

**Caracterização de harmônicos causados por  
equipamentos eletro-eletrônicos residenciais e  
comerciais no sistema de distribuição de energia  
elétrica**

IGOR AMARIZ PIRES

Orientador:

MANUEL LOSADA y GONZALEZ

Dissertação apresentada ao Programa de  
Pós-Graduação de Engenharia Elétrica da  
UFMG, como parte dos requisitos para  
obtenção do título de Mestre em  
Engenharia Elétrica.

PPGEE – UFMG  
Março de 2006

Ao meu pai  
Que fez com que seu sorriso não se apagasse  
da memória daqueles que o conheceram

# Agradecimentos

Agradeço a Deus pela oportunidade da vida e por todo o caminho que tem me reservado.

Ao meu pai que deixou seu legado de persistência, humildade e abnegação pelo próximo.

À minha mãe por me ensinar a serenidade na tormenta de uma tempestade.

À minha namorada por seu amor, companheirismo, dedicação e paciência.

Às minhas irmãs pela amizade.

Aos meus amigos pelo sorriso.

Ao CIPMOI pela oportunidade de fazer parte desta família e ter sido uma escola completa, tanto no aspecto técnico quanto humano.

À UFMG pela excelência de ensino.

Ao Engenheiro Paulo Arpini, eletricitas e funcionários da concessionária ELFSM por seus valiosos ensinamentos.

# Resumo

A não-linearidade no perfil de cargas elétricas de consumidores residenciais e comerciais vem aumentando, principalmente nestes tempos de busca de uma maior eficiência energética por parte dos aparelhos domésticos, assim como o acesso da população aos bens de consumo eletrônicos. A preocupação por uma melhor qualidade da energia vem crescendo por parte dos consumidores e se solidificando nas companhias de energia. Este trabalho tem por objetivo caracterizar os harmônicos causados por aparelhos eletro-eletrônicos de consumidores residenciais e comerciais e estudar o impacto destes harmônicos no sistema de distribuição de energia elétrica.

Primeiramente será mostrado o efeito maléfico da circulação de harmônicos no sistema elétrico e em seus componentes. Para avaliar estes, várias medições foram realizadas em aparelhos eletrodomésticos e de uso comercial para caracterizá-los quanto a produção de componentes harmônicos. Consumidores residenciais e comerciais também foram medidos, bem como os transformadores que alimentam estes.

Com as medições, simulações de cenários de utilização destas cargas não-lineares, avaliando resultados na corrente demandada quanto ao volume de harmônicos produzidos, foram realizadas. Será mostrada a correlação inversa existente entre o valor eficaz da corrente e a distorção que a mesma apresenta.

Por último, procederam-se simulações com o objetivo de avaliar a distorção de tensão que os harmônicos provenientes de consumidores residenciais e comerciais provocam nos sistemas de baixa e média tensão considerados.

# Abstract

The non linearity on the profile of residential and commercial electrical loads has been growing, mainly in these days of seeking for bigger energy efficiency of household appliances as well as the access of the population to electronic consumer goods. The preoccupation for a better power quality has been growing by the customer and also by the energy distributors. This work aims to characterize the harmonics caused by electrical-electronic households of residential and commercial consumers and to study the impacts of these harmonics caused on the distribution system.

First of all, it will be shown the bad effects of harmonics on the electrical system and its components. To assess these, several measurements were done in household appliances in order to characterize the production of harmonics. Residential and commercial customers were also measured as well as the transformers which fed them.

With the measurements, simulations of situations of the utilization the non-linear loads were made evaluating the results on the demanded current by the produced harmonics. It will be shown the opposite correlation between the rms value of the current and its distortion.

At last, simulations were made in order to evaluate the distortion in the voltage caused by the harmonics which were produced by residential and commercial customers on systems of low and medium voltage.

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1	Qualidade de energia .....	1
1.2	Conservação de energia .....	3
1.3	Harmônicos.....	3
1.4	Conclusões gerais .....	8
<b>2</b>	<b>Efeitos de harmônicos no sistema de distribuição e limites segundo as principais normas nacionais e internacionais.....</b>	<b>9</b>
2.1	Medidores de energia.....	10
2.2	Condutores.....	13
2.3	Iluminação .....	15
2.4	Máquinas rotativas.....	15
2.5	Equipamentos eletrônicos.....	20
2.6	Interferência telefônica .....	21
2.7	Transformadores .....	22
2.8	Capacitores .....	23
2.9	Relés de proteção.....	24
2.10	Síntese dos efeitos dos harmônicos e grau de imunidade.....	25
2.11	Limites de harmônicos segundo normas nacionais e internacionais .....	26
2.12	Conclusões gerais .....	30
<b>3</b>	<b>Caracterização de aparelhos eletrodomésticos.....</b>	<b>31</b>
3.1	Instrumento de medição.....	31
3.2	Aparelhos eletrodomésticos.....	32
3.2.1	Iluminação .....	33
3.2.2	Eletrônicos .....	40
3.2.3	Refrigeradores .....	43
3.2.4	Condicionadores de ar .....	45
3.2.5	Aquecimento.....	47
3.2.6	Motores.....	49
3.3	Conclusões gerais .....	50
<b>4</b>	<b>Cenários harmônicos em cargas residenciais e comerciais .....</b>	<b>52</b>
4.1	Consumidores residenciais .....	52

4.1.1	Residência de consumo baixo.....	53
4.1.2	Residências de consumo médio.....	56
4.1.3	Residência de consumo alto .....	64
4.2	Consumidores comerciais.....	72
4.2.1	Venda de roupas .....	73
4.2.2	Venda de computadores.....	75
4.2.3	Curso de informática .....	77
4.2.4	Agência de turismo.....	79
4.3	Prédio comercial .....	81
4.4	Transformadores .....	85
4.4.1	Transformador de consumidores residenciais .....	85
4.4.2	Transformador de consumidores comerciais.....	90
4.4.3	Transformador de consumidores residenciais e comerciais .....	93
4.5	Conclusões Gerais .....	103
<b>5</b>	<b>Simulação de um sistema de distribuição em áreas residenciais e comerciais</b>	<b>104</b>
5.1	Formas de ondas de conjunto de eletrodomésticos em consumidores residenciais e comerciais .....	105
5.2	Sistema de um alimentador de distribuição secundário.....	108
5.3	Simulação de distribuição primária .....	115
5.4	Conclusões gerais .....	120
	<b>Conclusões.....</b>	<b>121</b>
	<b>Propostas de futuros trabalhos .....</b>	<b>123</b>
	<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>124</b>
	<b>Apêndice A – Formas de onda e espectro harmônico das simulações de cenários residenciais e comerciais .....</b>	<b>130</b>
	<b>Apêndice B - Medidas de mitigação de harmônicos.....</b>	<b>144</b>
B.1	Filtros passivos .....	145
B.1.1	Filtro sintonizado .....	145
B.1.2	Filtro amortecido.....	146
B.1.3	Aplicações.....	147
B.2	Filtro ativo.....	153
B.2.1	Filtro ativo paralelo.....	154
B.2.2	Filtro ativo série .....	154

B.2.3 Filtro ativo série/paralelo .....	155
B.3 Filtro passivo versus Filtro ativo .....	156
B.4 Conclusões gerais .....	156



# Figuras

Figura 3-1 - ION 7650 (Power Measurement©) .....	32
Figura 3-2- Lâmpada incandescente dimerizada em 75% de iluminação.....	34
Figura 3-3 - Lâmpada incandescente dimerizada em 25% de iluminação.....	34
Figura 3-4 - Forma de onda de corrente típica de uma LFC .....	36
Figura 3-5 - Forma de onda de corrente típica de lâmpadas fluorescentes convencionais com reatores eletromagnéticos .....	37
Figura 3-6 - Forma de onda de corrente típica de lâmpadas fluorescentes convencionais com reatores eletrônicos .....	37
Figura 3-7 - Forma de onda de corrente da lâmpada mista .....	39
Figura 3-8 - Forma de onda de corrente da lâmpada de vapor de mercúrio.....	39
Figura 3-9 - Forma de onda de corrente da lâmpada de vapor de sódio.....	39
Figura 3-10 - Forma de onda de corrente típica de um computador .....	42
Figura 3-11 - Forma de onda de corrente típica de uma televisão .....	42
Figura 3-12 - Forma de onda de corrente típica dos outros aparelhos eletrônicos mencionados (aparelho de som 3) .....	42
Figura 3-13 - Forma de onda de corrente típica de aparelhos refrigeradores.....	44
Figura 3-14 - Corrente eficaz ao longo do tempo (geladeira 3) .....	45
Figura 3-15 - Forma de onda de corrente de um condicionador de ar – modo resfriar..	46
Figura 3-16 - Forma de onda de corrente de um condicionador de ar – modo ventilar .	46
Figura 3-17 - Curva de corrente eficaz ao longo do tempo no ferro de passar roupa ....	48
Figura 3-18 - Forma de onda de corrente de um aparelho de microondas .....	48
Figura 3-19 - Forma de onda de corrente típica de eletrodomésticos com motores.....	50
Figura 4-1- Corrente eficaz ao longo do tempo para a residência com consumo baixo.	54
Figura 4-2 - THD de Corrente ao longo do tempo para a residência com consumo baixo .....	54
Figura 4-3 - THD de tensão ao longo do tempo para a residência com consumo baixo	55
Figura 4-4 - Forma de onda de corrente às 13 horas – consumo baixo.....	55
Figura 4-5 - Forma de onda de corrente às 02 horas – consumo baixo.....	55
Figura 4-6 - Forma de onda de corrente às 12 horas – consumo baixo.....	55
Figura 4-7 - Forma de onda de corrente às 21 horas – consumo baixo.....	56
Figura 4-8- Corrente eficaz ao longo do tempo para residência com consumo médio 1	57
Figura 4-9 - THD de Corrente ao longo do tempo para residência com consumo médio 1 .....	58
Figura 4-10 - THD de tensão ao longo do tempo para residência com consumo médio 1 .....	58
Figura 4-11 - Forma de onda de corrente às 21 horas – consumo médio 1.....	58
Figura 4-12 - Forma de onda de corrente às 13 horas – consumo médio 1.....	59
Figura 4-13 - Forma de onda de corrente às 12 horas – consumo médio 1.....	59
Figura 4-14 - Forma de onda de corrente às 02 horas – consumo médio 1.....	59
Figura 4-15 - Corrente eficaz ao longo do tempo para residência com consumo médio 2 .....	61
Figura 4-16 - THD de corrente ao longo do tempo para residência com consumo médio 2 .....	61
Figura 4-17 - THD de tensão ao longo do tempo para residência com consumo médio 2 .....	62
Figura 4-18 - Forma de onda de corrente às 02 horas – consumo médio 2.....	62
Figura 4-19 - Forma de onda de corrente às 12 horas – consumo médio 2.....	62
Figura 4-20 - Forma de onda de corrente às 15 horas – consumo médio 2.....	63

Figura 4-21 - Forma de onda de corrente às 21 horas – consumo médio 2.....	63
Figura 4-22 - Corrente eficaz em 24 horas – Consumo alto – Fases A e B .....	65
Figura 4-23 - Corrente eficaz em 24 horas – Consumo alto – Fase C e neutro.....	65
Figura 4-24 - THD de corrente em 24 horas – Consumo alto – Fases A, B e C .....	66
Figura 4-25 - THD de corrente em 24 horas – Consumo alto – Neutro.....	66
Figura 4-26 - THD de tensão em 24 horas – Consumo alto – Fases A, B e C .....	67
Figura 4-27 - Formas de onda de corrente às 12 horas – consumo alto .....	68
Figura 4-28 - Formas de onda de corrente às 18 horas – consumo alto .....	68
Figura 4-29 - Formas de onda de corrente às 21 horas – consumo alto .....	69
Figura 4-30 - Formas de onda de corrente às 02 horas – consumo alto .....	69
Figura 4-31 - Corrente eficaz ao longo do tempo – Venda de roupas.....	73
Figura 4-32 - THD de corrente ao longo do tempo – Venda de roupas .....	73
Figura 4-33 - THD de tensão ao longo do tempo – Venda de roupas .....	74
Figura 4-34 - Formas de onda de corrente – Venda de roupas.....	74
Figura 4-35- Corrente eficaz ao longo do tempo – Venda de computadores .....	75
Figura 4-36 - THD de corrente ao longo do tempo – Venda de computadores .....	75
Figura 4-37 - THD de tensão ao longo do tempo – Venda de computadores .....	75
Figura 4-38 - Forma de onda de corrente – Venda de computadores – Menor valor eficaz de corrente.....	76
Figura 4-39 - Forma de onda de corrente – Venda de computadores – Maior valor eficaz de corrente .....	76
Figura 4-40 - Corrente eficaz ao longo do tempo – Curso de informática.....	77
Figura 4-41 - THD de corrente ao longo do tempo – Curso de informática .....	78
Figura 4-42 - THD de tensão ao longo do tempo – Curso de informática .....	78
Figura 4-43 - Forma de onda de corrente – Curso de informática .....	78
Figura 4-44 - Corrente eficaz ao longo do tempo – Agência de turismo .....	79
Figura 4-45 - THD de corrente ao longo do tempo – Agência de turismo.....	80
Figura 4-46 - THD de tensão ao longo do tempo – Agência de turismo.....	80
Figura 4-47 - Forma de onda de corrente – Agência de turismo.....	80
Figura 4-48 - Corrente eficaz ao longo do tempo – Prédio Comercial.....	82
Figura 4-49 - THD de corrente ao longo do tempo – Prédio Comercial .....	82
Figura 4-50 - THD de tensão ao longo do tempo – Prédio Comercial.....	83
Figura 4-51 - Forma de onda de corrente – Prédio Comercial – horário de expediente	83
Figura 4-52 - Forma de onda de corrente – Prédio Comercial – horário de almoço .....	83
Figura 4-53 - Forma de onda de corrente – Prédio Comercial - horário de Madrugada	83
Figura 4-54 - Corrente eficaz ao longo do tempo – Transformador de consumidores residenciais – Fases A e B .....	85
Figura 4-55 - Corrente eficaz ao longo do tempo – Transformador de consumidores residenciais – Fase C e neutro .....	86
Figura 4-56 - THD de corrente ao longo do tempo – Transformador de consumidores residenciais – Fases A e B .....	86
Figura 4-57 - THD de corrente ao longo do tempo – Transformador de consumidores residenciais – Fase C e neutro .....	87
Figura 4-58 - THD de tensão ao longo do tempo – Transformador de consumidores residenciais .....	87
Figura 4-59 - Forma de onda de corrente – Transformador de consumidores residenciais – 12:00 .....	88
Figura 4-60 - Forma de onda de corrente – Transformador de consumidores residenciais – 21:00.....	88

Figura 4-61 - Forma de onda de corrente – Transformador de consumidores residenciais – 02:00.....	88
Figura 4-62 - Corrente eficaz ao longo do tempo de medição – Transformador de consumidores comerciais.....	90
Figura 4-63 - THD de corrente ao longo do tempo de medição – Transformador de consumidores comerciais – Fases A, B e C.....	90
Figura 4-64 - THD de corrente ao longo do tempo de medição – Transformador de consumidores comerciais – Neutro .....	91
Figura 4-65 - THD de tensão ao longo do tempo de medição – Transformador de consumidores comerciais.....	91
Figura 4-66 - Forma de onda de corrente – Transformador de consumidores comerciais – horário de expediente.....	91
Figura 4-67 - Forma de onda de corrente – Transformador de consumidores comerciais – horário de almoço .....	92
Figura 4-68 - Forma de onda de corrente – Transformador de consumidores comerciais – horário de madrugada .....	92
Figura 4-69- Corrente eficaz ao longo do tempo de medição – Transformador de consumidores residenciais e comerciais de 75 kVA – Fases A e B .....	94
Figura 4-70 - Corrente eficaz ao longo do tempo de medição – Transformador de consumidores residenciais e comerciais de 75 kVA – Fase C e neutro .....	94
Figura 4-71 - THD de Corrente ao longo do tempo de medição – Transformador de consumidores residenciais e comerciais de 75 kVA – Fases A, B e C.....	95
Figura 4-72 - THD de Corrente ao longo do tempo de medição – Transformador de consumidores residenciais e comerciais de 75 kVA – Neutro .....	95
Figura 4-73 - THD de Tensão ao longo do tempo medição – Transformador de consumidores residenciais e comerciais de 75 kVA .....	96
Figura 4-74 - Forma de onda de corrente– Transformador de consumidores residenciais e comerciais de 75 kVA – 02 horas .....	96
Figura 4-75 - Forma de onda de corrente– Transformador de consumidores residenciais e comerciais de 75 kVA – 12 horas .....	96
Figura 4-76 - Forma de onda de corrente– Transformador de consumidores residenciais e comerciais de 75 kVA – 21 horas .....	97
Figura 4-77 - Corrente eficaz ao longo do tempo de medição – Transformador de consumidores residenciais e comerciais de 112,5 kVA – Fases A e B .....	98
Figura 4-78 - Corrente eficaz ao longo do tempo de medição – Transformador de consumidores residenciais e comerciais de 112,5 kVA – Fase C e neutro .....	99
Figura 4-79 - THD de Corrente ao longo do tempo de medição – Transformador de consumidores residenciais e comerciais de 112,5 kVA – Fases A, B e C .....	99
Figura 4-80 - THD de Corrente ao longo do tempo de medição – Transformador de consumidores residenciais e comerciais de 112,5 kVA – Neutro .....	100
Figura 4-81 - THD de Tensão ao longo do tempo de medição – Transformador de consumidores residenciais e comerciais de 112,5 kVA .....	100
Figura 4-82 - Forma de onda de corrente– Transformador de consumidores residenciais e comerciais de 112,5 kVA – 02 horas.....	101
Figura 4-83 - Forma de onda de corrente – Transformador de consumidores residenciais e comerciais de 112,5 kVA – 12 horas .....	101
Figura 4-84 - Forma de onda de corrente – Transformador de consumidores residenciais e comerciais de 112,5 kVA –21 horas .....	101
Figura 5-1 - Modelagem de cargas por fonte de correntes harmônicos e ramo paralelo R-L.....	105

Figura 5-2 - Forma de onda de corrente da simulação 23 (televisão em ambiente iluminado por lâmpada de 100W) .....	107
Figura 5-3 - Forma de onda de corrente da simulação 20 (Computador em ambiente iluminado por LFC de 25 W + televisão, com ambiente iluminado por LFC de 25 W e compressor da geladeira ligado) .....	107
Figura 5-4 - Forma de onda de corrente da simulação 13 (Televisão, em ambiente iluminado por LFC de 25 W, compressor da geladeira ligado e cozinha utilizando iluminação fluorescente de reator eletromagnético 1x40W).....	108
Figura 5-5 - Sistema de distribuição secundário .....	109
Figura 5-6 - Bloco número 2 da figura 5-5 – “splitter” com os blocos de casas monofásicas representadas .....	111
Figura 5-7 - Correntes resultantes de simulação no transformador – 12 horas .....	111
Figura 5-8 - Correntes resultantes de simulação no transformador – 02 horas .....	112
Figura 5-9 - Correntes resultantes de simulação no transformador – 21 horas .....	112
Figura 5-10 – Mapa mostrando o percurso do alimentador primário – 11,4 kV (em negrito) .....	116
Figura B - 1 - Filtro Sintonizado RLC.....	145
Figura B - 2 - Módulo da impedância versus frequência num filtro sintonizado.....	146
Figura B - 3 - Filtro amortecido.....	147
Figura B - 4 - Módulo da impedância versus frequência do filtro amortecido .....	147
Figura B - 5 - Filtro duplo sintonizado [69] .....	148
Figura B - 6 - Módulo da impedância versus harmônicos – filtro duplamente sintonizado .....	148
Figura B - 7 - Módulo da impedância versus harmônico – filtro duplamente sintonizado – ramos série e paralelo .....	149
Figura B - 8 - Diagrama trifilar do Filtro Passivo de redes secundárias [70].....	150
Figura B - 9 - Ângulo da impedância do filtro .....	151
Figura B - 10 - Módulo da impedância do filtro implementado [70].....	152
Figura B - 11 - Filtro ativo paralelo [73].....	154
Figura B - 12 - Filtro ativo série [73] .....	155
Figura B - 13 - UPQC - Filtros ativos série/paralelo [73] .....	155
Figura B - 14 - Retificador trifásico [75].....	156

# Tabelas

Tabela 1-1- Influência dos harmônicos no acréscimo da corrente e na redução do fator de potência [5] .....	4
Tabela 1-2 - Resultados experimentais [17].....	7
Tabela 2-1 - Consumidores selecionados para avaliação de medidores de energia [19] 11	
Tabela 2-2 - Erros experimentais e simulados em medidores eletromagnéticos [22]....	13
Tabela 2-3 - Exemplo de cálculo do HDF [24] .....	14
Tabela 2-4 - Harmônicos de um motor trifásico alimentado por inversor de seis pulsos .....	16
Tabela 2-5 - Direção de rotação dos harmônicos em motores monofásicos .....	17
Tabela 2-6 - Perdas no motor .....	18
Tabela 2-7 - Formas de onda aplicada no exemplo em [27] .....	19
Tabela 2-8 - Resultados do exemplo de aplicação de ondas de tensão distorcidas em motores de indução trifásicos [27] .....	19
Tabela 2-9 - Pesos TIF para várias frequências [18].....	22
Tabela 2-10 - Efeito de harmônicos em componentes do sistema elétrico e grau de imunidade .....	25
Tabela 2-11- Limites globais de harmônicos expressos em porcentagem da tensão fundamental [39].....	26
Tabela 2-12 - Limites de distorção de tensão [18] .....	26
Tabela 2-13 – Limites de harmônicos individuais em sistema públicos de baixa tensão (240V e 415V) conforme norma IEC 61000-2-2 (extraída de Dugan [6]).....	27
Tabela 2-14 - Limites de distorção de corrente para sistemas de distribuição ( $V \leq 69$ kV).....	27
Tabela 2-15 - Limites de distorção de corrente para sistemas de subtransmissão ( $69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$ ).....	28
Tabela 2-16 - Limites de distorção de corrente para sistemas de transmissão ( $V > 161$ kV).....	28
Tabela 2-17 - Limites de correntes harmônicas para equipamentos classe A conforme norma IEC 61000-3-2 (extraída de Dugan [6]) .....	28
Tabela 2-18 - Limites de correntes harmônicas para equipamentos classe C conforme norma IEC 61000-3-2 (extraída de R.C. Dugan [6]).....	29
Tabela 2-19 - Limites de correntes harmônicas para equipamentos classe D conforme norma IEC 61000-3-2 (extraída de Dugan [6]) .....	29
Tabela 2-20 - Limites de correntes harmônicas para equipamentos com correntes entre 16 A e 75 A conforme norma IEC 61000-3-4 (extraída de Dugan [6]) .....	29
Tabela 3-1 - THD's de tensão e corrente em lâmpadas incandescentes.....	33
Tabela 3-2 - THD's de lâmpadas (100 W) incandescentes dimerizadas.....	34
Tabela 3-3- Conteúdo harmônico da lâmpada incandescente 4 (100W) com dimmer 2 (tabela 3-2).....	35
Tabela 3-4 - THD's de Lâmpadas Fluorescentes Compactas.....	35
Tabela 3-5 - Conteúdo harmônico de uma LFC (amostra 4).....	36
Tabela 3-6 - THD's de lâmpadas fluorescentes convencionais com reatores eletromagnéticos.....	37
Tabela 3-7 - THD's de lâmpadas fluorescentes convencionais com reatores eletrônicos .....	37
Tabela 3-8 - Conteúdo harmônico de lâmpadas fluorescentes convencionais com reatores eletromagnéticos e com reatores eletrônicos .....	38
Tabela 3-9 - THD's de lâmpadas mista, vapor de mercúrio e vapor de sódio .....	39

Tabela 3-10- Conteúdo harmônico de lâmpadas Mista, Vapor de Mercúrio e Vapor de Sódio.....	40
Tabela 3-11 - THD's de aparelhos eletrônicos.....	41
Tabela 3-12 - Conteúdo harmônico de um computador, uma televisão e um aparelho de som .....	43
Tabela 3-13 - THD's de aparelhos refrigeradores.....	44
Tabela 3-14 - Conteúdo harmônico de uma geladeira.....	45
Tabela 3-15 - THD's de Condicionadores de ar.....	46
Tabela 3-16 - Conteúdo harmônico do condicionador de ar 9 nos modos resfriar e ventilar.....	47
Tabela 3-17 - THD's de aparelhos de aquecimento .....	47
Tabela 3-18 - Conteúdo harmônico de um aparelho de microondas.....	48
Tabela 3-19 - THD's de eletrodomésticos baseados em motores .....	49
Tabela 3-20- Conteúdo harmônico de uma lavadora de roupas .....	50
Tabela 4-1 - Consumidores residenciais.....	53
Tabela 4-2- Conteúdos harmônicos das formas de onda de corrente da residência de consumo baixo.....	56
Tabela 4-3 - Conteúdos harmônicos das formas de onda de corrente da residência de consumo médio 1.....	60
Tabela 4-4 - Conteúdos harmônicos das formas de onda de corrente da residência de consumo médio 2.....	64
Tabela 4-5 - Conteúdo harmônico da forma de onda de corrente da residência de consumo alto às 12 horas.....	70
Tabela 4-6 - Conteúdo harmônico da forma de onda de corrente da residência de consumo alto às 18 horas.....	70
Tabela 4-7 - Conteúdo harmônico da forma de onda de corrente da residência de consumo alto às 21 horas.....	71
Tabela 4-8 - Conteúdo harmônico da forma de onda de corrente da residência de consumo alto às 02 horas da manhã .....	71
Tabela 4-9 - Consumidores comerciais .....	72
Tabela 4-10- Conteúdo harmônico das formas de onda de corrente – Venda de roupas	74
Tabela 4-11 - Conteúdo harmônico das formas de onda de corrente – Venda de computadores.....	77
Tabela 4-12 - Conteúdo harmônico das formas de onda de corrente – Curso de informática.....	79
Tabela 4-13 - Conteúdo harmônico das formas de onda de corrente .....	81
Tabela 4-14 - Prédio Comercial.....	82
Tabela 4-15 - Conteúdo harmônico das formas de onda de corrente - horário de expediente.....	84
Tabela 4-16 - Conteúdo harmônico das formas de onda de corrente - horário de almoço .....	84
Tabela 4-17 - Conteúdo harmônico das formas de onda de corrente - horário de madrugada .....	84
Tabela 4-18 - Transformadores .....	85
Tabela 4-19 - Conteúdo harmônico das formas de onda de corrente – Transformador de consumidores residenciais – 12:00.....	89
Tabela 4-20 - Conteúdo harmônico das formas de onda de corrente – Transformador de consumidores residenciais – 21:00.....	89
Tabela 4-21 - Conteúdo harmônico das formas de onda de corrente – Transformador de consumidores residenciais – 02:00.....	89

Tabela 4-22 - Conteúdo harmônico das formas de onda de corrente – Transformador de consumidores comerciais – expediente .....	92
Tabela 4-23 - Conteúdo harmônico das formas de onda de corrente – Transformador de consumidores comerciais – almoço .....	93
Tabela 4-24 - Conteúdo harmônico das formas de onda de corrente – Transformador de consumidores comerciais – madrugada .....	93
Tabela 4-25 - Conteúdo harmônico das formas de onda de corrente – Transformador de consumidores residenciais e comerciais de 75 kVA – 02:00 .....	97
Tabela 4-26 - Conteúdo harmônico das formas de onda de corrente – Transformador de consumidores residenciais e comerciais de 75 kVA – 12:00 .....	97
Tabela 4-27 - Conteúdo harmônico das formas de onda de corrente – Transformador de consumidores residenciais e comerciais de 75 kVA – 21:00 .....	98
Tabela 4-28 - Conteúdo harmônico das formas de onda de corrente – Transformador de consumidores residenciais e comerciais de 112,5 kVA – 02:00 .....	102
Tabela 4-29 - Conteúdo harmônico das formas de onda de corrente – Transformador de consumidores residenciais e comerciais de 112,5 kVA – 12:00 .....	102
Tabela 4-30 - Conteúdo harmônico das formas de onda de corrente – Transformador de consumidores residenciais e comerciais de 112,5 kVA – 21:00 .....	102
Tabela 5-1 - Simulações de cenários harmônicos em consumidores residenciais e comerciais .....	106
Tabela 5-2 - Consumo residencial .....	110
Tabela 5-3 - Conteúdo harmônico das formas de onda de corrente da figura 5-7 (12 horas) .....	112
Tabela 5-4 - Conteúdo harmônico das formas de onda de corrente da figura 5-8 (02 horas) .....	113
Tabela 5-5 - Conteúdo harmônico das formas de onda de corrente da figura 5-9 (21 horas) .....	113
Tabela 5-6 - Conteúdo harmônico das tensões às 12 horas (carga leve) utilizado nas simulações .....	114
Tabela 5-7 - Conteúdo harmônico das tensões às 02 horas (carga média) utilizado nas simulações .....	114
Tabela 5-8 - Conteúdo harmônico das tensões às 21 horas (carga pesada) utilizado nas simulações .....	114
Tabela 5-9 - Distorções de tensão no sistema de distribuição secundário.....	115
Tabela 5-10 - Características dos transformadores simulados .....	117
Tabela 5-11 - THD's das correntes no secundário e no primário após um transformador delta-estrela.....	118
Tabela 5-12 - THD's de tensão ao longo do alimentador – simulação a partir de transformadores com residências uniformemente distribuídas .....	119
Tabela 5-13 - THD's de tensão ao longo do alimentador – simulação a partir das medições em transformadores .....	119
Tabela B - 1 - Resultados da implementação do filtro de corrente de neutro [69] – Correntes Simétricas.....	149
Tabela B - 2 - Resultados da implementação do filtro de corrente de neutro [69] – Correntes Assimétricas .....	149
Tabela B - 3 - Potência de capacitores para diferentes transformadores [70] .....	150
Tabela B - 4 - Parâmetros do filtro de circuitos secundários.....	151
Tabela B - 5 - Distorções de tensão no sistema de distribuição secundário – sem pré-distorção no transformador.....	152

Tabela B - 6 - Distorções de tensão no sistema de distribuição secundário – com pré-distorção no transformador.....	153
Tabela B - 7 - Parâmetros finais dos filtros.....	153



# 1 Introdução

Nos últimos anos, o desenvolvimento da indústria eletroeletrônica tem propiciado um maior conforto para os usuários e também equipamentos mais eficientes, do ponto de vista do consumo de energia. Além disto, programas de conservação de energia passaram a ter um enfoque de maior destaque nas concessionárias de energia elétrica, a partir do racionamento de energia elétrica ocorrido em 2001.

Estes cenários propiciaram uma maior entrada de cargas eficientes e não-lineares<sup>1</sup> nos lares brasileiros e também em estabelecimentos comerciais. Este trabalho estuda o impacto que as cargas presentes em consumidores residenciais e comerciais provocam no sistema de distribuição no enfoque da qualidade de energia elétrica, especificamente harmônicos, tendo como objetivo caracterizar estas cargas quanto a produção de correntes harmônicas.

Na literatura técnica muito se tem encontrado sobre o impacto de cargas associadas a consumidores industriais e pouco acerca de consumidores residenciais e comerciais [1]. Isto se justificaria há alguns anos atrás pois a maior parte das cargas presentes em residências e comércios era linear. Outra justificativa pertinente é o fato do setor industrial ser o maior consumidor de energia. Porém, segundo o BEN 2005 [2], a indústria representou um consumo de 47,9% do consumo elétrico nacional de 2004, sendo o maior consumidor entre os setores analisados (residencial, comercial, industrial, transporte, agropecuário e público). Entretanto, os consumos de energia elétrica residencial e comercial foram, respectivamente, 21,9% e 13,9%, totalizando 35,9%. Por estes dados, um estudo dos cenários destes consumidores, enfocando a questão da qualidade de energia em seu aspecto relativo aos harmônicos se faz necessário.

## 1.1 Qualidade de energia

A qualidade de energia elétrica pode ser conceituada como o fornecimento de energia e aterramento adequados visando a operação correta de um equipamento conforme a norma IEEE 1159-1995 [3]. Já em Bollen [4], a qualidade de energia é dividida em 5 conceitos:

---

<sup>1</sup> Cargas não-lineares são aquelas em que, submetidas a uma onda de tensão puramente senoidal apresentam um onda de corrente não senoidal, segundo o IEEE [18].

---

- 1) *Qualidade de tensão*: focada nos desvios de tensão de um padrão ideal. Este padrão ideal seria uma onda de tensão senoidal com amplitude e frequência constantes.
- 2) *Qualidade de corrente*: termo complementar à qualidade de tensão; focada nos desvios de corrente de um padrão ideal. Este padrão ideal, conforme a tensão, seria uma onda de corrente senoidal com amplitude e frequência constantes.
- 3) *Qualidade de potência*: combinação entre a qualidade de tensão e a qualidade de corrente.
- 4) *Qualidade de fornecimento*: combinação da qualidade de tensão com aspectos não-técnicos de interação (atendimento, satisfação do cliente, etc...) entre a rede de fornecimento elétrico e seus consumidores.
- 5) *Qualidade de consumo*: termo complementar da qualidade de fornecimento, enfocando nas responsabilidades do consumidor quanto à correta utilização da energia elétrica.

De acordo com Gama e Oliveira [5], “a qualidade de energia elétrica pode ser definida como a ausência relativa de variações de tensão provocadas pelo sistema da concessionária, particularmente a ausência de desligamentos, flutuações de tensão, surtos e harmônicos (este último pelo lado do cliente), medidos no *ponto de entrega de energia* (fronteira entre as instalações da concessionária sob o ponto de vista do consumidor)”.

Dugan et alli [6] conceituam a qualidade de energia elétrica como sendo qualquer problema manifestado na tensão, corrente ou frequência que resultará em falha ou operação inadequada em equipamento de consumidores. Definem os principais problemas associados à qualidade de energia elétrica:

- 1) Transitórios
  - a. Impulsivo: impulso sem alteração na frequência de estado permanente da tensão e corrente, sendo unidirecional.
  - b. Oscilação: oscilações sem alteração na frequência de estado permanente da tensão e corrente, ocorrendo em valores positivos e negativos.
- 2) Variações de tensão de longa duração
  - a. Sobretensão: aumento no valor eficaz da tensão em 10% ou mais para uma duração mínima de 1 minuto.
  - b. Subtensão: diminuição no valor eficaz da tensão em 10% ou mais para uma duração mínima de 1 minuto.
  - c. Interrupção sustentada: quando a tensão de alimentação permanece em zero por um período maior que 1 minuto.
- 3) Variações de curta duração
  - a. Interrupções: tensão de alimentação ou corrente de carga esteja abaixo de 0,1 pu por um período menor que 1 minuto.
  - b. “Sags”: diminuição para valores entre 0,1 e 0,9 pu da tensão ou corrente eficaz para durações entre 0,5 ciclo e 1 minuto.
  - c. “Swell”: aumento para valores entre 1,1 e 1,8 pu da tensão ou corrente eficaz para durações entre 0,5 ciclo e 1 minuto.
- 4) Desbalanceamento
  - desvio máximo da média das três tensões ou correntes de fase dividido pela média das três tensões ou correntes de fase, expresso em porcentagem. A melhor análise seria através de componentes simétricas, pois a taxa de

componentes de seqüência negativa e positiva em relação à seqüência positiva daria o desbalanceamento para um dado sistema.

- 5) Distorção da forma de onda
  - a. DC offset: presença de tensão ou corrente contínua no sistema elétrico.
  - b. Harmônicos: tensões ou correntes de freqüências múltiplas à fundamental presentes na forma de onda de tensão ou corrente.
  - c. Interharmônicos: tensões ou correntes em freqüências não inteiras à fundamental presentes na forma de onda de tensão ou corrente.
  - d. Notching: distúrbio periódico de tensão causado pela operação de componentes eletrônicos de potência quando ocorre comutação de uma fase para outra.
  - e. Ruído: sinais indesejáveis em grandes freqüências, abaixo de 200 kHz, superpostas a tensão ou corrente nos condutores de fase.
- 6) Flutuação de tensão
  - Variações sistemáticas na tensão cuja amplitude não exceda a faixa de 0,9 a 1,1 pu do valor eficaz de tensão.
- 7) Variações na freqüência da rede
  - desvios na freqüência fundamental da rede. Flicker seria um fenômeno associado a este problema, caracterizando-o como uma flutuação na iluminação.

## **1.2 Conservação de energia**

O PROCEL - Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica -, criado em dezembro de 1985 e instituído no ano seguinte, é um programa do governo federal coordenado pelo Ministério de Minas e Energia cujo controle de sua execução cabe à Eletrobrás. Conforme [7], o objetivo deste programa é promover a racionalização da produção e do consumo de energia elétrica, para que se elimine o desperdício e se reduzam os custos e os investimentos setoriais. Sua atuação é focada em algumas áreas: elaboração de planos de ação para programas de combate ao desperdício; projetos de Gerenciamento pelo lado da demanda; atuação no uso final (residencial, comercial, industrial, outros); etc.

Este programa se tornou mais evidente para o povo brasileiro no ano de 2001, com o advento do racionamento. O programa de selos que classifica os produtos conforme sua eficiência começou a ter uma importância maior advinda do povo brasileiro, mesmo após o racionamento. Enfim, a cultura para a conservação de energia tem adentrado nos lares brasileiros [8].

## **1.3 Harmônicos**

Detalhando mais sobre os harmônicos, estes são ondas senoidais de freqüências múltiplas inteiras a uma freqüência de referência, chamada fundamental. No caso do sistema elétrico brasileiro, a fundamental é a freqüência padrão 60 Hz tendo como 2º harmônico uma onda senoidal de 120 Hz, 3º harmônico uma onda senoidal de 180 Hz e assim por diante. Os harmônicos são uma forma matemática de analisar a distorção de uma forma de onda, seja ela de tensão ou de corrente. Esta análise é feita através da decomposição de uma onda utilizando a série de Fourier [4].

O índice utilizado para contabilizar a quantidade de harmônicos presentes numa onda, ou em outras palavras, quão distorcido uma onda está em relação a uma onda senoidal é o *THD* (*Total Harmonic Distortion*). Para uma onda puramente senoidal, livre de distorções, o THD é de 0%. Já para algumas ondas muito distorcidas, como exemplo correntes de alguns aparelhos eletrônicos, o THD pode chegar a 100%. A definição do THD é apresentada em 1-1.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^k f_n^2}}{f_1} \times 100\% \quad (1-1)$$

Onde,

$f_1$  – módulo da grandeza na frequência fundamental

$n$  – ordem harmônica

$k$  - último harmônico considerado

$f_n$  – módulo da grandeza na frequência harmônica

Outro índice que também indica a distorção de uma onda em relação a uma senóide é o fator de crista (FC). Este é definido matematicamente como a divisão entre o valor de pico e o valor eficaz de uma onda. Para uma onda puramente senoidal, livre de distorções, o fator de crista é igual a 1,41. Alguns aparelhos eletrônicos apresentam fatores de crista em suas correntes de valores iguais a 2,00. A definição do fator de crista é apresentada em 1-2.

$$FC_{onda} = \frac{Onda_{pico}}{Onda_{eficaz}} \quad (1-2)$$

A referência [5] apresenta informações sobre a relação entre a distorção de corrente e o acréscimo na corrente e decréscimo no fator de potência, tendo como base uma corrente fundamental de 1 A. Ou seja, com uma corrente fundamental fixada em 1 A, foi-se acrescentando harmônicos que chegavam a uma certa distorção de corrente, tendo por conseqüência um acréscimo de corrente no valor eficaz e uma diminuição no fator de potência. A tabela 1-1 transcreve estas informações mencionadas.

**Tabela 1-1- Influência dos harmônicos no acréscimo da corrente e na redução do fator de potência [5]**

<b>Distorção de corrente – THD<sub>i</sub> (%)</b>	<b>Acréscimo de corrente (%)</b>	<b>Fator de potência total<sup>2</sup></b>
0	0,00	1
10	0,50	0,995
30	4,40	0,958
50	11,80	0,894
70	22,07	0,819
90	34,54	0,743
100	41,42	0,707
120	56,20	0,640
150	80,28	0,555

<sup>2</sup> Fator de potência total: divisão entre a potência ativa e a potência aparente (Equações 2-1 a 2-4)

Gama [5] e EFEI [9] analisaram as medidas adotadas pelo PROCEL na gerência pelo lado da demanda e atuação no uso final e seu impacto na distorção harmônica. Destacam quatro itens:

- 1) *Controladores de velocidade variável*: com a possibilidade de economia de energia e gerência do controle dos fluxos de potência, apresenta, em alguns casos, harmônicos bastantes significativos.
- 2) *Lâmpadas fluorescentes compactas*: a substituição de lâmpadas incandescentes por lâmpadas fluorescentes compactas, visando economia, injeta níveis substanciais de harmônicos nos sistema de distribuição secundária além de contribuir para a diminuição do fator de potência.
- 3) *Instalação de bancos de capacitores*: visando a melhoria do fator de potência, uma instalação mal executada sem uma análise crítica acerca dos harmônicos circulantes no sistema, provoca problemas de qualidade de energia, tais como: amplificação do conteúdo harmônico presente no sistema; estabelecimento de condições de ressonância harmônica; queima prematura dos bancos de capacitores devido ao aquecimento de unidades capacitivas sob condições harmônicas.
- 4) *Controladores de intensidade luminosa*: visando também economia, este dispositivo piora o fator de potência e aumenta a injeção de harmônicos no sistema elétrico.

Além das referências [5] e [9], vários estudos realizaram uma análise entre a qualidade de energia elétrica e a conservação de energia elétrica. Em [10], mostra-se um estudo acerca da substituição de lâmpadas incandescentes por lâmpadas fluorescente compactas (LFC's) em ambientes residenciais. Como conclusão, os autores perceberam que há um ganho em conservação de energia e uma perda na qualidade de energia elétrica, sobretudo na corrente circulante na instalação e um aumento na corrente pelo neutro, principalmente de 3º harmônico. Fujiwara et alli [11] apresentaram um estudo parecido com o anterior, focando na interferência causada pelo uso de LFC's em residências. Constatou-se também um ganho na demanda ativa da residência, porém um aumento da potência reativa, diminuindo o fator de potência. A corrente circulante na instalação elétrica também ficou mais distorcida.

Datta [12] analisou a poluição na rede elétrica causada por sistemas de controle de iluminação, os dimmer's. Analisa dimmer's para controle de lâmpadas incandescentes, fluorescentes com reatores eletromagnéticos e eletrônicos. Duas variáveis foram estudadas para efeitos de comparação: fator de potência e 3º harmônico na corrente. Variando a potência de iluminação, o fator de potência diminui com a diminuição da potência para as lâmpadas incandescente e fluorescente com reator eletromagnético. Para a lâmpada fluorescente com reator eletrônico, o fator de potência se manteve constante. Em relação ao 3º harmônico da corrente, o percentual deste em relação à fundamental aumentava com a diminuição da potência de iluminação, também para as lâmpadas incandescente e fluorescente com reator eletromagnético. Mais uma vez, para a lâmpada fluorescente com reator eletrônico, o percentual de 3º harmônico em relação à fundamental se manteve constante com a diminuição da potência de iluminação.

Luz e Felberbaum [13] realizaram ensaios em reatores eletrônicos de lâmpadas fluorescentes comparando com reatores eletromagnéticos. O reator eletrônico, apesar de ser vantajoso no aspecto da conservação de energia, gera mais harmônicos de corrente,

tendo uma forma de onda bastante distorcida se comparado com o reator eletromagnético. O principal problema na utilização dos reatores eletrônicos é o aumento da corrente de neutro em sistemas trifásicos, comumente percebido em prédios comerciais que utilizem lâmpadas fluorescentes com reator eletrônico na base de sua iluminação.

Tostes et alli [14] apresentaram medições de correntes de lâmpadas de descarga utilizadas em iluminação pública, mostrando a corrente e seus harmônicos de lâmpadas de vapor de mercúrio, vapor de sódio e metálico. Das lâmpadas analisadas, as que apresentavam maior distorção harmônica de corrente foram as lâmpadas de vapor de sódio com uma média de 35% de distorção harmônica de corrente, sendo 20% e 25% para as lâmpadas de vapor de mercúrio e vapor metálico, respectivamente. Mostrou-se ainda medição em um transformador de 30 kVA que alimentava, exclusivamente, um conjunto de iluminação pública, contendo 15 postes com quatro lâmpadas de vapor de sódio de 400W cada um. A distorção de corrente encontrada foi de 59,37%, sendo que o espectro harmônico desta corrente apresentou um 3º harmônico de 53,2%, 2% de 5º harmônico e 7,6% de 7º harmônico. A distorção de tensão medida estava em 6%.

Gómez e Morcos [15] analisaram o impacto de carregadores de baterias de carros elétricos na qualidade de energia de sistemas de distribuição. Um estudo do estado da arte de carregadores de bateria de carros elétricos é apresentado. Como efeito, um grande número de carregadores resultará em uma tensão distorcida. Apresentaram também um algoritmo para pesquisar o impacto dos carregadores mencionados em transformadores, levando em conta fatores como temperatura ambiente, duração do carregamento de baterias, hora de início e THD de corrente dos carregadores. Como conclusões, os autores perceberam uma relação quadrática entre o THD de corrente dos carregadores e a redução de vida útil do transformador, indicando que o THD de corrente deveria ser limitado a 30%.

Nejdawi et alli [16] trazem uma pesquisa da tendência harmônica numa região dos Estados Unidos. Iniciam citando estudos realizados no Japão e na Europa ocidental. No Japão, até o ano de 2000 a distorção de tensão alcançaria níveis entre 6% e 7% em ambientes industriais e 4% e 5% em ambientes residenciais. Já na Europa ocidental, o 5º harmônico cresceu, entre 1979 e 1991, de 3% para 5%, tendo um crescimento de 1,67% por década. Os autores comparam medições realizadas em indústrias, universidade, supermercado, hospital, prédio residencial e alimentadores de subestações nos anos de 1986 e 1987 com medições em 1996 e 1997. Perceberam que o crescimento da distorção de tensão foi de 0,1% por ano. Este crescimento se deve, no ambiente industrial, pelo crescente uso de inversores de frequência e nos ambientes comerciais pela inserção de computadores.

Penna et alli [17] trazem alguns impactos dos programas de eficiência energética na qualidade de energia elétrica no Brasil. Primeiramente, investigaram dois consumidores residenciais onde, em suas casas a iluminação era preponderantemente feito por lâmpadas incandescentes, sendo estas substituídas por lâmpadas fluorescentes compactas, visando a mesma luminosidade. Mediram a potência ativa, aparente, corrente, tensão antes e depois da substituição. Com a substituição houve queda da potência ativa e reativa em uma casa, enquanto que na segunda residência houve queda na potência ativa mas um aumento na potência reativa. Isto se explica pelo baixo fator de potência que as LFC's apresentam. O fator de potência foi reduzido em 5,6% e

33,3% na primeira e segunda residência, respectivamente, tendo ainda um aumento percentual na distorção da corrente de 89,3% e 208,0%. Os autores fazem ainda uma perspectiva da economia de consumo de energia ativa que se alcançaria com a substituição efetivada em consumidores residenciais no Brasil. Como estes representavam 28% do consumo total e a iluminação 7% neste setor, se 40% da iluminação fosse substituída por LFC's, a redução no consumo total seria de 2,24%. Porém, os aspectos negativos desta troca fariam com que o número apresentado sofresse uma alteração. Estendendo a análise dos impactos, os autores simularam um alimentador trifásico em um barramento de iluminação contendo três lâmpadas incandescentes de 100W em uma situação e três lâmpadas fluorescentes compactas de 22W. Em cada situação, uma lâmpada por fase. Elas foram ligadas por impedância que simulavam condutores de seção de 4 mm<sup>2</sup> e 100m de comprimento. Os resultados obtidos na fase A e no neutro nestas duas situações estão apresentados na tabela 1-2.

**Tabela 1-2 - Resultados experimentais [17]**

Carga	Tensão (V)	THD <sub>v</sub> (%)	ΔV (%)	I <sub>a</sub> (A)	I <sub>n</sub> (A)
Incandescente	122,4	1,7	4,0	2,37	0,07
Compactas	113,0	5,6	11,2	2,35	4,17

Os resultados da tabela 1-2 mostram que os benefícios alardeados pelos programas de eficiência energética devem ser melhor estudados e feito paralelos com o tema qualidade de energia elétrica.

Como mostrado anteriormente, vários estudos avaliam o impacto da inserção de cargas eficientes e não-lineares nos ambientes residenciais e comerciais. O presente trabalho objetiva ser mais uma contribuição nesta temática, enfocando em estudos de penetração harmônica devido a um universo maior de cargas não lineares residenciais e comerciais, sendo dividido em cinco capítulos:

- *Capítulo 1 – Introdução*

Este capítulo apresentou a relação entre a conservação de energia e qualidade de energia, mostrando estudos realizados na temática envolvida neste trabalho.

- *Capítulo 2 – Efeitos de harmônicos no sistema de distribuição e limites segundo as principais normas nacionais e internacionais*

Este capítulo avaliará os efeitos provocados por harmônicos em diversos componentes do sistema elétrico e apresentará os limites definidos de harmônicos de tensão e corrente por diversas normas nacionais e internacionais.

- *Capítulo 3 – Caracterização de aparelhos eletrodomésticos*

Este capítulo irá apresentar medições realizadas em diversas cargas residenciais e comerciais enfocando no conteúdo harmônico produzido por estas.

- *Capítulo 4 – Cenários harmônicos em cargas residenciais e comerciais*

Este capítulo irá apresentar medições realizadas em consumidores residenciais e comerciais enfocando no conteúdo harmônico produzido por estes.

- *Capítulo 5 – Simulação de sistemas de distribuição em áreas residenciais e comerciais*

Neste capítulo serão apresentadas simulações de um sistema de distribuição que atende consumidores residenciais e comerciais em diferentes situações de carga, visando avaliar a distorção de tensão ao longo do sistema.

#### **1.4 Conclusões gerais**

Este capítulo apresentou uma introdução do trabalho desenvolvido nesta dissertação. O presente trabalho tem como objetivo caracterizar os equipamentos eletroeletrônicos presentes em consumidores residenciais e comerciais. Além desta caracterização, verifica o impacto que estas cargas presentes nos consumidores mencionados provocam no sistema de distribuição elétrica.

Foram apresentadas definições de qualidade de energia, conservação de energia e a interligação existente entre as duas. Também foram mostrados alguns exemplos de trabalhos que deram subsídios à realização desta dissertação.

Por fim, um resumo de cada capítulo foi apresentado.



## **2 Efeitos de harmônicos no sistema de distribuição e limites segundo as principais normas nacionais e internacionais**

Os harmônicos estão associados a perdas. Desta forma, quais são seus efeitos para o sistema elétrico e seus componentes? Quais seriam os níveis “suportáveis” de harmônicos e o que recomendam as normas relacionadas ao tema? Este capítulo pretende responder estas perguntas.

Este capítulo está dividido em subítens, sendo que cada um irá abordar um diferente dispositivo do sistema elétrico, quanto aos efeitos ocorridos advindos de harmônicos. Logo após se encontrará um subítem resumindo estes efeitos e os níveis permissíveis de harmônicos. Por fim, os limites de harmônicos das principais normas nacionais e internacionais serão apresentados.

Conforme a norma IEEE Std 519-1992 [18], o grau no qual os harmônicos podem ser tolerados é determinado pela susceptibilidade da carga à influência desses.

Uma carga pouco susceptível é aquela em que a energia harmônica é utilizada no processo, sendo então tolerável à existência de harmônicos para a mesma. Exemplos destas cargas são cargas de aquecimento como fornos ou chuveiros elétricos.

Cargas muito susceptíveis a harmônicos são aquelas que seus projetos assumiam a forma de onda de alimentação como sendo perfeitamente senoidal. Os equipamentos que freqüentemente se encaixam nesta categoria são processadores de dados e dispositivos de comunicação [18].

Um meio termo entre estas duas categorias seria, por exemplo, máquinas rotativas. A maior parte dos motores é relativamente tolerável aos harmônicos [18].

Em um sistema elétrico, os harmônicos podem excitar ressonâncias entre seus componentes, tais como capacitores e cabos ou transformadores.

## **2.1 Medidores de energia**

Medidores indutivos de energia elétrica apresentam erros quando instalados em um ambiente com grande presença de harmônicos, tanto de tensão quanto de corrente. Os erros podem ser positivos ou negativos, dependendo do espectro harmônico no qual o instrumento estaria submetido [18].

Em Oliveira et alli [19] é mostrado um trabalho de campo realizado pela Universidade de Brasília e pela Companhia Energética de Brasília, visando comparar a leitura de medidores de energia eletromecânicos e eletrônicos. Para tal, foram escolhidos cinco consumidores, representando diferentes segmentos e com distorções harmônicas distintas. Estes consumidores estão descritos na tabela 2-1 com seus respectivos THD de tensão e corrente e os erros de medição encontrados, comparando os medidores eletromagnéticos e eletrônicos.

Cada consumidor teve as medições da energia elétrica realizadas pelo seu medidor eletromecânico e um medidor eletrônico instalado em paralelo ao eletromecânico. Dos resultados obtidos, as diferenças na tarifação de energia ativa foram bastante pequenas, sendo bem menores do que as classes de exatidão dos instrumentos. Das grandezas medidas e apresentadas no artigo (energia ativa, demanda ativa em ponta e fora de ponta, energia reativa, esta medida indiretamente através de um algoritmo específico), a única que teve diferença foi a energia reativa, sendo que o medidor eletrônico apresentava valores maiores.

Tabela 2-1 - Consumidores selecionados para avaliação de medidores de energia [19]

Consumidor	THD – tensão (%)	THD – corrente (%)	Erros (%)*			
			kWh	kW (ponta)	kW (fp)**	kVArh
Indústria de cimento	1,77	15,90	-0,03	-0,76	-0,08	-27,65
Autarquia militar	2,70	15,40	-0,27	0,89	0,18	-18,48
Universidade	3,00	5,60	-0,37	-1,17	-0,42	-17,28
Edifício Inteligente	8,10	72,40	0,05	0,40	0,12	-15,85
Serviço de informática	12,50	14,00	-0,17	-0,10	-0,09	11,29

\* Erros do medidor eletromagnético em relação às medições realizadas em medidor eletrônico que considera as harmônicas

\*\* fp = fora de ponta

Estas diferenças ocorrem pois as definições de potência ativa, reativa e aparente em ambientes com distorções de tensão e corrente são diferentes das definições utilizadas admitindo formas de onda senoidal tanto para tensão como para a corrente. As potências ativa e reativa, neste novo cenário, serão as somas dos produtos das tensões e correntes na mesma frequência, mais os cossenos e senos do ângulo diferença das variáveis citadas. Uma terceira potência, que contabiliza a interação entre tensões e correntes de frequências distintas, é chamada de potência harmônica [20]. A interação entre estas três potências dará a potência aparente. A definição matemática das potências ativa, reativa, harmônica e aparente são apresentadas em 2-1, 2-2, 2-3 e 2-4, respectivamente.

$$P = \frac{1}{T} \int_T v(t).i(t).dt = \sum_{k=0}^{\infty} V_{k,rms} . I_{k,rms} . \cos(\theta_{vk} - \theta_{ik}) \quad (2-1)$$

$$Q = \sum_{k=1}^{\infty} V_{k,rms} . I_{k,rms} . \text{sen}(\theta_{vk} - \theta_{ik}) \quad (2-2)$$

$$D = \sqrt{\sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1, m \neq n}^{\infty} V_n^2 I_m^2} \quad (2-3)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (2-4)$$

Em Vasconcelos et alli [21], são mostrados os resultados de calibração de medidores de energia elétrica ativa submetidos às condições senoidais e não-senoidais. Calibraram-se trinta medidores eletromagnéticos monofásicos, classe 2 (2% de erro de medição), trabalhando-se com os seguintes parâmetros: fator de potência, variação simultânea da frequência da tensão e corrente, tensões e correntes distorcidas com diferentes THD's e, por fim, tensões e correntes distorcidas e variação do atraso da corrente em relação à tensão.

Diminuindo o fator de potência, é mostrada uma pequena tendência de diminuição da energia ativa medida, sendo, porém, não muito expressiva. Para um fator de potência 0,2 indutivo sem harmônicos, no pior caso, houve uma diminuição na contabilização de energia ativa de apenas 0,8%, sendo que para um fator de potência igual a 0,5 indutivo, houve um aumento de 0,1%. Em relação à variação simultânea da frequência da tensão e corrente, observa-se uma tendência de aumento do desvio, em relação ao padrão, com o aumento da frequência. Este comportamento pode ser explicado pelo fato de que o torque que provoca o movimento do disco do medidor eletromecânico ser proporcional ao produto das correntes que passam pelas duas bobinas, e estas diminuem com o aumento da frequência.

Avaliando o ensaio de tensão e corrente distorcidas com diferentes THD's (a tensão foi distorcida em 5,82%, sendo que a primeira componente harmônica era de 5% e a segunda 3%). A corrente teve uma distorção de 24,25%, sendo que a primeira componente harmônica era de 20% e a segunda 15%, com os seguintes perfis de composição harmônica foram: 1°, 3° e 5°; 1°, 5° e 7°; 1°, 7° e 9°; 1°, 9° e 11°. Ou seja, para o segundo perfil mencionado (1°, 5° e 7° harmônicos), o 5° harmônico teve um módulo igual a 20% e o 7° harmônico módulo igual a 15%, porcentagem em relação à fundamental. Concluiu-se que o valor da energia ativa varia com a alteração da composição harmônica, comprovando a tendência do ensaio anterior. O ensaio final de tensão e corrente distorcidas, variando o atraso da corrente em relação à tensão, foi basicamente a junção dos ensaios anteriormente realizados. As discrepâncias observadas na medição variam de acordo com o atraso da corrente em relação à tensão e a composição harmônica, tendo como resultados tanto valores positivos quanto negativos de discrepância. Como exemplo, para uma composição harmônica com fundamental, 5° e 7° harmônicos e um fator de potência igual a 0,2 indutivo, a discrepância observada foi de -1,5%. Já para uma composição harmônica de 1°, 9° e 11° e fator de potência igual a 0,5 indutivo, a discrepância foi de +1%. Desta forma, os valores encontrados de diferença não são muito significativos.

Em Silva et alli [22], os autores apresentam o desenvolvimento de um modelo matemático de um medidor de watt-hora indutivo para avaliar a influência deste em condições não senoidais. As características do medidor indutivo eram: 1 elemento, 2 fios, 1 fase, classe 2, 60 Hz, 220V, 15-100A e  $K_d = 3,6 \text{ Wh/r}$ . Os testes, em medidores reais para validação do modelo desenvolvido, apontaram que, para se ter uma diferença na tarifação da energia elétrica, seria necessário grandes THD's de tensão e corrente, na ordem de 20%. A tabela 2-2 mostra os resultados obtidos pelos autores tanto no experimento de medição quanto em simulações. Os erros são relativos aos valores medidos para tensão e corrente com THD's iguais a zero.

Tabela 2-2 - Erros experimentais e simulados em medidores eletromagnéticos [22]

<b>THD tensão (%) - experimental e simulação</b>	<b>THD corrente (%) - experimental e simulação</b>	<b>Erro experimental (%)</b>	<b>Erro simulação (%)</b>
3,6	117,0	-1,86	-1,97
5,0	30,0	0,56	0,61
9,0	26,0	1,45	1,37
11,0	113,0	- 4,31	- 4,56
11,9	11,9	1,10	1,08
21,0	32,0	3,97	4,10
22,0	22,0	4,10	3,95
37,1	37,1	9,54	9,61

Enfim, para os níveis de distorção normalmente encontrados na rede elétrica, ou seja tensões com distorções menores que 5%, não haverá erros significativos na tarifação de energia, sendo estes erros normalmente localizados na faixa de precisão dos medidores de energia (2%). Para se haver um grande erro de medição, o THD de tensão deve ser bastante severo, acima de 20% [18]. Não são citados os valores de THD's de corrente que dariam significativos erros de medição, pois é necessário que a tensão também esteja bastante distorcida. Assim, a referência [18] cita apenas o valor de distorção de tensão, pois, havendo uma grande distorção de tensão, por consequência haverá uma grande distorção de corrente, provocando assim um significativo erro de medição.

Em relação aos medidores eletrônicos, devido as suas modernas técnicas de medição, consegue-se incluir as energias dos harmônicos, apresentando erros muito pequenos [23].

## **2.2 Condutores**

Correntes harmônicas em condutores poderão provocar sobreaquecimento se comparados com o aquecimento provocado apenas pela fundamental da corrente. Há dois mecanismos para analisar este aquecimento.

O primeiro mecanismo é devido à redistribuição de corrente no condutor, incluindo os efeitos pelicular e de proximidade. O efeito pelicular é devido à blindagem da porção mais interna do condutor para a camada mais externa em função da frequência da rede [23].

O efeito de proximidade é devido ao campo magnético dos condutores próximos distorcendo a distribuição de corrente nos condutores adjacentes. Em cabos com condutores circulares, o efeito de proximidade é menos pronunciado que o efeito pelicular [23].

O segundo mecanismo é o aumento da corrente de neutro em sistemas trifásicos a quatro condutores alimentando cargas não-lineares. Várias cargas, como exemplo eletrônicas, produzem correntes de 3<sup>o</sup> harmônico significativas. Sistemas trifásicos

equilibrados e sem tensões harmônicas não terão corrente de neutro. Porém, 3º harmônicos e seus múltiplos inteiros irão se somar no neutro ao invés de subtrair, podendo a corrente de neutro chegar a ser 1.7 vezes a corrente de fase para cargas conversoras estáticas. Assim, como os cabos de neutro são dimensionados para serem do mesmo tamanho dos cabos de fase ou mesmo menores, eles estarão sobrecarregados. Este problema é mais provável de ocorrer em edifícios comerciais onde um sistema trifásico alimenta várias cargas comerciais monofásicas eletrônicas. Para situações como esta, é comum dimensionar o condutor de neutro para duas vezes o condutor de fase [23].

Cabos de potência, usados em transmissão e distribuição, quando submetidos em uma ressonância provocada por algum harmônico, podem ser submetidos a um stress de tensão e efeito corona, que podem levar a disrupção dielétrica [18].

Em Hiranadam [24], é mostrado o cálculo da ampacidade de cabos incluindo os efeitos dos harmônicos. O cálculo é resumido num fator de depreciação harmônico (HDF – “Harmonic Derating Factor”), como mostrado na equação 2-5.

$$HDF = \frac{1}{\sqrt{1 + \sum_{h=2}^n \alpha_h^2 \beta_h}} \quad (2-5)$$

onde

$HDF$  = fator de depreciação harmônico

$\alpha_h$  = corrente harmônica, em pu, tendo como base a fundamental

$\beta_h$  = resistência harmônica normalizada, em pu, tendo como base a resistência da frequência fundamental

Como exemplo, para um sistema trifásico a quatro condutores com cabos de alumínio de 500 kcm e diâmetro de 0,999 polegadas, a tabela 2-3 apresenta o conteúdo harmônico aplicado nestes condutores bem como seus valores de resistência para cada harmônico.

Tabela 2-3 - Exemplo de cálculo do HDF [24]

Fundamental + Harmônico	Frequência (Hz)	Resistência (ohm/m)	Corrente (A)	$\alpha_h$ (pu)	$\beta_h$ (pu)
1	60	0,000106	350	1	1
3	180	0,000123	80	0,2285	1,1582
5	300	0,000167	12	0,0345	1,5782
7	420	0,000187	12	0,0345	1,76

Com este conteúdo harmônico, o HDF para os condutores fase será de 0,96, ou seja uma redução na ampacidade dos cabos para 96% da ampacidade utilizando somente a fundamental.

Já no cabo de neutro, neste sistema equilibrado, a corrente de neutro terá apenas o 3º harmônico, porém esta será 3 vezes o valor da corrente de fase. Portanto, a corrente de 3º harmônico será igual a  $3 \times 0,2285 = 0,6855$  pu. Desta forma, utilizando a fórmula

---

2-5, o HDF será de 0,80, ou seja, redução na ampacidade do neutro para 80% da ampacidade em consideração a um regime sem harmônicos.

Em Dias [25], a imunidade prática de condutores aos efeitos de harmônicos é dado por  $\sqrt{\sum U_h^2} \leq 10\%$ , onde  $h > 1$  e  $U_h$  é dado em por cento.

Em suma, o maior problema que se verifica em cabos é em sua configuração de cabo neutro em ambientes com grandes concentrações de cargas não lineares. O mais comum é fixar a seção do neutro para, pelos menos, duas vezes a ampacidade dos cabos fase, em um sistema trifásico [23].

## 2.3 Iluminação

A lâmpada incandescente poderá ter uma diminuição na sua vida útil quando alimentada por tensões distorcidas, pois estas lâmpadas são sensíveis aos níveis de tensão a elas aplicados. Se a tensão de alimentação for maior que a tensão nominal devido aos harmônicos, a elevação da temperatura no filamento reduzirá a vida útil [23].

Para lâmpadas de descarga, o fenômeno mais conhecido devido aos harmônicos é um ruído audível. Os capacitores agregados em reatores eletromagnéticos, corrigindo o fator de potência, geram uma ressonância. Esta ressonância é comum na faixa de 75-80 Hz, não interagindo, portanto, com o sistema de alimentação [23].

Em Chen e Fu [26], foram apresentados resultados de testes de lâmpadas fluorescentes alimentadas por reatores eletromagnéticos e eletrônicos com ondas de tensão distorcidas. As conclusões deste estudo são que lâmpadas com reatores eletrônicos são mais imunes aos harmônicos que sistemas com reatores eletromagnéticos nos aspectos de potência, fator de potência, eficiência e luminosidade. Porém, mantendo os níveis de distorção de tensão recomendados em [18] ( $\text{THD}_v < 5\%$ ), a influência de harmônicos em lâmpadas fluorescentes não é significativa, independente do reator utilizado.

## 2.4 Máquinas rotativas

Tensões não senoidais aplicadas às máquinas elétricas podem causar sobreaquecimento, torques pulsantes ou ruídos. Além dos harmônicos vindos da rede elétrica, controladores de velocidade são alimentados por inversores que podem produzir harmônicos, levando a uma grande distorção de tensão [23].

Um problema que surge na presença de harmônicos é um grande ruído audível se comparado com uma excitação puramente senoidal. Os harmônicos também produzem um fluxo de distribuição resultante no entreferro que pode causar ou contribuir para dois fenômenos: “cogging” (recusa a partida suave) e “crawling” (grande escorregamento) [18].

Analisando um inversor de seis pulsos aplicado a um motor de indução, os harmônicos que este produz podem ser caracterizados pela equação 2-6:

$$h = 6i \pm 1 \quad (2-6)$$

onde

$h$  = ordem harmônica

$i$  = inteiro positivo maior que zero.

Estes harmônicos que aparecem em pares, como exemplo o quinto e o sétimo, podem causar oscilações mecânicas em uma combinação turbina-gerador ou sistema carga-motor. As oscilações mecânicas são frutos dos torques oscilantes quando estes, causados pela interação entre correntes harmônicas e campo magnético da frequência fundamental, excitam uma ressonância mecânica.

Detalhando este fenômeno, o fluxo de cada corrente harmônica no estator produzirá uma força magnética no entreferro que, por sua vez, irá induzir um fluxo de corrente no rotor da máquina rotativa. Como os harmônicos característicos podem ser definidos como seqüências positiva e negativa, a rotação destes harmônicos será na direção contrária (seqüência negativa) ou a favor (seqüência positiva) da rotação do rotor. O quinto harmônico irá girar em uma direção contrária (seqüência negativa), sendo então, a corrente harmônica induzida no rotor consequência da diferença entre a frequência da fundamental induzida no entreferro e o quinto harmônico. Assim o harmônico será cinco mais um (fundamental), sexto harmônico. Já o sétimo harmônico terá a mesma interação no entreferro com a frequência fundamental. Porém, como o sétimo harmônico irá girar na direção a favor (seqüência positiva) da rotação da fundamental, o resultado da interação será sete menos um, sexto harmônico. Logo, do ponto de vista de aquecimento no rotor, o quinto e sétimo harmônico no estator se combinam para produção de um sexto harmônico no rotor. O 11<sup>o</sup> e o 13<sup>o</sup> harmônicos terão, da mesma maneira, esta interação tendo como resultado uma indução no rotor de uma corrente de 12<sup>o</sup> harmônico. A tabela 2-4 apresenta um resumo dos harmônicos característicos num motor trifásico, quando alimentado por um inversor de seis pulsos, que resume estas interações e outras características.

Assim, estes harmônicos no rotor levarão a sobreaquecimento no rotor, redução de torque ou torques pulsantes.

**Tabela 2-4 - Harmônicos de um motor trifásico alimentado por inversor de seis pulsos**

Ordem Harmônica	Frequência (Hz)	Seqüência de fases	Harmônico no estator	Rotação harmônica*	Harmônico no rotor
1	60	+	1	A favor	-
5	300	-	5	Contrária	6
7	420	+	7	A favor	6
11	660	-	11	Contrária	12
13	480	+	13	A favor	12
17	1020	-	17	Contrária	18
19	1140	+	19	A favor	18
23	1380	-	23	Contrária	24
25	1500	+	25	A favor	24

\* em relação à rotação do campo girante fundamental



Klingshirn e Jordan [27] apresentam as rotações provocadas por harmônicos em motores monofásicos (tabela 2-5). Neste caso, haverá harmônicos triplos, pois há caminho de circulação de seqüência zero, seqüência característica dos harmônicos triplos.

**Tabela 2-5 - Direção de rotação dos harmônicos em motores monofásicos**

Ordem harmônica	Direção*
3	Contra
5	A favor
7	Contra
9	A favor
11	Contra
13	A favor
15	Contra
17	A favor
19	Contra

\* em relação à rotação do campo girante fundamental

Outras perdas causadas por harmônicos nos enrolamentos, tanto no rotor quanto no estator, serão perdas por efeito pelicular e aumento nas correntes parasitas.

Ainda em [27], os autores apresentam uma formulação matemática para cada perda existente no motor incluindo os harmônicos. Um resumo destas é apresentado na tabela 2-6. Para avaliá-las, os autores escolheram cinco formas de onda de tensão, sendo uma puramente senoidal em 60 Hz, e quatro com harmônicos característicos. Estas formas de onda, chamadas de A a D, estão descritas na tabela 2-7. Estas ondas foram então aplicadas em dois motores trifásicos idênticos de 20 hp, 220V, 60 Hz. Os resultados das perdas obtidas em plena carga, tanto experimentalmente quanto computacionalmente (utilizando as fórmulas da tabela 2-6), são apresentados na tabela 2-8. Os resultados apresentados utilizaram freqüências fundamentais de 15 Hz e 60 Hz. Analisando os resultados apresentados pelos autores, somente com distorções de tensão acima de 140% (situação C e D) é que as perdas serão o dobro em relação às perdas na situação em que a tensão é senoidal. Na situação A, com a tensão distorcida de 30,2%, situação muito difícil de ocorrer, as perdas ficaram 20% acima da situação com tensão senoidal. Desta forma, com as distorções de tensão normalmente encontradas na rede elétrica (em torno de 5%), o motor não terá grandes perdas devido aos harmônicos de tensão.

**Tabela 2-6 - Perdas no motor**

<b>Perdas</b>	<b>Associado a</b>	<b>Formulação</b>
Enrolamento do estator	Resistência do enrolamento	$W_1 = mr_1^s [(I_1^s)^2 + I_{har}^2]$
Enrolamento do rotor	Torque provocado pela seqüência negativa	$W_2 = \frac{Tn_{sl}}{7.04}$
Perdas no núcleo	As perdas no núcleo do estator é função da densidade de fluxo no mesmo. O aumento nas perdas devido aos harmônicos se constitui em uma pequena fração da perda total, podendo então ser desprezado.	
Perdas por atrito e ventilação	Estas perdas não dependem da forma de onda da tensão aplicada	
Perdas harmônicas no rotor	Correntes harmônicas induzidas no rotor	$W_{2k} = m(I_k^r)^2 r_k^r$
<b>Perdas complementares</b>		
Perdas “zig-zag” no rotor	Associado ao fluxo pulsante nas ranhuras do rotor	$W_{zz} = mC_{db}r_1^r [C_0I_0^2 + C_L I^2]$
Perdas finais no estator	Correntes parasitas devido ao fluxo de dispersão axial nas laminações do estator	$W_{se} = 0.3C_1m \sum_{k=1}^n (I_k^s)^2 kf_1$
Perdas finais no rotor	Correntes parasitas devido ao fluxo de dispersão axial nas laminações do rotor	Igual a do estator
Outras perdas	As outras perdas não mencionadas provavelmente aumentarão na presença de harmônicos. Entretanto, usualmente são pequenas, sendo consideradas as mesmas que quando excitado por uma onda puramente senoidal.	

*Legenda:*

$W_k$  = perdas em Watts, sendo k índice que identifica cada perda

$C_0, C_1, C_L$  e  $C_{db}$  = constantes empíricas

m = número de polos

k = ordem harmônica

$I_{har}$  = valor rms das correntes harmônicas excluída a fundamental

$f_1$  = frequência fundamental

$n_{sl}$  = escorregamento, em r/min (fundamental)

T = torque

$r_k^s, r_k^r$  = resistência no estator e rotor, respectivamente, para cada harmônico de ordem k

$I_k^s, I_k^r$  = Correntes no estator e rotor, respectivamente para o harmônico de ordem k

$I_0$  = corrente fundamental a vazio

I = corrente total no estator

**Tabela 2-7 - Formas de onda aplicada no exemplo em [27]**

Harmônico	Percentual de tensão em relação a fundamental			
	A	B	C	D
5	20,0	20,0	21,3	26,0
7	14,3	14,8	16,2	25,3
11	9,1	10,0	12,7	86,8
13	7,7	8,6	12,5	81,8
17	5,9	7,0	15,1	18,8
19	5,3	6,6	19,2	17,0
23	4,4	6,3	85,3	49,6
25	4,0	6,4	82,7	42,3
29	3,4	6,5	16,5	7,5
31	3,2	6,6	12,2	5,6
35	2,9	7,8	8,9	8,2
37	2,7	9,7	8,5	2,4
41	2,4	13,2	9,5	2,0
43	2,3	17,6	11,6	3,1
47	2,1	84,5	46,8	17,6
49	2,0	83,4	43,2	19,6
53	1,9	16,3	7,7	5,8
55	1,8	11,7	5,3	5,8
<b>THDv (%)</b>	<b>30,2</b>	<b>127,3</b>	<b>143,8</b>	<b>146,1</b>

**Tabela 2-8 - Resultados do exemplo de aplicação de ondas de tensão distorcidas em motores de indução trifásicos [27]**

Motor	Forma de onda	Frequência Fundamental (Hz)	Perdas	
			Medida (W)	Simulada (W)
1	Senoidal	15	902	712
	A	15	1070	1015
	B	15	1440	1272,6
	C	15	1680	1680,9
	D	15	2900	2791
	Senoidal	60	1303	1122
2	A	60	1600	1437,7
	Senoidal	15	912	741
	B	15	1400	1229,5
	C	15	1950	1613
D	15	1935	2664	

Em Lee et alli [28], o ângulo de fase dos harmônicos é analisado para se descobrir seu efeito na performance de motores de indução trifásico. Os autores executam alguns testes em motores, apresentando resultados da influência de mudança angular no 2º harmônico: quando em fase, a eficiência do motor era de 72,46% passando para 71,88% quando a defasagem for de 180º, para um THD de tensão de

20%. Percebe-se que a influência do ângulo de fase não é muito pronunciada, sendo confirmada através da afirmação em Emanuel [29] de que as perdas nos motores de indução são independentes do ângulo de fase dos harmônicos.

Em Oraee [30], é apresentada a realização de um estudo de estimação de vida útil do isolamento de motores quando submetidos a desbalanceamentos e harmônicos. Para tal, é construído um modelo térmico do motor onde se avaliam as anomalias mencionadas. Este modelo proposto divide o motor geometricamente em componentes concentrados, com interconexões através de impedâncias térmicas. Os componentes concentrados são derivados das informações dimensionais do motor, propriedades térmicas, material utilizado na construção e coeficientes de transferência térmica. Em vários resultados mostrados, como exemplo, para um desbalanceamento de tensão de 3%, um espectro harmônico de  $V_3=4\%$ ,  $V_5=3\%$ ,  $V_7=5\%$ ,  $V_9=2\%$  e  $V_{11}=1\%$ , tendo então um  $THD_v = 7,4\%$  e o motor operando em carga nominal, a redução de vida útil do isolamento seria de 24,3%.

Na referência [29], são estimados os efeitos das flutuações de tensões harmônicas no aumento da temperatura de motores de indução com rotor em gaiola. Como as harmônicas de tensão variam no tempo, o autor faz um estudo probabilístico do impacto destas variações na temperatura final do motor, baseando na média, variância e distribuição de probabilidade de cada harmônica. Como resultado, para motores com constantes térmicas no rotor maior que 60 minutos, estes motores toleram distorções de tensão com uma média de 4% e um máximo de 10%, desde que este máximo não ultrapasse 36 segundos, causando um aumento admissível de temperatura de 3%.

Conforme [25], o grau de imunidade aos harmônicos para máquinas síncronas é dado por  $\sqrt{\sum (U_h / h)^2} \leq 1,3$  a 2,4%. Para máquinas assíncronas, o grau de imunidade é  $\sqrt{\sum (U_h / h)^2} \leq 1,5$  a 3,5%, onde  $u_h$  é dado em por cento.

## 2.5 Equipamentos eletrônicos

Há várias formas em que as distorções harmônicas afetam os equipamentos eletrônicos. O primeiro efeito a ser considerado são as múltiplas passagens de tensão pelo zero. Em alguns equipamentos eletrônicos, a passagem pelo zero da tensão fundamental é utilizada para contagens temporais. Entretanto, distorções harmônicas causam passagens pelo zero mais freqüentes, o que prejudica o correto funcionamento daqueles equipamentos. Como exemplo, há relógios digitais domésticos que irão avançar no tempo devido a inesperados cruzamentos pelo zero. Qualquer equipamento que depende do sincronismo de seu contador com a passagem pelo zero pode ser considerado vulnerável às distorções harmônicas [23].

Semicondutores mudam seu estado no cruzamento da tensão pelo zero a fim de reduzir interferência eletromagnéticas e correntes de “inrush”. Múltiplos cruzamentos podem mudar o estado dos semicondutores diversas vezes e acarretar na operação inadequada do equipamento eletrônico [23].

Fontes eletrônicas de potência usam o pico da tensão para manter o capacitor de filtro em plena carga. Dependendo da frequência harmônica e sua fase angular em relação à fundamental, a distorção harmônica de tensão irá suavizar o pico da tensão, diminuindo-o. Esta diminuição provoca uma maior susceptibilidade do equipamento alimentado por esta fonte às quedas de tensão (sags). Em Barros e Diego [31] foi realizado um estudo da influência harmônica na curva CBEMA (Computer and Business Equipment Manufacturers Association). Adquiriram várias curvas CBEMA para diferentes curvas de tensão distorcidas. A conclusão deste estudo foi que os equipamentos ficam mais sensíveis aos harmônicos de baixa ordem e baixo fatores de crista de tensão.

Computadores e afins (exemplo: Controladores lógicos programáveis) suportam, no máximo, uma distorção harmônica total de tensão de 5%, limitando os harmônicos individuais em 3%. Níveis altos de harmônicos ( $THD_v > 5\%$ ) resultam em dados incorretos e desempenhos imprevisíveis. A situação mais crítica seria em equipamentos médicos. Assim, muitos destes são providos de filtros de linha [18].

Inter-harmônicas e sub-harmônicas podem afetar displays de vídeos e televisões. Inter-harmônicas irão produzir uma modulação na amplitude com a fundamental. 0,5% de inter-harmônicos de tensão (em relação à fundamental) produzem alargamentos e reduções periódicas na imagem de um tubo catódico [23].

Notches de tensão também comprometem o bom funcionamento de equipamentos eletrônicos. Alguns notches podem provocar indesejáveis passagens pelo zero, tendo as consequências anteriormente citadas. Os notches também introduzem frequências de ordem muito elevada no sistema elétrico, podendo excitar alguma ressonância nesta faixa de frequência, ocasionando uma poluição eletromagnética em sistemas de comunicação [18].

## 2.6 Interferência telefônica

A posição das linhas elétricas e linhas telefônicas em postes das concessionárias cria oportunidades de interferência da rede elétrica na rede telefônica. Como a sensibilidade audível do ser humano tem um pico a 1 kHz, harmônicos apresentam maiores problemas do que a fundamental. A interferência pode ser expressa por vários fatores, sendo mais comuns o fator de influência telefônica (TIF) e o produto corrente ( $I$ ) e TIF ( $T$ ). TIF leva em conta a frequência, magnitude e um peso para cada frequência (tabela 2-9). Pode ser definido conforme fórmula 2-3 [18].

$$TIF = \frac{\sqrt{\sum (X_f * W_f)^2}}{X_t} \quad (2-3)$$

onde:

$X_f$  = tensão ou corrente harmônica de frequência  $f$

$X_t$  = tensão ou corrente total

$W_f$  = peso TIF na frequência  $f$

**Tabela 2-9 - Pesos TIF para várias frequências [18]**

<b>Freq.</b>	<b>Peso</b>	<b>Freq.</b>	<b>Peso</b>	<b>Freq.</b>	<b>Peso</b>	<b>Freq.</b>	<b>Peso</b>
60	0,5	1020	5100	1860	7820	3000	9670
180	30	1080	5400	1980	8330	3180	8740
300	225	1140	5630	2100	8830	3300	8090
360	400	1260	6050	2160	9080	3540	6730
420	650	1380	6370	2220	9330	3660	6130
540	1320	1440	6560	2340	9840	3900	4400
660	2260	1500	6680	2460	10340	4020	3700
720	2760	1620	6970	2580	10600	4260	2750
780	3360	1740	7320	2820	10210	4380	2190
900	4350	1800	7570	2940	9820	5000	840
1000	5000						

Falando em termos de IT, um produto IT menor que 10000 não causa problemas enquanto um produto IT de 25000 causará problemas de interferência [23].

Há quatro mecanismos de acoplamento entre as linhas elétricas e as linhas telefônicas:

- 1) Indução em loop em que o campo magnético da linha elétrica induz uma tensão no loop formado pelos dois condutores de telefone. Práticas normalizadas de transposição das linhas elétricas ou pares telefônicos limitam este mecanismo.
- 2) Similar ao primeiro mecanismo, porém o loop se dá entre o condutor telefônico e a terra. O caminho através do solo é criado pela conexão ao solo dos dois pontos terminais do circuito. Como esta área de loop pode chegar a ser muito grande, este mecanismo é o tipo mais comum de interferência.
- 3) Acoplamento capacitivo entre o condutor da linha elétrica e o condutor telefônico. As capacitâncias entre condutores e entre condutor e solo formam um divisor de tensão para o potencial dos condutores de potência. Blindando os condutores telefônicos é um meio efetivo de eliminar o acoplamento capacitivo.
- 4) Aumento do potencial de terra, devido ao condutor neutro aterrado da linha elétrica, aplicado ao condutor telefônico aterrado. Este fenômeno cria um potencial entre o ponto de aterramento da linha elétrica e o ponto de aterramento da linha telefônica. Uma conexão ruim de neutro pode ocasionar potenciais anormais de terra resultando em interferências.

## **2.7 Transformadores**

As perdas provocadas por harmônicos contribuem para aumentar a quantidade de perdas no transformador, fazendo com que eleve sua temperatura e diminua sua vida útil [18, 23 e 32].

Outros problemas advindo dos harmônicos seriam ressonâncias entre a indutância do transformador e capacitores presentes no sistema elétrico, estresses na isolação mecânica devido ao aumento na temperatura e possíveis vibrações no núcleo, chegando a ser audíveis [23].

Analisando algumas perdas, as perdas joulicas nos enrolamentos serão devido ao efeito pelicular provocado pelas correntes harmônicas, dissipando energia em forma de calor. As perdas devido às correntes parasitas crescerão com o quadrado da corrente e o quadrado da frequência. Perdas devido ao fluxo de dispersão crescerão com aumento da frequência [23].

Dividindo os harmônicos em harmônicos de tensão e corrente, as correntes harmônicas irão causar perdas no cobre e aumentos no fluxo de dispersão, enquanto as tensões harmônicas aumentarão as perdas no ferro [18].

A norma IEEE C57.12.00-2000 [33] propõe limites para as correntes harmônicas em transformadores. O limite máximo para a corrente harmônica é de 5% para fator de distorção na corrente nominal. Recomendações ainda da norma falam sobre as sobretensões que o transformador deve suportar: 5 % com carga nominal e 10 % sem carga. Estas sobretensões incluem situações com ou sem harmônicos.

Delaiba et alli [32] apresentam um estudo do efeito dos harmônicos na vida útil do transformador. Foi realizado um modelo térmico na frequência, servindo de base para a interação dos harmônicos no aumento da temperatura do transformador. Relacionando este aumento de temperatura com a diminuição na vida útil do transformador, os resultados obtidos foram que com tensões harmônicas normalmente encontrados no sistema de distribuição (< 5%), a vida útil do transformador não é muito afetada. Porém, para correntes harmônicas acima do valor recomendado (5% de distorção em relação à corrente fundamental na norma IEEE C57.12.00-2000 [33]), um valor de 30% de distorção na corrente nominal (valor encontrado em algumas ocasiões), a vida útil do transformador cai aproximadamente 50%.

## **2.8 Capacitores**

A maior preocupação em relação a capacitores é o possível surgimento de ressonâncias com o sistema elétrico. Este efeito causa sobretensões e sobrecorrentes que afetam tanto o sistema elétrico, como os capacitores [18 e 23].

A reatância de um capacitor diminui com o crescimento da frequência, fazendo com que o capacitor seja um caminho preferencial de correntes harmônicas. Este fenômeno aumenta o aquecimento e stress no seu dielétrico.

O resultado do aumento do aquecimento e do stress no dielétrico é a diminuição da vida útil do capacitor [18, 34 e 35].

Algumas diretrizes para instalações de capacitores podem ser aplicadas em caso de instalações elétricas em baixa tensão [23]:

- Se a potência harmônica das cargas não-lineares, em kVA, é menor que 10% da potência nominal do transformador, capacitores podem ser utilizados sem preocupação de ressonância.
- Se a potência harmônica das cargas não-lineares, em kVA, for menor que 30% da potência nominal do transformador e a potência reativa dos

capacitores for menor que 20% da potência nominal do transformador, capacitores podem ser utilizados sem preocupação de ressonância.

- Se a potência harmônica das cargas não-lineares for maior que 30% da potência nominal do transformador, devem ser empregados filtros aos capacitores.

Conforme a norma ANSI/IEEE st. 18-2002 [36], os capacitores de potência devem suportar os seguintes valores de sobretensão e sobrecorrente:

- 110% da tensão nominal, e fator de crista menor que  $1,41*\sqrt{2}$ , incluindo harmônicos.
- 180% da corrente nominal, incluindo a fundamental e harmônicos.

Um outro dado que apresenta a imunidade de capacitores a tensões harmônicas é dado por  $\sum h.U_h^2 \leq 44\%$  [25].

Em Filho e Silva [37], é descrito um caso real de capacitores em um prédio comercial. A quantidade de cargas não-lineares presentes neste ambiente fez com que um dos bancos que estavam em paralelo com um dos transformadores do sistema elétrico do prédio, sofresse uma queima. Através de medições, foram constatados sobrecorrentes nos capacitores e transformadores devido aos harmônicos. Os capacitores tinham uma potência de 20% da potência nominal do transformador. A solução proposta foi a instalação de filtros de harmônicos ou sobredimensionamento dos componentes da instalação, visando minimizar o problema de harmônicos.

## **2.9 Relés de proteção**

Formas de onda distorcidas afetam o desempenho de relés de proteção, causando uma operação indevida ou mesmo a não operação dos mesmos quando necessário. Uma onda senoidal acrescida de harmônicos altera o pico de corrente, diferenciando do que o relé esperaria por presumir que trabalhará com uma onda senoidal. O ângulo das harmônicas em relação a fundamental influencia também na performance do relé [23].

Entretanto, é difícil definir como será o desempenho de um relé devido a uma onda distorcida pois cada relé tem uma resposta diferente a este fenômeno. Relés de diferentes fabricantes têm respostas diferentes assim como, em algumas vezes, relés do mesmo fabricante e modelo [23].

Num ambiente distorcido, os relés podem falhar quando ocorrer uma falta no sistema elétrico ou mesmo podem operar quando não houver nenhuma falta. Relés dependentes de pico de corrente ou passagem por zero, não irão operar adequadamente com uma onda distorcida. A presença de terceiro harmônico, por corresponder às correntes e tensões de seqüência zero, pode causar operação indevida das proteções de terra [23].

Os relés tendem a operar mais lentamente ou com valores de corrente mais altos na presença de harmônicos [18, 25].



Em geral, o nível de harmônicos requeridos para causar os problemas anteriormente citados está entre 10% a 20% de THD de corrente [18].

Como alternativa aos relés eletromecânicos e eletromagnéticos, que são mais susceptíveis a estes problemas, utilizam-se relés digitais que computem valores RMS em ondas com grande conteúdo harmônico [38].

## 2.10 Síntese dos efeitos dos harmônicos e grau de imunidade

A tabela 2-10 traz uma síntese dos efeitos que os harmônicos causam nos elementos anteriormente citados, bem como o grau de imunidade que cada um tolera. Estes foram baseados nos artigos apresentados para cada elemento e principalmente na referência [25].

Tabela 2-10 - Efeito de harmônicos em componentes do sistema elétrico e graus de imunidade

Equipamento	Efeitos devido à presença de harmônicos	Grau de imunidade
Máquinas rotativas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Torque pulsante</li> <li>- Ruído audível</li> <li>- Sobreaquecimento</li> <li>- Perda de vida útil no isolamento</li> </ul>	$\sqrt{\sum (U_h / h)^2} \leq 1,3$ a $2,4\%$ (máquinas síncronas) $\sqrt{\sum (U_h / h)^2} \leq 1,5$ a $3,5\%$ (máquinas assíncronas)
Condutores	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sobreaquecimento</li> <li>- Diminuição na capacidade de condução de corrente</li> </ul>	$\sqrt{\sum U_h^2} \leq 10\%$
Medidores de energia	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Erros na tarifação</li> </ul>	$\text{THD}_v \leq 20\%$
Relés de proteção	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Operação indevida</li> <li>- Inoperância</li> </ul>	$\text{THD}_i \leq 10\%$
Capacitores	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ressonância</li> <li>- Perda de vida útil do dielétrico</li> </ul>	$\sum h U_h^2 \leq 44\%$ $V_h \leq 115\%$ $I_h \leq 180\%$
Transformadores	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aumento nas perdas nos enrolamentos, ferro e componentes</li> <li>- Sobreaquecimento</li> </ul>	$\sqrt{\sum U_h^2} \leq 5\%$ carga plena $\leq 10\%$ a vazio
Equipamentos eletrônicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Maior susceptibilidade a sags</li> <li>- Perda de sincronismo em contadores digitais</li> <li>- Imagens distorcidas nos tubos catódicos</li> </ul>	$\sqrt{\sum U_h^2} \leq 5\%$ (para computadores)
Iluminação	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Diminuição da vida útil em lâmpadas incandescentes</li> <li>- Ruídos audíveis em lâmpadas fluorescentes</li> <li>- Flicker</li> </ul>	-
Sistemas de telefonia	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ruídos audíveis</li> </ul>	$\text{IT} \leq 10000$

## 2.11 Limites de harmônicos segundo normas nacionais e internacionais

Segundo padrões do ONS [39], os limites de harmônicos para faixas acima e abaixo de 69 kV são descritos na tabela 2-11. O  $THD_v$  para tensões abaixo de 69 kV é limitado em 6% enquanto para tensões acima de 69 kV está em 3%.

Tabela 2-11- Limites globais de harmônicos expressos em porcentagem da tensão fundamental [39]

V < 69 kV				V ≥ 69 kV			
Ímpares		Pares		Ímpares		Pares	
Ordem	Valor por harm. (%)	Ordem	Valor por harm. (%)	Ordem	Valor por harm. (%)	Ordem	Valor por harm. (%)
3, 5, 7	5	2, 4, 6	2	3, 5, 7	2	2, 4, 6	1
9, 11, 13	3			9, 11, 13	1,5		
15 a 25	2	≥ 8	1	15 a 25	1	≥ 8	0,5
≥ 27	1			≥ 27	0,5		
THD <sub>v</sub> = 6%				THD <sub>v</sub> = 3%			

Os valores recomendados segundo a norma IEEE std. 519/1992 [18] são expressos na tabela 2-12.

Tabela 2-12 - Limites de distorção de tensão [18]

Faixa de tensão	Distorção Individual por harmônico (%)	Distorção total de tensão – THD <sub>v</sub> (%)
V ≤ 69 kV	3,0	5,0
69 kV < V < 161 kV	1,5	2,0
V ≥ 161 kV	1,0	1,5

Nas tabelas 2-11 e 2-12, os limites estabelecidos são bem próximos, sendo a tabela do ONS mais detalhada em relação aos limites estabelecidos para cada harmônico.

Dugan et alli [6] transcreve os limites das tensões harmônicas sugeridas pela norma IEC 61000-2-2 para sistemas públicos de baixa tensão (240V e 415V). A tabela 2-13 apresenta estes limites.

**Tabela 2-13 – Limites de harmônicos individuais em sistema públicos de baixa tensão (240V e 415V) conforme norma IEC 61000-2-2 (extraída de Dugan [6])**

Ordem ímpar	Tensão harmônica (%)*	Ordem ímpar – múltiplo de 3	Tensão harmônica (%)*	Ordem par	Tensão harmônica (%)*
5	6,0	3	5,0	2	2
7	5,0	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,3	6	0,5
13	3,0	21	0,2	8	0,5
17	2,0	>21	0,2	10	0,2
19	1,5			12	0,2
23	1,5			>12	0,2
25	1,5				
>25	0,2 + 1,3 x 25/h				
THD <sub>v</sub> (até o 40º harmônico) < 8%					

\* Valores em relação à tensão fundamental

Da tabela 2-13, percebe-se que a norma IEC é menos rígida para sistemas de baixa tensão (THD<sub>v</sub> = 8%).

A norma IEEE std. 519/1992 [18] define limites de distorção de corrente em um ponto do sistema elétrico conforme sua corrente de curto-circuito e níveis de tensão. As tabelas 2-14, 2-15 e 2-16 trazem estas recomendações, diferenciadas pelo nível de tensão. Há um termo utilizado nesta norma que é o TDD (Total Demand Distortion). Tendo a mesma formulação matemática que o THD, diferenciando no termo do dividendo que, enquanto no THD será a fundamental da tensão ou corrente do sinal analisado, o TDD usará a tensão ou corrente de demanda nominal no barramento analisado. Em outras palavras, o TDD seria o THD na situação em que a fundamental da tensão ou corrente estivessem em seus valores nominais de demanda.

**Tabela 2-14 - Limites de distorção de corrente para sistemas de distribuição (V ≤ 69 kV)**

<b>Distorção de corrente em percentuais de I<sub>carga</sub></b>						
<i>Harmônicos individuais</i>						
I <sub>CC</sub> /I <sub>carga</sub>	<11	11 ≤ h < 17	17 ≤ h < 23	23 ≤ h < 35	h ≥ 35	TDD
<20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20 < 50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50 < 100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100 < 1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
> 1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0
Harmônicos pares são limitados a 25% dos limites dos harmônicos ímpares						
I <sub>CC</sub> = corrente máxima de curto-circuito						
I <sub>carga</sub> = demanda máxima de corrente de carga (somente fundamental)						

**Tabela 2-15 - Limites de distorção de corrente para sistemas de subtransmissão (69 kV < V ≤ 161 kV)**

<b>Distorção de corrente em percentuais de <math>I_{carga}</math></b>						
	<i>Harmônicos individuais</i>					
$I_{CC}/I_{carga}$	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$h \geq 35$	TDD
<20	2,0	1,0	1,75	0,3	0,15	2,5
20<50	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4,0
50<100	5,0	2,25	2,0	0,75	0,35	6,0
100<1000	6,0	2,75	2,5	1,0	0,5	7,5
> 1000	7,5	3,5	3,0	1,25	0,7	10,0

Harmônicos pares são limitados a 25% dos limites dos harmônicos ímpares

$I_{CC}$  = corrente máxima de curto-circuito  
 $I_{carga}$  = demanda máxima de corrente de carga (somente fundamental)

**Tabela 2-16 - Limites de distorção de corrente para sistemas de transmissão (V > 161 kV)**

<b>Distorção de corrente em percentuais de <math>I_{carga}</math></b>						
	<i>Harmônicos individuais</i>					
$I_{CC}/I_{carga}$	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$h \geq 35$	TDD
<50	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
≥50	3,0	1,5	1,15	0,45	0,22	3,75

Harmônicos pares são limitados a 25% dos limites dos harmônicos ímpares

$I_{CC}$  = corrente máxima de curto-circuito  
 $I_{carga}$  = demanda máxima de corrente de carga (somente fundamental)

A IEC 61000-3-2 (extraída de Dugan [6]) define limites de correntes harmônicas que podem ser emitidos por aparelhos que trabalham com uma corrente eficaz menor que 16 A por fase. Os aparelhos são divididos em quatro classes:

- Classe A: Equipamentos com alimentação trifásica equilibrada e todos os demais que não se enquadram nas outras classes.
- Classe B: Equipamentos portáteis.
- Classe C: Equipamentos para iluminação incluindo dispositivos dimmer .
- Classe D: Equipamentos contendo uma forma de onda de corrente de entrada “especial” com uma potência ativa de entrada menor que 600W.

Os limites para os equipamentos classe A estão expostos na tabela 2-17. Para os equipamentos classe B basta utilizar os índices da tabela 2-17 e multiplicá-los por 1,5.

A tabela 2-18 apresenta os limites para equipamentos classe C enquanto a tabela 2-19 mostra os limites para os equipamentos classe D.

**Tabela 2-17 - Limites de correntes harmônicas para equipamentos classe A conforme norma IEC 61000-3-2 (extraída de Dugan [6])**

<b>Ordem harmônica (h)</b>	<b>Máxima corrente (A)</b>	<b>Ordem harmônica (h)</b>	<b>Máxima corrente (A)</b>
3	2,3	2	1,08
5	1,14	4	0,43
7	0,77	6	0,3
9	0,4	8-40	0,23 x 8/h
11	0,33		
13	0,21		
15-39	0,15 x 15/h		

**Tabela 2-18 - Limites de correntes harmônicas para equipamentos classe C conforme norma IEC 61000-3-2 (extraída de R.C. Dugan [6])**

Ordem Harmônica (h)	Máxima corrente (%)*
2	2
3	30% x fator de potência
5	10
7	7
9	5
11-39	3

\* Em relação à corrente fundamental

**Tabela 2-19 - Limites de correntes harmônicas para equipamentos classe D conforme norma IEC 61000-3-2 (extraída de Dugan [6])**

Ordem Harmônica (h)	Máxima Corrente	
	Por watt (mA/W)	(A)
2	3,4	2,3
5	1,9	1,14
7	1,0	0,77
9	0,50	0,40
11	0,35	0,33
13	0,296	0,21
15-39	3,86/h	2,25/h

Para equipamentos com correntes acima de 16A e abaixo de 75A por fase, a norma IEC 61000-3-4 (Dugan [6]) fixa os limites de correntes harmônicas para estes equipamentos. Os limites estão na tabela 2-20.

**Tabela 2-20 - Limites de correntes harmônicas para equipamentos com correntes entre 16 A e 75 A conforme norma IEC 61000-3-4 (extraída de Dugan [6])**

Ordem Harmônica (h)	Máxima corrente (%)*	Ordem Harmônica (h)	Máxima corrente (%)*
3	21,6	19	1,1
5	10,7	21	0,6
7	7,2	23	0,9
9	3,8	25	0,8
11	3,1	27	0,6
13	2,0	29	0,7
15	0,7	31	0,7
17	1,2	33	0,6

\* Em relação à corrente fundamental

## **2.12 Conclusões gerais**

Neste capítulo, procurou-se mostrar os principais efeitos que os harmônicos causam nos seguintes componentes do sistema elétrico: medidores de energia, condutores, iluminação, máquinas rotativas, equipamentos eletrônicos, interferência telefônica, transformadores, capacitores, relés de proteção. Além destes efeitos, mostraram-se os limites de harmônicos segundo as principais normas nacionais e internacionais.

Os harmônicos causam perdas para o consumidor e para a concessionária de energia. Apesar destas perdas, os equipamentos mencionados têm um nível de susceptibilidade à harmônicos.

Nos limites relacionado pelas normas, a norma brasileira estabelece 6% de THD de tensão para o sistema de baixa tensão. Já o IEEE limita em 5% enquanto a IEC admite 8% de THD de tensão.

Para correntes harmônicas, o IEEE apresenta limites da distorção que a corrente poderá ter de acordo com a relação (divisão) corrente de curto-circuito e corrente nominal. Quanto mais alta esta relação, o limite de distorção de corrente também será mais alto, tendo um limite de 20% de distorção de corrente nominal (TDD de 20%).

A IEC tem várias normas que limitam a produção de harmônicos por parte de equipamentos eletrônicos, dependendo de sua finalidade e potência.

Os efeitos de harmônicos no sistema de distribuição, em conjunto com os limites determinados por normas nacionais e internacionais, mostram que se pode conviver com harmônicos, desde que eles estejam devidamente controlados.

# 3 Caracterização de aparelhos eletrodomésticos

Com o objetivo de dar suporte à avaliação do impacto de harmônicos causados por consumidores residenciais e comerciais no sistema de distribuição, eletrodomésticos normalmente encontrados nestes consumidores foram medidos a fim de caracterizar as suas produções de harmônicos. Serão apresentados os principais resultados obtidos nestas medições. Primeiramente, será apresentado o instrumento utilizado, seguido por eletrodomésticos divididos nos grupos:

- Iluminação
- Eletrônicos
- Refrigeradores
- Condicionadores de ar
- Aquecimento
- Funcionamento com motores

## ***3.1 Instrumento de medição***

O medidor utilizado a fim de caracterizar os aparelhos eletrodomésticos foi o ION 7650 (figura 3.1), medidor desenvolvido pela Power Measurement© [40] que apresenta as principais grandezas elétricas (tensão, corrente, potência ativa, reativa e aparente, energia dentre outros), objetivando a monitoração da qualidade de energia.



Figura 3-1 - ION 7650 (Power Measurement©)

Aprovado pela Aneel para os estudos em qualidade de energia, este instrumento é totalmente configurável. O usuário pode escolher e configurar que variáveis medir e guardar em sua memória, tempo de amostragem das mesmas, número de pontos nas formas de onda coletadas, dentre outros.

Para as medições de aparelhos eletrodomésticos, mediu-se tensão, corrente, THD de tensão e corrente, fator de potência, potência ativa, reativa e aparente, todos estes dados de minuto em minuto. Como o enfoque deste trabalho é em harmônicos, os resultados a serem apresentados serão de corrente, sendo mostrados sua forma de onda, harmônicos, valor eficaz e fator de crista mas também o THD de tensão no instante de medição. A forma de onda era guardada no instrumento não de forma automática e sim por intervenção do usuário. O tempo de coleta total variava de aparelho para aparelho, conforme sua funcionalidade.

Em relação aos harmônicos de tensão e corrente, foram guardados os harmônicos até o 32º. Esta escolha foi feita devido ao limite de memória do instrumento de medição. Quando apresentados, serão mostrados os harmônicos mais significativos. Significativos serão aqueles que terão magnitude maior que 1% da fundamental. Na maior parte dos aparelhos, serão os harmônicos ímpares. Os pares irão aparecer somente quando o ciclo positivo for diferente do ciclo negativo da onda analisada, o que ocorre com poucos eletrodomésticos, sobretudo com os condicionadores de ar e refrigeradores. Os ângulos dos harmônicos que serão apresentados são referenciados ao ângulo da tensão fundamental da fase A a eles aplicados, sendo este valor 0º.

### 3.2 Aparelhos eletrodomésticos

Foram medidos mais de 100 aparelhos eletrodomésticos em 33 diferentes tipos. Para melhor visualização destes resultados, agruparam-se estas medições em 6 categorias:



- 1) *Iluminação*: lâmpadas incandescentes e dimerizadas, fluorescentes compactas, fluorescentes convencionais, vapor de mercúrio, vapor de sódio e mista.
- 2) *Eletrônicos*: televisões, vídeo cassetes, vídeo games, computadores, aparelhos de fax, aparelhos de som, laptop, telefone sem fio.
- 3) *Refrigeradores*: geladeiras, freezers, frigobar, bebedouros.
- 4) *Condicionadores de ar*: ar condicionados de várias potências.
- 5) *Aquecimento*: chuveiro, cafeteira, ferro de passar roupas, torradeira, microondas.
- 6) *Motores*: batedeiras, circulador de ar, ventiladores, enceradeira, espremedor de laranja, exaustor, lavadora de roupas, liquidificador, tanquinho.

Com exceção do primeiro grupo que apresenta diferenças na forma de onda de corrente de um aparelho medido para o outro, os outros grupos têm a forma de onda de corrente comum se forem comparados um eletrodoméstico com outro. Desta maneira, serão apresentadas formas de onda dos aparelhos mais comumente encontrados em consumidores residenciais e comerciais de cada grupo.

### 3.2.1 Iluminação

#### *Lâmpadas Incandescentes*

As lâmpadas incandescentes são cargas puramente resistivas, tendo um comportamento linear conforme medição realizada [1]. Este fato também se confirma quando se compara o conteúdo harmônico da tensão e corrente. A tabela 3-1 traz os THD's de tensão e corrente em medições realizadas em cinco lâmpadas incandescentes. Pode-se notar que, a menos dos erros do instrumento de medição, os dois THD's são iguais, mostrando que estas lâmpadas não geram correntes harmônicas. Enfim, os harmônicos de corrente serão iguais aos harmônicos de tensão, por serem as lâmpadas incandescentes cargas lineares.

**Tabela 3-1 - THD's de tensão e corrente em lâmpadas incandescentes**

No.	Fabricante/tipo	Potência (W)	THD (%)	
			V	I
1	Fabricante 1 – tipo clara	40	4,01	3,67
2	Fabricante 2 - tipo clara	40	3,91	3,95
3	Fabricante 3 - tipo bulbo translúcido	60	3,76	3,64
4	Fabricante 3 - tipo cristal	100	3,22	3,15
5	Fabricante 1 - tipo bulbo translúcido	100	3,76	3,66

Entretanto, quando dimerizadas, o conjunto lâmpada incandescente+dimmer passa a ter um comportamento de carga não linear [1, 12], como mostrado nas Figuras 3-2, 3-3 e tabela 3-2. As Figuras 3-2 e 3-3 mostram a forma de onda de corrente de uma lâmpada de 100 W sendo dimerizada com 75% e 25% do nível de iluminação total. Na tabela 3-2 são mostrados os THD's, tanto de tensão quanto de corrente, para os mesmos níveis de iluminação e para 3 dimmers analisados.

A tabela 3-3 apresenta o conteúdo harmônico em cada situação de iluminação. É interessante notar o aumento dos harmônicos quando abaixa-se o iluminamento de 75% a 25%, pois a forma de onda de corrente fica “mais não-linear”, ou seja, cada vez mais distante de uma forma de onda senoidal.

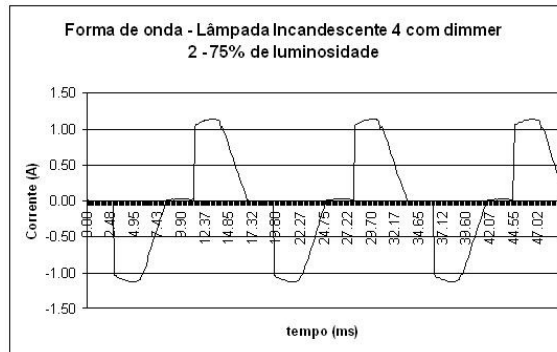


Figura 3-2- Lâmpada incandescente dimerizada em 75% de iluminamento

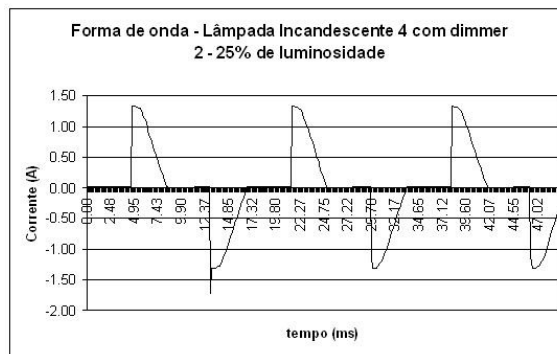


Figura 3-3 - Lâmpada incandescente dimerizada em 25% de iluminamento

Tabela 3-2 - THD's de lâmpadas (100 W) incandescentes dimerizadas

No.	Fabricante / tipo	Iluminamento em 75%		Iluminamento em 25%	
		THD (%)		THD(%)	
		V	I	V	I
1	Fabricante 1 – tipo rotativo	3,40	26,62	3,29	78,03
2	Fabricante 2 – tipo deslizante	3,87	37,86	4,10	76,72
3	Fabricante 2 – tipo rotativo	4,24	33,74	3,94	74,86

Tabela 3-3- Conteúdo harmônico da lâmpada incandescente 4 (100W) com dimmer 2 (tabela 3-2)

Harmônico	Iluminamento em 75%		Iluminamento em 25%	
	$I_{rms} = 0.725 \text{ A}$		$I_{rms} = 0.625 \text{ A}$	
	THD <sub>i</sub> = 37,86%		THD <sub>i</sub> = 76,12%	
	Fator de crista = 1,36		Fator de crista = 1,58	
	Módulo (%)	Ângulo (graus)	Módulo (%)	Ângulo (graus)
1	100,00	-15,75	100,00	-34,89
3	29,13	146,91	62,52	79,18
5	14,29	68,76	24,47	-133,26
7	9,03	-54,47	18,62	45,10
9	7,76	174,37	12,90	-157,24
11	6,55	63,30	10,76	20,29
13	4,81	-54,28	9,14	179,97
15	4,63	-179,61	7,62	-5,34
17	4,15	63,50	7,26	157,07
19	3,29	-53,03	6,28	-32,83
21	3,27	-175,79	6,22	130,05
23	3,08	65,28	5,28	-62,97
25	2,47	-52,43	5,11	103,73
27	2,55	-171,98	4,46	-89,61
29	2,46	65,85	4,34	78,98
31	1,98	-50,60	3,99	-115,23

### Lâmpadas Fluorescentes Compactas (LFC's)

As lâmpadas fluorescentes compactas são lâmpadas com elevada eficiência luminosa. Porém, são cargas não-lineares [10, 11, 41 a 45] com uma alta distorção de corrente, da ordem de 100%. A tabela 3-4 traz o resultado de medições realizadas em 7 amostras de LFC's e a figura 3-4 mostra a forma de onda de corrente tipicamente encontrado nas mesmas .

A tabela 3-5 traz o conteúdo harmônico de uma LFC.

Tabela 3-4 - THD's de Lâmpadas Fluorescentes Compactas

No.	Fabricante / tipo	Potência (W)	THD (%)	
			V	I
1	Fabricante 1 – tipo 1	5	3,91	103,05
2	Fabricante 2 – tipo 1	11	4,11	89,58
3	Fabricante 3 – tipo 1	15	4,36	105,09
4	Fabricante 4 – tipo 1	15	4,21	111,21
5	Fabricante 5 – tipo 1	15	4,30	133,30
6	Fabricante 6 – tipo 1	18	4,40	126,94
7	Fabricante 5 – tipo 2	25	4,21	114,96

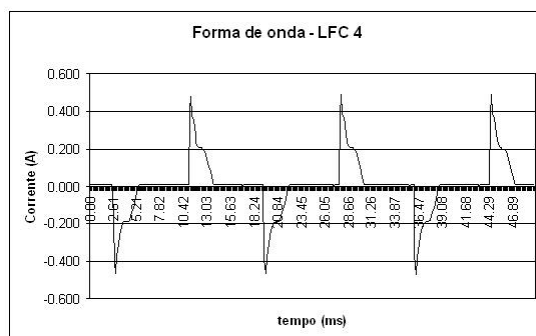


Figura 3-4 - Forma de onda de corrente típica de uma LFC

Tabela 3-5 - Conteúdo harmônico de uma LFC (amostra 4)

Harmônicos	Irms = 0,071 A	
	THD <sub>i</sub> = 111,21	
	Fator de crista = 4,11	
	Módulo (%)	Ângulo (graus)
1	100,00	20,81
3	69,37	-113,07
5	33,40	137,99
7	29,90	62,28
9	33,02	-47,11
11	25,17	-154,91
13	21,10	111,33
15	20,43	9,41
17	17,01	-91,75
19	15,81	173,13
21	15,50	70,22
23	13,46	-31,38
25	11,84	-130,85
27	10,70	127,90
29	8,95	26,87
31	7,96	-69,12

### Lâmpadas Fluorescentes Convencionais

As lâmpadas fluorescentes convencionais podem trabalhar tanto com reatores eletromagnéticos quanto com reatores eletrônicos. Estes últimos são mais econômicos, do ponto de vista energético, porém apresentam uma maior produção de harmônicos [13, 46 a 48]. As tabelas 3-6 e 3-7 trazem os THD's de tensão e corrente de medições realizadas em lâmpadas fluorescentes convencionais com reatores eletromagnéticos e eletrônicos, respectivamente.

Comparando as tabelas 3-6 e 3-7 percebe-se que a produção de harmônicos em reatores eletrônicos é bem superior que os reatores eletromagnéticos. Destaque para a última medição na tabela 3-7, onde o THD de corrente é baixo pois atende a portaria do INMETRO n° 188 de 9 de novembro de 2004 que determina que reatores que alimentem lâmpadas fluorescentes convencionais em que o conjunto reator-lâmpada

tenha potência superior a 56W devem ser fabricados na versão com alto fator de potência [50].

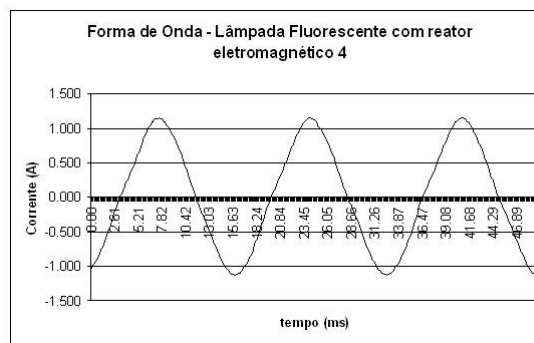
**Tabela 3-6 - THD's de lâmpadas fluorescentes convencionais com reatores eletromagnéticos**

No.	Fabricante / tipo	Lâmpadas	THD (%)	
			V	I
1	Fabricante 1 – tipo 1	1 x 20W	4,09	5,45
2	Fabricante 2 – tipo 1	1 x 40W	4,30	11,25
3	Fabricante 1 – tipo 2	1 x 40W	4,00	12,30
4	Fabricante 1 – tipo 3	1 x 40W	4,19	12,20
5	Fabricante 2 – tipo 2	2 x 20W	4,01	11,70

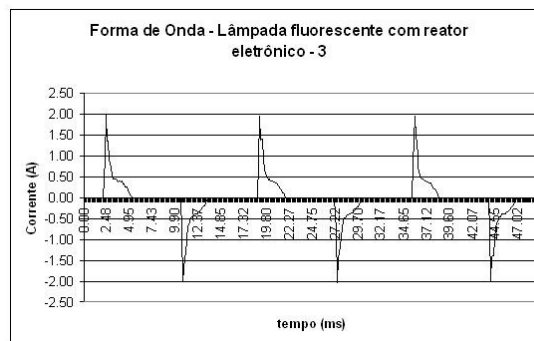
**Tabela 3-7 - THD's de lâmpadas fluorescentes convencionais com reatores eletrônicos**

No.	Fabricante / tipo	Lâmpadas	THD (%)	
			V	I
1	Fabricante 1 – tipo 1	1 x 20W	4,16	131,83
2	Fabricante 1 – tipo 2	1 x 40W	4,31	125,86
3	Fabricante 2 – tipo 1	1 x 40W	4,23	103,88
4	Fabricante 2 – tipo 2	2 x 40W	4,37	15,78

As figuras 3-5 e 3-6 apresentam formas de onda de corrente típica de lâmpadas fluorescentes convencionais trabalhando com reatores eletromagnéticos e eletrônicos, respectivamente. A lâmpada utilizada nas duas figuras foi a mesma. A figura 3-6 mostra uma forma de onda de corrente semelhante a forma de onda de LFC's. Isto era esperado por comungarem da mesma tecnologia.



**Figura 3-5 - Forma de onda de corrente típica de lâmpadas fluorescentes convencionais com reatores eletromagnéticos**



**Figura 3-6 - Forma de onda de corrente típica de lâmpadas fluorescentes convencionais com reatores eletrônicos**

A tabela 3-8 traz o espectro harmônico das correntes apresentadas nas figuras 3-5 e 3-6. Nota-se a diferença nos harmônicos entre os dois reatores mencionados, destacando o alto índice de harmônicos no reator eletrônico. No caso do reator eletromagnético, foi apresentado o conteúdo harmônico até o 11º harmônico pois, acima deste, os harmônicos já não eram mais representativos ( $\leq 0,35\%$ ).

**Tabela 3-8 - Conteúdo harmônico de lâmpadas fluorescentes convencionais com reatores eletromagnéticos e com reatores eletrônicos**

Harmônico	Reator eletromagnético		Reator eletrônico	
	$I_{rms} = 0,945 \text{ A}$		$I_{rms} = 0,565 \text{ A}$	
	THD <sub>i</sub> = 12,20%		THD <sub>i</sub> = 103,88%	
	Fator de crista = 1,05		Fator de crista = 1,76	
	Módulo (%)	Ângulo (graus)	Módulo (%)	Ângulo (graus)
<b>1</b>	100,00	-64,40	100,00	33,37
<b>3</b>	11,89	-51,00	65,98	-70,65
<b>5</b>	1,28	-94,18	42,40	-144,53
<b>7</b>	0,80	27,15	40,10	135,49
<b>9</b>	0,39	-24,25	28,29	47,01
<b>11</b>	0,35	-163,32	19,55	-21,39
<b>13</b>	-	-	15,32	-91,57
<b>15</b>	-	-	10,95	-149,73
<b>17</b>	-	-	10,20	150,10
<b>19</b>	-	-	10,70	86,96
<b>21</b>	-	-	12,34	15,53
<b>23</b>	-	-	11,80	-63,76
<b>25</b>	-	-	10,85	-138,37
<b>27</b>	-	-	7,90	145,93
<b>29</b>	-	-	6,36	83,12
<b>31</b>	-	-	3,99	-115,23

### *Lâmpadas de vapor de mercúrio, sódio e mista*

Em sistemas de iluminação externos, industrial e pública, as lâmpadas mais utilizadas são as lâmpadas de vapor de mercúrio, vapor de sódio e vapor misto. A substituição de lâmpadas de vapor de mercúrio para lâmpadas de vapor de sódio foi uma das medidas indicadas pelo PROCEL [14] em seu programa de Gerenciamento pelo Lado da Demanda – GLD. As lâmpadas de vapor de sódio são mais eficientes, porém, como em outros casos, com um conteúdo harmônico maior que as outras duas lâmpadas mencionadas [14, 49]. A tabela 3-9 apresenta as medições realizadas destas lâmpadas com seus respectivos reatores (eletromagnéticos). Houve apenas uma medição para cada tipo de lâmpada pois era o único material disponível para tal.

**Tabela 3-9 - THD's de lâmpadas mista, vapor de mercúrio e vapor de sódio**

No.	Lâmpada	Potência (W)	THD (%)	
			V	I
1	Mista	160	3,68	30,42
2	Vapor de mercúrio	80	4,41	38,04
3	Vapor de sódio	70	4,52	59,46

As figuras 3-7, 3-8 e 3-9 mostram as correntes das lâmpadas mistas, de vapor de mercúrio e vapor de sódio. A tabela 3-10 traz o conteúdo harmônico das correntes apresentadas nas figuras 3-7, 3-8 e 3-9.

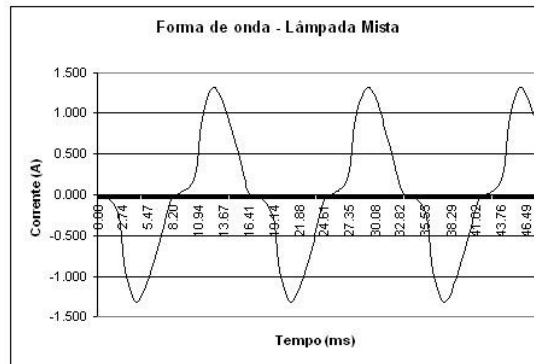
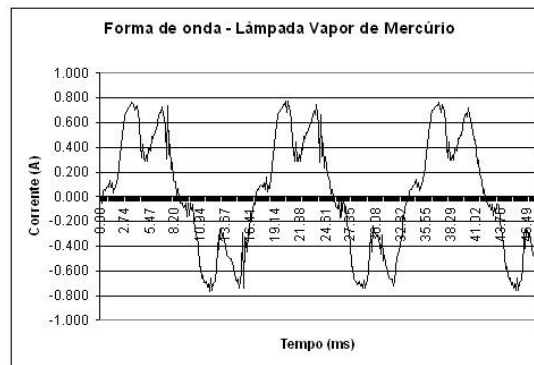
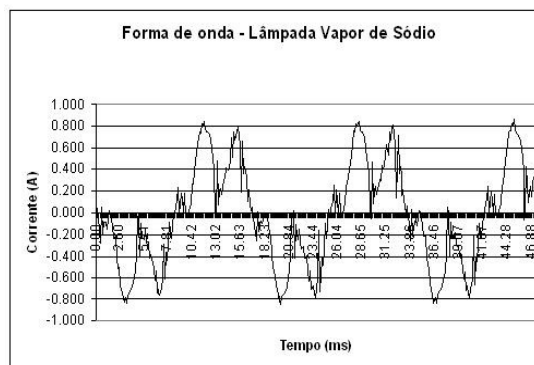

**Figura 3-7 - Forma de onda de corrente da lâmpada mista**

**Figura 3-8 - Forma de onda de corrente da lâmpada de vapor de mercúrio**

**Figura 3-9 - Forma de onda de corrente da lâmpada de vapor de sódio**

Tabela 3-10- Conteúdo harmônico de lâmpadas Mista, Vapor de Mercúrio e Vapor de Sódio

Harmônicos	Mista		Vapor de Mercúrio		Vapor de Sódio	
	$I_{rms} = 0,760 \text{ A}$		$I_{rms} = 0,477 \text{ A}$		$I_{rms} = 0,474 \text{ A}$	
	THD <sub>i</sub> = 30,42%		THD <sub>i</sub> = 38,04%		THD <sub>i</sub> = 59,46%	
	Fator de crista = 1,31		Fator de crista = 1,65		Fator de crista = 1,83	
	Módulo (%)	Ângulo (graus)	Módulo (%)	Ângulo (graus)	Módulo (%)	Ângulo (graus)
1	100,00	-7,57	100,00	-7,97	100,00	-9,18
3	28,87	166,57	19,27	-43,84	29,72	-49,14
5	9,25	77,32	30,61	111,17	45,14	102,86
7	2,13	-50,34	3,64	3,57	7,16	-0,72
9	2,90	-140,00	1,15	4,21	1,47	-111,08
11	1,98	141,10	6,96	-93,97	7,79	-69,86
13	1,25	19,84	3,13	112,44	4,93	79,99
15	1,03	-101,87	0,40	31,11	1,23	-56,60
17	0,88	159,16	0,89	125,26	5,89	116,13
19	0,48	49,23	1,88	-11,53	4,40	-86,21
21	0,43	-69,31	0,44	-169,30	0,26	-141,79
23	0,37	-172,25	3,39	-25,48	5,11	-81,46
25	0,27	83,10	1,20	163,57	3,88	35,85
27	0,24	-36,45	0,63	59,02	0,21	-96,51
29	0,21	-144,27	1,57	-164,22	3,46	67,09
31	0,09	94,83	1,06	15,31	3,45	-170,03

### 3.2.2 Eletrônicos

Os aparelhos eletrônicos apresentam altos THD's de corrente. Isto se explica por sua forma de conversão CA-CC utilizada na fonte de alimentação: ponte de diodos com filtro capacitivo [6]. Esta categoria de eletrodomésticos se constitui a principal carga não-linear em consumidores residenciais e comerciais e conseqüentemente, na rede de distribuição que os abastece. A tabela 3-11 traz os aparelhos eletrônicos medidos com seus respectivos THD's. Os fabricantes estão numerados conforme o tipo de aparelho, ou seja, fabricante 1 de televisão não é o mesmo fabricante 1 do aparelho de som.



Tabela 3-11 - THD's de aparelhos eletrônicos

No.	Aparelho / fabricante	THD (%)	
		V	I
<b>Computador</b>			
1	Athlon 1.8 GHz	3,81	89,27
2	Pentium 166 MHz – monitor 14"	4,07	98,47
3	Pentium 300 MHz – monitor 14"	3,10	98,10
4	Pentium 3 - 1 GHz - monitor 15"	3,66	114,32
5	Pentium 3 - 1 GHz - monitor 17"	3,75	94,06
6	Pentium 4 - 2,7 GHz – monitor 17"	3,78	119,96
7	Pentium 4 - 3 GHz - monitor 17"	5,28	94,42
<b>Televisão</b>			
1	Fabricante 1 – 14"	1,07	111,63
2	Fabricante 2 – 14"	3,03	95,96
3	Fabricante 3 – 14"	2,98	103,29
4	Fabricante 4 – 20"	2,90	103,00
5	Fabricante 5 – 20"	1,69	136,17
<b>Aparelho de som</b>			
1	Fabricante 1	2,4	43,20
2	Fabricante 2	1,27	61,18
3	Fabricante 3	3,29	42,80
4	Fabricante 4	4,5	35,97
<b>Impressora a laser</b>			
1	Fabricante 1	3,47	111,60
<b>Laptop</b>			
1	Pentium 4 - 3 GHz – 15"	3,04	10,00
<b>Rádio Relógio</b>			
1	Fabricante 01	3,37	51,03
<b>Telefone sem fio</b>			
1	Fabricante 01	3,45	26,18
2	Fabricante 02	4,19	29,15
3	Fabricante 03	1,61	37,84
<b>Vídeo Cassete</b>			
1	Fabricante 01	3,28	135,23
2	Fabricante 02	3,45	56,28
<b>Vídeo Game</b>			
1	Fabricante 01	3,3	45,30
2	Fabricante 02	4,01	56,92

As figuras 3-10 e 3-11 trazem as curvas de corrente de um computador e de uma televisão, cargas mais representativas deste grupo de eletrônicos. Os outros aparelhos eletrônicos têm a forma de onda um pouco diferente do computador e da televisão, tendo o formato da figura 3-12 (aparelho de som 3). A tabela 3-12 apresenta os harmônicos das formas de onda de corrente apresentadas.

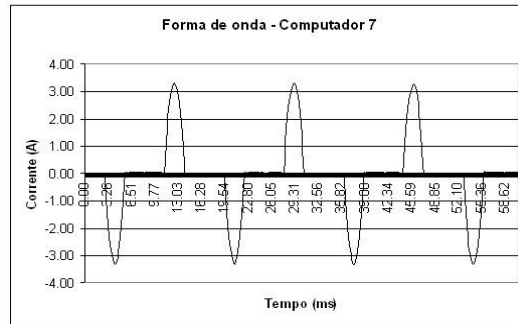


Figura 3-10 - Forma de onda de corrente típica de um computador

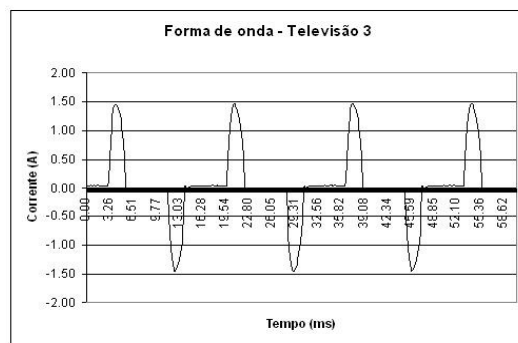


Figura 3-11 - Forma de onda de corrente típica de uma televisão

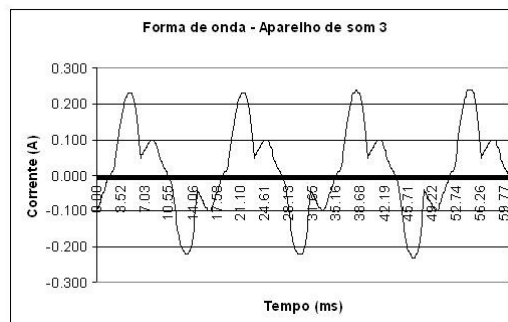


Figura 3-12 - Forma de onda de corrente típica dos outros aparelhos eletrônicos mencionados (aparelho de som 3)

Tabela 3-12 - Conteúdo harmônico de um computador, uma televisão e um aparelho de som

Harmônicos	Computador 7		Televisão 3		Aparelho de som 3	
	$I_{rms} = 1,408 \text{ A}$		$I_{rms} = 0,621 \text{ A}$		$I_{rms} = 0,127 \text{ A}$	
	THD <sub>i</sub> = 94,42%		THD <sub>i</sub> = 103,29%		THD <sub>i</sub> = 42,80%	
	Fator de crista = 2,15		Fator de crista = 1,67		Fator de crista = 1,89	
	Módulo (%)	Ângulo (graus)	Módulo (%)	Ângulo (graus)	Módulo (%)	Ângulo (graus)
1	100,00	2,46	100,00	2,49	100,00	-26,19
3	78,46	-174,73	82,29	175,41	37,40	-179,22
5	45,08	9,40	54,84	-7,64	17,31	-48,47
7	13,74	-161,18	25,15	173,21	6,04	-17,81
9	6,11	169,64	3,41	43,13	5,91	132,88
11	10,42	11,77	10,51	-33,28	1,97	-128,06
13	5,55	-154,47	11,82	146,07	2,59	-46,53
15	2,09	139,21	6,27	-42,45	0,98	76,64
17	4,50	7,39	0,84	-1,12	1,20	137,23
19	3,00	-160,01	0,38	61,72	0,67	-108,95
21	0,60	82,59	4,86	-53,31	0,69	-53,26
23	1,91	14,14	2,00	95,39	0,59	58,81
25	1,23	-151,58	1,68	154,01	0,44	137,31
27	0,57	153,49	3,31	-57,23	0,43	-119,81
29	1,55	28,31	2,74	102,59	0,35	-38,46
31	1,18	-134,33	0,89	-147,40	0,33	63,18

### 3.2.3 Refrigeradores

Refrigeradores se constituem em importantes eletrodomésticos, sendo presente na maioria dos lares brasileiros. Segundo o IBGE [51], em 2003, 86,8% dos lares brasileiros possuíam uma geladeira. Neste trabalho, refrigeradores estão sendo chamados de geladeiras, freezers, frigobares e bebedouros, sendo estes dois últimos comuns em consumidores comerciais. A tabela 3-13 apresenta as medições realizadas e a figura 3-13 mostra a forma de onda de corrente típica deste grupo de eletrodomésticos. Mais uma vez, os fabricantes são divididos por aparelho. Estas cargas não podem ser consideradas não-lineares apesar da sua distorção de corrente, pois apresentam baixos THD's de corrente. A tensão na qual elas foram medidas não era estritamente senoidal. Segundo a definição de carga não-linear, para se caracterizar uma carga como não-linear, sua corrente deve ser diferente de uma senóide quando a carga é submetida a uma onda de tensão puramente senoidal. As formas de onda de corrente destes eletrodomésticos são muito semelhantes e lembram uma senóide.

Tabela 3-13 - THD's de aparelhos refrigeradores

No.	Aparelho / Fabricante	THD (%)	
		V	I
<b>Geladeira</b>			
1	Fabricante 1 – tipo 1 (1 porta)	1,13	4,74
2	Fabricante 1 – tipo 2 (1 porta)	3,84	8,01
3	Fabricante 1 – tipo 3 (1 porta)	4,10	15,80
4	Fabricante 1 – tipo 4 (1 porta)	3,10	8,50
5	Fabricante 2 – tipo 1 (2 portas)	2,60	8,30
<b>Freezer</b>			
1	Fabricante 1	2,55	7,49
2	Fabricante 2	2,61	14,47
<b>Frigobar</b>			
1	Fabricante 1	1,28	7,2
<b>Bebedouro</b>			
1	Fabricante 1	3,96	4,19
2	Fabricante 2	1,25	7,99

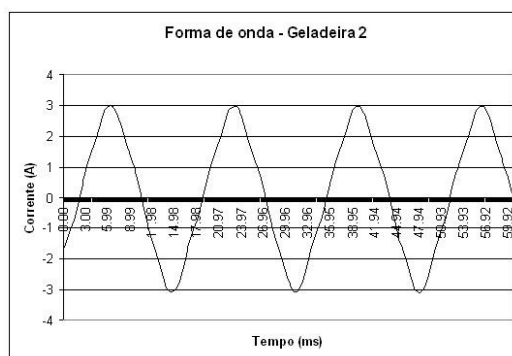


Figura 3-13 - Forma de onda de corrente típica de aparelhos refrigeradores

A figura 3-14 apresenta a corrente eficaz da geladeira, durante um período de 15 horas. O comportamento mais espaçado durante a madrugada se deve ao número reduzido ou nenhuma abertura da porta da geladeira, o que faz com que seu compressor fique mais tempo desligado, além da baixa temperatura ambiente. Esta alternância é menos pronunciada no freezer, por trabalhar com temperaturas menores. Os bebedouros medidos não apresentam o controle mencionado, ou seja, tem-se compressor ligado a todo instante.

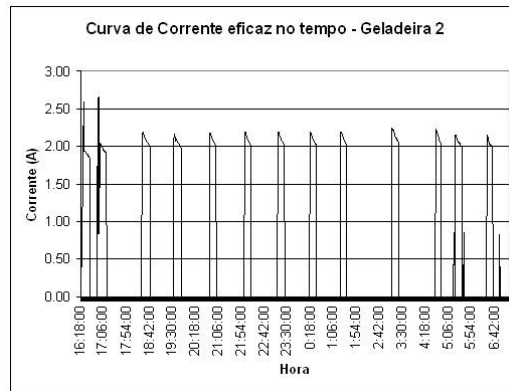


Figura 3-14 - Corrente eficaz ao longo do tempo (geladeira 3)

Uma distorção típica nesta categoria de aparelhos é um THD de 8% (valor médio), conforme tabela 3-13. O conteúdo harmônico da forma de onda da figura 3-13 é mostrado na tabela 3-14. Este foi apresentado até o 9º harmônico, pois os restantes eram de valores abaixo de 0,40%. Nota-se a presença de um 2º harmônico. Isto se deve pela pequena diferença entre o ciclo positivo e negativo da corrente.

Tabela 3-14 - Conteúdo harmônico de uma geladeira

Harmônicos	$I_{rms} = 2,120 \text{ A}$	
	$THD_i = 8,01\%$	
	Fator de crista = 1,01	
	Módulo (%)	Ângulo (graus)
1	100,00	-45,72
2	2,07	-98,18
3	6,72	48,71
5	3,60	110,91
7	1,04	7,99
9	0,44	72,55

### 3.2.4 Condicionadores de ar

Os aparelhos de ar condicionado medidos foram aqueles do tipo janela, comuns tanto em ambientes residenciais de médio/alto poder aquisitivo como em consumidores comerciais. Eles contêm um controle de temperatura na qual desligam o seu compressor de resfriamento quando a temperatura ambiente chega a um certo nível. Além disto, os aparelhos medidos tinham vários níveis de resfriamento e um ou dois níveis de ventilação. No modo de resfriamento, a distorção de corrente é maior que no modo de ventilação. Aqui vale a mesma observação feita para os refrigeradores: não há como classificá-los como não lineares pois as medições foram realizadas em ambientes com níveis de tensão distorcidos. A tabela 3-15 mostra os THD's de tensão e corrente medidos para diversos condicionadores de ar. As figuras 3-15 e 3-16 mostram os modos resfriar e ventilar respectivamente.

Tabela 3-15 - THD's de Condicionadores de ar

No.	Fabricante / tipo	BTU	Resfriar		Ventilar	
			THD(%)		THD(%)	
			V	I	V	I
1	Fabricante 1 – tipo 1	7500	3,20	12,70	3,40	5,40
2	Fabricante 2 – tipo 1	7500	1,21	11,26	1,37	1,89
3	Fabricante 2 – tipo 2	7500	1,60	13,08	1,59	5,21
4	Fabricante 2 – tipo 3	10500	3,90	12,20	-	-
5	Fabricante 2 – tipo 4	10500	3,10	15,40	-	-
6	Fabricante 2 – tipo 5	15000	3,80	16,30	3,50	4,90
7	Fabricante 2 – tipo 6	18000	1,54	10,65	1,63	2,07
8	Fabricante 1 – tipo 2	18000	0,85	15,38	0,76	6,05
9	Fabricante 1 – tipo 3	21000	1,15	17,31	1,10	7,87

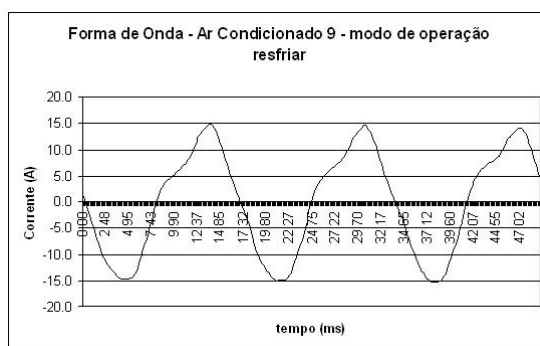


Figura 3-15 - Forma de onda de corrente de um condicionador de ar – modo resfriar

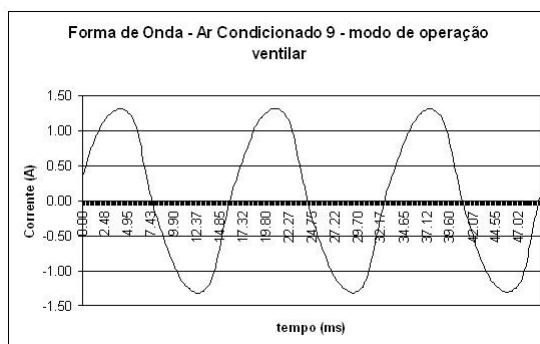


Figura 3-16 - Forma de onda de corrente de um condicionador de ar – modo ventilar

Na figura 3-15 percebe-se a diferença entre o semi-ciclo positivo e negativo da forma de onda apresentada. Este fato é melhor visualizado no conteúdo harmônico desta forma de onda, apresentado na tabela 3-16. Decompondo a forma de onda, a presença de um harmônico de ordem par representa uma diferença entre os semi-ciclos. Também foi incluído o conteúdo harmônico da figura 3-16. Nos dois casos, o último harmônico apresentado foi o 9º.

Tabela 3-16 - Conteúdo harmônico do condicionador de ar 9 nos modos resfriar e ventilar

Harmônicos	Resfriar		Ventilar	
	$I_{rms} = 9,856 \text{ A}$		$I_{rms} = 0,967 \text{ A}$	
	$THD_i = 17,31\%$		$THD_i = 7,87\%$	
	Fator de crista = 1,43		Fator de crista = 1,04	
	Módulo (%)	Ângulo (graus)	Módulo (%)	Ângulo (graus)
1	100,00	-2,38	100,00	15,80
2	12,50	125,33	0,14	51,20
3	12,00	104,03	7,50	116,20
5	1,61	-163,86	2,90	-147,02
7	0,73	138,83	0,82	-75,43
9	0,83	113,51	0,25	65,31

### 3.2.5 Aquecimento

Normalmente, os eletrodomésticos que envolvem algum aquecimento têm esta funcionalidade associada a uma resistência que provoca este fenômeno. Assim, são aparelhos lineares sendo que a distorção da corrente acompanha a distorção de tensão conforme pode ser visto na tabela 3-17. Uma exceção neste grupo seria o aparelho de microondas. Sua distorção de corrente é facilmente explicada por não utilizar uma resistência, e sim um propulsor de microondas para aquecer os alimentos. Mais uma vez, o fabricante 1 de um aparelho é diferente de fabricante 1 de outro aparelho.

Tabela 3-17 - THD's de aparelhos de aquecimento

No.	Aparelho / fabricante	THD (%)	
		V	I
<b>Cafeteira</b>			
1	Fabricante 1	3,48	3,49
<b>Chuveiro</b>			
1	Fabricante 1	4,8	3,8
<b>Ferro de passar roupas</b>			
1	Fabricante 1	4,14	4,13
<b>Torradeira</b>			
1	Fabricante 1	3,5	3,52
<b>Microondas</b>			
1	Fabricante 1	5,8	29,24

O ferro de passar roupas teve um tempo de amostragem diferente dos outros aparelhos. Foi de segundo em segundo, o que possibilitou conhecer seu ciclo de funcionamento. Ele permanece ligado até atingir uma certa temperatura. Desliga-se e volta a ligar quando a temperatura está em um nível menor que definido em seu termostato. Esta constatação confirma uma recomendação de racionamento de energia que é o de passar roupas em um volume maior e mais concentrado ao invés de se passar em volumes menores e horários distintos. Este ciclo de funcionamento é apresentado na figura 3-17.

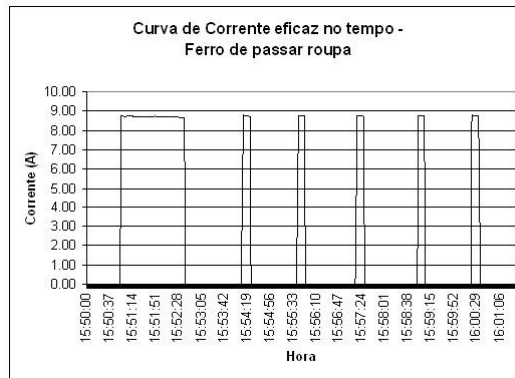


Figura 3-17 - Curva de corrente eficaz ao longo do tempo no ferro de passar roupa

A curva de corrente do aparelho de microondas é mostrada na figura 3-18 e seu conteúdo harmônico na tabela 3-18. Também há uma pequena distorção do semi-ciclo positivo para o semi-ciclo negativo, imperceptível na figura 3-18, porém evidenciado quando analisado o espectro harmônico de corrente (presença de harmônico de ordem par). O último harmônico mais significativo foi o 11<sup>o</sup>, sendo os outros com valores menores que 1%.

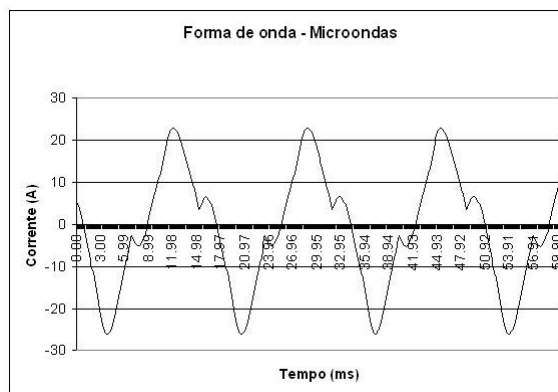


Figura 3-18 - Forma de onda de corrente de um aparelho de microondas

Tabela 3-18 - Conteúdo harmônico de um aparelho de microondas

Harmônicos	$I_{rms} = 13,459 \text{ A}$	
	$THD_i = 29,24\%$	
	Fator de crista = 1,64	
	Módulo (%)	Ângulo (graus)
1	100,00	-0,32
2	6,60	-97,20
3	27,14	-145,31
5	4,79	-47,26
7	4,84	-54,95
9	1,75	28,47
11	1,68	93,70



### 3.2.6 Motores

Esta última categoria de eletrodomésticos, na qual se efetuaram medições, empregam algum motor para seu funcionamento. A distorção de corrente nesta categoria é geralmente baixa. A tabela 3-19 traz os THD's dos vários eletrodomésticos medidos. Novamente, o fabricante 1 de um aparelho é diferente do fabricante 1 de outro aparelho.

Tabela 3-19 - THD's de eletrodomésticos baseados em motores

No.	Aparelho / fabricante	THD (%)	
		V	I
<b><i>Aspirador de Pó</i></b>			
1	Fabricante 1	4,07	22,68
<b><i>Batedeira</i></b>			
1	Fabricante 1	4,16	5,62
<b><i>Circulador de Ar</i></b>			
1	Fabricante 1	2,80	3,80
<b><i>Enceradeira</i></b>			
1	Fabricante 1	3,11	11,26
<b><i>Espremedor de laranja</i></b>			
1	Fabricante 1	3,76	10,16
<b><i>Exaustor de fogão</i></b>			
1	Fabricante 1	3,32	7,80
<b><i>Liquidificador</i></b>			
1	Fabricante 1	3,40	13,51
2	Fabricante 2	2,51	16,85
<b><i>Lavadora de roupas</i></b>			
1	Fabricante 1	2,63	5,56
2	Fabricante 2	3,26	17,06
<b><i>Tanquinho</i></b>			
1	Fabricante 1	1,75	8,98
<b><i>Ventilador de Teto</i></b>			
1	Fabricante 1	4,20	4,21
<b><i>Ventilador Pequeno</i></b>			
1	Fabricante 1	3,38	2,24
2	Fabricante 2	2,90	3,90
3	Fabricante 3	5,32	5,49

A figura 3-19 mostra a curva de corrente típica desta categoria, sendo a curva de uma lavadora de roupas. Seu espectro harmônico é apresentado na tabela 3-20, limitado ao 7º pois os de maior ordem apresentam valores insignificantes (< 0,90%).

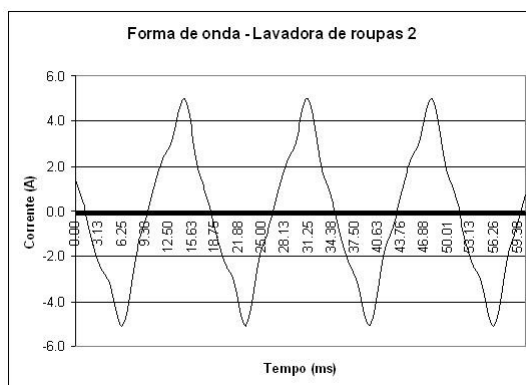


Figura 3-19 - Forma de onda de corrente típica de eletrodomésticos com motores

Tabela 3-20- Conteúdo harmônico de uma lavadora de roupas

Harmônicos	$I_{rms} = 4,442 \text{ A}$	
	$THD_i = 17,06\%$	
	Fator de crista = 1,35	
	Módulo (%)	Ângulo (graus)
1	100,00	-34,88
3	14,52	47,94
5	8,78	134,48
7	0,98	-154,95

### 3.3 Conclusões gerais

Neste capítulo foram apresentadas medições em diversos aparelhos eletrodomésticos presentes em consumidores residenciais e comerciais a fim de caracterizar a produção de correntes harmônicas de cada aparelho. A fim de melhor organizar os mais de 100 eletrodomésticos de 33 diferentes tipos, eles foram agrupados em seis categorias: iluminação, eletrônicos, refrigeradores, condicionadores de ar, aquecimento e motores.

O grupo de iluminação possui elementos lineares e também os que produzem uma quantidade média de harmônicos (lâmpadas de descarga com reatores eletromagnéticos), com THD de corrente médio de 30%. Há também aqueles que produzem grande quantidade de harmônicos como as LFC's e as lâmpadas fluorescentes com reatores eletrônicos, possuindo THD's de corrente da ordem de 100%.

O grupo de eletrônicos, devido ao processo de conversão CA-CC empregado em suas fontes de alimentação, é um grupo em que, em sua grande maioria, irá apresentar uma grande produção de harmônicos, sobretudo os computadores e televisores, com THD médio de corrente de 100%.

Os refrigeradores, condicionadores de ar e motores não apresentam níveis substanciais de harmônicos, tendo um THD de corrente médio de 10%.

Cargas de aquecimento, por serem em sua grande maioria lineares, irão apresentar correntes com espectro harmônico e distorção iguais aos verificados para a tensão, no instante de medição.

Das medições realizadas, percebeu-se que os aparelhos de maior potência em consumidores residenciais e comerciais são cargas lineares enquanto que as cargas não-lineares seriam as de menor potência. Assim, constata-se uma correlação inversa entre a potência dos aparelhos eletrodomésticos e a distorção de corrente.

# 4 Cenários harmônicos em cargas residenciais e comerciais

Além dos eletrodomésticos apresentados no capítulo anterior, consumidores residenciais e comerciais também foram medidos para ter-se um perfil do consumo de cada um e o conteúdo harmônico que cada um destes produz.

No caso de consumidores residenciais, são apresentados resultados de quatro medições, sendo um resultado para o perfil de consumo baixo, 2 para médio e 1 para o alto.

Em consumidores comerciais, são mostradas as medições realizadas em um centro comercial. Este local foi escolhido pois permitiu medir vários consumidores comerciais. É também mostrada a medição global realizada neste centro comercial.

Resultados de medições em transformadores que alimentam consumidores residenciais e comerciais também são apresentados.

## 4.1 *Consumidores residenciais*

As medições em consumidores residenciais foram realizadas na cidade sede da concessionária de energia elétrica. A partir do circuito secundário de um certo transformador, escolheu-se 4 amostras de consumidores residenciais de um universo de 39. A escolha foi baseada no consumo mensal de cada residência, escolhendo, portanto, 1 consumidor com consumo baixo, 2 consumidores com consumos médios e 1 consumidor com consumo alto. A definição destes patamares foi realizada da seguinte forma:

- Consumo abaixo de 200 kWh/mês – consumo baixo
- Consumo entre 200 e 500 kWh/mês – consumo médio
- Consumo acima de 500 kWh/mês – consumo alto

A medição foi realizada no ramal que alimenta o padrão do consumidor. Para tal, utilizou-se um TC de janela junto ao instrumento de medição. O tempo total de coleta

de dados foi de 24 horas, sendo possível caracterizar a curva de consumo e de distorção de corrente do consumidor. As formas de onda foram adquiridas de hora em hora.

Um trabalho semelhante às medições realizadas é apresentado em [52]. As curvas de corrente e distorção de corrente ao longo do tempo de consumidores residenciais do atual trabalho são muito semelhantes às divulgadas em [52].

A tabela 4-1 traz a corrente eficaz média, os THD's de corrente e tensão médios durante a coleta de dados nas residências mencionadas no tempo coletado (24 horas), além do consumo médio mensal de cada uma (dado fornecido pela concessionária de energia elétrica).

**Tabela 4-1 - Consumidores residenciais**

No.	Consumo médio (kWh/mês)	I <sub>eficaz</sub> médio (A)			THD <sub>I</sub> -médio (%)			THD <sub>V</sub> -médio (%)		
		I <sub>a</sub>	I <sub>b</sub>	I <sub>c</sub>	I <sub>a</sub>	I <sub>b</sub>	I <sub>c</sub>	V <sub>a</sub>	V <sub>b</sub>	V <sub>c</sub>
1	Baixo – 89	1,28			7,62			1,61		
2	Médio 1 – 212	1,93			23,54			1,32		
3	Médio 2 – 296	2,61			11,92			1,46		
4	Alto - 690	I <sub>a</sub>	I <sub>b</sub>	I <sub>c</sub>	I <sub>a</sub>	I <sub>b</sub>	I <sub>c</sub>	V <sub>a</sub>	V <sub>b</sub>	V <sub>c</sub>
		3,17	3,35	1,04	5,52	13,70	61,51	1,24	1,42	1,66

#### 4.1.1 Residência de consumo baixo

Este consumidor, com um consumo médio mensal de 89 kWh/mês, é atendido apenas por 1 fase. Em pesquisa realizada, constatou-se o baixo número de eletrodomésticos existentes nesta residência, havendo apenas 1 televisão e 1 rádio como aparelhos eletrônicos. A iluminação era essencialmente feita por lâmpadas incandescentes. Outros eletrodomésticos que merecem destaque são a geladeira e o chuveiro. A figura 4-1 apresenta a curva de corrente eficaz da fase que alimenta este consumidor ao longo do tempo, enquanto a figura 4-2 mostra o THD's desta curva de corrente. A figura 4-3 apresenta o THD de tensão no período de coleta de dados.

Analisando as figuras 4-1 e 4-2, pode-se inferir sobre quais cargas eram utilizadas em cada momento. Os picos que ocorrem na figura 4-1 denotam a utilização de chuveiro elétrico (às 17:35, 20:10 e 21:00). No início das curvas, onde o nível de corrente é baixo e o nível de THD é alto, conclui-se que, neste instante, algum aparelho eletrônico estaria sendo utilizado, provavelmente uma televisão. Este fato é confirmado pela curva de corrente às 13 horas que é visualizado na figura 4-4. Em vários momentos no gráfico, percebe-se o ciclo da geladeira apresentado na figura 3-14. Por exemplo, em dois horários: às 2:06 e às 11:50. As figuras 4-5 e 4-6 confirmam esta suposição. Às 21 horas, hora de ponta do sistema, a residência apresenta uma curva com baixo THD visualizado na figura 4-7. Isto pode ser explicado por um número de lâmpadas incandescentes ligadas em paralelo com outro aparelho eletrônico, admitindo que seus moradores estivessem vendo televisão neste instante. Os conteúdos harmônicos das formas de onda apresentadas estão na tabela 4-2. Apenas no horário das 13 horas houve harmônicos significativos até o 31°. Nos outros horários, o último harmônico apresentado do espectro foi aquele que tinha seu módulo maior que 1%.

Uma importante conclusão da comparação realizada entre as figuras 4-1 e 4-2 é que o THD de corrente é inversamente proporcional ao valor eficaz da corrente. Ou seja, pela configuração de cargas existentes no consumidor residencial, à medida que a corrente eficaz aumenta, o índice THD de corrente diminui. Diminuindo a corrente eficaz, o THD de corrente aumenta. Isto se explica por serem ainda lineares as cargas mais significativas neste ambiente residencial.

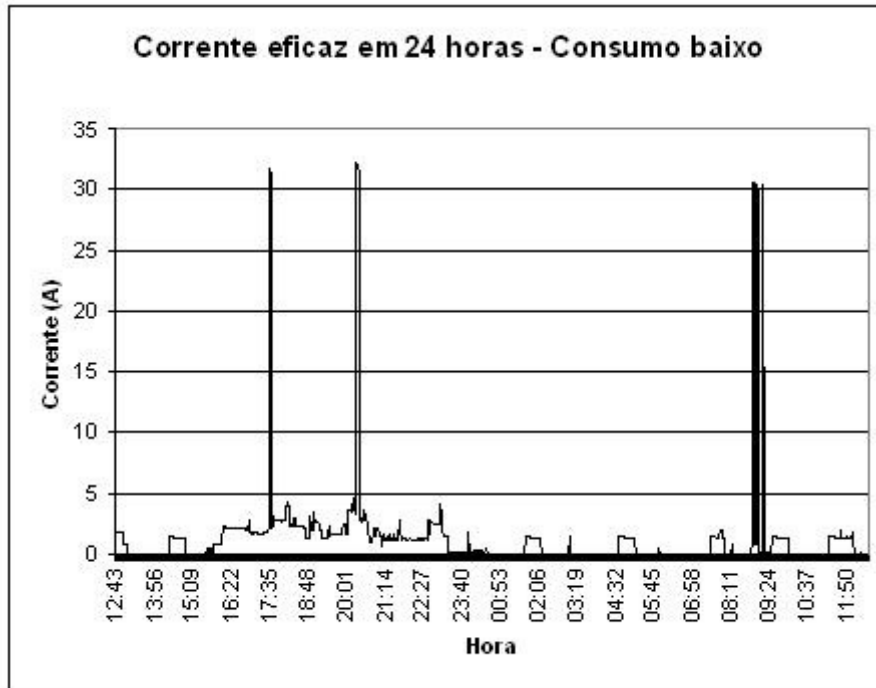


Figura 4-1- Corrente eficaz ao longo do tempo para a residência com consumo baixo

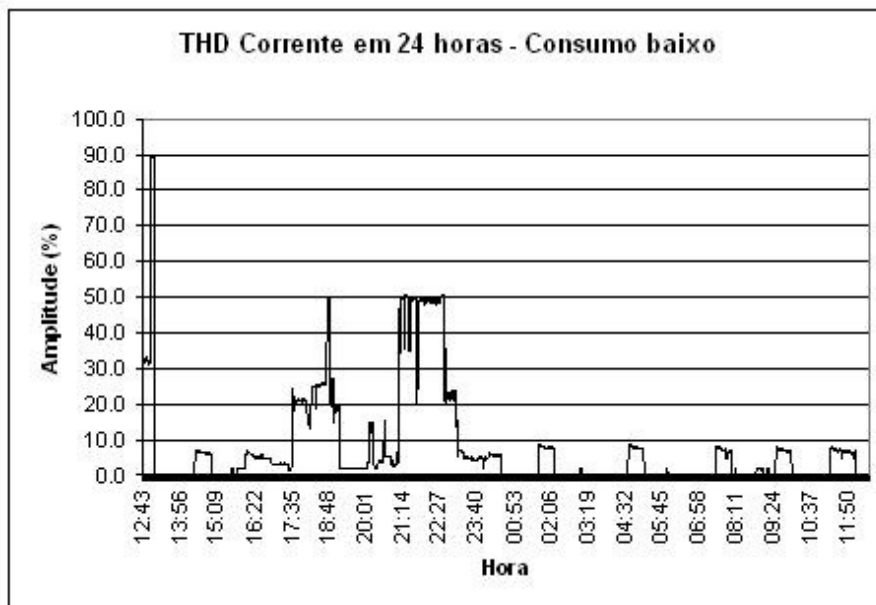


Figura 4-2 - THD de Corrente ao longo do tempo para a residência com consumo baixo

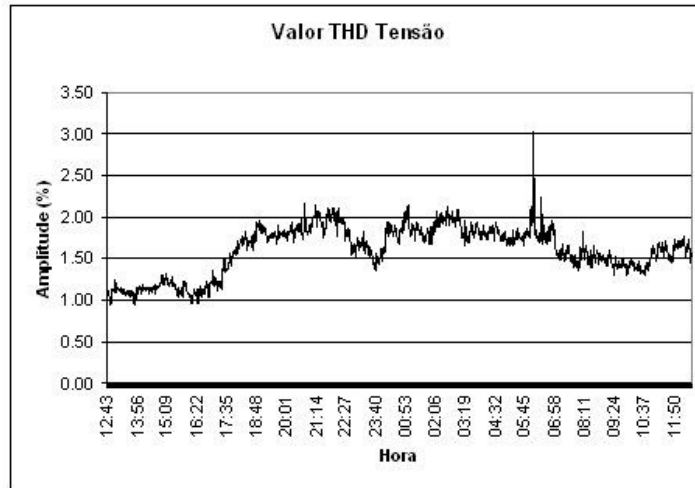


Figura 4-3 - THD de tensão ao longo do tempo para a residência com consumo baixo

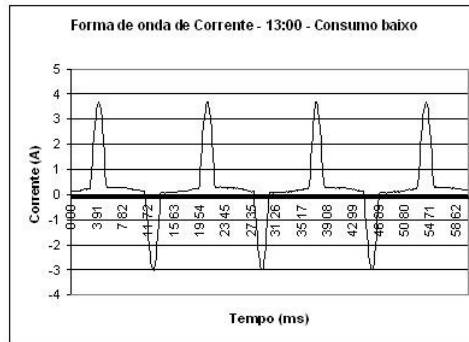


Figura 4-4 - Forma de onda de corrente às 13 horas – consumo baixo

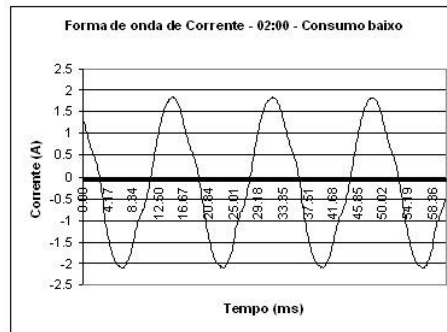


Figura 4-5 - Forma de onda de corrente às 02 horas – consumo baixo

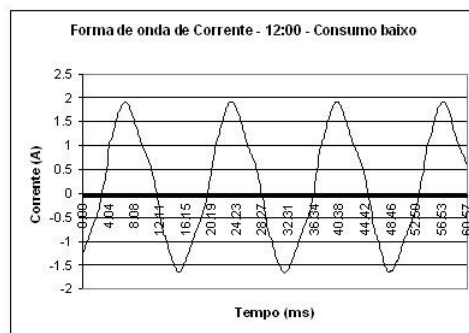


Figura 4-6 - Forma de onda de corrente às 12 horas – consumo baixo

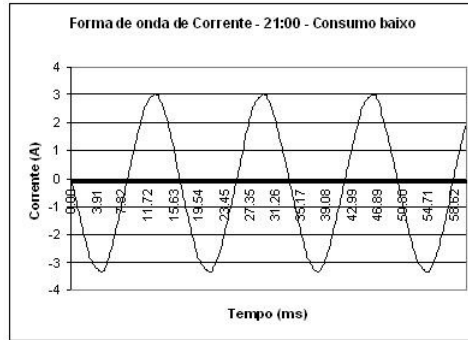


Figura 4-7 - Forma de onda de corrente às 21 horas – consumo baixo

Tabela 4-2- Conteúdos harmônicos das formas de onda de corrente da residência de consumo baixo

Harm.	12:00		13:00		21:00		02:00	
	$I_{rms} = 1,337$		$I_{rms} = 0,857$		$I_{rms} = 2,189$		$I_{rms} = 1,355$	
	$THD_i = 9,02$		$THD_i = 105,15$		$THD_i = 2,87$		$THD_i = 7,68$	
	F. crista = 1,26		F. crista = 2,34		F. crista = 1,37		F. crista = 1,33	
	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)
1	100,00	-59,99	100,00	0,22	100,00	-2,92	100,00	-53,82
3	7,96	69,99	79,83	-169,31	2,65	163,70	6,75	83,22
5	3,50	28,42	56,76	16,04	0,51	-151,24	3,74	0,09
7	1,20	-145,36	31,61	-158,61	-	-	-	-
9	-	-	10,62	22,66	-	-	-	-
11	-	-	3,00	106,33	-	-	-	-
13	-	-	6,55	-122,02	-	-	-	-
15	-	-	4,79	58,37	-	-	-	-
17	-	-	0,46	-124,27	-	-	-	-
19	-	-	2,38	-102,81	-	-	-	-
21	-	-	2,95	78,94	-	-	-	-
23	-	-	1,39	-105,43	-	-	-	-
25	-	-	0,54	17,92	-	-	-	-
27	-	-	1,55	134,46	-	-	-	-
29	-	-	1,42	-57,20	-	-	-	-
31	-	-	0,45	127,73	-	-	-	-

#### 4.1.2 Residências de consumo médio

Neste padrão de consumo foram medidas duas residências: uma com o consumo médio mensal de 212 kWh e outra de 296 kWh. O perfil de eletrodomésticos existente nas duas residências é parecido e também se assemelha ao consumidor com consumo baixo. Entretanto, há mais alguns eletrodomésticos: utensílios de cozinha (batedeira, liquidificador, etc.), computador, ventilador dentre outros. Em relação à iluminação havia algumas lâmpadas fluorescentes compactas.



Os dois consumidores eram atendidos apenas por 1 fase. As figuras 4-8, 4-9 e 4-10 apresentam as curvas de corrente, THD de corrente e tensão ao longo do tempo, respectivamente para o consumidor com consumo médio de 212 kWh (chamado, nos gráficos, consumo médio 1).

A maior parte da figura 4-8 evidencia o ciclo de funcionamento de uma geladeira. Novamente, os picos de corrente representam o funcionamento do chuveiro elétrico. Os valores altos de THD de corrente da figura 4-9 ocorrem nos instantes em que o valor eficaz da corrente diminui consideravelmente, representando o desligamento do compressor da geladeira. Nestes momentos, pelo valor de THD de corrente (em torno de 100%) algum equipamento eletrônico estava ligado. Como exemplo, a figura 4-11 mostra a forma de onda de corrente às 21 horas. A curva apresentada poderia ser definida como uma senóide com um pico de corrente superposto. Pode-se configurar como um ambiente iluminado por uma lâmpada incandescente e uma televisão. A figura 4-12 traz a forma de onda de corrente às 13 horas, sendo esta também como sendo um aparelho eletrônico ligado neste momento. Nos horários de 12 horas e 2 horas da manhã, o compressor da geladeira estava ligado, o que pode ser visto nas figuras 4-13 e 4-14. A tabela 4-3 traz o conteúdo harmônico das formas de onda apresentadas.

A correlação inversa, entre as curvas das figuras 4-8 e 4-9 (corrente eficaz e THD de corrente) percebida na residência de consumo baixo, também pode ser visualizada aqui.

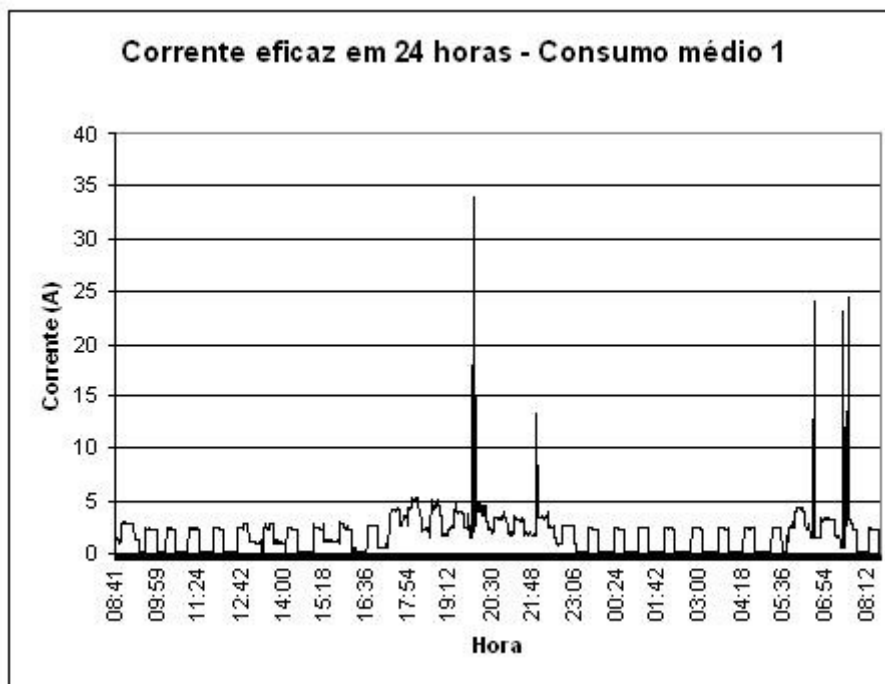


Figura 4-8- Corrente eficaz ao longo do tempo para residência com consumo médio 1

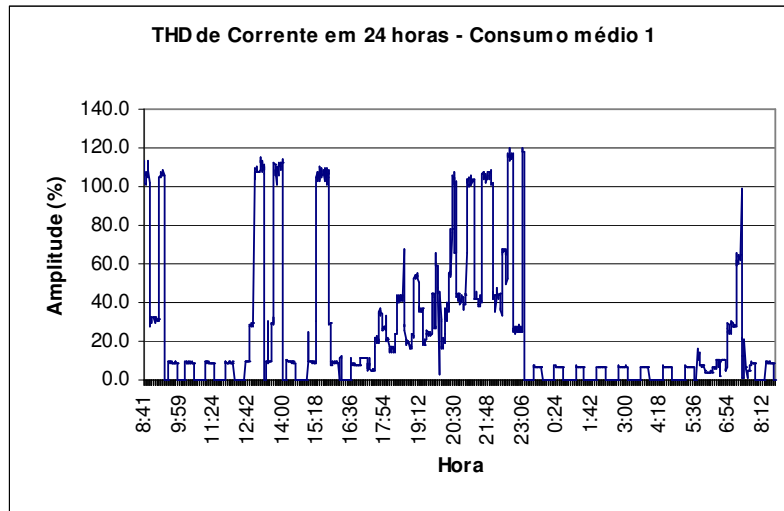


Figura 4-9 - THD de Corrente ao longo do tempo para residência com consumo médio 1

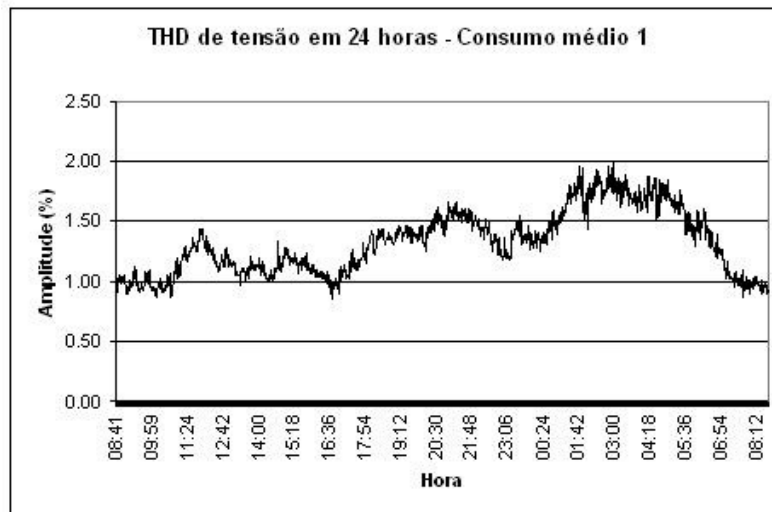


Figura 4-10 - THD de tensão ao longo do tempo para residência com consumo médio 1

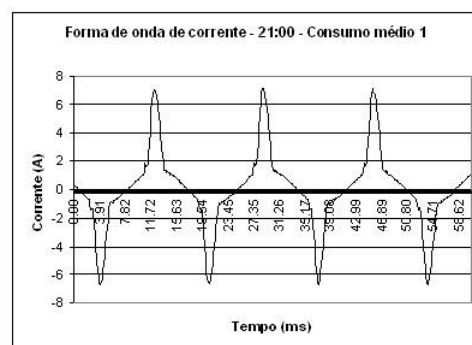


Figura 4-11 - Forma de onda de corrente às 21 horas – consumo médio 1

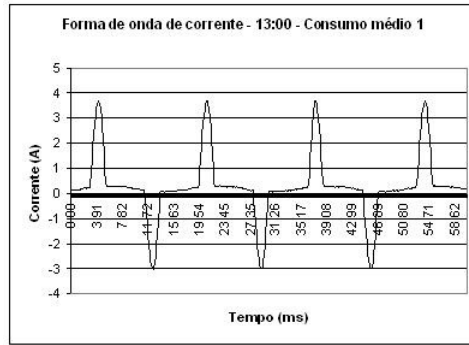


Figura 4-12 - Forma de onda de corrente às 13 horas – consumo médio 1

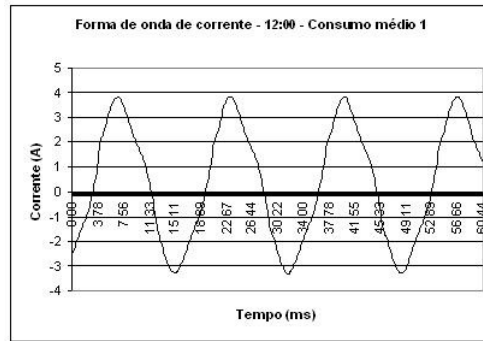


Figura 4-13 - Forma de onda de corrente às 12 horas – consumo médio 1

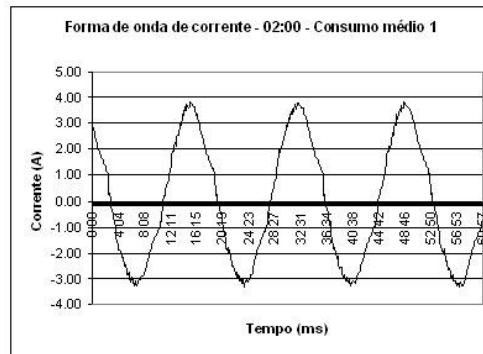


Figura 4-14 - Forma de onda de corrente às 02 horas – consumo médio 1

**Tabela 4-3 - Conteúdos harmônicos das formas de onda de corrente da residência de consumo médio 1**

Harm.	12:00		13:00		21:00		02:00	
	$I_{rms} = 2,396$		$I_{rms} = 1,259$		$I_{rms} = 2,705$		$I_{rms} = 2,387$	
	THD <sub>i</sub> = 9,01		THD <sub>i</sub> = 105,27		THD <sub>i</sub> = 65,90		THD <sub>i</sub> = 7,13	
	F. crista = 1,49		F. crista = 3,00		F. crista = 2,18		F. crista = 1,26	
	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)
1	100,00	-60,10	100,00	0,45	100,00	1,89	100,00	-57,51
3	7,87	111,15	80,03	10,78	51,34	-162,78	3,27	79,34
5	3,55	29,93	57,48	16,47	34,93	26,90	3,44	31,43
7	1,26	31,67	33,03	21,89	19,37	-143,80	1,37	-23,46
9	-	-	12,03	22,75	8,09	49,92	1,11	-47,06
11	-	-	2,29	87,31	2,74	-69,54	1,61	-165,45
13	-	-	6,37	121,33	3,74	176,59	1,71	58,88
15	-	-	5,06	119,58	3,85	18,72	1,14	-80,86
17	-	-	1,33	116,86	1,74	-132,10	-	-
19	-	-	1,97	75,89	1,05	178,60	-	-
21	-	-	2,83	78,99	1,44	43,66	-	-
23	-	-	1,85	77,37	0,81	-94,41	-	-
25	-	-	0,48	0,23	0,65	-128,11	-	-
27	-	-	1,25	53,21	0,89	99,59	-	-
29	-	-	1,42	52,06	0,36	-13,35	-	-
31	-	-	0,53	38,32	0,75	-84,77	-	-

O segundo consumidor medido neste padrão de consumo tinha um consumo médio de 296 kWh/mês (nos gráficos é chamado consumo médio 2). As figuras 4-15, 4-16 e 4-17 apresentam a corrente eficaz, o THD de corrente e tensão ao longo do tempo, respectivamente para este consumidor.

Como na residência anterior, a maior parte da figura de corrente (figura 4-15) é reconhecida como um ciclo de funcionamento da geladeira. O interessante que, durante a madrugada, além do compressor da geladeira algo em paralelo está ligado. Esta conclusão é tirada dos instantes em que o compressor se desliga e a corrente eficaz não vai a zero. Pelo valor de corrente e seu THD, além do horário, pode-se inferir que há uma lâmpada fluorescente com reator eletromagnético. O consumidor, quando entrevistado sobre eletrodomésticos que possuía, confirmou a presença de lâmpadas fluorescentes convencionais. Esta suposição se confirma pela forma de onda às 2 horas da manhã (figura 4-18), com seus valores de THD e eficaz representados na tabela 4-4, que além destes dois valores traz o conteúdo harmônico desta forma de onda. Os picos de corrente da figura 4-15 representam chuveiros enquanto os picos menores (10 a 15 A) se devem a utilização de secadores de cabelo. A forma de onda às 12 horas (figura 4-19) representa um compressor de geladeira, esta um modelo mais antigo. Esta última informação também foi confirmada junto ao consumidor. Ao invés de apresentar a forma de onda às 13 horas, que nas outras residências representou um momento em que havia apenas um aparelho eletrônico, esta situação ocorreu às 15 horas para a residência de consumo médio 2. A figura 4-20 apresenta a forma de onda de corrente às 15 horas enquanto a figura 4-21 traz a forma de onda da corrente às 21 horas. Neste último

horário, a curva de corrente não é distorcida, representando algum dispositivo resistivo sendo utilizado na residência.

Novamente se confirma a correlação inversa da curva de corrente eficaz com a curva de THD de corrente (figuras 4-15 e 4-16), vista nas residências anteriores.

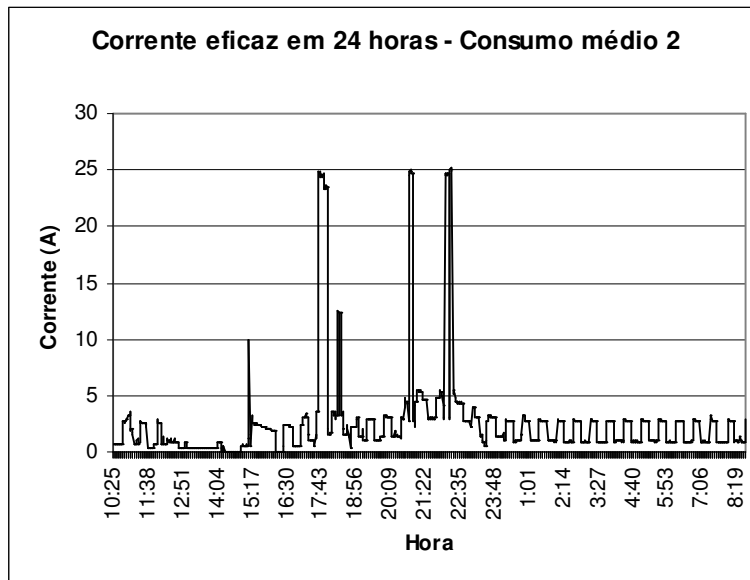


Figura 4-15 - Corrente eficaz ao longo do tempo para residência com consumo médio 2

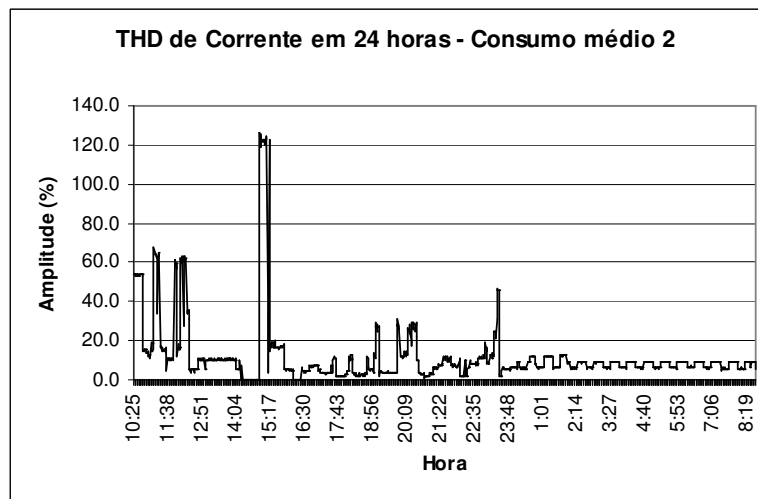


Figura 4-16 - THD de corrente ao longo do tempo para residência com consumo médio 2

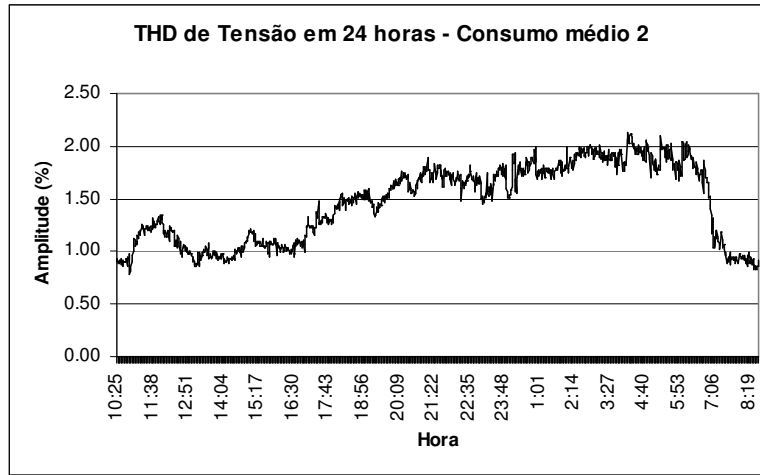


Figura 4-17 - THD de tensão ao longo do tempo para residência com consumo médio 2

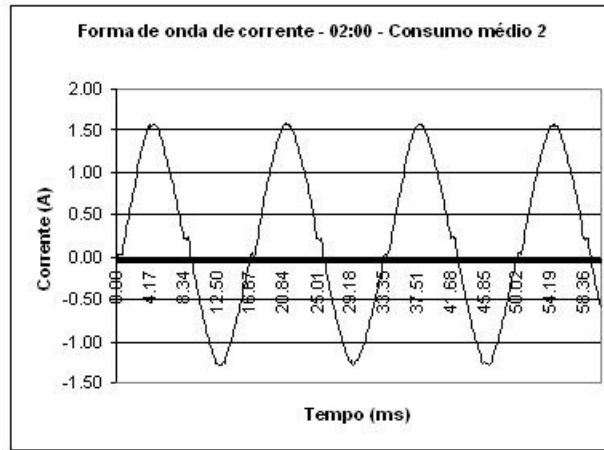


Figura 4-18 - Forma de onda de corrente às 02 horas – consumo médio 2

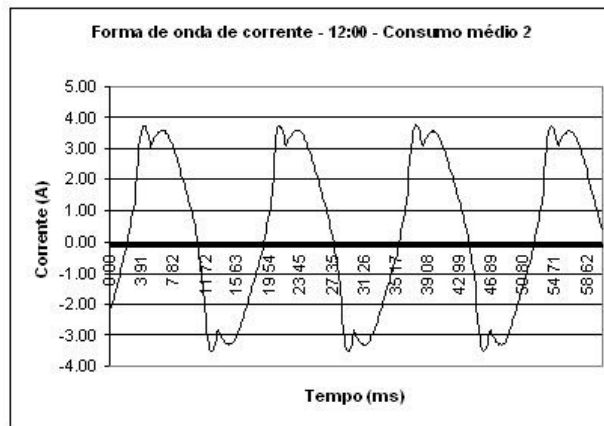


Figura 4-19 - Forma de onda de corrente às 12 horas – consumo médio 2

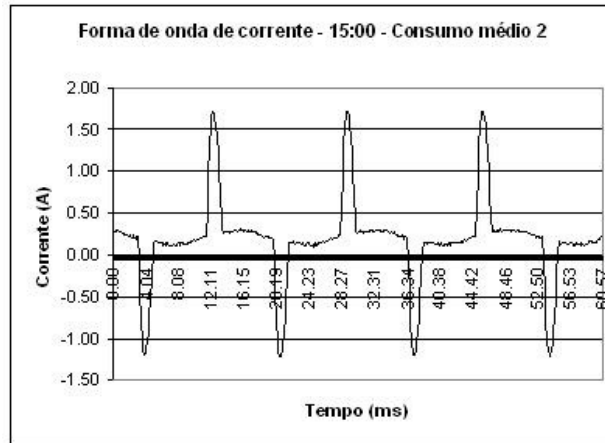


Figura 4-20 - Forma de onda de corrente às 15 horas – consumo médio 2

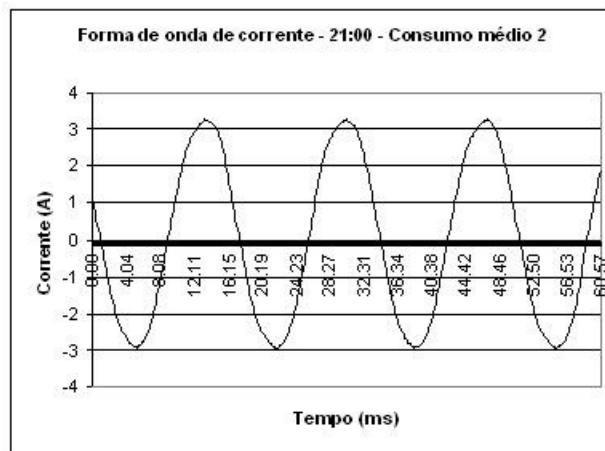


Figura 4-21 - Forma de onda de corrente às 21 horas – consumo médio 2

**Tabela 4-4 - Conteúdos harmônicos das formas de onda de corrente da residência de consumo médio 2**

Harm.	12:00		15:00		21:00		02:00	
	$I_{rms} = 2,602$		$I_{rms} = 0,510$		$I_{rms} = 2,234$		$I_{rms} = 0,946$	
	THD <sub>i</sub> = 15,74		THD <sub>i</sub> = 19,5		THD <sub>i</sub> = 3,75		THD <sub>i</sub> = 8,911	
	F. crista = 1,38		F. crista = 1,82		F. crista = 1,45		F. crista = 1,68	
	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)
1	100,00	-42,13	100,00	-6,31	100,00	-16,48	100,00	-10,25
3	10,36	174,09	82,73	-169,04	3,48	-19,45	8,51	163,94
5	9,69	27,27	66,41	16,19	1,20	130,98	1,12	-172,74
7	5,77	-149,32	48,34	-155,97	0,69	64,47	1,86	146,68
9	3,33	33,65	28,24	33,49	-	-	1,41	131,02
11	1,46	-133,03	12,48	-130,33	-	-	1,10	117,51
13	-	-	3,12	134,16	-	-	-	-
15	-	-	6,96	19,03	-	-	-	-
17	-	-	8,77	-144,18	-	-	-	-
19	-	-	6,57	48,35	-	-	-	-
21	-	-	3,15	-127,25	-	-	-	-
23	-	-	1,07	-163,19	-	-	-	-
25	-	-	2,52	55,44	-	-	-	-
27	-	-	3,29	-114,64	-	-	-	-
29	-	-	2,32	83,17	-	-	-	-
31	-	-	0,89	-89,40	-	-	-	-

#### 4.1.3 Residência de consumo alto

Este consumidor, com um consumo médio mensal de 690 kWh/mês, representou o maior padrão de consumo entre as medições de consumidores residenciais realizadas. Com uma variedade enorme de eletrodomésticos, além dos citados pelos outros consumidores, haviam 2 freezers, 1 banheira de hidromassagem (ainda que declarado que a utilizava raramente), vídeo-cassete, DVD's, computador e outros. Atendida a residência por 3 fases, a medição foi feita nestas e também no cabo de neutro. A figura 4-22 apresenta a corrente eficaz ao longo do tempo nas fases A e B, enquanto a figura 4-23 mostra a corrente eficaz na fase C e no neutro. As figuras 4-24, 4-25 e 4-26 mostram os THD's de corrente nas fases, na corrente de neutro e nas tensões, respectivamente. Na figura 4-25 o THD de corrente de neutro em 24 horas estará sem alguns pontos. Isto se deve à corrente de neutro não ter atingido um valor mínimo para o processamento da FFT no instrumento de medição. Assim, nestes pontos, o instrumento não grava nenhuma informação.



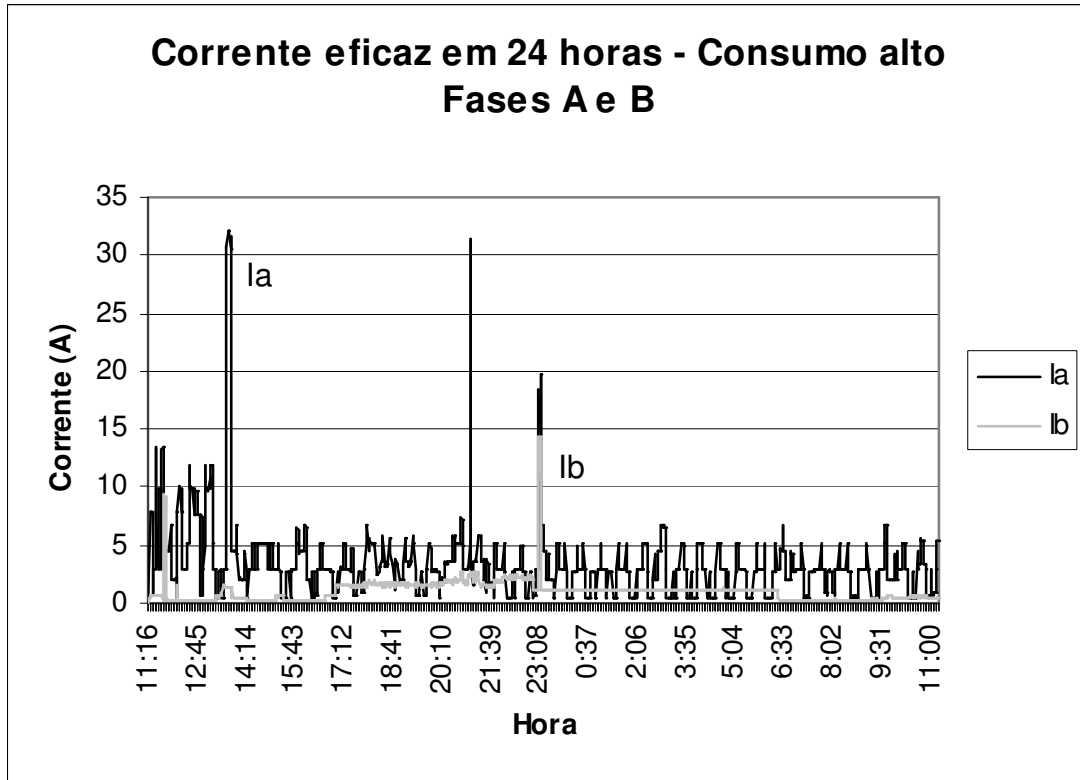


Figura 4-22 - Corrente eficaz em 24 horas – Consumo alto – Fases A e B

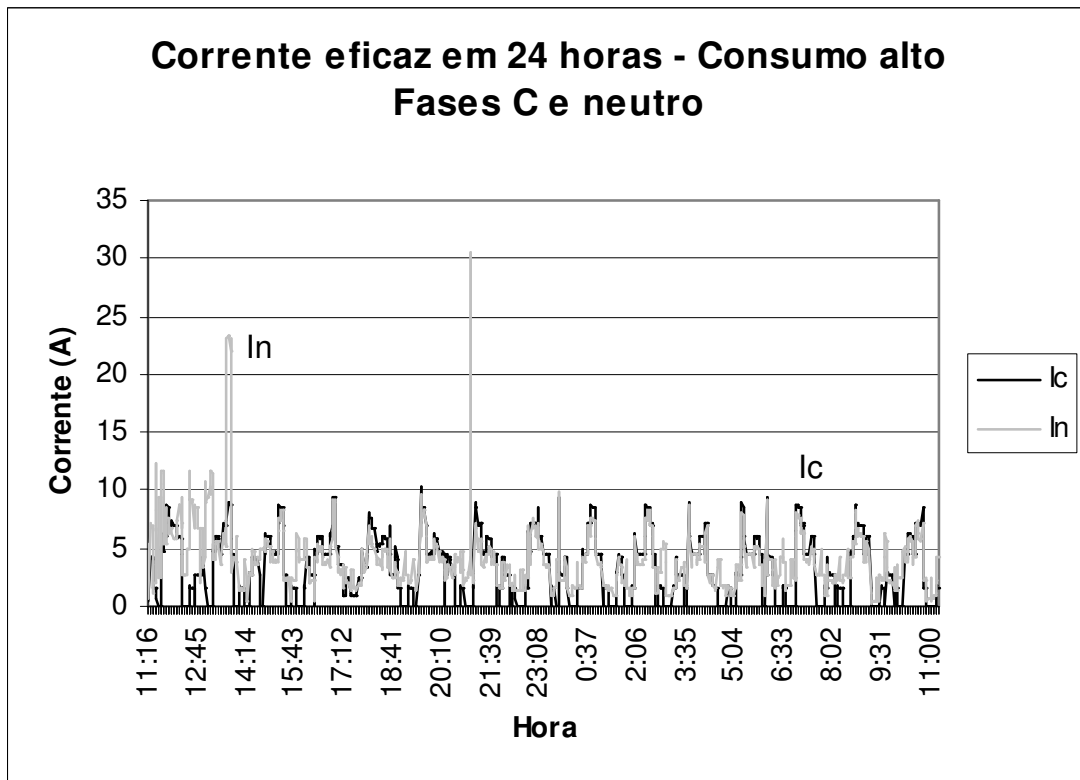


Figura 4-23 - Corrente eficaz em 24 horas – Consumo alto – Fase C e neutro

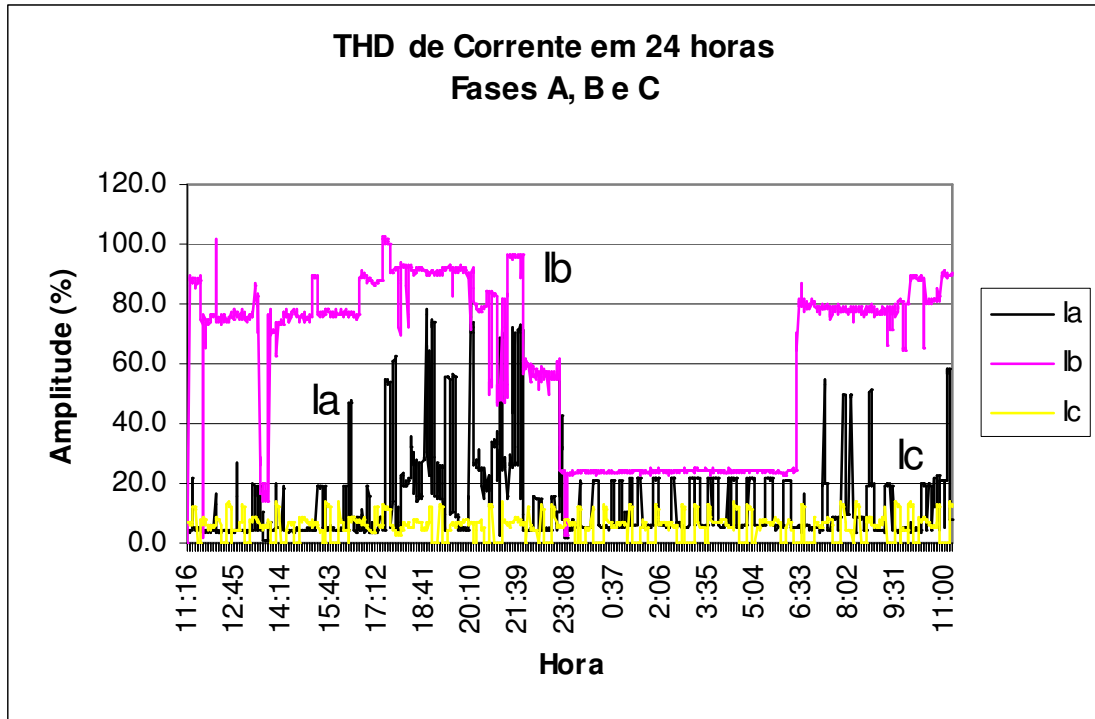


Figura 4-24 - THD de corrente em 24 horas – Consumo alto – Fases A, B e C

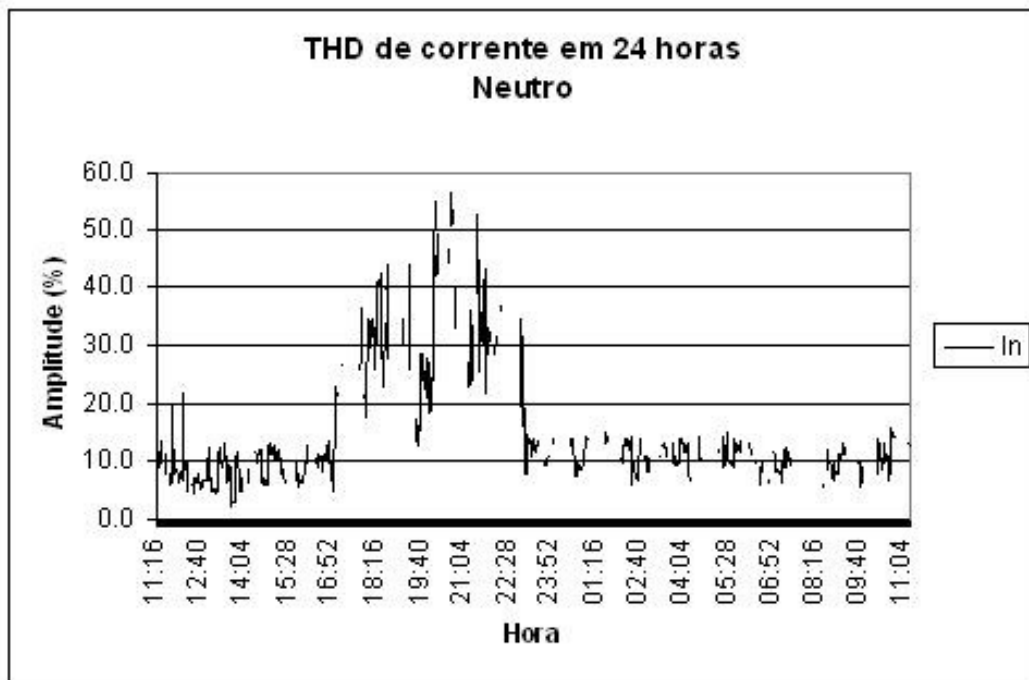
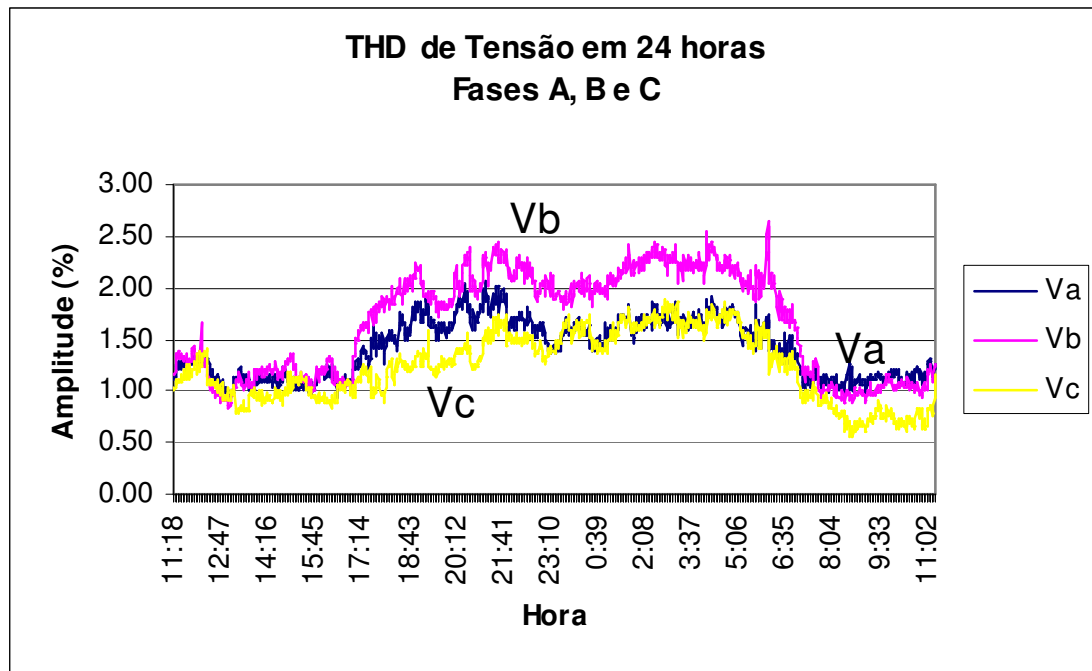


Figura 4-25 - THD de corrente em 24 horas – Consumo alto – Neutro



**Figura 4-26 - THD de tensão em 24 horas – Consumo alto – Fases A, B e C**

Analisando as figuras apresentadas, percebe-se que a fase A é a fase onde se encontra uma geladeira a ela conectada. Confirma-se esta suposição pela clara visualização do ciclo do compressor nas figuras 4-22 e 4-24. A fase C fica mais com cargas eletrônicas, pois seu valor rms é baixo na maior parte do tempo com um THD alto. Na fase B fica difícil de supor que cargas estariam a ela ligada. Uma é facilmente identificável: um chuveiro elétrico por volta de 20:40, sendo este monofásico. A medição do THD de neutro indica que os horários com maior produção de harmônicos nesta residência são entre as 17 horas e 23 horas.

As figuras 4-27, 4-28, 4-29 e 4-30 apresentam as formas de onda de corrente das fases e do neutro nos horários de 12 horas, 18 horas, 21 horas e 02 horas da manhã, respectivamente. Estas formas de onda confirmam as percepções ditas acerca das correntes nas fases. As tabelas 4-5, 4-6, 4-7 e 4-8 trazem os conteúdos harmônicos das formas de onda apresentadas. Interessante notar que, às 21 horas, o compressor de geladeira estava desligado (fase A). Isto também ocorre às 02 horas da manhã, mas ligado a ela há outra carga que provavelmente seja um conjunto de lâmpadas fluorescentes com reatores eletromagnéticos, devido ao THD apresentado.

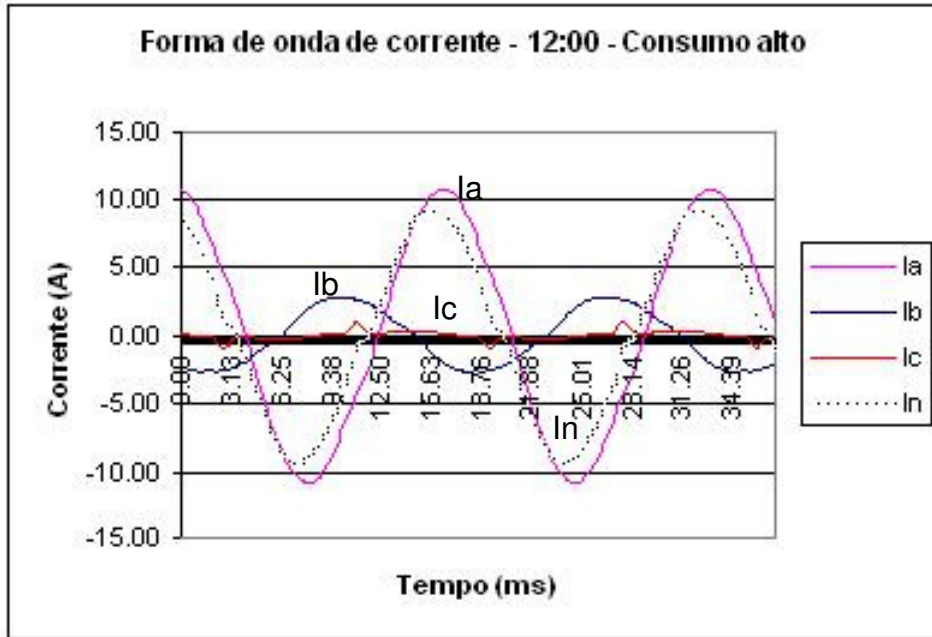


Figura 4-27 - Formas de onda de corrente às 12 horas – consumo alto

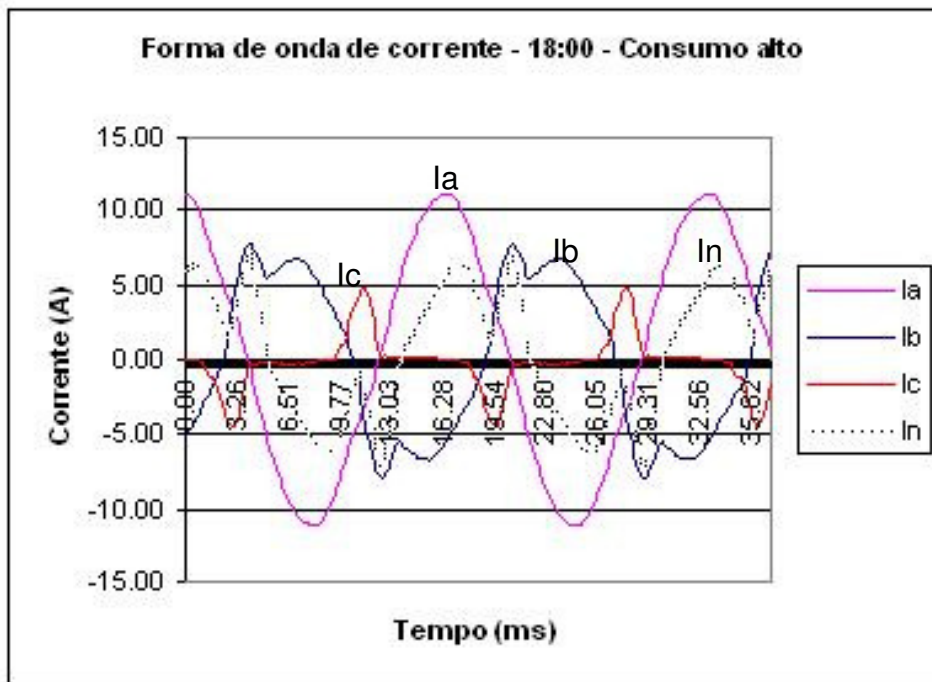


Figura 4-28 - Formas de onda de corrente às 18 horas – consumo alto

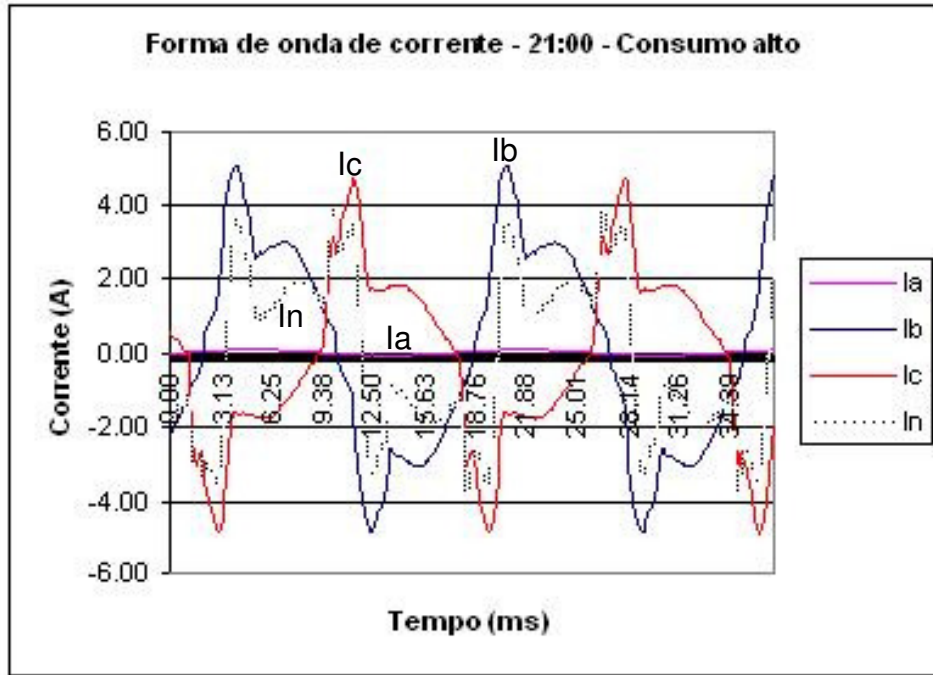


Figura 4-29 - Formas de onda de corrente às 21 horas – consumo alto

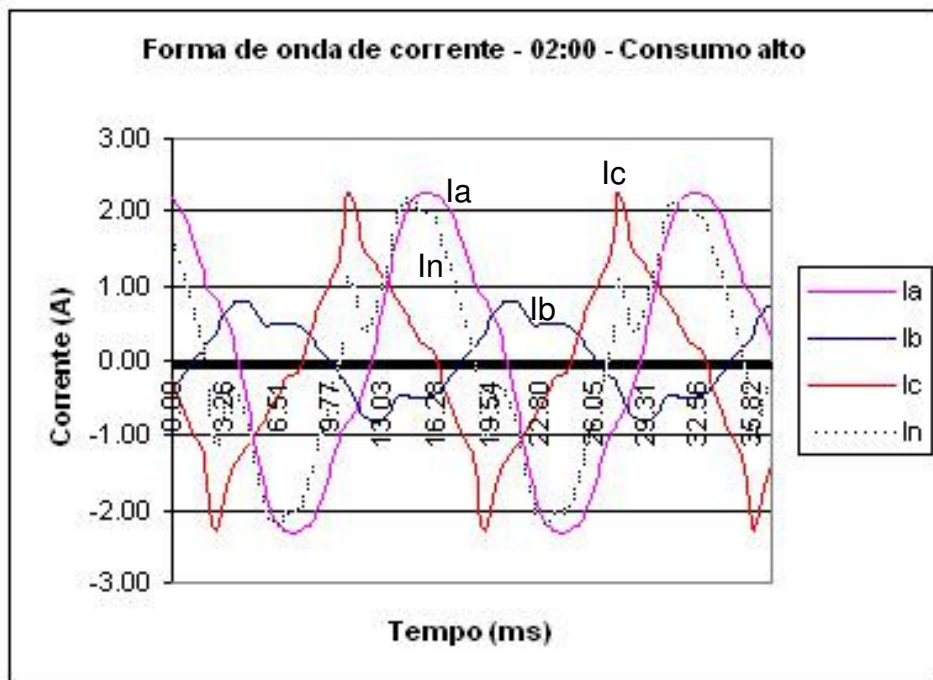


Figura 4-30 - Formas de onda de corrente às 02 horas – consumo alto

**Tabela 4-5 - Conteúdo harmônico da forma de onda de corrente da residência de consumo alto às 12 horas**

Harm.	Fase A		Fase B		Fase C		Neutro	
	$I_{rms} = 7,607$		$I_{rms} = 1,962$		$I_{rms} = 0,312$		$I_{rms} = 6,322$	
	THD <sub>i</sub> = 4,17		THD <sub>i</sub> = 6,08		THD <sub>i</sub> = 75,89		THD <sub>i</sub> = 8,31	
	F. crista = 1,44		F. crista = 1,39		F. crista = 2,85		F. crista = 1,44	
	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)
1	100,00	5,37	100,00	-130,78	100,00	89,94	100,00	-3,99
3	3,64	83,43	4,49	68,21	43,30	27,53	7,02	71,45
5	1,49	-18,78	3,83	-73,43	40,33	-116,97	3,47	-62,71
7	-	-	-	-	33,92	134,72	1,60	166,89
9	-	-	-	-	24,06	18,18	1,39	49,74
11	-	-	-	-	17,40	-99,08	-	-
13	-	-	-	-	12,03	148,18	-	-
15	-	-	-	-	6,70	35,80	-	-
17	-	-	-	-	3,50	-77,71	-	-
19	-	-	-	-	2,14	-168,33	-	-
21	-	-	-	-	0,80	140,04	-	-
23	-	-	-	-	0,98	64,15	-	-
25	-	-	-	-	0,92	-25,44	-	-
27	-	-	-	-	1,50	-127,59	-	-
29	-	-	-	-	1,31	115,70	-	-
31	-	-	-	-	1,32	0,28	-	-

**Tabela 4-6 - Conteúdo harmônico da forma de onda de corrente da residência de consumo alto às 18 horas**

Harm.	Fase A		Fase B		Fase C		Neutro	
	$I_{rms} = 7,650$		$I_{rms} = 5,393$		$I_{rms} = 1,719$		$I_{rms} = 4,317$	
	THD <sub>i</sub> = 4,27		THD <sub>i</sub> = 22,83		THD <sub>i</sub> = 92,95		THD <sub>i</sub> = 45,06	
	F. crista = 1,45		F. crista = 1,43		F. crista = 2,78		F. crista = 1,63	
	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)
1	100,00	6,95	100,00	-132,67	100,00	114,37	100,00	-26,07
3	3,37	68,51	16,94	114,90	73,73	-2,35	30,45	60,48
5	2,28	-39,09	13,98	-53,88	47,36	-132,37	29,34	-76,51
7	-	-	5,29	143,06	24,64	92,36	13,46	127,40
9	-	-	1,12	-38,01	12,67	-62,88	5,49	-42,07
11	-	-	0,82	-1,70	8,13	141,47	1,52	120,53
13	-	-	1,45	173,04	3,78	-25,70	1,26	-142,24
15	-	-	1,12	22,14	4,09	142,09	1,53	91,25
17	-	-	0,66	-87,90	4,24	5,71	1,69	-12,04
19	-	-	1,15	177,07	1,94	-92,25	1,32	-140,99
21	-	-	1,24	38,54	1,98	-108,83	1,13	48,32
23	-	-	-	-	3,28	156,51	1,16	-134,58
25	-	-	-	-	2,29	54,31	-	-
27	-	-	-	-	0,68	-15,49	-	-
29	-	-	-	-	1,31	-27,65	-	-
31	-	-	-	-	1,47	-133,60	-	-

**Tabela 4-7 - Conteúdo harmônico da forma de onda de corrente da residência de consumo alto às 21 horas**

Harm.	Fase A*		Fase B		Fase C		Neutro	
	$I_{rms} = 0$		$I_{rms} = 2,749$		$I_{rms} = 2,303$		$I_{rms} = 2,202$	
	THD <sub>i</sub> = -		THD <sub>i</sub> = 30,86		THD <sub>i</sub> = 47,47		THD <sub>i</sub> = 83,32	
	F. crista = -		F. crista = 1,80		F. crista = 2,05		F. crista = 1,72	
	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)
1	-	-	100,00	-122,96	100,00	96,03	100,00	-171,50
3	-	-	23,43	114,59	39,21	20,76	58,29	62,74
5	-	-	16,98	-70,43	20,54	-99,39	49,98	-79,28
7	-	-	8,63	110,83	4,73	93,79	19,09	113,03
9	-	-	4,21	-56,03	9,52	-84,05	17,64	-64,63
11	-	-	1,66	-145,88	9,83	167,81	13,86	-173,19
13	-	-	2,74	106,81	4,60	74,43	9,47	101,80
15	-	-	1,65	-40,86	2,05	95,60	1,88	40,30
17	-	-	0,43	-44,19	4,59	22,93	5,80	34,38
19	-	-	1,31	166,93	4,00	-64,15	3,89	-69,11
21	-	-	1,00	-37,57	2,28	-121,40	3,23	-72,46
23	-	-	1,43	118,95	2,36	-167,97	4,01	-175,84
25	-	-	1,00	-46,00	2,21	116,29	1,32	121,93
27	-	-	0,31	-46,01	1,10	46,65	1,35	54,53
29	-	-	1,12	172,88	0,89	28,17	1,03	166,40
31	-	-	0,61	16,61	0,99	-38,13	1,83	18,28

\* Compressor da geladeira desligado, apresentando baixos valores de corrente, fazendo com que o instrumento de medição não medisse o conteúdo harmônico

**Tabela 4-8 - Conteúdo harmônico da forma de onda de corrente da residência de consumo alto às 02 horas da manhã**

Harm.	Fase A		Fase B		Fase C		Neutro	
	$I_{rms} = 1,590$		$I_{rms} = 0,505$		$I_{rms} = 1,140$		$I_{rms} = 1,392$	
	THD <sub>i</sub> = 12,04		THD <sub>i</sub> = 21,57		THD <sub>i</sub> = 24,00		THD <sub>i</sub> = 27,91	
	F. crista = 1,41		F. crista = 1,60		F. crista = 1,97		F. crista = 1,54	
	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)
1	100,00	9,81	100,00	-113,15	100,00	107,94	100,00	41,50
3	10,94	100,73	18,08	127,78	19,49	6,19	21,82	67,21
5	4,57	-58,04	11,27	-98,43	7,54	-115,07	14,31	-86,43
7	0,97	-115,07	1,69	93,80	8,86	109,18	7,12	121,57
9	-	-	1,59	108,69	5,98	23,66	4,84	43,99
11	-	-	2,12	-93,27	3,15	-123,66	3,13	-103,92
13	-	-	-	-	3,09	143,61	2,60	151,85
15	-	-	-	-	1,03	49,67	-	-

## 4.2 Consumidores comerciais

Em um centro comercial foram medidos 13 diferentes consumidores comerciais. O tempo médio de medição por consumidor foi de 2 horas. As medições, como nos consumidores residenciais, foram feitas no ramal do padrão de medição dos clientes. A maior parte dos consumidores tinha um perfil de demanda fixo ao longo do tempo. Quando havia alguma variação, era porque ou tinha um ar condicionado ligado ou nas instalações elétricas do consumidor haviam cargas específicas que causavam isto (refrigeradores e outros). As cargas presentes nestes consumidores eram cargas de iluminação, sendo a maior parte utilizando lâmpadas fluorescentes convencionais e compactas, computadores e cargas específicas para o ramo de atuação. A referência [52] traz uma caracterização das curvas de demanda de vários consumidores comerciais. Ainda que não seja o objetivo do presente trabalho, as curvas de demanda encontradas foram de encontro com as apresentadas na citada referência.

A tabela 4-9 traz os consumidores comerciais medidos com a corrente média e os THD's médios de tensão e corrente. Os consumidores são atendidos por duas fases, com exceção de dois, atendidos por três fases: uma agência de turismo e um escritório de advogados. A diferença é devido ao grande número de cargas instaladas nestes locais, predominantemente computadores e aparelhos de ar condicionado.

Tabela 4-9 - Consumidores comerciais

No.	Ramo de atuação	I <sub>eficaz</sub> médio (A)		THD <sub>I</sub> -médio (%)			THD <sub>V</sub> - médio (%)			
		I <sub>a</sub>	I <sub>b</sub>	I <sub>a</sub>	I <sub>b</sub>	V <sub>a</sub>	V <sub>b</sub>			
1	Escritório administrativo	15,30	1,89	10,69	6,04	3,01	2,51			
2	Bar	9,42	7,44	6,91	4,84	1,52	2,35			
3	Contabilidade	15,17	20,17	6,47	15,05	2,68	2,67			
4	Curso de informática	7,57	8,47	84,17	79,09	1,52	1,45			
5	Escritório de jornalismo	4,52	4,54	30,39	28,27	1,50	1,17			
6	Salão de Beleza	13,26	21,79	6,69	14,64	1,93	2,24			
7	Seguradora	15,14	13,81	9,81	26,03	1,97	2,36			
8	Venda de bijuterias	4,64	3,18	42,84	65,44	1,37	2,15			
9	Venda de computadores	14,36	25,54	28,90	28,23	1,96	1,83			
10	Venda de cosméticos	7,23	11,13	27,78	44,12	2,08	1,55			
11	Venda de roupas	4,02	0,89	8,75	67,14	1,35	1,97			
		I <sub>eficaz</sub> médio (A)			THD <sub>I</sub> -médio (%)			THD <sub>V</sub> - médio (%)		
		I <sub>a</sub>	I <sub>b</sub>	I <sub>c</sub>	I <sub>a</sub>	I <sub>b</sub>	I <sub>c</sub>	V <sub>a</sub>	V <sub>b</sub>	V <sub>c</sub>
12	Agência de turismo	13,60	13,90	10,70	5,72	10,62	53,31	1,47	2,35	2,00
13	Escritório de advogados	13,79	14,53	19,38	31,34	7,76	17,14	3,36	3,10	2,89



Não serão apresentadas todas as formas de onda dos 13 consumidores comerciais, mesmo porque há algumas curvas de demanda que são parecidas entre si. Assim, serão mostradas as curvas dos seguintes consumidores:

- Venda de roupas
- Venda de computadores
- Curso de informática
- Agência de turismo

#### 4.2.1 Venda de roupas

Este consumidor apresentava uma curva de demanda invariável no tempo de medição coletado. As cargas presentes eram apenas lâmpadas fluorescentes convencionais e compactas, sendo estas últimas utilizadas na vitrine da loja. Essa invariabilidade na corrente demandada também foi constatada para o escritório administrativo, contabilidade, venda de bijuterias (loja muito parecida com a em análise) e venda de cosméticos. A figura 4-31 traz a curva de corrente ao longo do tempo de medição. As figuras 4-32 e 4-33 trazem o THD de corrente e tensão, respectivamente.

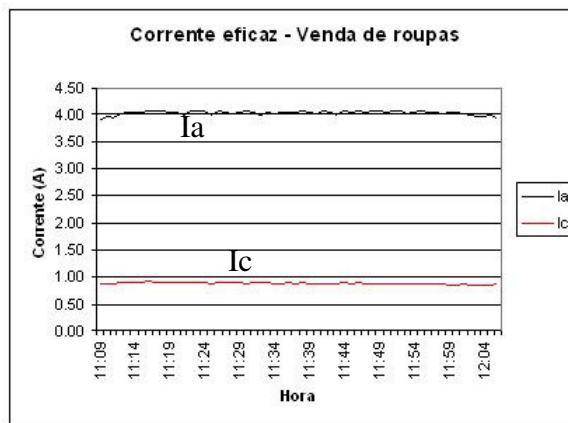


Figura 4-31 - Corrente eficaz ao longo do tempo – Venda de roupas

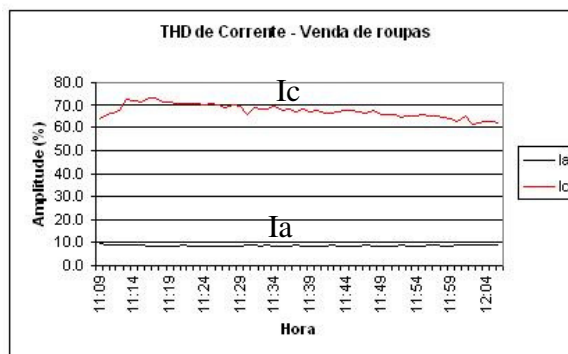


Figura 4-32 - THD de corrente ao longo do tempo – Venda de roupas

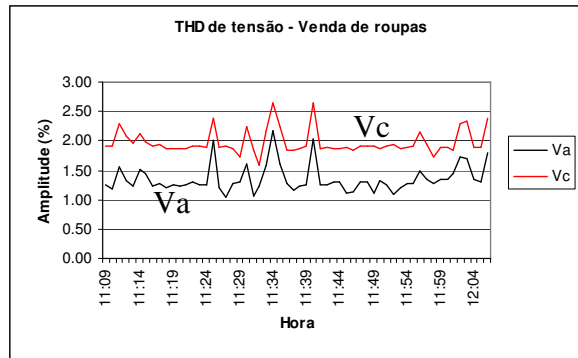


Figura 4-33 - THD de tensão ao longo do tempo – Venda de roupas

A figura 4-34 traz a forma de onda das correntes de fases. A tabela 4-10 revela o conteúdo harmônico das formas de onda apresentadas. As fases no padrão de medição do consumidor eram as fases A e C. A corrente na fase C apresenta uma visível diferença entre o semi-ciclo positivo e o semi-ciclo negativo. Assim, seu conteúdo harmônico irá apresentar dois harmônicos pares: o 2º e o 4º.

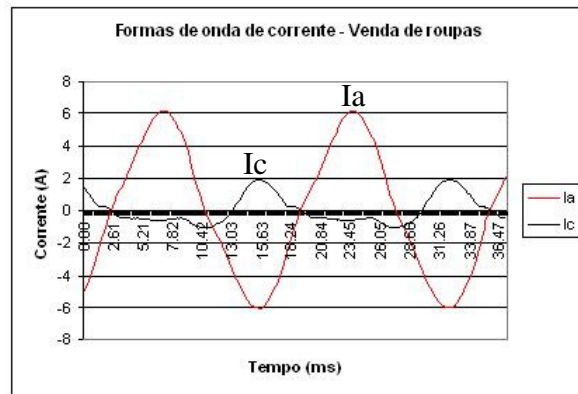


Figura 4-34 - Formas de onda de corrente – Venda de roupas

Tabela 4-10- Conteúdo harmônico das formas de onda de corrente – Venda de roupas

Harmônicos	Fase A		Fase C	
	$I_{rms} = 4,055 \text{ A}$		$I_{rms} = 0,891 \text{ A}$	
	$THD_i = 8,62\%$		$THD_i = 67,23\%$	
	Fator de crista = 1,48		Fator de crista = 1,12	
	Módulo (%)	Ângulo (graus)	Módulo (%)	Ângulo (graus)
1	100,00	-56,04	100,00	101,73
2	-	-	61,26	-40,80
3	8,54	-30,42	21,63	-158,70
4	-	-	4,04	20,59
5	1,54	-155,75	5,23	-112,53
7	1,00	109,56	4,62	120,18
9	0,45	41,08	0,78	66,30

## 4.2.2 Venda de computadores

Este consumidor apresenta uma curva de carga variável em um ciclo determinado (figura 4-35). Isto se deve à presença de ar condicionado com termostato que desliga o compressor do ar quando atinge o nível de temperatura determinado. A curva de corrente deste consumidor se assemelha às curvas de corrente do escritório de jornalismo, agência de turismo, escritório de advogados, bar e salão de beleza. A variabilidade de carga do bar se deve a 2 refrigeradores enquanto que no salão de beleza seria a utilização de secadores de cabelo, além do ar condicionado também ali presente. A figura 4-35 apresenta a corrente eficaz ao longo do tempo de medição enquanto as figuras 4-36 e 4-37 os THD's de corrente e tensão.

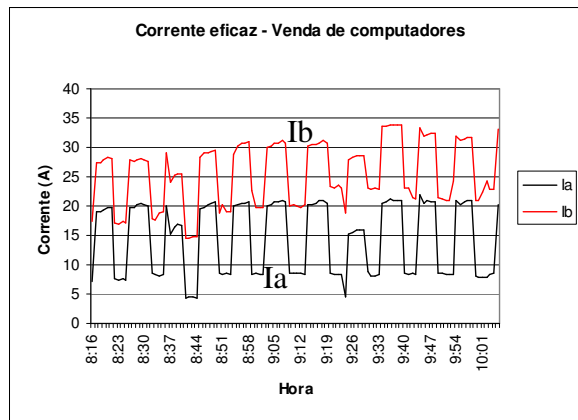


Figura 4-35- Corrente eficaz ao longo do tempo – Venda de computadores

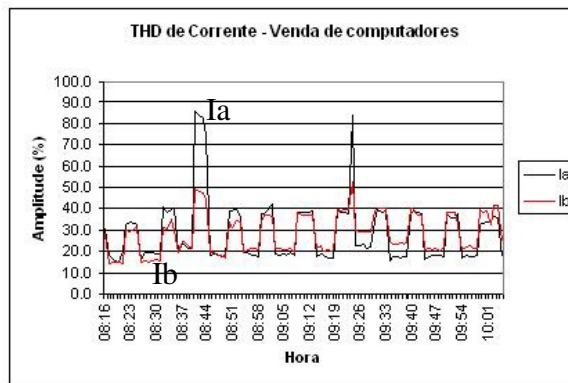


Figura 4-36 - THD de corrente ao longo do tempo – Venda de computadores

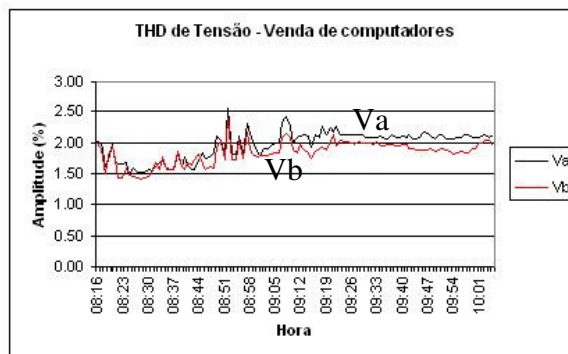
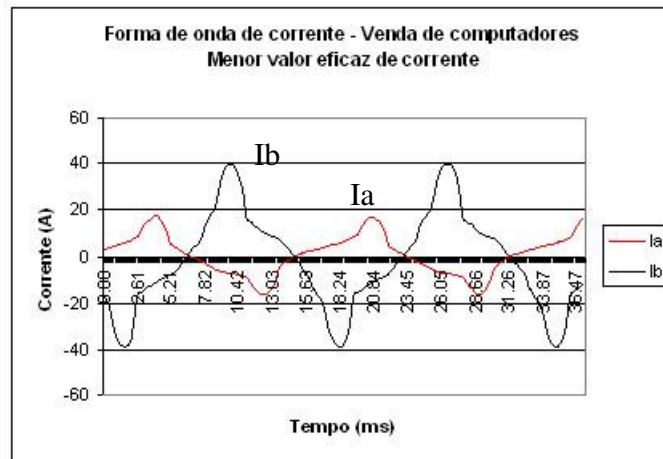


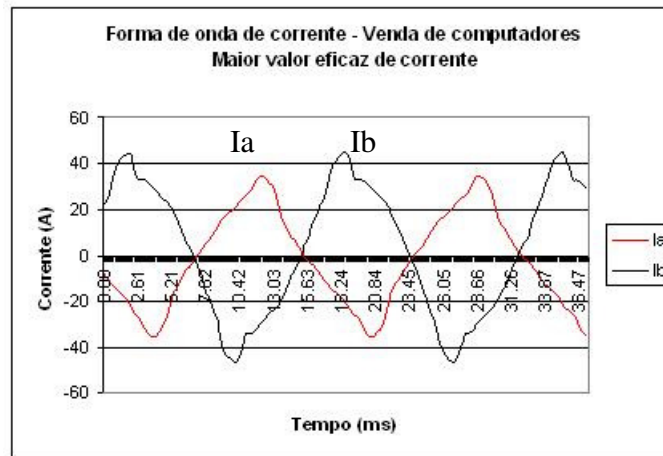
Figura 4-37 - THD de tensão ao longo do tempo – Venda de computadores

Comparando as curvas 4-35 e 4-36 chega-se a conclusão acerca de correlação inversa entre a curva de valor eficaz de corrente e seu THD, conclusão esta também conseguida nos consumidores residenciais.

O ciclo de funcionamento visualizado na figura 4-35 acontece simultaneamente nas duas fases, indicando que o ar condicionado era bifásico. Como na curva de corrente há dois momentos distintos, um de menor valor eficaz de corrente e outro de maior valor, as figuras 4-38 e 4-39 apresentam formas de ondas nestes dois instantes. A tabela 4-11 traz o conteúdo harmônico de corrente nos instantes mencionados.



**Figura 4-38 - Forma de onda de corrente – Venda de computadores – Menor valor eficaz de corrente**



**Figura 4-39 - Forma de onda de corrente – Venda de computadores – Maior valor eficaz de corrente**

Tabela 4-11 - Conteúdo harmônico das formas de onda de corrente – Venda de computadores

Harm.	Menor valor eficaz de corrente				Maior valor eficaz de corrente			
	Fase A		Fase B		Fase A		Fase B	
	$I_{rms} = 8,480$		$I_{rms} = 19,883$		$I_{rms} = 20,314$		$I_{rms} = 27,786$	
	$THD_i = 39,51$		$THD_i = 35,95$		$THD_i = 19,42$		$THD_i = 15,09$	
	F. crista = 1,87		F. crista = 1,91		F. crista = 1,67		F. crista = 1,62	
	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)
1	100,00	23,38	100,00	-128,13	100,00	21,20	100,00	-141,60
3	30,70	-167,43	32,10	-170,68	16,76	-156,34	13,71	-170,12
5	18,32	10,80	15,43	107,90	7,46	9,52	7,25	112,14
7	7,81	-173,67	6,77	25,71	2,15	-161,93	2,05	44,05
9	3,14	-22,22	3,68	-60,20	1,39	-5,34	2,17	-45,50
11	1,86	58,76	1,61	108,33	0,50	32,28	0,53	153,53
13	2,51	-135,94	3,57	31,18	1,07	-140,51	1,63	49,76
15	1,53	23,49	2,25	-31,89	0,82	30,24	1,27	-10,72
17	0,65	110,00	0,74	-176,29	-	-	-	-
19	1,10	-108,30	1,09	74,14	-	-	-	-

### 4.2.3 Curso de informática

O curso de informática foi escolhido para aqui ser exposto o seu alto THD de corrente nas fases medidas. Várias referências descrevem os problemas relativos a Centros de Processamento de dados (CPD's) devido aos harmônicos gerados pelos computadores destes locais [53, 54].

O curso de informática medido continha 15 computadores. Alimentado por duas fases, tinha como iluminação lâmpadas fluorescentes convencionais. As figuras 4-40 e 4-41 apresentam a curva de corrente eficaz e THD de corrente ao longo do tempo, sendo que a figura 4-42 mostra o THD de tensão durante a medição.

A medição iniciou-se por volta das 13:20. O treinamento iniciava às 14 horas e terminava às 17 horas, momento em que a medição foi concluída. A figura 4-41 mostra o alto nível de distorção harmônica durante o funcionamento do treinamento. Isto, em alguns casos, pode se tornar crítico devido principalmente ao nível de potência demandada.

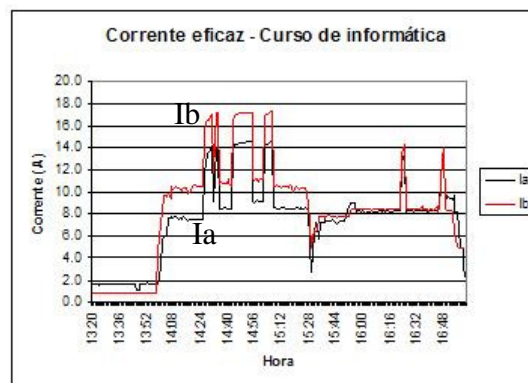


Figura 4-40 - Corrente eficaz ao longo do tempo – Curso de informática

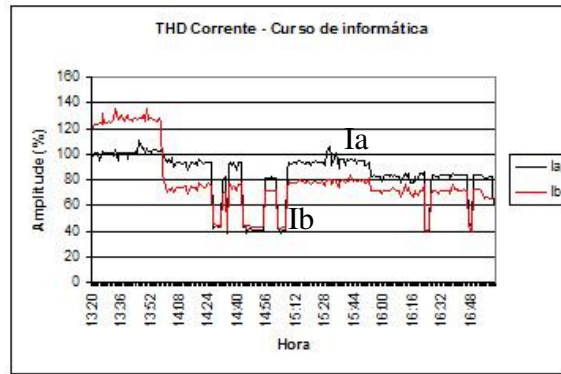


Figura 4-41 - THD de corrente ao longo do tempo – Curso de informática

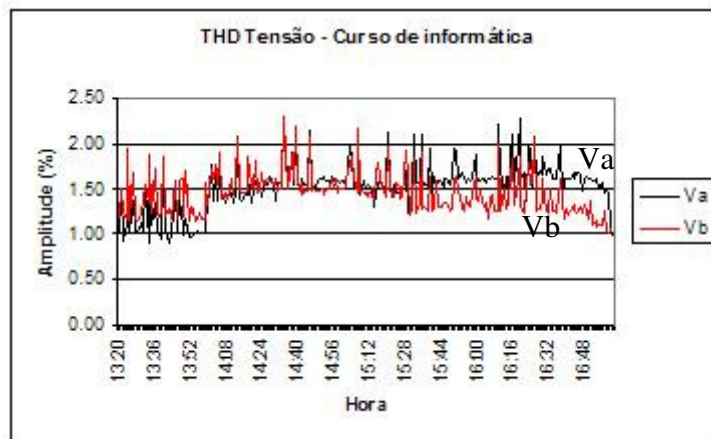


Figura 4-42 - THD de tensão ao longo do tempo – Curso de informática

A figura 4-43 mostra a forma de onda de corrente típica no curso de informática. A tabela 4-12 apresenta o conteúdo harmônico das ondas de corrente da figura 4-43.

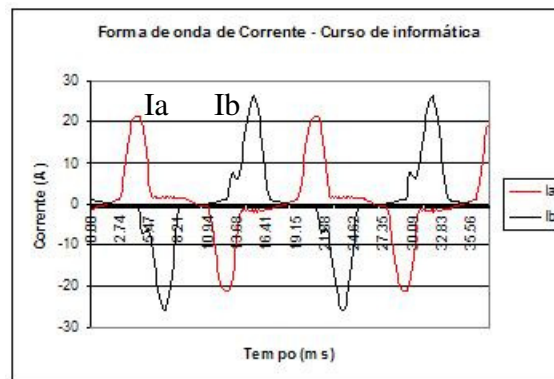


Figura 4-43 - Forma de onda de corrente – Curso de informática

Tabela 4-12 - Conteúdo harmônico das formas de onda de corrente – Curso de informática

Harmônicos	Fase A		Fase C	
	$I_{rms} = 9,116 \text{ A}$		$I_{rms} = 11,100 \text{ A}$	
	THD <sub>i</sub> = 81,63%		THD <sub>i</sub> = 71,70%	
	Fator de crista = 2,30		Fator de crista = 2,34	
	Módulo (%)	Ângulo (graus)	Módulo (%)	Ângulo (graus)
1	100,00	-6,21	100,00	128,66
3	66,89	-178,62	61,58	-160,04
5	42,12	-2,92	30,64	-107,33
7	16,68	172,32	17,09	-63,64
9	2,20	-95,07	4,90	6,66
11	6,54	11,11	5,57	-106,77
13	5,38	-179,63	5,79	-13,06
15	2,13	-22,05	1,49	173,40
17	0,93	60,27	3,72	-43,64
19	1,01	-167,36	1,22	53,72

#### 4.2.4 Agência de turismo

A agência de turismo era uma loja com um grande número de cargas instaladas, predominantemente computadores, sendo então alimentada por 3 fases. O escritório de advogados também era atendido por 3 fases, tendo um comportamento semelhante à agência de turismo. A figura 4-44 traz a curva de corrente eficaz ao longo do tempo. As fases A e B têm comportamento e valores muito parecidos. Isto se explica por haver um ar condicionado bifásico instalado neste consumidor. As figuras 4-45 e 4-46 trazem os THD's de corrente e tensão enquanto a figura 4-47 apresenta as suas formas de onda de corrente típicas. O THD de corrente da fase C juntamente com sua forma de onda indica a predominância de cargas eletrônicas nesta fase.

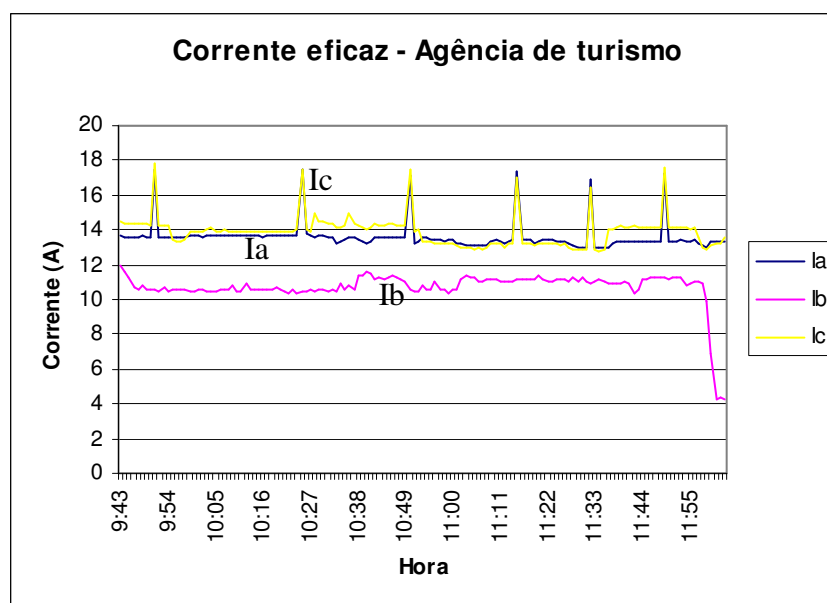


Figura 4-44 - Corrente eficaz ao longo do tempo – Agência de turismo

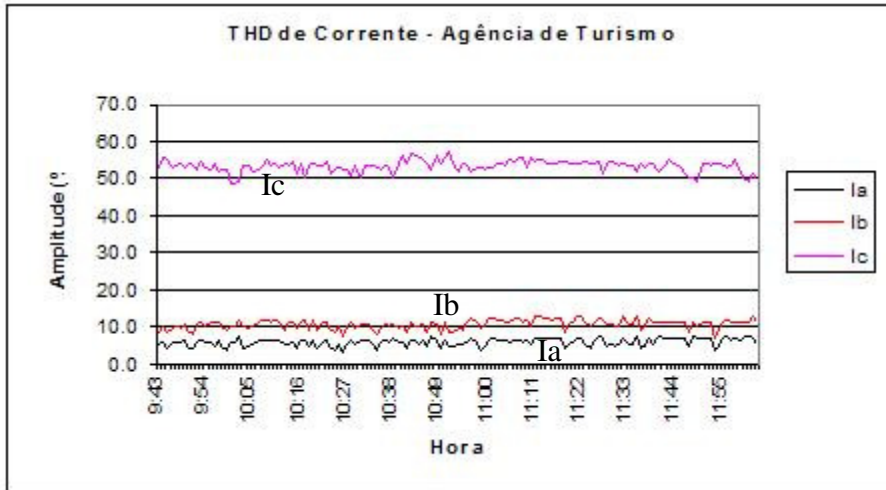


Figura 4-45 - THD de corrente ao longo do tempo – Agência de turismo

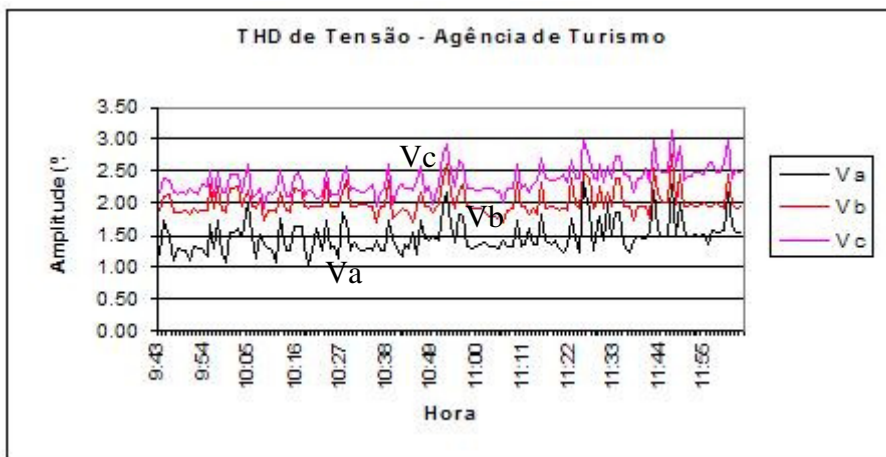


Figura 4-46 - THD de tensão ao longo do tempo – Agência de turismo

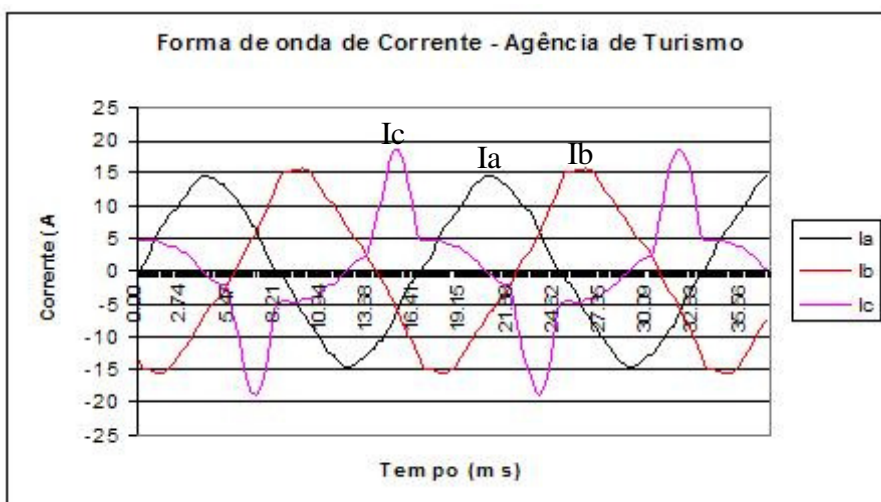


Figura 4-47 - Forma de onda de corrente – Agência de turismo

A tabela 4-13 apresenta o conteúdo harmônico das formas de onda de corrente apresentadas na figura 4-47.



**Tabela 4-13 - Conteúdo harmônico das formas de onda de corrente**

Harm.	Fase A		Fase B		Fase C	
	$I_{rms} = 13,632$		$I_{rms} = 14,490$		$I_{rms} = 10,564$	
	THD <sub>i</sub> = 6,05		THD <sub>i</sub> = 10,37		THD <sub>i</sub> = 52,95	
	F. crista = 1,46		F. crista = 2,10		F. crista = 1,45	
	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)
1	100,00	0,46	100,00	-120,13	100,00	109,16
3	5,50	167,07	10,29	-142,17	42,87	191,88
5	0,68	78,22	0,61	139,17	28,45	249,12
7	2,16	-130,01	1,29	-113,69	11,91	314,27
9	1,05	-176,57	-	-	2,22	297,36
11	-	-	-	-	3,84	293,67
13	-	-	-	-	1,58	350,61
15	-	-	-	-	0,66	318,72
17	-	-	-	-	1,77	345,62
19	-	-	-	-	1,33	54,93

### 4.3 Prédio comercial

Na mesma cidade onde foram realizadas as medições dos consumidores residenciais e comerciais, mediu-se o Prédio Administrativo da Concessionária de Energia Elétrica (PACEE). Várias referências tratam da temática de harmônicos em prédios comerciais.

A referência [55] contempla dois casos de corrente de neutro em circuitos trifásicos que alimentam lâmpadas fluorescentes. O autor apresenta um prédio comercial e uma indústria, contendo 75 e 157% de distorção da corrente de neutro, respectivamente.

Na referência [56] é apresentado uma investigação realizada em um prédio administrativo de uma escola para caracterização dos harmônicos presentes na rede elétrica do mesmo. Foram realizadas medições em uma sala que continha 22 computadores, constatando um alto fator de distorção na corrente de fase e neutro. Em seguida, fez-se um medição geral no prédio. Constatou-se uma menor distorção na corrente, devido à interação entre diversas cargas.

A referência [57] mostra um estudo teórico sobre harmônicos em estabelecimentos comerciais, atribuindo ao computador e aos motores de condicionadores de ar como os maiores responsáveis pela geração de harmônicos em prédios comerciais. Há ainda o problema da ressonância entre capacitores e transformadores, excitado pelos harmônicos presentes no sistema elétrico.

A medição no PACEE foi realizada em um período de 24 horas. Utilizou-se, para tal, os TC's de medição do prédio. Desta forma, apenas as fases foram medidas. O prédio tinha como cargas vários computadores, aparelhos de ar condicionado (havendo três de 30000 BTU's e tantos outros de janela de menor potência), iluminação a base de

lâmpadas fluorescentes. Havia um banco de capacitores para correção do fator de potência. A tabela 4-14 traz os valores médios coletados no prédio comercial.

Tabela 4-14 - Prédio Comercial

I <sub>eficaz</sub> médio (A)			THD <sub>I</sub> -médio (%)			THD <sub>V</sub> -médio (%)		
I <sub>a</sub>	I <sub>b</sub>	I <sub>c</sub>	I <sub>a</sub>	I <sub>b</sub>	I <sub>c</sub>	V <sub>a</sub>	V <sub>b</sub>	V <sub>c</sub>
96,19	120,83	125,52	35,31	10,64	20,85	2,12	2,23	2,10

As figuras 4-48, 4-49 e 4-50 trazem a corrente eficaz, os THD's de corrente e tensão ao longo do tempo. Na figura 4-48 é percebido o horário de expediente, almoço e madrugada quando a maioria das cargas está desligada. No período da madrugada, além de alguma iluminação, somente o CPD fica ligado, caracterizando um conteúdo harmônico alto. As oscilações vistas na figura 4-48 e 4-49 se devem aos condicionadores de ar. A correlação inversa na curva de corrente eficaz e o THD de corrente, verificada nos consumidores residenciais, aqui também é encontrada.

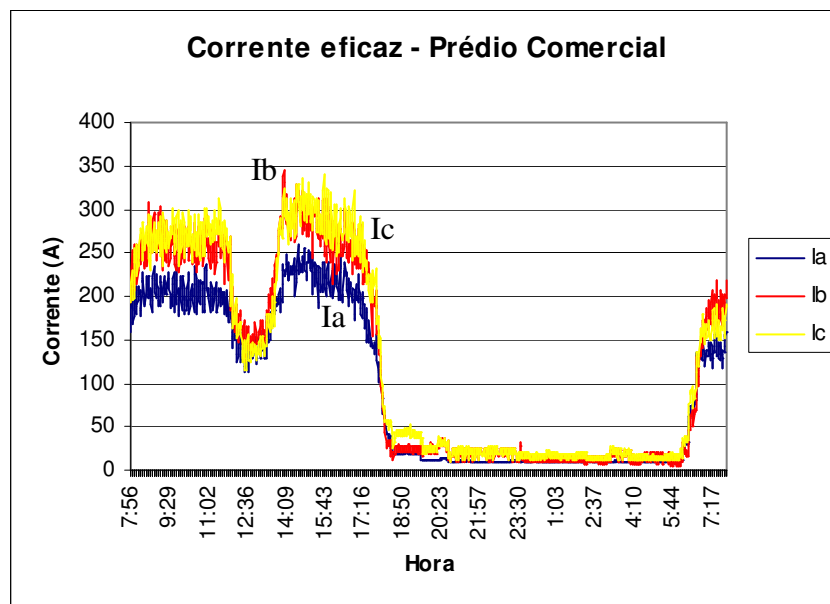


Figura 4-48 - Corrente eficaz ao longo do tempo – Prédio Comercial

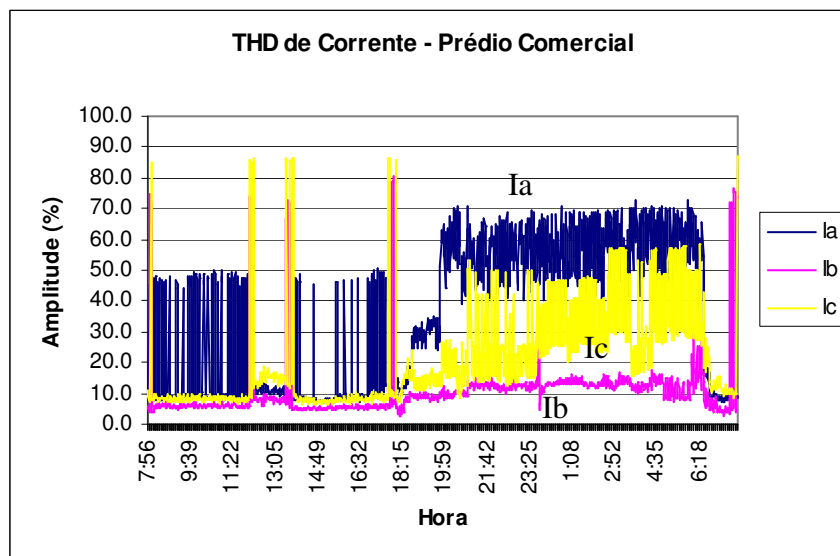


Figura 4-49 - THD de corrente ao longo do tempo – Prédio Comercial

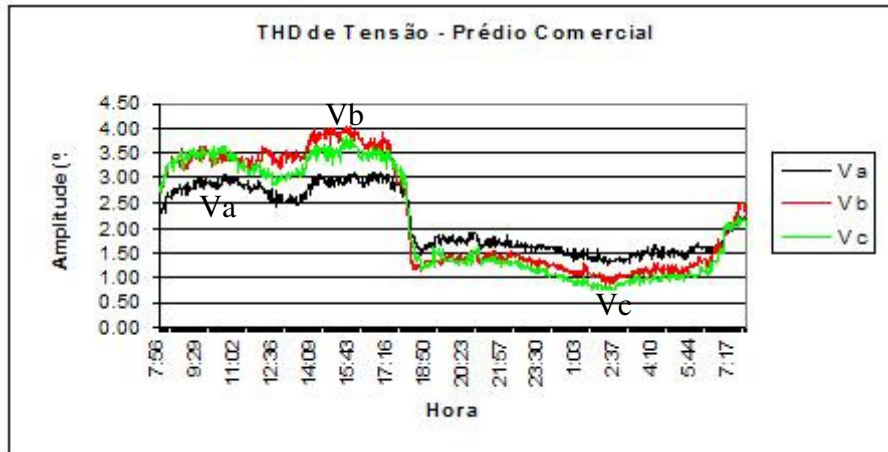


Figura 4-50 - THD de tensão ao longo do tempo – Prédio Comercial

Os três momentos de funcionamento (expediente, almoço e madrugada) têm suas formas de onda apresentadas nas figuras 4-51, 4-52 e 4-53. Os conteúdos harmônicos destas formas de onda são mostrados nas tabelas 4-15, 4-16 e 4-17.

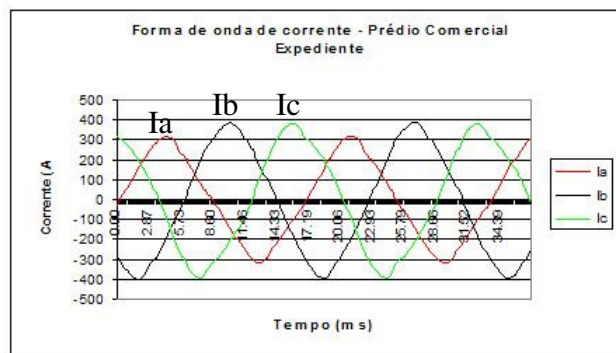


Figura 4-51 - Forma de onda de corrente – Prédio Comercial – horário de expediente

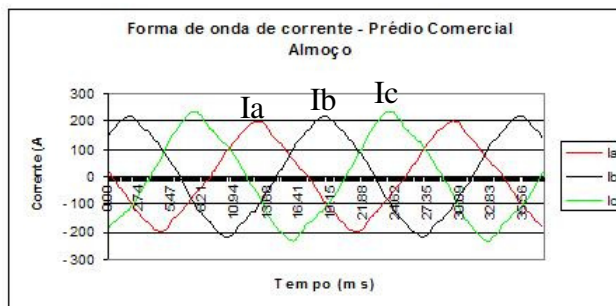


Figura 4-52 - Forma de onda de corrente – Prédio Comercial – horário de almoço

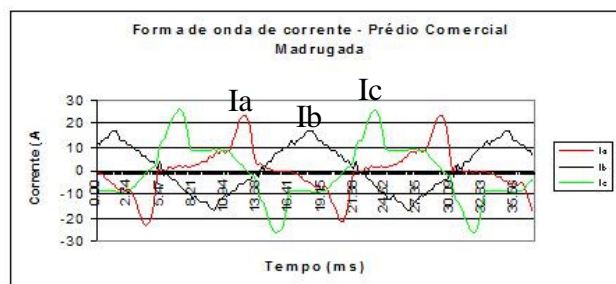


Figura 4-53 - Forma de onda de corrente – Prédio Comercial - horário de Madrugada

**Tabela 4-15 - Conteúdo harmônico das formas de onda de corrente - horário de expediente**

Harm.	Fase A		Fase B		Fase C	
	$I_{rms} = 208,52$		$I_{rms} = 276,29$		$I_{rms} = 260,92$	
	THD <sub>i</sub> = 8,39		THD <sub>i</sub> = 5,52		THD <sub>i</sub> = 9,43	
	F. crista = 1,56		F. crista = 1,53		F. crista = 1,55	
	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)
1	100,00	-2,30	100,00	-127,12	100,00	108,88
2	1,40	-21,66	0,47	-98,96	1,29	112,23
3	6,81	-168,88	5,30	-174,20	8,28	-155,31
5	2,29	-32,07	1,87	79,54	2,73	-150,22
7	1,44	149,20	1,41	31,50	1,74	-138,14

**Tabela 4-16 - Conteúdo harmônico das formas de onda de corrente - horário de almoço**

Harm.	Fase A		Fase B		Fase C	
	$I_{rms} = 126,70$		$I_{rms} = 144,02$		$I_{rms} = 150,21$	
	THD <sub>i</sub> = 9,19		THD <sub>i</sub> = 5,20		THD <sub>i</sub> = 7,96	
	F. crista = 1,56		F. crista = 1,50		F. crista = 1,50	
	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)
1	100,00	-2,42	100,00	-126,61	100,00	105,21
2	1,18	-30,10	1,60	178,74	1,75	65,28
3	7,95	-175,12	4,75	-177,29	7,46	-152,37
5	2,18	-22,26	1,18	63,47	1,48	-140,76
7	1,21	151,11	0,83	14,97	0,92	-117,18

**Tabela 4-17 - Conteúdo harmônico das formas de onda de corrente - horário de madrugada**

Harm.	Fase A		Fase B		Fase C	
	$I_{rms} = 9,856$		$I_{rms} = 9,693$		$I_{rms} = 12,643$	
	THD <sub>i</sub> = 63,74		THD <sub>i</sub> = 13,11		THD <sub>i</sub> = 46,97	
	F. crista = 2,36		F. crista = 1,66		F. crista = 2,06	
	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)
1	100,00	17,69	100,00	-117,24	100,00	101,67
3	47,39	-157,09	9,33	-154,50	39,78	-147,39
5	32,32	5,58	5,12	96,06	21,16	-97,45
7	22,91	-168,27	3,85	55,96	8,84	-43,98
9	11,41	0,73	3,19	-1,24	6,25	-34,37
11	5,26	138,63	1,91	-67,83	4,75	18,25
13	4,71	-88,72	1,65	-152,48	1,12	69,01
15	4,88	70,28	1,02	102,60	2,24	2,23
17	2,40	-136,56	1,23	68,87	2,82	82,67
19	1,93	-8,49	0,94	-7,73	1,05	179,45
21	2,66	117,15	1,20	20,16	1,01	46,74
23	1,99	-29,29	0,42	36,20	1,36	133,96
25	1,37	54,12	1,25	118,72	0,35	-107,67
27	0,97	153,90	3,86	-31,12	0,45	120,16
29	2,35	11,77	1,44	153,29	0,71	-171,31

## 4.4 Transformadores

Os consumidores residenciais (item 4.1) eram todos conectados a um transformador de 45 kVA enquanto os consumidores comerciais medidos estavam ligados a um transformador de 225 kVA do centro comercial. Dois transformadores de potência iguais a 75 kVA e 112,5 kVA, que alimentavam consumidores residenciais e comerciais, também foram medidos. Todos os transformadores foram medidos num período de 24 horas. A tabela 4-18 traz os valores médios adquiridos nos tempos de medição.

Tabela 4-18 - Transformadores

No.	$I_{\text{eficaz}} \text{ médio (A)}$				$\text{THD}_{I\text{-médio}} (\%)$				$\text{THD}_{V\text{-médio}} (\%)$		
	$I_a$	$I_b$	$I_c$	$I_n$	$I_a$	$I_b$	$I_c$	$I_n$	$V_a$	$V_b$	$V_c$
1	38,58	43,08	45,88	17,60	7,48	8,33	8,24	26,90	1,21	1,07	1,33
2	76,81	100,41	82,41	35,89	9,65	8,35	8,34	51,63	1,84	1,75	1,83
3	103,65	128,49	97,69	35,59	10,14	6,48	6,00	55,22	1,85	1,82	1,77
4	169,32	138,50	193,71	55,73	14,20	13,69	20,35	165,35	1,67	1,51	1,54

- 1) Transformador de consumidores **residenciais** (45 kVA)
- 2) Transformador de consumidores **residenciais e comerciais** (75 kVA)
- 3) Transformador de consumidores **residenciais e comerciais** (112,5 kVA)
- 4) Transformador de consumidores **comerciais** (225 kVA)

Da tabela 4-18, percebe-se a grande distorção de corrente no neutro de transformadores de consumidores comerciais, problema comumente encontrado em transformadores que alimentam consumidores comerciais [37, 56 e 57].

### 4.4.1 Transformador de consumidores residenciais

As figuras 4-54 e 4-55 trazem as correntes eficazes das fases e neutro ao longo do tempo enquanto as figuras 4-56, 4-57 e 4-58 mostram os THD's de corrente e tensão no mesmo tempo. Nas figuras 4-54 e 4-55 percebe-se o horário de ponta no transformador.

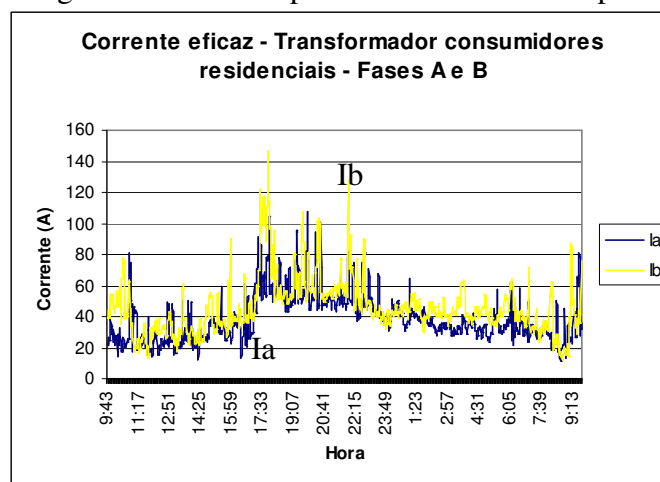


Figura 4-54 - Corrente eficaz ao longo do tempo – Transformador de consumidores residenciais – Fases A e B

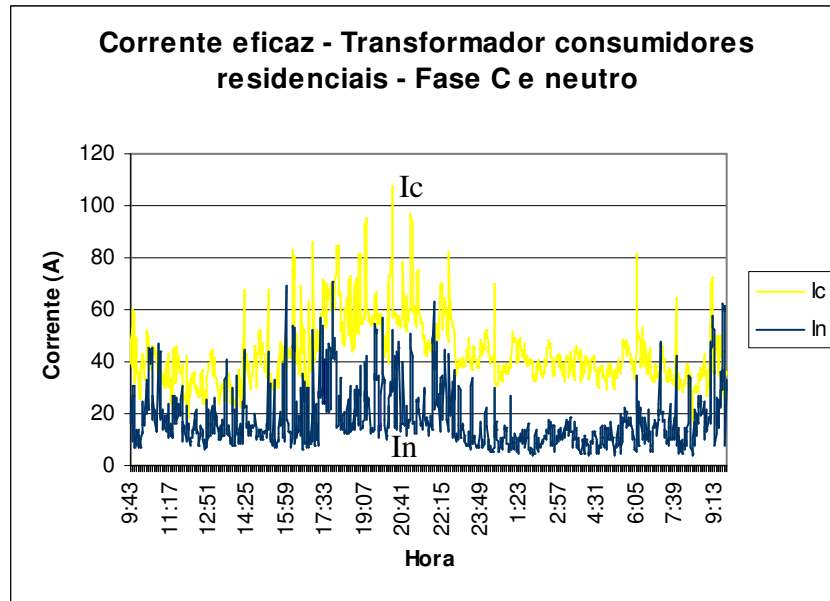


Figura 4-55 - Corrente eficaz ao longo do tempo – Transformador de consumidores residenciais – Fase C e neutro

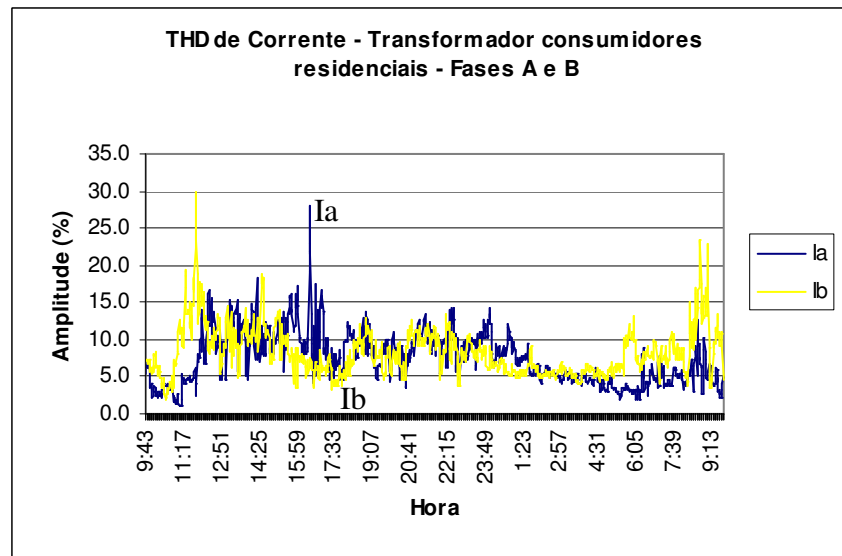


Figura 4-56 - THD de corrente ao longo do tempo – Transformador de consumidores residenciais – Fases A e B

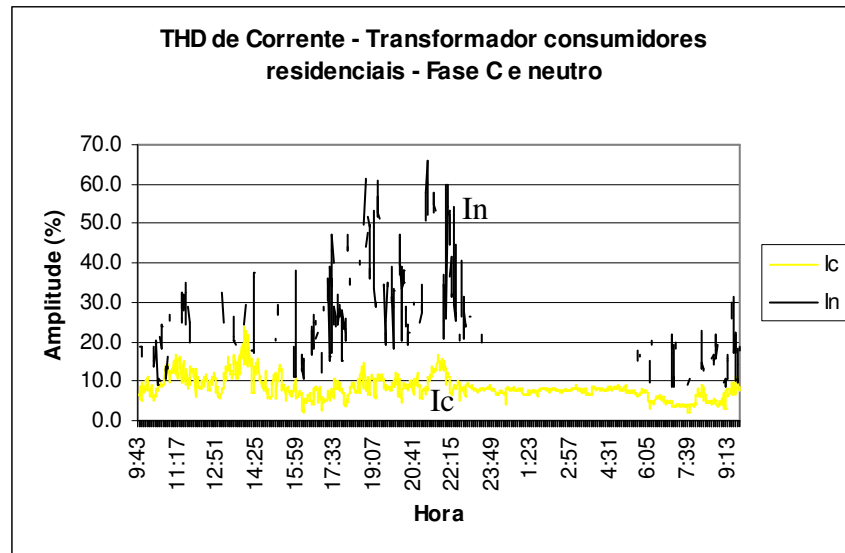


Figura 4-57 - THD de corrente ao longo do tempo – Transformador de consumidores residenciais – Fase C e neutro

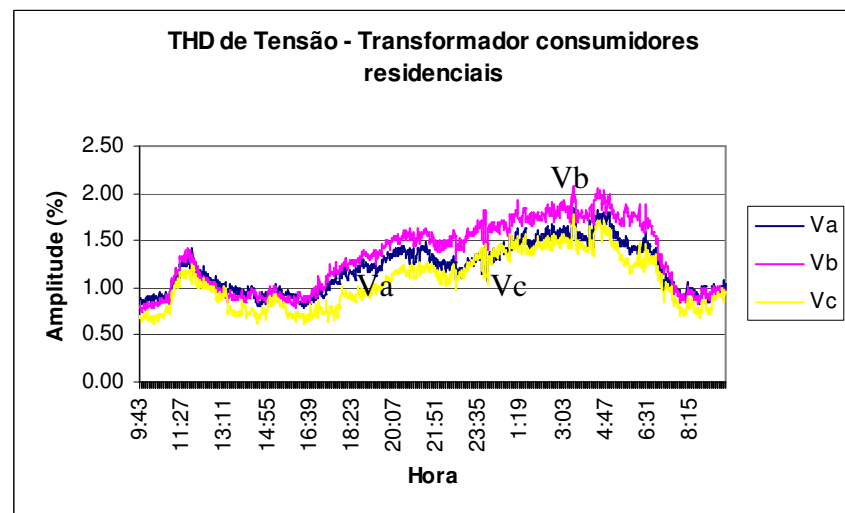


Figura 4-58 - THD de tensão ao longo do tempo – Transformador de consumidores residenciais

As figuras 4-59, 4-60 e 4-61 trazem as formas de onda às 12 horas, 21 horas e 02 horas da manhã (horário comumente mostrado nos consumidores residenciais). As tabelas 4-19, 4-20 e 4-21 mostram o conteúdo harmônico de cada forma de onda de corrente apresentada nas figuras 4-59, 4-60 e 4-61. Analisando as figuras 4-59, 4-60 e 4-61 e as tabelas 4-19, 4-20 e 4-21, percebe-se o desequilíbrio nas fases em todos os horários. Este desequilíbrio pode ser atribuído à natureza probabilística das cargas conectadas ao circuito do transformador. Outro ponto importante é o significativo valor de 3º harmônico no neutro, sendo 47% às 12 horas, 27% às 21 horas e 39% às 02 horas.

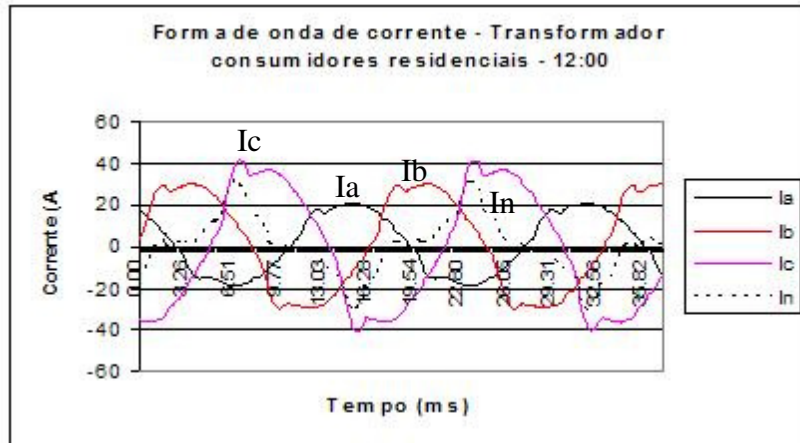


Figura 4-59 - Forma de onda de corrente – Transformador de consumidores residenciais – 12:00

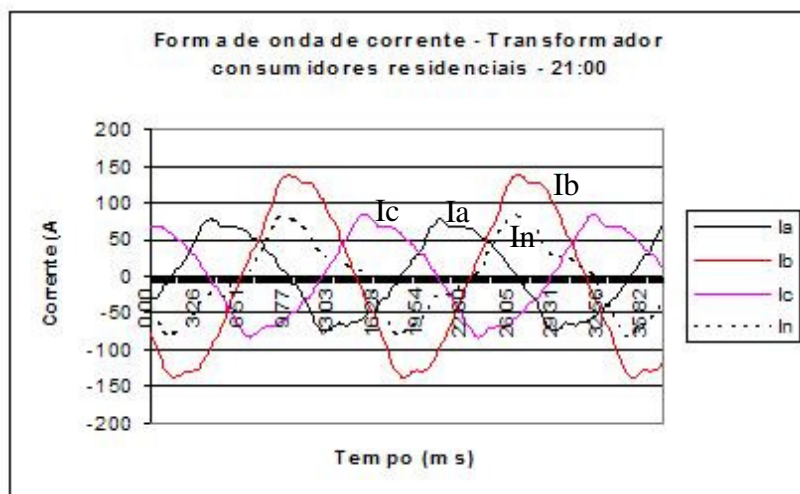


Figura 4-60 - Forma de onda de corrente – Transformador de consumidores residenciais – 21:00

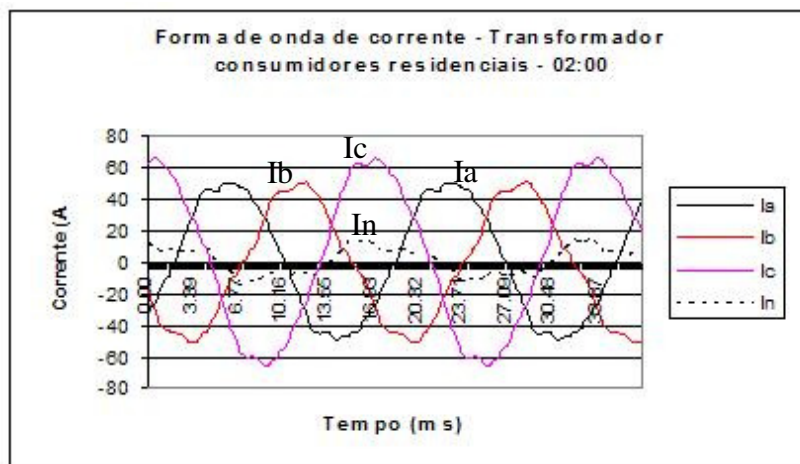


Figura 4-61 - Forma de onda de corrente – Transformador de consumidores residenciais – 02:00



**Tabela 4-19 - Conteúdo harmônico das formas de onda de corrente – Transformador de consumidores residenciais – 12:00**

Harm.	Fase A		Fase B		Fase C		Neutro	
	$I_{rms} = 14,61$		$I_{rms} = 22,79$		$I_{rms} = 28,55$		$I_{rms} = 14,74$	
	THD <sub>i</sub> = 10,52		THD <sub>i</sub> = 12,97		THD <sub>i</sub> = 16,15		THD <sub>i</sub> = 50,50	
	F. crista = 1,29		F. crista = 1,32		F. crista = 1,40		F. crista = 2,11	
	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)
1	100,00	-50,11	100,00	-165,22	100,00	79,22	100,00	126,34
3	6,61	-157,10	9,03	177,05	12,15	175,12	47,87	179,02
5	6,26	34,98	7,98	139,78	9,72	-98,77	10,53	-144,89
7	3,77	-133,79	3,65	99,23	4,99	-34,75	5,75	-38,433
9	2,34	59,76	1,84	37,24	2,56	24,24	11,49	28,338
11	0,85	-102,99	0,63	-19,30	0,84	89,93	1,38	22,683

**Tabela 4-20 - Conteúdo harmônico das formas de onda de corrente – Transformador de consumidores residenciais – 21:00**

Harm.	Fase A		Fase B		Fase C		Neutro	
	$I_{rms} = 51,06$		$I_{rms} = 95,30$		$I_{rms} = 54,49$		$I_{rms} = 48,12$	
	THD <sub>i</sub> = 11,37		THD <sub>i</sub> = 5,82		THD <sub>i</sub> = 11,15		THD <sub>i</sub> = 27,52	
	F. crista = 1,57		F. crista = 1,39		F. crista = 1,45		F. crista = 2,11	
	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)
1	100,00	-29,34	100,00	-140,64	100,00	95,29	100,00	-135,49
3	8,56	-166,51	3,84	152,09	9,70	-157,99	26,98	-174,26
5	6,33	23,69	4,02	160,16	4,46	-91,85	1,80	162,55
7	3,44	-159,47	1,48	93,20	2,71	-66,99	2,98	-158,66
9	1,86	36,54	0,74	8,78	1,18	-49,09	4,12	-2,0892
11	0,80	179,09	0,39	-99,37	1,34	21,25	0,45	-29,692

**Tabela 4-21 - Conteúdo harmônico das formas de onda de corrente – Transformador de consumidores residenciais – 02:00**

Harm.	Fase A		Fase B		Fase C		Neutro	
	$I_{rms} = 36,11$		$I_{rms} = 34,55$		$I_{rms} = 46,42$		$I_{rms} = 8,422$	
	THD <sub>i</sub> = 5,37		THD <sub>i</sub> = 5,17		THD <sub>i</sub> = 7,85		THD <sub>i</sub> = 42,05	
	F. crista = 1,36		F. crista = 1,44		F. crista = 1,40		F. crista = 1,55	
	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)
1	100,00	-37,51	100,00	-150,22	100,00	85,13	100,00	74,099
3	4,18	-147,69	4,98	90,51	3,83	-175,12	39,07	165,08
5	2,59	42,91	5,52	-179,41	2,89	-39,61	4,23	-146,09
7	1,76	-162,73	2,24	123,31	1,51	-50,85	7,21	176,7
9	1,28	23,86	1,08	83,59	0,63	8,70	12,26	26,077
11	1,79	179,12	0,92	137,81	1,63	-7,36	2,27	112,77

#### 4.4.2 Transformador de consumidores comerciais

Este transformador alimentava os consumidores comerciais anteriormente apresentados. Era um transformador de 225 kVA (centro comercial) ocorrendo a medição em seu secundário. A figura 4-62 apresenta as curvas de corrente ao longo do período de medição, enquanto as figuras 4-63, 4-64 e 4-65 mostram os THD's de corrente e tensão. A figura 4-62 é muito parecida com a figura da curva de corrente eficaz ao longo do tempo de medição do prédio comercial. Também na figura 4-62, pode-se identificar os três horários de funcionamento: expediente, almoço e madrugada. As formas de onda de corrente de cada horário e o conteúdo harmônico destas estão nas figuras 4-66, 4-67 e 4-68 e nas tabelas 4-22, 4-23 e 4-24.

A figura 4-64 mostra os altos valores de THD de corrente no neutro (média de 100% no horário da madrugada e 200% nos horários de expediente e almoço). Esta distorção se dá principalmente pelo 3º harmônico, que como pode ser visualizado nas tabelas 4-22, 4-23 e 4-24, sendo que para um THD de corrente de neutro de 192,89% durante o horário de expediente, o 3º harmônico foi de 192,03%. Este valor de 3º harmônico se deve à utilização de cargas não-lineares nas fases tais como lâmpadas fluorescentes compactas, computadores, dentre outros.

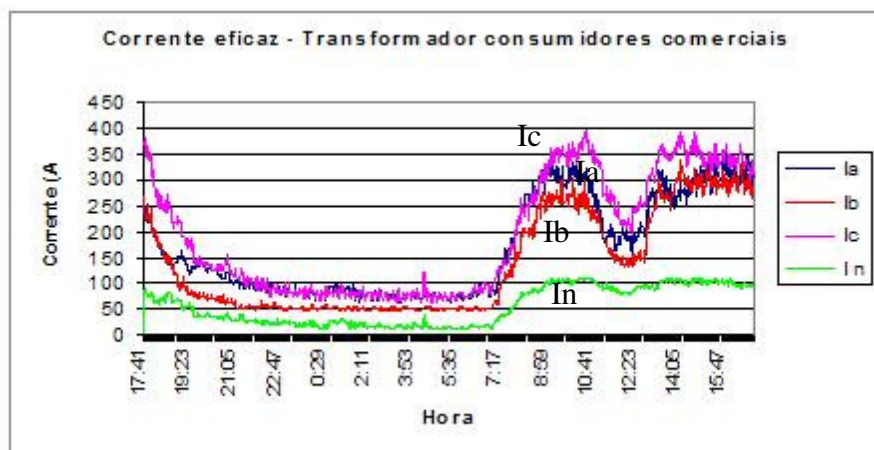


Figura 4-62 - Corrente eficaz ao longo do tempo de medição – Transformador de consumidores comerciais

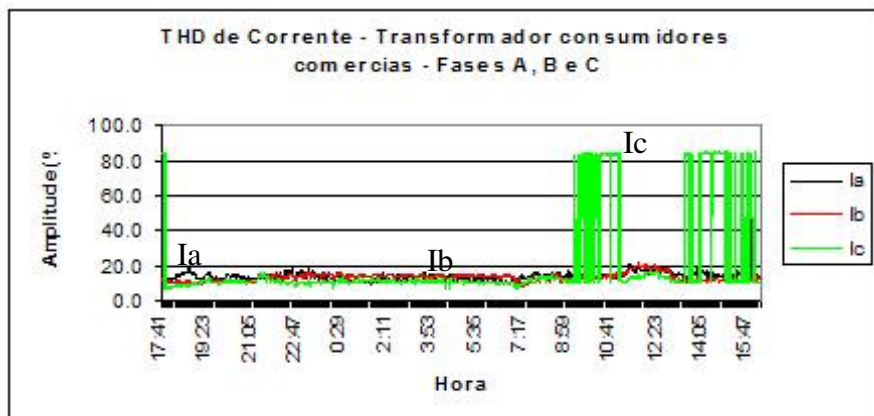


Figura 4-63 - THD de corrente ao longo do tempo de medição – Transformador de consumidores comerciais – Fases A, B e C

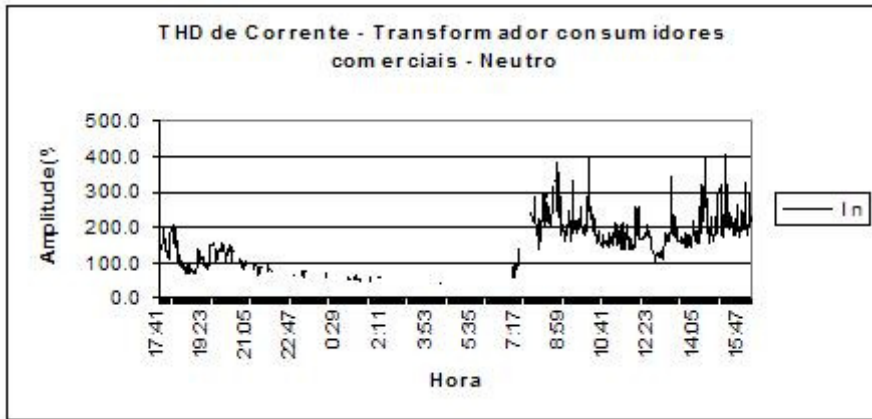


Figura 4-64 - THD de corrente ao longo do tempo de medição – Transformador de consumidores comerciais – Neutro



Figura 4-65 - THD de tensão ao longo do tempo de medição – Transformador de consumidores comerciais

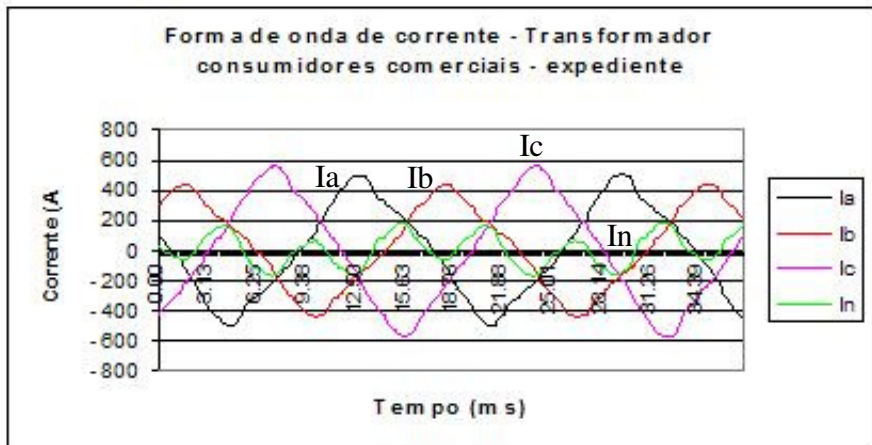


Figura 4-66 - Forma de onda de corrente – Transformador de consumidores comerciais – horário de expediente

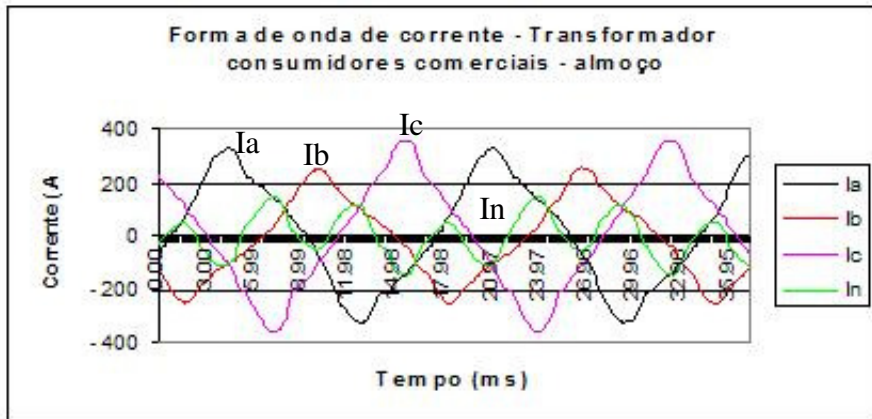


Figura 4-67 - Forma de onda de corrente – Transformador de consumidores comerciais – horário de almoço

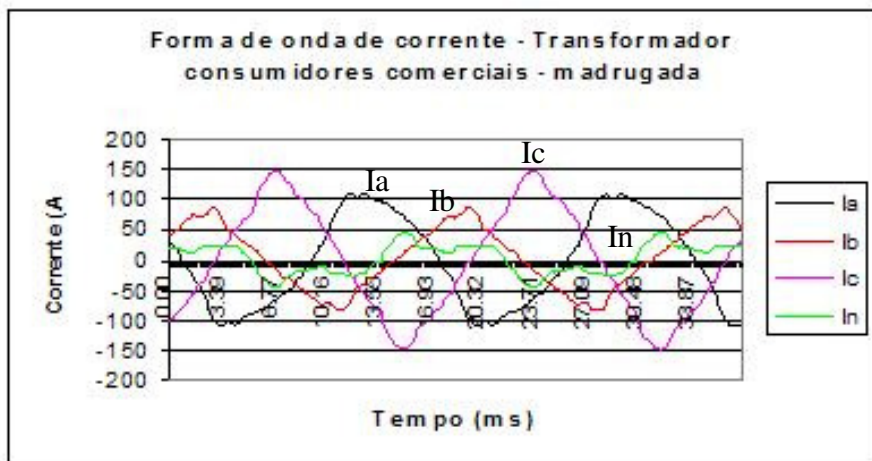


Figura 4-68 - Forma de onda de corrente – Transformador de consumidores comerciais – horário de madrugada

Tabela 4-22 - Conteúdo harmônico das formas de onda de corrente – Transformador de consumidores comerciais – expediente

Harm.	Fase A		Fase B		Fase C		Neutro	
	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)
	$I_{rms} = 307,71$		$I_{rms} = 273,73$		$I_{rms} = 356,42$		$I_{rms} = 105,10$	
	THD <sub>i</sub> = 14,61		THD <sub>i</sub> = 13,56		THD <sub>i</sub> = 11,06		THD <sub>i</sub> = 192,89	
	F. crista = 1,64		F. crista = 1,62		F. crista = 1,60		F. crista = 1,66	
1	100,00	-9,91	100,00	-126,91	100,00	110,96	100,00	-108,59
3	13,51	-165,64	13,01	-168,07	8,01	-179,58	192,03	10,00
5	4,26	-3,43	2,65	89,54	1,87	-142,30	7,99	-165,05
7	1,99	128,74	1,69	-8,50	1,46	-108,93	5,79	15,92
9	1,41	-87,47	1,28	-34,22	1,15	-64,86	16,97	107,04
11	0,63	47,96	0,37	45,39	0,26	-126,62	1,16	-95,32

**Tabela 4-23 - Conteúdo harmônico das formas de onda de corrente – Transformador de consumidores comerciais – almoço**

Harm.	Fase A		Fase B		Fase C		Neutro	
	$I_{rms} = 197,72$		$I_{rms} = 144,10$		$I_{rms} = 211,23$		$I_{rms} = 81,91$	
	THD <sub>i</sub> = 16,88		THD <sub>i</sub> = 19,27		THD <sub>i</sub> = 16,49		THD <sub>i</sub> = 187,25	
	F. crista = 1,65		F. crista = 1,74		F. crista = 1,70		F. crista = 1,79	
	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)
1	100,00	-10,93	100,00	-133,06	100,00	117,89	100,00	-100,33
3	15,72	-158,13	17,89	-178,75	14,80	-179,63	183,32	8,6362
5	4,67	13,97	5,66	106,91	6,00	-138,44	5,97	-59,703
7	1,34	159,53	2,14	27,35	2,93	-110,64	7,37	50,83
9	1,81	-77,91	2,09	-10,43	1,11	-85,53	16,23	117,32
11	0,85	77,81	0,77	-25,69	1,20	-139,25	0,76	10,12

**Tabela 4-24 - Conteúdo harmônico das formas de onda de corrente – Transformador de consumidores comerciais – madrugada**

Harm.	Fase A		Fase B		Fase C		Neutro	
	$I_{rms} = 75,81$		$I_{rms} = 50,66$		$I_{rms} = 88,64$		$I_{rms} = 23,67$	
	THD <sub>i</sub> = 13,44		THD <sub>i</sub> = 13,87		THD <sub>i</sub> = 10,39		THD <sub>i</sub> = 64,15	
	F. crista = 1,45		F. crista = 1,68		F. crista = 1,61		F. crista = 1,76	
	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)
1	100,00	-13,29	100,00	-136,00	100,00	116,142	100,00	-100,72
3	12,23	-119,91	11,58	111,58	8,04	171,278	61,68	15,68
5	3,88	111,52	4,19	-28,25	6,15	-112,15	14,37	102,52
7	2,43	7,17	3,84	179,82	2,21	-71,183	5,21	178,25
9	2,23	-93,24	4,29	47,21	0,62	-58,031	5,47	154,27
11	1,37	126,85	2,73	-59,71	0,53	-37,73	4,71	133,93

#### 4.4.3 Transformador de consumidores residenciais e comerciais

Dois transformadores que tinham consumidores residenciais e comerciais conectados ao seu secundário foram medidos. A potência destes dois foi de 75 kVA e 112,5 kVA. A porcentagem de consumidores nos dois transformadores era de 65% para consumidores residenciais e 35% para consumidores comerciais conforme informação da concessionária de energia elétrica.

Primeiramente, será apresentado o transformador de 75 kVA. As figuras 4-69 e 4-70 apresentam suas curvas de corrente ao longo do período de medição, enquanto as figuras 4-71, 4-72 e 4-73 mostram os THD's de corrente e tensão. As formas de onda de corrente de cada horário e o conteúdo harmônico destas estão nas figuras 4-74, 4-75 e 4-76 e nas tabelas 4-25, 4-26 e 4-27. Mais uma vez, a corrente de neutro apresenta um valor significativo de THD (média de 75%), sendo o 3º harmônico o maior responsável por tais distorções. Como exemplo, no horário de 21 horas, com o THD de corrente de neutro igual a 70,53%, o 3º harmônico foi igual a 69,70%.

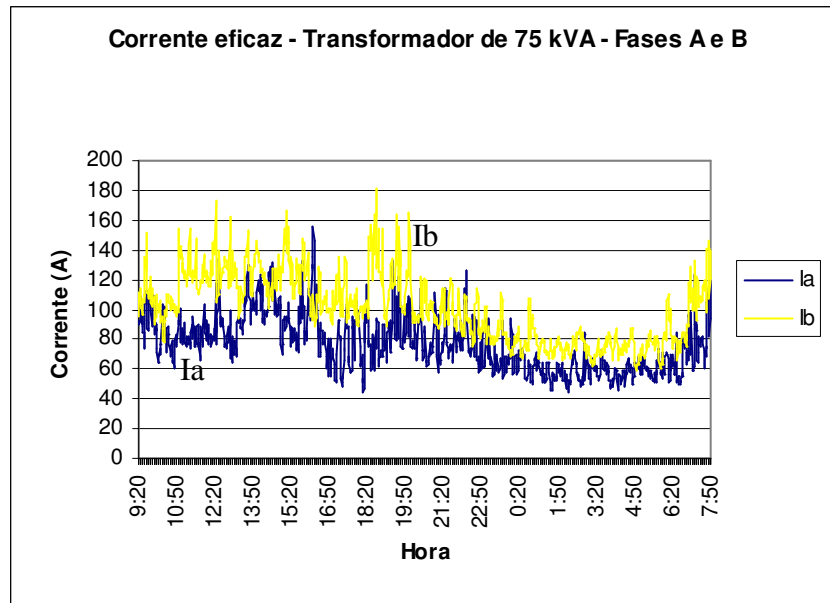


Figura 4-69- Corrente eficaz ao longo do tempo de medição – Transformador de consumidores residenciais e comerciais de 75 kVA – Fases A e B

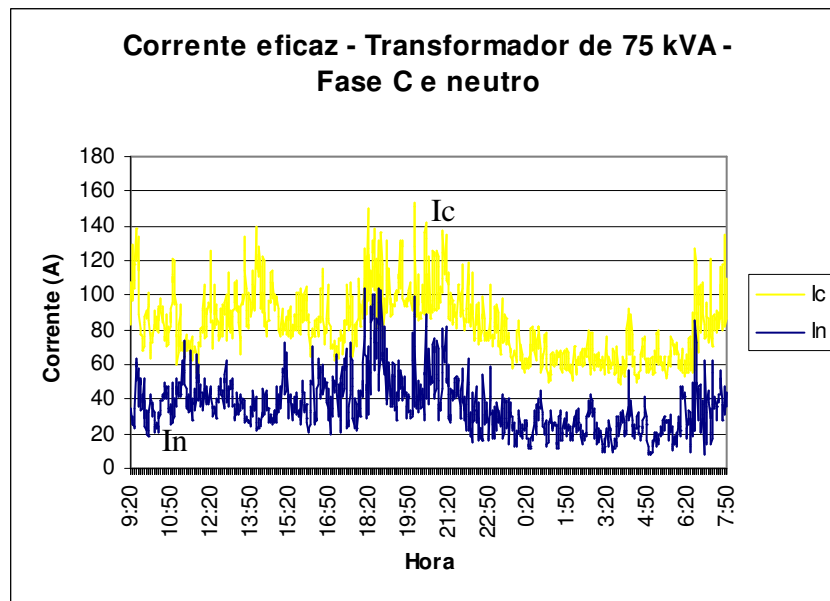


Figura 4-70 - Corrente eficaz ao longo do tempo de medição – Transformador de consumidores residenciais e comerciais de 75 kVA – Fase C e neutro

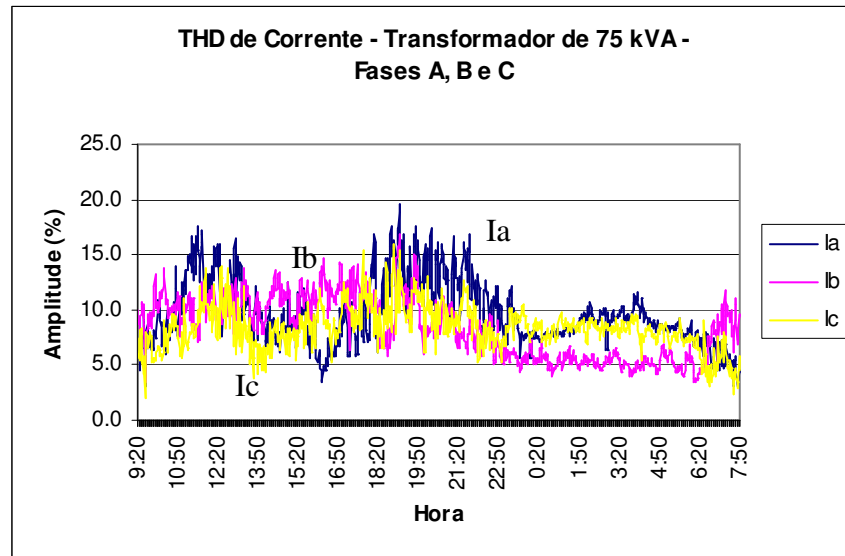


Figura 4-71 - THD de Corrente ao longo do tempo de medição – Transformador de consumidores residenciais e comerciais de 75 kVA – Fases A, B e C

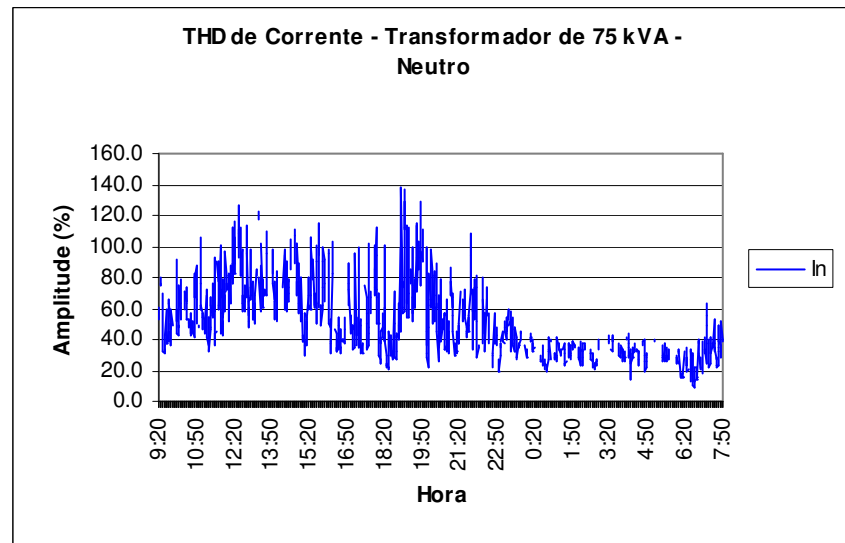


Figura 4-72 - THD de Corrente ao longo do tempo de medição – Transformador de consumidores residenciais e comerciais de 75 kVA – Neutro

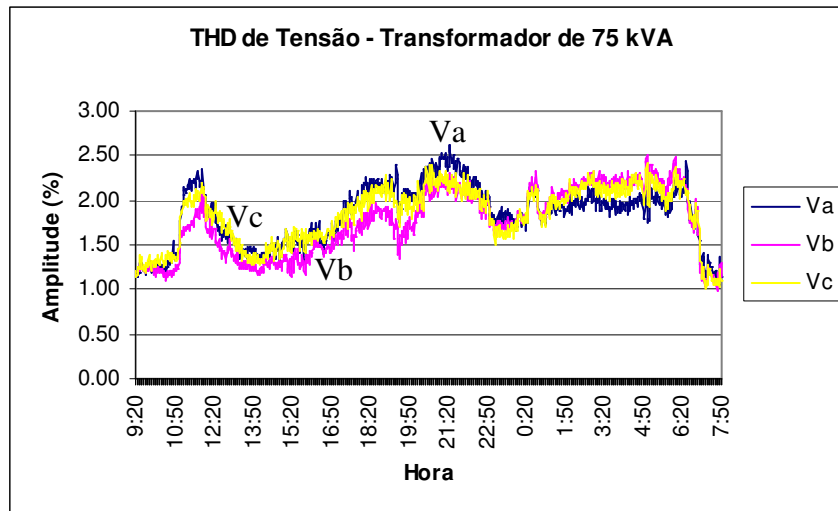


Figura 4-73 - THD de Tensão ao longo do tempo medição – Transformador de consumidores residenciais e comerciais de 75 kVA

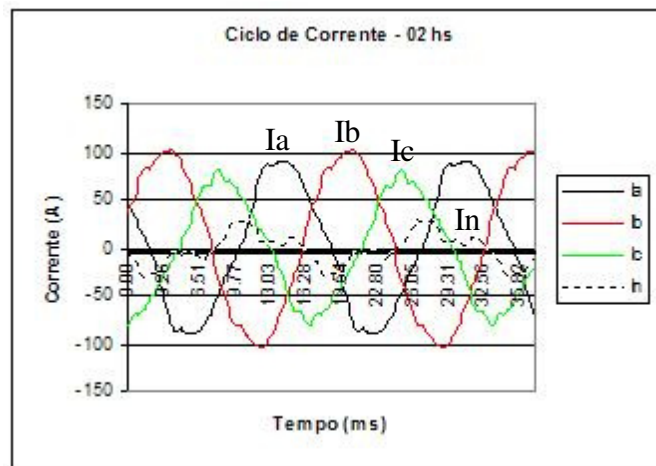


Figura 4-74 - Forma de onda de corrente– Transformador de consumidores residenciais e comerciais de 75 kVA – 02 horas

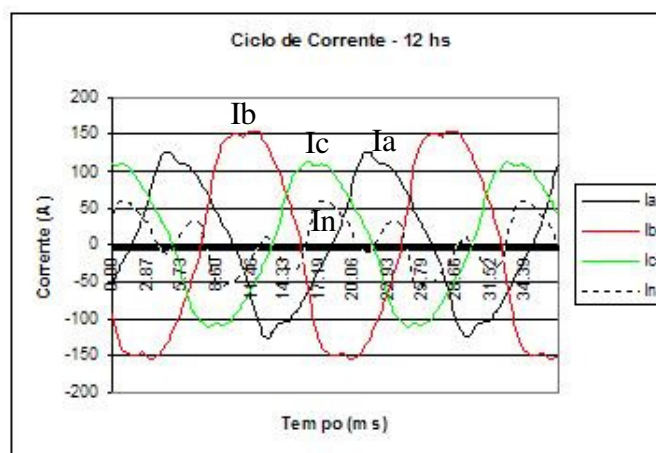


Figura 4-75 - Forma de onda de corrente– Transformador de consumidores residenciais e comerciais de 75 kVA – 12 horas



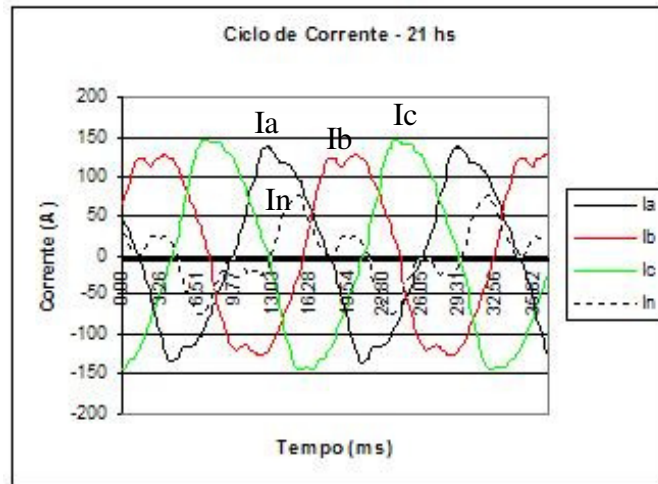


Figura 4-76 - Forma de onda de corrente– Transformador de consumidores residenciais e comerciais de 75 kVA – 21 horas

Tabela 4-25 - Conteúdo harmônico das formas de onda de corrente – Transformador de consumidores residenciais e comerciais de 75 kVA – 02:00

Harm.	Fase A		Fase B		Fase C		Neutro	
	$I_{rms} = 64,14$		$I_{rms} = 72,73$		$I_{rms} = 52,04$		$I_{rms} = 15,08$	
	THD <sub>i</sub> = 8,79		THD <sub>i</sub> = 5,79		THD <sub>i</sub> = 9,15		THD <sub>i</sub> = 59,07	
	F. crista = 1,38		F. crista = 1,40		F. crista = 1,55		F. crista = 1,79	
	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)
1	100,00	-36,20	100,00	-164,10	100,00	83,06	100,00	30,08
3	6,64	140,09	3,14	-110,70	7,54	131,57	55,21	-29,01
5	5,44	26,82	3,55	-166,52	1,78	-102,80	2,89	-161,38
7	1,86	-142,37	0,69	-62,34	1,81	36,47	4,72	86,43
9	1,21	22,51	1,72	-30,77	2,83	89,17	15,35	-154,76
11	0,76	-166,44	1,93	-46,18	2,58	118,29	0,91	-16,66

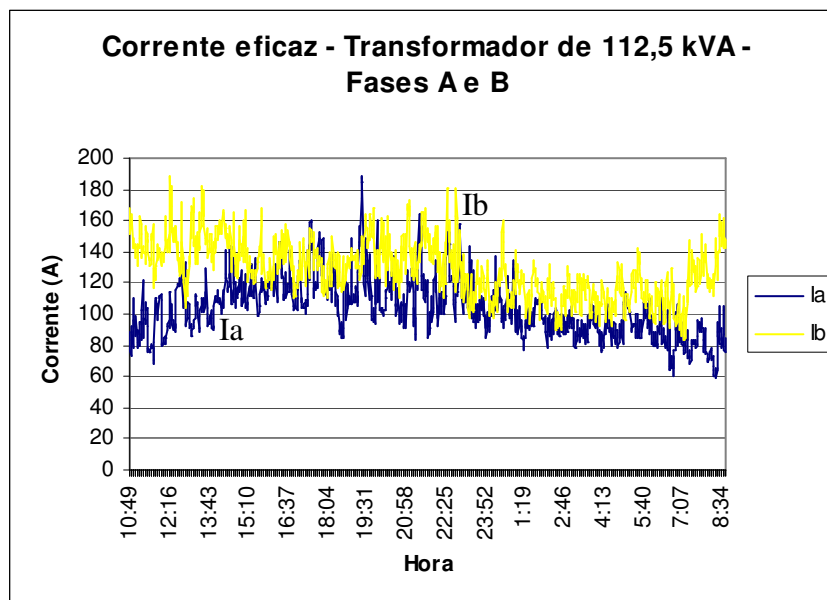
Tabela 4-26 - Conteúdo harmônico das formas de onda de corrente – Transformador de consumidores residenciais e comerciais de 75 kVA – 12:00

Harm.	Fase A		Fase B		Fase C		Neutro	
	$I_{rms} = 78,12$		$I_{rms} = 118,60$		$I_{rms} = 80,87$		$I_{rms} = 35,49$	
	THD <sub>i</sub> = 12,66		THD <sub>i</sub> = 11,35		THD <sub>i</sub> = 9,33		THD <sub>i</sub> = 103,40	
	F. crista = 1,52		F. crista = 1,30		F. crista = 1,27		F. crista = 1,72	
	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)
1	100,00	-30,96	100,00	-152,64	100,00	78,90	100,00	38,57
3	10,77	168,17	9,74	-130,28	8,01	163,46	91,53	12,16
5	6,45	15,65	5,66	-145,27	4,09	-89,52	23,39	83,03
7	2,16	-170,42	1,27	-133,33	0,85	-2,75	9,22	33,34
9	0,56	-33,20	1,02	-51,65	0,94	178,79	5,21	105,70
11	0,62	26,26	0,33	-58,45	0,82	-143,17	2,59	88,26

**Tabela 4-27 - Conteúdo harmônico das formas de onda de corrente – Transformador de consumidores residenciais e comerciais de 75 kVA – 21:00**

Harm.	Fase A		Fase B		Fase C		Neutro	
	$I_{rms} = 90,26$		$I_{rms} = 95,78$		$I_{rms} = 101,2$		$I_{rms} = 36,61$	
	THD <sub>i</sub> = 10,74		THD <sub>i</sub> = 10,94		THD <sub>i</sub> = 8,65		THD <sub>i</sub> = 70,53	
	F. crista = 1,50		F. crista = 1,32		F. crista = 1,39		F. crista = 1,92	
	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)
1	100,00	-21,30	100,00	-154,63	100,00	93,05	100,00	-70,69
3	7,84	-165,18	8,09	-123,27	6,81	-165,08	69,70	26,04
5	5,56	54,71	5,82	-160,43	4,09	-54,29	4,07	89,77
7	1,44	-150,28	0,24	154,49	0,86	52,63	2,83	-19,92
9	1,32	-9,14	1,44	-21,46	0,26	117,00	7,18	-24,25
11	0,78	176,67	1,42	-48,76	0,85	113,39	1,03	89,70

O 2º transformador medido foi o de 112,5 kVA. As figuras 4-77 e 4-78 apresentam suas curvas de corrente ao longo do período de medição, enquanto as figuras 4-79, 4-80 e 4-81 mostram os THD's de corrente e tensão. As formas de onda de corrente de cada horário e o conteúdo harmônico destas estão nas figuras 4-82, 4-83 e 4-84 e nas tabelas 4-28, 4-29 e 4-30. Mais uma vez, o THD de corrente de neutro apresenta valores significativos (média de 55%) porém com valores menores que os apresentados no transformador de 75 kVA (média de 75%). O harmônico mais representativo foi, de novo, o 3º harmônico. Como exemplo, no horário das 21 horas, momento que apresentava um THD de corrente de neutro de 66,22%, o 3º harmônico tinha um módulo de 65,06%.



**Figura 4-77 - Corrente eficaz ao longo do tempo de medição – Transformador de consumidores residenciais e comerciais de 112,5 kVA – Fases A e B**

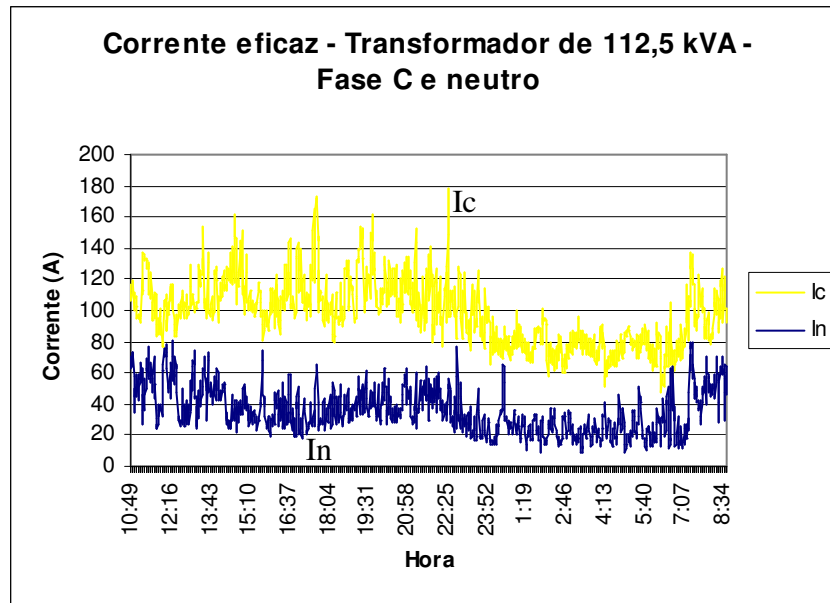


Figura 4-78 - Corrente eficaz ao longo do tempo de medição – Transformador de consumidores residenciais e comerciais de 112,5 kVA – Fase C e neutro

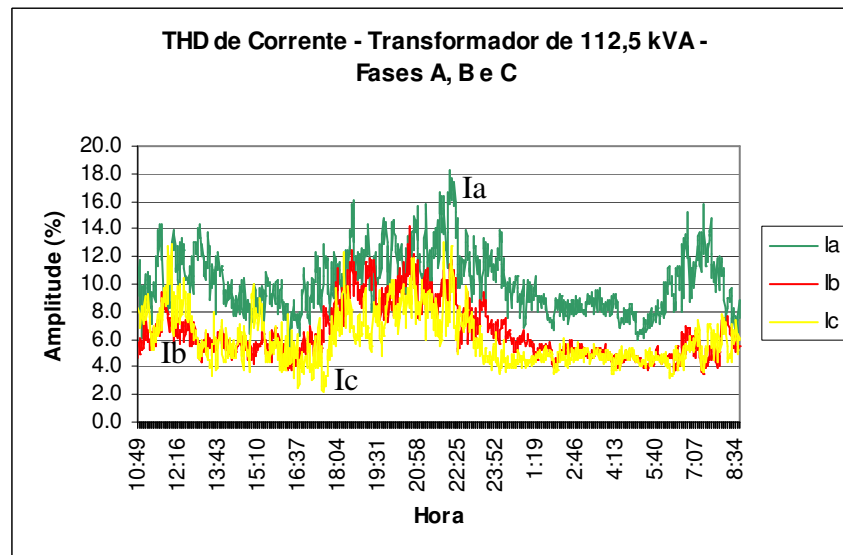


Figura 4-79 - THD de Corrente ao longo do tempo de medição – Transformador de consumidores residenciais e comerciais de 112,5 kVA – Fases A, B e C

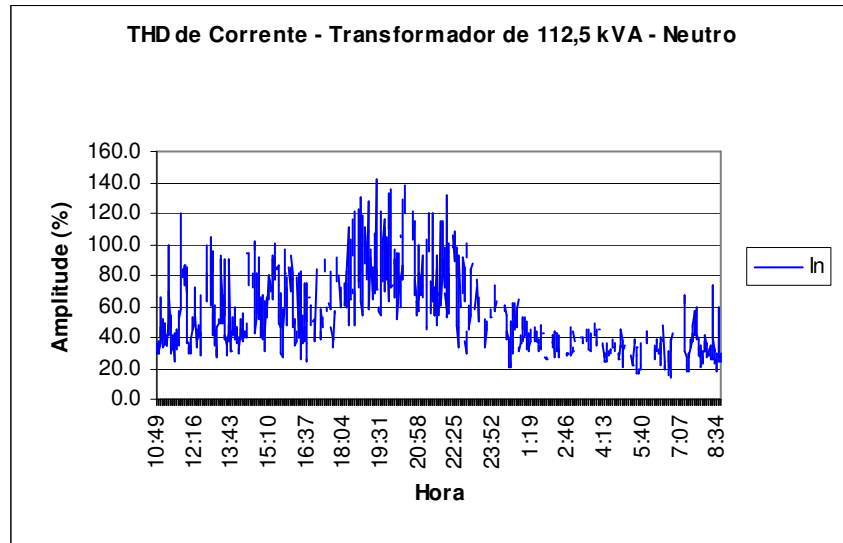


Figura 4-80 - THD de Corrente ao longo do tempo de medição – Transformador de consumidores residenciais e comerciais de 112,5 kVA – Neutro

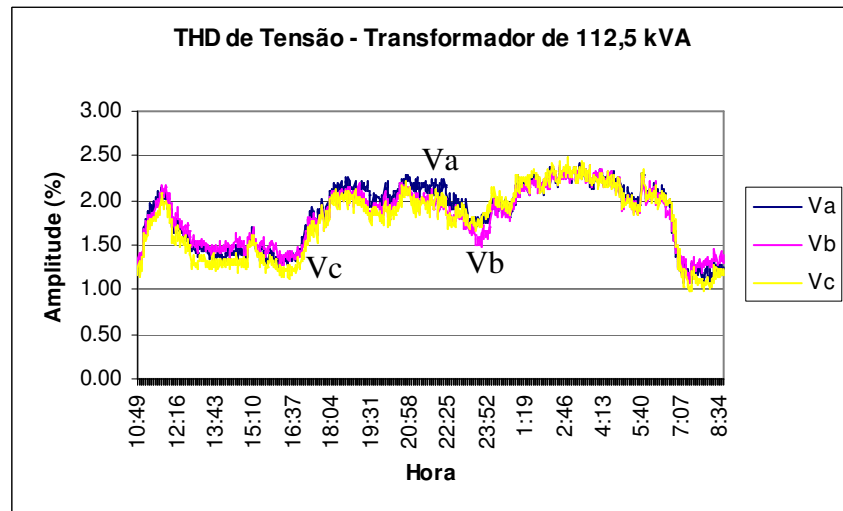


Figura 4-81 - THD de Tensão ao longo do tempo de medição – Transformador de consumidores residenciais e comerciais de 112,5 kVA

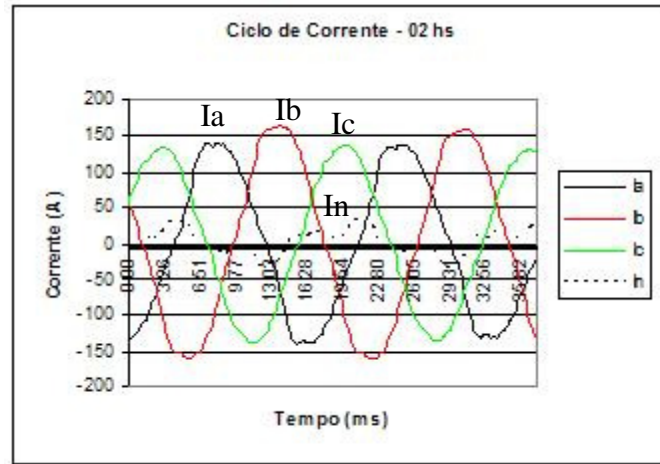


Figura 4-82 - Forma de onda de corrente – Transformador de consumidores residenciais e comerciais de 112,5 kVA – 02 horas

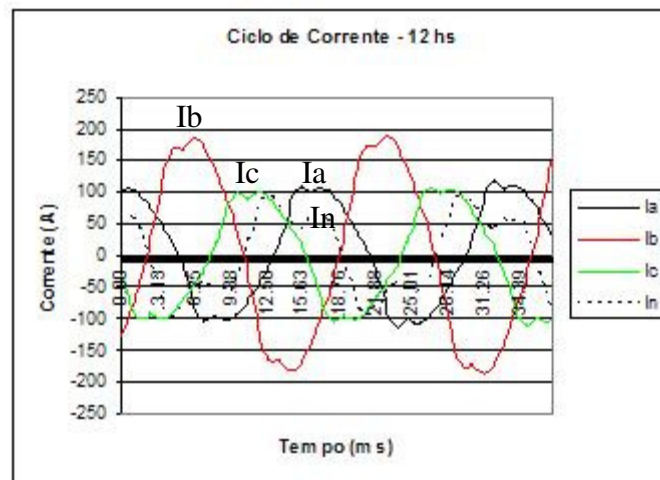


Figura 4-83 - Forma de onda de corrente – Transformador de consumidores residenciais e comerciais de 112,5 kVA – 12 horas

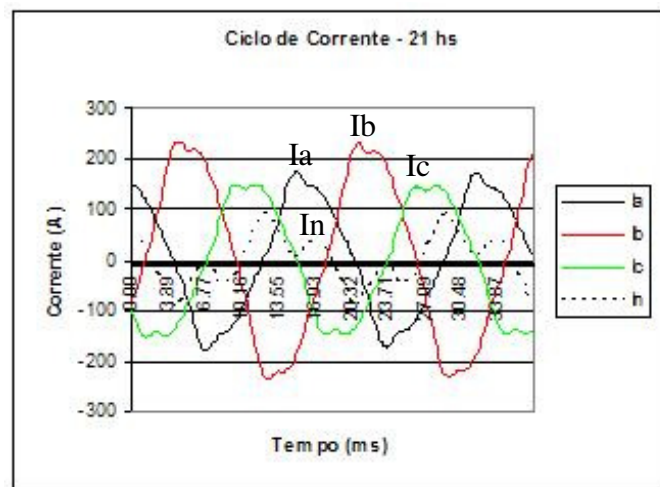


Figura 4-84 - Forma de onda de corrente – Transformador de consumidores residenciais e comerciais de 112,5 kVA – 21 horas

**Tabela 4-28 - Conteúdo harmônico das formas de onda de corrente – Transformador de consumidores residenciais e comerciais de 112,5 kVA – 02:00**

Harm.	Fase A		Fase B		Fase C		Neutro	
	$I_{rms} = 96,52$		$I_{rms} = 113,60$		$I_{rms} = 93,50$		$I_{rms} = 17,55$	
	THD <sub>i</sub> = 8,70		THD <sub>i</sub> = 4,52		THD <sub>i</sub> = 3,72		THD <sub>i</sub> = 61,86	
	F. crista = 1,42		F. crista = 1,39		F. crista = 1,43		F. crista = 1,81	
	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)
1	100,00	-29,49	100,00	-148,35	100,00	84,40	100,00	78,81
3	6,26	164,87	1,97	136,35	2,08	88,74	58,10	26,42
5	5,37	46,54	3,84	164,44	2,68	-58,61	18,58	20,00
7	1,98	-104,21	0,83	150,16	0,44	69,07	10,00	38,82
9	0,90	73,18	0,61	59,99	0,47	9,50	11,82	124,86
11	0,36	-149,40	0,31	-5,29	0,59	84,61	2,00	16,27

**Tabela 4-29 - Conteúdo harmônico das formas de onda de corrente – Transformador de consumidores residenciais e comerciais de 112,5 kVA – 12:00**

Harm.	Fase A		Fase B		Fase C		Neutro	
	$I_{rms} = 81,28$		$I_{rms} = 136,80$		$I_{rms} = 77,00$		$I_{rms} = 61,12$	
	THD <sub>i</sub> = 12,09		THD <sub>i</sub> = 7,97		THD <sub>i</sub> = 11,47		THD <sub>i</sub> = 38,86	
	F. crista = 1,36		F. crista = 1,37		F. crista = 1,35		F. crista = 1,56	
	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)
1	100,00	-36,50	100,00	-160,99	100,00	83,09	100,00	19,68
3	9,41	-174,22	5,74	-174,80	7,57	-175,05	38,26	-114,03
5	6,37	37,97	4,24	163,70	5,81	-75,54	0,61	89,77
7	3,25	-140,04	1,94	87,18	2,88	-34,91	0,62	75,92
9	1,13	28,02	0,86	20,88	1,65	6,86	5,53	78,62
11	0,05	125,01	0,26	119,74	0,38	160,23	1,17	70,62

**Tabela 4-30 - Conteúdo harmônico das formas de onda de corrente – Transformador de consumidores residenciais e comerciais de 112,5 kVA – 21:00**

Harm.	Fase A		Fase B		Fase C		Neutro	
	$I_{rms} = 114,90$		$I_{rms} = 164,22$		$I_{rms} = 110,14$		$I_{rms} = 47,31$	
	THD <sub>i</sub> = 11,76		THD <sub>i</sub> = 7,62		THD <sub>i</sub> = 8,37		THD <sub>i</sub> = 66,22	
	F. crista = 1,52		F. crista = 1,42		F. crista = 1,34		F. crista = 1,92	
	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)
1	100,00	-20,06	100,00	-145,45	100,00	92,69	100,00	36,62
3	10,15	-164,00	6,19	-172,14	5,92	-135,96	65,06	-99,47
5	6,93	51,16	4,89	173,28	5,92	-43,14	7,83	4,34
7	2,46	-123,78	1,68	94,45	1,69	21,09	2,86	-90,55
9	0,45	6,28	0,57	21,86	0,61	14,39	5,87	77,39
11	0,41	121,50	0,17	-105,61	0,51	88,34	2,24	51,52

## **4.5 Conclusões Gerais**

Este capítulo apresentou medições no ponto de entrega de consumidores residenciais e comerciais a fim de caracterizar a produção de correntes harmônicas, além da medição de um prédio comercial. Também foram mostradas medições realizadas nos transformadores que alimentavam estes e outros consumidores.

Nas medições, foram apresentadas curvas de corrente, THD de corrente e tensão ao longo do tempo. Além destas curvas, as formas de onda em alguns instantes também foram mostradas. Consumidores residenciais com consumo baixo, médio e alto e também consumidores comerciais de diferentes ramos foram medidos.

Das curvas apresentadas, notou-se uma correlação inversa entre a corrente demanda e sua distorção, ou seja, quanto maior o valor da corrente eficaz menor o seu THD e vice-versa.

O transformador que alimentava os consumidores residenciais tem a corrente mais distorcida no horário de ponta. Isto se deve pela maior utilização de aparelhos neste horário, sendo ainda estes aparelhos produtores de harmônicos (televisores, LFC's, etc.).

Já no transformador que alimentava os consumidores comerciais é possível notar os momentos de funcionamento do comércio. Destaque para o nível de 3º harmônico no neutro, devido ao grande número de cargas não-lineares presente: computadores, LFC's, etc.

Já em transformadores que alimentavam tanto consumidores residenciais como comerciais, nota-se a convergência da análise dos transformadores anteriores: corrente distorcida no horário de ponta e grande nível de 3º harmônico no neutro, maior que o encontrado em transformadores puramente residenciais.

# 5 Simulação de um sistema de distribuição em áreas residenciais e comerciais

Este capítulo tem como objetivo avaliar o estado atual de um sistema de distribuição em áreas residenciais e comerciais, quanto ao seu nível de distorção de tensão, a partir da interação das correntes harmônicas dos aparelhos eletrodomésticos e dos consumidores residenciais e comerciais. Para tal, várias simulações foram conduzidas a partir das medições apresentadas no capítulo 3 e 4.

As simulações iniciaram com cenários harmônicos encontrados em residências e estabelecimentos comerciais devido à interação das cargas presentes nos mesmos. Ou seja, foram simuladas as interações das correntes harmônicas de vários eletrodomésticos presentes nos consumidores residenciais e comerciais avaliando seu resultado no padrão de medição. Depois, simulou-se uma rede secundária do sistema de distribuição que alimentava os consumidores residenciais apresentados no capítulo 4, em três situações de carga: baixa, média e alta. Por fim, estes resultados foram extrapolados para o circuito primário e, assim, simulou-se o sistema de distribuição de média tensão, também nas situações de cargas descritas.

As simulações foram realizadas com o programa computacional ATP (Alternative Transient Program). A referência [58] traz as possibilidades de simulação que o ATP/EMTP fornece para a temática Qualidade de Energia Elétrica, tais como avaliação de sag/swell, harmônicos, dentre outros. Na referência [59] há um estudo de caso de um sistema de distribuição de uma universidade utilizando o ATP.



Como o ATP é um simulador baseado em modelos temporais e não no domínio da frequência, uma vantagem de se utilizá-lo é a capacidade de interação entre os ângulos de fase das correntes harmônicas produzidas por várias cargas não-lineares [60]. Além disto, os modelos de elementos do sistema de distribuição e fontes de tensão e corrente já existem no ATP. Bastava então modelar as cargas não-lineares e seus conjuntos. Estas foram modeladas como fonte de correntes harmônicas. Esta modelagem é precisa desde que as distorções de tensão nas fontes de harmônicos sejam menores que 10% [18]. Na referência [61], esta modelagem é apresentada principalmente para cargas eletrônicas. Várias referências utilizam esta modelagem tendo um ramo paralelo R-L para representar o conteúdo de potência do ambiente e fontes de correntes harmônicas para o conteúdo não-linear [58, 59, 62, 63 e 64].

Na modelagem das cargas, o ramo paralelo R-L foi utilizado para representar a corrente fundamental. Isto permitiu suprimir algumas oscilações que estavam ocorrendo quando se utilizavam apenas fontes de corrente em simulações no ATP. Em algumas cargas, principalmente cargas eletrônicas, a corrente fundamental teve que ser representada por um ramo paralelo R-C devido ao ângulo da fundamental. Nos harmônicos, as fontes de correntes harmônicas tiveram seus módulos e ângulos inseridos. Os resultados, somente com fontes de harmônicos ou fontes e paralelo R-L, eram exatamente os mesmos. As fontes harmônicas eram reproduzidas até o harmônico que apresentava módulo acima de 1% em relação à corrente fundamental, no máximo até o 31º, devido a este ser o limite de medição. Esta escolha foi feita (1% sendo o limite mínimo de representação de fontes harmônicas) para reproduzir o mais fielmente possível as ondas de corrente conforme as medições apresentadas nos capítulos 3 e 4. A figura 5-1 apresenta a modelagem realizada, no caso de uma carga com até o 11º harmônico.

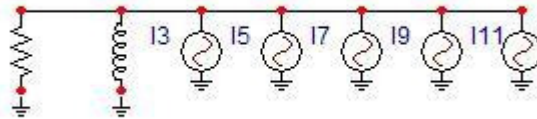


Figura 5-1 - Modelagem de cargas por fonte de correntes harmônicas e ramo paralelo R-L

### **5.1 Formas de ondas de conjunto de eletrodomésticos em consumidores residenciais e comerciais**

O objetivo desta simulação era encontrar as correntes nos padrões de medição destes consumidores, analisando a não-linearidade que estes consumidores produzem na rede de distribuição. Assim, cada eletrodoméstico foi modelado conforme a figura 5-1, produzindo um “bloco” de fontes de correntes harmônicas. A modelagem dos eletrodomésticos foi realizada a partir das medições apresentadas no capítulo 3. Cargas lineares, principalmente aquelas responsáveis por algum tipo de aquecimento, foram modeladas com um simples resistor.

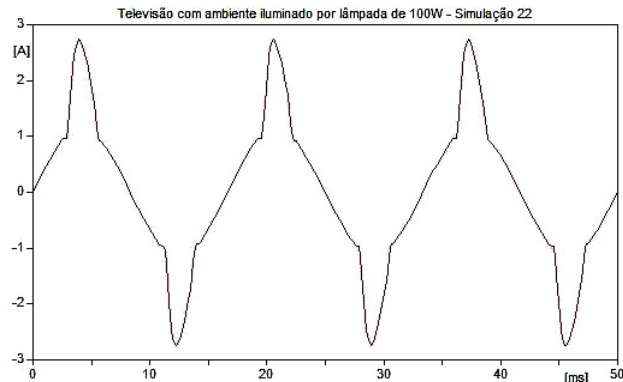
Para a simulação, com cada eletrodoméstico representado por um “bloco”, estes foram postos em um barramento de uma fase com uma fonte de tensão ideal. A corrente demandada deste grupo de eletrodomésticos foi o foco nestas simulações. A tabela 5-1

traz as situações simuladas com seus respectivos resultados: corrente eficaz e THD de corrente. A tabela está organizada pela distorção de corrente, iniciando pela menor.

**Tabela 5-1 - Simulações de cenários harmônicos em consumidores residenciais e comerciais**

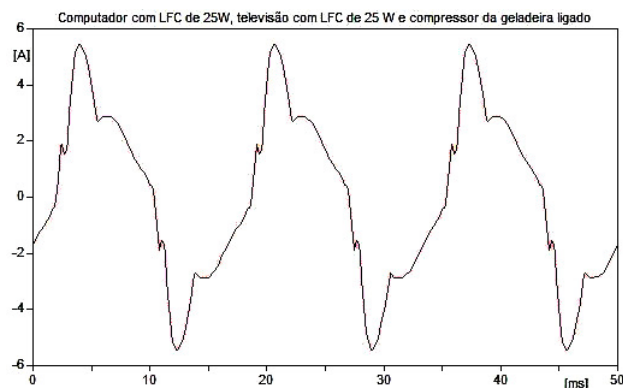
No.	Situação	$I_{rms}$	THD <sub>i</sub>
1	Chuveiro (4400W) com ambiente iluminado por lâmpada fluorescente com reator eletromagnético de 1x40W, secador de cabelo (1000 W) com ambiente iluminado por LFC de 25W.	42,92	0,45
2	Chuveiro com lâmpada fluorescente com reator eletrônico 1x40W, freezer, geladeira, aparelho de som e secador de cabelos com LFC 25W	47,06	0,58
3	Chuveiro, freezer e geladeira	38,53	1,18
4	Ferro de passar (1000 W), tanquinho, geladeira e televisão	11,38	4,86
5	Telefone sem fio, geladeira e freezer	6,48	7,00
6	Freezer, geladeira e televisão	6,70	7,14
7	Telefone sem fio e geladeira	1,89	7,29
8	Freezer, geladeira, microondas e lavadora de roupas	20,84	8,24
9	Ar condicionado 10500 BTU, televisão e video-cassete com LFC de 25W, geladeira	10,74	11,60
10	Ar condicionado, televisão e LFC de 25W	7,868	12,55
11	Lavadora de roupas, liquidificador, microondas e televisão	17,83	13,06
12	Tanquinho, compressor da geladeira ligado e televisão	4,223	13,18
13	Televisão, em ambiente iluminado por LFC de 25 W, compressor da geladeira ligado e cozinha utilizando iluminação fluorescente de reator eletromagnético 1x40W.	2,729	13,51
14	Ar condicionado 10500 BTU, televisão e video-cassete com LFC de 25W	9,05	13,66
15	Freezer, geladeira e microondas	14,91	16,88
16	Televisão, com o ambiente iluminado por LFC de 25 W, compressor da geladeira ligado e alguém jantando na cozinha utilizando iluminação fluorescente de reator eletrônico 1x40W.	2,420	17,52
17	Freezer, geladeira, microondas e fluor. elet. 2 (1x40W) e televisão com LFC 25W	15,63	18,74
18	Microondas com iluminação fluorescente de reator eletrônico 1x40W e compressor da geladeira ligado	12,06	23,69
19	Microondas com iluminação fluorescente de reator eletrônico 1x40W	10,75	28,07
20	Computador, em ambiente iluminado por LFC de 25 W e televisão, com mais um ambiente iluminado por LFC de 25 W e compressor da geladeira ligado	2,993	33,07
21	Ventilador de teto, Televisão e video-cassete com LFC de 25W	1,780	35,86
22	Computador, com ambiente iluminado por lâmpada incandescente de 60W e televisão, com ambiente iluminado por lâmpada incandescente de 100W.	2,501	43,90
23	Televisão em ambiente iluminado por lâmpada incandescente de 100W	1,319	49,67
24	Televisão e video-cassete com LFC de 25W e aparelho de som com LFC de 25 W	1,484	71,12
25	Computador, com ambiente iluminado por LFC de 25 W	0,906	79,95
26	Computador, com ambiente iluminado por LFC de 25 W e televisão, com ambiente iluminado por LFC de 25 W	1,646	80,19
27	Televisão, com o ambiente iluminado por LFC de 25 W	0,744	81,36
28	Televisão e video-cassete com LFC de 25W e computador com LFC de 25W, telefone sem fio	1,843	81,97
29	Televisão e video-cassete com LFC de 25W e computador com LFC de 25W	1,826	82,75
30	Televisão e video-cassete com LFC de 25W; televisão e video-game com LFC de 25W	1,656	91,38

As simulações executadas não serão todas aqui detalhadas. Todos os resultados das simulações (formas de onda e seus conteúdos harmônicos) estão no apêndice A. Algumas merecem destaque. A simulação de número 23, onde havia um aparelho de televisão em um ambiente iluminado por uma lâmpada incandescente de 100W, tem sua forma de onda de corrente apresentada na figura 5-2. Esta figura é bem parecida com a figura 4-11 que retrava a situação no consumidor residencial de consumo médio 1 às 21 horas. A diferença na figura 4-11 para a figura 5-2 é que a porção não-linear era muito maior que na simulada aqui, o que explica a maior distorção de corrente (65,90% na figura 4-11 contra 49,67% na figura 5-2).



**Figura 5-2 - Forma de onda de corrente da simulação 23 (televisão em ambiente iluminado por lâmpada de 100W)**

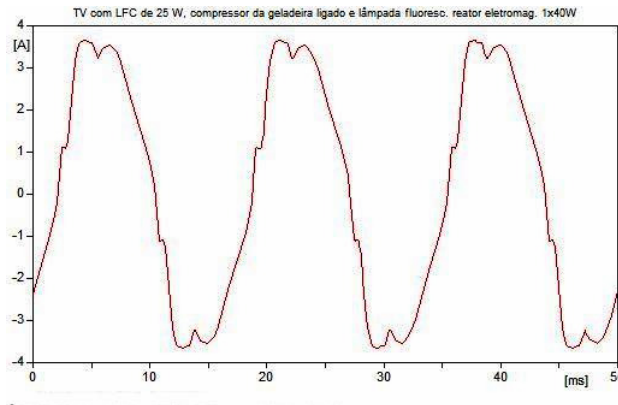
Outra simulação que merece destaque é a de número 20 (Computador, com ambiente iluminado por LFC de 25 W e televisão, com mais um ambiente iluminado por LFC de 25 W e compressor da geladeira ligado). A figura 5-3 apresenta a forma de onda obtida na simulação que é compatível com a figura 4-29 (consumidor residencial de alto consumo às 21 horas). Na figura 4-29, as fases B e C têm as formas de onda bastante parecidas com a apresentada na figura 5-3.



**Figura 5-3 - Forma de onda de corrente da simulação 20 (Computador em ambiente iluminado por LFC de 25 W + televisão, com mais um ambiente iluminado por LFC de 25 W e compressor da geladeira ligado)**

Outra forma de onda que foi bastante encontrada na medição de consumidores residenciais foi a forma de onda da simulação de número 13 (Televisão, em ambiente iluminado por LFC de 25 W, compressor da geladeira ligado e cozinha utilizando iluminação fluorescente de reator eletromagnético 1x40W). A figura 5-4 mostra a forma de onda obtida na simulação. Esta senóide distorcida com dois picos aparece tanto na

figura 4-19 (consumidor residencial de consumo médio 2 às 12 horas) quanto na figura 4-28 (consumidor residencial de consumo alto às 18 horas, fase B).



**Figura 5-4 - Forma de onda de corrente da simulação 13 (Televisão, em ambiente iluminado por LFC de 25 W, compressor da geladeira ligado e cozinha utilizando iluminação fluorescente de reator eletromagnético 1x40W)**

As comparações dos resultados simulados de eletrodomésticos com as medições indicam a idéia de configuração de eletrodomésticos ligados no instante de medição, podendo ser mais generalizada esta idéia. Como exemplo desta generalização, a figura 5-2 foi o resultado da interação entre uma televisão e uma lâmpada incandescente. Porém, esta forma de onda é encontrada na interação de uma carga resistiva com um aparelho eletrônico.

## **5.2 Sistema de um alimentador de distribuição secundário**

O alimentador de distribuição secundário (220 V) que alimenta os consumidores residenciais foi modelado e simulado para se identificar as distorções de tensão na rede secundária devido ao fluxo de correntes harmônicas provocadas por estes consumidores. Este alimentador é atendido por um transformador trifásico de 45 kVA 11,4 kV/220 V alimentando 39 consumidores residenciais. Cada vão de linha do alimentador foi modelado na configuração pi. Os condutores da linha têm condutores de fase em bitola 2/0 AWG e neutro 4/0 AWG numa configuração vertical e espaçamento de 20 cm por condutor, tendo o condutor mais próximo do solo uma distância de 8 metros. O condutor mais alto é o condutor neutro, seguido das fases A, B e C. A modelagem do sistema foi realizada em três fases, sendo apresentado seu diagrama unifilar na figura 5-5. A fonte de tensão utilizada foi uma fonte ideal.

Três situações de carga (leve, média e pesada) foram simuladas duas vezes: a primeira vez sem uma distorção harmônica de rede primária que alimenta o transformador (pré-distorção) e uma segunda-vez com essa distorção de tensão. Esta pré-distorção foi feita através de fontes de tensão harmônicas.

Pela medição realizada no transformador dos consumidores residenciais (capítulo 4), os horários para carga leve, média e pesada foram identificados como às 12 horas, 02 horas da madrugada e 21 horas. A explicação de ser às 12 horas o horário de carga leve é devido à ausência de iluminação, TV, chuveiro.

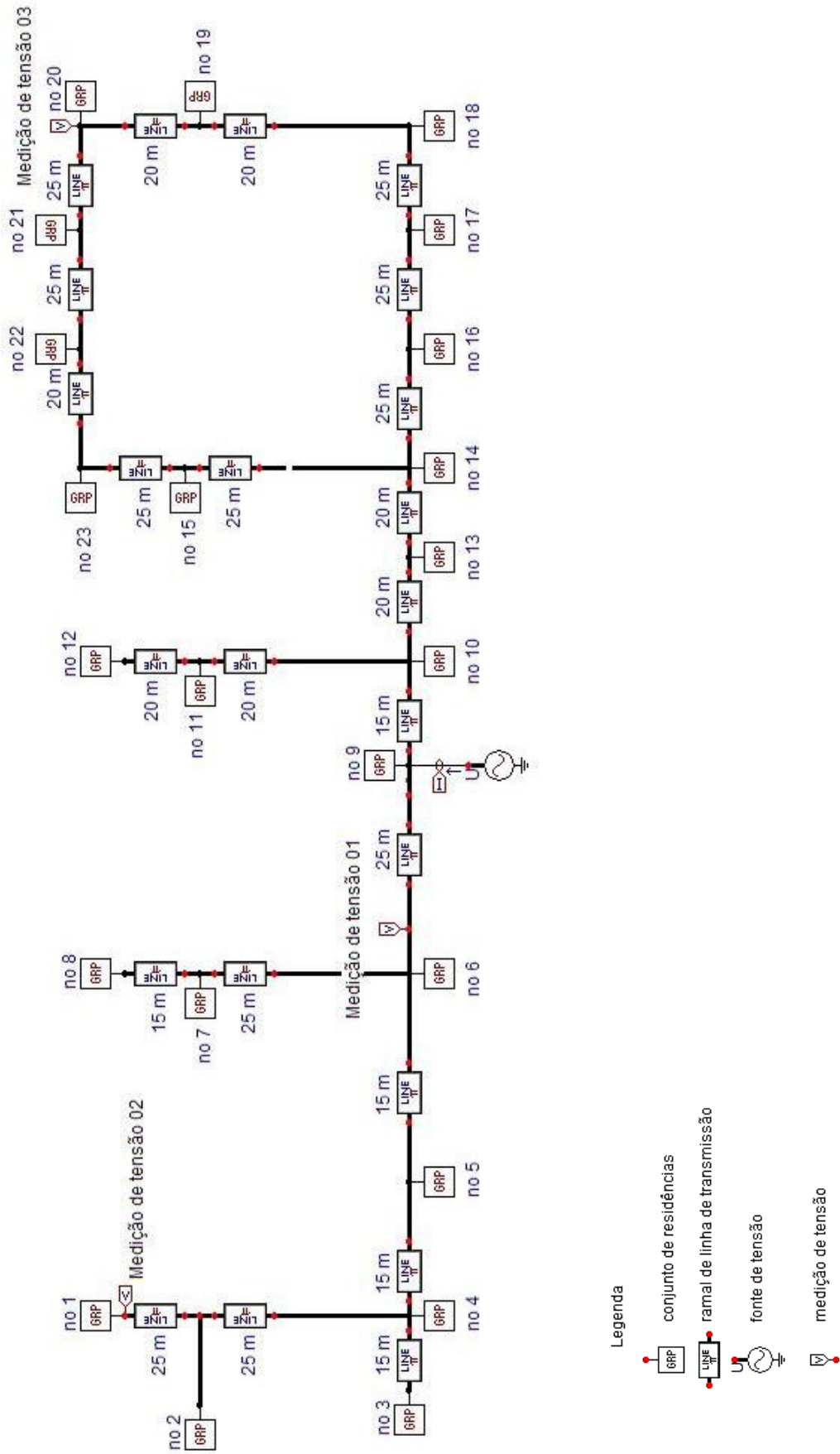


Figura 5-5 - Sistema de distribuição secundário

As residências foram divididas em casas com consumo baixo, médio 1, médio 2 e alto. No caso para o sistema estudado houve 14 residências com consumo baixo, 13 com médio 1, 8 médio 2 e 4 de consumo alto. Os consumos das residências, fornecidos pela concessionária, estão listados na tabela 5-2, ordenados pelo consumo mensal.

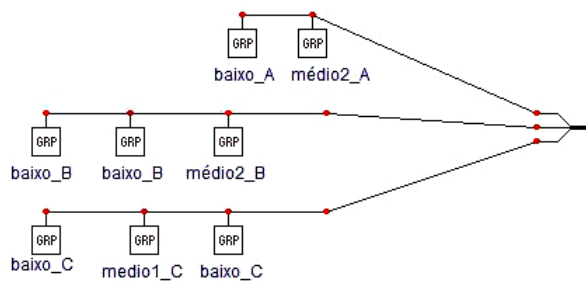
**Tabela 5-2 - Consumo residencial**

<b>Índice</b>	<b>Casa (referência figura 5-5)</b>	<b>Consumo (kWh/mês)</b>	<b>Divisão por consumo</b>
1	11	41	baixo
2	17	54	
3	5	64	
4	13	65	
5	14	74	
6	3	86	
7	<b>1</b>	89	
8	38	100	
9	33	101	
10	30	105	
11	2	120	
12	16	120	
13	29	125	
14	6	127	
15	24	136	Médio 1
16	22	144	
17	21	161	
18	32	162	
19	26	166	
20	9	171	
21	8	174	
22	34	177	
23	15	182	
24	28	215	
25	10	223	
26	31	236	
27	20	250	Médio 2
28	25	253	
29	36	271	
30	4	278	
31	18	278	
32	27	293	
33	35	296	
34	12	303	
35	23	349	Alto
36	19	529	
37	37	680	
38	7	943	
39	39	1315	

Com a localização de cada residência na topografia do alimentador secundário e o tipo de residência (consumo baixo, médio 1, médio 2 ou alto), modelou-se as residências conforme as medições realizadas (capítulo 4) e distribuiu-se, uniformemente, suas cargas pelas fases. A modelagem seguiu o indicado pela figura 5-1. Com todas as casas representadas, às 21 horas não se conseguia atingir a potência indicada no transformador. Para completar esta potência, acrescentaram-se chuveiros de 4400 W. Ainda, às 21 horas e 02 horas também foram incluídas lâmpadas de vapor de sódio de 70 W como iluminação pública.

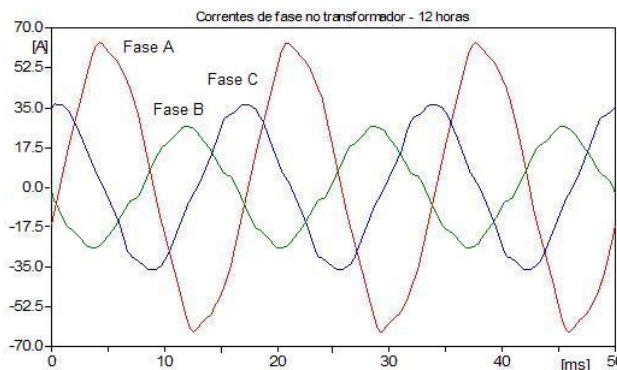
Na figura 5-5 há três indicativos de onde foram feitas as medições de tensão nas simulações: um próximo ao transformador (medição de tensão 01), um em cada uma das duas extremidades do alimentador (medições de tensão 02 e 03).

A figura 5-6 mostra o exemplo de um bloco com 4 residências de consumo baixo (baixo\_A, 2 baixo\_B e 2 baixo\_C), uma de consumo médio 1 (medio1\_C) e duas de consumo médio 2 (medio2\_A, medio2\_B). Este conjunto é representado no bloco 2 da figura 5-5. Assim, cada bloco de figura 5-5 continha um elemento chamado “splitter” que expandia o ramal unifilar em três fases, onde eram conectados as residências.



**Figura 5-6 - Bloco número 2 da figura 5-5 – “splitter” com os blocos de casas monofásicas representadas**

Primeiramente serão apresentadas as correntes totais por fase deste sistema de distribuição. Tanto no caso sem ou com pré-distorção a corrente resultante no transformador é a mesma, pois a modelagem foi feita por fontes de correntes harmônicas. As figuras 5-7, 5-8 e 5-9 trazem as correntes resultantes às 12 horas (carga leve), 02 horas (carga média) e 21 horas (carga pesada).



**Figura 5-7 - Correntes resultantes de simulação no transformador – 12 horas**

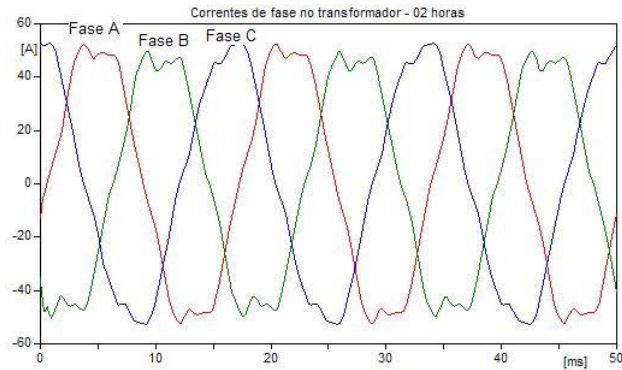


Figura 5-8 - Correntes resultantes de simulação no transformador – 02 horas

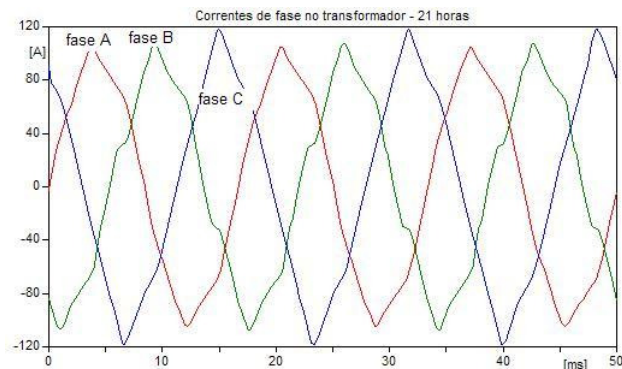


Figura 5-9 - Correntes resultantes de simulação no transformador – 21 horas

Das três figuras apresentadas anteriormente, apenas as correntes de fase às 12 horas ficaram fortemente desbalanceadas. Isto se explica na modelagem das residências. A carga da residência de consumo alto estava fortemente desequilibrada nas 3 fases, com uma corrente de valor alto na fase A, fazendo com que a resultante fosse alta nesta fase. Os conteúdos harmônicos das formas de onda estão apresentados nas tabelas 5-3, 5-4 e 5-5.

Tabela 5-3 - Conteúdo harmônico das formas de onda de corrente da figura 5-7 (12 horas)

Harm.	Fase A		Fase B		Fase C	
	$I_{rms} = 43,47 \text{ A}$		$I_{rms} = 17,72 \text{ A}$		$I_{rms} = 25,02 \text{ A}$	
	$THD_i = 4,05\%$		$THD_i = 8,34\%$		$THD_i = 6,74\%$	
	Fator de crista = 1,47		Fator de crista = 1,52		Fator de crista = 1,46	
	Módulo (%)	Ângulo (graus)	Módulo (%)	Ângulo (graus)	Módulo (%)	Ângulo (graus)
1	100,00	-15,62	100,00	-168,84	100,00	82,42
3	1,85	-145,58	6,24	61,15	4,87	64,56
5	3,32	17,67	4,49	147,75	4,27	-98,47
7	0,87	-151,52	2,88	124,09	1,07	-23,93
9	0,94	26,83	0,52	-146,37	1,20	10,57
11	0,59	-166,19	1,39	-57,83	0,94	85,32



Tabela 5-4 - Conteúdo harmônico das formas de onda de corrente da figura 5-8 (02 horas)

Harm.	Fase A		Fase B		Fase C	
	$I_{rms} = 38,13 \text{ A}$		$I_{rms} = 36,34 \text{ A}$		$I_{rms} = 37,28 \text{ A}$	
	THD <sub>i</sub> = 8,90%		THD <sub>i</sub> = 11,51%		THD <sub>i</sub> = 7,66%	
	Fator de crista = 1,38		Fator de crista = 1,38		Fator de crista = 1,41	
	Módulo (%)	Ângulo (graus)	Módulo (%)	Ângulo (graus)	Módulo (%)	Ângulo (graus)
1	100,00	-14,28	100,00	-136,25	100,00	94,92
3	4,00	-48,13	6,54	-53,12	5,09	9,08
5	7,68	92,33	9,16	-143,81	5,27	-43,38
7	1,33	-5,04	1,02	-94,44	1,39	95,13
9	0,26	-126,63	0,49	142,73	0,45	-51,72
11	1,32	-88,59	1,71	41,90	1,50	144,52

Tabela 5-5 - Conteúdo harmônico das formas de onda de corrente da figura 5-9 (21 horas)

Harm.	Fase A		Fase B		Fase C	
	$I_{rms} = 70,23 \text{ A}$		$I_{rms} = 67,99 \text{ A}$		$I_{rms} = 73,01 \text{ A}$	
	THD <sub>i</sub> = 5,50%		THD <sub>i</sub> = 10,05%		THD <sub>i</sub> = 9,22%	
	Fator de crista = 1,48		Fator de crista = 1,57		Fator de crista = 1,67	
	Módulo (%)	Ângulo (graus)	Módulo (%)	Ângulo (graus)	Módulo (%)	Ângulo (graus)
1	100,00	-1,33	100,00	-119,12	100,00	117,61
3	2,34	-39,95	3,21	164,59	6,69	-154,02
5	4,19	67,07	9,04	-154,53	6,19	-60,66
7	1,17	-114,20	0,28	-28,30	1,42	-26,50
9	0,27	-151,42	1,49	1,59	0,89	32,32
11	1,12	-93,51	1,77	70,20	0,88	154,85

Comparando os valores simulados com os valores medidos de corrente no transformador (tabelas 4-19, 4-20 e 4-21), os valores resultantes da simulação ficaram mais equilibrados do que os encontrados nas medições. Os valores de THD de corrente também apresentaram diferença. Esta pode ser explicada pela diferença de correntes harmônicas de cada residência. Como para a simulação considerou-se um conjunto de residenciais com a mesma corrente harmônica e mais chuveiros para completar a potência medida no transformador, as diferenças podem ter ocorrido devido a esse tipo de modelagem.

As distorções de tensão nos 3 pontos indicados na figura 5-5 foram determinados com duas suposições: sem e com pré-distorção. No caso com uma pré-distorção as tensões utilizadas foram aquelas medidas na saída do alimentador da sub-estação nos horários de carga leve, média e pesada. As distorções de tensão, em todos os casos, tinham o 5º harmônico como o maior harmônico do espectro. Como a distorção é baixa em todos os casos, representá-las até o 7º harmônico retrata bem a forma de onda de tensão naqueles instantes. Os conteúdos harmônicos das tensões nos momentos mencionados são mostrados nas tabelas 5-6, 5-7 e 5-8.

**Tabela 5-6 - Conteúdo harmônico das tensões às 12 horas (carga leve) utilizado nas simulações**

<b>Harm.</b>	<b>Fase A</b>		<b>Fase B</b>		<b>Fase C</b>	
	$V_{rms} = 6,58 \text{ kV}$		$V_{rms} = 6,58 \text{ kV}$		$V_{rms} = 6,58 \text{ kV}$	
	$THD_v = 1,08\%$		$THD_v = 0,99\%$		$THD_v = 0,95\%$	
	Fator de crista = 1,43		Fator de crista = 1,43		Fator de crista = 1,43	
	<b>Módulo (%)</b>	<b>Ângulo (graus)</b>	<b>Módulo (%)</b>	<b>Ângulo (graus)</b>	<b>Módulo (%)</b>	<b>Ângulo (graus)</b>
1	100,00	0,00	100,00	-119,74	100,00	120,36
3	0,40	111,34	0,45	95,89	0,18	-144,76
5	0,87	-38,48	0,73	91,47	0,80	-155,99
7	0,47	-143,75	0,47	97,98	0,42	-14,93

**Tabela 5-7 - Conteúdo harmônico das tensões às 02 horas (carga média) utilizado nas simulações**

<b>Harm.</b>	<b>Fase A</b>		<b>Fase B</b>		<b>Fase C</b>	
	$V_{rms} = 6,58 \text{ kV}$		$V_{rms} = 6,58 \text{ kV}$		$V_{rms} = 6,58 \text{ kV}$	
	$THD_v = 1,31\%$		$THD_v = 1,43\%$		$THD_v = 1,20\%$	
	Fator de crista = 1,41		Fator de crista = 1,42		Fator de crista = 1,40	
	<b>Módulo (%)</b>	<b>Ângulo (graus)</b>	<b>Módulo (%)</b>	<b>Ângulo (graus)</b>	<b>Módulo (%)</b>	<b>Ângulo (graus)</b>
1	100,00	0,00	100,00	-119,93	100,00	120,23
3	0,49	69,64	0,72	130,80	0,14	-152,90
5	1,16	-91,61	1,17	27,27	1,14	149,24
7	0,36	-143,18	0,38	101,16	0,35	-16,50

**Tabela 5-8 - Conteúdo harmônico das tensões às 21 horas (carga pesada) utilizado nas simulações**

<b>Harm.</b>	<b>Fase A</b>		<b>Fase B</b>		<b>Fase C</b>	
	$V_{rms} = 6,58 \text{ kV}$		$V_{rms} = 6,58 \text{ kV}$		$V_{rms} = 6,58 \text{ kV}$	
	$THD_v = 1,19\%$		$THD_v = 1,27\%$		$THD_v = 1,11\%$	
	Fator de crista = 1,40		Fator de crista = 1,42		Fator de crista = 1,40	
	<b>Módulo (%)</b>	<b>Ângulo (graus)</b>	<b>Módulo (%)</b>	<b>Ângulo (graus)</b>	<b>Módulo (%)</b>	<b>Ângulo (graus)</b>
1	100,00	0,00	100,00	-119,95	100,00	120,34
3	0,34	84,36	0,58	96,00	0,22	-151,85
5	1,07	-49,56	1,05	71,85	1,02	-169,04
7	0,41	-169,51	0,42	74,06	0,39	-43,39

Os resultados das distorções de tensão são apresentados na tabela 5-9.

**Tabela 5-9 - Distorções de tensão no sistema de distribuição secundário**

<b>Ponto de medição 01 – próximo ao transformador</b>						
Carga / horário	Sem pré-distorção			Com pré-distorção		
	Va (%)	Vb (%)	Vc (%)	Va (%)	Vb (%)	Vc (%)
Leve / 12 horas	0,33	0,26	0,27	1,28	1,15	1,07
Média / 02 horas	0,57	0,70	0,45	1,05	1,10	1,35
Pesada / 21 horas	0,69	1,48	1,11	1,57	2,04	2,00
<b>Ponto de medição 02 – ponta do sistema de distribuição secundário</b>						
Carga / horário	Sem pré-distorção			Com pré-distorção		
	Va (%)	Vb (%)	Vc (%)	Va (%)	Vb (%)	Vc (%)
Leve / 12 horas	0,42	0,34	0,33	1,35	1,20	1,08
Média / 02 horas	0,60	0,80	0,51	1,05	1,12	1,42
Pesada / 21 horas	0,76	1,76	1,44	1,61	2,24	2,29
<b>Ponto de medição 03 – ponta do sistema de distribuição secundário</b>						
Carga / horário	Sem pré-distorção			Com pré-distorção		
	Va (%)	Vb (%)	Vc (%)	Va (%)	Vb (%)	Vc (%)
Leve / 12 horas	0,33	0,20	0,33	1,25	1,10	1,18
Média / 02 horas	0,79	0,95	0,67	1,35	1,20	1,08
Pesada / 21 horas	0,89	1,67	1,16	1,67	2,11	2,06

Estes resultados de simulações podem ser comparados com os THD's de tensão medidos nas residências e apresentados no capítulo 4 (figuras 4-3, 4-10, 4-17 e 4-26). O ponto de medição 03 na simulação é a localização do circuito de entrada da residência de consumo alto. Os valores de simulação que se aproximam com os valores medidos estão na situação com pré-distorção (diferença média na ordem de 10%). A tendência de variabilidade do THD conforme o horário, encontrada na simulação, pode também ser constatada na medição.

### **5.3 Simulação de distribuição primária**

O sistema de distribuição de média tensão (rede primária – 11,4 kV) que alimentava o sistema de distribuição secundário foi modelado e simulado para também se ter uma noção de como as correntes harmônicas circulantes distorcem a forma de onda de tensão. Este alimentador primário pode ser visualizado na figura 5-10.

Para se atingir este objetivo, primeiramente era preciso saber quais eram as correntes harmônicas circulantes na média tensão, já que haviam apenas simulações e medições destas correntes no sistema de baixa tensão.

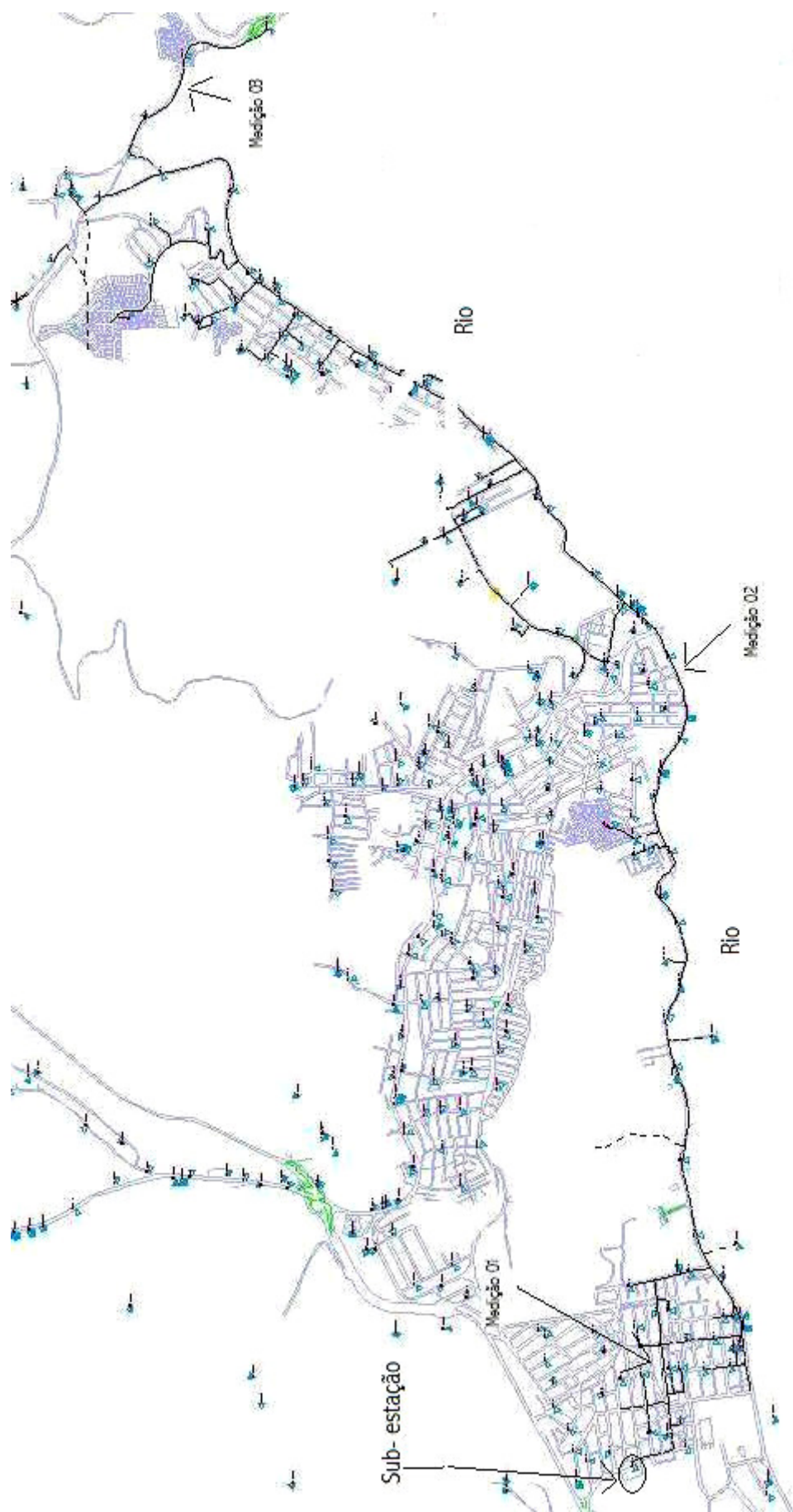


Figura 5-10 – Mapa mostrando o percurso do alimentador primário – 11,4 kV (em negrito)

A rede primária tinha um comprimento de 11 km, com condutores típicos 3/0 AWG. Dispostos horizontalmente, o espaçamento entre condutores era de 1 metro. A maior parte dos transformadores era de 45 kVA (15 unidades), 75 kVA (35 unidades) e 112,5 kVA (13 unidades). O transformador que alimentava a rede primária era de 30 MVA, 69/11,4 kV. De consumidores residenciais, havia 3519 unidades que consumiam 546817 kWh/mês, o que dava uma média por consumidor de 155 kWh/mês. Já de consumidores comerciais, havia 341 com um consumo mensal de 272757 kWh, dando uma média por consumidor de 800 kWh/mês. O número de consumidores industriais era de 184, com um consumo de 569949 kWh/mês, sendo que a média por consumidor era de 3098 kWh/mês. A respeito do nível de curto circuito na subestação, para uma falta trifásica simétrica, a potência de curto circuito era de 224,9 MVA sendo a corrente da falta simétrica igual a 8,66 kA. A relação X/R nesta falta era de 3,73. Por fim, havia um banco de capacitores de 600 kVAr que se localizava no meio da rede, conectado em estrela.

Os transformadores de distribuição tinham a configuração triângulo-estrela aterrada. Esta configuração de transformador, em um sistema equilibrado, eliminaria os harmônicos de ordem tripla, quando seus valores forem iguais nas 3 fases [6, 18 e 23]. Entretanto, as correntes e seus harmônicos não eram equilibrados. Assim, para saber quais harmônicos haveria na média tensão, o transformador delta-estrela foi simulado com as correntes do secundário. Para se determinar os parâmetros (R,X) dos transformadores, foram usados os valores de correntes de excitação e perdas estabelecidos pela norma NBR 5440 [65]. A tabela 5-10 mostra os valores retirados de [65] que representam os valores máximos permitidos em transformadores de distribuição. Utilizaram-se tanto os resultados de simulação das residências uniformemente distribuídas como também a medição de corrente no transformador.

**Tabela 5-10 - Características dos transformadores simulados**

<b>Potência (kVA)</b>	<b>Corrente de excitação (%)</b>	<b>Perdas máximas (W)</b>
45	3,7	884
75	3,1	1300
112,5	2,8	1759

As simulações mostraram que o transformador na configuração triângulo-estrela aterrado promove uma diminuição na distorção de corrente pois serve como um bloqueio para alguns harmônicos. Algumas correntes secundárias que tinham um distorção média de 10%, iam para 5% no lado de média tensão (transformadores de 75 kVA e 112,5 kVA). A tabela 5-11 apresenta os THD's das correntes resultantes de medição no secundário e seus respectivos THD's no primário dos transformadores delta-estrela.

Tabela 5-11 - THD's das correntes no secundário e no primário após um transformador delta-estrela

<b>Resultado das residências uniformemente distribuídas</b>						
	Secundário (%)			Primário (%)		
Horário	A	B	C	A	B	C
12 horas	3,45	6,72	5,34	4,41	3,98	3,90
21 horas	5,50	10,05	9,19	6,26	7,45	6,05
02 horas	8,90	11,51	7,66	6,60	7,19	6,09
<b>Transformador 45 kVA</b>						
	Secundário (%)			Primário (%)		
Horário	A	B	C	A	B	C
12 horas	10,52	12,97	16,15	9,42	6,50	8,51
21 horas	11,51	5,84	11,19	5,17	5,43	4,78
02 horas	5,56	7,92	5,35	2,89	5,59	5,12
<b>Transformador de 75 kVA</b>						
	Secundário (%)			Primário (%)		
Horário	A	B	C	A	B	C
12 horas	12,66	11,35	9,33	5,09	8,08	6,21
21 horas	10,74	10,94	8,65	5,75	8,66	5,32
02 horas	8,79	5,79	9,15	4,27	5,99	5,79
<b>Transformador 112,5 kVA</b>						
	Secundário (%)			Primário (%)		
Horário	A	B	C	A	B	C
12 horas	12,09	7,97	11,47	5,37	4,96	9,42
21 horas	11,76	7,62	8,37	6,23	5,42	5,76
02 horas	8,70	4,52	3,72	4,94	4,59	3,21

Com os resultados das correntes nos primários nas situações das residências uniformemente distribuídas e dos transformadores, os horários de 12, 21 e 02 horas foram simuladas. Estes resultados foram modelados e distribuídos ao longo do alimentador, sendo o alimentador também modelado conforme as suas características físicas anteriormente apresentadas.

Houve duas simulações: uma simulação realizada com transformadores de 45, 75 e 112,5 kVA, e uma segunda simulação com transformadores modelados a partir dos resultados da simulação das residências uniformemente distribuídas, ou seja, da simulação do sistema secundário de distribuição. Neste último caso, como o resultado da simulação do conjunto de residências era para um transformador de 45 kVA, este resultado foi extrapolado para os transformadores de 75 e 112,5 kVA, através de uma regra de três simples.

Avaliou-se a tensão nas simulações em três pontos distintos (figura 5-10): próximo à sub-estação (medição 01), meio do alimentador (medição 02) e no fim do alimentador (medição 03). Dos resultados encontrados, calculou-se o THD de tensão nestes pontos, os quais são apresentados nas tabelas 5-12 e 5-13.

**Tabela 5-12 - THD's de tensão ao longo do alimentador – simulação a partir de transformadores com residências uniformemente distribuídas**

<b><i>Próximo à sub-estação</i></b>			
	Fase A	Fase B	Fase C
12 horas	0,08	0,08	0,07
21 horas	0,23	0,57	0,23
02 horas	0,15	0,16	0,13
<b><i>Meio do alimentador</i></b>			
	Fase A	Fase B	Fase C
12 horas	0,39	0,40	0,32
21 horas	1,13	1,70	1,17
02 horas	0,74	0,82	0,67
<b><i>Fim do alimentador</i></b>			
	Fase A	Fase B	Fase C
12 horas	0,64	0,65	0,53
21 horas	1,85	2,62	1,93
02 horas	1,21	1,36	1,11

**Tabela 5-13 - THD's de tensão ao longo do alimentador – simulação a partir das medições em transformadores**

<b><i>Próximo à sub-estação</i></b>			
	Fase A	Fase B	Fase C
12 horas	0,13	0,15	0,12
21 horas	0,10	0,35	0,14
02 horas	0,08	0,11	0,08
<b><i>Meio do alimentador</i></b>			
	Fase A	Fase B	Fase C
12 horas	0,64	0,77	0,58
21 horas	0,50	1,06	0,71
02 horas	0,42	0,56	0,45
<b><i>Fim do alimentador</i></b>			
	Fase A	Fase B	Fase C
12 horas	1,06	1,30	0,98
21 horas	0,82	1,65	1,17
02 horas	0,71	0,93	0,76

Analisando os resultados apresentados nas tabelas 5-12 e 5-13, os maiores THD's de tensão são encontrados às 21 horas. Este instante é também o instante de maior carregamento nos transformadores e, por consequência, no alimentador dos três horários analisados nos resultados obtidos através de simulações. Os momentos de maior carregamento no alimentador terão maior distorção na forma de onda. Isto é explicado por não haver uma variação muito brusca na distorção de corrente nos instantes analisados. Assim, quanto maior o valor de corrente, maior serão os valores absolutos dos harmônicos e da fundamental. Assim, as quedas de tensão devido aos harmônicos serão maiores e por consequência, levarão a um maior distorção na tensão.

Na tabela 5-12, os THD's de tensão às 12 horas são menores do que às 02 horas. Já na tabela 5-13 ocorre o inverso. Isto se deve, pois, na tabela 5-12 o alimentador tem

somente as características dos transformadores de consumidores residenciais. Já na tabela 5-13, os transformadores levaram em conta a contribuição dos consumidores comerciais, o que em um transformador que alimenta estes consumidores em conjunto com consumidores residenciais, às 12 horas há uma maior carga que às 02 horas de madrugada. Por isso, a distorção, às 12 horas, será maior.

#### **5.4 Conclusões gerais**

Algumas simulações foram apresentadas neste capítulo que teve como objetivo apresentar como a corrente demandada em uma residência ou comércio fica alterada com a interação de vários eletrodomésticos. Além disto, também foram investigadas como as correntes harmônicas distorcem a tensão ao longo de um alimentador secundário e também ao longo de um alimentador primário.

30 simulações da interação de vários eletrodomésticos foram conduzidas. Os eletrodomésticos foram modelados a partir das medições apresentadas no capítulo 3. Destas simulações, percebeu-se também a correlação inversa entre a corrente eficaz e seu THD. Esta correlação é explicada por serem ainda as cargas lineares as cargas de maior potência em consumidores residenciais e comerciais, nos casos investigados.

A partir das medições de consumidores residenciais e comerciais e transformadores mostrados no capítulo 4, foram realizadas simulações em um circuito de baixa tensão (220 V) e outra simulação em um circuito de média tensão (11,4 kV). A simulação de baixa tensão foi realizada sem e com uma pré-distorção na fonte de tensão.

Das simulações dos circuitos, pode-se perceber que a tensão vai ficando mais distorcida a medida que o circuito se distancia do transformador da subestação que atende o alimentador. Isto se deve às quedas de tensão harmônicas que vão ocorrendo no alimentador a medida que se distancia da subestação.

Apesar das distorções de tensão encontradas na simulação, em nenhum caso encontraram-se distorções que estivessem acima das normas apresentadas no capítulo 2.



# Conclusões

O presente trabalho procurou caracterizar os harmônicos produzidos por equipamentos eletro-eletrônicos de consumidores residenciais e comerciais e o impacto que estes harmônicos provocam no sistema de distribuição de energia elétrica. Consumidores poucos contemplados na literatura, passaram a se tornar preocupação pela crescente penetração de cargas não-lineares, devido principalmente ao aumento na eficiência energética de aparelhos eletrodomésticos.

No 1º capítulo foi apresentada uma definição dos termos qualidade de energia, conservação de energia, a relação entre os dois termos e harmônicos. A conservação de energia deveria ter agregado em suas propostas de efficientização energética a qualidade de energia, pois dependendo das medidas adotadas, pode-se deteriorar a qualidade da energia, principalmente aumentando a quantidade de harmônicos circulantes pelo sistema de distribuição de energia elétrica.

No 2º capítulo, apresentaram-se os efeitos que os harmônicos provocam no sistema de distribuição e em seus componentes, tendo sido investigados os seguintes componentes: medidores de energia, condutores, iluminação, máquinas rotativas, equipamentos eletrônicos, interferência telefônica, transformadores, capacitores e relés de proteção. Percebeu-se que uns são mais susceptíveis que outros. Além desta apresentação, foram mostrados os principais limites de harmônicos contemplados por normas nacionais e internacionais. Analisando estes limites em conjunto com os efeitos que os harmônicos provocam no sistema de distribuição, é possível conviver com os harmônicos, desde que eles sejam controlados, ou seja, estejam dentro dos limites estabelecidos.

O 3º capítulo mostrou o trabalho de medições de aparelhos eletrodomésticos presentes em consumidores residenciais e comerciais a fim de caracterizar a produção de correntes harmônicas. Foram medidos mais de 100 exemplares de 33 diferentes aparelhos eletrodomésticos. Para melhor síntese dos resultados, os eletrodomésticos foram divididos em seis categorias: iluminação, eletrônicos, refrigeradores, condicionares de ar, aquecimento e motores. Percebeu-se que, quanto maior a potência do eletrodoméstico, mais linear ele é, conclusão esta dentre os aparelhos investigados. Os aparelhos eletrônicos são os que produzem um conteúdo harmônico maior em relação aos demais. Entretanto, são elementos de menor potência, ou como no caso das lâmpadas, de maior eficiência energética.

No 4º capítulo, foram mostradas medições realizadas nas entradas de energia de consumidores residências e comerciais, bem como nos transformadores que os

---

alimentavam. A medição em um prédio comercial também foi apresentada. Contemplaram-se consumidores residenciais de diferentes consumos e também consumidores comerciais de diferentes ramos. Nas medições observou-se uma correlação inversa entre a corrente demandada e seu THD. Este fato vem de encontro com a conclusão observada no capítulo 3: as maiores cargas presentes nestes consumidores tendem a ser lineares.

O capítulo 5, com as medições apresentadas nos capítulos 3 e 4, apresentou três tipos de simulação: simulação da corrente resultante de um conjunto de eletrodomésticos, simulação de um alimentador de distribuição secundário (220 V) e simulação de um alimentador de distribuição primária (11,4 kV). Na primeira simulação, com as medições do capítulo 3, modelaram-se vários eletrodomésticos e investigou-se qual era a corrente demandada por um conjunto de eletrodomésticos. A conclusão desta investigação estende às observações do capítulo 3 e 4: correlação inversa entre a corrente demandada e o THD da corrente. Outro fator também observado é que, uma situação com um grupo de cargas não-lineares, quando inserido uma carga linear, de potência superior ao grupo de cargas não-lineares, faz com que a corrente resultante seja menos distorcida, pois os harmônicos presentes estarão numa relação menor com a fundamental. Com as medições dos consumidores residenciais, estes consumidores foram modelados e inseridos em um sistema de distribuição secundário a fim de avaliar a distorção da tensão ao longo do alimentador. Percebeu-se que quanto mais distante o alimentador do transformador, maior será a distorção na tensão. Com as medições dos transformadores, apresentadas no capítulo 4, os transformadores foram modelados e inseridos em um alimentador primário (11,4 kV) de 11 km de comprimento. Observou-se também que, quanto mais distante estiver o ponto do alimentador da subestação que alimenta este circuito, mais distorcida estará a tensão. Esta observação é explicada devido às quedas de tensão harmônica que ocorrem ao longo do circuito, fazendo com que a tensão resultante seja mais distorcida. Apesar da distorção de tensão encontrada, tanto no caso do alimentador primário quanto secundário, os índices de distorção estiverem dentro dos limites apresentados no capítulo 2.

Os órgãos responsáveis por estabelecerem limites de produção de harmônicos, no caso brasileiro, deveriam iniciar uma campanha de regulamentação para os maiores poluidores, esta circulação de harmônicos seria diminuída, melhorando a qualidade da energia nos sistemas de distribuição. Algo já foi feito, como a portaria do INMETRO n<sup>o</sup> 188 de 9 de novembro de 2004 que determina que reatores eletrônicos que alimentem lâmpadas fluorescentes convencionais, em que o conjunto reator-lâmpada tenha potência superior a 56W, devem ser fabricados na versão com alto fator de potência.

Esta dissertação teve seu trabalho divulgado em dois eventos científicos: um artigo no VI SBQEE – Seminário Brasileiro de Qualidade de Energia Elétrica [1] e dois artigos no III Citenel - Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica [76 e 77].

# Propostas de futuros trabalhos

Como este trabalho apresentou várias curvas de medições de eletrodomésticos e consumidores residenciais e comerciais, além de simulações de diversos cenários atuais de utilização de eletrodomésticos, o próximo passo poderia ser a investigação de cenários diferentes através de simulações.

Um cenário, por exemplo, seria o de investigar o sistema de distribuição com os consumidores residenciais e comerciais utilizando diferentes tipos de iluminação: uma situação com todos utilizando lâmpadas incandescentes e outra situação utilizando apenas lâmpadas fluorescentes compactas.

Um outro cenário a ser estudado é o impacto que os chuveiros com controle eletrônico de temperatura causarão no sistema de distribuição. No mercado, há alguns modelos deste eletrodoméstico que produzem uma quantidade significativa de harmônicos. Dado que o valor de corrente destes harmônicos será elevado, espera-se ter uma distorção significativa na tensão no sistema de distribuição onde estarão estes aparelhos inseridos.

---

# Referências Bibliográficas

- [1] GONZALEZ, M. L. y, PIRES, I. A., et alli, *Correntes harmônicas em aparelhos eletrodomésticos*, VI SBQEE – Seminário Brasileiro sobre Qualidade de Energia Elétrica, 21 a 24 de agosto de 2005, Belém – PA.
- [2] BEN 2005, Boletim Energético Nacional 2005, disponível em [http://www.mme.gov.br/site/menu/select\\_main\\_menu\\_item.do?channelId=1432&pageId=4060](http://www.mme.gov.br/site/menu/select_main_menu_item.do?channelId=1432&pageId=4060), acessado em 19/01/06.
- [3] IEEE std 1159-1995, IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality.
- [4] BOLLEN, M. H. J., *What is power quality?*, Electric Power Systems Research, 66, 2003, pags. 5-14.
- [5] GAMA, P. H. R. P. e OLIVEIRA, A., *Conservação de Energia e sua relação com a qualidade de Energia Elétrica*, XV SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (1999), Brasil.
- [6] DUGAN, R.C. et alli, *Electrical Power Systems Quality*, second edition, McGraw-Hill.
- [7] PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia elétrica, disponível em <http://www.eletrabras.gov.br/procel/site/home/index.asp>, acessado em 04/11/05.
- [8] PIRES, I. A. e GONZALEZ, M. L. y, *Avaliação dos ganhos em demanda e perdas elétricas de instalações elétricas residenciais utilizando equipamentos eficientes*, I Congresso Brasileiro de Eficiência Energética, 12-14 de setembro de 2005, Belo Horizonte – MG.
- [9] Conservação de Energia – Eficiência Energética de Instalações e Equipamentos, 2ª edição, Eletrobrás/Procel, Editora da EFEI, 2001.
- [10] ASTORGA, O. A. M. et alli, *Um estudo da substituição das lâmpadas incandescentes por lâmpadas fluorescentes compactas em instalações elétricas residenciais e o compromisso entre conservação e qualidade de energia*, XVI SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (2001), Brasil.
- [11] FUJIWARA, J. K. et alli, *Interferência causada pelo uso de fluorescentes compactas em residências*, Eletricidade Moderna, pag. 134-142, Setembro, 1998.
- [12] DATTA, S., *Power Pollution Caused By Lighting Control Systems*, IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 1991.
- [13] LUZ, J. M. e FELBERBAUM, M. I. , *Ensaio em reatores eletrônicos e o impacto na conservação de energia elétrica*, III SBQEE – Seminário Brasileiro de Qualidade de Energia Elétrica, ST 8 – IT 61, 8-12 de agosto de 1999, Brasília – DF.

[14] TOSTES, M. E. L. et. alli. , *Impactos Harmônicos em redes de distribuição de energia da Iluminação Pública*, XV SENDI – Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica (2002), Brasil.

[15] GÓMEZ , J. C., MORCOS, M. M., *Impact of EV Battery Chargers on the Power Quality of Distribution Systems*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 18, no. 3, July 2003.

[16] NEJDAMI, I. M. et alli, *Harmonics Trend in NE USA: a preliminary survey*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 14, no. 4, October 1999.

[17] PENNA, C. et alli, O impacto dos programas de eficiência energética na Qualidade de Energia Elétrica, I Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, 6 e 7 de novembro de 2001, Brasília – DF.

[18] IEEE std. 519-1992, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems.

[19] OLIVEIRA, M. et alli, *Efeito das distorções harmônicas nas medições de energia elétrica*, III SBQEE – Seminário Brasileiro de Qualidade de Energia Elétrica, ST 1 – IT 7, 8-12 de agosto de 1999, Brasília – DF.

[20] GALHARDO, M. A. B., PINHO, J. T., *Conceitos de distorção e não-linearidades*, V SBQEE – Seminário Brasileiro de Qualidade de Energia Elétrica, 17-20 de agosto de 2003, Aracaju – SE.

[21] VASCONCELOS, F. H et alli, *Calibração de Medidores de Energia Elétrica Ativa em Condições Não Senoidais*, Metrologia 2003, Sociedade Brasileira de Metrologia, 01 a 05 de setembro de 2003, Recife – PE.

[22] SILVA, R.V. R. et alli, *Análise de desempenho de medidores de watt-hora sob condições não senoidais*, III SBQEE – Seminário Brasileiro de Qualidade de Energia Elétrica, ST 8 – IT 61, 8-12 de agosto de 1999, Brasília – DF.

[23] IEEE Task Force on the Effects of Harmonics on Equipment, *Effects of Harmonics on Equipment*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 8, nº 2, abril de 1993.

[24] HIRANANDAM, A., *Calculation of Cable Ampacities Including the Effects of Harmonics*, IEEE Industry Applications Magazine, March/April 1998, p.p. 42-51.

[25] DIAS, G.A.D., *Harmônicas em Sistemas Industriais*, 2ª edição, EDIPUCRS, 1998.

[26] CHEN, M.T., FU, C.H., *Characteristics of Fluorescent Lamps under abnormal System Voltage Conditions*, Electric Power System Research, nº 41, 1997.

[27] KLINGSHIRN, E. A., JORDAN, H. E., *Polyphase Induction Motor Performance and Losses on Nonsinusoidal Voltage Sources*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-87, nº 3, março, 1968.

- 
- [28] LEE, C. Y. et alli, *The Effect of Harmonic Phase Angle on the Operation Performance of a Three-Phase Induction Motor*, IEEE 2000.
- [29] EMANUEL, A. E., *Estimating the Effects of Harmonic Voltage Fluctuations on the Temperature Rise of Squirrel-Cage Motors*, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 6, no. 1, march 1991.
- [30] ORAEE, H., *A Quantative Approach to Estimate the Life Expectancy of Motor Insulation Systems*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 7, no. 16, december 2000.
- [31] BARROS, J., DIEGO, R. I., *Effects of Nonsinusoidal Supply on Voltage Tolerance of Equipment*, IEEE Power Engineering Review, july 2002.
- [32] DELAIBA A. C. et alli, *The Effect of Harmonics on Power Transformers Loss of Life*, 38<sup>th</sup> Midwest Symposium on Circuits and System, Rio de Janeiro, 1995, v. 1, p.p. 933-936.
- [33] IEEE std C57.12.00-2000 IEEE Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power and Regulating Transformers.
- [34] CAVALLINI A. et alli, *A Parametric Investigation on the Effect of Harmonic Distortion on Life Expectancy of Power Capacitors*, 8<sup>th</sup> Mediterranean Electrotechnical Conference, 1996, Italy, vol.1 p. 491-494.
- [35] DUARTE, L. H. S., ALVES, M. F., *Degradação dos capacitores de potência sob influência dos componentes harmônicos*, XVI SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 21 a 26 de outubro de 2001, Campinas – SP.
- [36] IEEE std. 18-2002, IEEE Standard for Shunt Power Capacitors.
- [37] SIQUEIRA F., J. B., SILVA, E. P. de, *Harmônicos e capacitores em prédios comerciais: análise de um caso real*, Eletricidade Moderna, fevereiro, 1998.
- [38] BROZEK, J. P., *The Effects of Harmonics on Overcurrent Protection Devices*, IEEE Conference Record of the Industry Applications Society Annual Meeting, 1990.
- [39] ONS, Submódulo 2.2.2 – Padrões para Desempenho da Rede Básica, 2002.
- [40] Site da Power Measurement, disponível em <http://www.pwrm.com> acessado em 30/11/05.
- [41] SADEK, M.H. et alli, *Impact of Using Compact Fluorescent Lamps on Power Quality*, IEEE ICEEC'04, pp. 941 – 946, 2004.
- [42] TEIXEIRA, M. D. et alli, *Análise do Impacto de Lâmpadas Fluorescentes Compactas na Rede de Distribuição da Copel*, VI SBQEE – Seminário Brasileiro sobre Qualidade de Energia Elétrica, 21 a 24 de agosto de 2005, Belém – PA.
-

- 
- [43] RESENDE, J.W. et alli, *Avaliação das características elétricas, de iluminação e de suportabilidade a chaveamento de lâmpadas fluorescentes compactas*, V SBQEE – Seminário Brasileiro de Qualidade de Energia Elétrica, 17-20 de agosto de 2003, Aracaju - SE.
- [44] VERDERBER, R. R. et alli, *Harmonics from Compact Fluorescent Lamps*, IEEE Industrial Applications Society Annual Meeting, pp.1853-1858, 1991.
- [45] GLUSKIN, E., *High Harmonic Currents in Fluorescent Lamp Circuits*, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 26, no.2, abril, 1990.
- [46] KALINOWSKY, S.A., MARTELLO, J.J. , *Electrical and Illumination Characteristics of Energy-Saving Fluorescent Lighting as a Function of Potencial*, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 25, no. 2, abril, 1989.
- [47] KALINOWSKY, S. A. et alli, *Harmonic Content and Illumination Characteristics versus Voltage for Energy Saving Fluorescent Lighting Systems*, IEEE Transactions, 1991.
- [48] BRONZEADO, H. S. et alli, *Conservação e Qualidade de Energia Elétrica: análise comparativa entre os “reatores” eletrônicos e eletromagnéticos usados em sistemas de iluminação fluorescente*, III SBQEE – Seminário Brasileiro de Qualidade de Energia Elétrica, ST 8 – IT 62, 8-12 de agosto de 1999, Brasília – DF.
- [49] RÍOS, S. et alli, *Harmonic Distortion and Power Factor Assessment in City Street Gas Discharge Lamps*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 11, no. 2, abril, 1996.
- [50] Portaria INMETRO n° 188 de 9 de novembro de 2004 disponível em [http://www.inmetro.gov.br/rtac/detalhe.asp?seq\\_classe=1&seq\\_ato=920](http://www.inmetro.gov.br/rtac/detalhe.asp?seq_classe=1&seq_ato=920).
- [51] IBGE – Brasil em síntese – Habitação – Domicílios com bens duráveis 2001 a 2003, disponível em [www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br).
- [52] JARDINI, J. A. et alli, *Curva de Carga de Consumidores Comerciais e Industriais em Baixa Tensão*, Eletricidade Moderna, abril, 1998.
- [53] MOORE, P.J., PORTUGUÉS, I.E., *The Influence of Personal Computer Processing Modes on Line Current Harmonics*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 18, no. 4, october 2003.
- [54] AZEVEDO, A. C. et alli, *Diagnóstico, análise e sugestões relativa à qualidade de energia elétrica em centro de processamento de dados – CPD’s*, III SBQEE – Seminário Brasileiro de Qualidade de Energia Elétrica, ST 8 – IT 61, 8-12 de agosto de 1999, Brasília – DF.
- [55] LIEW, A., *Excessive Neutral Currents in Three-Phase Fluorescent Lighting Circuits*, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 25, no. 4, agosto, 1989.
-

- [56] AINTABLIAN, H., *The Harmonic Currents of Commercial Office Buildings due to Non-Linear Electronic Equipment*, SouthCom/96, Conference Record, 25-27 June 1996, p.p. 610-613.
- [57] MORRISON, R.E., *Harmonic distortion in commercial establishments*, IEE Colloquium on Sources and Effect of Harmonic Distortion in Power Systems, 1997.
- [58] MARTINEZ, J. A., *Power Quality Analysis using Electromagnetic Transient Programs*, 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP '98, october 14-16, 1998, Athens, Greece.
- [59] JUN, W., SAHA, T. K., *Simulation of Power Quality Problems on a University Distribution System*, IEEE Power Engineering Society General Meeting 16-20 July 2000 Page(s): 2326 - 2331 vol. 4.
- [60] UMEH, K. C et alli, *Determining Harmonic Characteristics of Typical Single Phase Non-Linear Loads*, Proceeding of Student Conference on Research and Development (Scored), 2003, Putrajaya, Malaysia.
- [61] Task Force on Harmonics Modeling and Simulation, *Modeling and Simulation of the Propagation of Harmonics in Electric Power Networks - Part I: Concepts, Models and Simulation Techniques*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 1, January 1996.
- [62] Task Force on Harmonics Modeling and Simulation, *Test Systems for Harmonic Modeling and Simulation*, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 14, No. 2, April 1999.
- [63] WANG, Y. et alli, *Modeling and Prediction of Distribution System Voltage Distortion Caused by Nonlinear Residential Loads*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol.16, no. 4, outubro, 2001.
- [64] BASS, R. et alli, *Residential Harmonic Loads and EV Charging*, IEEE Transactions, 2001.
- [65] NBR-5440 - *Transformadores para Redes Aéreas de Distribuição. Padronização*, ABNT, Jul. 1999.
- [66] ARRILLAGA, J. et alli, *Power System Harmonics*, John Wiley & Sons, 1985.
- [67] ROCCIA, P. e QUILLON, N., *Harmônicas em redes industriais: causas, efeitos e soluções*, Eletricidade Moderna, pág. 124 a 154, outubro, 1997.
- [68] ALVES, M. F., *Critério para especificação e projeto de filtro de harmônicas*, Eletricidade Moderna, pág. 30 a 40, junho, 1994.
- [69] LAWRENCE, W. et alli, *Reduction of Harmonics Currents in Fluorescent Lighting Systems: Design and Realisation*, Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, july, 1997.



[70] MACEDO Jr., J. R., *Desenvolvimento e aplicação de filtros harmônicos passivos em circuitos secundários de distribuição*, XVI SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão em Engenharia Elétrica, 21 a 26 de outubro de 2001, Campinas – SP, Brasil.

[71] MACEDO Jr., J. R. et alli, *Aplicação de Filtros Harmônicos Passivos em Circuitos Secundários*, II Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica.

[72] PENNA, C e RESENDE, J. W., *Análise da Instalação de Filtros Harmônicos Passivos em Circuitos Secundários de Distribuição*, II Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica.

[73] WATANABE, E. H e AREDES, M., *Teoria de Potência Ativa e Reativa Instantânea e Aplicações – Filtros Ativos e FACTS*, XII Congresso Brasileiro de Automática), Uberlândia, Brasil, Setembro 14-18, 1998.

[74] CHEN, S. e Joós, G, *Analysys and Comparison of Passive & Active Harmonic Suppression Filters in Distribution Systems*, IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Vol. 2, pp. 615-619, May 2000.

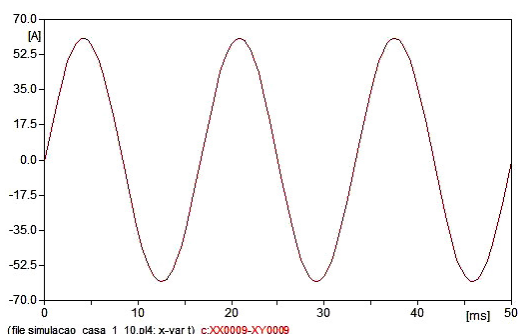
[75] LUOR, T. S., *Influence of Load Characteristics on the Applications of Passive and Active Harmonic Filters*, Proceedings of 9o IEEE International Conference on Harmonics and Quality of Power, 2000.

[76] GONZALEZ, M. y, PIRES, I.A. et alli, *Impacto de Cargas Eletrônicas Residenciais e Comerciais Eficientes e Não-lineares no Sistema de Distribuição Parte I - Medições de Amostras de Cargas Individuais (Eletrodomésticos)*, III Citenel – Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, 5 e 6 de dezembro de 2006, Florianópolis, Brasil.

[77] GONZALEZ, M. y, PIRES, I.A. et alli, *Impacto de Cargas Eletrônicas Residenciais e Comerciais Eficientes e Não-lineares no Sistema de Distribuição Parte II - Medições de carga em alimentadores típicos*, III Citenel – Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, 5 e 6 de dezembro de 2006, Florianópolis, Brasil.

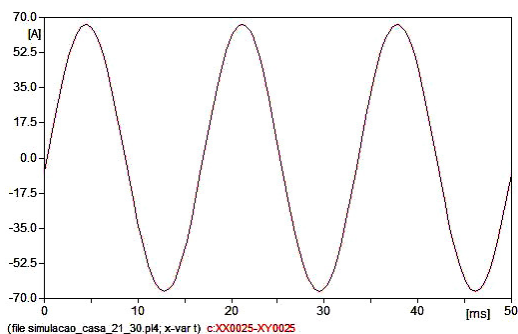
# **Apêndice A – Formas de onda e espectro harmônico das simulações de cenários residenciais e comerciais**

**Cenário 01** - Chuveiro (4400W) com ambiente iluminado por fluorescente com reator eletromagnético de 1x40W, secador de cabelo (1000 W) com ambiente iluminado por LFC de 25W.



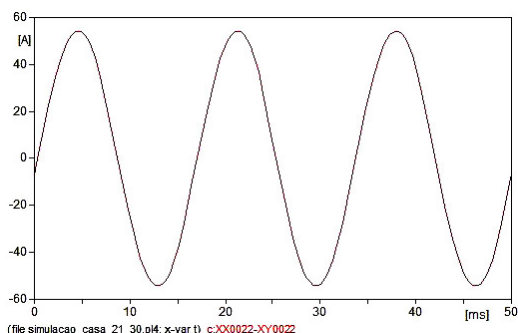
<b>Cenário 01</b>		
Harm.	$I_{rms} = 42,49$	
	$THD_i = 0,58$	
	F. crista = 1,41	
	Mod. (%)	Ang. (graus)
1	100,00	-0,49
3	0,33	-81,97
5	0,15	159,15

**Cenário 02** - Chuveiro com fluor. Elet. 1x40W, freezer, geladeira, aparelho de som e secador de cabelos com LFC 25W



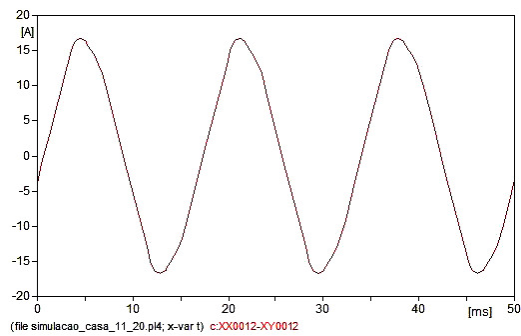
<b>Cenário 02</b>		
Harm.	$I_{rms} = 47,06$	
	$THD_i = 0,45$	
	F. crista = 1,41	
	Mod. (%)	Ang. (graus)
1	100,00	-6,37
3	0,15	11,25
5	0,41	134,30

**Cenário 03** - Chuveiro, freezer e geladeira



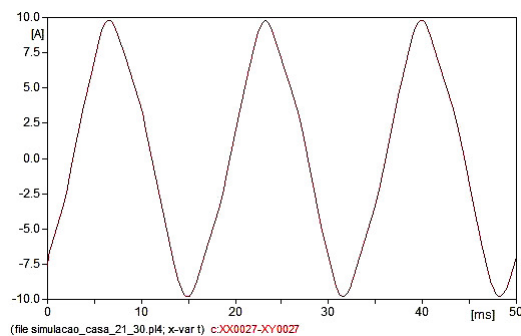
<b>Cenário 03</b>		
Harm.	$I_{rms} = 38,53$	
	$THD_i = 1,18$	
	F. crista = 1,42	
	Mod. (%)	Ang. (graus)
1	100,00	-8,10
3	1,12	57,40
5	0,41	102,61

**Cenário 04 - Ferro de passar (1000 W), tanquinho, geladeira e televisão**



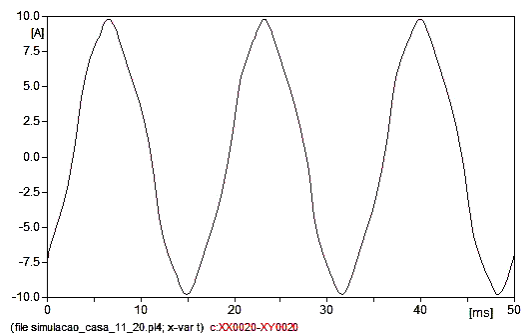
<b>Cenário 04</b>		
Harm.	$I_{rms} = 11,38$	
	$THD_i = 4,86$	
	F. crista = 1,47	
	Mod. (%)	Ang. (graus)
	1	100,00
3	3,90	158,74
5	2,64	32,97
7	0,83	-158,45

**Cenário 05 - Telefone sem fio, geladeira e freezer**



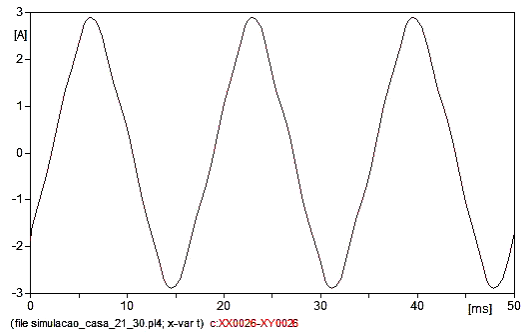
<b>Cenário 05</b>		
Harm.	$I_{rms} = 6,48$	
	$THD_i = 7,00$	
	F. crista = 1,51	
	Mod. (%)	Ang. (graus)
	1	100,00
3	6,57	57,95
5	2,39	102,65
7	0,22	-30,91

**Cenário 06 - Freezer, geladeira e televisão**



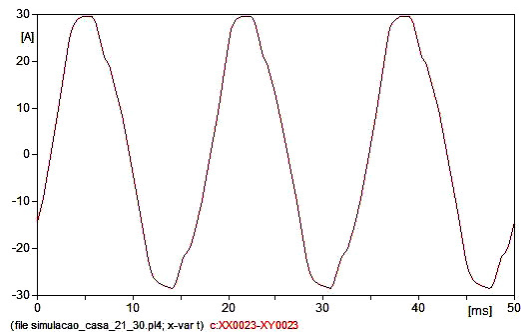
<b>Cenário 06</b>		
Harm.	$I_{rms} = 6,70$	
	$THD_i = 7,14$	
	F. crista = 1,37	
	Mod. (%)	Ang. (graus)
	1	100,00
3	5,53	111,07
5	4,04	42,09
7	1,53	-157,32

**Cenário 07 - Telefone sem fio e geladeira**



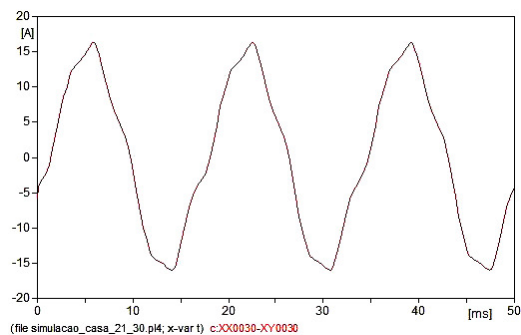
<b>Cenário 07</b>		
Harm.	$I_{rms} = 1,89$	
	$THD_i = 7,29$	
	F. crista = 1,53	
	Mod. (%)	Ang. (graus)
1	100,00	-45,55
3	6,35	49,84
5	3,36	110,96
7	1,11	5,18

**Cenário 08 - Freezer, geladeira, microondas e lavadora de roupas**



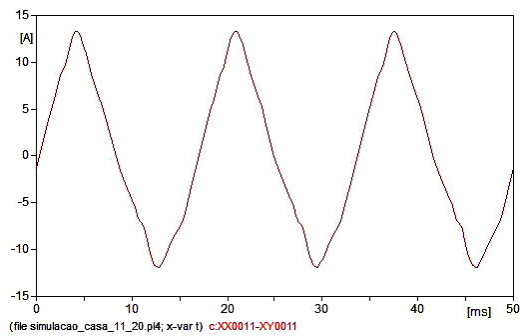
<b>Cenário 08</b>		
Harm.	$I_{rms} = 20,84$	
	$THD_i = 8,24$	
	F. crista = 1,43	
	Mod. (%)	Ang. (graus)
1	100,00	-26,11
2	3,15	-97,09
3	7,06	-159,35
5	1,02	115,86
7	2,33	-61,41

**Cenário 09 - Ar condicionado 10500 BTU, televisão e videocassete com LFC de 25W, geladeira**



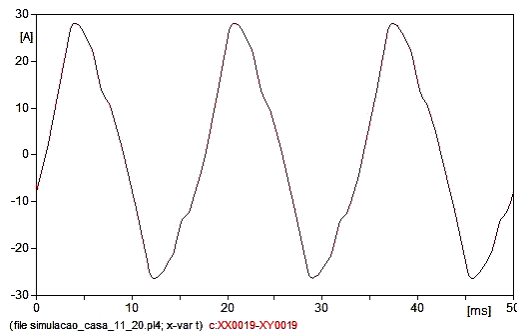
<b>Cenário 09</b>		
Harm.	$I_{rms} = 10,74$	
	$THD_i = 11,60$	
	F. crista = 1,52	
	Mod. (%)	Ang. (graus)
1	100,00	-23,49
2	5,12	118,17
3	6,85	152,08
5	7,62	142,95
7	1,00	-102,86

**Cenário 10** - Ar condicionado, televisão e LFC de 25W



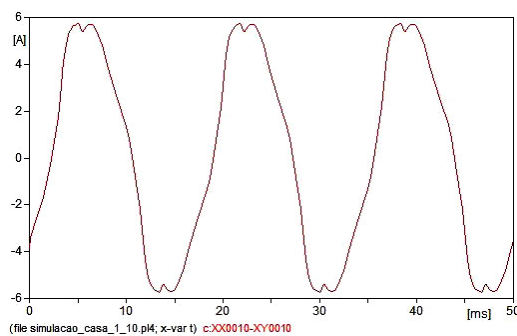
Harm.	<b>Cenário 10</b>	
	$I_{rms} = 7,686$	
	$THD_i = 12,55$	
	F. crista = 1,72	
	Mod. (%)	Ang. (graus)
1	100,00	-4,75
2	8,56	-51,16
3	7,36	168,00
5	4,76	0,51
7	2,35	149,73

**Cenário 11** - Lavadora de roupas, liquidificador, microondas e televisão



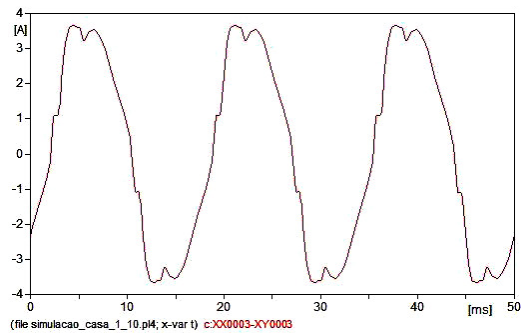
Harm.	<b>Cenário 11</b>	
	$I_{rms} = 17,83$	
	$THD_i = 13,06$	
	F. crista = 1,57	
	Mod. (%)	Ang. (graus)
1	100,00	-13,72
2	3,70	-97,09
3	12,08	-162,05
5	0,85	23,17
7	2,68	-75,93
9	1,16	45,28

**Cenário 12** - Tanquinho, compressor da geladeira ligado e televisão



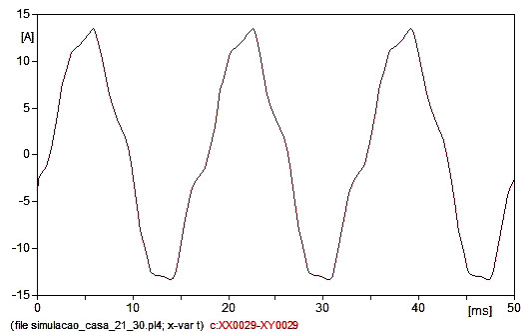
Harm.	<b>Cenário 12</b>	
	$I_{rms} = 4,233$	
	$THD_i = 13,18$	
	F. crista = 1,57	
	Mod. (%)	Ang. (graus)
1	100,00	-41,52
3	10,61	158,75
5	7,17	32,99
7	2,26	-158,47

**Cenário 13** - Televisão, com o ambiente iluminado por LFC de 25 W, compressor da geladeira ligado e alguém jantando na cozinha utilizando iluminação fluorescente de reator eletromagnético 1x40W.



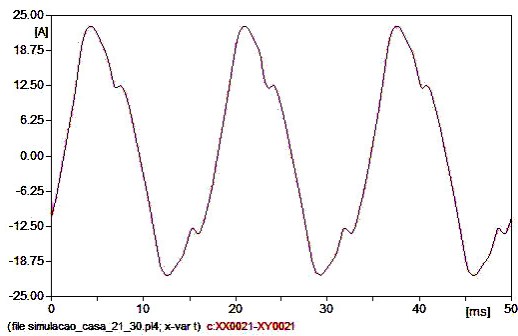
Harm.	<b>Cenário 13</b>	
	$I_{rms} = 2,729$	
	$THD_i = 13,51$	
	F. crista = 1,55	
	Mod. (%)	Ang. (graus)
1	100,00	-38,84
3	10,00	-166,13
5	6,94	36,95
7	2,67	160,34
9	2,21	15,20
11	2,39	-84,23
13	2,91	145,53
15	1,77	12,19
17	1,36	-73,04
19	1,45	169,27

**Cenário 14** - Ar condicionado 10500 BTU, televisão e videocassete com LFC de 25W



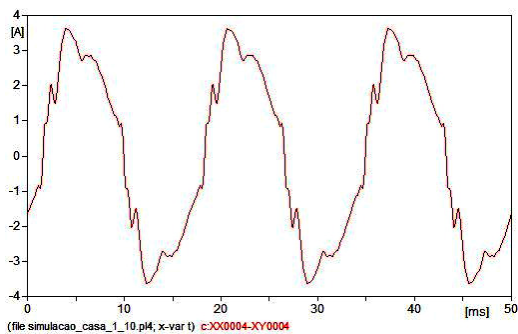
Harm.	<b>Cenário 14</b>	
	$I_{rms} = 9,05$	
	$THD_i = 13,66$	
	F. crista = 1,52	
	Mod. (%)	Ang. (graus)
1	100,00	-18,98
2	6,09	118,17
3	8,58	161,18
5	8,44	145,65
7	1,28	-111,82
9	1,06	19,15

**Cenário 15** - Freezer, geladeira e microondas



<b>Cenário 15</b>		
$I_{rms} = 14,91$		
$THD_i = 16,88$		
F. crista = 1,54		
Harm.	Mod. (%)	Ang. (graus)
1	100,00	-22,43
2	4,45	-97,11
3	15,65	-149,08
5	2,36	-34,17
7	3,35	-54,32
9	1,14	28,53
11	1,11	99,25

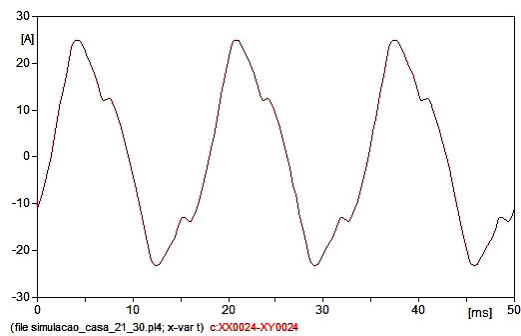
**Cenário 16** - Televisão, com o ambiente iluminado por LFC de 25 W, compressor da geladeira ligado e alguém jantando na cozinha utilizando iluminação fluorescente de reator eletrônico 1x40W.



<b>Cenário 16</b>		
$I_{rms} = 2,420$		
$THD_i = 17,52$		
F. crista = 1,49		
Harm.	Mod. (%)	Ang. (graus)
1	100,00	-27,81
3	12,95	-140,38
5	3,16	37,20
7	7,39	146,25
9	5,52	34,04
11	4,24	-55,09
13	2,76	178,75
15	0,89	-14,35
17	1,06	-123,19
19	2,20	135,12
21	2,08	22,36
23	1,56	-47,57
25	1,58	-138,24

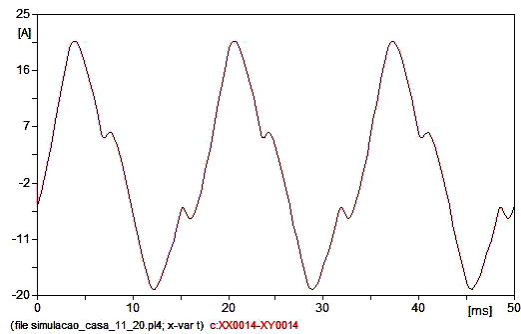


**Cenário 17** - Freezer, geladeira, microondas e fluor. elet. 2 1x40W e televisão com LFC 25W



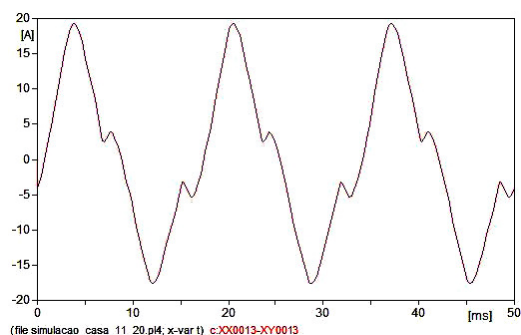
<b>Cenário 17</b>		
$I_{rms} = 15,63$		
$THD_i = 18,74$		
F. crista = 1,60		
Harm.	Mod. (%)	Ang. (graus)
1	100,00	-20,52
2	4,26	-97,10
3	17,75	-147,29
5	2,78	-29,75
7	2,13	-68,23
9	1,90	29,85

**Cenário 18** - Microondas com iluminação fluorescente de reator eletrônico 1x40W e compressor da geladeira ligado



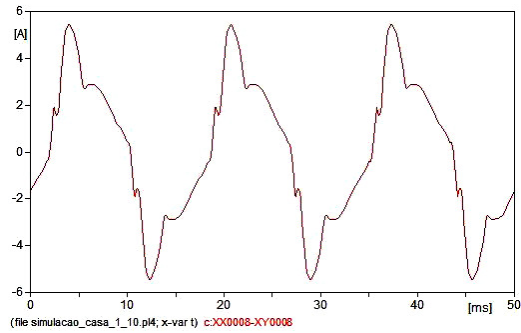
<b>Cenário 18</b>		
$I_{rms} = 12,06$		
$THD_i = 23,69$		
F. crista = 1,72		
Harm.	Mod. (%)	Ang. (graus)
1	100,00	-6,65
2	5,57	-97,12
3	22,36	-141,77
5	3,48	-60,21
7	3,24	-55,31
9	2,18	35,44
11	1,24	76,37

**Cenário 19** - Microondas com iluminação fluorescente de reator eletrônico 1x40W



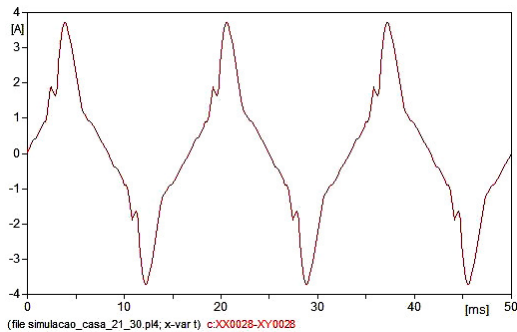
<b>Cenário 19</b>		
$I_{rms} = 10,75$		
$THD_i = 28,07$		
F. crista = 1,80		
Harm.	Mod. (%)	Ang. (graus)
1	100,00	-0,12
2	6,32	-97,13
3	26,54	-141,30
5	4,59	-61,46
7	3,59	-57,94
9	2,41	34,26
11	1,47	74,81

**Cenário 20** - Computador, com ambiente iluminado por LFC de 25 W e televisão, com ambiente iluminado por LFC de 25 W e compressor da geladeira ligado



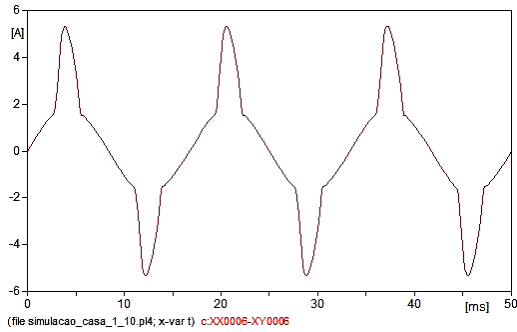
Harm.	<b>Cenário 20</b>	
	$I_{rms} = 2,993$	
	$THD_i = 33,07$	
	F. crista = 1,82	
	Mod. (%)	Ang. (graus)
1	100,00	-24,76
3	27,62	-165,27
5	15,27	30,51
7	5,11	176,24
9	2,68	11,68
11	3,38	-66,10
13	5,00	155,92
15	3,09	21,29
17	2,40	-58,57
19	2,78	-177,96
21	1,20	56,60

**Cenário 21** - Ventilador de teto, Televisão e videocassete com LFC de 25W



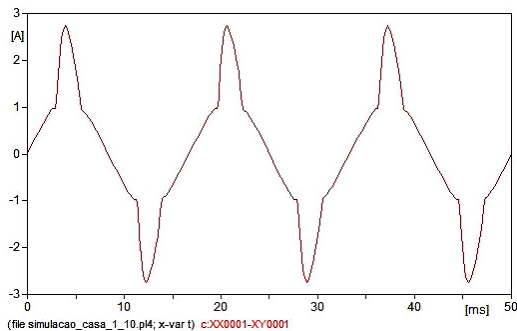
Harm.	<b>Cenário 21</b>	
	$I_{rms} = 1,780$	
	$THD_i = 35,86$	
	F. crista = 2,08	
	Mod. (%)	Ang. (graus)
1	100,00	2,96
3	30,07	-163,33
5	15,79	18,89
7	7,36	-172,19
9	4,08	28,88
11	4,38	-71,31
13	3,69	149,02
15	3,64	14,12
17	2,43	-81,49
19	2,46	166,59
21	1,25	31,24

**Cenário 22** - Computador, com ambiente iluminado por lâmpada incandescente de 60W e televisão, com ambiente iluminado por lâmpada incandescente de 100W



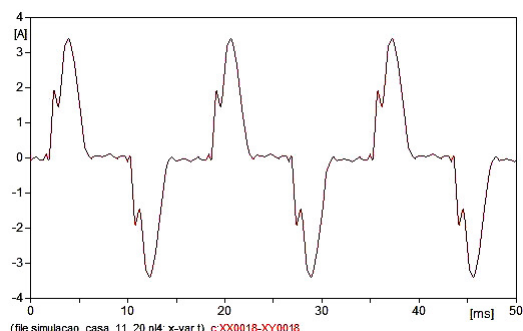
Harm.	<b>Cenário 22</b>	
	$I_{rms} = 2,501$	
	$THD_i = 43,90$	
	F. crista = 2,14	
	Mod. (%)	Ang. (graus)
1	100,00	0,74
3	35,44	-173,42
5	22,75	12,12
7	9,67	-154,85
9	3,13	100,58
11	4,99	-16,55
13	4,02	177,16
15	1,28	10,78
17	1,07	-29,65
19	1,82	168,94
21	1,09	-14,76

**Cenário 23** - Televisão, com o ambiente iluminado por lâmpada incandescente de 100W



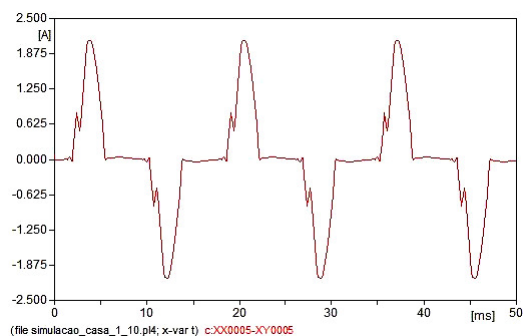
Harm.	<b>Cenário 23</b>	
	$I_{rms} = 1,319$	
	$THD_i = 49,67$	
	F. crista = 2,12	
	Mod. (%)	Ang. (graus)
1	100,00	0,83
3	39,58	-177,18
5	25,75	6,54
7	11,91	-162,45
9	4,46	75,28
11	6,07	-35,91
13	5,30	159,29
15	2,23	-8,68
17	1,38	-73,44
19	2,54	146,94
21	1,92	-26,15

**Cenário 24** - Televisão e videocassete com LFC de 25W e aparelho de som com LFC de 25 W



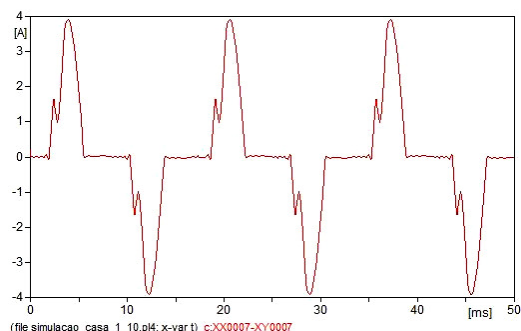
Harm.	Cenário 24	
	$I_{rms} = 1,484$	
	$THD_i = 71,12$	
	F. crista = 2,29	
	Mod. (%)	Ang. (graus)
1	100,00	6,71
3	64,51	-155,64
5	23,34	29,48
7	6,86	150,94
9	6,80	-9,30
11	8,16	-95,71
13	7,75	135,07
15	7,40	18,81
17	5,70	-79,25
19	5,02	175,37
21	2,87	63,85
23	1,71	-3,69
25	1,28	-99,24
27	1,09	-141,94
29	1,71	116,23
31	1,56	13,25

**Cenário 25** - Computador, com ambiente iluminado por LFC de 25 W



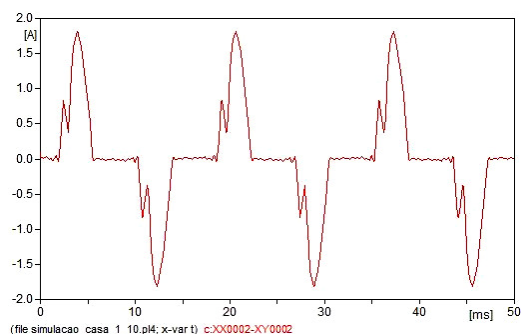
Harm.	Cenário 25	
	$I_{rms} = 0,906$	
	$THD_i = 79,95$	
	F. crista = 2,32	
	Mod. (%)	Ang. (graus)
1	100,00	6,05
3	69,59	-159,15
5	34,33	26,01
7	11,07	-172,23
9	2,68	-2,21
11	5,69	-37,89
13	9,37	167,75
15	5,83	31,87
17	4,77	-42,75
19	5,89	-165,93
21	2,78	73,30
23	2,75	15,30
25	2,70	-113,42
27	0,66	164,88
29	1,80	92,60
31	0,90	-42,38

**Cenário 26** - Computador, com ambiente iluminado por LFC de 25 W e televisão, com ambiente iluminado por LFC de 25 W



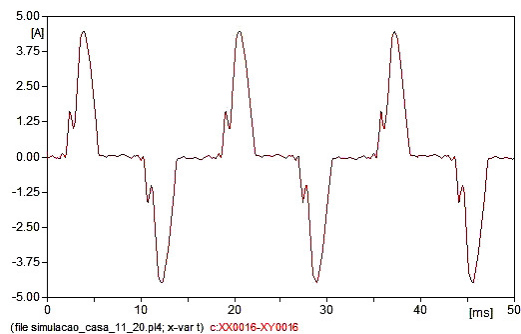
Harm.	<b>Cenário 26</b>	
	$I_{rms} = 1,646$	
	$THD_i = 80,19$	
	F. crista = 2,38	
	Mod. (%)	Ang. (graus)
1	100,00	6,54
3	69,39	-160,77
5	33,32	21,61
7	12,75	177,61
9	5,63	5,79
11	7,30	-61,64
13	11,01	155,75
15	6,84	21,29
17	5,30	-58,57
19	6,16	-177,96
21	2,66	56,60
23	2,35	12,93
25	2,01	-120,21
27	0,68	-134,26
29	1,95	102,80
31	1,11	-13,36

**Cenário 27** - Televisão, com o ambiente iluminado por LFC de 25 W



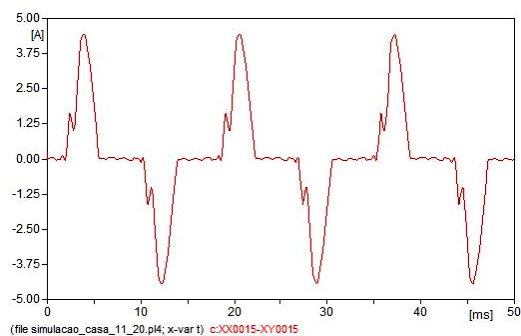
Harm.	<b>Cenário 27</b>	
	$I_{rms} = 0,744$	
	$THD_i = 81,36$	
	F. crista = 2,45	
	Mod. (%)	Ang. (graus)
1	100,00	7,14
3	69,21	-162,78
5	32,35	15,88
7	15,22	168,55
9	9,29	8,62
11	10,25	-77,59
13	13,48	145,53
15	8,31	12,19
17	6,37	-73,06
19	6,81	169,27
21	2,83	36,33
23	1,87	8,63
25	1,24	-138,60
27	1,32	-102,05
29	2,21	113,00
31	1,59	6,40

**Cenário 28** - Televisão e vídeo-cassete com LFC de 25W e computador com LFC de 25W, telefone sem fio



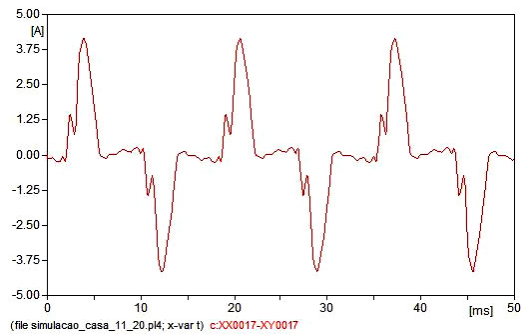
Harm.	<b>Cenário 28</b>	
	$I_{rms} = 1,843$	
	$THD_i = 81,97$	
	F. crista = 2,43	
	Mod. (%)	Ang. (graus)
1	100,00	5,94
3	70,38	-161,24
5	35,60	21,89
7	14,06	-171,91
9	6,02	22,74
11	7,65	-59,90
13	8,87	159,00
15	7,11	21,25
17	4,94	-64,06
19	5,66	-179,62
21	2,67	51,57
23	1,83	7,66
25	1,61	-121,57
27	0,59	-125,06
29	1,70	109,12
31	1,08	-3,41

**Cenário 29** - Televisão e videocassete com LFC de 25W e computador com LFC de 25W



Harm.	<b>Cenário 29</b>	
	$I_{rms} = 1,826$	
	$THD_i = 82,75$	
	F. crista = 2,44	
	Mod. (%)	Ang. (graus)
1	100,00	6,59
3	70,92	-161,27
5	36,09	22,29
7	14,38	-172,21
9	6,08	22,31
11	7,79	-59,63
13	9,01	158,70
15	7,20	21,25
17	5,01	-64,06
19	5,74	-179,62
21	2,70	51,57
23	1,85	7,66
25	1,63	-121,57
27	0,59	-125,06
29	1,73	109,13
31	1,10	-3,41

**Cenário 30** - Televisão e videocassete com LFC de 25W; televisão e videogame com LFC de 25W



Harm.	<b>Cenário 29</b>	
	$I_{rms} = 1,656$	
	$THD_i = 91,38$	
	F. crista = 2,51	
	Mod. (%)	Ang. (graus)
1	100,00	3,05
3	78,42	-162,47
5	37,99	16,98
7	16,10	179,84
9	8,98	21,91
11	10,90	-74,20
13	11,02	145,46
15	8,66	13,91
17	6,37	-79,05
19	6,37	167,48
21	3,04	34,54
23	1,55	-1,67
25	0,92	-139,32
27	1,23	-95,74
29	2,08	120,86
31	1,65	10,63

# Apêndice B - Medidas de mitigação de harmônicos

A maneira mais comum de mitigar harmônicos é através da utilização de filtros. O principal objetivo dos filtros de harmônicos é reduzir a amplitude de tensões e correntes de uma ou mais frequências harmônicas [66].

Quando o objetivo é impedir que uma determinada corrente harmônica adentre uma planta elétrica ou partes do sistema elétrico, é possível utilizar um filtro série que consiste no paralelo de um indutor com um capacitor, representando uma alta impedância para o harmônico que se deseja impedir. Entretanto, esta solução não elimina o surgimento de harmônicos por parte da fonte geradora. Outra forma de evitar a penetração de harmônicos no sistema elétrico, a partir de uma fonte geradora, seria fornecer um caminho derivação de baixa impedância para as correntes harmônicas.

Evitar circulação de correntes harmônicas, além de beneficiar aqueles dispositivos que sofrem danos por sua circulação, tais como cabos, transformadores e capacitores, significa também diminuir a distorção de onda de tensão. Isto será possível pela diminuição das correntes harmônicas nas impedâncias dos cabos presentes no sistema elétrico, causando assim uma menor queda de tensão harmônica.

Além destas diferenças entre filtro série e paralelo (shunt), os filtros ainda podem ser classificados como passivos e ativos [66]. Os primeiros, assim são chamados pois utilizam elementos passivos (resistores, indutores e capacitores) enquanto os filtros ativos utilizam a eletrônica embarcada em conjunto com elementos passivos para realizar a mitigação.



## B.1 Filtros passivos

Os filtros passivos série são utilizados quando o objetivo é evitar que uma determinada frequência (ou faixa de frequências) tenha acesso a uma parte do sistema. Com ação semelhante a uma bobina de bloqueio é composto por um capacitor e um indutor em paralelo. Esta é uma solução cara e raramente utilizada, tendo como principal fator negativo o fato do filtro ter que transportar toda a corrente passante no ponto do sistema em que ele foi instalado [68].

A solução mais usual para se evitar que correntes harmônicas penetrem em determinadas partes do sistema elétrico consiste na utilização dos chamados filtros em derivação (paralelo ou shunt), que oferecem um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas de interesse. Deste filtro, há dois tipos:

- filtro sintonizado
- filtro amortecido

Antes de definir os dois filtros, necessário falar sobre o fator de qualidade ( $Q$ ) de um filtro. O fator de qualidade de um filtro determina seu grau de seletividade e é expresso pela divisão entre a frequência de ressonância do filtro ( $\omega_n$ ) e sua banda de passagem (BP) como mostrado na equação B-1.

$$Q = \omega_n / \text{BP} \quad (\text{B-1})$$

### B.1.1 Filtro sintonizado

O filtro sintonizado é um circuito série RLC como mostrado na figura B-1, sintonizado em uma frequência de um harmônico. Sua impedância é dada pela equação B-2:

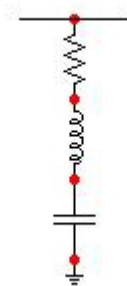
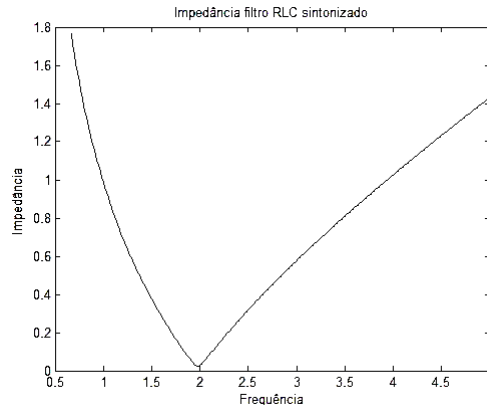


Figura B - 1 - Filtro Sintonizado RLC

$$Z = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad (\text{B-2})$$

A frequência de ressonância (ou sintonia) deste filtro é definida na fórmula B-3. A figura B-2 mostra uma curva qualitativa do módulo da impedância de um filtro RLC ao longo de um espectro de frequência. Na frequência de ressonância, a impedância do filtro é a menor de todo o espectro.

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (B-3)$$



**Figura B - 2 - Módulo da impedância versus frequência num filtro sintonizado**

Neste tipo de filtro, o fator de qualidade Q do filtro sintonizado RLC é expresso por [66]:

$$Q = X_0/R \quad (B-4)$$

Onde  $X_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$

O filtro sintonizado tem um fator de qualidade elevado, variando entre 30 e 80 [68]. Na figura B-2, o fator de qualidade foi 40.

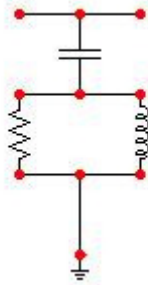
Uma importante característica deste filtro é comportar-se capacitivamente abaixo da sua frequência de ressonância, contribuindo para a compensação da potência reativa à frequência da rede. Acima da frequência de ressonância o comportamento do filtro será indutivo [67].

Assim, para o desenvolvimento de um filtro sintonizado basta escolher a frequência de ressonância, a quantidade de potência reativa que será entregue na frequência fundamental (podendo ser próximo de zero ficando o filtro com a exclusiva função de filtrar os harmônicos) e o fator de qualidade. A partir destas escolhas, os elementos R, L e C são facilmente fornecidos pelas fórmulas B-1 a B-4.

### B.1.2 Filtro amortecido

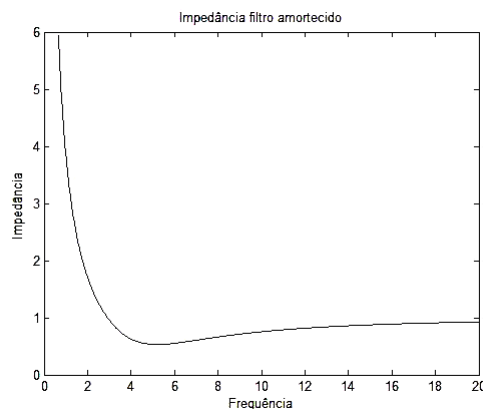
Filtros amortecidos são filtros passa-alta que apresentam uma baixa impedância a partir da frequência de ressonância. Esta é sintonizada, normalmente, em um

harmônico de baixa ordem. É constituído por um capacitor em série com um RL paralelo como mostrado na figura B-3. O fator de qualidade deste filtro é baixo, sendo da ordem de 1 a 10 [68].



**Figura B - 3 - Filtro amortecido**

A frequência de ressonância e o fator de qualidade têm as mesmas fórmulas do filtro sintonizado (fórmulas B-1 a B-4). A figura B-4 mostra um gráfico qualitativo do módulo da impedância do filtro amortecido ao longo da frequência. O R escolhido na figura B-4 é igual a 1. Nas altas frequências, a tendência do filtro é ter uma impedância igual a R, conforme ilustrado na figura B-4.



**Figura B - 4 - Módulo da impedância versus frequência do filtro amortecido**

A filosofia de desenvolvimento deste filtro não é muito diferente do exposto no filtro sintonizado, ou seja, escolher a frequência de ressonância, quantidade de potência reativa que será entregue na frequência fundamental e o fator de qualidade.

### B.1.3 Aplicações

Os filtros sintonizado e amortecido, muitas vezes, são aplicados em conjunto para mitigar correntes harmônicas de uma fonte poluidora. Como exemplo, em um conversor estático de 6 pulsos, haverá quatro filtros sintonizados, estes nas frequências do 5°, 7°, 11° e 13° e um filtro amortecido com frequência de ressonância no 17° harmônico [66]. Este último filtro será responsável por amortecer os harmônicos de ordem superiores.

Na referência [69], os autores apresentam um filtro passivo para minimizar a corrente harmônica no neutro em sistemas de iluminação por lâmpadas fluorescentes. Consiste num filtro duplamente sintonizado, como mostrado na figura B-5, que nada mais é do que uma extensão do filtro sintonizado, sendo que agora há duas frequências de ressonância. O filtro será instalado em série com o neutro. Nas frequências de ressonância, a impedância do filtro será baixa, sendo alta nas demais frequências. Uma das frequências de ressonância escolhidas será a fundamental, sendo que a segunda será em uma frequência diferente de um harmônico. Esta configuração série tem por objetivo “barrar” as correntes de seqüência zero, o que, em um sistema equilibrado, representa os harmônicos triplos (3°, 9°, 15°, etc.).

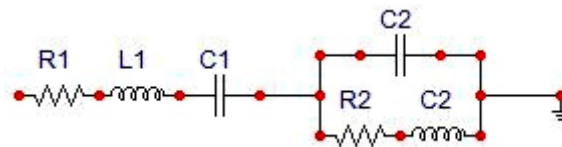
No artigo, os autores apresentam um exemplo de dimensionamento desse filtro. Os valores por eles utilizados foram:

Ramo série –  $C_1 = 1250 \text{ uF}$ ,  $L_1 = 4,4 \text{ mH}$ ,  $R_1 = 0,1\Omega$

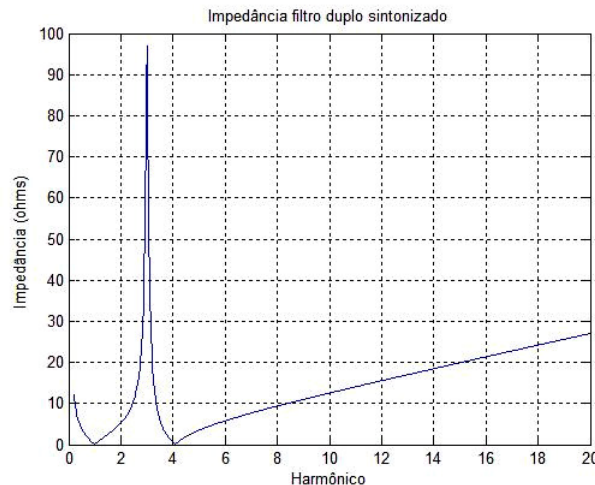
Ramo paralelo –  $C_2 = 340 \text{ uF}$ ,  $L_2 = 3,3 \text{ mH}$ ,  $R_2 = 0,1\Omega$ .

Vale lembrar que a frequência fundamental, para esses autores, era 50 Hz.

A figura B-6 traz o gráfico de impedância para diversos harmônicos para este filtro. As frequências de ressonância se dão na frequência fundamental e em torno do 4° harmônico.

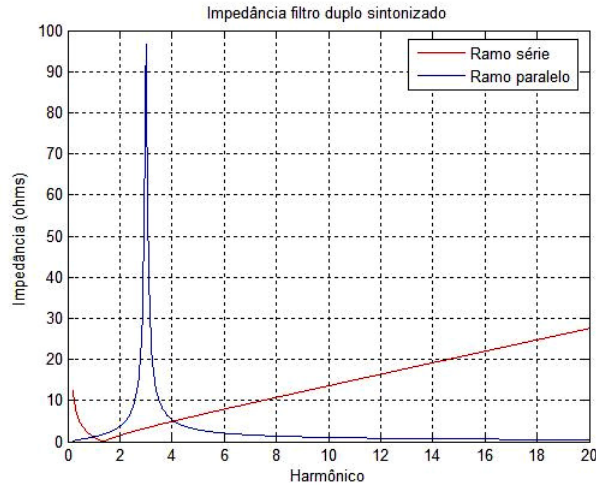


**Figura B - 5 - Filtro duplo sintonizado [69]**



**Figura B - 6 - Módulo da impedância versus harmônicos – filtro duplamente sintonizado**

A alta impedância no 3° harmônico (figura B-6) se deve ao ramo paralelo. O ramo série fica responsável por fornecer uma baixa impedância na fundamental. A figura B-7 apresenta o módulo da impedância de cada ramo (série e paralelo) por harmônico.



**Figura B - 7 - Módulo da impedância versus harmônico – filtro duplamente sintonizado – ramos série e paralelo**

Por volta do 4º harmônico, o módulo da impedância do ramo paralelo é igual ao do ramo série, mas em valores complexos, a parte imaginária é o oposto da outra, sendo o ramo série positiva e o ramo paralelo negativa. Assim, o resultado final é uma impedância de baixo valor, constituindo desta forma, a 2ª frequência de ressonância.

Analisando novamente a figura B-6, as impedâncias que o filtro oferece para os harmônicos triplos (3º, 9º e 15º) são bastante elevadas. Os autores implementaram este filtro, com duas possibilidades: somente o ramo paralelo e o filtro duplo sintonizado (FDS). Colocaram em um sistema de iluminação trifásico a quatro condutores. Mediram as correntes de fase e neutro nas situações de simetria e assimetria. Os resultados encontrados estão nas tabelas B-1 e B-2.

**Tabela B - 1 - Resultados da implementação do filtro de corrente de neutro [69] – Correntes Simétricas**

Corrente eficaz	Sem filtro (A)	Somente filtro paralelo (A)	FDS (A)
Fase A	21	19,9	19,8
Fase B	20,3	19,7	19,5
Fase C	20,7	19,6	19,6
<b>Neutro</b>	<b>20</b>	<b>1,38</b>	<b>1,39</b>

**Tabela B - 2 - Resultados da implementação do filtro de corrente de neutro [69] – Correntes Assimétricas**

Corrente eficaz	Sem filtro (A)	Somente filtro paralelo (A)	FDS (A)
Fase A	35,6	31,6	32,8
Fase B	29,4	28,2	29,2
Fase C	21	20,4	20,4
<b>Neutro</b>	<b>21</b>	<b>6,32</b>	<b>8,38</b>

Em um projeto de P&D entre a Universidade de Uberlândia, ESCELSA e a ENERSUL, em meados de 2000, foi desenvolvido um filtro harmônico passivo para utilização em circuitos secundários aéreos de distribuição [70, 71 e 72].

O filtro harmônico passivo é um filtro sintonizado com a configuração apresentada na figura B-8.

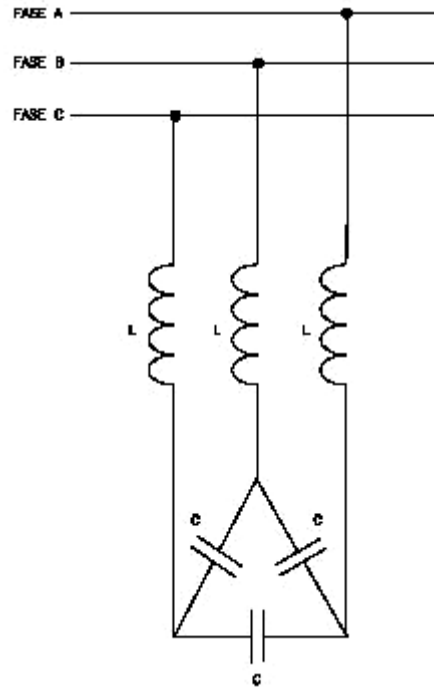


Figura B - 8 - Diagrama trifilar do Filtro Passivo de redes secundárias [70]

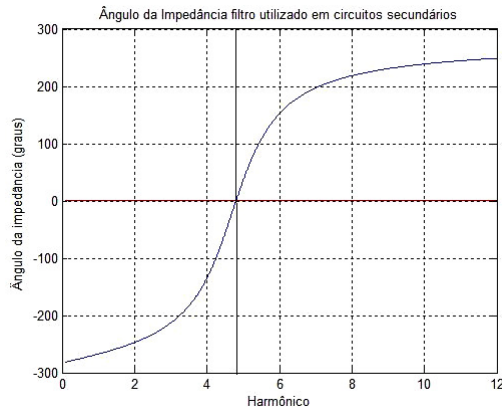
Inicialmente, determinou-se a quantidade de potência reativa que os capacitores forneceriam na frequência fundamental para compensação de reativos. A tabela B-3 traz a potência dos capacitores para diferentes transformadores.

Tabela B - 3 - Potência de capacitores para diferentes transformadores [70]

Potência do transformador (kVA)	Tensão (V)	Potência do capacitor (kVAr)
30	220	7,5
45	220	10
75	220	15
112,5	220	20

Nos sistemas secundários de distribuição, tipicamente o 5º harmônico é o mais presente [70, 71 e 72]. Nas medições mostradas no capítulo 4, este fato é comprovado. A frequência de sintonia do filtro foi escolhida como 4,8 vezes a frequência fundamental ou 288 Hz. Esta escolha foi realizada, conforme os autores, por motivos de segurança e não em um harmônico específico devido à inconstância das características de topologia dos circuitos secundários de baixa tensão.

Conforme explicitado na descrição dos filtros sintonizados, abaixo da frequência de ressonância, o filtro se comporta como um capacitor e como indutor acima desta frequência. A figura B-9 mostra o ângulo da impedância do filtro em questão, comprovando seu comportamento capacitivo e indutivo.



**Figura B - 9 - Ângulo da impedância do filtro**

As referências [70, 71 e 72] desenvolvem um dimensionamento do filtro para um ramo monofásico. Considerando um transformador de 45 kVA, o capacitor foi determinado por:

$$C = \frac{Q_c}{\omega V^2} = \frac{10000}{2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot 220^2} = 548 \mu\text{F} \quad (\text{B-5})$$

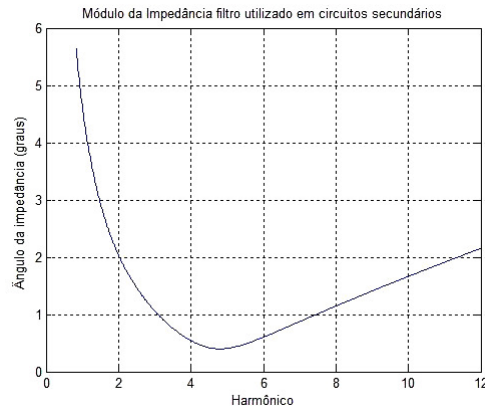
Escolhido a frequência de 288 Hz e utilizando a fórmula B-3, encontra-se uma indutância de 557  $\mu\text{H}$ . Os autores incluíram ainda, para efeito de simulação, uma resistência de 0,4  $\Omega$  para computar as resistências intrínsecas do reator e condutores.

Desta forma, o filtro ficou com os seguintes parâmetros (tabela B-4):

**Tabela B - 4 - Parâmetros do filtro de circuitos secundários**

<b>R (<math>\Omega</math>)</b>	<b>L (<math>\mu\text{H}</math>)</b>	<b>C (<math>\mu\text{F}</math>)</b>
0,4	557	548

O módulo da impedância do filtro resultante em função da frequência é apresentado na figura B-10 enquanto na figura B-9, usada como exemplo anteriormente, é mostrado o ângulo desta impedância.



**Figura B - 10 - Módulo da impedância do filtro implementado [70]**

Como resultados, os autores obtiveram uma redução média de 50% de THD de tensão no transformador de 45 kVA instalado ( $THD_v$  médio de 4% para 2%) [70, 71].

Nesta dissertação, este filtro foi implementado no ATP e posto nas simulações do sistema de distribuição secundário em todos os casos simulados no capítulo 5. O filtro foi ligado diretamente nos terminais do secundário do transformador. As tabelas B-5 e a tabela B-6 apresentam os resultados em três pontos de medição sem e com pré-distorção de tensão no transformador.

**Tabela B - 5 - Distorções de tensão no sistema de distribuição secundário – sem pré-distorção no transformador**

<b>Ponto de medição 01 – próximo ao transformador</b>						
Carga / horário	Sem filtro			Com filtro		
	Va (%)	Vb (%)	Vc (%)	Va (%)	Vb (%)	Vc (%)
Leve / 12 horas	0,33	0,26	0,27	0,29	0,23	0,23
Média / 02 horas	0,57	0,70	0,45	0,43	0,59	0,40
Pesada / 21 horas	0,69	1,48	1,11	0,58	1,21	1,02
<b>Ponto de medição 02 – ponta do sistema de distribuição secundário</b>						
Carga / horário	Sem filtro			Com filtro		
	Va (%)	Vb (%)	Vc (%)	Va (%)	Vb (%)	Vc (%)
Leve / 12 horas	0,42	0,34	0,33	0,36	0,31	0,29
Média / 02 horas	0,60	0,80	0,51	0,47	0,69	0,47
Pesada / 21 horas	0,76	1,76	1,44	0,68	1,48	1,35
<b>Ponto de medição 03 – ponta do sistema de distribuição secundário</b>						
Carga / horário	Sem filtro			Com filtro		
	Va (%)	Vb (%)	Vc (%)	Va (%)	Vb (%)	Vc (%)
Leve / 12 horas	0,33	0,20	0,33	0,29	0,17	0,28
Média / 02 horas	0,79	0,95	0,67	0,66	0,83	0,60
Pesada / 21 horas	0,89	1,67	1,16	0,77	1,37	1,05



**Tabela B - 6 - Distorções de tensão no sistema de distribuição secundário – com pré-distorção no transformador**

<b>Ponto de medição 01 – próximo ao transformador</b>						
Carga / horário	Sem filtro			Com filtro		
	Va (%)	Vb (%)	Vc (%)	Va (%)	Vb (%)	Vc (%)
Leve / 12 horas	1,28	1,15	1,07	1,07	0,95	0,88
Média / 02 horas	1,05	1,10	1,35	0,88	0,90	1,20
Pesada / 21 horas	1,57	2,04	2,00	1,31	1,67	1,77
<b>Ponto de medição 02 – ponta do sistema de distribuição secundário</b>						
Carga / horário	Sem filtro			Com filtro		
	Va (%)	Vb (%)	Vc (%)	Va (%)	Vb (%)	Vc (%)
Leve / 12 horas	1,35	1,20	1,08	1,15	0,96	0,88
Média / 02 horas	1,05	1,12	1,42	0,87	0,89	1,25
Pesada / 21 horas	1,61	2,24	2,29	1,38	1,81	2,06
<b>Ponto de medição 03 – ponta do sistema de distribuição secundário</b>						
Carga / horário	Sem filtro			Com filtro		
	Va (%)	Vb (%)	Vc (%)	Va (%)	Vb (%)	Vc (%)
Leve / 12 horas	1,25	1,10	1,18	1,06	0,89	0,98
Média / 02 horas	1,35	1,20	1,08	1,15	1,02	0,89
Pesada / 21 horas	1,67	2,11	2,06	1,40	1,66	1,81

Das tabelas B-5 e B-6, quando inserido o filtro no secundário do sistema de distribuição, apresentou melhoria em todas situações. Desta forma, o filtro se mostrou eficiente com uma média de melhoria no THD de tensão de 20%.

Na referência [72], os autores apresentaram os parâmetros R, L e C para transformadores de 30 kVA, 75 kVA e 112,5 kVA (tabela B-7), além do já previamente apresentado em [70] e [71] para o transformador de 45 kVA (tabela B-4). Todos os filtros foram projetados na frequência de ressonância de 288 Hz. As potências capacitivas dos filtros seguem a tabela B-3.

**Tabela B - 7 - Parâmetros finais dos filtros**

<b>Potência do transformador (kVA)</b>	<b>R (<math>\Omega</math>)</b>	<b>L (<math>\mu</math>H)</b>	<b>C (<math>\mu</math>F)</b>
30	0,30	411,04	742,97
75	0,30	685,07	445,78
112,5	0,30	822,08	371,48

## **B.2 Filtro ativo**

O filtro ativo é composto por elementos ativos que fornecem o conteúdo harmônico necessário a uma carga não-linear, limpando a rede da circulação destes harmônicos. Há dois tipos: paralelo e série.

Estes filtros foram inicialmente propostos por Akagi: o filtro paralelo em 1984 e o filtro série em 1988, sendo este último em conjunto com filtro paralelo [73].

### B.2.1 Filtro ativo paralelo

De acordo com a figura B-11, o filtro ativo paralelo é representado pelo inversor fonte de tensão e seu controle. Este inversor funciona com malha de controle e tem a função básica de “curto-circuitar” as correntes indesejadas, geradas pela carga [73]. Analisando de outra perspectiva, o filtro paralelo (ou shunt) irá fornecer as correntes harmônicas desejadas para o correto funcionamento da carga não-linear.

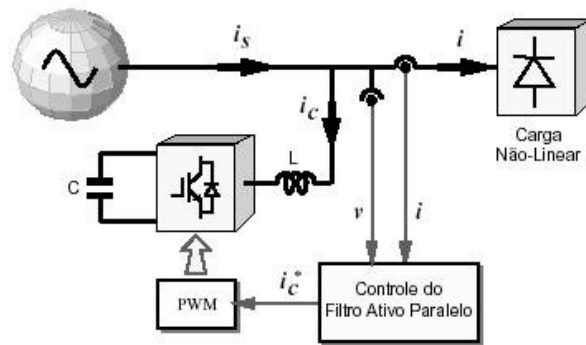


Figura B - 11 - Filtro ativo paralelo [73]

Vale dizer que as correntes não desejadas, na maioria dos casos são harmônicos, mas podem, em alguns casos, ser correntes na frequência fundamental (exemplo corrente reativa ou de desequilíbrio). Assim, o grande desafio no projeto de um filtro ativo paralelo baseado em conversores deste tipo, está na determinação instantânea da referência de corrente a ser sintetizada.

### B.2.2 Filtro ativo série

O filtro série é mostrado na figura B-12. Nesta figura, a fonte de tensão está representada por uma fonte de tensão distorcida. O filtro ativo em série, entre a carga e a fonte, impede, desta forma que as parcelas não desejáveis de tensão sejam aplicadas na carga. Vale lembrar que o filtro ativo série não é capaz de eliminar harmônicos de correntes geradas pela carga uma vez que este filtro está inserido em série com esta carga. Este consiste no conceito dual do que o ocorre com o filtro paralelo. Para se ter esta compensação, tanto de tensão e corrente é necessário utilizar um filtro ativo série/paralelo.

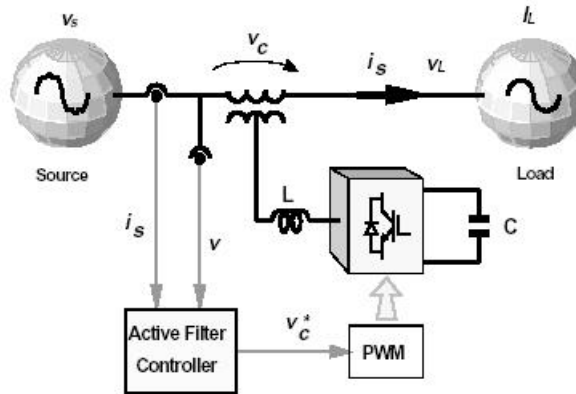


Figura B - 12 - Filtro ativo série [73]

### B.2.3 Filtro ativo série/paralelo

Para a compensação simultânea da tensão e da corrente, há uma combinação de filtros ativos série/paralelo, a qual foi convencionada como UPQC (“Unified Power Quality Conditioner”) [73].

A figura B-13 mostra uma situação típica para o emprego do UPQC. Este é um cenário onde se tem um grupo de cargas críticas, muitos sensíveis às distorções harmônicas e requerem um suprimento de energia de boa qualidade. Porém, estas cargas estão conectadas a um barramento onde se encontram outras cargas ( $i_L$ ), não lineares, geradores de alto conteúdo de correntes harmônicas e desbalanceadas. Além disso, admite-se que a tensão de suprimento ( $v_s$ ) deste barramento também seja desbalanceada e distorcida, independentemente destas cargas não lineares. O UPQC está inserido em paralelo, próximo à carga não-linear e em série com a tensão de suprimento, de tal forma que a tensão do filtro série  $v_c$  compense a tensão  $v_s$  e torne a tensão  $v$  senoidal e balanceada. Por outro lado, a corrente  $i_c$  do filtro paralelo compensa os harmônicos e desbalanços da corrente  $i_L$ , impedindo que estas componentes indesejadas da corrente fluam pelo sistema, distorcendo ainda mais a tensão de suprimento.

Há ainda a possibilidade de haver filtros híbridos ativo/passivo. Duas possibilidades são existentes: ativo série / passivo paralelo e ativo paralelo / passivo paralelo.

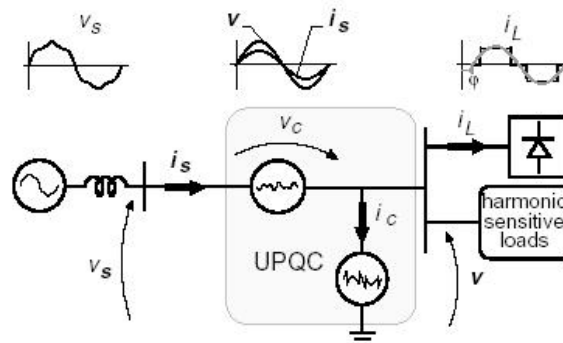


Figura B - 13 - UPQC - Filtros ativos série/paralelo [73]

### B.3 Filtro passivo versus Filtro ativo

Nas duas configurações de filtro apresentadas (passivo e ativo) cada uma apresenta vantagens e desvantagens.

A principal vantagem do filtro passivo é o seu custo. Porém, podem ocorrer ressonâncias com elementos do sistema elétrico [74, 75]. Para seu bom desempenho, é necessária uma grande compensação capacitiva na frequência fundamental [74]. A variabilidade da carga onde o filtro está conectado influencia em seu rendimento [75].

O filtro ativo deve ter uma potência igual ou maior que a carga não-linear a ser filtrada, o que o torna economicamente inviável em alguns casos [75]. Mais caro que o filtro passivo, o filtro ativo tem seu rendimento constante independente da variabilidade da carga.

Na referência [75], os autores apresentam um trabalho onde se comparou um filtro passivo de 54 kVAR e um filtro ativo de 50 kVAR para diminuir os harmônicos de corrente injetados na rede de um retificador trifásico de 110 kVA. O circuito elétrico do retificador é mostrado na figura B-14. Dois casos de carga do retificador foram considerados. No primeiro caso, retirou-se o indutor  $L_d$  (figura B-14) sendo que no segundo caso, o indutor foi novamente inserido ao retificador.

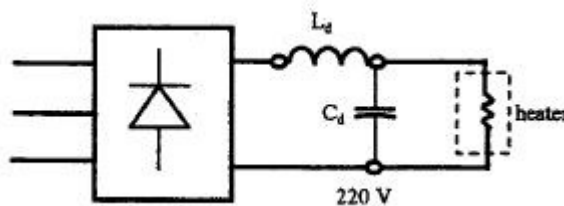


Figura B - 14 - Retificador trifásico [75]

A corrente do sistema elétrico que alimentava o retificador tinha uma distorção de 25,58% para o primeiro caso (sem indutor) e 50,48% no segundo caso (com indutor). Quando o filtro passivo foi inserido ao sistema, a distorção de corrente no primeiro caso foi de 7,84% e no segundo caso, 12,32%. Trocado o filtro passivo pelo filtro ativo, a distorção de corrente foi de 4,94%, no primeiro caso e 11,15% para o segundo caso. O filtro ativo apresentou uma melhora nos níveis de distorção. Entretanto, paga-se um preço, por ser esta alternativa mais cara do que a utilização do filtro passivo.

### B.4 Conclusões gerais

Este apêndice apresentou algumas formas de mitigação de harmônicos. O principal elemento para se chegar a este objetivo foi o filtro. Por sua vez, duas formas de filtro são utilizadas: filtros passivos e filtros ativos.

Filtros passivos são aqueles em que seus componentes seriam passivos (resistores, capacitores e indutores). Filtros ativos são aqueles compostos por elementos

ativos que fornecem o conteúdo harmônico necessário a uma carga não-linear limpando a rede da circulação destes harmônicos.

Os filtros ainda podem ser utilizados na configuração em série, que tem o objetivo de barrar os harmônicos de tensão provenientes da rede elétrica para o consumidor, ou na configuração paralela, que objetiva limpar a rede elétrica de correntes harmônicas, estas provenientes do consumidor de energia elétrica, pela utilização de cargas não-lineares.

Filtros passivos são mais baratos que filtros ativos. Para a boa performance do filtro passivo é necessário um capacitor em condições de fornecer uma grande compensação capacitiva na frequência fundamental. Um inconveniente deste filtro será a variabilidade de seu desempenho devido a variabilidade da carga na qual o filtro está submetido. Pode ainda ocorrer ressonâncias com o sistema elétrico.

Filtros ativos para terem uma boa performance necessitam ter uma potência igual ou superior à carga não-linear a ser filtrada, tornando-se em alguns casos economicamente inviáveis. Entretanto, têm seu desempenho constante independente da variabilidade da carga, desde que respeitada os limites de carga do filtro.