se dividiria entre o ramo do indutor e o ramo do capacitor, tornando o filtro eficaz. Mas deve ficar atento a queda de tensão, pois aumentando a resistência estará aumentando também a queda de tensão sobre o filtro. Está é uma possível solução, mas que só surgiu ao final do trabalho, não sendo possível a sua confirmação. Fica a sugestão de se testar essa possível solução.

Como forma de verificar o funcionamento de cada componente utilizado no protótipo, todos eles foram retirados e medidos separadamente, não encontrando nenhuma anomalia. Portanto a suspeita do mau funcionamento do filtro não pôde ser atribuída aos componentes utilizados.

Vale lembrar que toda a modelagem computacional para a definição do protótipo levou em consideração aspectos diferentes dos enfrentados durante o teste do filtro. Por exemplo, a forma de onda de tensão utilizada durante o teste foi uma onda já distorcida, fato ocorrido por conta da impossibilidade de se utilizar a fonte 3000iX da *California Instruments*.

A partir de então surgiu a idéia de utilizar os mesmos componentes para montar um filtro em derivação sintonizado em 5ª e 7ª ordem.

### **6.3.2 – Análise do filtro em derivação**

Depois de montado e submetido aos testes descritos anteriormente, os dados referentes ao filtro em derivação se mostraram razoavelmente melhores que o filtro série. Como pode ser visto nas tabelas e figuras D.6 e D.7, as componentes harmônicas foram reduzidas sensivelmente. A DHTI média passou de 144,53% para 60,62% com o filtro ativado, e a DHI<sub>3</sub> média passou de 93,03% para 38,16%.

Embora o mesmo filtro simulado no *PSPICE* tenha fornecido uma DHTI de 24,7% e uma DHI-3ª de 24,5%, os resultados obtidos com o protótipo podem ser considerados próximos de um resultado satisfatório. Pois é de se saber que um filtro em derivação seguindo o modelo do filtro 3 da tabela 5.2, é capaz de produzir resultados melhores segundo o quesito filtragem de harmônicas de corrente.

Como forma de explicar a eficiência do filtro em derivação, vale lembrar do seu princípio de funcionamento. A bobina conectada em série com a linha serve como um

bloqueio para as componentes de alta frequência que vão da carga para a fonte. Em contrapartida, os ramos conectados em paralelo com a carga são dimensionados de forma a facilitar a condução de correntes na frequência sintonizada pelo mesmo.

Dessa maneira, o filtro em derivação atuaria como um dreno para as correntes harmônicas, enquanto o filtro série atuaria como um bloqueio das correntes harmônicas que fluiriam no sentido carga – fonte.

Uma coisa que deve ficar claro, é que cada estágio do filtro: a bobina série, o derivação de 5ª ordem e o derivação de 7ª ordem, separados, são também filtros. Mas a atenuação de cada um é baixa, fazendo por isso um arranjo com os três para conseguir uma maior atenuação dos harmônicos.

Da mesma forma, a atuação do filtro em derivação como um dreno não se dá de forma perfeita, como escreve a teoria. A corrente fundamental do circuito não encontra uma impedância infinita nos ramos sintonizados, ocorrendo assim uma fuga desta corrente por estes ramos, implicando no aumento do consumo de energia pelo filtro.

Para se ter uma idéia do comportamento da forma de onda de corrente obtida com cada um dos filtros utilizados, os valores em porcentagem (em relação à fundamental) de cada componente harmônica obtido com o analisador de qualidade foram transcritos para um arquivo do MATLAB e um gráfico contendo as formas de onda foi traçado.

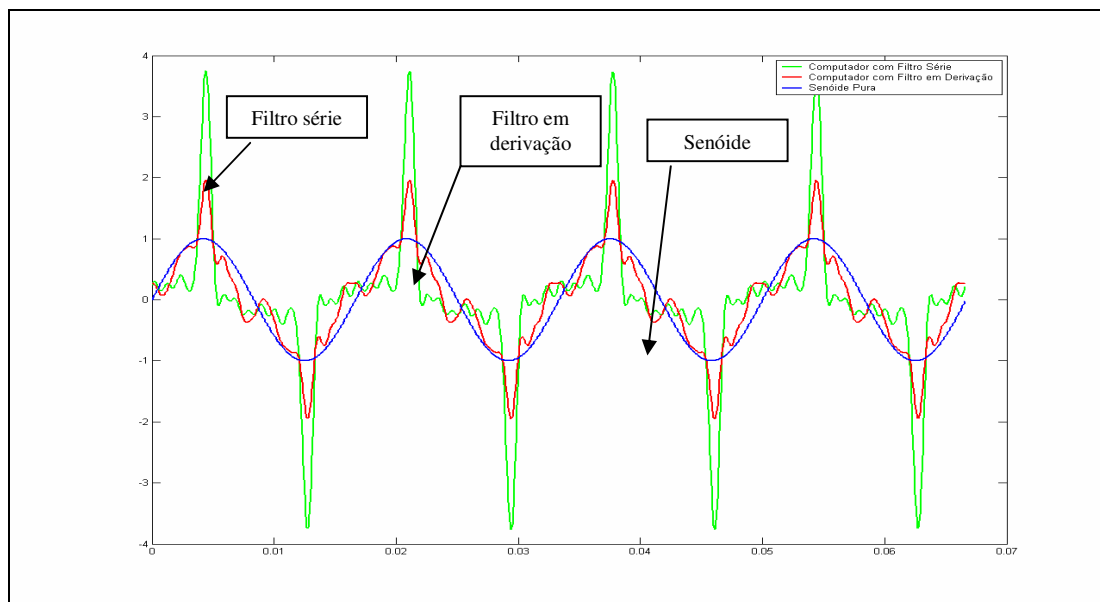


Figura 6.3: Gráfico comparativo entre as ondas de corrente do computador com o filtro série, com o filtro em derivação e uma onda puramente senoidal, obtidas em relação à componente fundamental de cada teste.

Portanto, o gráfico tem como função ilustrar o desempenho dos dois filtros implementados. São apresentadas as formas de onda de corrente em cada filtro comparadas com uma senóide pura da componente fundamental. As curvas foram traçadas de acordo com os valores em porcentagem de cada componente harmônica (até a 15ª ordem) obtidos durante o teste do computador com o filtro série e com o filtro em derivação.

Analizando o gráfico da figura 6.3, percebe-se que o valor de pico (em relação a fundamental) da corrente filtrada diminui, mas ocorre um alargamento de certas partes da forma da onda da corrente, aproximando está de uma senóide.

Vale ressaltar que para uma análise mais detalhada acerca do desempenho dos filtros (análise de consumo de energia, por exemplo) seria necessário obter o valor eficaz da componente fundamental ou de alguma componente harmônica, para assim poder expressar o gráfico da figura 6.3 em termos de valores eficazes. Tal análise tornou-se impossível à medida que descobriu-se que os valores fornecidos pelo ION 7600 só eram expressos em porcentagem.

Outra análise interessante é o das perdas na rede elétrica: há um aumento da corrente solicitada da rede quando se opta pela utilização de um filtro série ou em derivação, gerando assim um aumento nas perdas por Efeito *Joule* nos fios da rede, como pode ser visto na tabela 6.1 mostrada a seguir.

Tabela 6.1: Análise das perdas na rede elétrica

	resistência (mΩ)	corrente (A)	perdas na rede (mW)	DHTI (%)
<b>sem filtro</b>	3,03	0,9	2,5	160
<b>filtro em série</b>	3,03	1,1	3,7	130
<b>filtro em derivação</b>	3,03	1,6	7,8	60

Com o valor das correntes medidas em cada um dos ensaios realizados com um alicate amperímetro, e com o valor da resistência calculado no tópico 5.1.2, tornou-se possível realizar o cálculo das perdas por Efeito *Joule* na rede.

Pode-se perceber com os valores obtidos para as perdas na rede, que o filtro com maior eficiência em termos de filtragem harmônica é o que possui a menor eficiência em termos energéticos, uma vez que provoca uma maior perda na linha, além de consumir uma corrente aproximadamente 80% maior que o computador sem filtro.

## 7 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Foram realizados, ao longo deste trabalho, estudos relacionados ao problema da qualidade da energia elétrica gerados pelo aumento da utilização de equipamentos eletrônicos que solicitam e retornam para a rede uma corrente distorcida. Como a utilização destes equipamentos está intimamente ligada ao conforto pessoal, abolir a utilização deste tipo de equipamento está descartada. Portanto, outro tipo de solução para o problema gerado pela fonte chaveada presente nos microcomputadores pessoais foi o foco deste estudo.

Com a intenção de reduzir as distorções harmônicas inseridas na rede, foram estudadas e analisadas diversas configurações de filtros passivos. Com a intenção de corroborar os testes realizados no computador, foram implementadas duas topologias diferentes. Com os dados obtidos durante os testes realizados, pode-se afirmar que o filtro em derivação é mais eficiente que o filtro série.

Ao longo deste trabalho foi possível aliar o conhecimento adquirido durante parte do curso de Engenharia Elétrica, as etapas de concepção e testes de um filtro passivo de correntes harmônicas para um microcomputador.

Para a implementação do filtro fez-se necessária uma a realização de um grande apanhado entre as matérias da Matemática e da Engenharia, a constante observância de uma relação de compromisso entre a eficiência energética e a qualidade da energia.

Ao final deste estudo é possível notar a quantidade de aprendizado adquirido, principalmente se abater sem se deixar levar. Os resultados obtidos com os testes dos filtros ao contradizerem os números das simulações e principalmente com a expectativa criada durante o desenvolvimento do projeto, criaram uma certa frustração em não haver tempo hábil para uma melhor abordagem do problema vivenciado.

Fica claro que utilizar a expressão “eliminação das correntes harmônicas” quando se faz o uso de um filtro é um tanto quanto equivocada, visto que os resultados não passam de atenuações de suas componentes individuais.

Para tanto, pode-se afirmar que a simples redução das correntes harmônicas tem o seu preço. E este vai desde a correta averiguação do problema, fazendo-se utilizar de equipamentos de boa confiabilidade, até utilização de componentes eletrônicos projetados única e exclusivamente para este fim.

Por fim, a utilização de um filtro passivo de correntes harmônicas é uma escolha adequada para reduzir as distorções presentes na rede elétrica. Mas o seu dimensionamento pode ser representado por uma balança desequilibrada, sempre puxando para o lado da qualidade da energia, deixando de lado a eficiência energética do sistema.

Pela falta de tempo hábil e pela grandiosidade do assunto, fica como sugestão para trabalhos futuros, a análise de ressonância do filtro série, e a implementação e teste do filtro em derivação caracterizado pelo filtro 3 da tabela 5.2 com seus respectivos componentes.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] DE OLIVEIRA, M.A.G. **Apostila de Qualidade da Energia Elétrica**. Brasília: UnB, 2003.
- [2] ALMEIDA, W.G. e FREITAS, F.D **Circuitos Polifásicos: teoria e ensaios**. Brasília: Fundação de Empreendimentos Científicos e Tecnológicos, 1995.
- [3] Atendimento a Cargas Geradoras de Harmônicas em Sistemas Primários de Distribuição – disponível na URL [http://www.cpfl.com.br/publ\\_tecnica/](http://www.cpfl.com.br/publ_tecnica/).
- [4] PROCOBRE. **Harmônicas nas Instalações Elétricas: Causas, efeitos e soluções**. [http://www.procobre.org/br/\\_configStuff/docs/uploaded/harmonic.pdf](http://www.procobre.org/br/_configStuff/docs/uploaded/harmonic.pdf).
- [5] Engecomp Tecnologia em Automação e Controle LTDA, disponível na URL [http://www.engecomp.com.br/pow\\_qual.htm](http://www.engecomp.com.br/pow_qual.htm).
- [6] SCHNEIDER ELECTRIC E PROCOBRE. **Qualidade de energia - Harmônicas**. Março, 2003.
- [7] ANEEL. **Prodlist – 2ª versão do modulo 8**. Brasília, 2005.
- [8] **Operação Conjunta: Filtro e Bloqueador Eletromagnético para Harmônicas de Seqüência Zero**, VI SBQEE, Belém - Pará - Brasil.
- [9] *IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*. IEEE 519. 1992
- [10] *IEC 61000-3-2. Eletromagnet compatibility (EMC)*. Part 3-3: Limits – Limits for harmonic current emission (equipment input current  $\leq 16$  A per phase).
- [11] ALBERTO, C. **Qualidade da Energia Elétrica**. Escola Federal de Engenharia de Itajubá.
- [12] ALDABÓ, R. **Qualidade na Energia Elétrica**. São Paulo: Artiber Editora, 2001.
- [13] RUSCHER, N.A. **Projeto e Análise do Filtro de Harmônicas Sintonizado de 5ª ordem**. Brasília, UnB, 2003.
- [14] AFONSO, J.L. e MARTINS, J.S. **Qualidade da Energia Elétrica**. Revista o eletrcista, n° 9, 3º trimestre de 2004, ano 3, pp. 66-71.
- [15] CLAMPER. **Sobretensões nas Linhas Elétricas de Baixa Tensão**.
- [16] SCHNEIDER ELECTRIC. **Proteção Contra Descargas Atmosféricas**.

## **ANEXO A**

### **Tabelas e gráficos**

Medições dos harmônicos presentes na rede elétrica da Câmara dos Deputados



Tabela A.1: Dados de tensão nos computadores

Harm.	Tensão			
	Média	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão
Fund.(rms)	219,35	210,03	226,47	2,26
2	0,07	0	0,4	0,03
3	3,85	2,74	4,69	0,39
4	0,07	0	0,23	0,03
5	4,2	2,42	5,21	0,38
6	0,04	0	0,1	0,02
7	0,54	0,16	0,98	0,11
8	0,02	0	0,13	0,01
9	0,79	0,06	1,8	0,31
10	0,02	0	0,12	0,01
11	0,37	0	1,17	0,17
12	0,02	0	0,14	0,01
13	0,45	0,11	0,86	0,09
14	0,02	0	0,11	0,01
15	0,37	0	1,37	0,18
16	0,02	0	0,16	0,01
17	0,3	0	1,11	0,17
18	0,02	0	0,2	0,01
19	0,19	0	0,93	0,11
20	0,02	0	0,14	0,02
21	0,54	0,01	2,09	0,3
22	0,04	0	0,22	0,02
23	0,37	0	1,52	0,22
24	0,04	0	0,27	0,02
25	0,3	0,01	1,26	0,18
26	0,04	0	0,19	0,03
27	0,48	0,01	2,47	0,31
28	0,03	0	0,18	0,02
29	0,26	0	1,47	0,18
30	0,03	0	0,2	0,02
31	0,24	0	1,34	0,17
DHTU	2,69%	1,74%	3,91%	40,77%

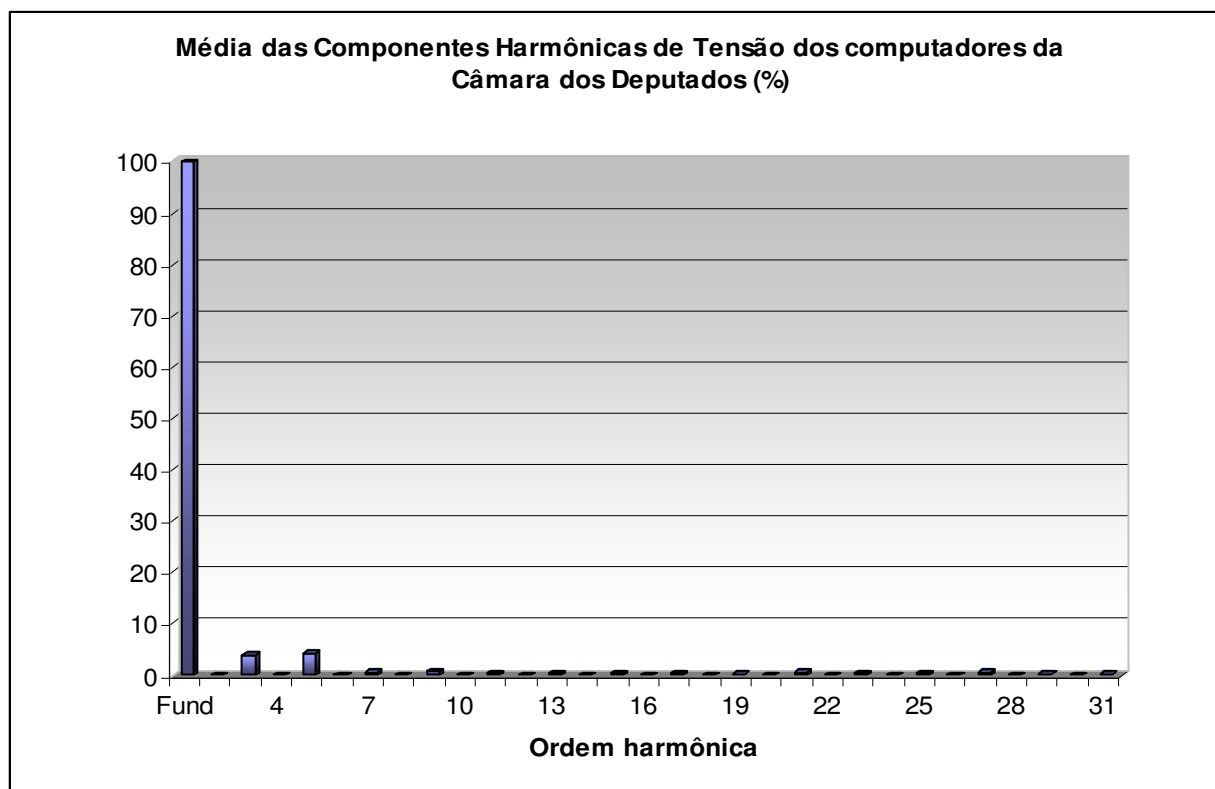


Figura A.1: Gráfico das médias das componentes harmônicas de tensão presente nos computadores

Tabela A.2: Dados de corrente nos computadores

Harm.	Corrente			
	Média	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão
Fund.(rms)	0,59	0,54	0,96	0,1
2	3,03	0,55	12,59	1,79
3	72,15	50,93	83,32	10,57
4	2,2	0,48	11,16	1,21
5	35,05	2,94	55,93	18,58
6	1,36	0,05	5,65	1
7	15,11	2,75	27,53	7,62
8	0,93	0,18	6,44	0,77
9	3,73	0,08	14,93	2,76
10	0,65	0,05	5,16	0,7
11	8,31	5,65	14,04	1,6
12	0,55	0,02	4,45	0,51
13	5,76	0,04	9,87	2,49
14	0,49	0,02	3,56	0,41
15	3,52	0,93	6,96	0,97
16	0,42	0,02	2,98	0,39
17	3,37	0,61	7,76	1,51
18	0,33	0,03	2,61	0,31
19	2,32	0,11	4,69	1,26
20	0,28	0,01	2,26	0,25
21	1,97	0,1	4,66	0,93
22	0,31	0,01	1,88	0,23
23	2,28	0,1	5,67	1,01
24	0,28	0,02	1,78	0,2
25	2,04	0,07	4,4	0,78
26	0,22	0,01	1,53	0,16
27	1,9	0,3	4,59	0,85
28	0,23	0,01	1,47	0,18
29	1,67	0,14	4,93	0,92
30	0,21	0,02	1,41	0,17
31	1,49	0	4,49	0,83
Neutro	0,87	0,68	1,25	0,13
DHTI	82,76%	51,42%	109,85%	23,42%

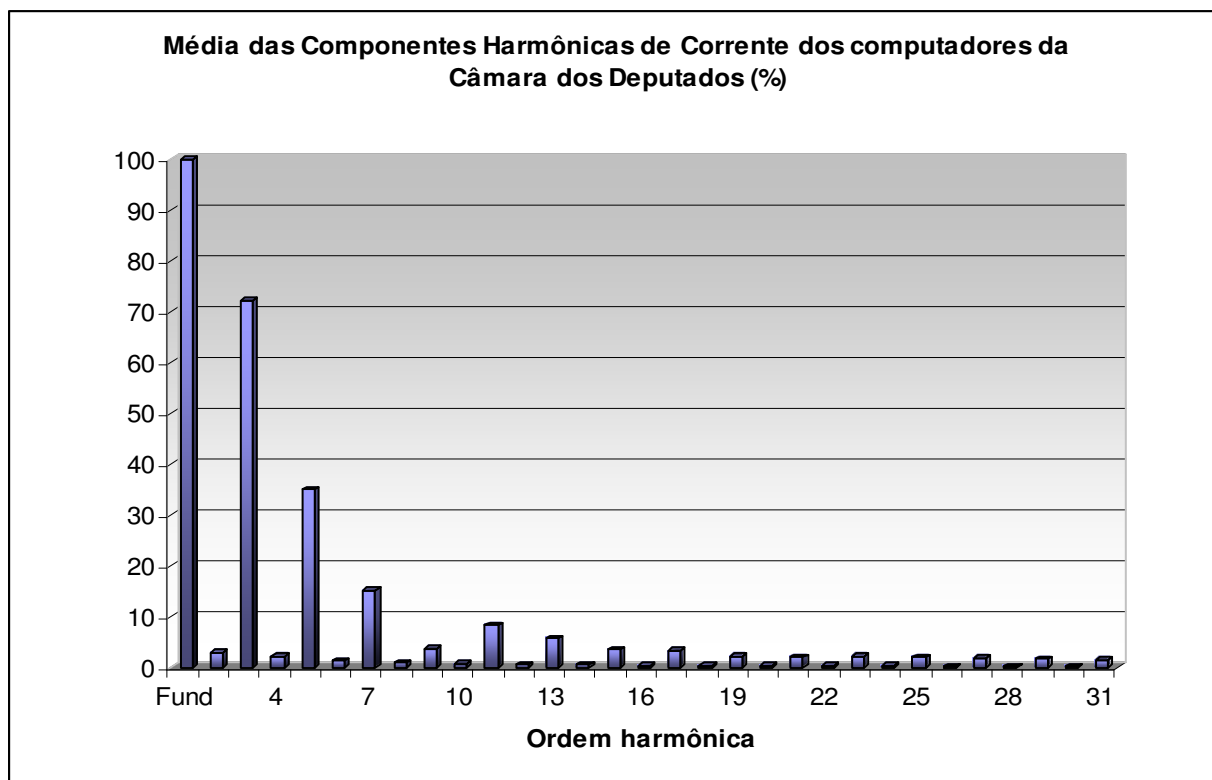


Figura A.2: Gráfico das médias das componentes harmônicas de corrente dos computadores

Tabela A.3: Dados de tensão na fase A do quadro de distribuição do andar 19

Harm.	Tensão - FASE A			
	Média	Máximo	Mínimo	Desvio Padrão
Fund.	220,48	222,67	217,64	0,82
2	0,06	0,15	0	0,02
3	3,68	4	3,39	0,06
4	0,03	0,12	0	0,02
5	4,09	4,85	3,21	0,24
6	0,02	0,07	0	0,01
7	0,46	0,74	0,18	0,11
8	0,02	0,08	0	0,01
9	0,38	0,81	0,02	0,14
10	0,02	0,08	0	0,01
11	0,27	0,77	0,01	0,13
12	0,02	0,08	0	0,01
13	0,44	0,8	0,18	0,07
14	0,02	0,06	0	0,01
15	0,36	1,24	0,05	0,16
16	0,02	0,11	0	0,01
17	0,19	0,62	0	0,12
18	0,02	0,1	0	0,01
19	0,17	0,54	0,01	0,1
20	0,02	0,11	0	0,01
21	0,38	1,27	0,02	0,22
22	0,03	0,14	0	0,02
23	0,21	0,77	0,02	0,14
24	0,03	0,14	0	0,02
25	0,38	1,21	0,03	0,19
26	0,03	0,15	0	0,02
27	0,37	1,68	0,02	0,27
28	0,03	0,19	0	0,02
29	0,26	1,09	0,01	0,17
30	0,03	0,17	0	0,02
31	0,25	0,81	0	0,17
DHTU	5,66	6,12	4,86	0,19

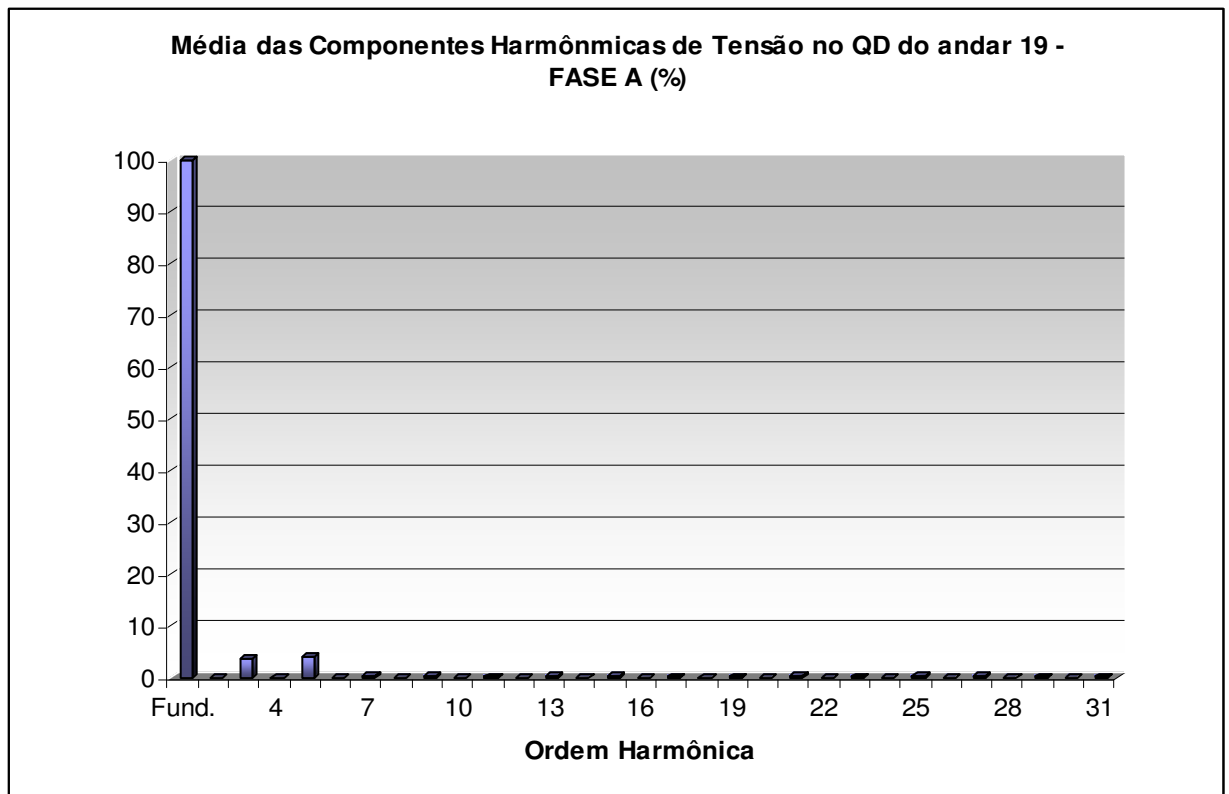


Figura A.3: Gráfico das médias das componentes harmônicas de tensão no QD do andar 19 – Fase A

Tabela A.4: Dados de tensão na fase B do quadro de distribuição do andar 19

Harm.	Tensão - FASE B			
	Média	Máximo	Mínimo	Desvio Padrão
Fund. (rms)	221,47	223,53	218,68	0,8
2	0,06	0,16	0	0,03
3	3,8	4,13	0,062	0,06
4	0,04	0,1	0	0,02
5	3,63	4,42	2,63	0,25
6	0,02	0,06	0	0,01
7	0,42	0,91	0,03	0,12
8	0,02	0,05	0	0,01
9	0,41	0,83	0,02	0,015
10	0,02	0,04	0	0,01
11	0,22	0,65	0,02	0,12
12	0,02	0,05	0	0,01
13	0,39	0,67	0,07	0,08
14	0,02	0,08	0	0,01
15	0,28	1,14	0,04	0,15
16	0,02	0,07	0	0,01
17	0,22	0,64	0,02	0,12
18	0,02	0,07	0	0,01
19	0,18	0,53	0,01	0,1
20	0,02	0,09	0	0,01
21	0,36	1,13	0,03	0,22
22	0,03	0,11	0	0,02
23	0,27	0,91	0,01	0,18
24	0,03	0,1	0	0,02
25	0,26	0,85	0,01	0,14
26	0,03	0,11	0	0,02
27	0,35	1,52	0,02	0,24
28	0,03	0,13	0	0,02
29	0,24	1,27	0,01	0,16
30	0,03	0,12	0	0,02
31	0,22	1,05	0	0,17
DHTU	5,4	6,12	4,86	0,19

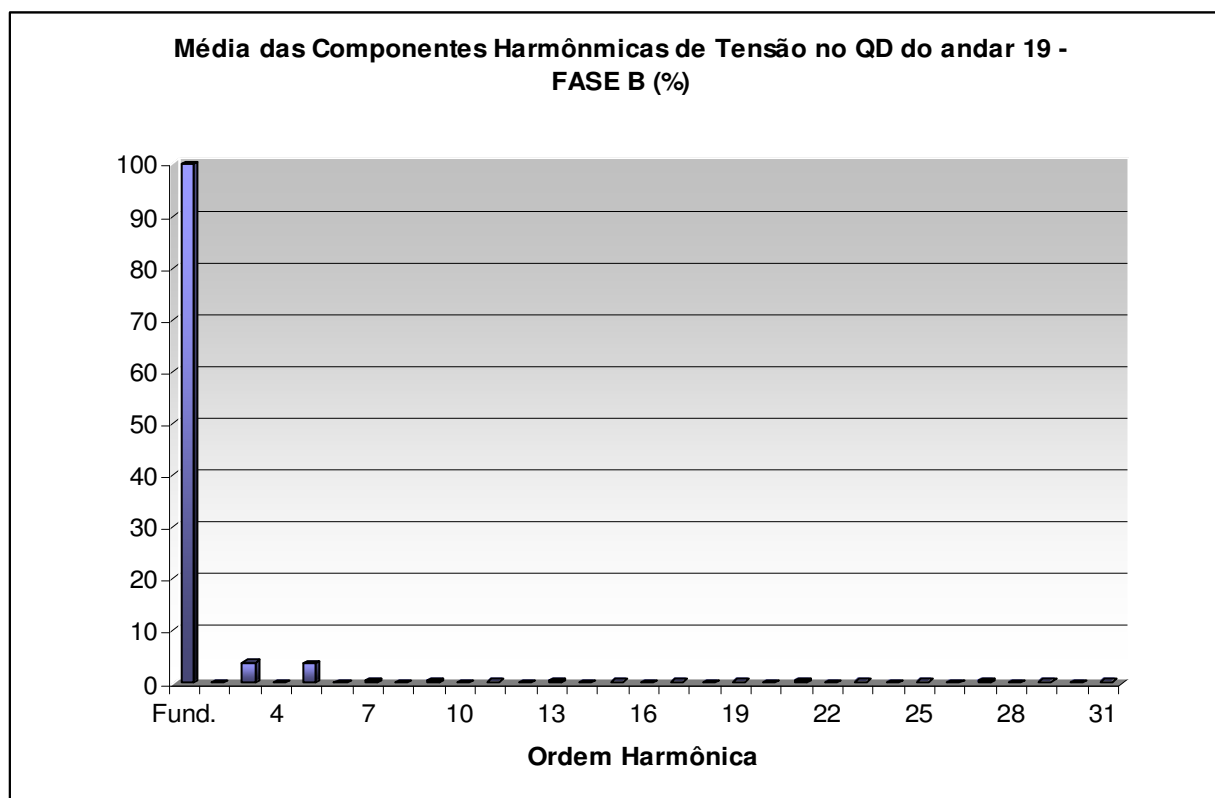


Figura A.4: Gráfico das médias das componentes harmônicas de tensão no QD do andar 19 – Fase B

Tabela A.5: Dados de tensão na fase C do quadro de distribuição do andar 19

Harm.	Tensão - FASE C			
	Média	Máximo	Mínimo	Desvio Padrão
Fund. (rms)	220,37	222,59	217,23	1
2	0,1	0,26	0,03	0,3
3	4,09	4,37	3,93	0,07
4	0,8	0,13	0,01	0,02
5	4,28	5,03	3,42	0,23
6	0,03	0,09	0	0,01
7	0,45	0,76	0,14	0,1
8	0,02	0,12	0	0,01
9	0,41	0,87	0,03	0,15
10	0,02	0,06	0	0,01
11	0,43	1,01	0,05	0,15
12	0,02	0,14	0	0,01
13	0,4	0,72	0,15	0,8
14	0,02	0,15	0	0,01
15	0,38	1,16	0	0,19
16	0,02	0,09	0	0,01
17	0,38	1,04	0,03	0,16
18	0,02	0,22	0	0,2
19	0,16	0,56	0,01	0,11
20	0,02	0,12	0	0,02
21	0,45	1,32	0,02	0,27
22	0,03	0,15	0	0,02
23	0,35	1,18	0,03	0,21
24	0,03	0,25	0	0,03
25	0,26	0,91	0,02	0,17
26	0,04	0,21	0	0,02
27	0,48	2,04	0,02	0,32
28	0,03	0,15	0	0,02
29	0,25	0,96	0,02	0,16
30	0,03	0,18	0	0,02
31	0,21	0,87	0	0,15
DHTU	6,1	6,82	5,65	0,2

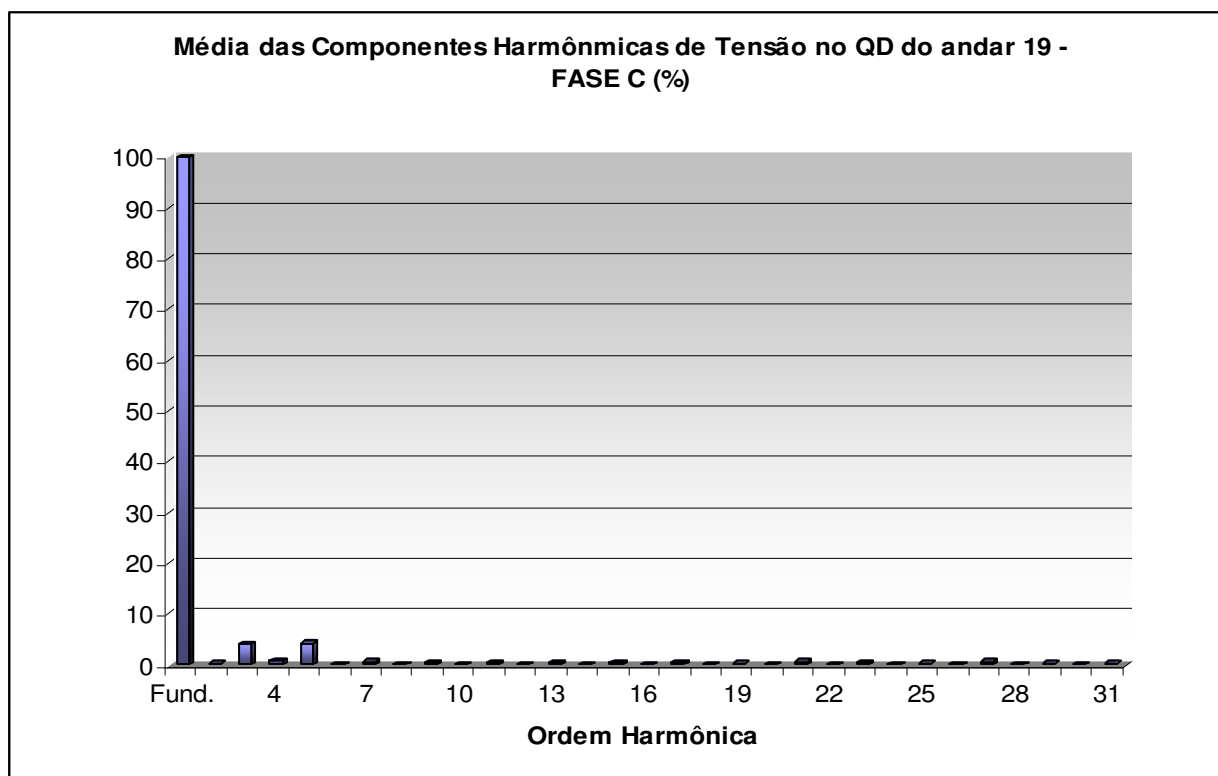


Figura A.5: Gráfico das médias das componentes harmônicas de tensão no QD do andar 19 – Fase

## **ANEXO B**

### **Tabelas e gráficos**

Ensaio de distorções harmônicas nos computadores em laboratório

Tabela B.1: Planilha das distorções harmônicas individuais produzidas pelos computadores durante o ensaio senoidal.

PLANILHAS DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS DE CORRENTE - ENSAIO SENOIDAL																					
Harm.	MICRO 01			MICRO 02			MICRO 03			MICRO 04			MICRO 05			MICRO 06			MÉDIA		
	rms.	rel. (%)	Phase	rms.	rel. (%)	Phase	rms.	rel. (%)	Phase	rms.	rel. (%)	Phase	rms.	rel. (%)	Phase	rms.	rel. (%)	Phase	rms.	rel. (%)	Phase
Fund	0,59	100	9,3	0,63	100	11,3	0,52	100	4,5	0,65	100	13	0,67	100	11,2	0,67	100	11,2	0,62	100,00	10,30
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00
3	0,57	96,61	165,4	0,6	95,24	158,6	0,5	96,15	174,6	0,6	92,31	148,6	0,64	95,52	169,7	0,64	95,52	169,7	0,59	94,22	164,28
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00
5	0,49	83,05	336,1	0,51	80,95	325	0,44	84,62	351,2	0,51	78,46	307,9	0,54	80,6	342,3	0,54	80,6	342,3	0,49	78,91	-26,00
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,01	1,54	0	0,01	1,54	0	0	0	0	0,00	0,54	0,00
7	0,41	69,49	146,3	0,42	66,67	131,3	0,37	71,15	167,6	0,41	63,08	107,6	0,42	62,69	156,9	0,42	62,69	156,9	0,38	61,92	144,41
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00
9	0,32	54,24	316,9	0,32	50,79	297,2	0,29	55,77	344,5	0,29	44,62	268,2	0,29	43,28	331,8	0,29	43,28	331,8	0,27	43,76	-44,58
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,01	1,54	0	0,01	1,54	0	0	0	0	0,0033	0,54	0,00
11	0,23	38,98	127,5	0,21	33,33	103,1	0,21	40,38	162	0,18	27,69	70,7	0,16	23,88	149	0,16	23,88	149	0,17	26,58	127,43
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00
13	0,14	23,73	297,3	0,11	17,46	271,1	0,13	25	340,2	0,09	13,85	238,3	0,06	8,96	340,9	0,06	8,96	340,9	0,08	12,60	-57,13
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00
15	0,06	10,17	106	0,03	4,76	0	0,06	11,54	162,3	0,03	4,62	0	0,03	4,48	0	0,03	4,48	0	0,01	2,39	58,62
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00
17	0,01	1,69	0	0,01	1,59	0	0,02	3,85	0	0,02	3,08	0	0,06	8,96	99,4	0,06	8,96	99,4	0,02	3,36	71,16
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00
19	0,02	3,39	0	0,04	6,35	0	0,01	1,92	0	0,04	6,15	0	0,07	10,45	283,8	0,07	10,45	283,8	0,03	5,30	-43,48
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00
21	0,04	6,78	0	0,05	7,94	0	0,03	5,77	0	0,04	6,15	0	0,07	10,45	108,6	0,07	10,45	108,6	0,03	4,72	49,00
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00
23	0,04	6,78	0	0,04	6,35	0	0,03	5,77	0	0,02	3,08	0	0,05	7,46	0	0,05	7,46	0	0,04	6,17	0,00
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00
25	0,03	5,08	0	0,02	3,17	0	0,02	3,85	0	0,01	1,54	0	0,03	4,48	0	0,03	4,48	0	0,02	3,76	0,00
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00
27	0,02	3,39	0	0,01	1,59	0	0,01	1,92	0	0,01	1,54	0	0,03	4,48	0	0,03	4,48	0	0,02	2,95	0,00
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00
29	0,01	1,69	0	0,01	1,59	0	0	0	0	0,01	1,54	0	0,04	5,97	0	0,04	5,97	0	0,02	2,95	0,00
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00
31	0,01	1,69	0	0,01	1,59	0	0	0	0	0,01	1,54	0	0,03	4,48	0	0,03	4,48	0	0,02	2,42	0,00
32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00
33	0,02	3,39	0	0,02	3,17	0	0,01	1,92	0	0,01	1,54	0	0,03	4,48	0	0,03	4,48	0	0,02	3,22	0,00
34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00
35	0,02	3,39	0	0,02	3,17	0	0,01	1,92	0	0	0	0	0,02	2,99	0	0,02	2,99	0	0,02	2,42	0,00
36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00
37	0,02	3,39	0	0,01	1,59	0	0,01	1,92	0	0	0	0	0,01	1,49	0	0,01	1,49	0	0,01	1,61	0,00
38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00
39	0,01	1,69	0	0,01	1,59	0	0	0	0	0	0	0	0,01	1,49	0	0,01	1,49	0	0,01	1,07	0,00
40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00
41	0,01	1,69	0	0,01	1,59	0	0	0	0	0	0	0	0,01	1,49	0	0,01	1,49	0	0,01	1,07	0,00
42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00
43	0	0	0	0,01	1,59	0	0	0	0	0	0	0	0,01	1,49	0	0,01	1,49	0	0,01	0,81	0,00
44	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00
45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,01	1,49	0	0,01	1,49	0	0,00	0,54	0,00
46	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00
47	0,01	1,69	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0017	0,27	0,00
48	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00
49	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00
50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00
DHTI	162,42%			155,82%			164,57%			147,44%			150,29%			150,28%			147,93%		

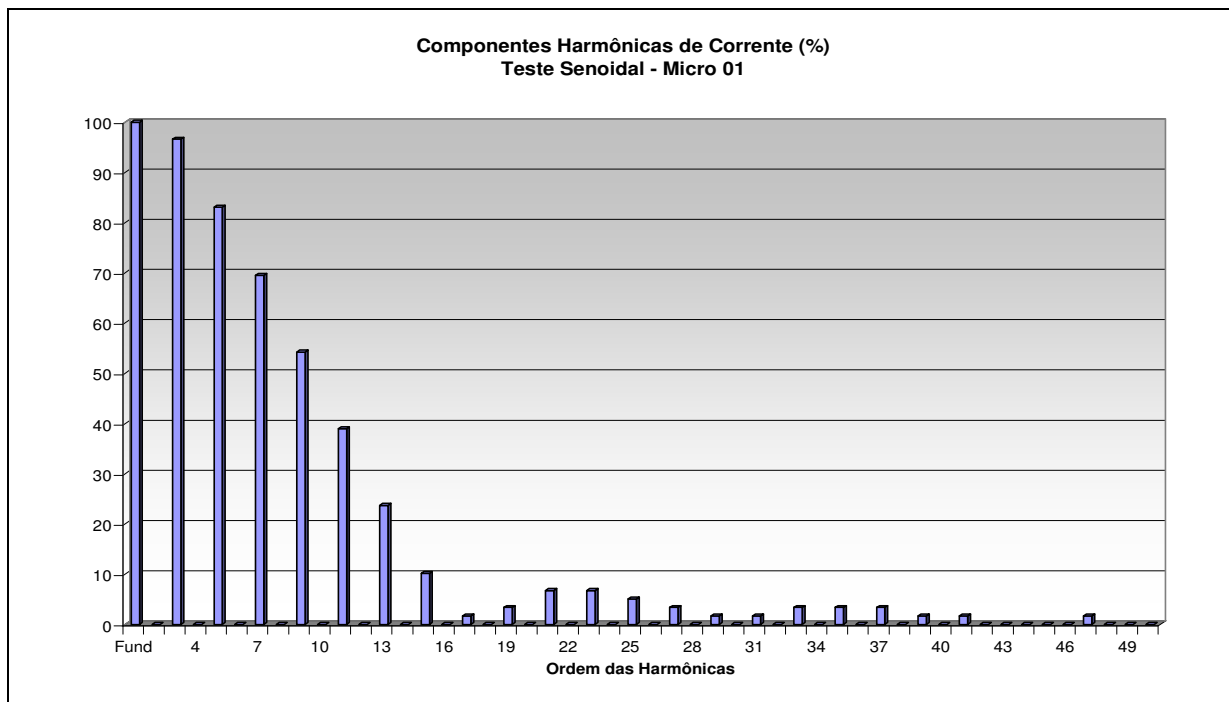


Figura B.1: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente no Micro 01 durante o Teste Senoidal

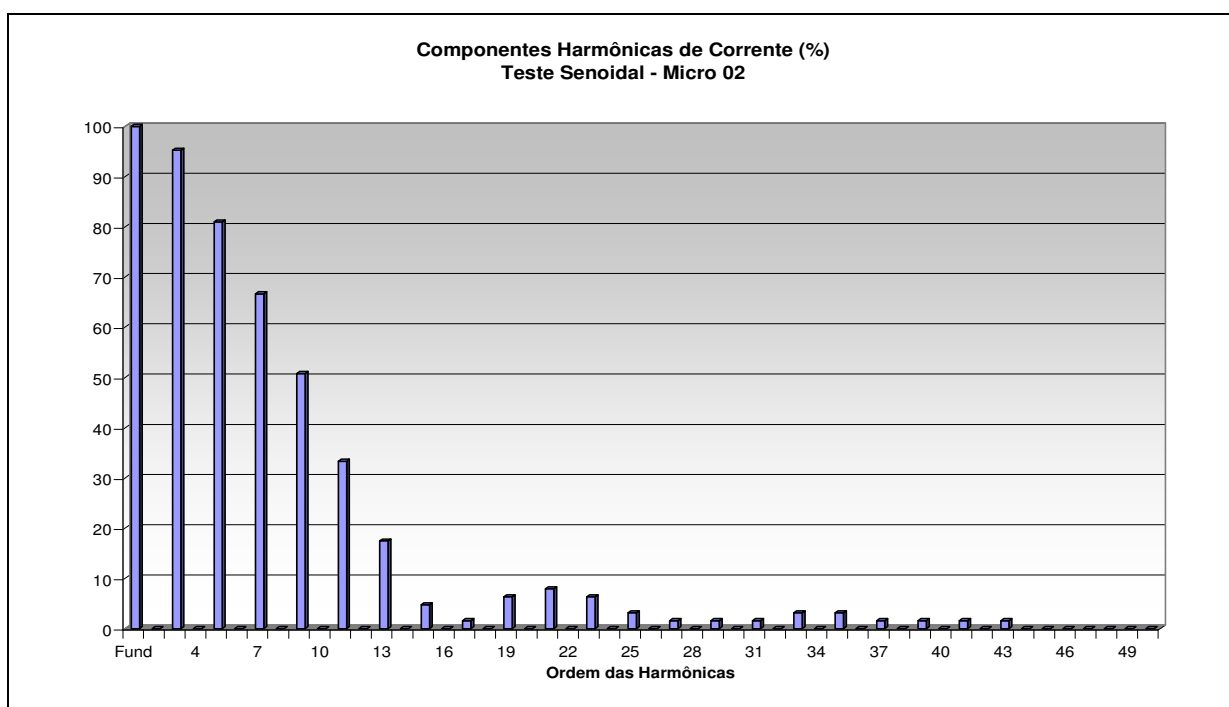


Figura B.2: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente no Micro 02 durante o Teste Senoidal



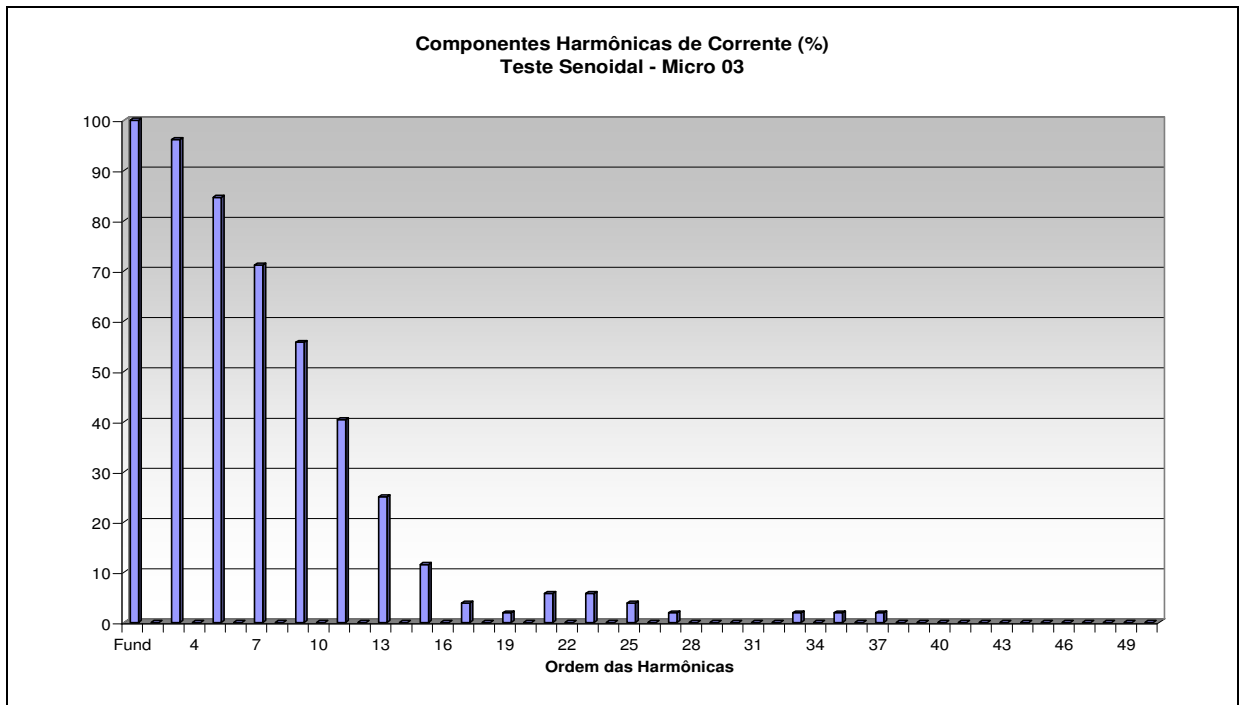


Figura B.3: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente no Micro 03 durante o Teste Senoidal

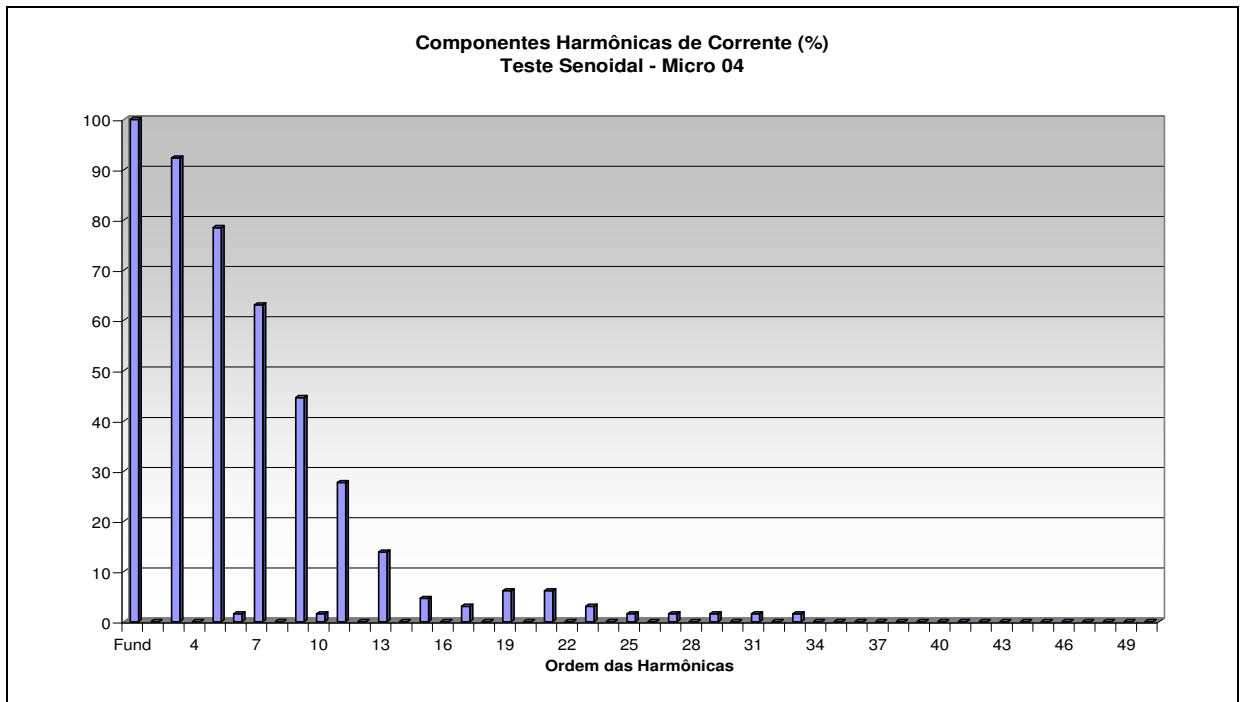


Figura B.4: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente no Micro 04 durante o Teste Senoidal

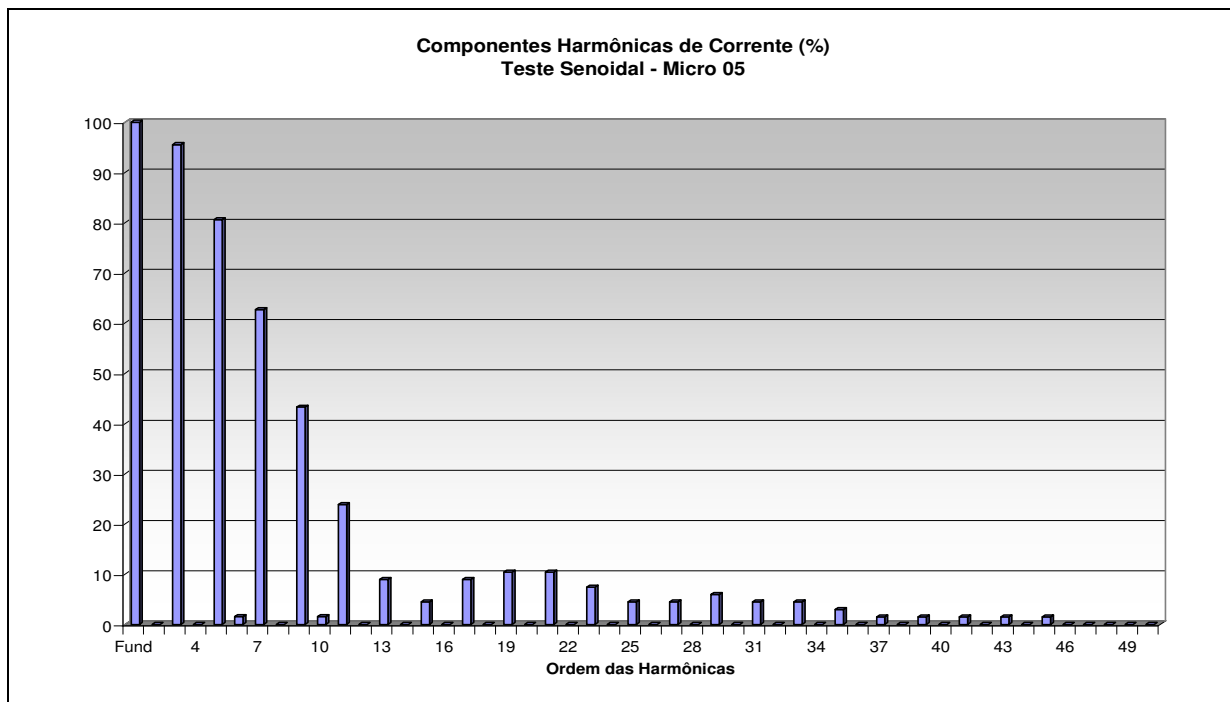


Figura B.5: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente no Micro 05 durante o Teste Senoidal

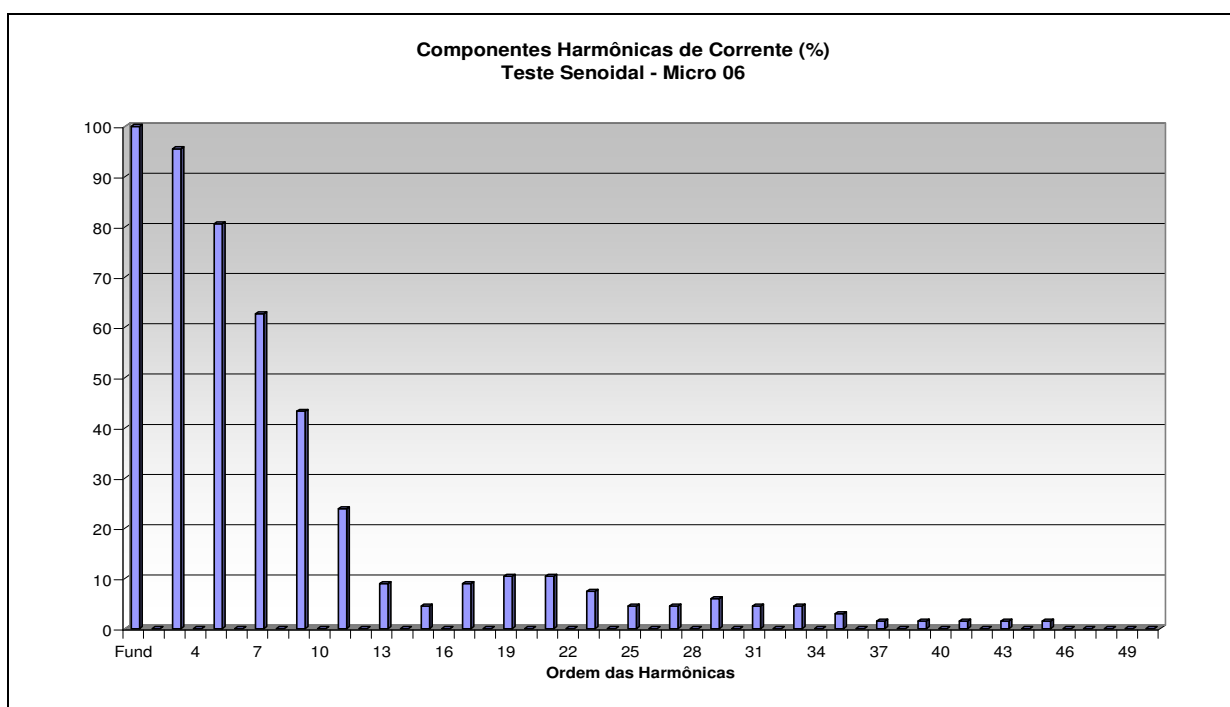


Figura B.6: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente no Micro 06 durante o Teste Senoidal

Tabela B.2: Planilha das distorções harmônicas individuais produzidas pelos computadores durante o ensaio médio.

PLANILHAS DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS DE CORRENTE - ENSAIO MÉDIO																					
Harm.	MICRO 01			MICRO 02			MICRO 03			MICRO 04			MICRO 05			MICRO 06			MÉDIA		
	rms.	rel. (%)	Phase	rms.	rel. (%)	Phase	rms.	rel. (%)	Phase	rms.	rel. (%)	Phase	rms.	rel. (%)	Phase	rms.	rel. (%)	Phase	rms.	rel. (%)	Phase
Fund	0,59	100	6,5	0,61	100	8,1	0,42	100	2,8	0,68	100	11,5	0,7	100	9,1	0,57	100	6,9	0,59	100,00	7,9
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,01	1,43	0	0	0	0	0	0	0
3	0,57	96,61	170,4	0,57	93,44	164,6	0,39	92,86	173,9	0,61	89,71	149,3	0,67	95,71	171	0,55	96,49	169	0,55	93,24	165,9
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,01	1,43	0	0	0	0	0,00	0,28	0
5	0,52	88,14	345,1	0,52	85,25	335,9	0,37	88,1	350	0,56	82,35	313,1	0,61	87,14	345,6	0,52	91,23	341,7	0,50	84,93	-22,0
6	0	0	0	0,01	1,64	0	0,01	2,38	0	0,01	1,47	0	0	0	0	0	0	0	0,01	0,84	0
7	0,45	76,27	158,3	0,45	73,77	144,9	0,33	78,57	165,5	0,46	67,65	111,1	0,5	71,43	159,1	0,45	78,95	153,6	0,42	70,47	148,4
8	0,01	1,69	0	0	0	0	0	0	0	0,01	1,47	0	0	0	0	0	0	0	0,0033	0,56	0
9	0,38	64,41	332,4	0,36	59,02	315,8	0,29	69,05	341,5	0,37	54,41	272,8	0,38	54,29	333,4	0,38	66,67	327,2	0,33	56,03	-39,3
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,01	1,47	0	0	0	0	0	0	0	0,0017	0,28	0
11	0,29	49,15	146	0,27	44,26	126	0,24	57,14	157,4	0,26	38,24	73,2	0,26	37,14	147,9	0,29	50,88	140,5	0,24	40,34	133,5
12	0	0	0	0	0	0	0,01	2,38	0	0,01	1,47	0	0	0	0	0	0	0	0,0033	0,56	0
13	0,21	35,59	320,8	0,18	29,51	297,9	0,19	45,24	333,6	0,17	25	236,7	0,15	21,43	324,2	0,21	36,84	314,7	0,16	26,93	-51,9
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0,14	23,73	135,2	0,11	18,03	111,8	0,14	33,33	149,9	0,09	13,24	43,7	0,06	8,57	145,2	0,14	24,56	129,3	0,10	16,30	125,1
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0,07	11,86	307,9	0,04	6,56	0	0,09	21,43	327,1	0,03	4,41	0	0,01	1,43	0	0,08	14,04	306,7	0,05	8,37	-34,3
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0,02	3,39	0	0,01	1,64	0	0,05	11,9	0	0,02	2,94	0	0,05	7,14	0	0,03	5,26	0	0,03	5,05	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0,01	1,69	0	0,03	4,92	0	0,02	4,76	0	0,03	4,41	0	0,07	10	115,8	0,01	1,75	0	0,02	2,63	42,2
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0,03	5,08	0	0,04	6,56	0	0	0	0	0,03	4,41	0	0,07	10	294,5	0,03	5,26	0	0,03	4,80	-21,8
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0,04	6,78	0	0,04	6,56	0	0,02	4,76	0	0,03	4,41	0	0,06	8,57	117	0,03	5,26	0	0,02	4,01	21,9
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0,03	5,08	0	0,03	4,92	0	0,02	4,76	0	0,01	1,47	0	0,04	5,71	0	0,03	5,26	0	0,03	4,49	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	0,02	3,39	0	0,02	3,28	0	0,02	4,76	0	0	0	0	0,03	4,29	0	0,02	3,51	0	0,02	3,08	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31	0,01	1,69	0	0,01	1,64	0	0,02	4,76	0	0,01	1,47	0	0,03	4,29	0	0,01	1,75	0	0,02	2,52	0
32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
33	0	0	0	0	0	0	0,02	4,76	0	0,01	1,47	0	0,03	4,29	0	0	0	0	0,01	1,68	0
34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
35	0,01	1,69	0	0,01	1,64	0	0,01	2,38	0	0,01	1,47	0	0,03	4,29	0	0	0	0	0,01	1,96	0
36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
37	0,01	1,69	0	0,01	1,64	0	0	0	0	0,01	1,47	0	0,03	4,29	0	0,01	1,75	0	0,01	1,96	0
38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
39	0,02	3,39	0	0,01	1,64	0	0	0	0	0	0	0	0,02	2,86	0	0,01	1,75	0	0,01	1,68	0
40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
41	0,01	1,69	0	0,01	1,64	0	0	0	0	0	0	0	0,01	1,43	0	0,01	1,75	0	0,01	1,12	0
42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
43	0,01	1,69	0	0	0	0	0,01	2,38	0	0	0	0	0,01	1,43	0	0,01	1,75	0	0,01	1,12	0
44	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
45	0,01	1,69	0	0	0	0	0,01	2,38	0	0	0	0	0,01	1,43	0	0	0	0	0,01	0,84	0
46	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
47	0	0	0	0	0	0	0,01	2,38	0	0	0	0	0,01	1,43	0	0	0	0	0,0033	0,56	0
48	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
49	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,01	1,43	0	0	0	0	0,0017	0,28	0
50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DHII	177,79%			168,18%			185,79%			157,27%			164,89%			182,20%			163,78%		

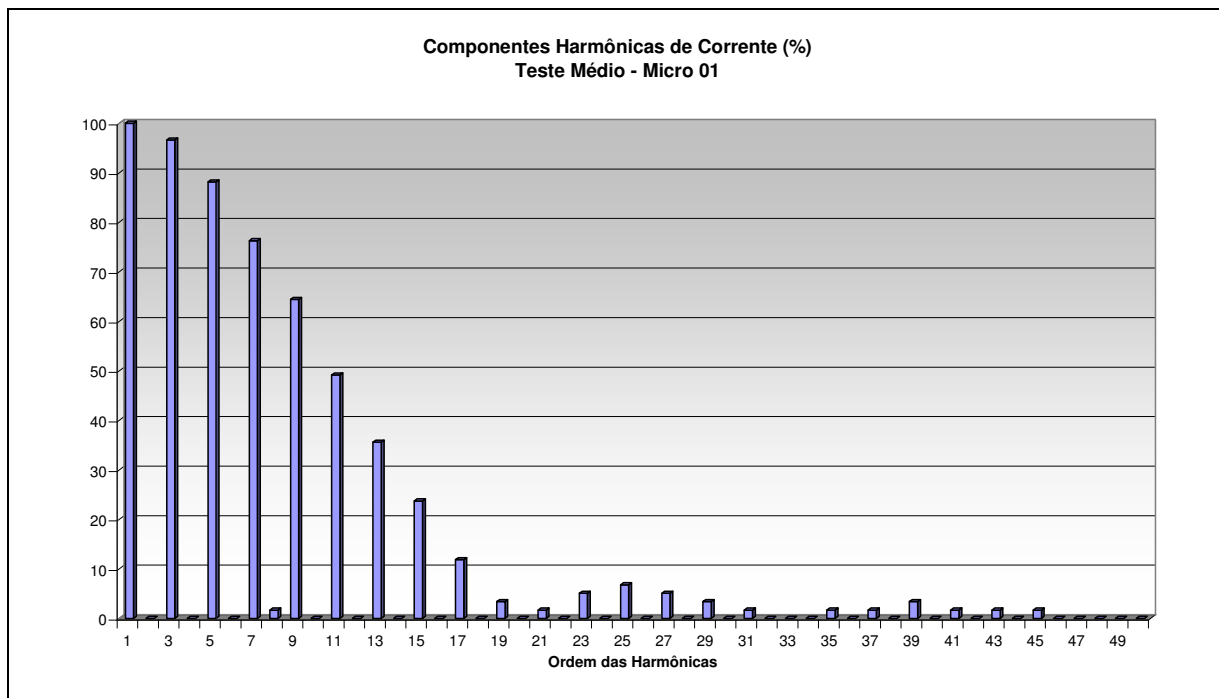


Figura B.7: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente no Micro 01 durante o Teste Médio

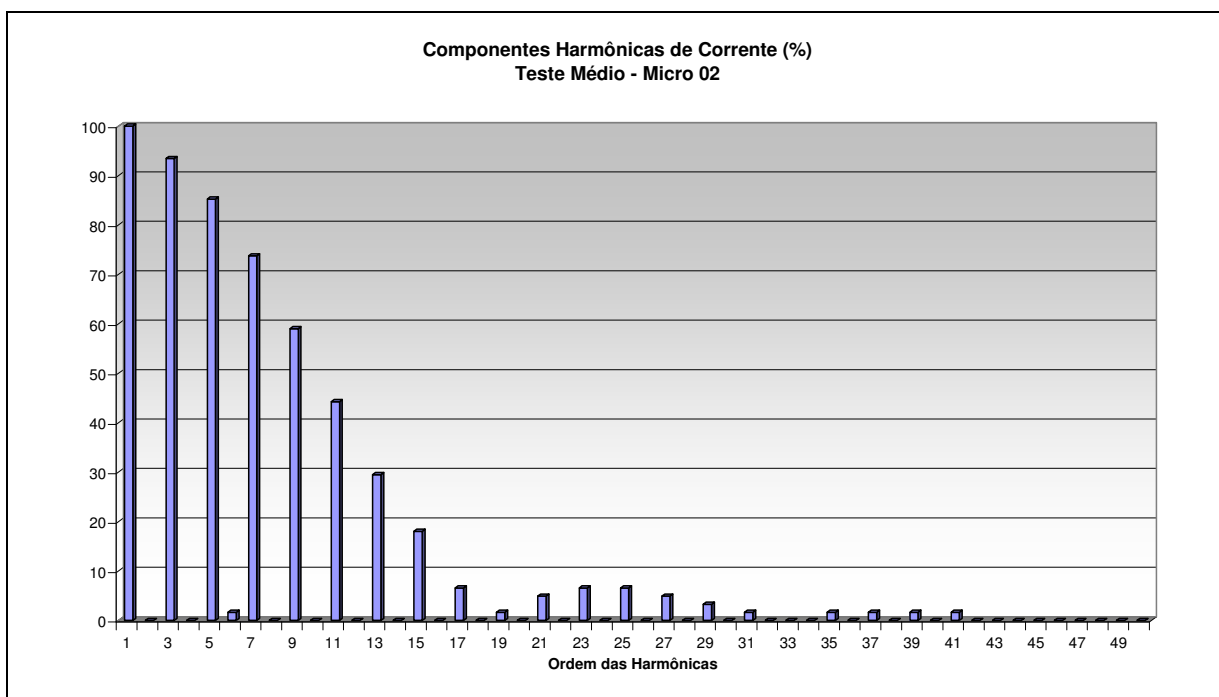


Figura B.8: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente no Micro 02 durante o Teste Médio

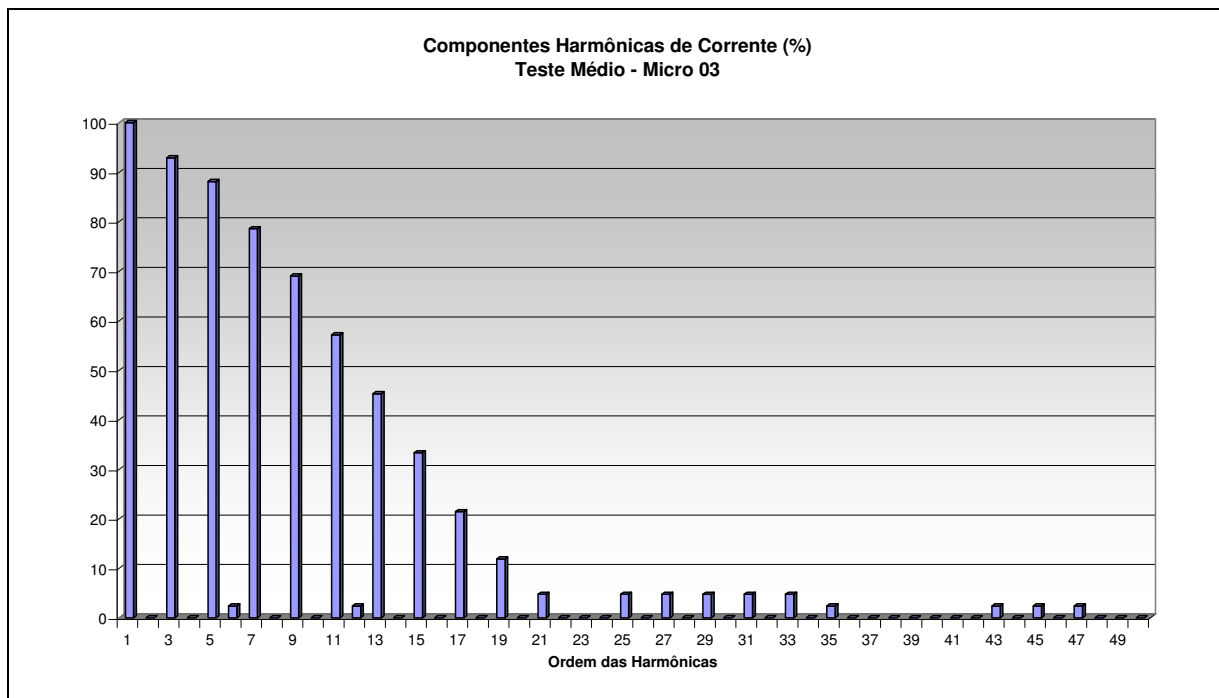


Figura B.9: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente no Micro 04 durante o Teste Médio

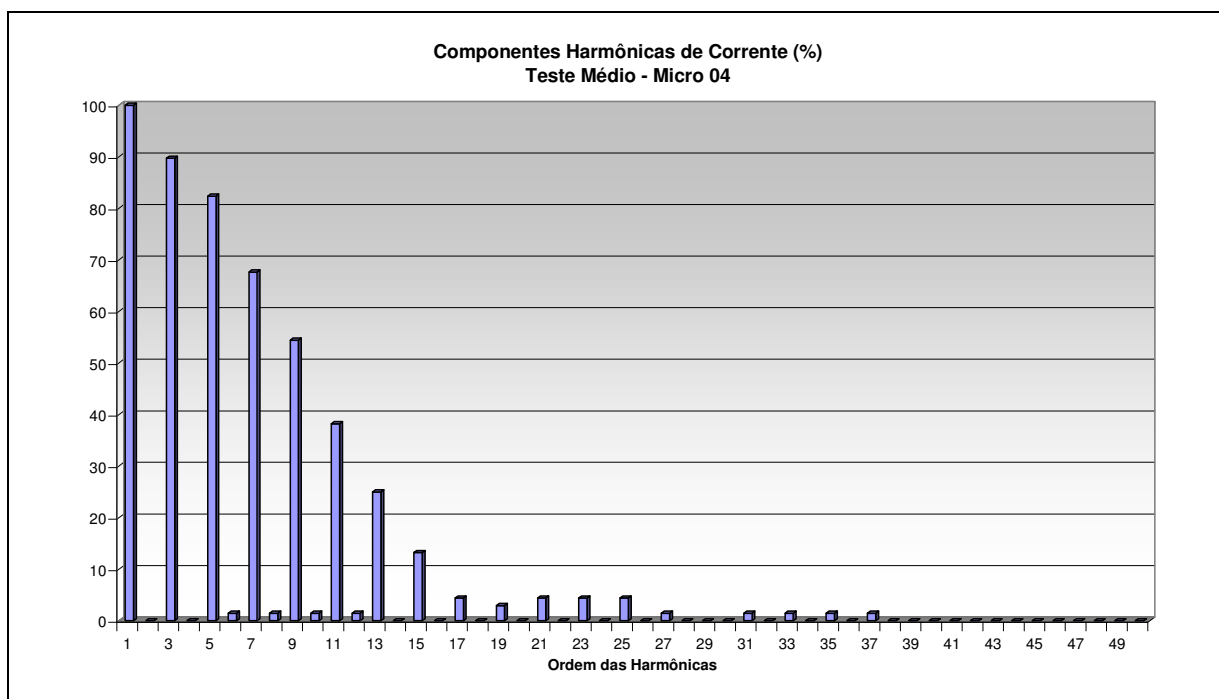


Figura B.10: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente no Micro 04 durante o Teste Médio

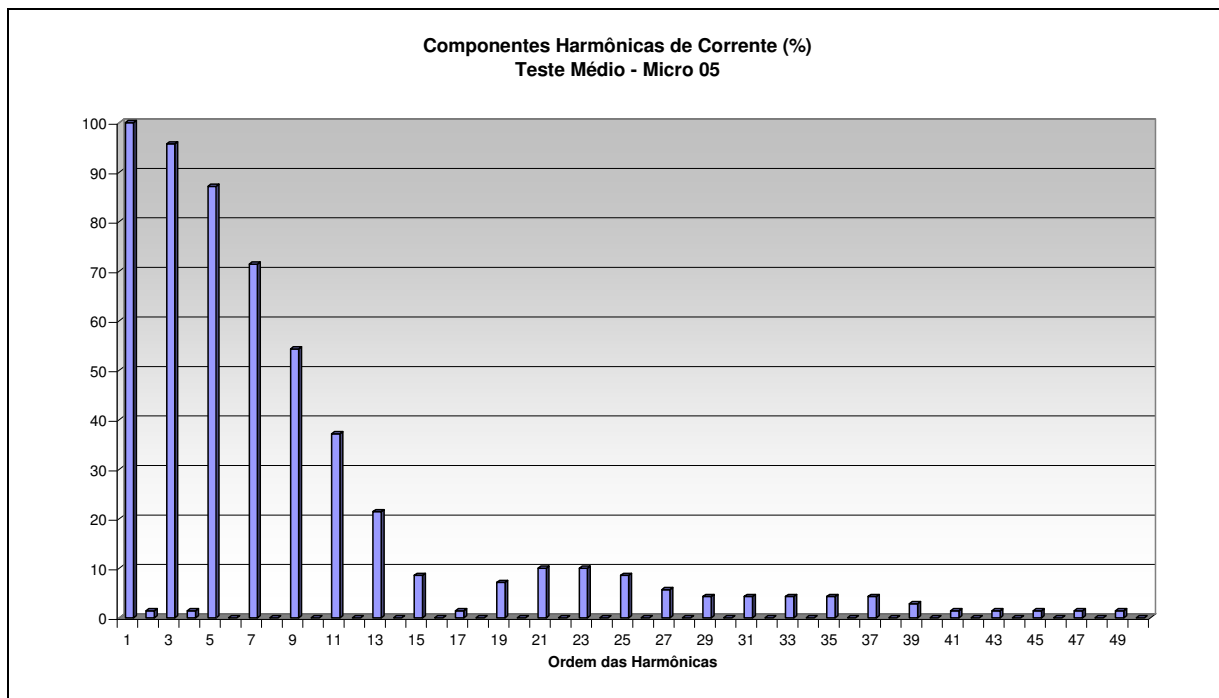


Figura B.11: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente no Micro 05 durante o Teste Médio

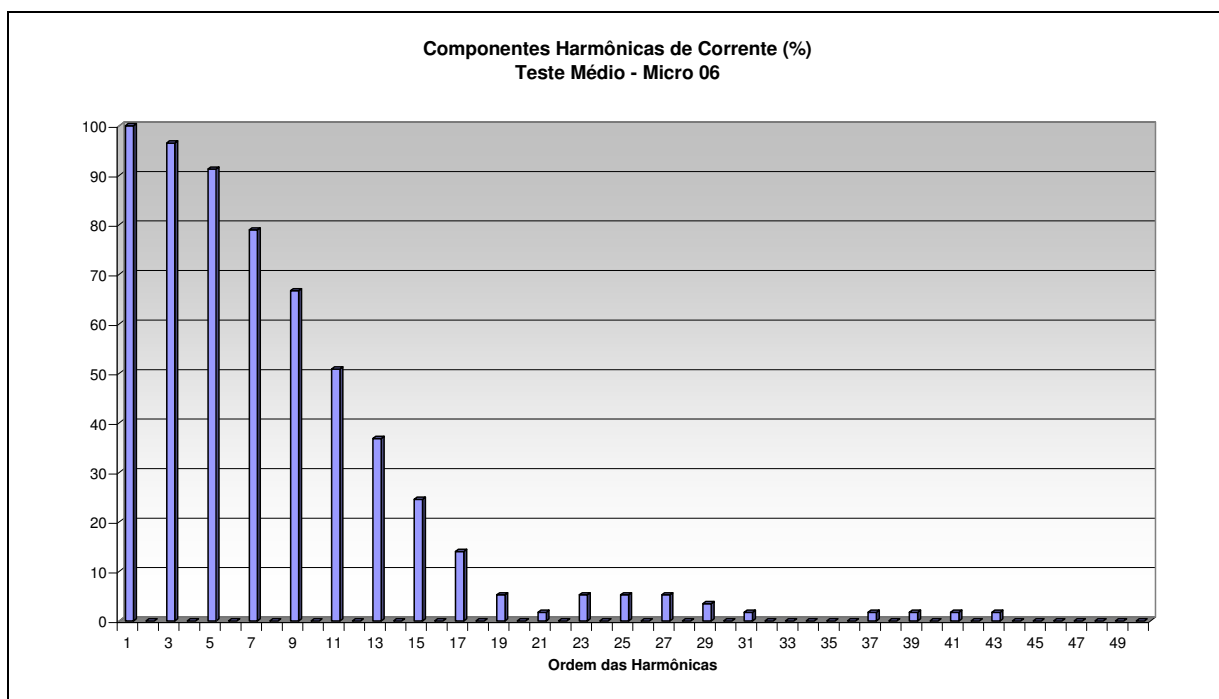


Figura B.12: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente no Micro 06 durante o Teste Médio

Tabela B.3: Planilha das distorções harmônicas individuais produzidas pelos computadores durante o ensaio máximo.

PLANILHAS DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS DE CORRENTE - ENSAIO MÁXIMO																					
Harm.	MICRO 01			MICRO 02			MICRO 03			MICRO 04			MICRO 05			MICRO 06			MEDIA		
	rms.	rel. (%)	Phase	rms.	rel. (%)	Phase	rms.	rel. (%)	Phase	rms.	rel. (%)	Phase	rms.	rel. (%)	Phase	rms.	rel. (%)	Phase	rms.	rel. (%)	Phase
Fund	0,59	100	6,5	0,59	100	8,5	0,42	100	2,9	0,69	100	11,6	0,72	100	9	0,57	100	6,6	0,60	0,27	7,9092
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
3	0,59	100	170,3	0,58	98,31	162,6	0,4	95,24	174,3	0,63	91,3	148,8	0,67	93,06	171,5	0,55	96,49	170,3	0,56	0,26	165,8
4	0	0	0	0,01	1,69	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0
5	0,53	89,83	345,6	0,52	88,14	333,7	0,37	88,1	350,7	0,57	82,61	312,9	0,61	84,72	346,4	0,51	89,47	345	0,51	0,23	-21,6
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0
7	0,46	77,97	159,3	0,45	76,27	141,4	0,33	78,57	166,3	0,47	68,12	109,9	0,5	69,44	160,7	0,44	77,19	158,2	0,42	0,19	148,9
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
9	0,38	64,41	334,4	0,37	62,71	310,9	0,28	66,67	342,9	0,37	53,62	272,7	0,39	54,17	336,1	0,37	64,91	332,5	0,33	0,15	-38,2
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
11	0,29	49,15	149	0,27	45,76	119,6	0,23	54,76	159	0,25	36,23	71,8	0,27	37,5	152,6	0,28	49,12	147	0,23	0,11	135,4
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
13	0,21	35,59	325,4	0,18	30,51	290,8	0,18	42,86	336,1	0,16	23,19	238,6	0,16	22,22	332,3	0,21	36,84	323,3	0,16	0,07	-48,0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
15	0,13	22,03	143,2	0,11	18,64	103,3	0,13	30,95	154,2	0,08	11,59	50	0,07	9,72	161,6	0,13	22,81	141,3	0,09	0,04	131,8
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
17	0,07	11,86	326,7	0,05	8,47	0	0,09	21,43	333,9	0,03	4,35	0	0,03	4,17	0	0,07	12,28	325,2	0,05	0,03	-21,0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
19	0,02	3,39	0	0,01	1,69	0	0,05	11,9	0	0,03	4,35	0	0,05	6,94	0	0,03	5,26	0	0,03	0,01	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
21	0,02	3,39	0	0,03	5,08	0	0,02	4,76	0	0,04	5,8	0	0,07	9,72	102,4	0,02	3,51	0	0,02	0,01	30,7
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
23	0,03	5,08	0	0,04	6,78	0	0,01	2,38	0	0,04	5,8	0	0,07	9,72	286,8	0,03	5,26	0	0,03	0,01	-21,5
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
25	0,04	6,78	0	0,04	6,78	0	0,02	4,76	0	0,03	4,35	0	0,06	8,33	111,6	0,04	7,02	0	0,03	0,01	20,7
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
27	0,03	5,08	0	0,03	5,08	0	0,03	7,14	0	0,02	2,9	0	0,04	5,56	0	0,03	5,26	0	0,03	0,01	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
29	0,02	3,39	0	0,02	3,39	0	0,03	7,14	0	0	0	0	0,03	4,17	0	0,02	3,51	0	0,02	0,01	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
31	0,01	1,69	0	0,01	1,69	0	0,02	4,76	0	0,01	1,45	0	0,03	4,17	0	0,01	1,75	0	0,02	0,01	0
32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
33	0	0	0	0	0	0	0,02	4,76	0	0,01	1,45	0	0,03	4,17	0	0,01	1,75	0	0,01	0,01	0
34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
35	0,01	1,69	0	0,01	1,69	0	0,01	2,38	0	0,01	1,45	0	0,03	4,17	0	0,01	1,75	0	0,01	0,01	0
36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
37	0,01	1,69	0	0,01	1,69	0	0	0	0	0,01	1,45	0	0,03	4,17	0	0,01	1,75	0	0,01	0,01	0
38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
39	0,01	1,69	0	0,01	1,69	0	0	0	0	0	0	0	0,02	2,78	0	0,01	1,75	0	0,01	0,00	0
40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
41	0,01	1,69	0	0,01	1,69	0	0	0	0	0	0	0	0,02	2,78	0	0,01	1,75	0	0,01	0,00	0
42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
43	0,01	1,69	0	0,01	1,69	0	0	0	0	0	0	0	0,01	1,39	0	0,01	1,75	0	0,01	0,00	0
44	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,01	1,39	0	0	0	0	0,00	0,00	0
46	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
47	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,01	1,39	0	0	0	0	0,0017	0,00	0
48	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
49	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,01	1,39	0	0	0	0	0,0017	0,00	0
50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
DHTI	180,98%			175,51%			184,52%			157,48%			161,41%			179,19%			163,55%		

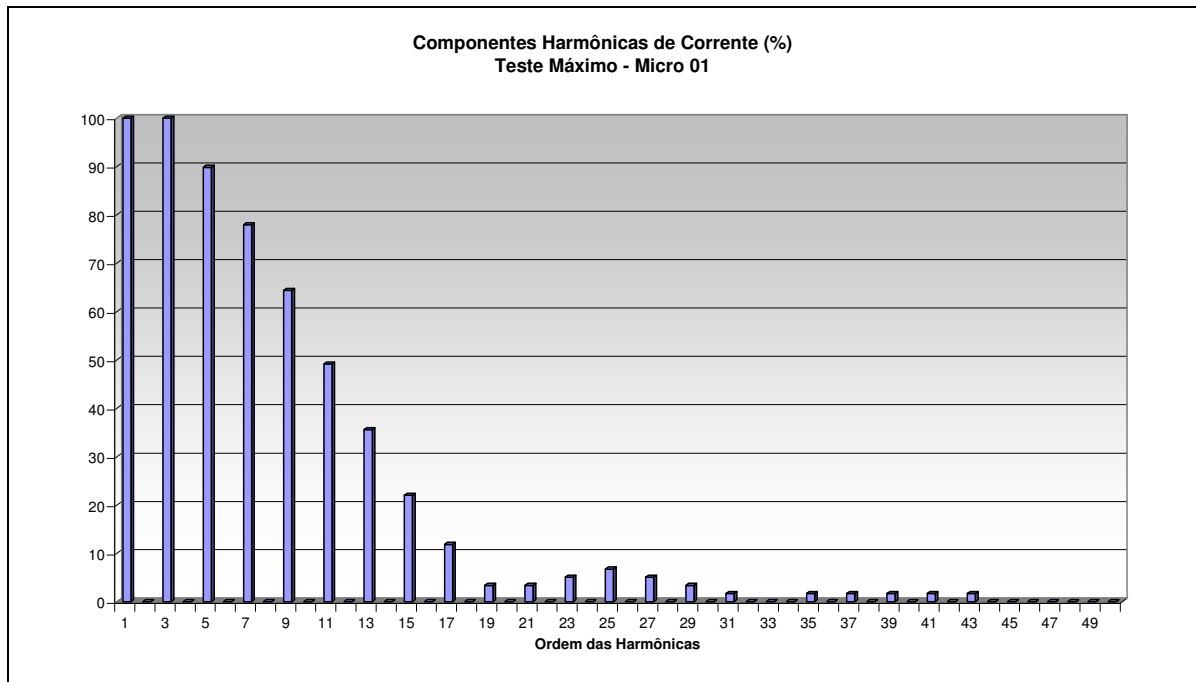


Figura B.13: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente no Micro 01 durante o Teste Máximo

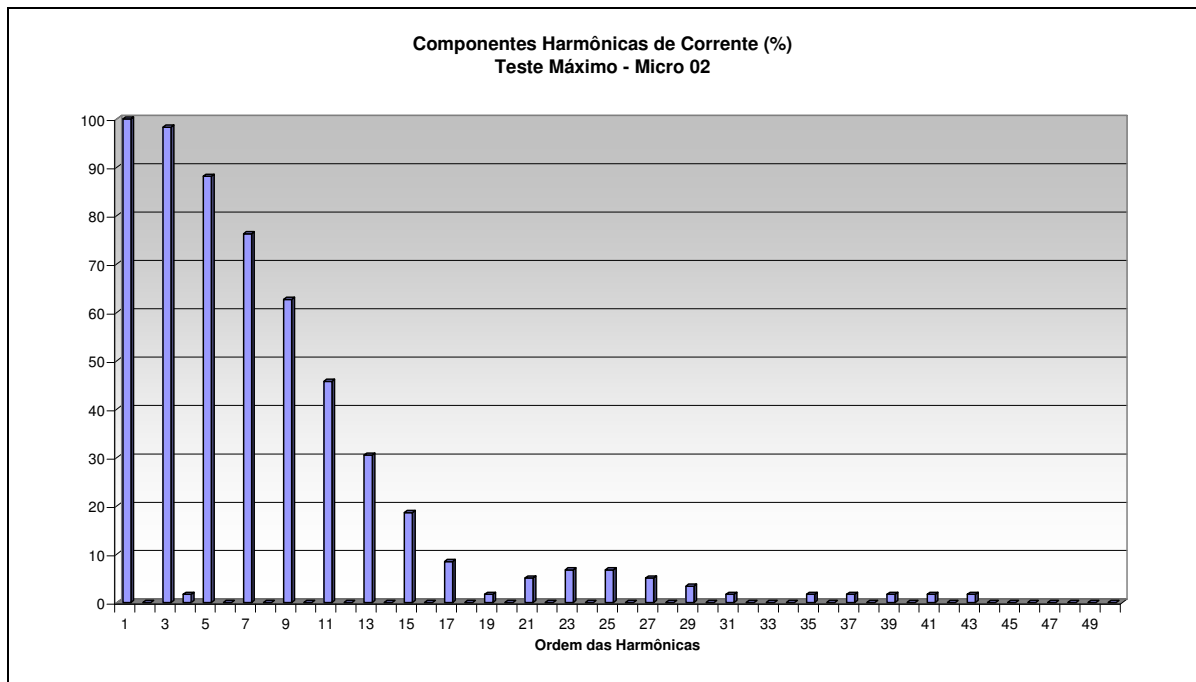


Figura B.14: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente no Micro 02 durante o Teste Máximo



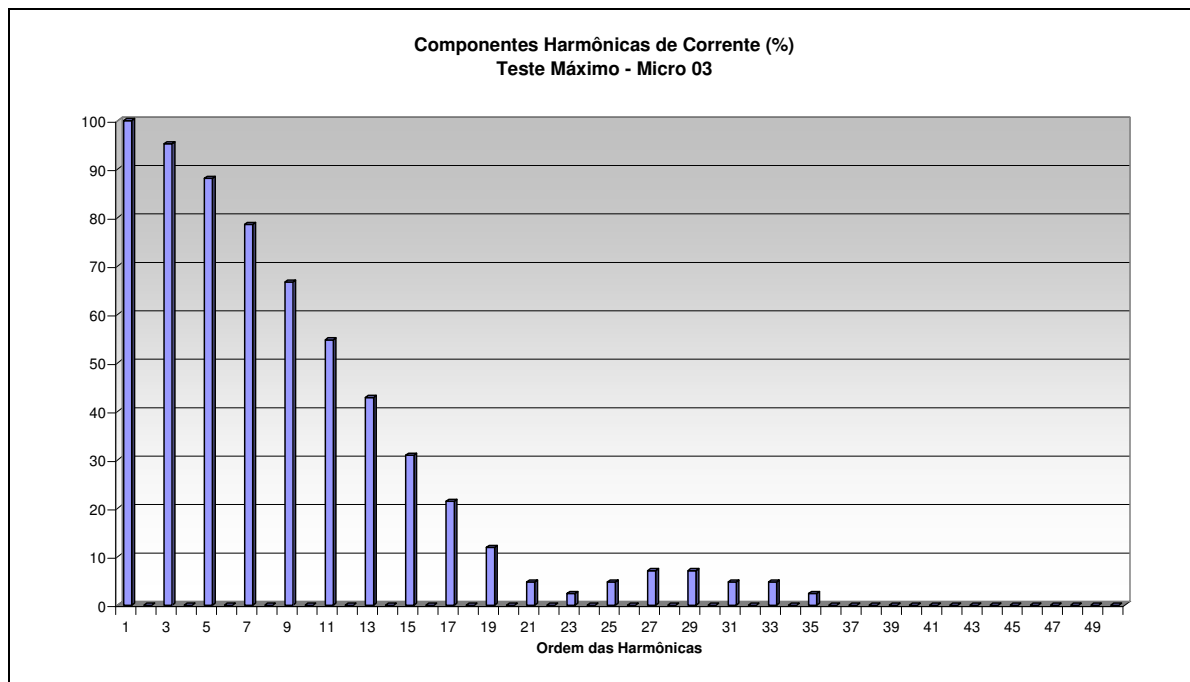


Figura B.15: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente no Micro 03 durante o Teste Máximo

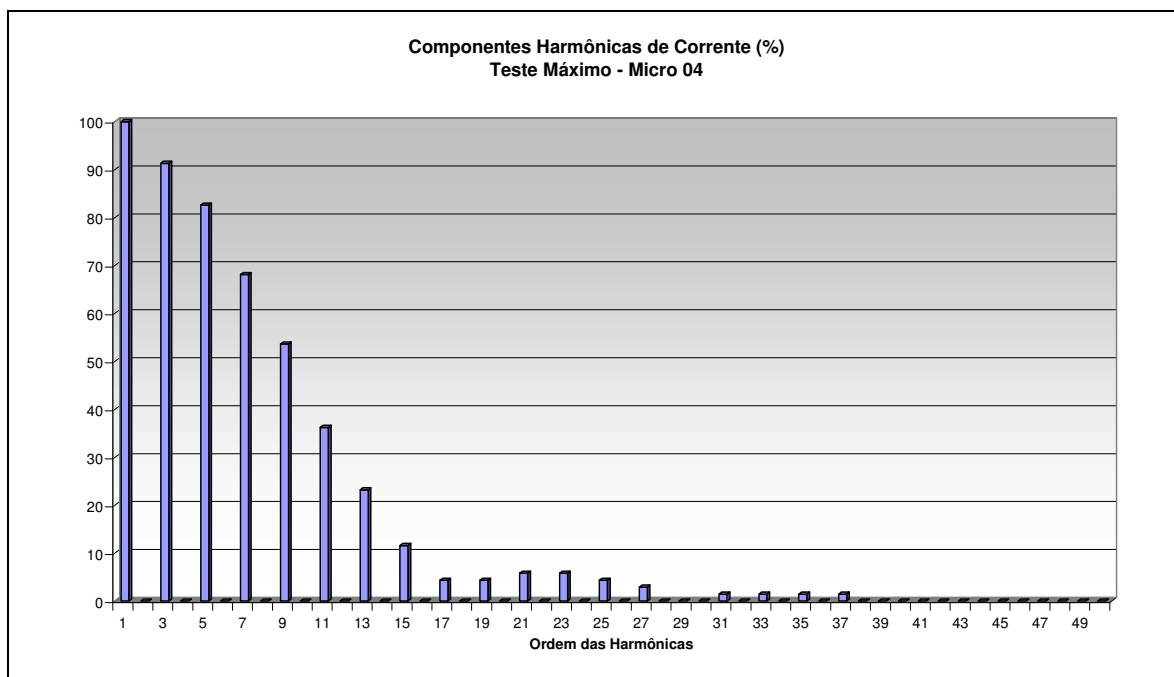


Figura B.16: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente no Micro 04 durante o Teste Máximo

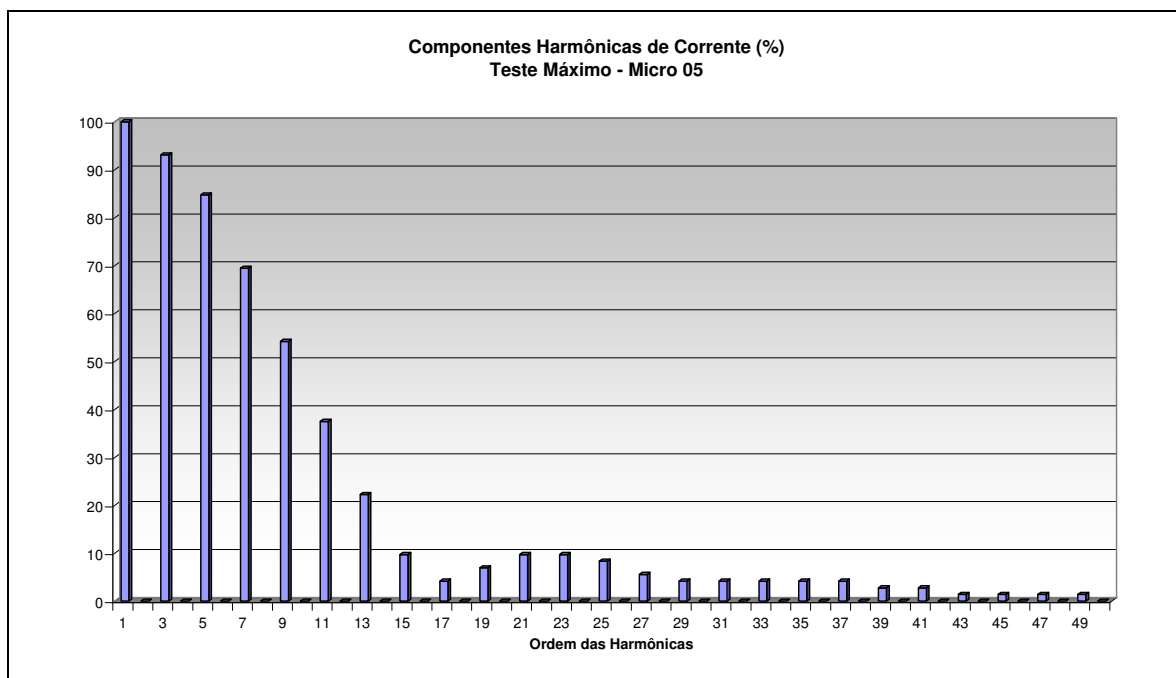


Figura B.17: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente no Micro 05 durante o Teste Máximo

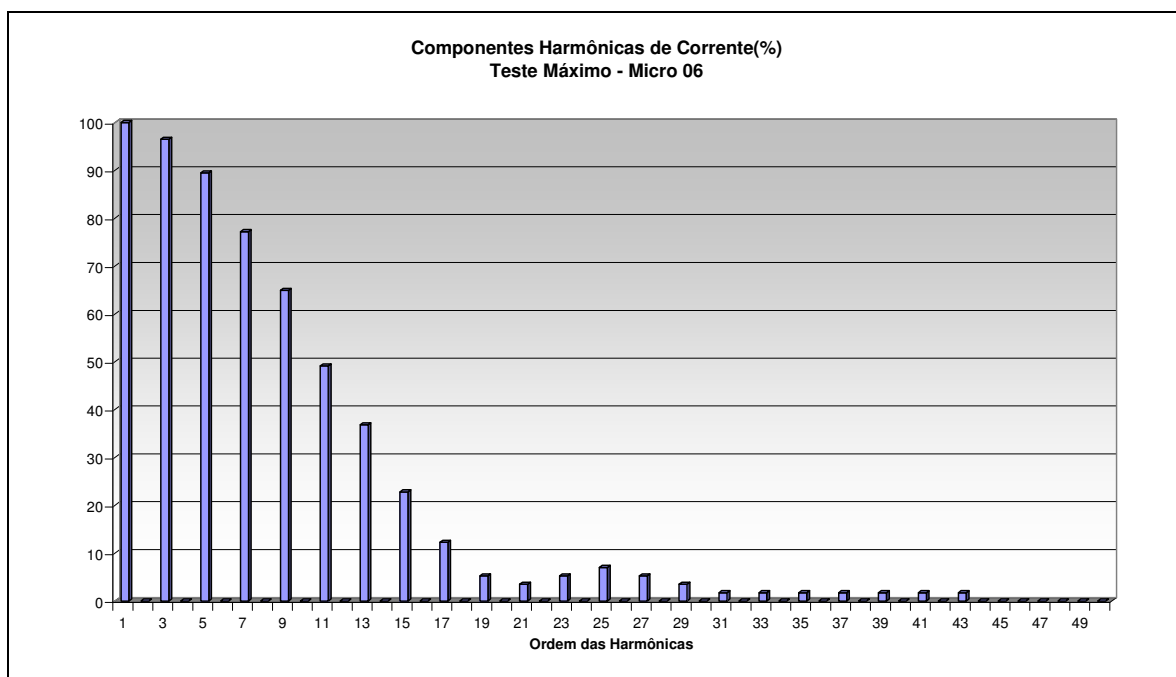


Figura B.18: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente no Micro 06 durante o Teste Máximo

Tabela B.4: Planilha das distorções harmônicas individuais produzidas pelos computadores durante o ensaio absurdo.

PLANILHAS DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS DE CORRENTE - ENSAIO ABSURDO																					
Harm.	MICRO 01			MICRO 02			MICRO 03			MICRO 04			MICRO 05			MICRO 06			MÉDIA		
	rms.	rel. (%)	Phase	rms.	rel. (%)	Phase	rms.	rel. (%)	Phase	rms.	rel. (%)	Phase	rms.	rel. (%)	Phase	rms.	rel. (%)	Phase	rms.	rel. (%)	Phase
Fund	0,52	100	6,8	0,6	100	8	0,5	100	3,4	0,68	100	11,7	0,71	100	9,2	0,62	100	7,4	0,60	100,00	8,02
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,01	1,41	0	0	0	0	0,0017	0,28	0
3	0,51	98,08	169,8	0,57	95	163,8	0,47	94	174,8	0,63	92,65	148,4	0,67	94,37	170,9	0,61	98,39	170	0,57	94,29	165,9
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,01	1,61	0	0,00	0,28	0
5	0,47	90,38	344,4	0,52	86,67	335,4	0,43	86	351,7	0,57	83,82	312,4	0,6	84,51	346	0,56	90,32	343,6	0,51	84,65	-21,6
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,01	1,41	0	0	0	0	0,00	0,28	0
7	0,41	78,85	157,4	0,44	73,33	143,6	0,38	76	167,7	0,47	69,12	108,8	0,5	70,42	160	0,47	75,81	156,6	0,42	69,46	148,9
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
9	0,34	65,38	331,9	0,36	60	314,7	0,32	64	344,6	0,37	54,41	271,9	0,39	54,93	336,1	0,39	62,9	331,6	0,33	54,81	-37,7
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
11	0,26	50	145,5	0,27	45	124,1	0,25	50	161,2	0,25	36,76	70,2	0,27	38,03	153,4	0,29	46,77	146,2	0,23	38,39	135,9
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
13	0,19	36,54	321,6	0,19	31,67	296,5	0,18	36	338,6	0,16	23,53	236,8	0,16	22,54	335,1	0,2	32,26	323	0,15	25,25	-47,5
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
15	0,12	23,08	139,1	0,11	18,33	110	0,12	24	157,4	0,08	11,76	48,4	0,08	11,27	168,7	0,12	19,35	143	0,09	14,35	133,8
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
17	0,06	11,54	321,9	0,05	8,33	0	0,07	14	339,8	0,03	4,41	0	0,05	7,04	0	0,06	9,68	334,1	0,05	8,53	-16,4
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
19	0,02	3,85	0	0,02	3,33	0	0,02	4	0	0,04	5,88	0	0,06	8,45	254,4	0,03	4,84	0	0,02	3,52	-26,91
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
21	0,02	3,85	0	0,03	5	0	0,01	2	0	0,04	5,88	0	0,07	9,86	86,9	0,04	6,45	0	0,03	4,41	25,9
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
23	0,03	5,77	0	0,04	6,67	0	0,02	4	0	0,04	5,88	0	0,07	9,86	272,6	0,04	6,45	0	0,03	5,15	-22,0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
25	0,04	7,69	0	0,04	6,67	0	0,03	6	0	0,03	4,41	0	0,05	7,04	0	0,04	6,45	0	0,04	6,34	0,0
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
27	0,03	5,77	0	0,04	6,67	0	0,03	6	0	0,01	1,47	0	0,04	5,63	0	0,03	4,84	0	0,03	4,96	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
29	0,02	3,85	0	0,02	3,33	0	0,02	4	0	0	0	0	0,03	4,23	0	0,02	3,23	0	0,02	3,03	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
31	0,01	1,92	0	0,01	1,67	0	0,01	2	0	0,01	1,47	0	0,03	4,23	0	0,01	1,61	0	0,01	2,21	0
32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
33	0,01	1,92	0	0	0	0	0	0	0	0,01	1,47	0	0,03	4,23	0	0,01	1,61	0	0,01	1,65	0
34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
35	0,01	1,92	0	0,01	1,67	0	0	0	0	0,01	1,47	0	0,03	4,23	0	0,02	3,23	0	0,01	2,21	0
36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
37	0,01	1,92	0	0,01	1,67	0	0	0	0	0,01	1,47	0	0,03	4,23	0	0,02	3,23	0	0,01	2,21	0
38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
39	0,02	3,85	0	0,01	1,67	0	0,01	2	0	0	0	0	0,02	2,82	0	0,02	3,23	0	0,01	2,21	0
40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
41	0,01	1,92	0	0,01	1,67	0	0,01	2	0	0	0	0	0,02	2,82	0	0,01	1,61	0	0,01	1,65	0
42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
43	0,01	1,92	0	0	0	0	0,01	2	0	0	0	0	0,01	1,41	0	0,01	1,61	0	0,01	1,10	0
44	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
45	0,01	1,92	0	0	0	0	0	0	0	0,01	1,47	0	0,01	1,41	0	0,01	1,61	0	0,01	1,10	0
46	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
47	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,01	1,41	0	0,01	1,61	0	0,0033	0,55	0
48	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
49	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,01	1,41	0	0,01	1,61	0	0,0033	0,55	0
50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
DHTI	181,64%			170,71%			175,53%			159,83%			163,15%			177,40%			162,59%		

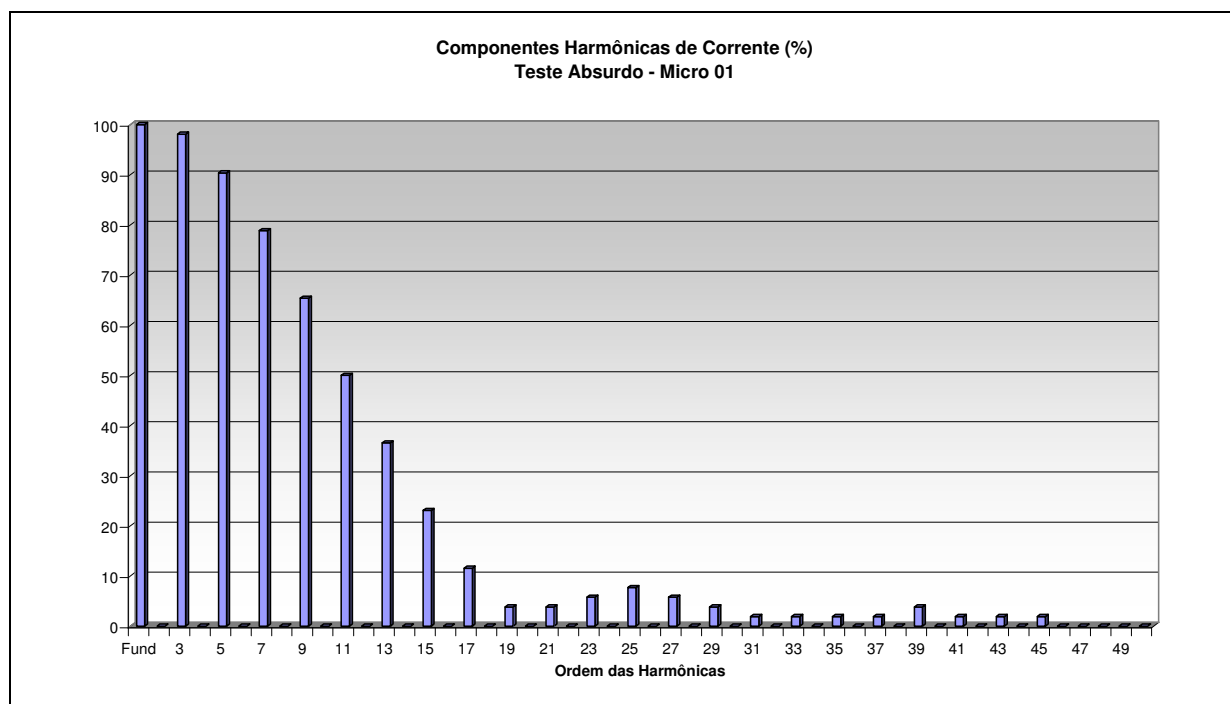


Figura B.19: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente no Micro 01 durante o Teste Absurdo

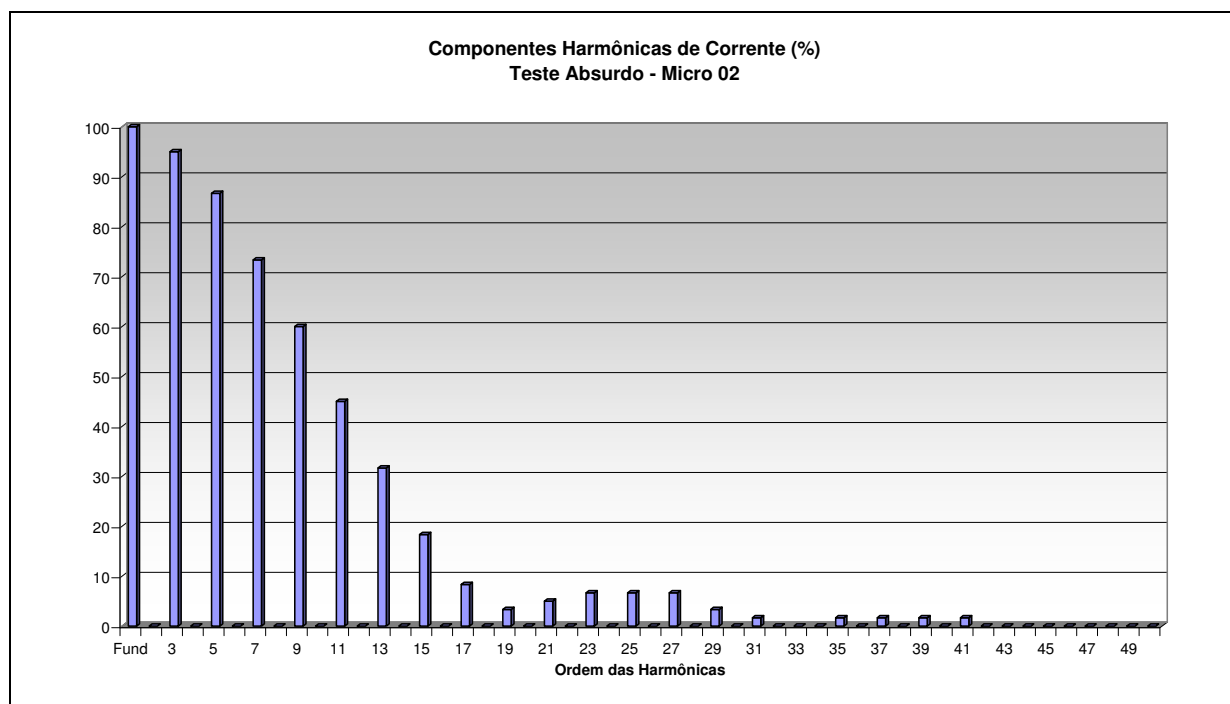


Figura B.20: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente no Micro 02 durante o Teste Absurdo

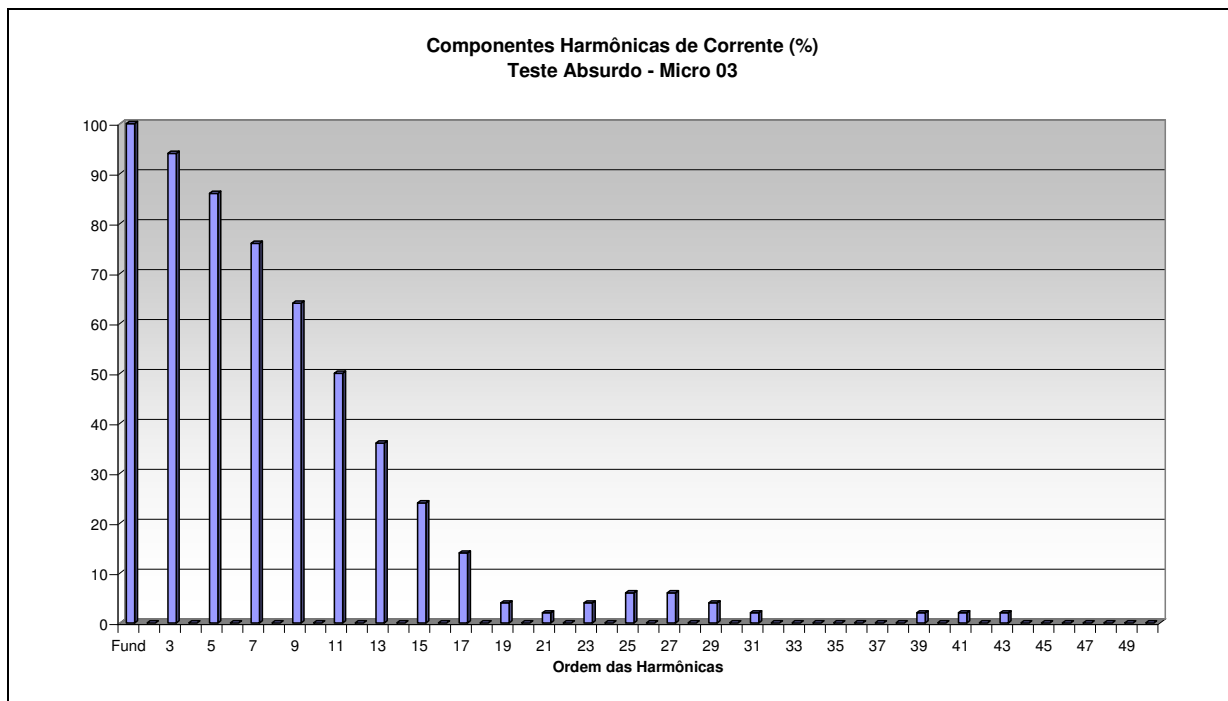


Figura B.21: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente no Micro 03 durante o Teste Absurdo

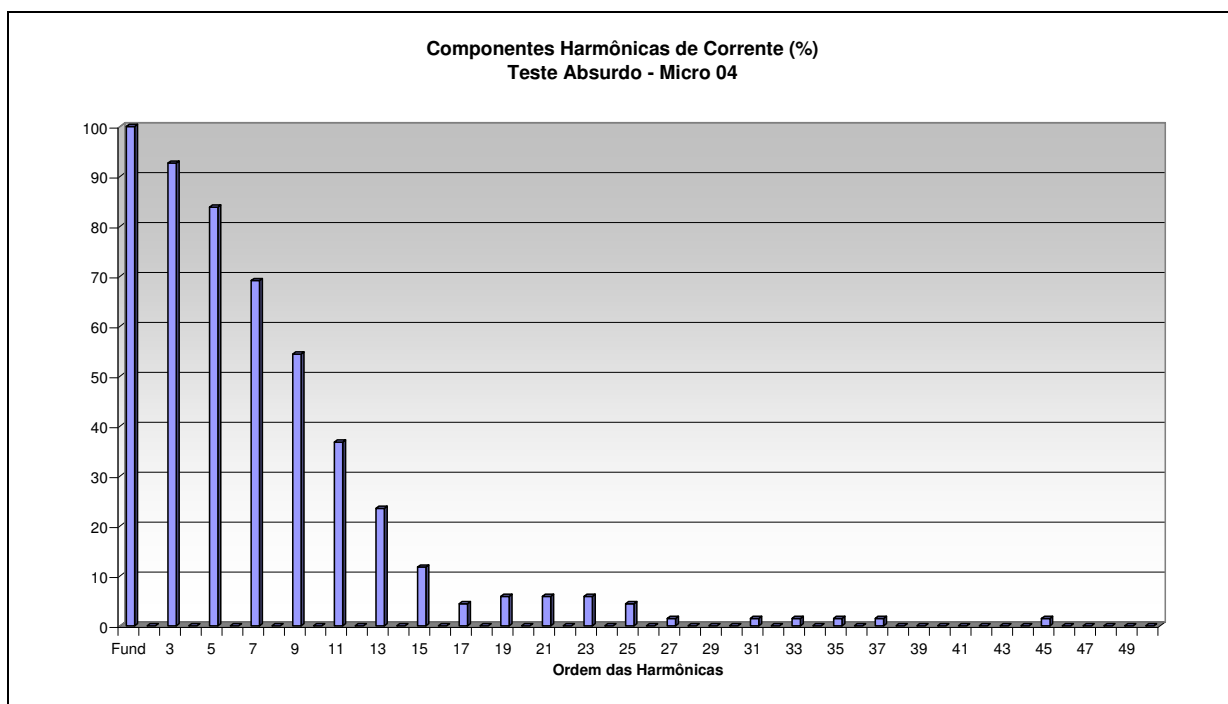


Figura B.22: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente no Micro 04 durante o Teste Absurdo

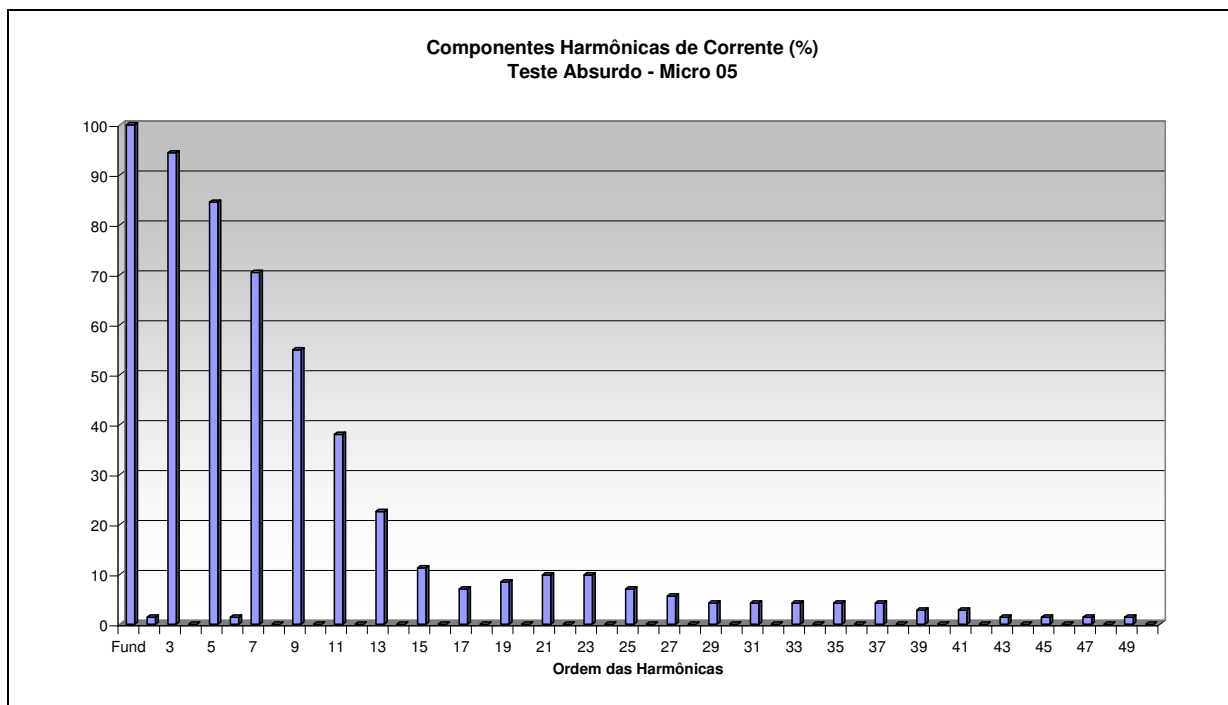


Figura B.23: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente no Micro 05 durante o Teste Absurdo

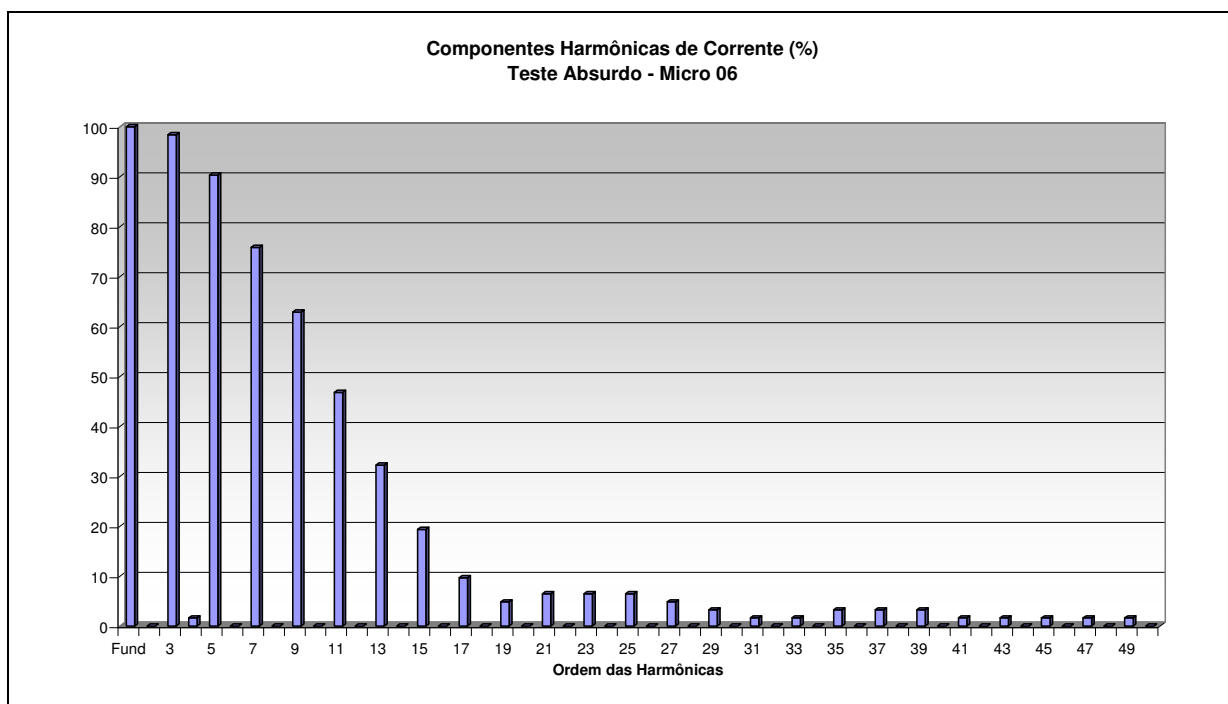


Figura B.24: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente no Micro 06 durante o Teste Absurdo

Tabela B.5: Planilha das distorções harmônicas individuais produzidas pelos computadores 1, 2 e 3 conectados na mesma fase em cada um dos ensaios.

PLANILHAS DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS DE CORRENTE - MICROS 1, 2 e 3 EM SÉRIE																															
Harm.	SENODIAL			MÉDIO			MÁXIMO			ABSURDO			TESTE 01			TESTE 02			TESTE 03			TESTE 04			TESTE 05			TESTE 06			
	rms.	rel. (%)	Phase	rms.	rel. (%)	Phase	rms.	rel. (%)	Phase	rms.	rel. (%)	Phase	rms.	rel. (%)	Phase	rms.	rel. (%)	Phase	rms.	rel. (%)	Phase	rms.	rel. (%)	Phase	rms.	rel. (%)	Phase	rms.	rel. (%)	Phase	
Fund	1,79	100	5,7	1,68	100	4,8	1,68	100	4,8	1,67	100	4,9	1,74	100	7,2	1,55	100	4	1,6	100	6,4	1,6	100	6,4	1,63	100	4,6	1,63	100	4,6	
2	0,01	0,56	0	0,01	0,6	0	0,01	0,6	0	0	0	0	0,01	0,57	0	0,01	0,65	0	0,02	1,25	0	0,02	1,25	0	0,01	0,61	0	0,01	0,61	0	
3	1,66	92,74	171,8	1,59	94,64	170,8	1,58	94,05	171	1,57	94,01	170,7	1,58	90,8	171,3	1,48	95,48	170,1	1,46	91,25	169,9	1,46	91,25	169,9	1,53	93,87	169,5	1,53	93,87	169,5	
4	0,01	0,56	0	0,01	0,6	0	0,01	0,6	0	0,01	0,6	0	0,02	1,15	0	0,01	0,65	0	0,02	1,25	0	0,02	1,25	0	0,02	1,23	0	0,02	1,23	0	
5	1,45	81,01	346,3	1,43	85,12	345,3	1,43	85,12	345,9	1,42	85,03	345,7	1,31	75,29	345,7	1,38	89,03	343,8	1,27	79,37	342,3	1,27	79,37	342,3	1,4	85,89	343,7	1,4	85,89	343,7	
6	0,01	0,56	0	0,01	0,6	0	0,01	0,6	0	0	0	0	0,02	1,15	0	0,01	0,65	0	0,01	0,62	0	0,01	0,62	0	0,02	1,23	0	0,02	1,23	0	
7	1,18	65,92	160,4	1,22	72,62	158,2	1,21	72,02	158,9	1,2	71,86	158,6	0,98	56,32	159,4	1,23	79,35	156,3	1,02	63,75	155	1,02	63,75	155	1,22	74,85	156	1,22	74,85	156	
8	0,01	0,56	0	0,01	0,6	0	0,01	0,6	0	0	0	0	0,01	0,57	0	0,01	0,65	0	0,01	0,62	0	0,01	0,62	0	0,02	1,23	0	0,02	1,23	0	
9	0,88	49,16	334,1	0,98	58,33	331,6	0,97	57,74	333,1	0,96	57,49	332,6	0,63	36,21	332,5	1,05	67,74	329,4	0,75	46,88	327,9	0,75	46,88	327,9	1,01	61,96	328,1	1,01	61,96	328,1	
10	0,01	0,56	0	0,01	0,6	0	0,01	0,6	0	0	0	0	0,01	0,57	0	0,01	0,65	0	0,01	0,62	0	0,01	0,62	0	0,02	1,23	0	0,02	1,23	0	
11	0,59	32,96	147,7	0,73	43,45	144	0,71	42,26	145,8	0,7	41,92	145,2	0,33	18,97	142,9	0,86	55,48	142	0,48	30	139,9	0,48	30	139,9	0,79	48,47	140,2	0,79	48,47	140,2	
12	0	0	0	0,01	0,6	0	0,01	0,6	0	0	0	0	0	0	0	0,01	0,65	0	0	0	0	0	0	0	0,01	0,61	0	0,01	0,61	0	
13	0,33	18,44	320	0,49	29,17	315,7	0,47	27,98	319,1	0,46	27,54	318,6	0,11	6,32	299,6	0,66	42,58	314,2	0,25	15,62	310,1	0,25	15,62	310,1	0,57	34,97	311,4	0,57	34,97	311,4	
14	0	0	0	0,01	0,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,01	0,65	0	0	0	0	0	0	0	0,01	0,61	0	0,01	0,61	0	
15	0,13	7,26	126,9	0,28	16,67	124,2	0,26	15,48	130,8	0,26	15,57	130,6	0,05	2,87	0	0,47	30,32	125,5	0,08	5	112,2	0,08	5	112,2	0,38	23,31	120,8	0,38	23,31	120,8	
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,01	0,6	0	0	0	0	0,01	0,65	0	0	0	0	0	0	0	0,01	0,61	0	0,01	0,61	0	
17	0,02	1,12	0	0,13	7,74	283,3	0,1	5,95	296,3	0,1	5,99	297,1	0,09	5,17	156	0,31	20	295	0,03	1,88	0	0,03	1,88	0	0,21	12,88	285,8	0,21	12,88	285,8	
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,01	0,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
19	0,07	3,91	322,6	0,05	2,98	0	0,02	1,19	0	0,02	1,2	0	0,07	4,02	325,2	0,17	10,97	100,9	0,07	4,38	306,4	0,07	4,38	306,4	0,1	6,13	78	0,1	6,13	78	
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
21	0,09	5,03	130,1	0,07	4,17	159,2	0,06	3,57	132,2	0,07	4,19	128,3	0,02	1,15	0	0,07	4,52	252	0,08	5	115	0,08	5	115	0,06	3,68	197,3	0,06	3,68	197,3	
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
23	0,07	3,91	300,2	0,08	4,76	316,4	0,08	4,76	299,5	0,08	4,79	295,3	0,02	1,15	0	0,04	2,58	0	0,05	3,12	0	0,05	3,12	0	0,07	4,29	329,1	0,07	4,29	329,1	
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
25	0,03	1,68	0	0,06	3,57	122,7	0,07	4,17	109,3	0,07	4,19	106,2	0,05	2,87	0	0,06	3,87	135,1	0,01	0,62	0	0,01	0,62	0	0,07	4,29	126,7	0,07	4,29	126,7	
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
27	0	0	0	0,03	1,79	0	0,03	1,79	0	0,04	2,4	0	0,06	3,45	125,5	0,07	4,52	296,3	0,02	1,25	0	0,02	1,25	0	0,05	3,07	0	0,05	3,07	0	
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
29	0,03	1,68	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,04	2,3	0	0,06	3,87	102,6	0,04	2,5	0	0,04	2,5	0	0,03	1,84	0	0,03	1,84	0	
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
31	0,04	2,23	0	0,02	1,19	0	0,02	1,19	0	0,02	1,2	0	0,02	1,15	0	0,04	2,58	0	0,05	3,12	0	0,05	3,12	0	0	0	0	0	0	0	0
32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
33	0,04	2,23	0	0,04	2,38	0	0,04	2,38	0	0,04	2,4	0	0,01	0,57	0	0,01	0,65	0	0,03	1,88	0	0,03	1,88	0	0,02	1,23	0	0,02	1,23	0	
34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
35	0,03	1,68	0	0,05	2,98	0	0,05	2,98	0	0,05	2,99	0	0,02	1,15	0	0	0	0	0,01	0,62	0	0,01	0,62	0	0,03	1,84	0	0,03	1,84	0	
36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
37	0,01	0,56	0	0,04	2,38	0	0,04	2,38	0	0,04	2,4	0	0,03	1,72	0	0,02	1,29	0	0	0	0	0	0	0	0,04	2,45	0	0,04	2,45	0	
38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
39	0	0	0	0,03	1,79	0	0,03	1,79	0	0,03	1,8	0	0,02	1,15	0	0,03	1,94	0	0,01	0,62	0	0,01	0,62	0	0,04	2,45	0	0,04	2,45	0	
40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
41	0,01	0,56	0	0,01	0,6	0	0,01	0,6	0	0,01	0,6	0	0,01	0,57	0	0,04	2,58	0	0,02	1,25	0	0,02	1,25	0	0,03	1,84	0	0,03	1,84	0	
42	0	0	0	0	0</																										

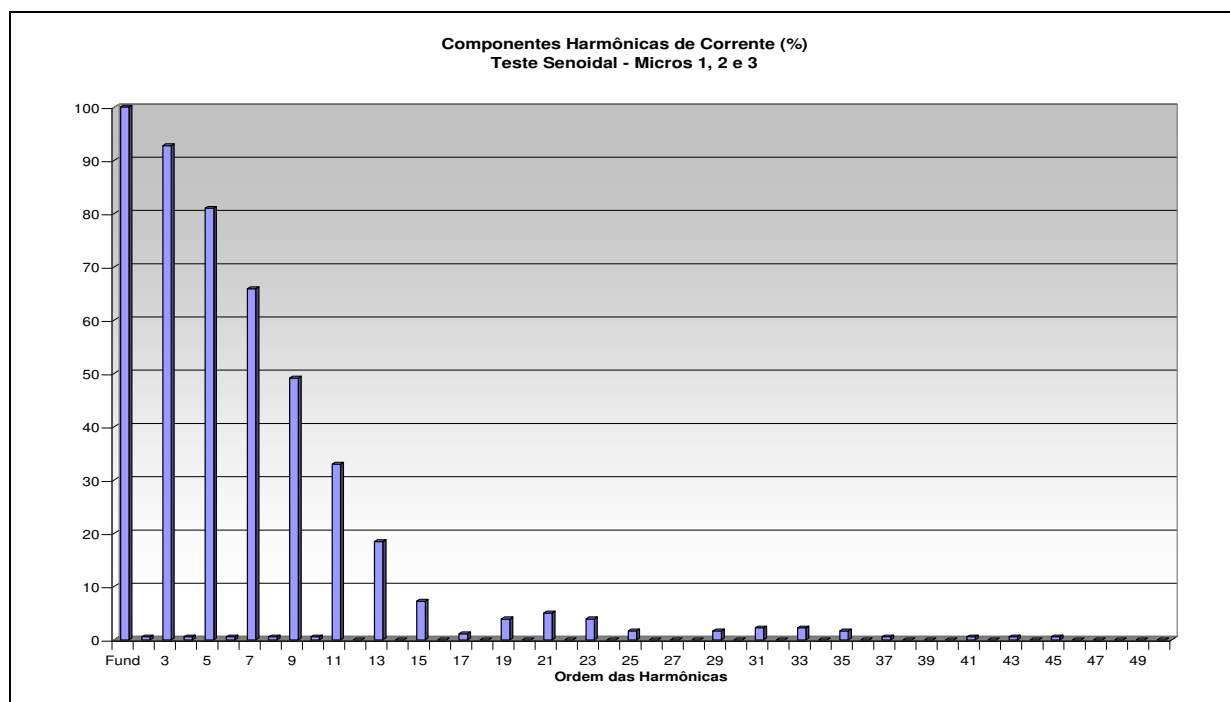


Figura B.25: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente nos Micros 1, 2 e 3 durante o Teste Senoidal

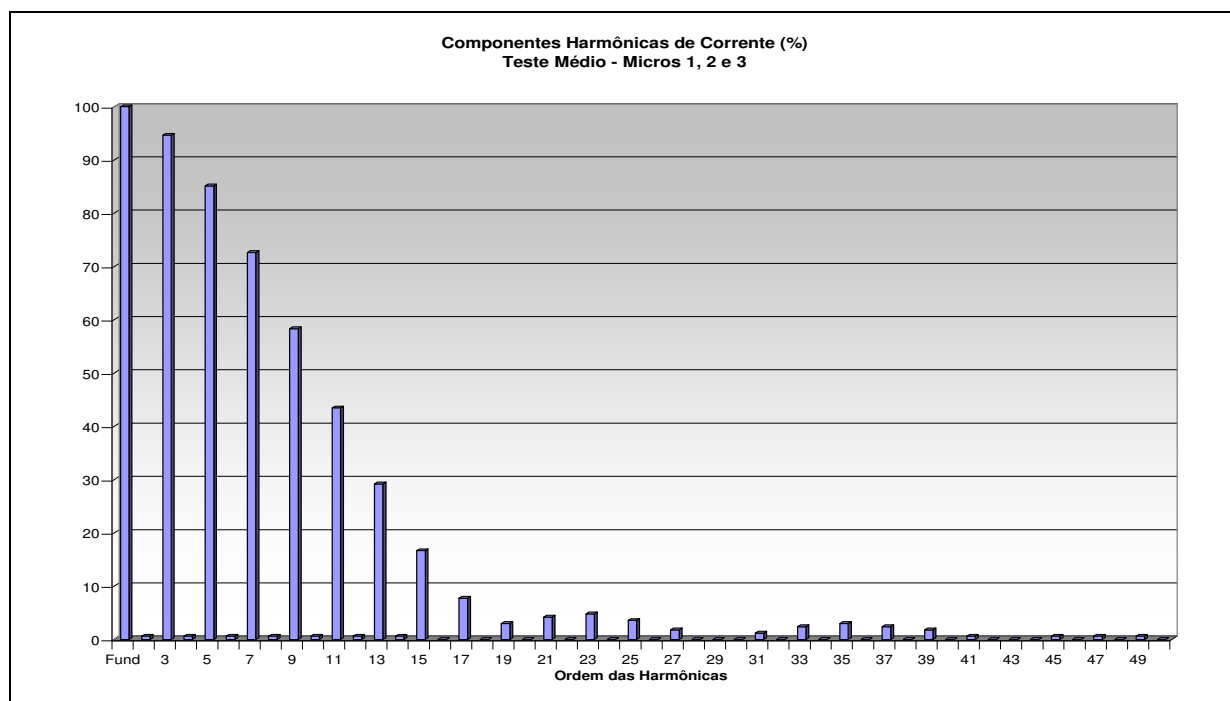


Figura B.26: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente nos Micros 1, 2 e 3 durante o Teste Médio



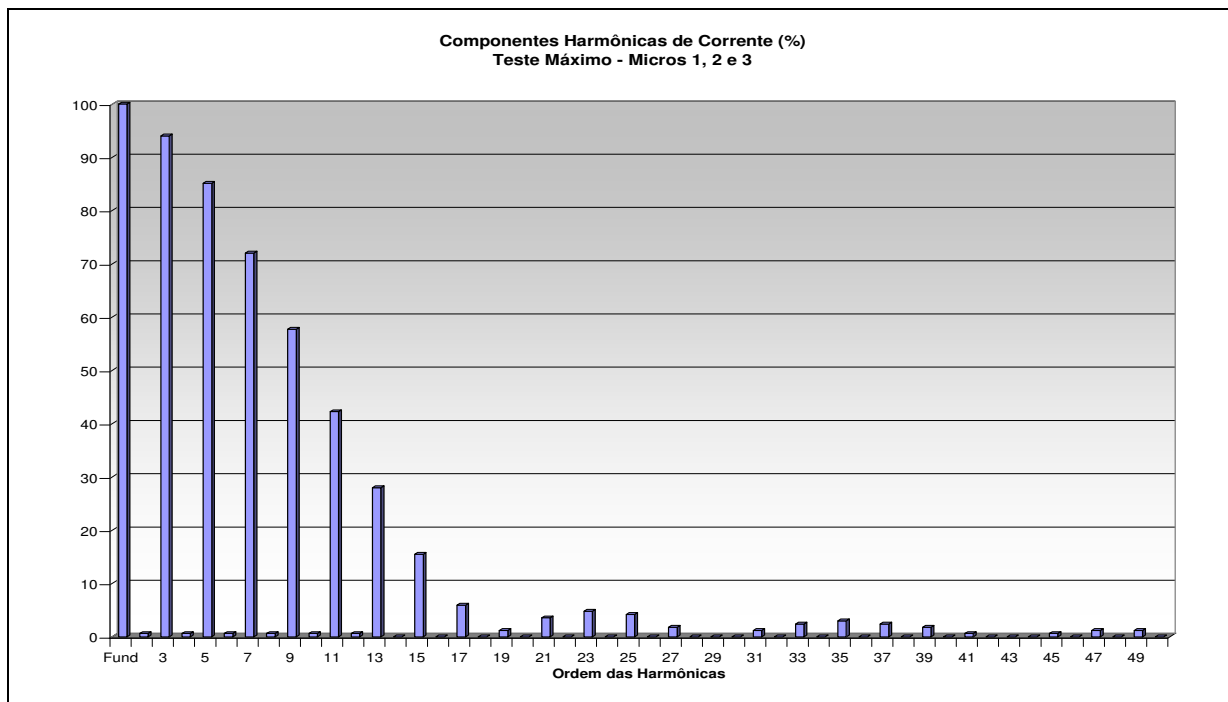


Figura B.27: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente nos Micros 1, 2 e 3 durante o Teste Máximo

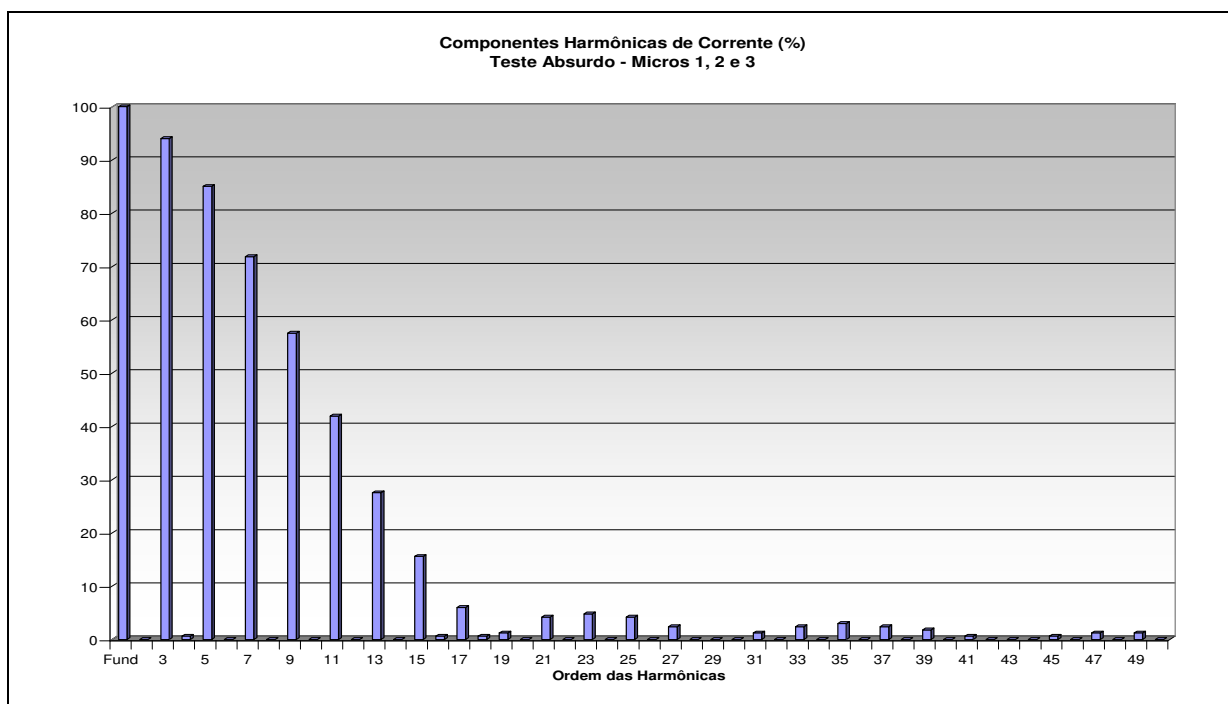


Figura B.28: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente nos Micros 1, 2 e 3 durante o Teste Absurdo

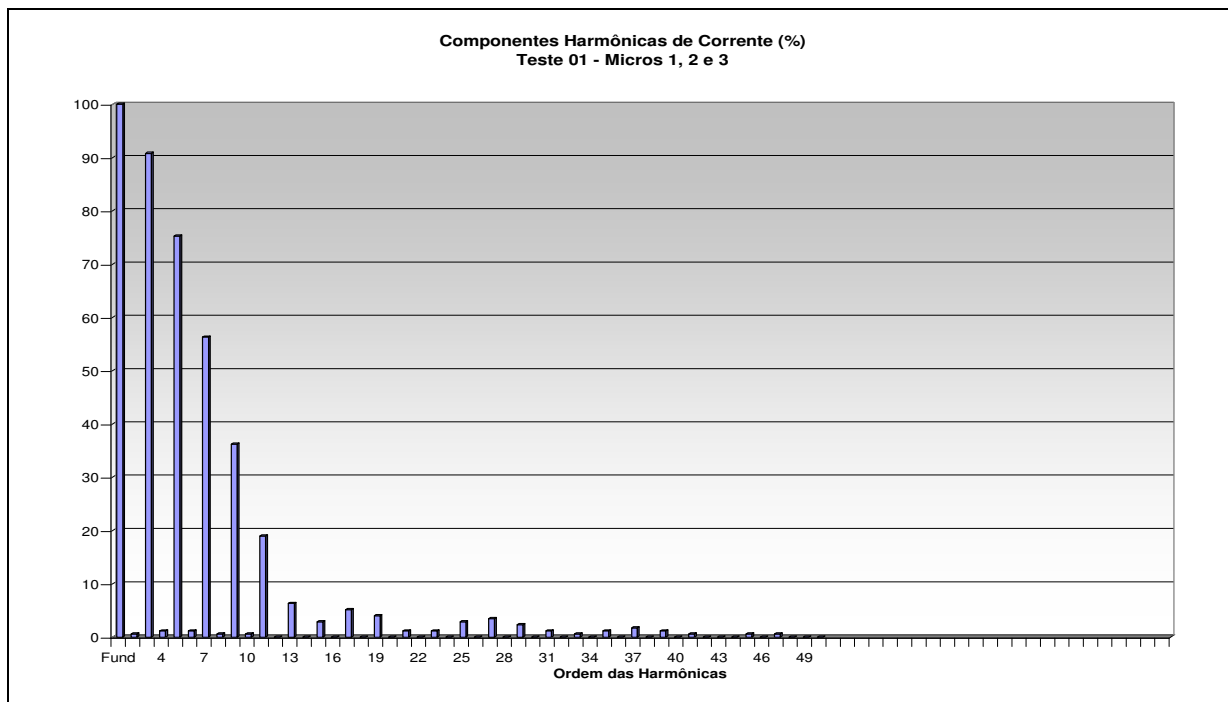


Figura B.29: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente nos Micros 1, 2 e 3 durante o Teste 01

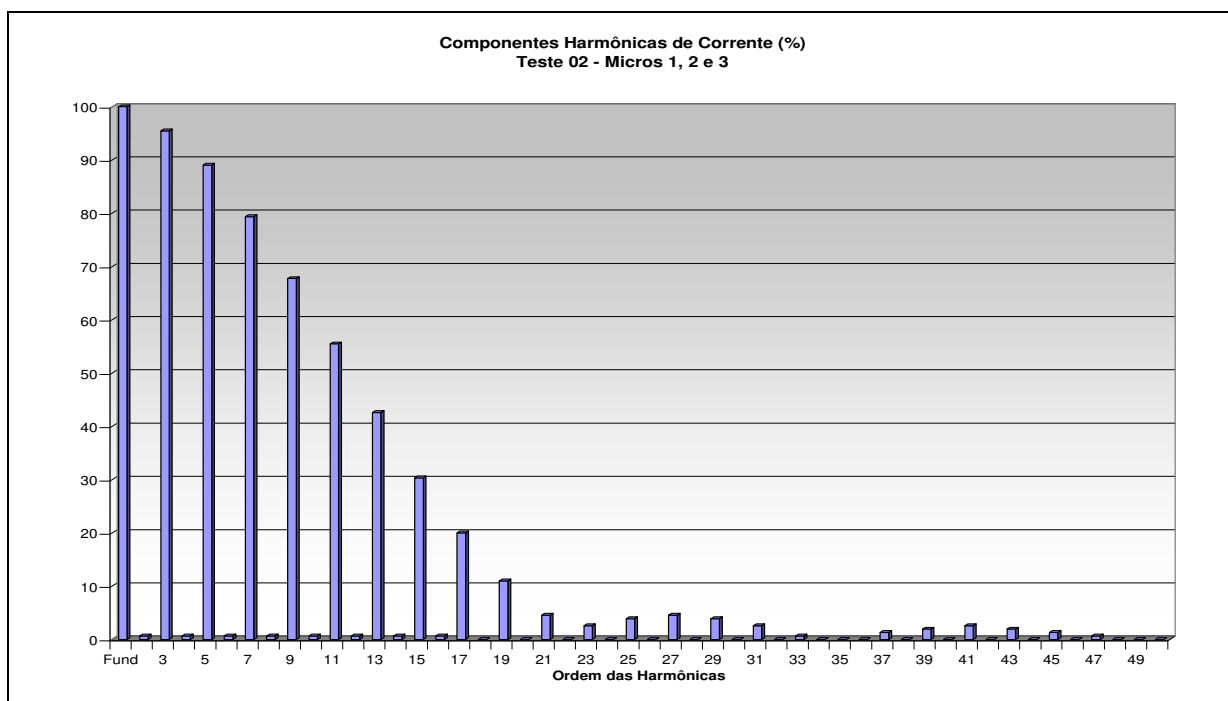


Figura B.30: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente nos Micros 1, 2 e 3 durante o Teste 02

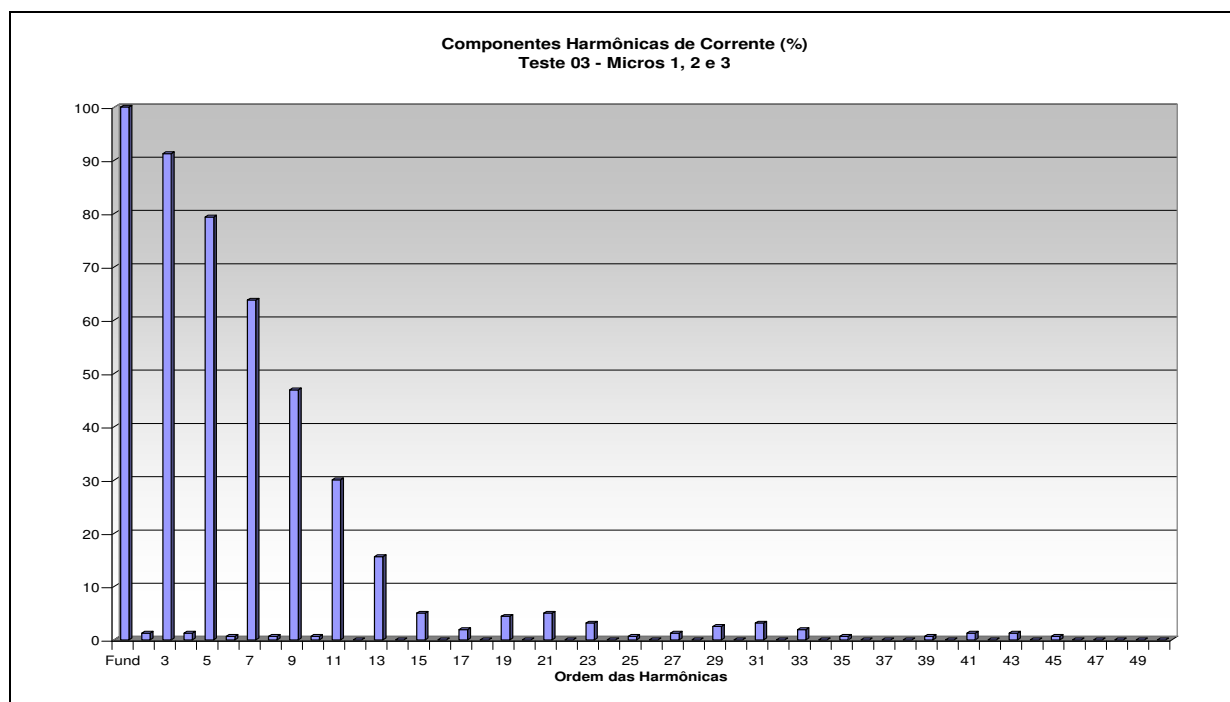


Figura B.31: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente nos Micros 1, 2 e 3 durante o Teste 03

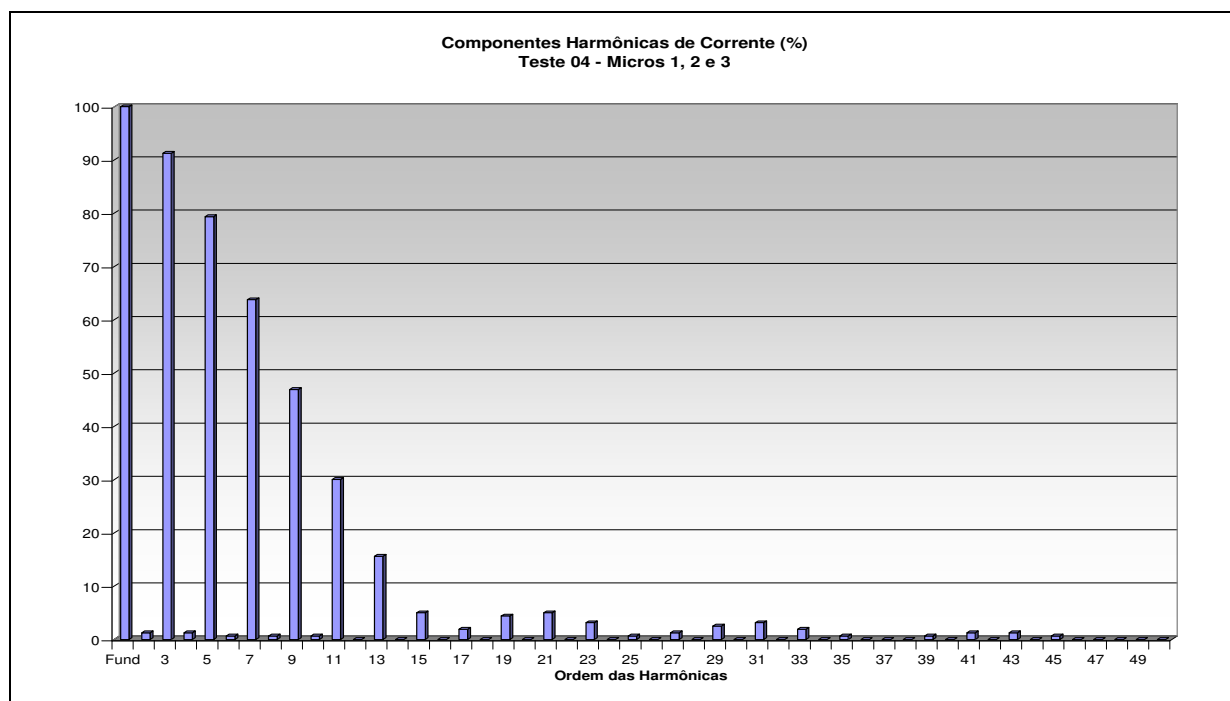


Figura B.32: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente nos Micros 1, 2 e 3 durante o Teste 04

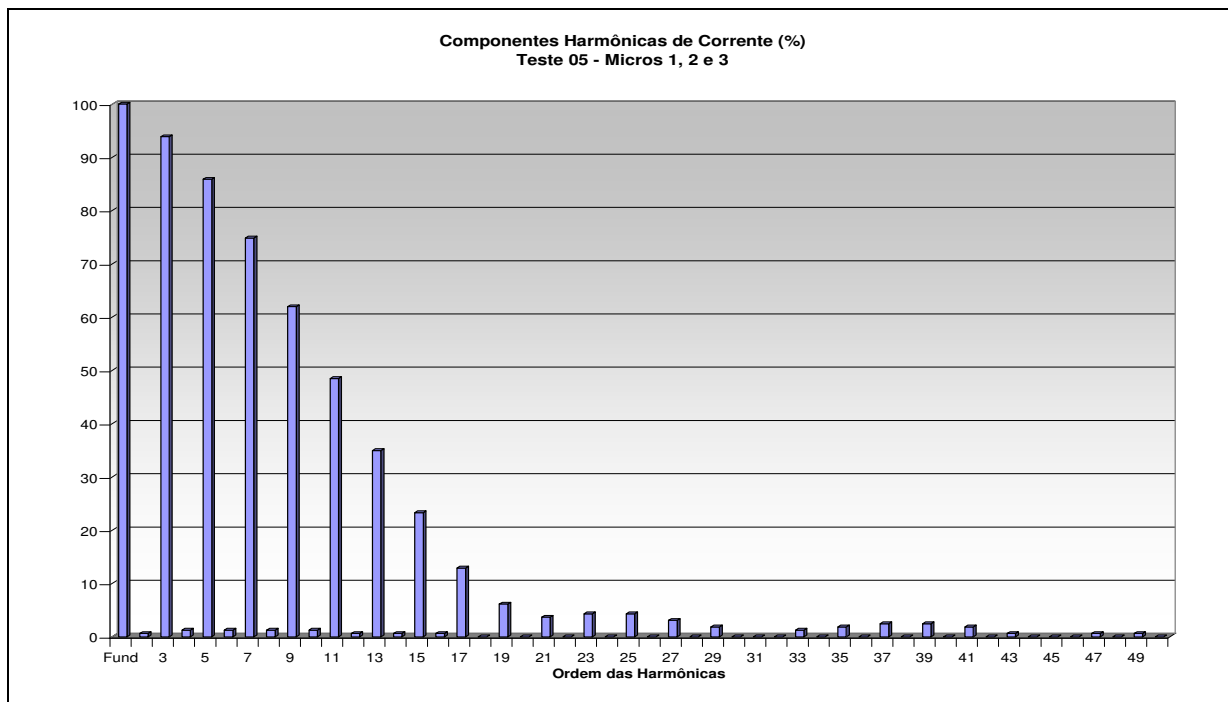


Figura B.33: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente nos Micros 1, 2 e 3 durante o Teste 05

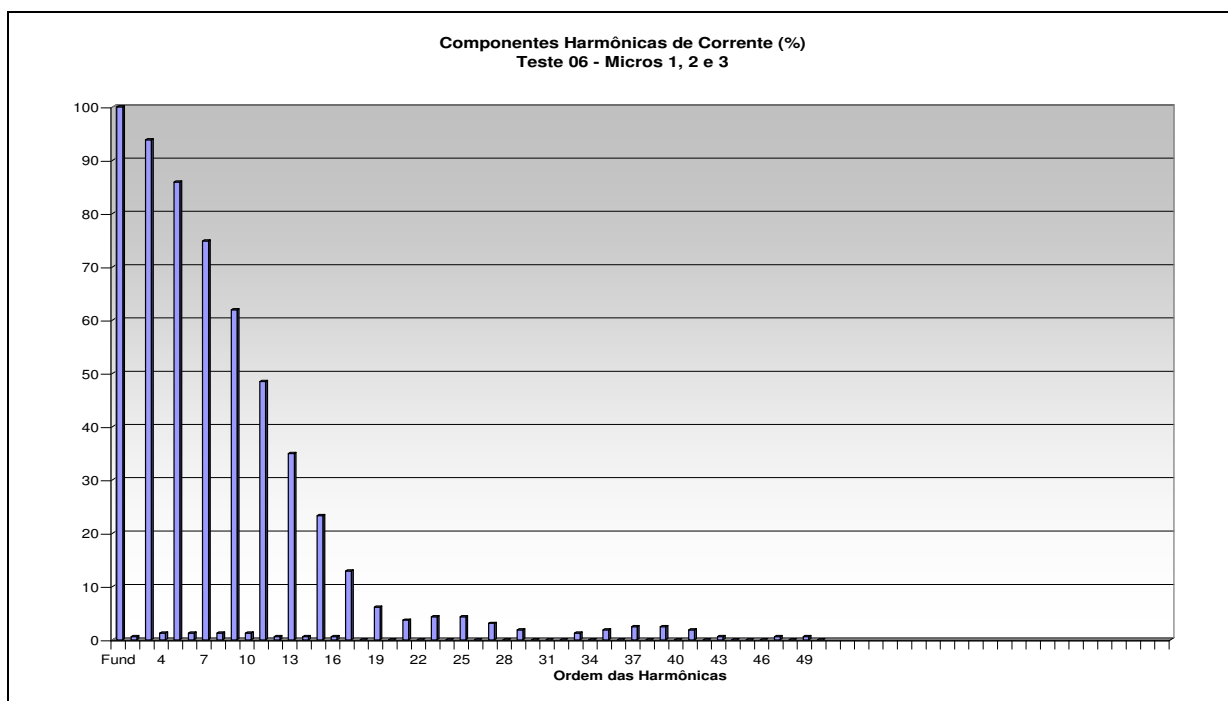


Figura B.34: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente nos Micros 1, 2 e 3 durante o Teste 06

Tabela B.6: Planilha das distorções harmônicas individuais produzidas pelos computadores 4, 5 e 6 conectados em série em cada um dos ensaios.

PLANILHAS DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS DE CORRENTE - MICROS 4, 5 e 6 EM SÉRIE																														
Harm.	SENOIDAL			MÉDIO			MÁXIMO			ABSURDO			TESTE 01			TESTE 02			TESTE 03			TESTE 04			TESTE 05			TESTE 06		
	rms.	rel. (%)	Phase	rms.	rel. (%)	Phase	rms.	rel. (%)	Phase	rms.	rel. (%)	Phase	rms.	rel. (%)	Phase	rms.	rel. (%)	Phase	rms.	rel. (%)	Phase	rms.	rel. (%)	Phase	rms.	rel. (%)	Phase	rms.	rel. (%)	Phase
Fund	2,02	100	9,6	2,03	100	8,6	2,01	100	8,6	2,06	100	8,7	2,11	100	11,1	1,98	100	7,6	2,02	100	10,2	2,04	100	9,1	2,05	100	8,2	2,07	100	10,4
2	0,01	0,5	0	0,01	0,49	0	0,01	0,5	0	0,01	0,49	0	0,03	1,42	0	0,01	0,51	0	0,02	0,99	0	0,01	0,49	0	0	0	0	0	0	0
3	1,83	90,59	163,1	1,86	91,63	162,3	1,85	92,04	162,4	1,88	91,26	162	1,83	86,73	163,1	1,84	92,93	162,6	1,8	89,11	162,9	1,83	89,71	162,8	1,88	91,71	162,6	1,83	88,41	163,2
4	0,01	0,5	0	0,02	0,99	0	0,01	0,5	0	0	0	0	0,02	0,95	0	0,01	0,51	0	0,02	0,99	0	0,02	0,98	0	0,01	0,49	0	0	0	0
5	1,55	76,73	331,5	1,66	81,77	332,2	1,65	82,09	333	1,67	81,07	332,4	1,46	69,19	332,5	1,67	84,34	332,2	1,5	74,26	331,4	1,57	76,96	331	1,67	81,46	332,5	1,49	71,98	332,4
6	0,01	0,5	0	0,02	0,99	0	0,01	0,5	0	0,01	0,49	0	0,01	0,47	0	0,01	0,51	0	0,02	0,99	0	0,01	0,49	0	0	0	0	0	0	0
7	1,19	58,91	139,9	1,35	66,5	139,2	1,33	66,17	140,1	1,35	65,53	139,2	1	47,39	141,4	1,43	72,22	139	1,11	54,95	139,8	1,26	61,76	138,8	1,39	67,8	139,6	1,06	51,21	140
8	0,01	0,5	0	0,02	0,99	0	0,02	1	0	0,01	0,49	0	0,01	0,47	0	0,01	0,51	0	0,01	0,5	0	0,01	0,49	0	0,01	0,49	0	0	0	0
9	0,8	39,6	307,9	1,03	50,74	307,7	1,01	50,25	310	1,03	50	308,9	0,55	26,07	310,5	1,16	58,59	306,8	0,71	35,15	308,5	0,91	44,61	306,7	1,07	52,2	307,9	0,64	30,92	306,1
10	0,01	0,5	0	0,02	0,99	0	0,02	1	0	0,01	0,49	0	0,01	0,47	0	0,02	1,01	0	0,01	0,5	0	0	0	0,01	0,49	0	0	0	0	0
11	0,46	22,77	115,1	0,69	33,99	114,6	0,67	33,33	117,6	0,67	32,52	116,8	0,19	9	118,3	0,88	44,44	114,6	0,36	17,82	118	0,57	27,94	112,1	0,76	37,07	115,4	0,29	14,01	103,3
12	0	0	0	0,02	0,99	0	0,02	1	0	0,01	0,49	0	0	0	0	0,01	0,51	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0,18	8,91	278,5	0,4	19,7	281,7	0,38	18,91	288,6	0,39	18,93	288,3	0,03	1,42	0	0,61	30,81	281,7	0,1	4,95	290,5	0,29	14,22	273,6	0,47	22,93	281,4	0,1	4,83	219,3
14	0	0	0	0,01	0,49	0	0,01	0,5	0	0,01	0,49	0	0	0	0	0,01	0,51	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0,02	0,99	0	0,17	8,37	86,1	0,16	7,96	101,5	0,16	7,77	105,4	0,13	6,16	281,7	0,37	18,69	87,4	0,06	2,97	266,7	0,1	4,9	57,4	0,23	11,22	84	0,13	6,28	324,1
16	0	0	0	0	0	0	0,01	0,5	0	0,01	0,49	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0,1	4,95	96,9	0,02	0,99	0	0,02	1	0	0,03	1,46	0	0,12	5,69	92,9	0,18	9,09	249	0,12	5,94	80	0,07	3,43	136,4	0,07	3,41	226	0,14	6,76	118,7
18	0	0	0	0	0	0	0,01	0,5	0	0,01	0,49	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0,11	5,45	262,1	0,07	3,45	265,1	0,08	3,98	238,3	0,09	4,37	225,9	0,07	3,32	269,1	0,06	3,03	30,4	0,11	5,45	251,2	0,1	4,9	279	0,06	2,93	296,7	0,09	4,35	284,6
20	0	0	0	0	0	0	0,01	0,5	0	0,01	0,49	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0,08	3,96	69,4	0,1	4,93	66,5	0,11	5,47	51,9	0,11	5,34	42,7	0,01	0,47	0	0,05	2,53	0	0,07	3,47	65,1	0,09	4,41	80,2	0,09	4,39	82,2	0,03	1,45	0
22	0	0	0	0	0	0	0,01	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0,03	1,49	0	0,08	3,94	232,7	0,09	4,48	221,5	0,09	4,37	213,3	0,04	1,9	0	0,07	3,54	247,8	0,01	0,5	0	0,06	2,94	244,9	0,09	4,39	245,1	0,01	0,48	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0,01	0,5	0	0,05	2,46	0	0,05	2,49	0	0,05	2,43	0	0,05	2,37	0	0,08	4,04	48,9	0,03	1,49	0	0,01	0,49	0	0,06	2,93	49,1	0,03	1,45	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0,03	1,49	0	0,01	0,49	0	0,01	0,5	0	0,01	0,49	0	0,04	1,9	0	0,06	3,03	214,7	0,05	2,48	0	0,01	0,49	0	0,02	0,98	0	0,03	1,45	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	0,04	1,98	0	0,02	0,99	0	0,02	1	0	0,02	0,97	0	0,01	0,47	0	0,03	1,52	0	0,04	1,98	0	0,03	1,47	0	0	0	0	0,02	0,97	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31	0,03	1,49	0	0,03	1,48	0	0,04	1,99	0	0,04	1,94	0	0	0	0	0	0	0	0,02	0,99	0	0,03	1,47	0	0,02	0,98	0	0,01	0,48	0
32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
33	0,01	0,5	0	0,03	1,48	0	0,04	1,99	0	0,04	1,94	0	0	0	0	0,01	0,51	0	0	0	0	0,02	0,98	0	0,03	1,46	0	0,01	0,48	0
34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
35	0	0	0	0,03	1,48	0	0,03	1,49	0	0,03	1,46	0	0	0	0	0,03	1,52	0	0	0	0	0,01	0,49	0	0,03	1,46	0	0,01	0,48	0
36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
37	0	0	0	0,01	0,49	0	0,01	0,5	0	0,01	0,49	0	0	0	0	0,03	1,52	0	0	0	0	0,01	0,49	0	0,02	0,98	0	0	0	0
38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,01	0,47	0	0,02	1,01	0	0	0	0	0,01	0,49	0	0,01	0,49	0	0,01	0,48	0
40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,01	0,47	0	0,01	0,51	0	0	0	0	0,01	0,49	0	0,01	0,49	0	0,01	0,48	0
42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
43	0	0	0	0	0	0	0,01	0,5	0	0,01	0,49	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,01	0,49	0	0,01	0,48	0
44	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
45	0,01	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,01	0,49	0	0	0	0
46	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
47	0,01	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,01	0,51	0	0	0	0	0,01	0,49	0	0	0	0	0	0	0
48	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
49	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,01	0,47	0	0,01	0,51	0	0	0	0	0,01	0,49	0	0	0	0	0	0	0
50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DHTI	140,77%			154,16%			154,06%			152,51%			124,17%			166,79%			134,74%			144,41%			156,43%			130,03%		

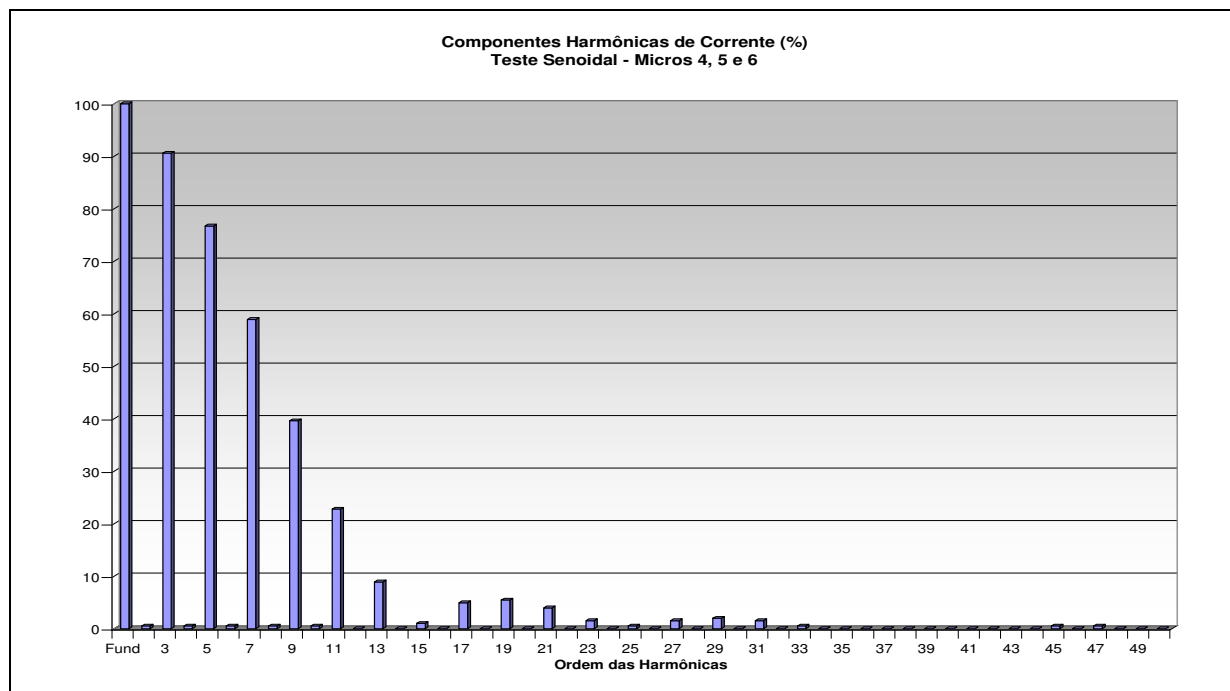


Figura B.35: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente nos Micros 4, 5 e 6 durante o Teste Senoidal

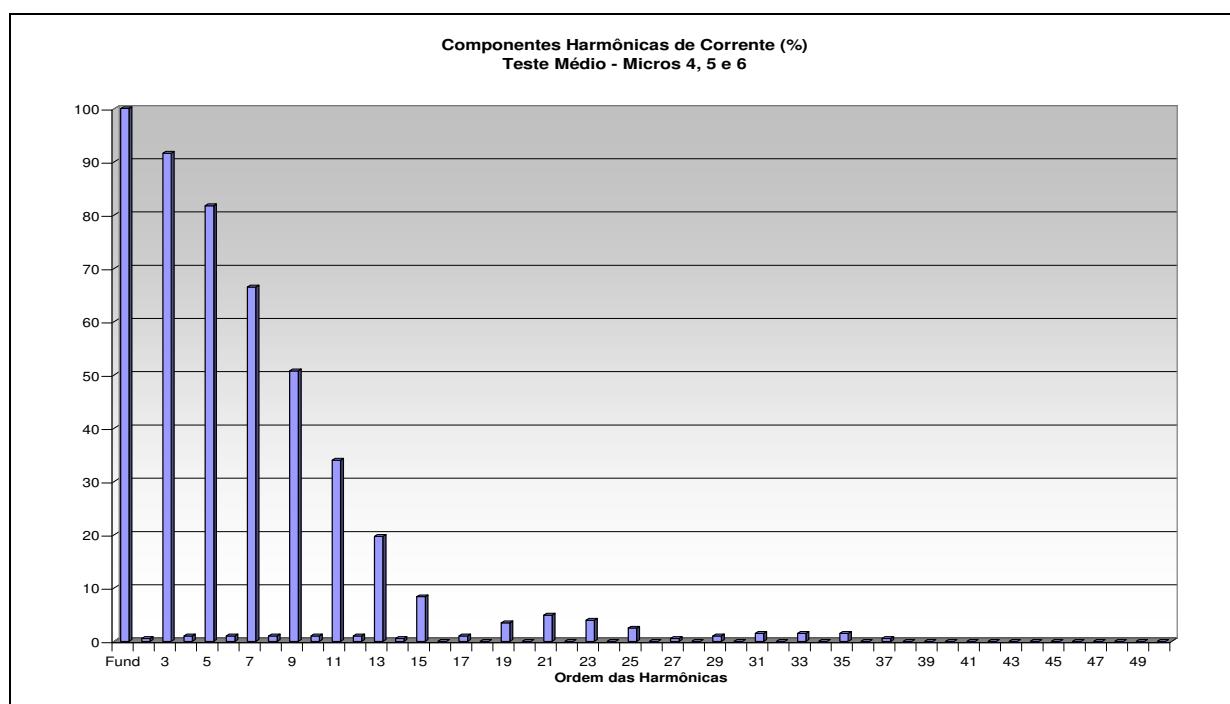


Figura B.36: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente nos Micros 4, 5 e 6 durante o Teste Médio

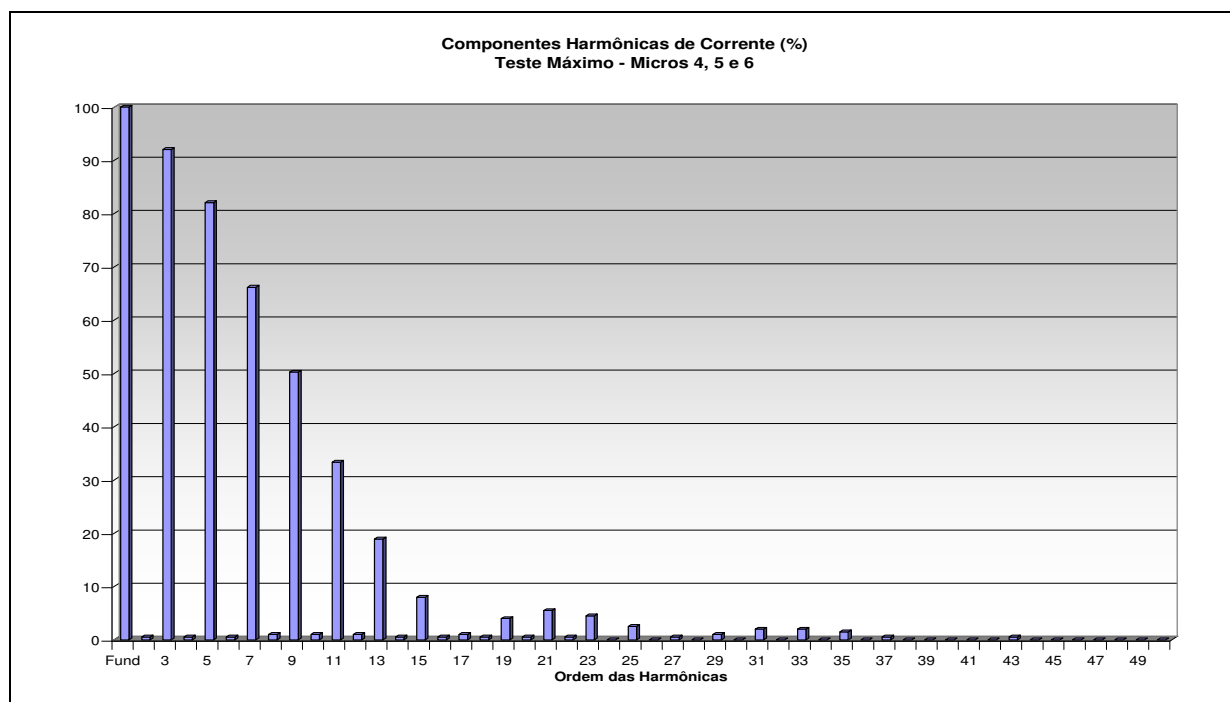


Figura B.37: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente nos Micros 4, 5 e 6 durante o Teste Máximo

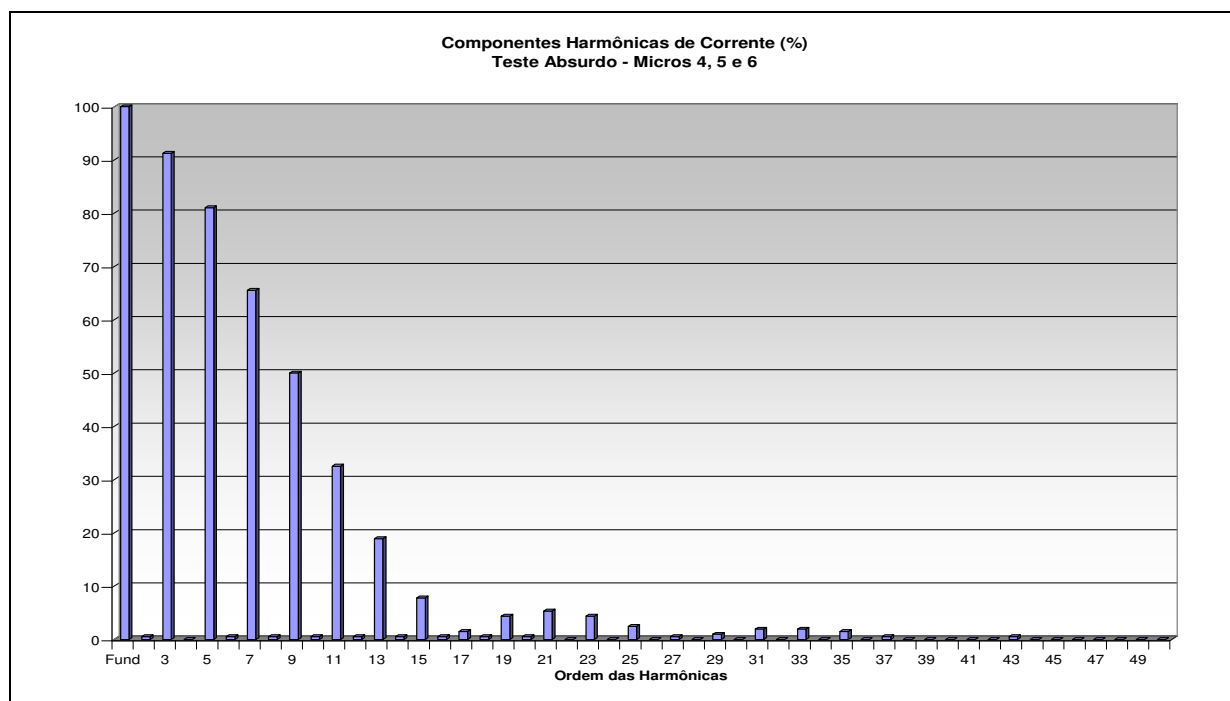


Figura B.38: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente nos Micros 4, 5 e 6 durante o Teste Absurdo

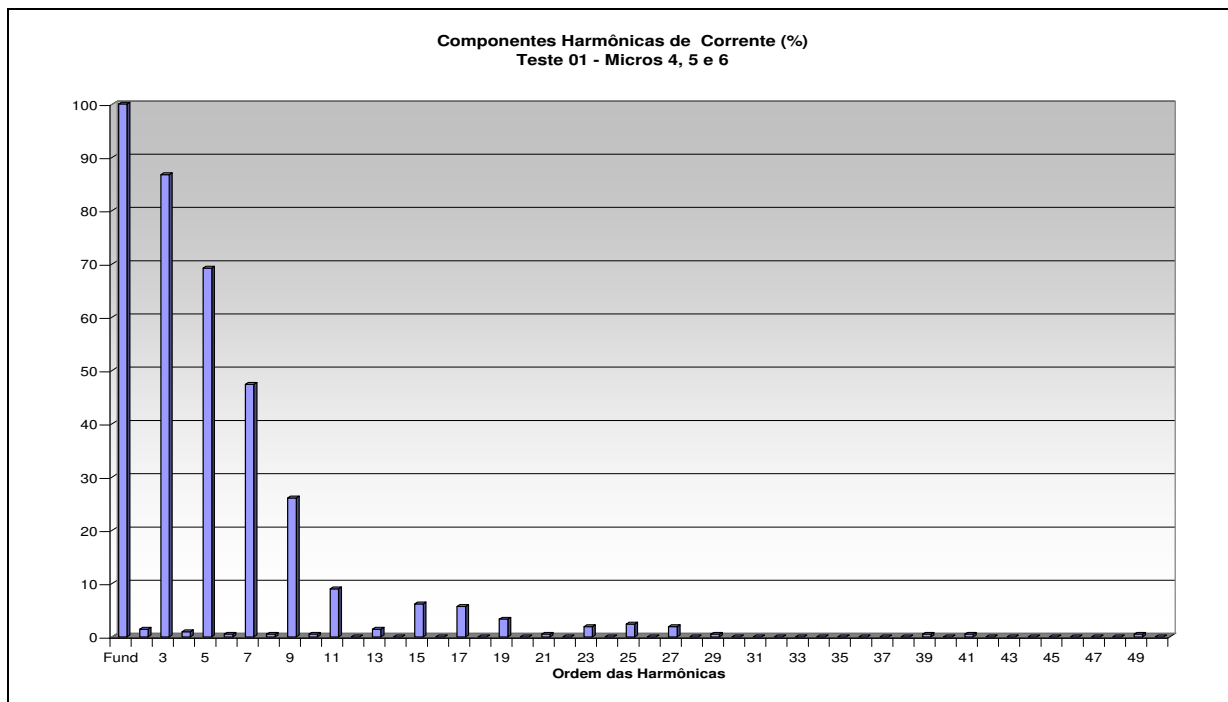


Figura B.39: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente nos Micros 4, 5 e 6 durante o Teste 01

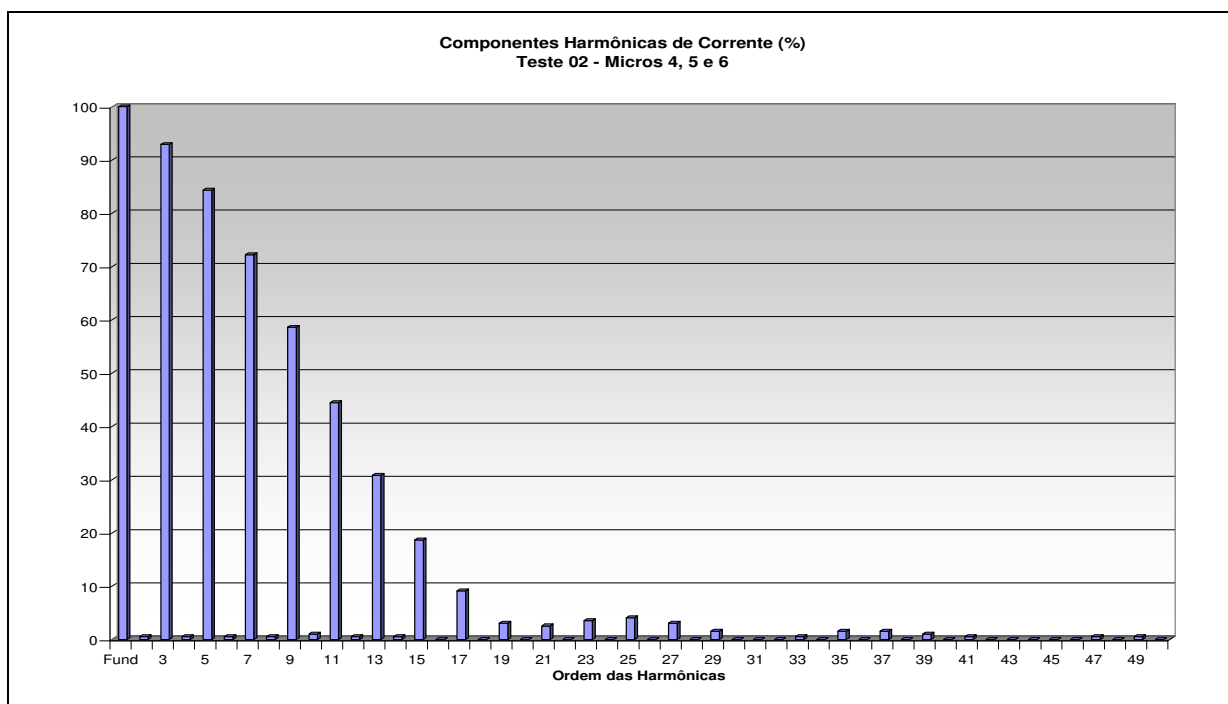


Figura B.40: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente nos Micros 4, 5 e 6 durante o Teste 02



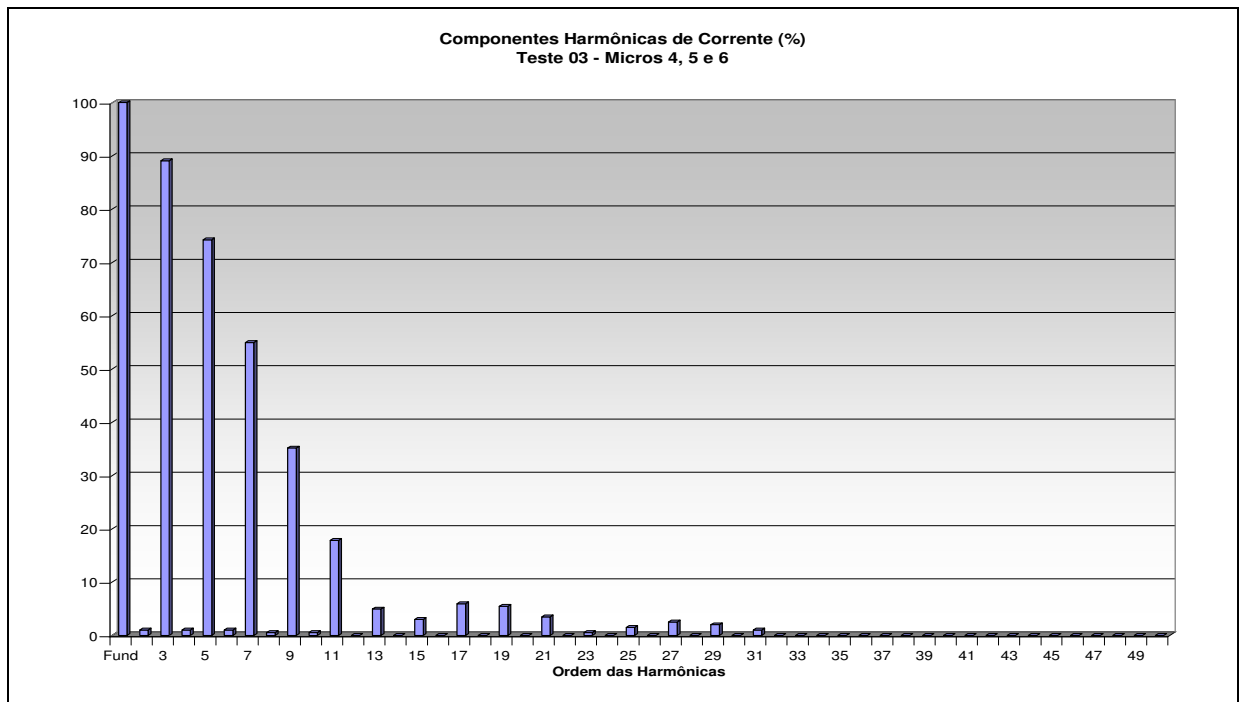


Figura B.41: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente nos Micros 4, 5 e 6 durante o Teste 03

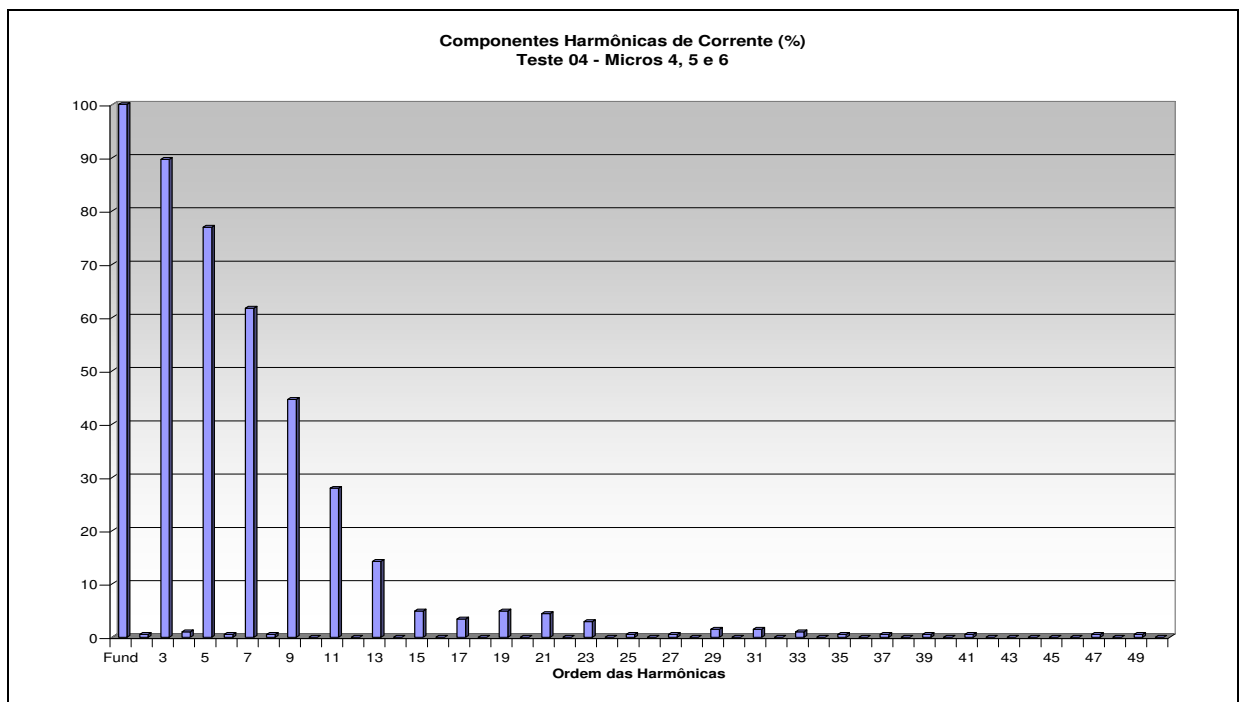


Figura B.42: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente nos Micros 4, 5 e 6 durante o Teste 04

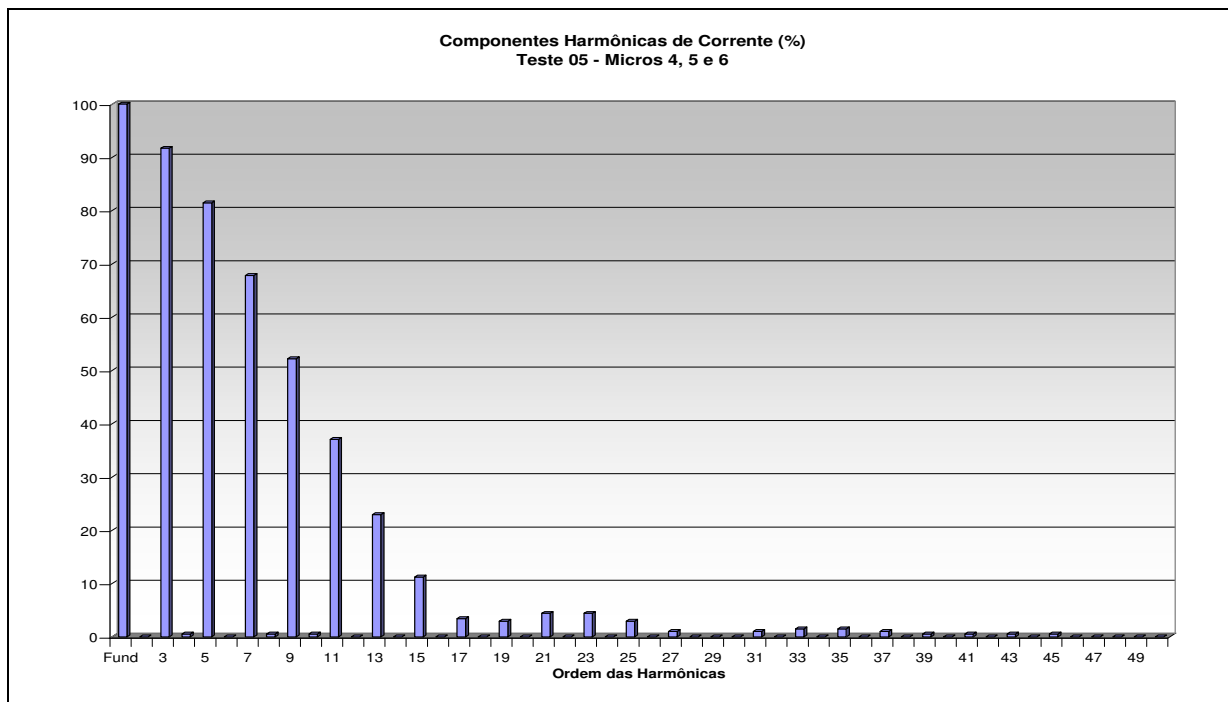


Figura B.43: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente nos Micros 4, 5 e 6 durante o Teste 05

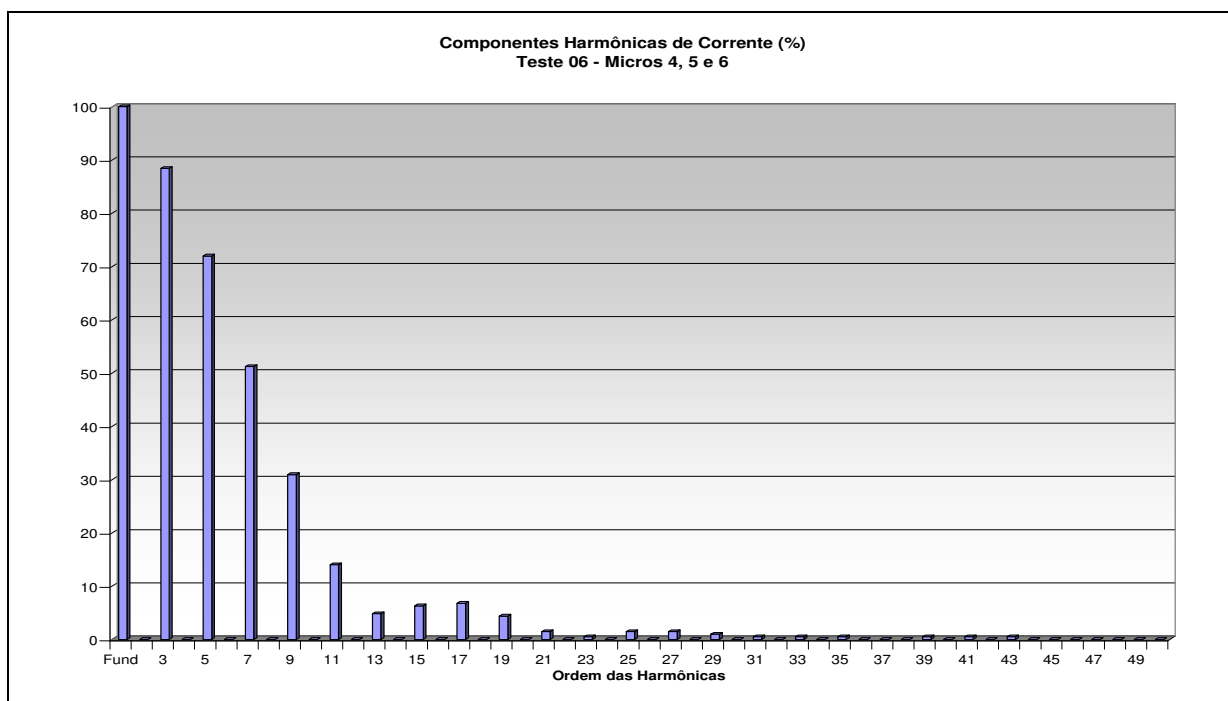


Figura B.44: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente nos Micros 4, 5 e 6 durante o Teste 06

Tabela B.7: Planilha das distorções harmônicas individuais produzidas pelos seis computadores conectados na mesma em cada um dos ensaios.

PLANILHAS DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS DE CORRENTE - SEIS MICROS EM SÉRIE																															
Harm.	SENOIDAL			MÉDIO			MÁXIMO			ABSURDO			TESTE 01			TESTE 02			TESTE 03			TESTE 04			TESTE 05			TESTE 06			
	rms.	rel. (%)	Phase	rms.	rel. (%)	Phase	rms.	rel. (%)	Phase	rms.	rel. (%)	Phase	rms.	rel. (%)	Phase	rms.	rel. (%)	Phase	rms.	rel. (%)	Phase	rms.	rel. (%)	Phase	rms.	rel. (%)	Phase	rms.	rel. (%)	Phase	
Fund	3,66	100	6,9	3,64	100	5,9	3,64	100	6	3,67	100	6,1	3,74	100	8,3	3,53	100	7,3	3,68	100	7,3	3,6	100	6,5	3,65	100	5,8	3,74	100	7,7	
2	0,01	0,27	0	0,02	0,55	0	0,02	0,55	0	0,02	0,54	0	0,02	0,53	0	0,02	0,57	0	0,02	0,54	0	0,02	0,56	0	0,01	0,27	0	0,03	0,8	0	
3	3,32	90,71	166,5	3,39	93,13	166,4	3,38	92,86	166,3	3,39	92,37	165,8	3,3	88,24	166,5	3,3	93,48	166,8	3,3	89,67	166,8	3,33	92,5	166,4	3,4	93,15	166	3,36	89,84	166,4	
4	0,02	0,55	0	0,03	0,82	0	0,01	0,27	0	0,02	0,54	0	0,02	0,53	0	0,01	0,28	0	0,04	1,09	0	0,03	0,83	0	0,02	0,55	0	0,02	0,53	0	
5	2,83	77,32	337	3,01	82,69	338,5	3	82,42	338,7	3,01	82,02	338	2,64	70,59	337,7	3,01	85,27	338,5	2,75	74,73	337,8	2,88	80	336,7	3,04	83,29	337,8	2,76	73,8	337,3	
6	0,02	0,55	0	0,04	1,1	0	0,02	0,55	0	0,02	0,54	0	0,04	1,07	0	0,04	1,13	0	0,04	1,09	0	0,05	1,39	0	0,03	0,82	0	0,01	0,27	0	
7	2,19	59,84	147,1	2,47	67,86	147,9	2,45	67,31	148,1	2,46	67,03	147	1,83	48,93	148	2,59	73,37	148,1	2,06	55,98	148,3	2,29	63,61	146,5	2,53	69,32	147,1	2,02	54,01	146,6	
8	0,01	0,27	0	0,04	1,1	0	0,02	0,55	0	0,01	0,27	0	0,02	0,53	0	0,04	1,13	0	0,04	1,09	0	0,04	1,11	0	0,03	0,82	0	0,01	0,27	0	
9	1,52	41,53	316,4	1,88	51,65	318,1	1,86	51,1	319,4	1,87	50,95	318,1	1,05	28,07	317,1	2,1	59,49	318,2	1,35	36,68	318,6	1,67	46,39	315,5	1,97	53,97	316,6	1,29	34,49	313,7	
10	0	0	0	0,04	1,1	0	0,02	0,55	0	0,01	0,27	0	0,01	0,27	0	0,04	1,13	0	0,03	0,82	0	0,03	0,83	0	0,03	0,82	0	0	0	0	
11	0,91	24,86	123,7	1,3	35,71	126,2	1,25	34,34	127,8	1,27	34,6	126,3	0,43	11,5	121,6	1,6	45,33	127,4	0,73	19,84	127,8	1,08	30	121,8	1,41	38,63	125	0,68	18,18	113,7	
12	0	0	0	0,03	0,82	0	0,02	0,55	0	0	0	0	0	0	0	0,03	0,85	0	0,02	0,54	0	0,02	0,56	0	0,03	0,82	0	0	0	0	
13	0,43	11,75	285,6	0,79	21,7	292,7	0,75	20,6	297	0,75	20,44	296,1	0,07	1,87	237,9	1,12	31,73	295,2	0,26	7,07	292	0,6	16,67	283,2	0,9	24,66	291,1	0,3	8,02	255,6	
14	0,01	0,27	0	0,02	0,55	0	0,01	0,27	0	0,01	0,27	0	0	0	0	0,03	0,85	0	0	0	0	0,01	0,28	0	0,02	0,55	0	0	0	0	
15	0,13	3,55	59,8	0,39	10,71	93	0,34	9,34	102,1	0,34	9,26	102	0,14	3,74	312,5	0,71	20,11	100,7	0,05	1,36	0	0,28	7,78	71,3	0,5	13,7	92,1	0,19	5,08	14,3	
16	0,01	0,27	0	0,01	0,27	0	0	0	0	0,01	0,27	0	0	0	0	0,02	0,57	0	0	0	0	0	0	0	0,01	0,27	0	0	0	0	
17	0,12	3,28	144,2	0,15	4,12	229,8	0,08	2,2	239,3	0,06	1,63	243,7	0,14	3,74	112,1	0,39	11,05	259,4	0,15	4,08	114,3	0,16	4,44	190,3	0,23	6,3	238,8	0,17	4,55	153,8	
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,02	0,54	0	0	0	0	0,01	0,28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
19	0,14	3,83	291,5	0,11	3,02	329,1	0,1	2,75	296,8	0,1	2,72	285,4	0,06	1,6	270,8	0,19	5,38	41,7	0,14	3,8	277,6	0,15	4,17	321,2	0,13	3,56	355,1	0,11	2,94	308,7	
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,01	0,27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
21	0,1	2,73	88,3	0,14	3,85	110,4	0,15	4,12	91,1	0,15	4,09	83	0,02	0,53	0	0,13	3,68	161,3	0,08	2,17	80,9	0,13	3,61	110,5	0,14	3,84	124,9	0,03	0,8	0	
22	0	0	0	0	0	0	0,01	0,27	0	0,01	0,27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
23	0,05	1,37	0	0,12	3,3	264,1	0,13	3,57	251,6	0,14	3,81	245,2	0,07	1,87	88,2	0,14	3,97	297,2	0,01	0,27	0	0,08	2,22	260,5	0,13	3,56	274,4	0,03	0,8	0	
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
25	0,03	0,82	0	0,07	1,92	53,3	0,08	2,2	47,3	0,09	2,45	40,9	0,07	1,87	247,3	0,13	3,68	89,6	0,05	1,36	0	0,04	1,11	0	0,1	2,74	67,7	0,06	1,6	281,3	
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
27	0,05	1,37	0	0,04	1,1	0	0,04	1,1	0	0,04	1,09	0	0,05	1,34	0	0,1	2,83	243,9	0,07	1,9	61,9	0,04	1,11	0	0,06	1,64	208,1	0,06	1,6	72,8	
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
29	0,05	1,37	0	0,04	1,1	0	0,04	1,1	0	0,04	1,09	0	0,02	0,53	0	0,07	1,98	29,8	0,06	1,63	223,1	0,05	1,39	0	0,04	1,1	0	0,04	1,07	0	
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
31	0,04	1,09	0	0,05	1,37	0	0,05	1,37	0	0,05	1,36	0	0,01	0,27	0	0,05	1,42	0	0,03	0,82	0	0,04	1,11	0	0,04	1,1	0	0,03	0,8	0	
32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
33	0,02	0,55	0	0,04	1,1	0	0,05	1,37	0	0,05	1,36	0	0,02	0,53	0	0,04	1,13	0	0,01	0,27	0	0,03	0,83	0	0,04	1,1	0	0,01	0,27	0	
34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
35	0,02	0,55	0	0,03	0,82	0	0,04	1,1	0	0,04	1,09	0	0,02	0,53	0	0,05	1,42	0	0,01	0,27	0	0,03	0,83	0	0,03	0,82	0	0	0	0	
36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
37	0,01	0,27	0	0,03	0,82	0	0,02	0,55	0	0,02	0,54	0	0,03	0,8	0	0,04	1,13	0	0,02	0,54	0	0,02	0,56	0	0,03	0,82	0	0,02	0,53	0	
38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
39	0,01	0,27	0	0,02	0,55	0	0,02	0,55	0	0,02	0,54	0	0,02	0,53	0	0,03	0,85	0	0,02	0,54	0	0,01	0,28	0	0,03	0,82	0	0,03	0,8	0	
40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
41	0,01	0,27	0	0,02	0,55	0	0,02	0,55	0	0,02	0,54	0	0,01	0,27	0	0,02	0,57	0	0,02	0,54	0	0	0	0	0,02	0,55	0	0,02	0,53	0	
42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
43	0,02	0,55	0	0,01	0,27	0	0,01	0,27	0	0,01	0,27	0	0	0	0	0,02	0,57	0	0,02	0,54	0	0,01	0,28	0	0,01	0,27	0	0,01	0,27	0	
44	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
45	0,02	0,55	0	0	0	0	0,01	0,27	0	0,01	0,27	0	0,01	0,27	0	0,02	0,57	0	0,01	0,27	0	0,02	0,56	0	0,01	0,27	0	0	0	0	
46	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
47	0,01	0,27	0	0,01	0,27	0	0,01	0,27	0	0,01	0,27	0	0,02	0,53	0	0,02	0,57	0	0	0	0	0,02	0,56	0	0	0	0	0	0,01	0,27	0
48	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
49	0	0	0	0,01	0,27	0	0,01	0,27	0	0,01	0,27	0	0,01	0,27	0	0,01	0,28	0	0,01	0,27	0	0,01	0,28	0	0,01	0,27	0	0,01	0,27	0	
50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
DHTI	142,56%			157,21%			155,90%			155,26%			127,01%			169,17%			136,39%			149,87%			160,37%						

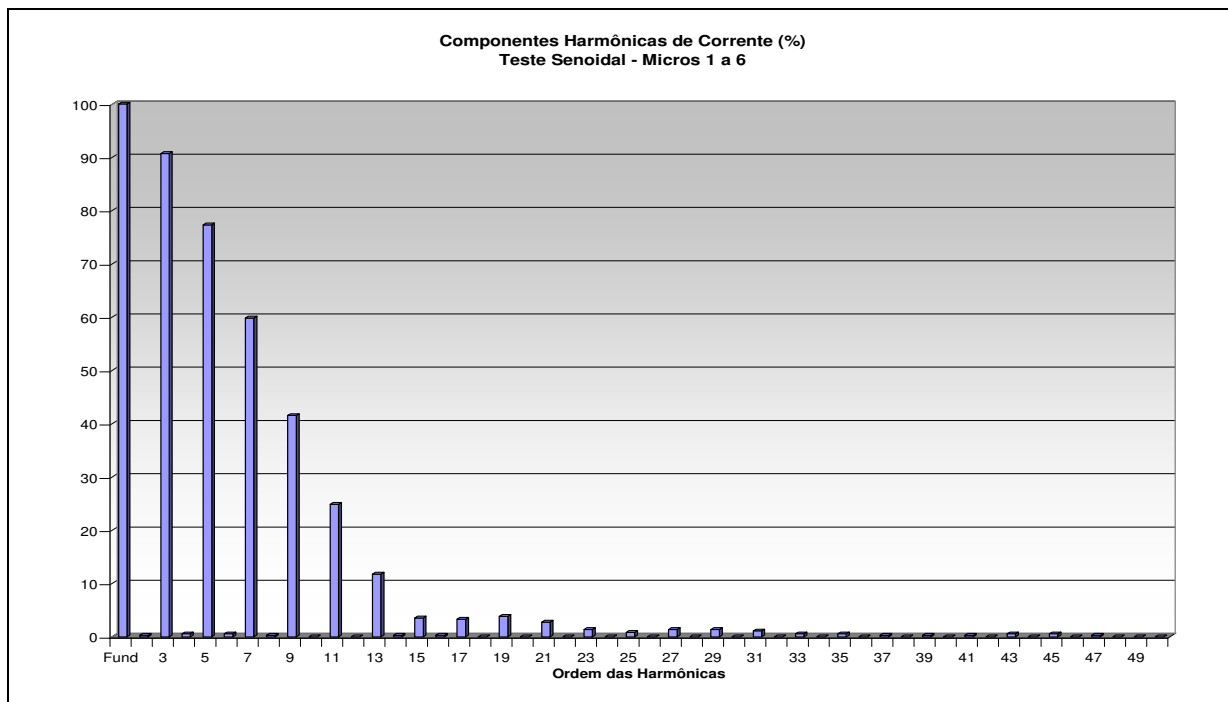


Figura B.45: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente nos Micros de 1 a 6 durante o Teste Senoidal

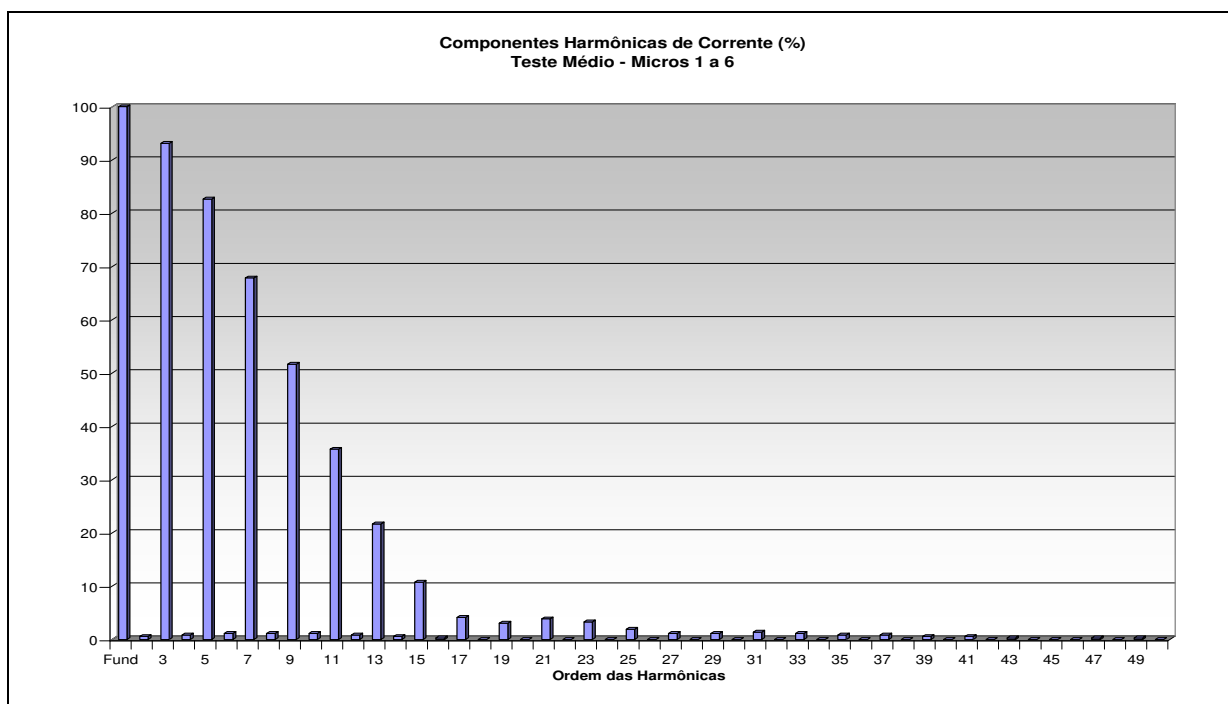


Figura B.46: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente nos Micros de 1 a 6 durante o Teste Médio

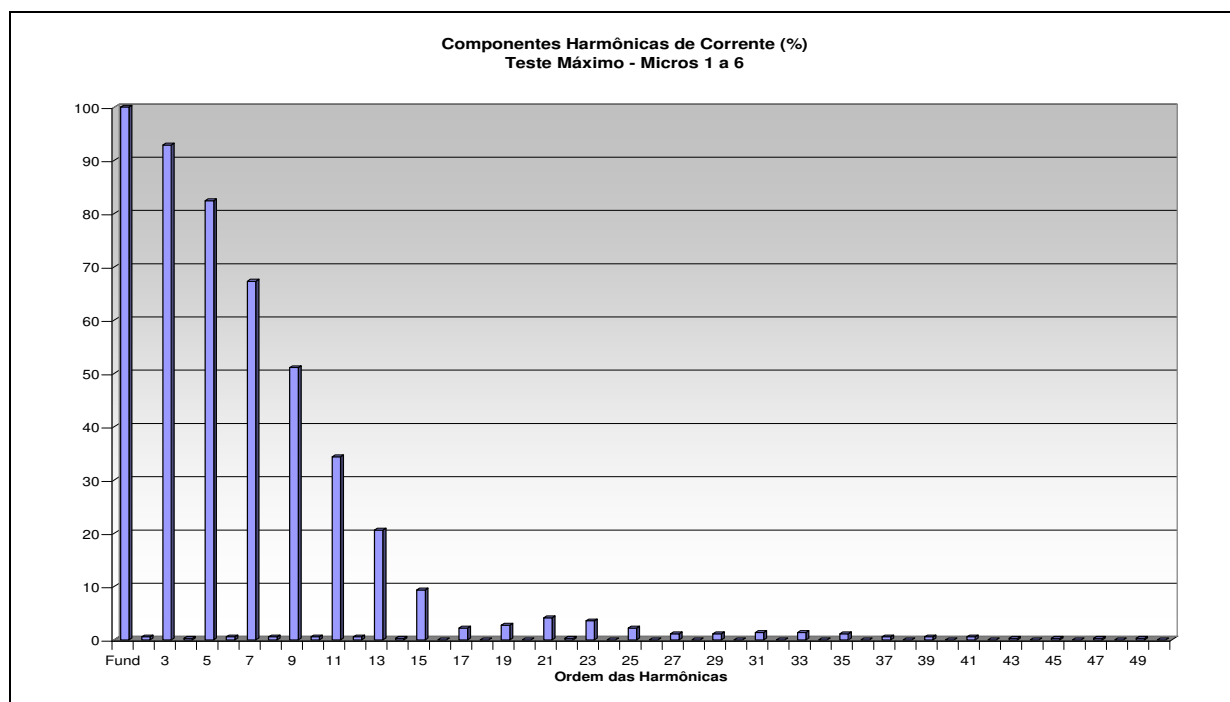


Figura B.47: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente nos Micros de 1 a 6 durante o Teste Máximo

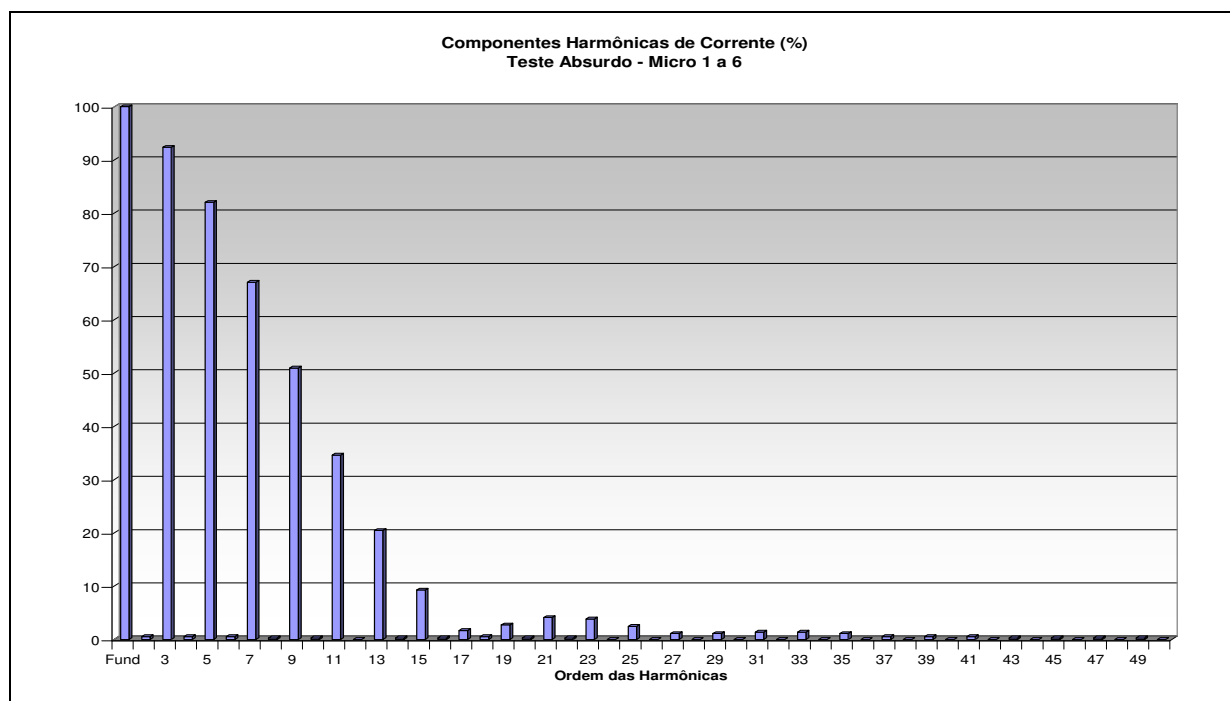


Figura B.48: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente nos Micros de 1 a 6 durante o Teste Absurdo

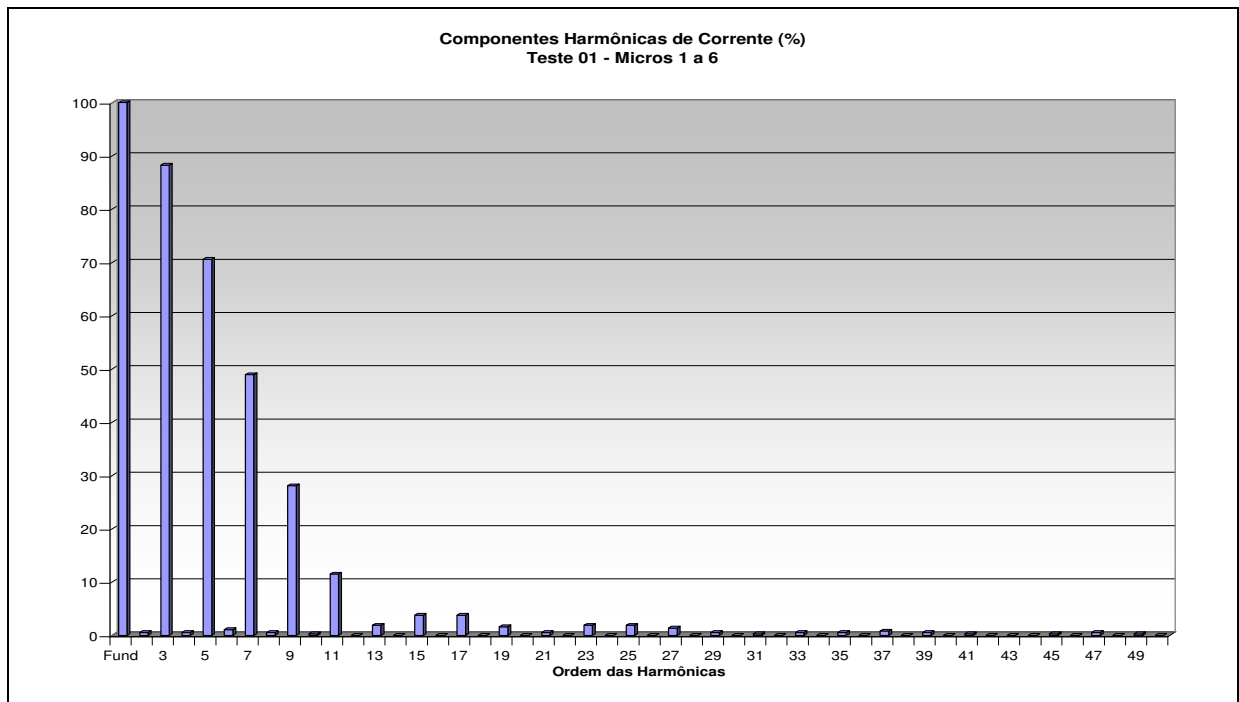


Figura B.49: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente nos Micros de 1 a 6 durante o Teste 01

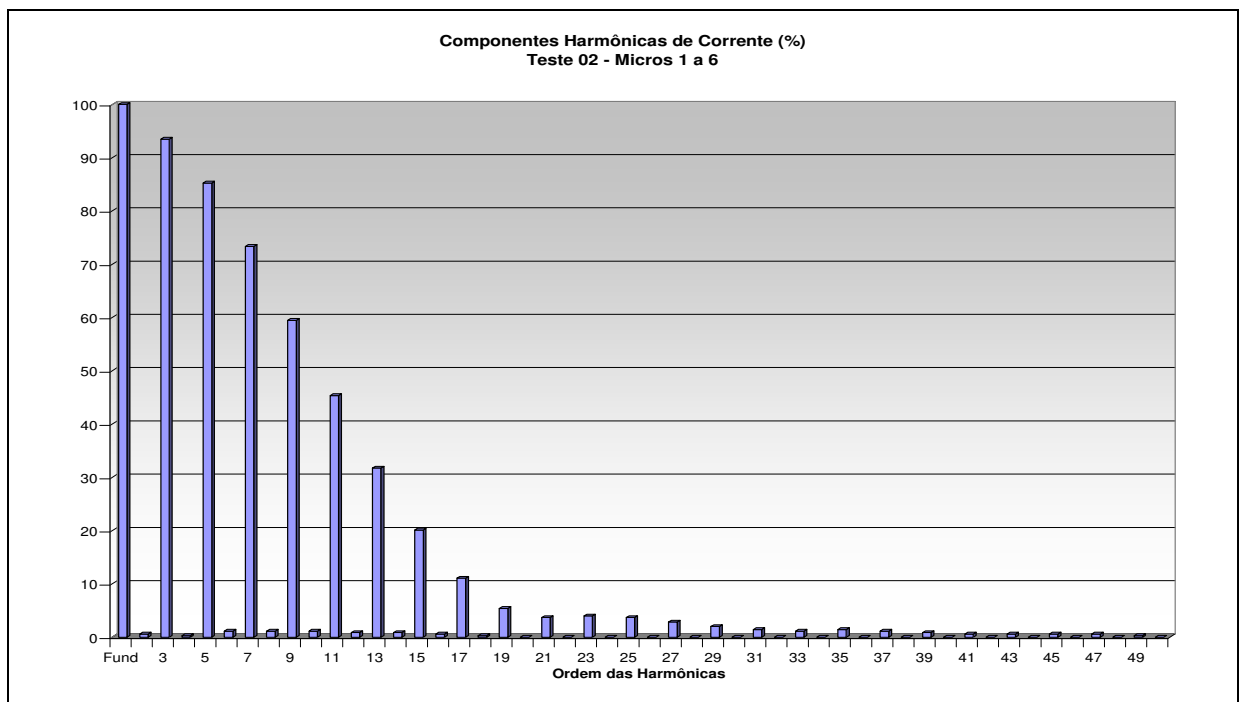


Figura B.50: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente nos Micros de 1 a 6 durante o Teste 02

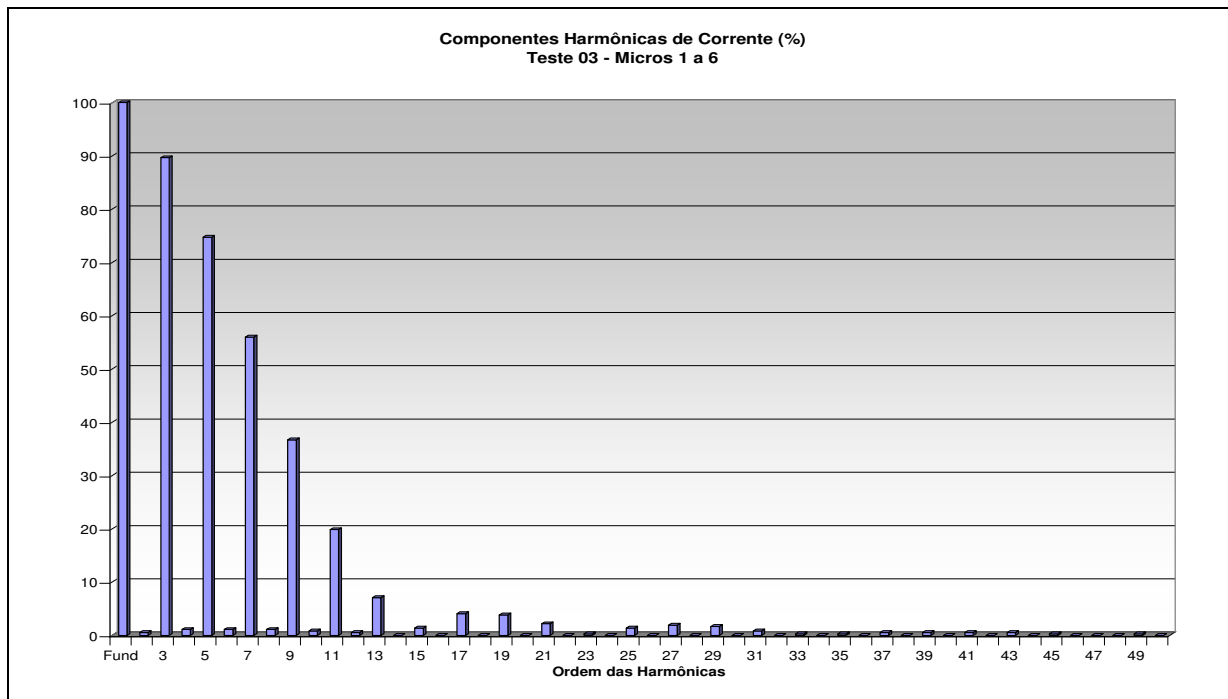


Figura B.51: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente nos Micros de 1 a 6 durante o Teste 03

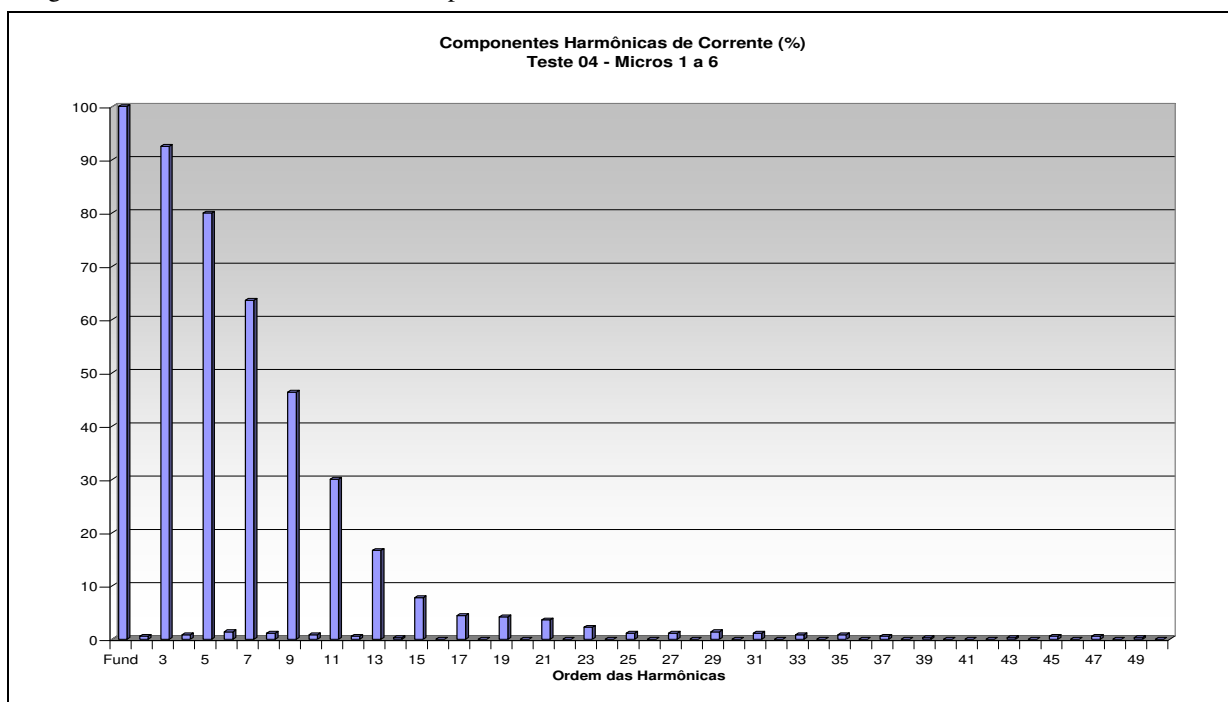


Figura B.52: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente nos Micros de 1 a 6 durante o Teste 04

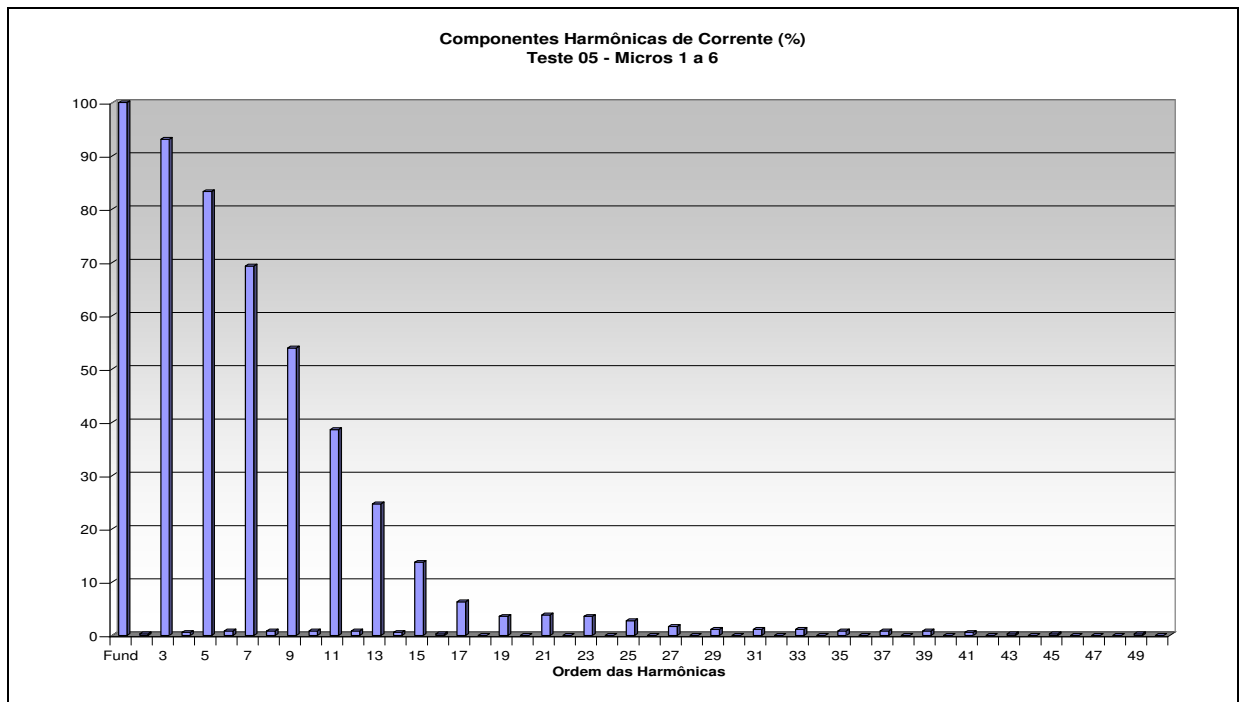


Figura B.53: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente nos Micros de 1 a 6 durante o Teste 05

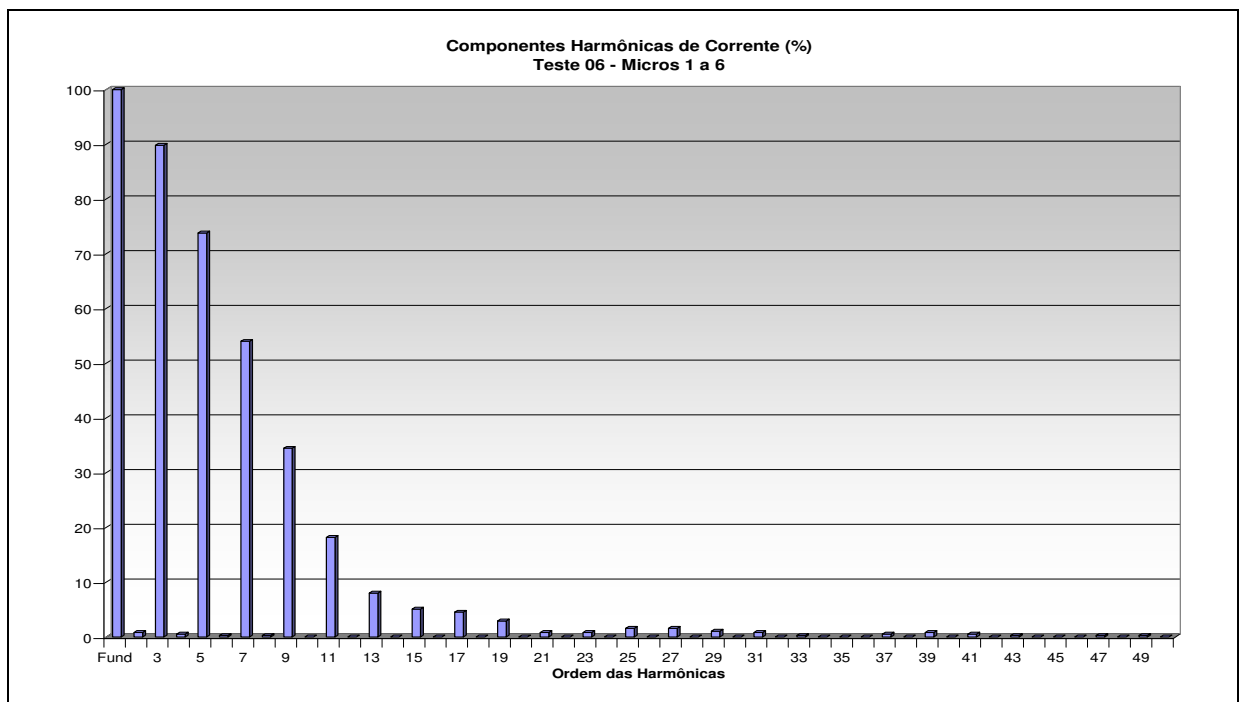


Figura B.54: Gráfico de barras das componentes harmônicas de corrente nos Micros de 1 a 6 durante o Teste 06



Tabela B.8: Planilha das distorções harmônicas individuais de tensão produzidas pela fonte harmônica 3000iX da Califórnia Instruments durante todos os ensaios..

PLANILHAS DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS DE TENSÃO DURANTE OS ENSAIOS																														
Harm.	SENODIAL			MEDIO			MAXIMO			ABSURDO			TESTE 01			TESTE 02			TESTE 03			TESTE 04			TESTE 05			TESTE 06		
	rms.	rel. (%)	Phase	rms.	rel. (%)	Phase	rms.	rel. (%)	Phase	rms.	rel. (%)	Phase	rms.	rel. (%)	Phase	rms.	rel. (%)	Phase	rms.	rel. (%)	Phase	rms.	rel. (%)	Phase	rms.	rel. (%)	Phase	rms.	rel. (%)	Phase
Fund	220,22	100		219,92	100		219,73	100		219,67	100		220,07	100		220,05	100		220,22	100		220,17	100		219,85	100		220,06	100	
2	0,09	0,04		0,14	0,06		0,15	0,07		0,22	0,1	0,3	0,29	0,13	172	0,29	0,13	175,2	0,31	0,14	172,6	0,29	0,13	174,3	0,26	0,12	174,5	0,3	0,14	170,9
3	0,74	0,34	76,1	8,58	3,9	3,2	9,25	4,21	2,7	9,41	4,28	2,7	8,49	3,86	1,9	0,76	0,35	81,3	0,73	0,33	86,7	0,73	0,33	83,8	8,58	3,9	3,1	8,51	3,87	2,9
4	0,01		0	0,03	0,01		0,19	0,09	0	0,24	0,11	352,3	0,13	0,06	0	0,05	0,02	0	0,1	0,05	0	0,08	0,04	0	0,08	0,04	0	0,12	0,05	0
5	0,35	0,16	270,9	8,73	3,97	354,4	10,42	4,74	354,9	10,97	4,99	355	0,13	0,06	0	8,7	3,95	354,1	0,34	0,15	262,3	0,35	0,16	259,1	8,73	3,97	354,5	0,29	0,13	265,8
6	0,03	0,01		0,03	0,01		0		0	0,09	0,04	0	0,07	0,03	0	0,08	0,04	0	0,04	0,02	0	0,05	0,02	0	0,13	0,06	0	0,04	0,02	0
7	0,43	0,2	92,3	1,07	0,49	26,6	1,8	0,82	12,9	2,04	0,93	11,2	0,24	0,11	110,6	0,58	0,26	86,2	0,93	0,42	20	0,47	0,21	92,7	0,55	0,25	90,3	0,4	0,18	103,2
8	0,01		0	0,03	0,01		0,1	0,05	0	0,13	0,06	0	0,06	0,03	0	0,06	0,03	0	0,05	0,02	0	0,05	0,02	0	0,07	0,03	0	0,05	0,02	0
9	0,3	0,14	286	0,98	0,45	332,7	1,92	0,87	343,8	2,22	1,01	345,4	0,12	0,05	0	0,43	0,2	262,2	0,24	0,11	286,9	1	0,45	334,5	0,37	0,17	268,4	0,97	0,44	340,3
10	0,01		0	0,05	0,02		0,07	0,03	0	0,09	0,04	0	0,05	0,02	0	0,05	0,02	0	0,04	0,02	0	0,04	0,02	0	0,05	0,02	0	0,05	0,02	0
11	0,2	0,09	112,1	0,62	0,28	21,8	1,63	0,74	2,7	1,92	0,87	1,7	0,13	0,06	0	0,41	0,19	94,5	0,17	0,08	0	0,28	0,13	109,5	0,36	0,16	102,5	0,16	0,07	0
12	0,01		0	0,06	0,03	0	0,07	0,03	0	0,08	0,04	0	0,04	0,02	0	0,04	0,02	0	0,04	0,02	0	0,03	0,01	0	0,05	0,02	0	0,04	0,02	0
13	0,07	0,03		0,17	0,08		0,13	0,06	0	0,12	0,05	0	0,03	0,01	0	0,29	0,13	266,1	0	0	0	0,12	0,05	0	0,21	0,1	274,6	0,05	0,02	0
14	0		0	0,04	0,02	0	0,05	0,02	0	0,06	0,03	0	0,03	0,01	0	0,03	0,01	0	0,03	0,01	0	0,04	0,02	0	0,04	0,02	0	0,03	0,01	0
15	0,02	0,01		0,1	0,05	0	0,11	0,05	0	0,1	0,05	0	0,01		0	0,2	0,09	100,9	0,06	0,03	0	0,04	0,02	0	0,12	0,05	0	0,03	0,01	0
16	0		0	0,04	0,02		0,04	0,02	0	0,05	0,02	0	0,03	0,01	0	0,03	0,01	0	0,03	0,01	0	0,03	0,01	0	0,04	0,02	0	0,04	0,02	0
17	0,09	0,04		0,04	0,02	0	0,06	0,03	0	0,06	0,03	0	0,07	0,03	0	0,09	0,04	0	0,13	0,06	0	0,07	0,03	0	0,04	0,02	0	0,11	0,05	0
18	0		0	0,03	0,01		0,03	0,01	0	0,03	0,01	0	0,02	0,01	0	0,02	0,01	0	0,01		0	0,02	0,01	0	0,02	0,01	0	0,02	0,01	0
19	0,09	0,04		0,06	0,03	0	0,09	0,04	0	0,09	0,04	0	0,01		0	0,01		0	0,08	0,04	0	0,07	0,03	0	0,04	0,02	0	0,04	0,02	0
20	0		0	0,03	0,01	0	0,03	0,01	0	0,03	0,01	0	0,02	0,01	0	0,03	0,01	0	0,02	0,01	0	0,02	0,01	0	0,03	0,01	0	0,02	0,01	0
21	0,08	0,04		0,12	0,05	0	0,14	0,06	0	0,14	0,06	0	0,04	0,02	0	0,09	0,04	0	0,07	0,03	0	0,09	0,04	0	0,11	0,05	0	0,04	0,02	0
22	0		0	0,02	0,01	0	0,02	0,01	0	0,02	0,01	0	0,01		0	0,02	0,01	0	0,01		0	0,01		0	0,02	0,01	0	0,01		0
23	0,03	0,01		0,08	0,04	0	0,09	0,04	0	0,09	0,04	0	0,02	0,01	0	0,09	0,04	0	0,01		0	0,04	0,02	0	0,08	0,04	0	0,04	0,02	0
24	0		0	0,02	0,01	0	0,03	0,01	0	0,03	0,01	0	0,01		0	0,02	0,01	0	0,02	0,01	0	0,02	0,01	0	0,03	0,01	0	0,01		0
25	0,02	0,01		0,06	0,03	0	0,07	0,03	0	0,08	0,04	0	0,03	0,01	0	0,11	0,05	0	0,02	0,01	0	0,03	0,01	0	0,08	0,04	0	0,03	0,01	0
26	0		0	0,02	0,01	0	0,02	0,01	0	0,03	0,01	0	0,02	0,01	0	0,02	0,01	0	0,02	0,01	0	0,01		0	0,02	0,01	0	0,01		0
27	0,05	0,02		0,03	0,01	0	0,02	0,01	0	0,02	0,01	0	0,05	0,02	0	0,07	0,03	0	0,08	0,04	0	0,05	0,02	0	0,03	0,01	0	0,06	0,03	0
28	0		0	0,02	0,01	0	0,02	0,01	0	0,02	0,01	0	0,01		0	0,01		0	0		0	0,01		0	0,01		0	0,01		0
29	0,05	0,02		0,02	0,01	0	0,01		0	0,01		0	0,03	0,01	0	0,04	0,02	0	0,04	0,02	0	0,03	0,01	0	0,02	0,01	0	0,03	0,01	0
30	0		0	0,02	0,01	0	0,02	0,01	0	0,02	0,01	0	0,01		0	0,01		0	0,01		0	0,01		0	0,02	0,01	0	0,01		0
31	0,05	0,02		0,07	0,03	0	0,07	0,03	0	0,07	0,03	0	0,02	0,01	0	0,05	0,02	0	0,05	0,02	0	0,06	0,03	0	0,06	0,03	0	0,05	0,02	0
32	0		0	0,01		0	0,01		0	0,01		0	0,01		0	0,01		0	0		0	0		0	0,01		0	0		0
33	0,03	0,01		0,03	0,01	0	0,05	0,02	0	0,04	0,02	0	0,02	0,01	0	0,03	0,01	0	0,01		0	0,04	0,02	0	0,03	0,01	0	0,01		0
34	0		0	0,02	0,01	0	0,02	0,01	0	0,02	0,01	0	0		0	0,02	0,01	0	0,01		0	0,01		0	0,01		0	0,01		0
35	0,03	0,01		0,06	0,03	0	0,06	0,03	0	0,06	0,03	0	0,02	0,01	0	0,06	0,03	0	0,01		0	0,04	0,02	0	0,06	0,03	0	0		0
36	0		0	0,01		0	0		0	0,02	0,01	0	0,01		0	0		0	0,01		0	0		0	0		0	0,01		0
37	0,01		0	0,03	0,01	0	0,03	0,01	0	0,03	0,01	0	0,03	0,01	0	0,05	0,02	0	0,03	0,01	0	0,02	0,01	0	0,04	0,02	0	0,03	0,01	0
38	0		0	0,01		0	0,01		0	0,01		0	0,01		0	0,01		0	0		0	0,01		0	0,01		0	0,01		0
39	0,01		0	0,03	0,01	0	0,03	0,01	0	0,03	0,01	0	0,02	0,01	0	0,05	0,02	0	0,01		0	0,01		0	0,04	0,02	0	0,02	0,01	0
40	0		0	0,01		0	0,01		0	0,02	0,01	0	0,01		0	0,01		0	0,01		0	0		0	0,01		0	0,01		0
41	0,03	0,01		0,02	0,01	0	0,03	0,01	0	0,03	0,01	0	0		0	0,04	0,02	0	0,04	0,02	0	0,02	0,01	0	0,03	0,01	0	0,04	0,02	0
42</																														

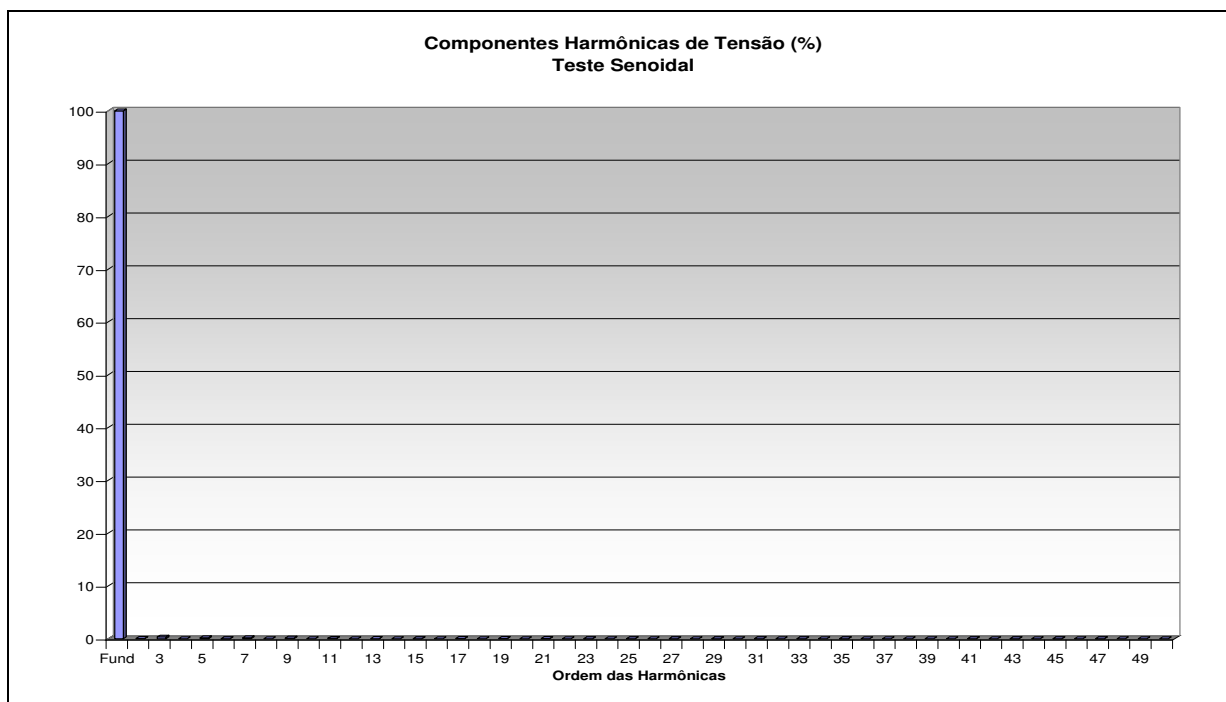


Figura B.55: Gráfico de barras das componentes harmônicas de tensão durante todos os Testes Senoidais

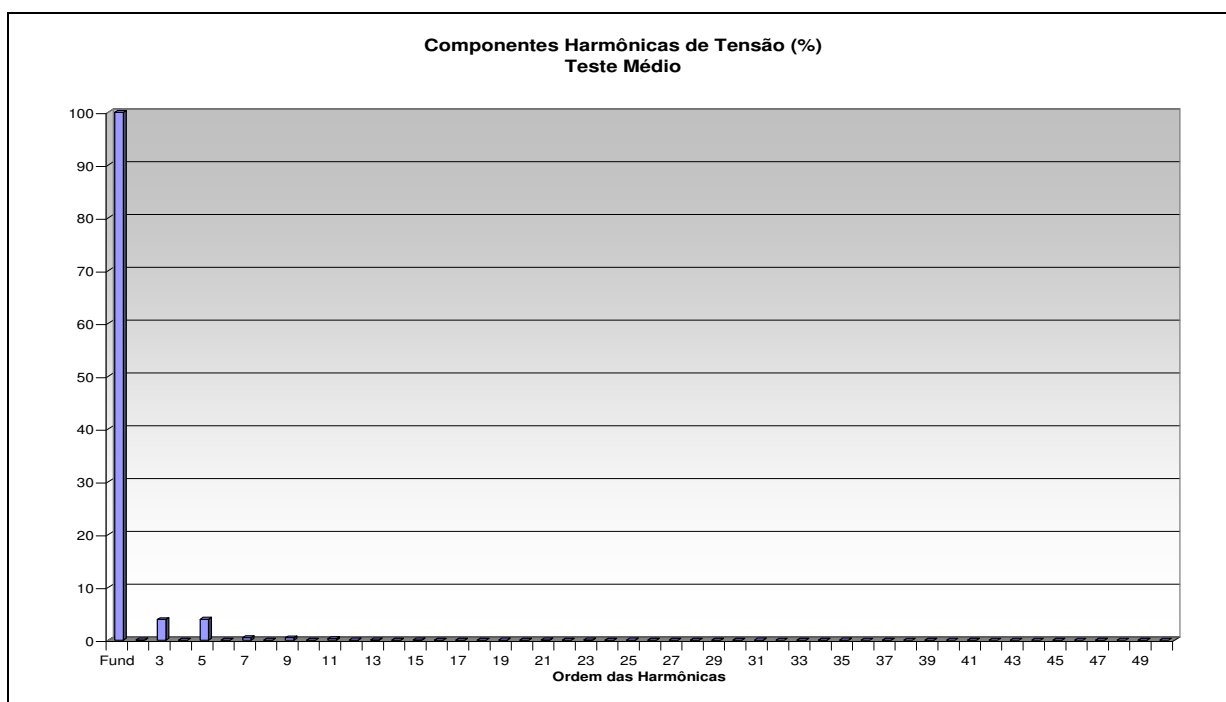


Figura B.56: Gráfico de barras das componentes harmônicas de tensão durante todos os Testes Médios

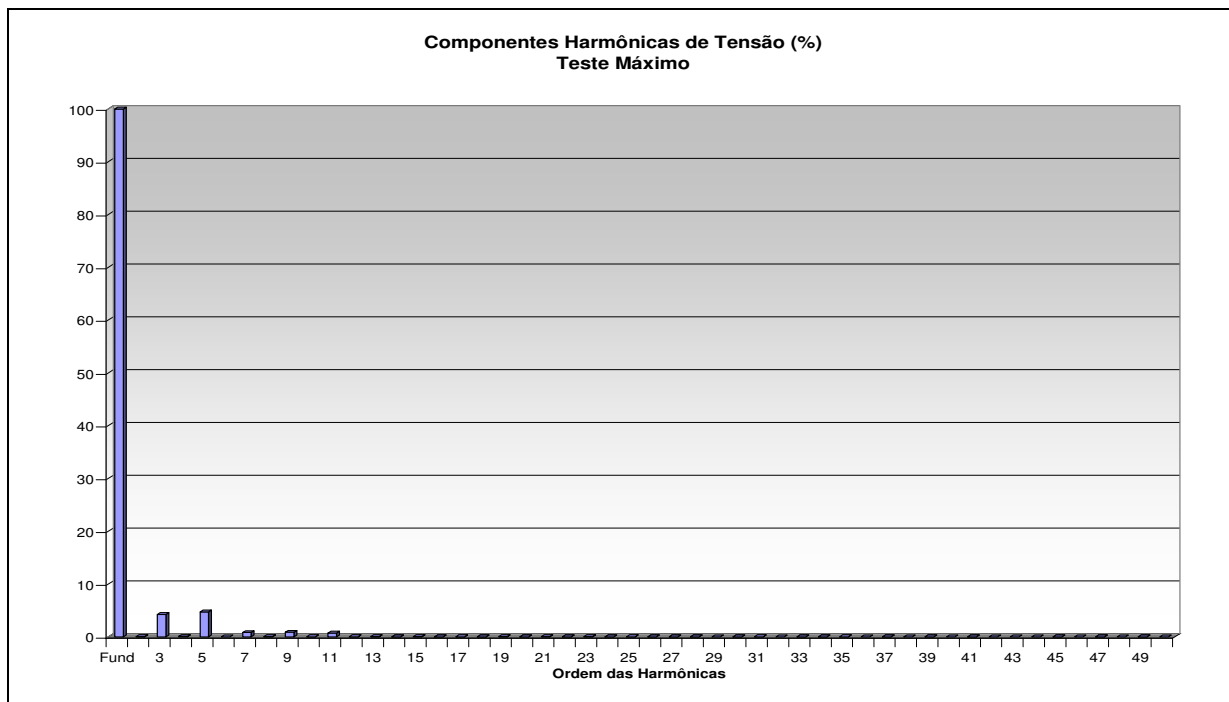


Figura B.57: Gráfico de barras das componentes harmônicas de tensão durante todos os Testes Máximos

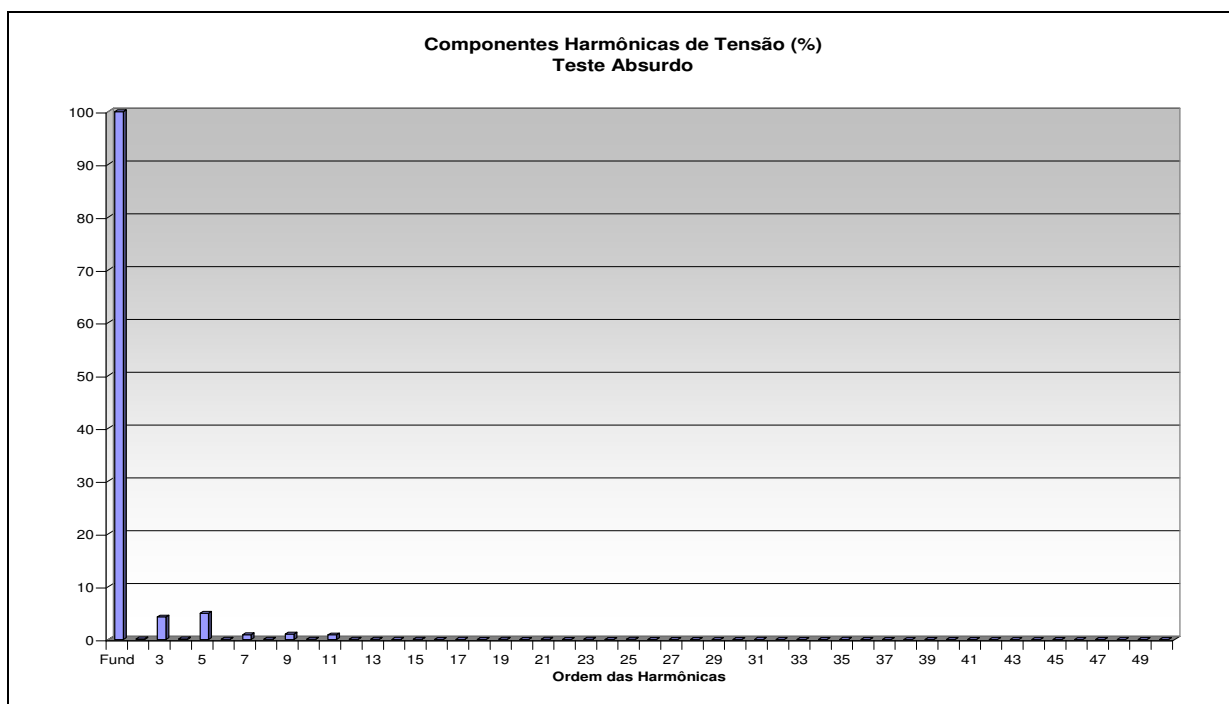


Figura B.58: Gráfico de barras das componentes harmônicas de tensão durante todos os Testes Absurdos

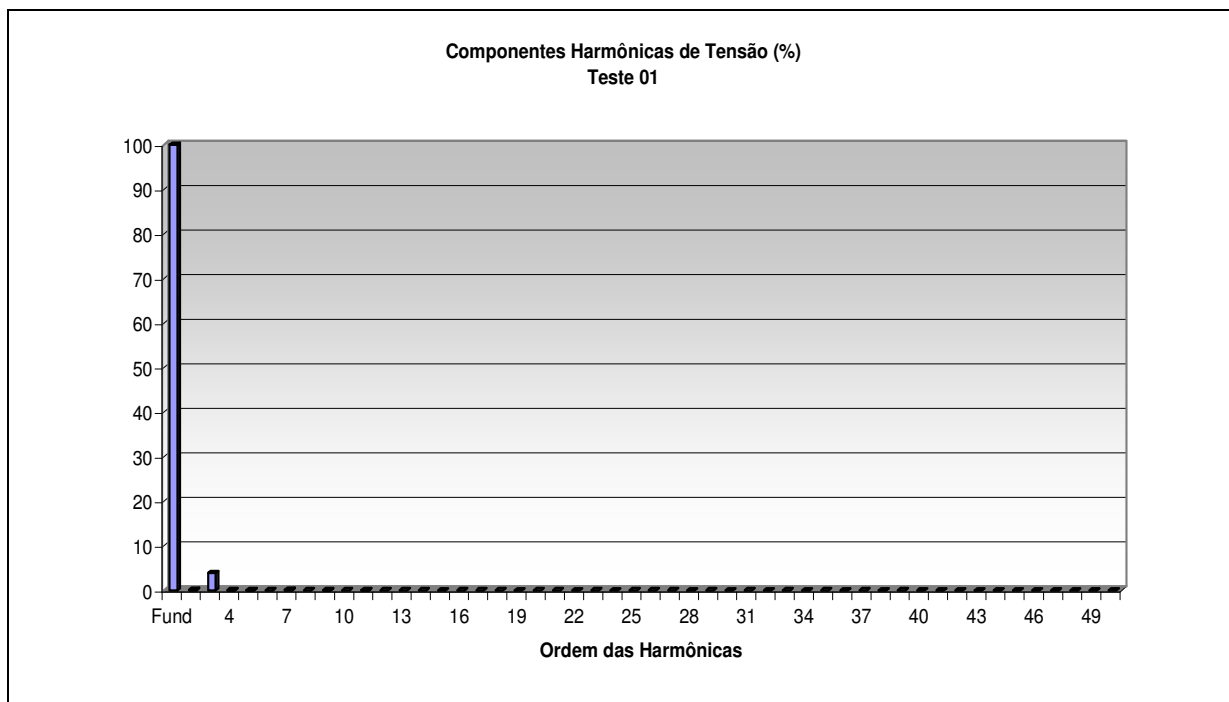


Figura B.59: Gráfico de barras das componentes harmônicas de tensão durante todos os Testes 01

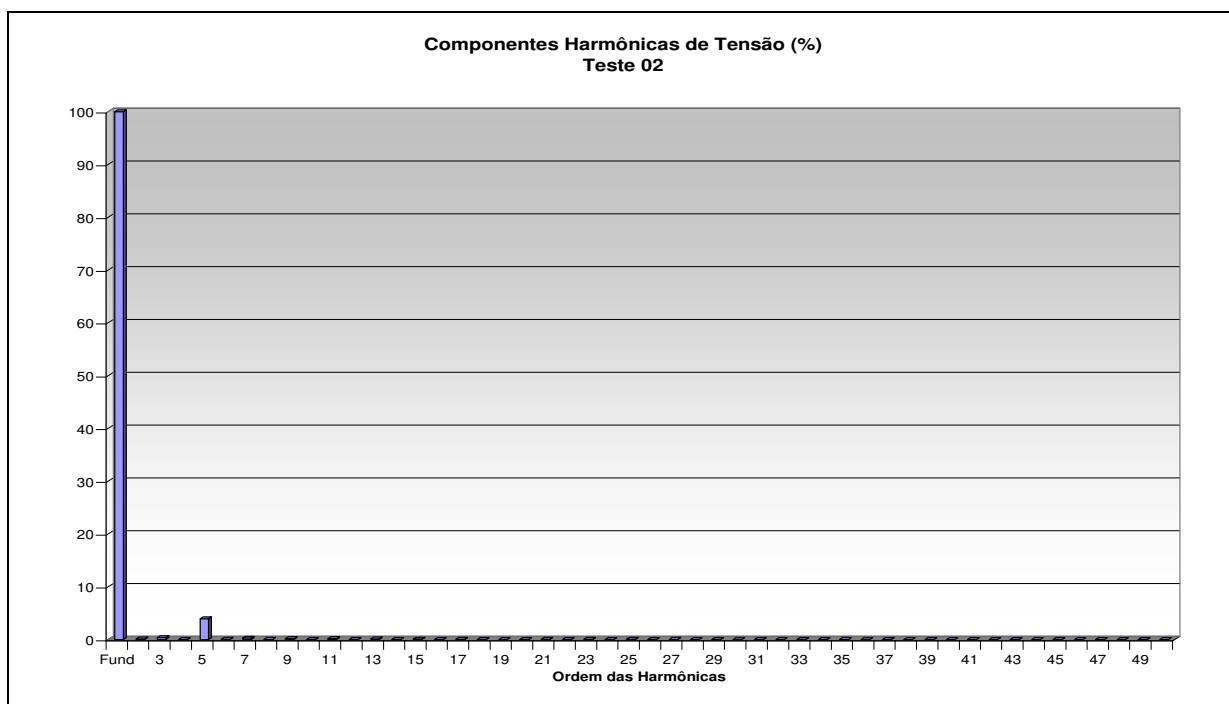


Figura B.60: Gráfico de barras das componentes harmônicas de tensão durante todos os Testes 02

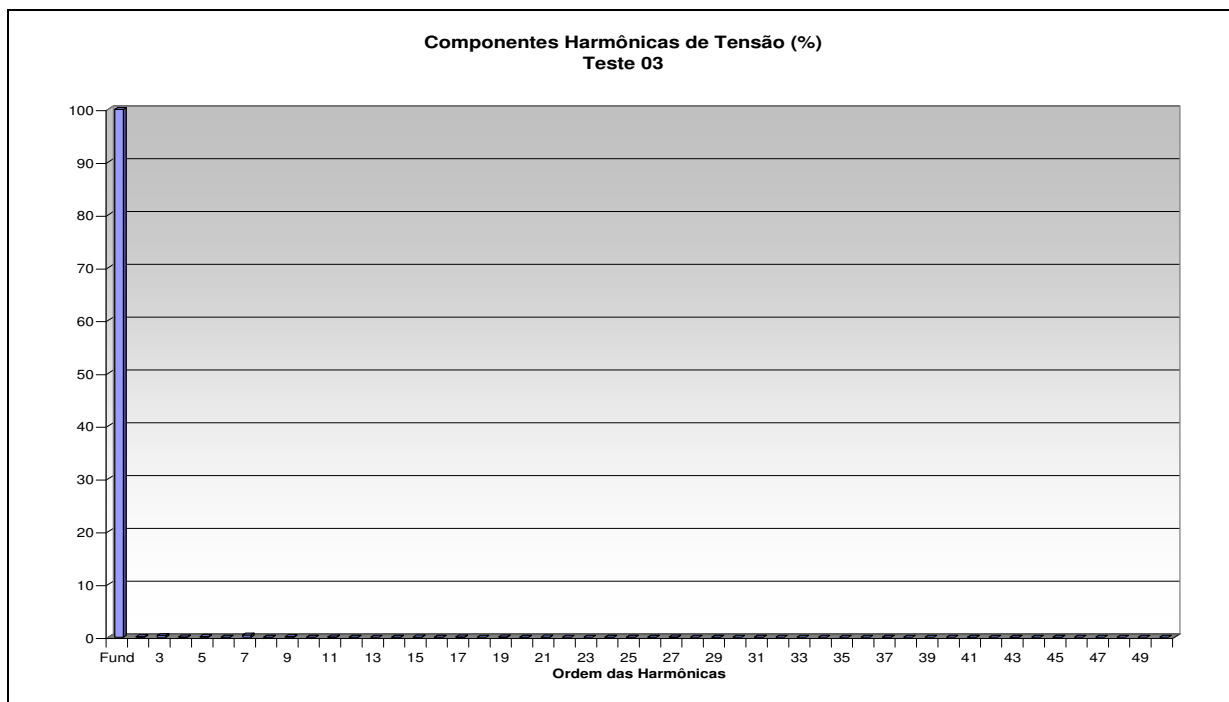


Figura B.61: Gráfico de barras das componentes harmônicas de tensão durante todos os Testes 03

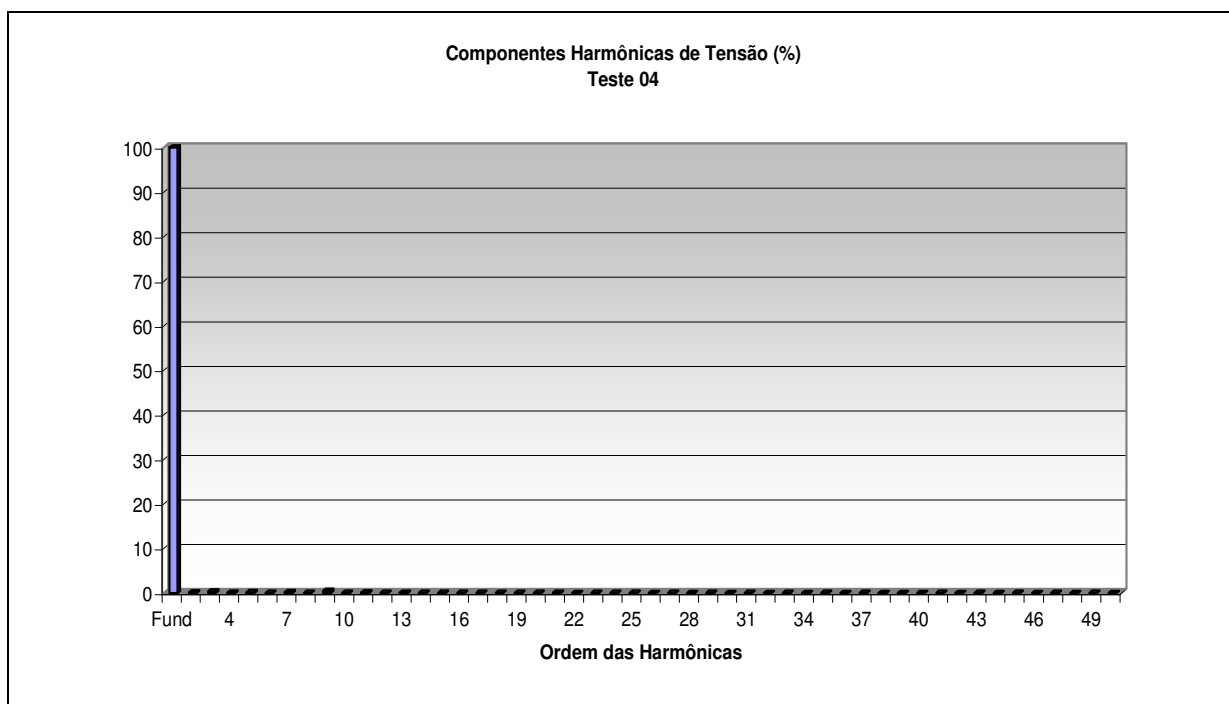


Figura B.62: Gráfico de barras das componentes harmônicas de tensão durante todos os Testes 04

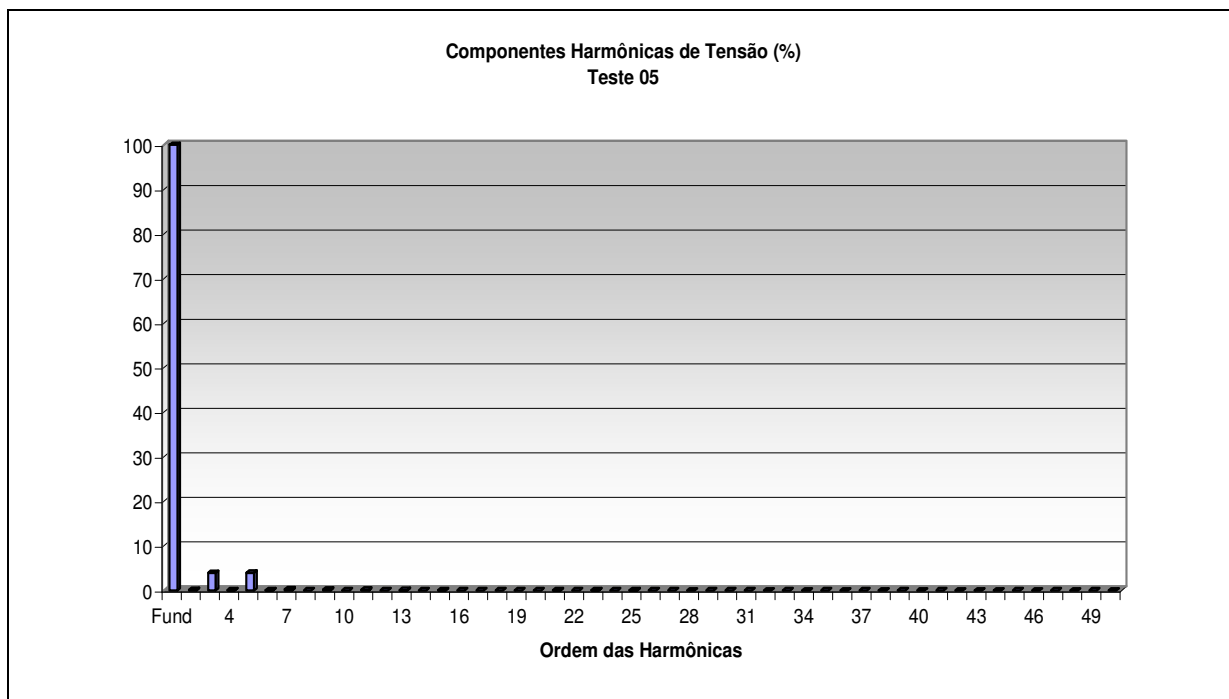


Figura B.63: Gráfico de barras das componentes harmônicas de tensão durante todos os Testes 05

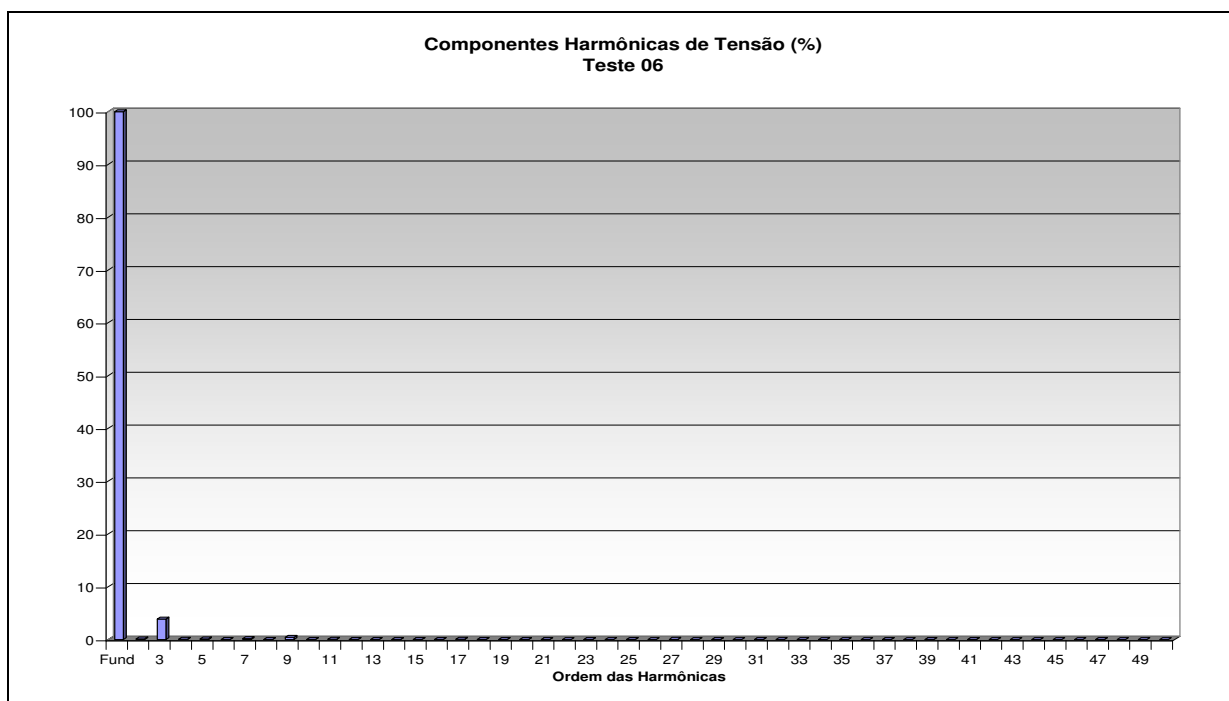


Figura B.64: Gráfico de barras das componentes harmônicas de tensão durante todos os Testes 06

Tabela B.9: Valores calculados para as distorções harmônicas totais de tensão produzidas pelos computadores em cada um dos ensaios monofásicos realizados.

DISTORÇÕES HARMÔNICAS TOTAIS DE TENSÃO - ENSAIOS MONOFÁSICOS									
Ensaio	Micro 1	Micro 2	Micro 3	Micro 4	Micro 5	Micro 6	Micros 123	Micros 456	Micros 1a6
Senoidal	0,24%	0,24%	0,34%	0,34%	0,20%	0,19%	0,35%	0,36%	0,46%
Harmônicas	Médio	5,85%	5,85%	5,63%	5,62%	5,68%	5,68%	5,59%	5,61%
	Máximo	6,47%	6,47%	6,50%	6,51%	6,58%	6,57%	6,48%	6,50%
	Absurdo	6,74%	6,74%	6,78%	6,78%	6,86%	6,84%	6,75%	6,78%

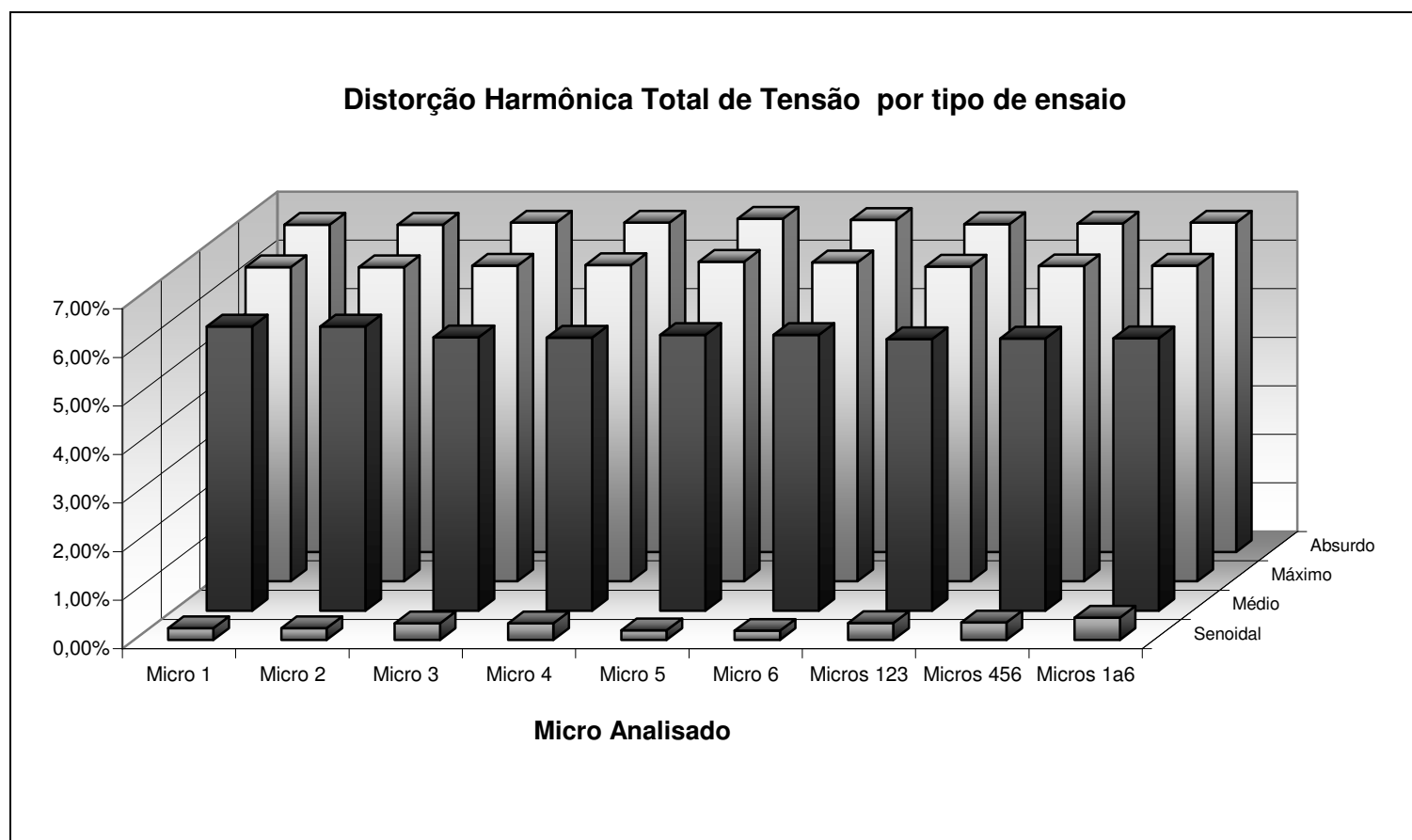


Figura B.65: Gráfico de barras das DHTU's em cada ensaio realizado

Tabela B.10: Valores calculados para as distorções harmônicas totais de corrente produzidas pelos computadores em cada um dos ensaios monofásicos realizados.

DISTORÇÕES HARMÔNICAS TOTAIS DE CORRENTE - ENSAIOS MONOFÁSICOS									
Ensaio	Micro 1	Micro 2	Micro 3	Micro 4	Micro 5	Micro 6	Micros 123	Micros 456	Micros 1a6
Senoidal	162,42%	155,82%	164,57%	147,44%	150,29%	150,28%	153,24%	140,77%	142,56%
Harmônicas	Médio	177,79%	168,18%	185,79%	157,27%	164,89%	182,20%	167,48%	154,16%
	Máximo	180,98%	175,51%	184,52%	157,48%	161,41%	179,19%	165,96%	155,90%
	Absurdo	181,64%	170,71%	175,53%	159,83%	163,15%	177,40%	165,61%	152,26%

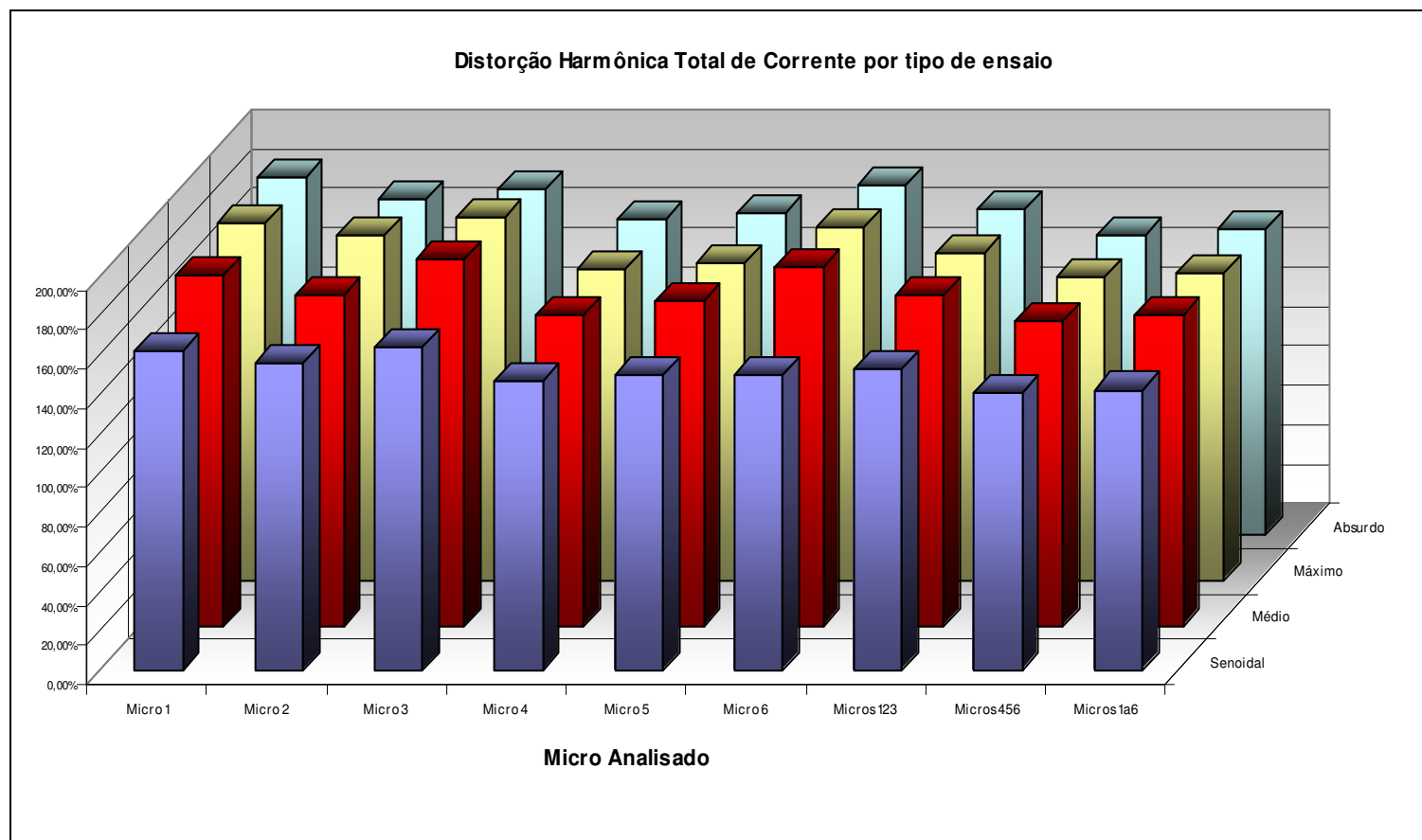


Figura B.66: Gráfico de barras das DHTI's para cada caso dos ensaios Senoidal, Médio, Máximo e Absurdo



## **ANEXO C**

### **Projeto do Indutor de 78mH**

Problemática e descrição do processo de montagem do indutor de 78mH

Um dos problemas encontrados no processo de fabricação do filtro passivo de correntes harmônicas, foi encontrar no mercado os componentes utilizados para implementá-lo. A maneira adotada foi de estipular o valor dos capacitores com valores de capacitância encontrada no mercado, e então adquirir os indutores com os valores dado pela equação (2.52).

Depois de longa procura por fabricante de indutor, foi encontrada no estado do Rio Grande do Sul, uma empresa que os fabricava sob encomenda. Mas a mesma nos pediu um valor elevado pelos componentes, inviabilizando a aquisição dos mesmos. Devido a grande dificuldade na aquisição do indutor, optou-se por utilizar componentes existentes no depósito do SG-11 e pela fabricação indutor que restava.

O método adotado para a fabricação do indutor foi o de tentativa e erro. Primeiro passo foi encontrar no depósito da SG-11 um indutor que se aproximava do valor desejado. Um indutor toroidal de 30mH projetado para uma corrente de 1,2(A) foi o que mais se aproximou, e ao desenrolá-lo constatou-se que haviam aproximadamente 77 (setenta e sete) voltas.

Para conseguir uma indutância próxima da desejada, um novo indutor foi enrolado no núcleo mencionado acima, devendo ter uma indutância de 78mH suportando uma corrente de 2(A).

De acordo com a tabela a seguir, o fio esmaltado deverá ser de 19 AWG. Mas por precaução adotou-se um o fio de 18 AWG, como margem de folga para o projeto.

Tabela C.1: Tabela de fios esmaltados (FONTE: <http://www.geoctys.com/projetoperiferiaV/proj8.htm>).

Nº AWG	Ø (mm)	Secção (mm) <sup>2</sup>	Espiras por cm	Kg por m	Resist. Ω/km	Corrente máx.(A)
0	8,252	53,48	—	—	0,317	150
1	7,348	42,41	—	375	0,40	120
2	6,544	33,63	—	295	0,50	96
3	5,827	26,67	—	237	0,63	78
4	5,189	21,15	—	188	0,80	60
5	4,621	16,77	—	149	1,01	48
6	4,115	13,30	—	118	1,27	38
7	3,665	10,55	—	94	1,70	30
8	3,264	8,36	—	74	2,03	24
9	2,906	6,63	—	58,9	2,56	19
10	2,588	5,26	—	46,8	3,23	15
11	2,305	4,17	—	32,1	4,07	12
12	2,053	3,31	—	29,4	5,13	9,5
13	1,828	2,63	—	23,3	6,49	7,5
14	1,628	2,08	5,6	18,5	8,17	6,0
15	1,450	1,65	6,4	14,7	10,3	4,8
16	1,291	1,31	7,2	11,6	12,9	3,7
17	1,150	1,04	8,4	9,26	16,34	3,2
18	1,024	0,82	9,2	7,3	20,73	2,5
19	0,9116	0,65	10,2	5,79	26,15	2,0
20	0,8118	0,52	11,6	4,61	32,69	1,6
21	0,7230	0,41	12,8	3,64	41,46	1,2
22	0,6438	0,33	14,4	2,89	51,5	0,92

Para a confecção do indutor desejado, o núcleo toroidal foi enrolado com aproximadamente 10 metros do fio esmaltado de 18 AWG. Ao final, o indutor confeccionado foi aferido no *Vector Impedance Meter 480A* e verificou-se que o mesmo possuía uma indutância de 300mH.

Assim sendo, as espiras foram retiradas aos poucos à medida que o indutor se aproximava do valor desejado. Abaixo segue uma foto contendo alguns instantes de medição do indutor no Laboratório de Teoria de Comunicações.



figura C.1: foto do indutor de 300mH.



figura C.2: Vector Impedance Meter 4800A da HP.

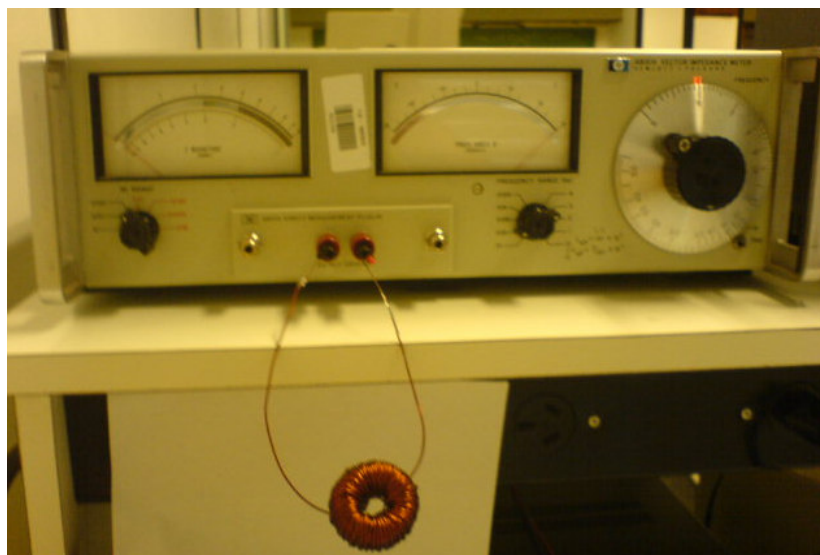


figura C.3: forma que foi medida o valor da indutância .



Figura C.4: indutor de 78mH implementado no filtro de harmônicos

## **ANEXO D**

### **Tabelas e Gráficos**

Testes das componentes harmônicas presentes na rede do Laboratório e dos  
filtros de harmônicas

Tabela D.1: Perfil de tensão da rede elétrica de alimentação do Laboratório

Harm	Tensão			
	Média	Máximo	Mínimo	Desvio Padrão
Fund.	100	100	100	0
2	0	0	0	0
3	0,79	0,95	0,6	0,06
4	0	0	0	0
5	3,1	3,59	2,43	0,11
6	0	0	0	0
7	0,35	0,6	0	0,12
8	0	0	0	0
9	0,01	0,39	0	0,06
10	0	0	0	0
11	0,01	0,37	0	0,04
12	0	0	0	0
13	0	0,37	0	0,03
14	0	0	0	0
15	0	0	0	0
DHTU	3,22	3,59	2,43	0,11

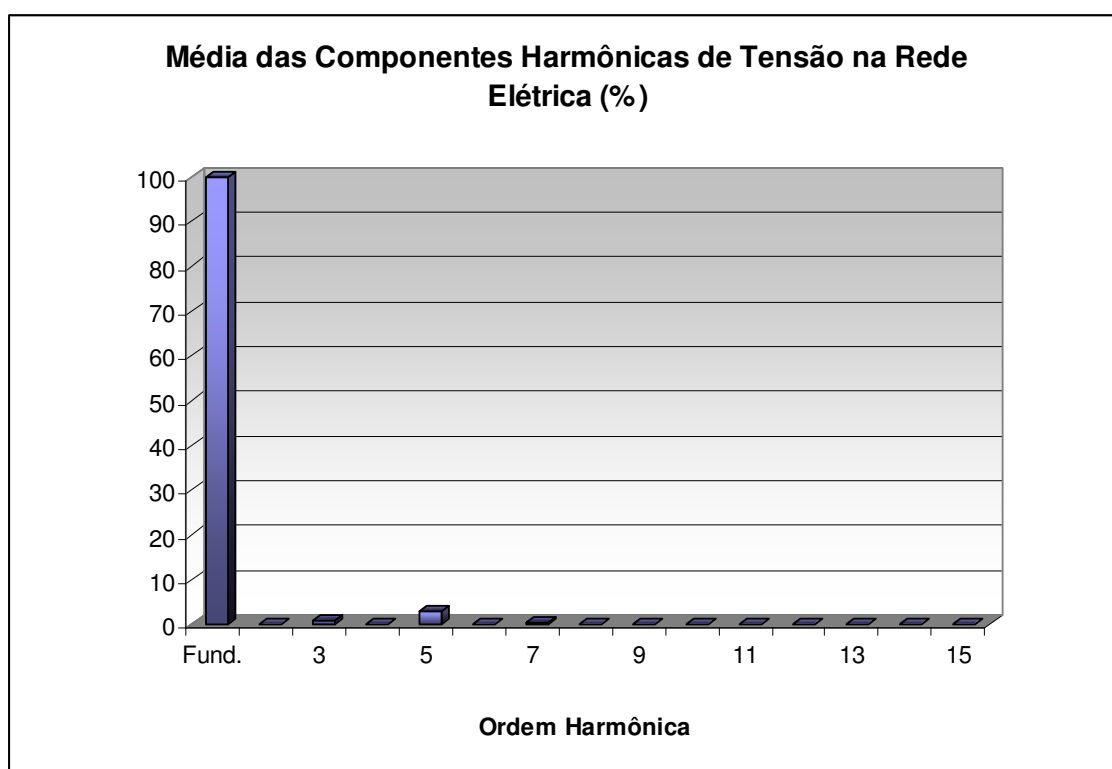


Figura D.1: Gráfico das médias das Componentes Harmônicas de Tensão da rede

Tabela D.2: Perfil de corrente na Década Resistiva no Laboratório

Harm	Corrente			
	Média	Máximo	Mínimo	Desvio Padrão
Fund.	100	100	100	0
2	0	0	0	0
3	0,94	1,05	0,8	0,05
4	0	0	0	0
5	3,15	3,34	2,98	0,07
6	0	0	0	0
7	0,3	0,52	0	0,16
8	0	0	0	0
9	0,01	0,45	0	0,07
10	0	0	0	0
11	0	0	0	0
12	0	0	0	0
13	0,01	0,31	0	0,05
14	0,01	0,44	0	0,05
15	0	0,38	0	0,04
DHTI	3,4	3,58	3,25	0,07

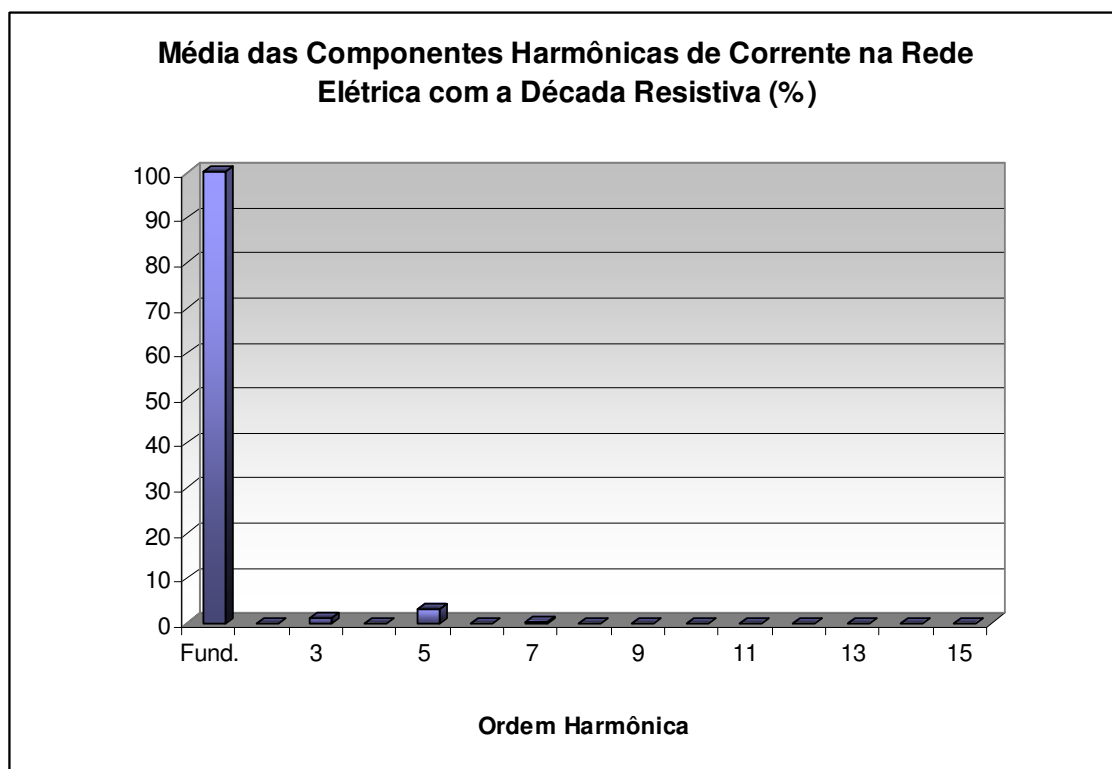


Figura D.2: Gráfico das médias das Componentes Harmônicas de Corrente na Década Resistiva

Tabela D.3: Perfil de Corrente no Computador sem Filtro de Harmônicas

Harm	Corrente			
	Média	Máximo	Mínimo	Desvio Padrão
Fund.	100	100	100	0
2	0,78	5,18	0	0,83
3	93,25	94,91	64,9	4,05
4	0,69	4,5	0	0,73
5	81,93	85,1	41,69	4,61
6	0,64	3,78	0	0,61
7	68	73,23	31,96	3,64
8	0,53	2,83	0	0,54
9	51,62	63,31	22,68	3,59
10	0,45	2,37	0	0,46
11	35,41	57,71	14,13	4,13
12	0,39	3,82	0	0,51
13	21,03	54,08	7,48	5,01
14	0,36	2,43	0	0,48
15	10,72	48,21	4,58	5,74
DHTI	158,57	182,43	88,99	7,64

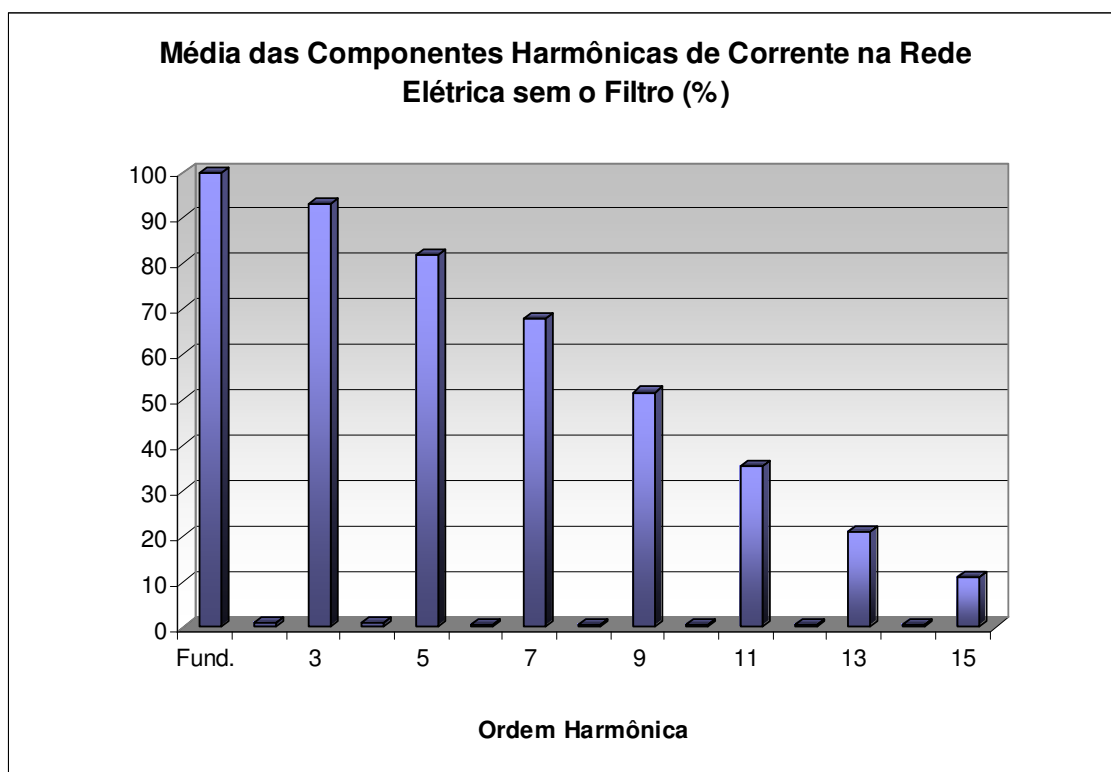


Figura D.3: Gráfico das médias das Componentes Harmônicas de Corrente no Computador sem o Filtro de Harmônicas



Tabela D.4: Perfil de Corrente no Computador com o Filtro Série em By Pass

Harm	Corrente			
	Média	Máximo	Mínimo	Desvio Padrão
Fund.	100	100	100	0
2	0,77	2,99	0	0,64
3	93,9	94,28	93,01	0,25
4	0,71	2,57	0	0,56
5	82,23	82,95	79,76	0,55
6	0,62	2,14	0	0,5
7	67,45	68,62	63,09	0,94
8	0,53	2,04	0	0,41
9	50,26	52,02	44,71	1,24
10	0,39	1,79	0	0,36
11	33,23	35,88	26,9	1,41
12	0,32	1,61	0	0,31
13	17,96	21,62	12,15	1,35
14	0,24	1,58	0	0,32
15	6,29	11,95	3,88	0,94
DHTI	156,12	159,29	148,75	1,65

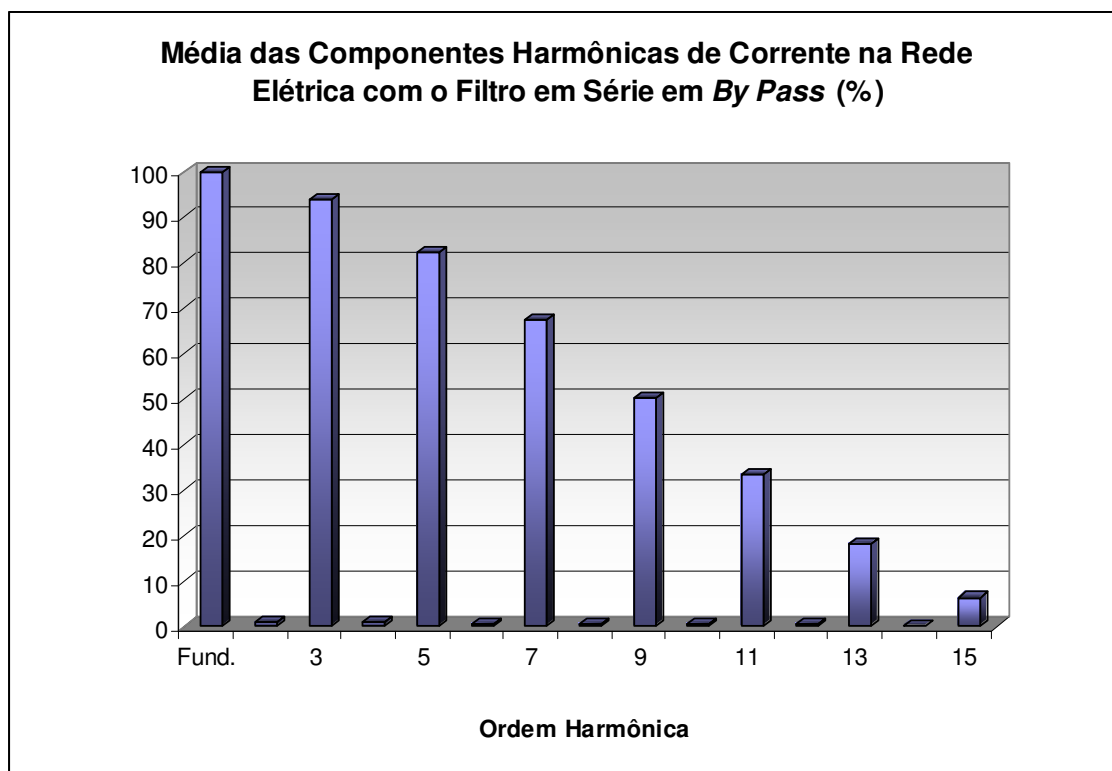


Figura D.4: Gráfico das Médias das Componentes Harmônicas no Computador com o Filtro Série em By Pass

Tabela D.5: Perfil de Corrente no Computador com o Filtro Série ativado

Harm	Corrente			
	Média	Máximo	Mínimo	Desvio Padrão
Fund.	100	100	100	0
2	1,23	3,9	0	0,69
3	76,48	80,06	74,21	1,46
4	1,12	3,62	0	0,72
5	63,25	67,46	59,18	2,19
6	1,05	3,18	0	0,6
7	56,35	59,77	53,53	1,55
8	0,99	2,26	0	0,55
9	40,34	42,83	37,71	1,3
10	1,11	3,22	0	0,66
11	22,76	26,04	18,71	1,91
12	1,21	2,45	0	0,58
13	11,06	15,03	6,71	2,16
14	1,26	3,18	0	0,7
15	10,76	14,23	6,5	1,73
DHTI	128,64	133,88	123,75	2,39

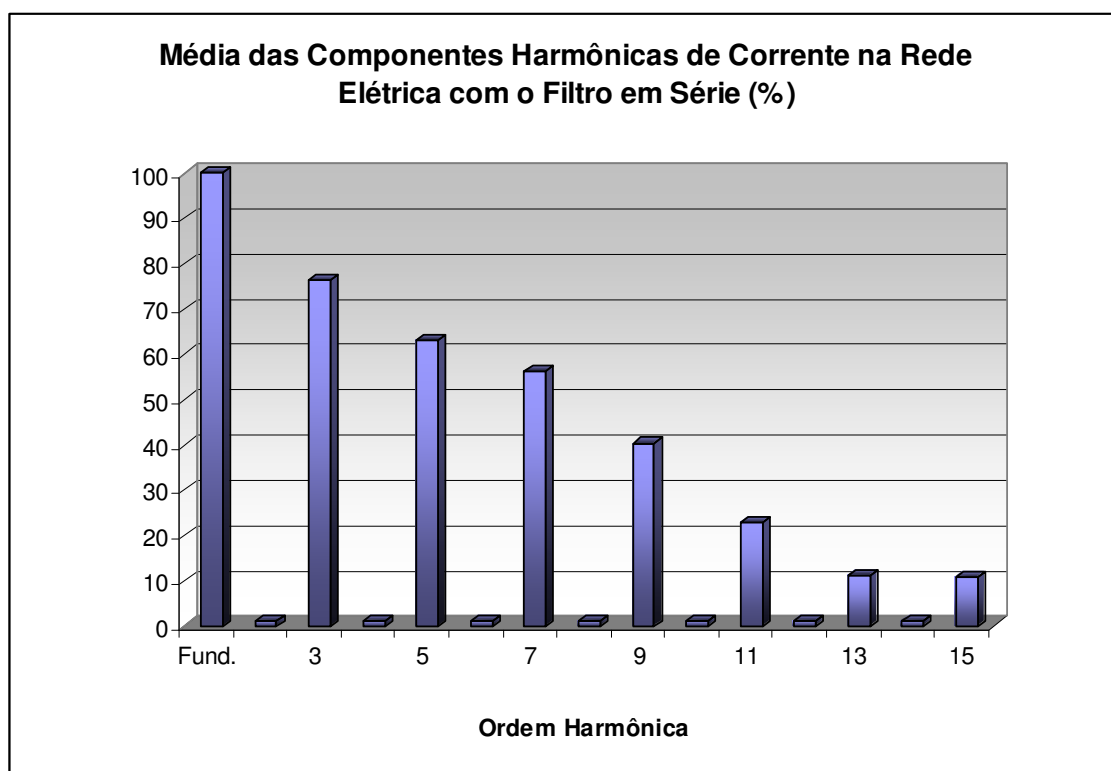


Figura D.5: Gráfico das Médias das Componentes Harmônicas no Computador com o Filtro Série ativado

Tabela D.6: Perfil de Corrente no Computador com o Filtro em Derivação em By Pass

Harm	Corrente			
	Média	Máximo	Mínimo	Desvio Padrão
Fund.	100	100	100	0
2	1,63	6,27	0	1,12
3	92,03	94,18	90,67	0,41
4	1,41	5,15	0	0,93
5	77,62	82,36	74,33	1,03
6	1,16	4,52	0	0,72
7	60,52	70,5	55,01	1,88
8	0,89	3,2	0	0,55
9	41,77	55,33	34,71	2,49
10	0,7	2,61	0	0,46
11	24,83	40,25	17,43	2,68
12	0,59	2,36	0	0,44
13	12,15	25,46	6,47	2,2
14	0,56	2,03	0	0,39
15	6,82	14,3	5,2	1
DHTI	144,53	162,41	136,01	3,14

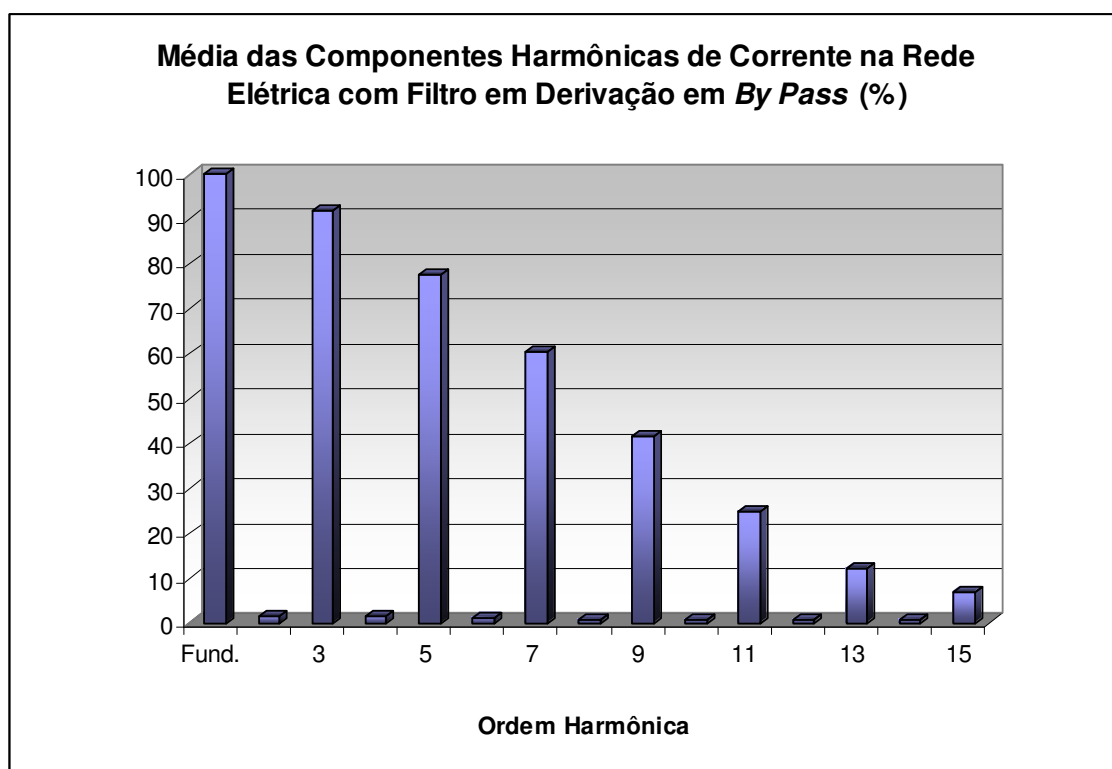


Figura D.6: Gráfico das Médias das Componentes Harmônicas no Computador com o Filtro em Derivação em By Pass

Tabela D.7: Perfil de Corrente no Computador com o Filtro em Derivação ativado

Harm	Corrente			
	Média	Máximo	Mínimo	Desvio Padrão
Fund.	100	100	100	0
2	2,73	50,36	0	10,17
3	38,16	41,03	36,23	0,78
4	1,89	32,46	0	6,36
5	21,95	24,42	18,51	0,87
6	0,65	8,41	0	1,26
7	22,28	24,28	19,78	0,91
8	1,13	19,87	0	3,88
9	13,5	15,53	10,33	1,2
10	0,36	6,36	0	0,78
11	10,13	11,78	8,57	0,67
12	0,64	11,36	0	2,09
13	8,46	9,66	6,42	0,57
14	0,38	5,52	0	0,8
15	4,97	7,7	1,76	0,97
DHTI	60,62	89,19	54,78	6,16

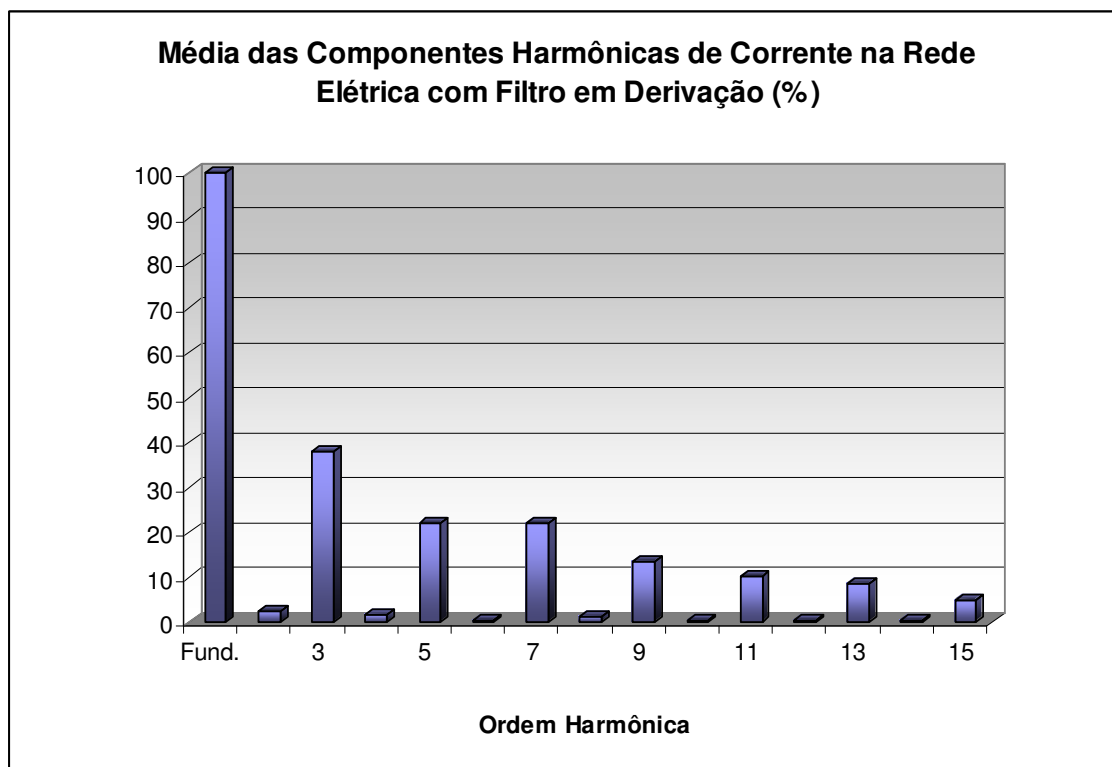


Figura D.7: Gráfico das Médias das Componentes Harmônicas no Computador com o Filtro em Derivação ativado



