

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA  
ENGENHARIA ELÉTRICA**

**KAREN THATIANE PORTELA  
JEFFERSON DA SILVA ROSA**

**ESTUDO DOS EFEITOS DOS HARMÔNICOS GERADOS POR  
RESIDÊNCIAS NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO SECUNDÁRIA**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**CURITIBA**

**2016**

**KAREN THATIANE PORTELA**  
**JEFFERSON DA SILVA ROSA**

**ESTUDO DOS EFEITOS DOS HARMÔNICOS GERADOS POR  
RESIDÊNCIAS NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO SECUNDÁRIA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina de TCC2 do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Joaquim Eloir Rocha

**CURITIBA**

**2016**

KAREN THATIANE PORTELA

JEFFERSON DA SILVA ROSA

## Estudo dos efeitos dos harmônicos gerados por residências na rede de distribuição secundária

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Eletricista, do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 30 de novembro de 2016.

---

Prof. Emerson Rigoni, Dr.  
Coordenador de Curso  
Engenharia Elétrica

---

Profa. Annemahlen Gehrke Castagna, Mestre  
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso  
de Engenharia Elétrica do DAELT

### ORIENTAÇÃO

---

Joaquim Eloir Rocha, Dr.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Orientador

### BANCA EXAMINADORA

---

Joaquim Eloir Rocha, Dr.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Antonio Ivan Bastos Sobrinho, Esp.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Lilian Moreira Garcia, Dra.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, a Deus, por nos dar forças para nunca desistir.

Aos nossos pais, por sempre colocarem nossos desejos acima dos deles, por todos os ensinamentos durante a vida, por sempre acreditarem em nós e por sempre desejarem o nosso melhor.

Aos amigos, pelo apoio nas horas difíceis e pela companhia nos momentos alegres.

Aos professores, pelos ensinamentos compartilhados e pela paciência e atenção em tirar nossas dúvidas.

Ao nosso orientador, professor Joaquim, pela disposição em nos ajudar nessa etapa importante do curso e por compartilhar seus conhecimentos e conselhos, além das horas dedicadas para a realização deste trabalho.

A banca examinadora, pelo interesse no trabalho, contribuições para o enriquecimento do trabalho e por sua disposição de tempo.

Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades. Lembrai-vos de que as grandes coisas do homem foram conquistadas do que parecia impossível. (Charles Chaplin)

## RESUMO

PORTELA, Karen T.; ROSA, Jefferson da S. **Estudo dos efeitos dos harmônicos gerados por residências na rede de distribuição secundária**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

Atualmente, as concessionárias de energia buscam a melhoria na qualidade da energia fornecida no sistema elétrico, devido aos níveis de energia reativa existente no sistema, que causam grandes perdas de energia e do potencial fornecido. Com o avanço da tecnologia eletroeletrônica, tem-se propiciado um maior conforto aos usuários do sistema quanto ao consumo de energia, além do surgimento de aparelhos mais eficientes energeticamente. Todavia, estes aparelhos tem a característica de não apresentarem uma relação linear entre a tensão e a corrente (cargas não lineares), gerando harmônicos que são injetados na rede de baixa tensão.

Neste trabalho é apresentado um referencial teórico sobre harmônicos e seus principais efeitos no sistema de distribuição, levantando também os tipos de filtros usados para corrigi-los. Então, com o objetivo de se verificar a eficácia do uso de um filtro passivo, sintonizado, do tipo RLC, junto ao transformador da rede de distribuição para a mitigação dos níveis de harmônicos de corrente, foram efetuados o projeto e a simulação de um filtro e examinados os resultados encontrados.

**Palavras-chave:** harmônicos de corrente, filtro passivo, rede de distribuição, consumidores residenciais.

## ABSTRACT

PORTELA, Karen T.; ROSA, Jefferson da S. **Study of the effects of harmonics generated by residences on the secondary distribution network.** 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

Currently the energy provider seeks improvements in energy quality supplied in the electrical system due to the reactive energy levels existente in the system that can cause huge losses of energy and provide potential. Whit the electronic technological advance have providing a greater comfort to the users of the system with regard energy consumption, in addition to the emergence of more efficient equipment energy. Although, this equipments have the characteristic of not presenting linear relation whit tension and current (none linear charges), generating harmonics which are injected into the low voltage network.

Presents a theoretical framework on harmonics and its main effects in the distribution system, also getting the types of filters used to correct them. Then, in order to verify the efficacy of a tuned passive filter RLC type next to the transformer of the distribution network to mitigate the levels of current harmonics, the project and the simulation of a filter were made and the final results were examined.

**Palavras-chave:** current harmonics, passive filter, distribution network, residencial customers.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Procedimento metodológico de estudo dos harmônicos na rede de distribuição .....	20
Figura 2 - Decomposição de uma onda distorcida em uma soma de senóides .....	23
Figura 3 - Perfil de tensão ao longo do cabo na frequência de ressonância .....	27
Figura 4 - Triângulo de potência e FP para senóides puras.....	28
Figura 5 - Visualização espacial das potências em um sistema com harmônicos ....	29
Figura 6 - Filtragem passiva de corrente em carga não-linear .....	32
Figura 7 - Filtro série monofásico para compensação de tensão .....	33
Figura 8 - Esquema simplificado de filtro híbrido monofásico de corrente .....	33
Figura 9 - Sistema de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica .....	34
Figura 10 - Componentes simétricas.....	36
Figura 11 - Lâmpada incandescente dimerizada em 75% de iluminação .....	41
Figura 12- Lâmpada incandescente dimerizada em 25% de iluminação .....	41
Figura 13 - Forma de onda de corrente típica de uma LFC .....	43
Figura 14 - Forma de onda de corrente típica de lâmpadas fluorescentes convencionais com reatores eletromagnéticos.....	44
Figura 15 - Forma de onda de corrente típica de lâmpadas fluorescentes convencionais com reatores eletrônicos .....	45
Figura 16 - Forma de onda de corrente da lâmpada mista .....	46
Figura 17- Forma de onda de corrente da lâmpada vapor de mercúrio .....	47
Figura 18 - Forma de onda de corrente da lâmpada vapor de sódio.....	47
Figura 19- Forma de onda de corrente típica de um computador .....	49
Figura 20- Forma de onda de corrente típica de um televisor .....	49
Figura 21 - Forma de onda de corrente típica dos outros aparelhos eletrônicos representados pelo aparelho de som .....	50
Figura 22 -Forma de onda de corrente típica de aparelhos refrigeradores .....	51
Figura 23 - Corrente eficaz ao longo do tempo .....	52
Figura 24- Forma de onda de corrente de um condicionador de ar no modo resfriar	53



Figura 25 - Forma de onda de corrente de um condicionador de ar no modo ventilar .....	54
Figura 26 - Forma de onda de corrente de um aparelho de micro-ondas .....	55
Figura 27- Forma de onda de corrente típica de eletrodomésticos com motores.....	57
Figura 28 – Espectro de corrente - Consumidor do conjunto residencial Carmelândia .....	65
Figura 29 – Espectro de corrente - Consumidor de renda média do edifício Miracy .	66
Figura 30 – Espectro de corrente - Consumidor de renda alta do edifício Santa Lúcia .....	66
Figura 31 – Espectro de corrente – Secundário do transformador do edifício Miracy .....	67
Figura 32 – Espectro de corrente – Secundário do transformador do edifício Santa Lúcia.....	67
Figura 33 - Modelos de circuito do filtro. (a) Configuração trifásica.....	69
Figura 34 - Potência reativa efetiva de projeto versus fator de potência para um transformador de 75 kVA.....	70
Figura 35 - Diagrama unifilar da rede para simulação dos filtros .....	74
Figura 36 - Gráfico da reposta em frequência apenas com o capacitor .....	78
Figura 37 - Gráfico das correntes harmônicas no secundário de cada transformador .....	78
Figura 38 - Gráfico da reposta em frequência com o uso do filtro sintonizado.....	79
Figura 39 - Gráfico dos níveis de distorção dos harmônicos de tensão no secundário de cada transformador com o uso do filtro sintonizado .....	80
Figura 40 – Gráfico dos níveis das correntes harmônicas no secundário de cada transformador com o uso do filtro sintonizado.....	80
Figura 41 - Gráfico da reposta em frequência do filtro sintonizado na frequência de 294 Hz.....	84
Figura 42 - Gráfico dos níveis de distorção dos harmônicos de tensão no secundário de cada transformador com o filtro sintonizado na frequência de 294 Hz .....	84
Figura 43 – Gráfico dos níveis das correntes harmônicas no secundário de cada transformador com o filtro sintonizado na frequência de 294 Hz.....	85

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em porcentagem da tensão fundamental).....	17
Tabela 2 - Influência dos harmônicos no acréscimo de corrente e na redução do fator de potência.....	37
Tabela 3 - Conteúdo harmônico da lâmpada incandescente (tipo cristal 100 W) com dimmer (tipo deslizante) .....	42
Tabela 4 - Conteúdo harmônico da lâmpada fluorescente compacta .....	43
Tabela 5 - Conteúdo harmônico de lâmpadas fluorescentes convencionais com reatores eletromagnéticos e com reatores eletrônicos.....	45
Tabela 6 - Conteúdo harmônico de lâmpadas mista, vapor de mercúrio e vapor de sódio.....	48
Tabela 7- Conteúdo harmônico de computador, televisão e aparelho de som .....	50
Tabela 8 - Conteúdo harmônico de uma geladeira .....	52
Tabela 9 - Conteúdo harmônico do condicionador de ar nos modos resfriar e ventilar .....	54
Tabela 10– Conteúdo harmônico de um aparelho de micro-ondas.....	56
Tabela 11- Conteúdo harmônico de uma lavadora de roupas .....	57
Tabela 12 - Limites de distorção de tensão – IEEE 519-2014 .....	59
Tabela 13 - Limites de distorção de corrente para sistemas de distribuição com tensão menor que 69 kV – IEEE 519-2014 .....	60
Tabela 14 - Limites de harmônicos individuais em sistemas públicos de baixa tensão .....	60
Tabela 15 - Limites de corrente harmônica para equipamentos classe A conforme norma IEC 61000-3-2.....	61
Tabela 16 - Limites de corrente harmônica para equipamentos classe C conforme norma IEC 61000-3-2.....	61
Tabela 17 - Limites de corrente harmônica para equipamentos classe D conforme norma IEC 61000-3-2.....	62

Tabela 18 - Limites de corrente harmônica para equipamentos com corrente entre 16 A e 75 A conforme norma IEC 61000-3-4 .....	62
Tabela 19 – Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em porcentagem da tensão fundamental).....	63
Tabela 20 – Valores de referência globais das distorções harmônicas totais (em porcentagem da tensão fundamental).....	63
Tabela 21 - Características dos transformadores de 75 kVA e 112,5 kVA.....	68
Tabela 22 - Potências reativas a frequência fundamental para diferentes transformadores e fator de potência final de 0,95 .....	70
Tabela 23 - Dados construtivos do filtro RLC .....	73
Tabela 24 - Dados dos transformadores para simulação dos filtros.....	75
Tabela 25 - Dados dos harmônicos de corrente para simulação do filtro.....	76
Tabela 26 - Valores dos parâmetros do circuito na simulação apenas com o capacitor.....	79
Tabela 27 - Valores dos parâmetros do circuito na simulação com o filtro sintonizado .....	81
Tabela 28 - Dados do filtro RLC com a frequência modificada para 294 Hz .....	83
Tabela 29 - Valores dos parâmetros do circuito na simulação do filtro sintonizado em 294 Hz.....	85

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
1.1.TEMA.....	16
1.1.1. Delimitação do Tema.....	17
1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS.....	18
1.3 OBJETIVOS.....	18
1.3.1. Objetivo Geral.....	18
1.3.2. Objetivos Específicos.....	19
1.4 JUSTIFICATIVA.....	19
1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	19
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	20
<b>2. INTRODUÇÃO A HARMÔNICOS.....</b>	<b>22</b>
2.1.QUALIDADE DE ENERGIA.....	24
2.1.1. Motores e Geradores.....	25
2.1.2. Transformadores.....	25
2.1.3. Cabos de Alimentação.....	26
2.1.4. Aparelhos Eletrônicos.....	27
2.1.5. Aparelhos de Medição.....	27
2.1.6. Relés de Proteção e Fusíveis.....	28
2.2.FATOR DE POTENCIA E COS $\varphi$ .....	28
2.3.FILTROS.....	30
2.3.1. Filtros Passivos.....	30
2.3.2. Filtros Ativos.....	32
2.3.3. Filtros Híbridos.....	33
<b>3. HARMÔNICOS DE CORRENTE EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO.....</b>	<b>34</b>
3.1.MODELO DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO.....	34
3.1.1. Quantificação do Harmônico de Corrente no Sistema de Distribuição.....	35
3.1.2. Problemas Causados Pelos Harmônicos na Rede de Distribuição.....	36

3.2 CARACTERIZAÇÃO DO HARMÔNICO DE CORRENTE EM APARELHOS ELETRODOMÉSTICOS.....	40
3.2.1. Lâmpadas Incandescentes.....	40
3.2.2. Lâmpadas Fluorescentes Compactas (LFCs).....	42
3.2.3. Lâmpadas Fluorescentes Convencionais.....	44
3.2.4. Lâmpadas de Vapor de Mercúrio, Sódio e Mista.....	46
3.2.5. Eletrônicos.....	48
3.2.6. Refrigeradores.....	51
3.2.7. Condicionadores de Ar.....	53
3.2.8. Aquecimento.....	55
3.2.9. Motores.....	56
3.3 NORMATIZAÇÃO DE HARMÔNICOS.....	58
3.3.1. Recomendação da Norma IEEE 519-2014.....	59
3.3.2. Recomendação da Norma IEC 61000-2-2.....	60
3.3.3. Recomendação da Norma IEC 61000-3-2.....	61
3.3.4. Recomendação da Norma IEC 61000-3-4:.....	62
3.3.5. Recomendação da ANEEL.....	62
<b>4. ANÁLISE DE HARMÔNICOS DE CORRENTE EM TRANSFORMADORES DO SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO.....</b>	<b>64</b>
4.1 HARMÔNICOS DE CORRENTE GERADOS POR CONSUMIDORES.....	64
4.1.1. Níveis Harmônicos de Consumidores de Baixa Renda.....	65
4.1.2. Níveis Harmônicos de Consumidores de Média Renda.....	65
4.1.3. Níveis Harmônicos de Consumidores de Alta Renda.....	66
4.1.4. Níveis Harmônicos no Secundário do Transformador.....	67
4.2 FILTRO PASSIVO RLC SINTONIZADO DE HARMÔNICO.....	68
4.2.1. Cálculo dos Parâmetros dos Filtros.....	68
<b>5. SIMULAÇÃO E RESULTADOS DO FILTRO PASSIVO RLC SINTONIZADO</b>	<b>74</b>
5.1 DADOS PARA A SIMULAÇÃO DO FILTRO.....	74
5.1.1. Dados dos Transformadores de Distribuição.....	75
5.1.2. Cálculo dos Harmônicos de Corrente nos Transformadores.....	75

5.1.3. Simulação do Filtro com o Programa HarmZs® .....	76
5.2 RESULTADOS OBTIDOS NA SIMULAÇÃO DOS FILTROS.....	77
5.2.1. Filtro Sintonizado.....	77
5.2.2. Filtro Sintonizado com Envelhecimento dos Componentes .....	82
5.3 DIFICULDADES E DESAFIOS FUTUROS .....	86
<b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>88</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>90</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente, as concessionárias de energia buscam a melhoria na qualidade da energia fornecida no sistema elétrico, devido aos níveis de energia reativa existente no sistema, que causam grandes perdas de energia e do potencial fornecido. Na literatura técnica, o enfoque quanto aos causadores dessa energia reativa está nos consumidores industriais, mas pouco se menciona sobre o impacto causado por cargas não lineares<sup>1</sup> utilizadas por consumidores residenciais e comerciais de pequeno porte. Após a crise energética ocorrida em 2001 (PINTO, 2015), as concessionárias de energia buscam soluções e incentivam programas de conservação de energia. Com o avanço da tecnologia eletroeletrônica, tem-se propiciado um maior conforto aos usuários do sistema quanto ao consumo de energia, além do surgimento de aparelhos mais eficientes energeticamente. Todavia, estes aparelhos tem a característica de não apresentarem uma relação linear entre a tensão e a corrente (cargas não lineares), gerando harmônicos que são injetados na rede de baixa tensão.

Com isso é cada vez mais frequente o uso de *soft-starters*, fontes reguladas, inversores de frequência, entre outros aparelhos, por pequenas indústrias para melhoria no controle dos processos, mas estes aparelhos deformam as curvas de corrente e de tensão gerando harmônicos e diminuindo a qualidade da energia. Nas unidades consumidoras residenciais e comerciais esse papel é ocupado por uma infinidade de equipamentos eletrônicos presentes, tais como: micro computadores, impressoras, fornos de micro-ondas, televisores, aparelhos de DVD, fonte chaveadas, etc., sem falar das lâmpadas compactas com reatores eletrônicos, cuja presença crescente, em virtude da busca pela eficiência energética e redução do consumo, têm considerável contribuição na degradação da forma de onda de corrente e tensão, e conseqüentemente na qualidade da energia elétrica (GRANDI, 2009).

Através da identificação e caracterização destas diferentes fontes de harmônicos na rede secundária, é possível se fazer uma análise dos impactos causados por essas fontes, e um estudo das soluções a serem adotadas para a

---

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

amenização dos problemas encontrados na qualidade da energia da rede de distribuição.

### 1.1. TEMA

Devido à crescente geração de harmônicos por cargas não lineares na rede de distribuição de energia, é necessário se fazer a identificação dos principais aparelhos e consumidores causadores desta distorção, assim como o tipo de harmônico gerado, e os locais aonde cada tipo de harmônico é gerado com maior intensidade.

Existem muitos estudos e trabalhos acerca das tensões e correntes harmônicas no sistema elétrico, mas estes trabalhos contemplam médias e grandes unidades consumidoras industriais, e sistemas de potência em média e alta tensão (PIRES, 2006). No que tange a avaliações em baixa tensão, é comum estudar-se somente as injeções harmônicas provocadas por determinados tipos individuais de cargas, caracterizando-as pelos quantitativos de correntes harmônicas injetadas na rede elétrica. É bem verdade que cerca de 40% a 45% da carga de um sistema de distribuição advém das redes de baixa tensão, a partir, principalmente, das classes residencial e comercial, sendo importante uma melhor avaliação e caracterização das componentes harmônicas presentes neste tipo de sistema (GRANDI, 2009).

A aprovação do PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional) pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) em dezembro de 2008, deu início a um novo marco regulatório no setor elétrico brasileiro, quanto ao quesito qualidade da energia elétrica. Há um módulo específico tratando do assunto (Módulo 8), abordando os requisitos relativos à qualidade do serviço e do produto. Quanto aos limites referenciais das distorções harmônicas individuais de tensão, cujo espectro deve contemplar, no mínimo, até a 25ª ordem harmônica, a Tabela 01 apresenta os limites dos indicadores estabelecidos no Módulo 8 do PRODIST (GRANDI, 2009).



**Tabela 1 - Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em porcentagem da tensão fundamental)**

Ordem Harmônica	Distorção Harmônica Individual de Tensão [%]				
	$V_n \leq 1 \text{ kV}$	$1 \text{ kV} < V_n \leq 13,8 \text{ kV}$	$13,8 \text{ kV} < V_n \leq 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} < V_n < 230 \text{ kV}$	
Ímpares não múltiplas de 3	5	7,5	6	4,5	2,5
	7	6,5	5	4	2
	11	4,5	3,5	3	1,5
	13	4	3	2,5	1,5
	17	2,5	2	1,5	1
	19	2	1,5	1,5	1
	23	2	1,5	1,5	1
	25	2	1,5	1,5	1
>25	1,5	1	1	0,5	
Ímpares múltiplas de 3	3	6,5	5	4	2
	9	2	1,5	1,5	1
	15	1	0,5	0,5	0,5
	21	1	0,5	0,5	0,5
	>21	1	0,5	0,5	0,5
Pares	2	2,5	2	1,5	1
	4	1,5	1	1	0,5
	6	1	0,5	0,5	0,5
	8	1	0,5	0,5	0,5
	10	1	0,5	0,5	0,5
	12	1	0,5	0,5	0,5
	>12	1	0,5	0,5	0,5

Fonte: ANEEL, 2010

### 1.1.1. Delimitação do Tema

Para estudar harmônicos, é utilizada a série de Fourier (GRANDI, 2009), onde podemos decompor uma onda e assim obter uma análise das distorções que ocorrem na forma de onda.

Essas ondas senoidais possuem frequências múltiplas inteiras, tendo uma frequência de referência. No sistema elétrico brasileiro utilizamos como onda fundamental a que se encontra na frequência de 60 Hz. O segundo harmônico tem frequência de 120 Hz, o terceiro é uma onda senoidal em 180 Hz, e assim por diante (PIREZ, 2006).

Neste trabalho é tratado principalmente as ondas de terceira, quinta e sétima ordem. Essas ondas são as que mais afetam aparelhos eletroeletrônicos pertencentes a áreas residenciais.

A primeira parte do trabalho consistiu em realizar um estudo para averiguar se as distorções harmônicas causadas por consumidores residenciais podem ser consideradas significativas. Foi feita a caracterização do conteúdo harmônico típico de um sistema de distribuição.

Conhecendo-se o conteúdo harmônico típico da rede de distribuição, foi estudado o melhor filtro para atenuar o conteúdo harmônico que chega ao

transformador de distribuição. Assim, foi dimensionado um filtro a ser instalado junto ao transformador. Um filtro elétrico pode ser descrito como um circuito que deixa passar determinados sinais de sua entrada para sua saída, e impede que outros sejam transmitidos.

Sendo assim, foi feita a simulação de um filtro base, que possa corrigir os principais distúrbios.

## 1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

Para a realização do estudo, utilizamos dados de estudos anteriores e referências bibliográficas.

Sabe-se, em função da análise de alguns trabalhos já publicados, que os harmônicos no sistema de distribuição têm impactos importantes nos transformadores.

Para a eliminação desses harmônicos encontrados na rede de distribuição, é necessária a utilização de um filtro, o qual foi projetado baseado nesses dados obtidos na literatura técnica.

O filtro que foi projetado para a atenuação dos harmônicos foi simulado para obtenção de dados e resultados, devido a inviabilidade de colocá-lo na rede da concessionária.

## 1.3 OBJETIVOS

A seguir serão apresentados os principais objetivos que se pretende alcançar neste trabalho.

### 1.3.1. Objetivo Geral

Identificar e analisar harmônicos na rede de distribuição, gerados por consumidores residenciais, e projetar um filtro para diminuir o efeito dos mesmos.

### 1.3.2. Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral, foram entendidos como objetivos específicos os seguintes itens:

- Apresentar, de maneira abrangente, o que são os harmônicos, qual o efeito e como diminuir ou eliminar o efeito dos harmônicos;
- Prospectar e analisar dados reais, sobre a quantidade de harmônicos em áreas de consumidores residenciais;
- Modelar um sistema de distribuição para a realização do estudo;
- Dimensionar um filtro passivo para o caso estudado;
- Apresentar a simulação para verificar o desempenho do filtro para filtragem dos harmônicos.

## 1.4 JUSTIFICATIVA

Há muito se estuda o efeito de harmônicos na rede; porém, a maioria desses estudos está voltada para harmônicos de consumidores industriais.

O fato de que o tipo de aparelhos nas nossas residências vem mudando ao longo dos anos, principalmente com a maior utilização de eletroeletrônicos, faz com que o aspecto de consumo residencial mude e torne possível a geração de harmônicos que acabam afetando a rede.

A ideia do estudo de viabilidade e da criação de um filtro, torna, assim, esse estudo justificável, pois trará benefícios para a concessionária e para os consumidores finais, com uma energia de melhor qualidade.

## 1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

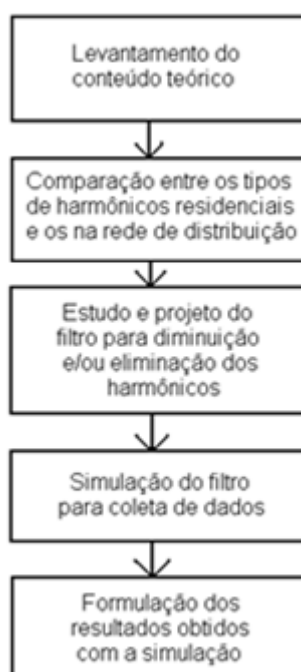
Inicialmente foi feito um levantamento teórico do que é um harmônico e os tipos mais prejudiciais dentro do sistema elétrico na parte da rede de distribuição. Também foi feito um levantamento teórico dos tipos de harmônicos gerados pelos aparelhos eletroeletrônicos mais comuns dos consumidores residenciais.

A partir da consolidação do embasamento teórico, foram comparadas as formas dos harmônicos encontrados nos consumidores residenciais com os tipos mais comuns da rede de distribuição.

Definidas as formas e níveis dos harmônicos na rede de distribuição foi feito o estudo e projeto de um filtro para a diminuição e/ou eliminação dos níveis na rede de distribuição da concessionária.

O filtro projetado foi então simulado pelos autores do trabalho para coleta de dados e formulação dos resultados obtidos.

O procedimento metodológico descrito para o estudo dos harmônicos, coleta de dados reais e projeto do filtro está também apresentado na Figura 01.



**Figura 1 - Procedimento metodológico de estudo dos harmônicos na rede de distribuição**

**Fonte: Elaboração própria**

## 1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esse trabalho possui estrutura a seguir:

Capítulo 1 – Introdução a harmônicos, o que são e como afetam a rede elétrica.

Capítulo 2 – Revisão da literatura para identificar o que já foi estudado sobre o assunto.

Capítulo 3 – Harmônicos em sistemas de distribuição

Capítulo 4 – Quantização dos tipos de harmônicos e como diminuí-los ou eliminá-los.

Capítulo 5 – Projeto e simulação de um filtro de harmônicos.

Capítulo 6 – Conclusões, considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

## 2. INTRODUÇÃO A HARMÔNICOS

Neste capítulo, iremos introduzir a teoria sobre harmônicos, tratando principalmente sobre: o que são harmônicos, como afetam a rede elétrica e como podemos filtrá-los.

Podemos associar as distorções harmônicas às deformações nas formas de onda de tensão e de corrente em relação à onda senoidal que ocorre na frequência fundamental. Para analisar essas distorções, usamos o teorema de Fourier, que diz que toda função periódica não senoidal pode ser representada sob a forma de uma soma de expressões composta por:

- Uma expressão senoidal na frequência fundamental;
- Expressões senoidais cujas frequências são múltiplos inteiros da fundamental;
- Uma eventual componente contínua.

Desta forma, tem-se que para qualquer forma de onda periódica  $u(t)$ , é possível escrevê-la como se vê nas expressões a seguir (GRANDI, 2009):

$$u(t) = U_{dc} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cdot \cos(n\omega_0 t) + b_n \cdot \sin(n\omega_0 t)] \quad (1)$$

onde:

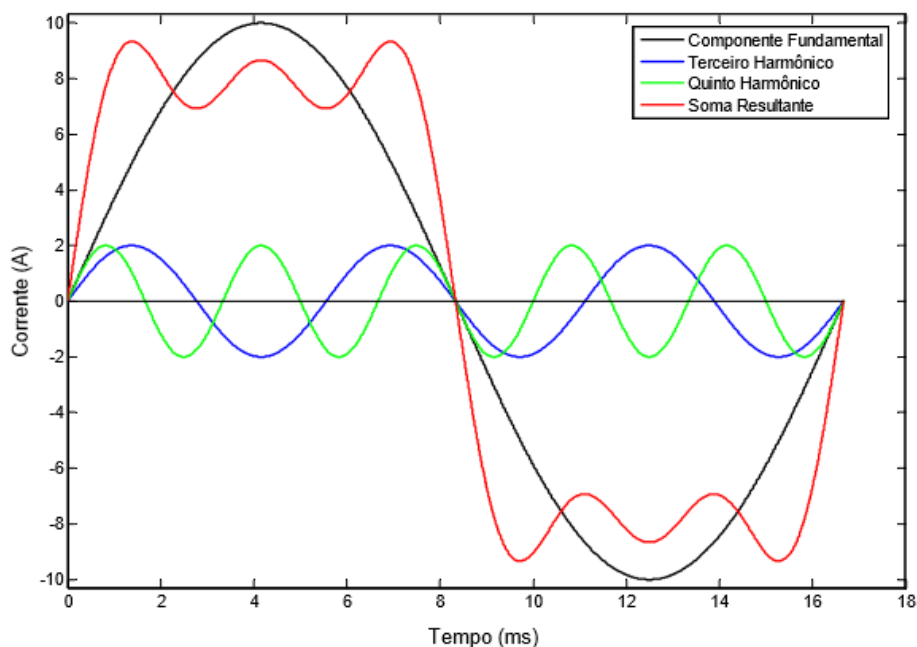
$$U_{dc} = \frac{1}{T} \cdot \int_{t_0}^{t_0+T} u(t) dt \quad (2)$$

$$a_k = \frac{2}{T} \cdot \int_{t_0}^{t_0+T} u(t) \cdot \cos(n\omega_0 t) dt \quad (3)$$

$$b_k = \frac{2}{T} \cdot \int_{t_0}^{t_0+T} u(t) \cdot \sin(n\omega_0 t) dt \quad (4)$$

sendo,  
 $T$  o período e  
 $\omega_0$  a frequência fundamental.

Para exemplificar, a Figura 02 apresenta uma onda periódica não senoidal, que pode ser decomposta na soma da onda senoidal na frequência fundamental, com as suas múltiplas inteiras, de terceira e quinta ordens.



**Figura 2 - Decomposição de uma onda distorcida em uma soma de senóides**  
**Fonte: RIBEIRO, 2007**

Essas múltiplas inteiras da onda senoidal na frequência fundamental são chamadas de componentes harmônicas, ou simplesmente harmônicos, cujas amplitudes correspondem, geralmente, a uma porcentagem da amplitude da fundamental. Há vários parâmetros usados para determinação dos conteúdos harmônicos em uma onda de tensão ou de corrente elétrica. Os mais comumente empregados são a distorção harmônica individual, que expressa a magnitude de cada harmônica em relação à fundamental, e a distorção harmônica total, que expressa o quão afastado a onda medida se encontra da forma de onda ideal, dada em termos da relação entre o valor eficaz de todas as harmônicas desde a ordem 2 ( $f_2$ ) até a  $n$ -ésima ordem ( $f_n$ ) e o valor da fundamental ( $f_1$ ). As expressões que representam os parâmetros mencionados serão apresentadas no tópico 2.1, já incorporando a terminologia brasileira acerca do assunto.

## 2.1. QUALIDADE DE ENERGIA

A preocupação com a qualidade da energia elétrica tornou-se importante para fornecedores e consumidores a partir do fim dos anos 80 devido ao aumento do nível de harmônicos gerados por cargas eletrônicas, e também pela utilização crescente de sistemas de controle micro processados, resultando em cargas sensíveis aos distúrbios relacionados com a qualidade da energia. De certa forma, a utilização de novas tecnologias obrigou consumidores e fornecedores a buscarem uma energia de qualidade, ou seja, sem desvios na tensão, corrente, ou frequência, que resultem na falha ou má operação dos aparelhos dos consumidores (DUGAN et al, 2003).

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<sup>2</sup> (PIRES,2010).

O grau com que os harmônicos podem ser tolerados em um sistema de alimentação depende da susceptibilidade da carga (ou da fonte de potência). Os aparelhos menos sensíveis, geralmente, são os de aquecimento (carga resistiva), para os quais a forma de onda não é relevante. Os mais sensíveis são aqueles que, em seu projeto, assumem a existência de uma alimentação senoidal como, por exemplo, aparelhos de comunicação e processamento de dados. No entanto, mesmo para as cargas de baixa susceptibilidade, a presença de harmônicos (de tensão ou de corrente) podem ser prejudiciais, produzindo maiores esforços nos componentes e isolantes.

Então, baseado no texto da IEEE – 519, que trata das práticas recomendadas e requisitos para o controle de harmônicos no sistema elétrico de potência, temos estes efeitos nos diversos aparelhos relacionados à energia.

---

<sup>2</sup> Ponto de entrega: Ponto de conexão do sistema elétrico da empresa distribuidora de eletricidade com a instalação elétrica da(s) unidade(s) consumidora(s) e que delimita as responsabilidades da distribuidora, definidas pela autoridade reguladora.



### 2.1.1. Motores e Geradores

Tratando de máquinas rotativas, sejam essas de indução ou síncronas, o maior efeito dos harmônicos é o aumento do aquecimento que ocorre devido ao aumento das perdas no ferro e no cobre. Esse aquecimento afeta diretamente sua eficiência e o torque entregue pela máquina.

O torque é afetado pelo surgimento de um torque oscilatório, que terá uma mesma amplitude em relação a distorção harmônica, podendo criar oscilações mecânicas e ocasionar o desgaste dos rolamentos da máquina.

O sobreaquecimento que pode ser tolerado depende do tipo de rotor utilizado. Os de gaiola profunda, por causa do efeito pelicular, produzem maior elevação de temperatura do que os de gaiola convencional.

O efeito peculiar consiste em uma redução da área que é realmente condutora, à medida que se eleva a frequência da corrente, fazendo com que a condução da corrente seja na superfície do condutor e não no seu interior.

Como consequência desse aquecimento, é possível que aumente o ruído audível, quando comparado com alimentação puramente senoidal. Esse ruído pode vir das oscilações mecânicas ou então se uma das frequências de harmônicos coincidir com a frequência natural de algum elemento componente do motor, gerando assim, ressonância.

O efeito cumulativo do aumento das perdas reflete-se numa diminuição da eficiência e da vida útil da máquina. A redução na eficiência é indicada na literatura como de 5 a 10% dos valores obtidos com uma alimentação puramente senoidal. Este fato não se aplica a máquinas projetadas para alimentação a partir de inversores, mas apenas àquelas de uso em alimentação direta da rede. Isso ocorre porque os inversores acabam tendo o papel de filtro para possíveis ruídos, entregando ao motor uma onda igual ou bem próxima da puramente senoidal.

### 2.1.2. Transformadores

Também neste caso tem-se um aumento nas perdas. Tratando de harmônicos na corrente, estes elevam as perdas no cobre. A elevação das perdas no cobre deve-se principalmente ao efeito pelicular citado anteriormente.

Normalmente as componentes harmônicas possuem amplitude reduzida, o que colabora para não tornar esses aumentos de perdas excessivos. No entanto, podem surgir situações específicas (ressonâncias, por exemplo) em que surjam componentes de alta frequência e amplitude elevada.

Associada à dispersão existe ainda outro fator de perdas que se refere às correntes induzidas pelo fluxo disperso. Esta corrente manifesta-se nos enrolamentos, no núcleo, e nas peças metálicas adjacentes aos enrolamentos.

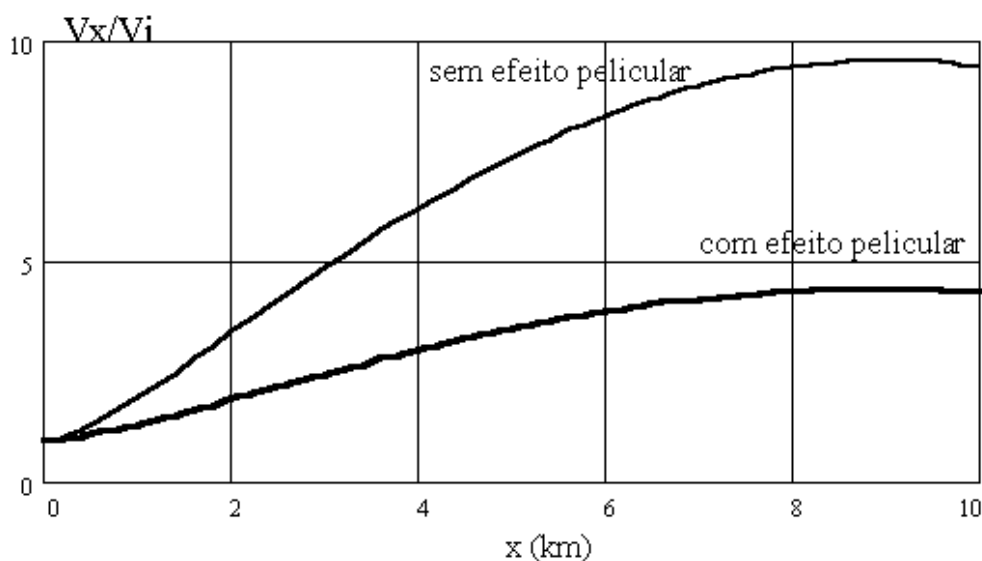
Tem-se ainda uma maior influência das capacitâncias parasitas (entre espiras e entre enrolamento) que podem realizar acoplamentos não desejados e, eventualmente, produzir ressonâncias no próprio dispositivo.

### 2.1.3. Cabos de Alimentação

Em razão do efeito pelicular, ocorre um aumento das perdas nos cabos de alimentação, devido às harmônicas de corrente. Existe também o chamado "efeito de proximidade", que relaciona um aumento na resistência do condutor em função do efeito dos campos magnéticos produzidos pelos demais condutores colocados nas proximidades.

Além disso, caso os cabos sejam longos e os sistemas conectados tenham suas ressonâncias excitadas pelas componentes harmônicas, podem aparecer elevadas sobre tensões ao longo da linha, podendo danificar o cabo.

Temos também que, quando o comprimento do cabo for igual a  $\frac{1}{4}$  do comprimento de onda do sinal injetado, o final da linha pode ser considerado como "circuito aberto", refletindo-se como um curto-circuito na fonte. Isto repete-se para todos os múltiplos ímpares desta frequência. As duas curvas mostradas na Figura 03, referem-se à resposta em frequência com e sem o efeito pelicular. Nota-se que, considerando este efeito, tem-se uma redução na amplitude das ressonâncias, devido ao maior amortecimento apresentado pelo cabo por causa do aumento de sua resistência (POMILIO, 2013).



**Figura 3 - Perfil de tensão ao longo do cabo na frequência de ressonância**  
**Fonte: POMILIO, 2013**

#### 2.1.4. Aparelhos Eletrônicos

A sensibilidade de aparelhos eletrônicos varia conforme a sua aplicabilidade. Por exemplo: se um aparelho necessita ou utiliza os cruzamentos com o zero para realizar alguma ação, e os harmônicos causarem uma distorção nessa onda, fazendo com que ela não passe pelo zero, isso pode alterar, ou mesmo inviabilizar, o seu funcionamento correto.

O bom funcionamento de aparelhos eletrônicos também pode ser alterado caso as harmônicas penetrem na alimentação do equipamento, que pode ocorrer por meio de acoplamentos indutivos e capacitivos (que se tornam mais efetivos com o aumento da frequência).

#### 2.1.5. Aparelhos de Medição

Aparelhos de medição que possuam discos de indução, como por exemplo, os medidores de energia, são sensíveis a componentes harmônicas, e podem apresentar tanto erros positivos quanto erros negativos. Esses erros variam conforme o tipo de medidor e conforme o tipo e o grau dos harmônicos presentes. Para o erro ser significativo, essa distorção deve ser elevada, em geral maiores que 20%.

Quando citamos aparelhos de medição e instrumentação, podemos dizer que, em geral, são afetados por harmônicos, especialmente se ocorrerem ressonâncias que afetam a grandeza medida.

#### 2.1.6. Relés de Proteção e Fusíveis

Seja qual for o aparelho, um aumento da corrente eficaz, devido a harmônicos, provocará um maior aquecimento dos dispositivos pelos quais circula a corrente. Esse aumento pode ocasionar uma redução em sua vida útil, e, em casos mais extremos, sua operação inadequada.

Tratando-se dos relés de proteção, não é possível definir completamente as respostas; isso se deve à variedade de distorções possíveis, e também aos diferentes tipos de dispositivos existentes no mercado.

#### 2.2. FATOR DE POTENCIA E $\cos \varphi$

De acordo com (ISONE, 2004), o fator de potência em um sistema senoidal puro é expresso matematicamente pelo cosseno do ângulo formado entre os fasores que representam a potência ativa (W) e a potência aparente (VA), como pode ser observado pela Figura 04.

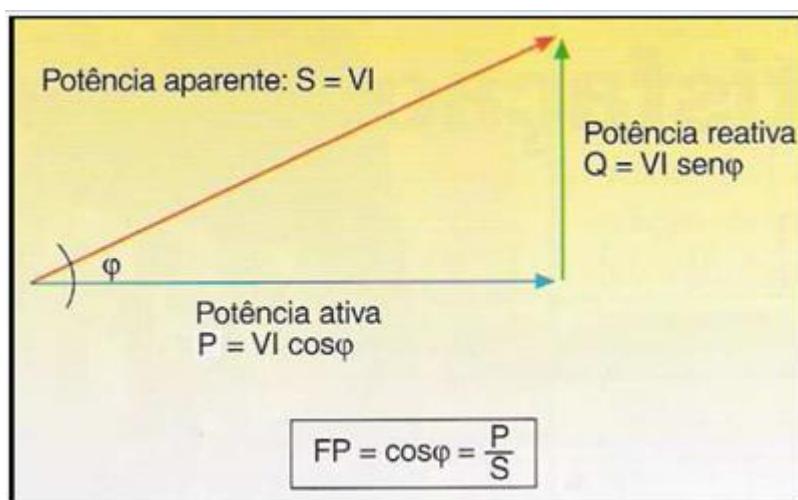


Figura 4 - Triângulo de potência e FP para senóides puras  
Fonte: ISONE, 2004

Perante a presença de harmônicos, as grandezas elétricas passam a não mais ser expressas matematicamente por funções senoidais puras e lineares, o que incorre no surgimento de um desvio entre o fator de potência e o  $\cos \varphi$ . Nesse caso, o fator de potência será expresso pela relação entre a potência ativa e a potência aparente relativas ao sinal distorcido (sinal periódico não senoidal). O  $\cos \varphi$  será expresso pela relação entre a potência ativa e a potência aparente relativas a cada um dos componentes harmônicos, que são ondas senoidais.

Quando há distorções geradas por harmônicos, as reatâncias indutivas elevam-se proporcionalmente com a elevação da frequência. O triângulo de potências é alterado, introduzindo-se uma nova (terceira) dimensão, decorrente da potência aparente necessária para sustentar a distorção do sinal (Figura 05).

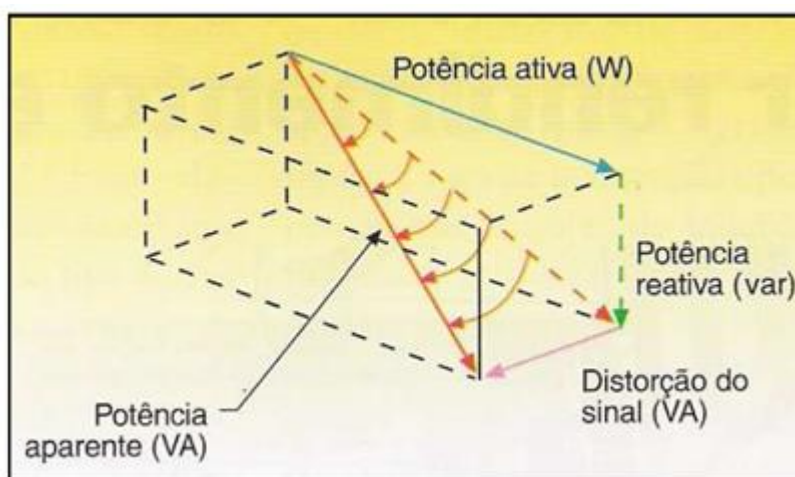


Figura 5 - Visualização espacial das potências em um sistema com harmônicos  
Fonte: ISONE, 2004

Pode-se concluir que o fator de potência equivale ao  $\cos \varphi$  somente para senóides puras (tensão e corrente). Na presença de ondas distorcidas, o fator de potência pode ser expresso por duas grandezas distintas:

- Fator de potência real: considera os ângulos de fase de cada harmônico e a potência reativa necessária para produzi-las; é o fator de potência que deve efetivamente ser corrigido.
- Fator de potência de deslocamento: considera apenas a defasagem entre tensão e corrente para a frequência fundamental; havendo a presença de harmônicos, é

sempre mais elevado que o fator de potência real; não havendo harmônicos, o fator de potência de deslocamento equivale ao fator de potência real.

## 2.3. FILTROS

A definição de filtro pode ser dada por: “Um filtro é um aparelho que permite a passagem de certos sinais em determinadas frequências, ou faixas de frequência, enquanto restringe a passagem de outros”.

Existem vários tipos de filtros, sendo que sua escolha depende das características da rede onde será instalado, e também das características das cargas presentes.

### 2.3.1. Filtros Passivos

A solução clássica para a redução da contaminação harmônica de corrente em sistemas elétricos, é o uso de filtros sintonizados conectados em derivação no alimentador (POMILIO, 2013).

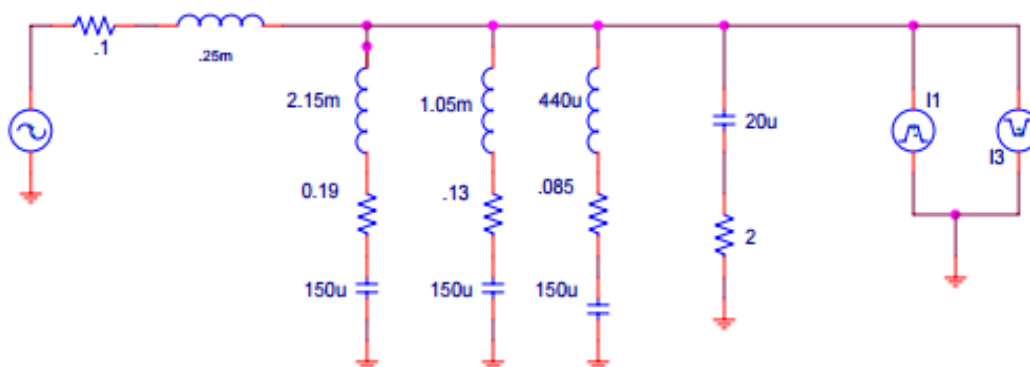
Esses filtros, também conhecidos por filtros passivos ou filtros em derivação (paralelo ou shunt), são a solução mais usual para se evitar que correntes harmônicas penetrem em determinadas partes do sistema elétrico. A função desses filtros é oferecer um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas que se tenha interesse em filtrar.

Os filtros passivos são normalmente compostos por conjuntos de indutores e capacitores sintonizados em uma frequência de ressonância característica. Podem também ser construídos em conjuntos, de forma a serem sintonizados em várias frequências desejáveis simultaneamente. A função dos filtros passivos é de absorver as correntes harmônicas da carga, impedindo que elas circulem pela rede. Devido à sua própria construção, também injetam energia reativa na rede, enquanto as harmônicas são absorvidas (em geral, a absorção das harmônicas não é total, mas, normalmente, é uma parcela daquelas geradas pela carga). Caso a carga seja variável, a construção desses filtros deve prever o arranjo em grupos de filtros para

adequar a sua operação à variação da carga, evitando sobre compensação de energia reativa (STAROSTA, 2011).

Sistemas antirressonantes ou filtros antirressonantes são filtros passivos como os apresentados anteriormente, cuja sintonia, entretanto, não é próxima às frequências presentes na corrente das cargas, mas em outra faixa. Esta aplicação é bastante comum e econômica quando se deseja proteger os capacitores e evitar que eles provoquem ressonância harmônica em redes que suportam a presença de cargas não lineares, e não se deseja a redução da distorção de corrente. Os indutores antirressonantes adequadamente dimensionados, elevarão a impedância do ramo do capacitor, de forma a controlar as correntes harmônicas que circularão nos capacitores e na rede. Para a decisão entre utilização de filtro ressonante ou antirressonante, pode-se fazer uso da norma IEEE 519, que estabelece limites de distorção de tensão a serem atendidos, isto é, mesmo na presença de cargas deformantes, nem sempre se faz necessária a aplicação de filtro sintonizado. O que definirá isso será a resposta do sistema elétrico existente (fontes e outras cargas), além das cargas deformantes na presença dos capacitores a serem instalados (STAROSTA, 2011).

A estrutura típica de um filtro passivo de harmônicos de corrente é mostrada na Figura 06. As várias células RLC série são sintonizadas nas proximidades das frequências que se deseja eliminar, o que, via de regra, são os componentes de ordem inferior. Para as frequências mais elevadas é usado, em geral, um simples capacitor funcionando como filtro passa-altas. A carga considerada neste exemplo é do tipo fonte de corrente, e é similar à que se obtém com o uso de um retificador tiristorizado trifásico, alimentando uma carga indutiva, como um motor de corrente contínua (POMILIO, 2013).



**Figura 6 - Filtragem passiva de corrente em carga não-linear**  
**Fonte: POMILIO, 2013**

### 2.3.2. Filtros Ativos

Os filtros ativos, apesar de terem a mesma função dos passivos, são concebidos por aparelhos eletrônicos que injetam correntes harmônicas defasadas adequadamente daquelas geradas pelas cargas, de modo que, ao se somarem, se cancelem. Enquanto os filtros passivos são normalmente dependentes e especificados pelos valores dos indutores, capacitores e elementos de manobra que os compõem, os filtros ativos são especificados pelos “ampères” que irão filtrar (STAROSTA, 2011).

O entendimento do filtro ativo pode ser o de uma “máquina de corrente elétrica”, em que são geradas não só correntes harmônicas em diversas frequências em função da presença de cada uma delas, como na própria frequência fundamental, que poderão servir para equilibrar as correntes nas fases, ou até mesmo para adiantar as correntes da frequência fundamental em relação à tensão, melhorando, assim, o fator de potência (STAROSTA, 2011).

Um modelo de estrutura de um filtro ativo de harmônicos do tipo série, é mostrada na Figura 07.



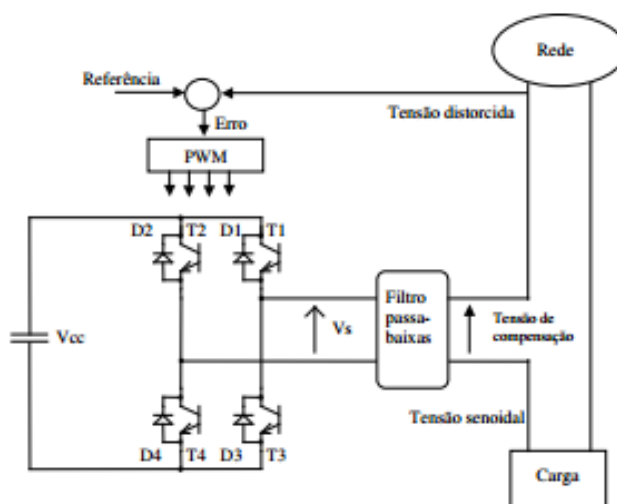


Figura 7 - Filtro série monofásico para compensação de tensão  
Fonte: POMILIO, 2013

### 2.3.3. Filtros Híbridos

A fim de reduzir a potência a ser processada pelo filtro ativo, é possível utilizá-lo em associação com filtros passivos, de maneira que a parte ativa deve atuar apenas sobre as componentes não corrigidas pelo filtro passivo. A Figura 08 ilustra o princípio de um filtro híbrido monofásico, tem-se o esquema geral, considerando a existência de uma fonte de tensão na frequência fundamental ( $V_s$ ) e uma fonte de tensão que representa a distorção harmônica da tensão ( $V_{sh}$ ). A carga é modelada como uma fonte de corrente ( $I_L$ ), a qual também possui componente harmônica ( $I_{lh}$ ). Existe uma reatância da fonte, ( $Z_s$ ) e um filtro LC série sintonizado na frequência da harmônica de interesse. O filtro ativo é modelado como uma fonte de corrente (POMILIO, 2013).

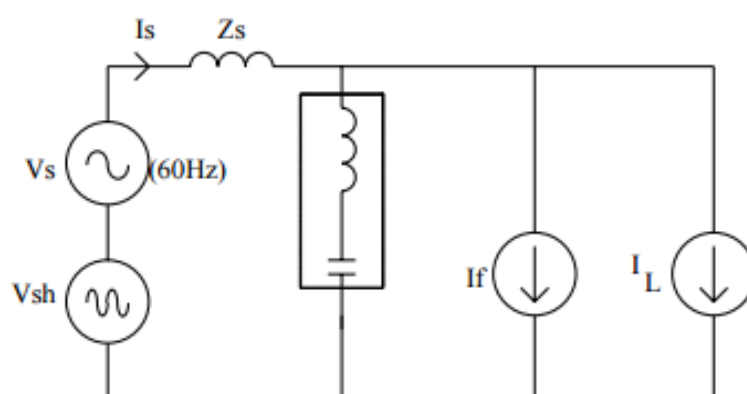


Figura 8 - Esquema simplificado de filtro híbrido monofásico de corrente  
Fonte: POMILIO, 2013

### 3. HARMÔNICOS DE CORRENTE EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

#### 3.1. MODELO DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO

O sistema de distribuição de uma concessionária é composto basicamente por subestações de distribuição, redes primárias de média tensão (MT), redes secundárias de baixa tensão (BT), e os aparelhos da rede, que em geral são transformadores de distribuição, chaves fusíveis, chaves seccionadoras (automatizadas ou não), chaves religadoras e bancos de capacitores. Ligados a este sistema de distribuição temos os consumidores que podem ser classificados em industriais, comerciais e residenciais.

Os consumidores industriais podem ser atendidos em tensão primária de média tensão ou em tensão secundária de baixa tensão conforme a carga instalada dos mesmos. Já os consumidores residenciais e comerciais de pequeno porte são atendidos em tensão secundária de baixa tensão.

Na Figura 09 podemos observar um modelo simplificado do sistema elétrico: temos a subestação de distribuição (item 4), a rede primária e seus aparelhos (item 5) e a rede de distribuição secundária com os consumidores (item 6).

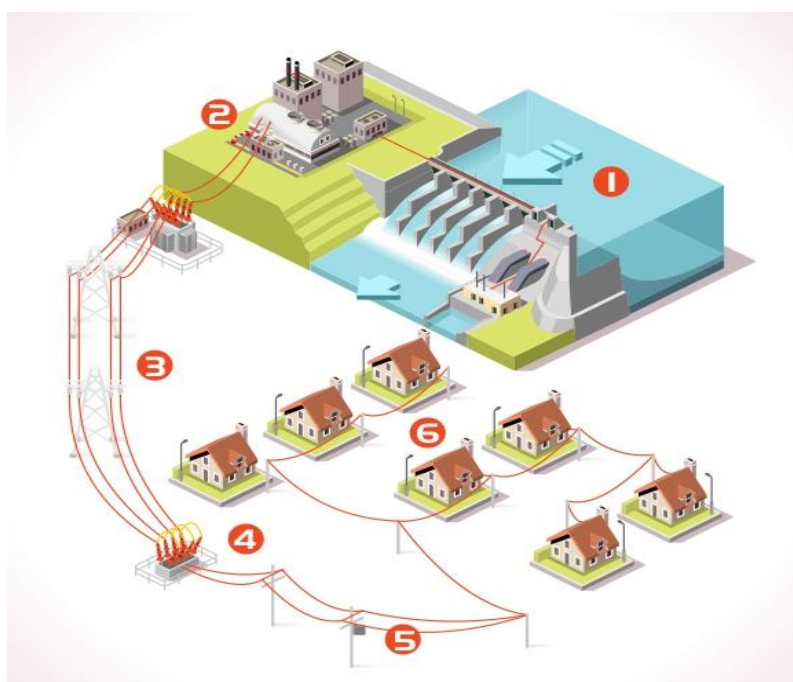


Figura 9 - Sistema de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica  
Fonte: CEMIG, 2016

Para o estudo do efeito dos harmônicos na rede de distribuição secundária, podemos considerar como fontes de distorções harmônicas os consumidores residenciais e comerciais de pequeno porte. Os efeitos a serem observados serão sobre os cabos da rede secundária, os transformadores de distribuição, as chaves, e os bancos de capacitores.

### 3.1.1. Quantificação do Harmônico de Corrente no Sistema de Distribuição

O valor da corrente harmônica que circula pelo sistema de distribuição, não pode ser obtido fazendo-se uma soma algébrica dos valores de cada componente harmônico, devido à defasagem fasorial que pode existir entre valores do mesmo componente harmônico, gerados por cargas não lineares diferentes que compõem o sistema.

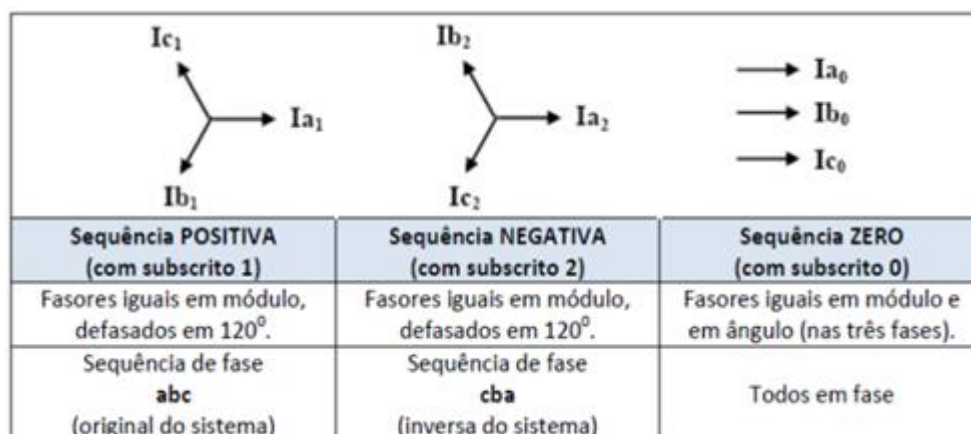
Em sistemas trifásicos equilibrados, as tensões e correntes em cada fase são senóides puras e estão defasadas de  $120^\circ$  entre si no tempo. Neste tipo de sistema não há passagem de corrente pelo condutor neutro, pois a corrente fasorial no neutro é igual à corrente resultante da soma vetorial das correntes das três fases. Quando o sistema se encontra desbalanceado, esta soma vetorial das correntes de fase não é nula, o que ocasiona a circulação de corrente pelo condutor neutro.

Os sistemas de distribuição são inevitavelmente desequilibrados, visto que as linhas são assimétricas, e as cargas são em sua maioria monofásicas, bifásicas e trifásicas desequilibradas. Porém a distribuição das cargas entre as fases é feita com o intuito de se manter o equilíbrio de cargas entre as fases.

Segundo o teorema de Fortescue, formulado pelo engenheiro Charles LeGeyt Fortescue no início do século XX, qualquer sistema polifásico com  $N$  fasores desequilibrados pode ser expresso como a soma de três conjuntos simétricos de  $N$  fasores equilibrados, denominados “componentes simétricas” dos fasores originais. Apenas uma única componente de frequência é representada pelos fasores.

Estas componentes simétricas são a sequência positiva (+), negativa (-) e nula ou zero (0). A soma fasorial destas componentes de frequência resulta no fasor original. Esta técnica pode ser estendida aos harmônicos. Nos sistemas trifásicos equilibrados os harmônicos serão caracterizados pela ordem da frequência e por uma sequência de fase: positiva, negativa e zero. Em sistemas desequilibrados e não

lineares, o teorema de Fortescue é aplicado, gerando para cada harmônico de ordem  $h$ , um conjunto de componentes simétricas de uma dada sequência de fase correspondente (LEÃO, 2014). Na Figura 10 podem ser vistas as componentes simétricas.



**Figura 10 - Componentes simétricas**  
Fonte: RAMOS, 2009

Os componentes de sequência positiva consistem em três fasores de módulos iguais e defasados de  $120^\circ$  e com a mesma sequência de fase dos fasores originais. Os componentes de sequência negativa também consistem em três fasores de módulos iguais e defasados de  $120^\circ$ , mas a sequência de fase é contrária dos fasores originais. Os componentes da sequência nula consistem em três fasores de mesmo módulo, mesma direção e sentido, ou seja, não possuem defasagem entre si (CARVALHO, 2013).

No sistema de distribuição as correntes harmônicas de 3º ordem e suas múltiplas são de sequência zero; o módulo da soma vetorial entre estes componentes é igual à soma algébrica de suas intensidades, e é este o valor da corrente harmônica que passa pelo neutro em um sistema desequilibrado.

### 3.1.2. Problemas Causados Pelos Harmônicos na Rede de Distribuição

Harmônicos causam diversos problemas tanto para a concessionária quanto para os consumidores em geral; dentre estes problemas podemos destacar os elencados a seguir (GAMA, 1999):

- Operação incorreta de aparelhos de controle e proteção.
- Erros em medidores de energia ativa, utilizados nas indústrias, comércios e residências.
- Aumento da corrente do neutro de transformadores.
- Aumento das perdas em aparelhos como transformadores, motores, cabos, capacitores, etc.
- Interferência em sistema de comunicação.
- Redução do fator de potência.
- Sobre tensão devido à circulação de correntes harmônicas.

Na Tabela 02 é mostrada a relação entre o acréscimo de distorções harmônicas de corrente (THDi), causado por cargas não lineares, o acréscimo de corrente e o respectivo fator de potência total<sup>3</sup>, tendo como base uma corrente fundamental de 1 A.

**Tabela 2 - Influência dos harmônicos no acréscimo de corrente e na redução do fator de potência.**

Distorção na Corrente THDi - %	Acréscimo de corrente %	Fator de Potência total
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

Fonte: GAMA, 1999

Os efeitos que os harmônicos de corrente causam no sistema de distribuição podem ocasionar problemas tanto financeiros como técnicos. Em um estudo feito por Thomas S. Key (1996), quanto ao efeito da redução do nível harmônico em um prédio

---

<sup>3</sup> Fator de potência total: divisão entre a potência ativa e a potência aparente.

comercial, foi verificado que os principais aparelhos utilizados eram computadores, impressoras, fotocopiadoras, lâmpadas fluorescentes com reatores eletrônicos de alta eficiência, e controladores de velocidade de motores, sendo estes aparelhos caracterizados como cargas não lineares. As perdas nos cabos elétricos foram calculadas em US\$888,00 por ano. No transformador que fornecia energia ao prédio o custo era de US\$1.203,00 por ano, totalizando o custo total de US\$2.091,00 dólares por ano, devido somente ao problema de harmônico. Neste mesmo estudo foi verificado que o transformador estava sobrecarregado, funcionando com apenas 50% da sua capacidade devido ao efeito dos harmônicos de corrente.

Os efeitos que harmônicos de corrente causam nos diversos aparelhos, variam para cada componente, sendo descritos a seguir.

### 3.1.2.1 Condutores

Correntes harmônicas em condutores podem gerar aquecimento dos mesmos e existem dois mecanismos para analisar este efeito.

O primeiro mecanismo é devido à redistribuição de corrente no condutor, incluindo o efeito pelicular e de proximidade. O efeito pelicular é devido à restrição da porção mais interna do condutor para a camada mais externa em função da frequência da rede. 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.

O segundo mecanismo é o aumento da corrente de neutro em sistemas trifásicos a quatro condutores alimentando cargas não lineares. Várias cargas, por exemplo, as eletrônicas, produzem correntes de 3º harmônico significativas. Sistemas trifásicos equilibrados e sem tensões harmônicas não terão corrente de neutro. Porém, harmônicos de terceira ordem e seus múltiplos inteiros irão se somar no neutro ao invés de se subtrair, podendo a corrente de neutro chegar a ser 1,7 vezes a corrente fundamental de fase para cargas conversoras estáticas (PIRES, 2006).

O maior problema que se verifica em cabos é a configuração do cabo de neutro em ambientes com grandes concentrações de cargas não lineares. Os cabos

de neutro quando são dimensionados para serem do mesmo tamanho dos cabos de fase, ou mesmo menores, estarão sobrecarregados.

### 3.1.2.2 Iluminação

Nas 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 (IEEE, 1993).

### 3.1.2.3 Transformadores

As perdas por efeito Joule nos enrolamentos serão devido ao efeito pelicular provocado pelas correntes harmônicas, dissipando energia em forma de calor. As perdas no núcleo 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 (IEEE, 1993).

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 (IEEE-519, 1992).

A norma IEEE C57.12.00 (2000) 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 desta norma citam as sobre tensões que o transformador deve suportar: 5 % com carga nominal e 10 % sem carga. Estas sobre tensões incluem situações com ou sem harmônicos (PIRES, 2006).

Delaiba et al. (1995) apresenta um estudo do efeito dos harmônicos na vida útil do transformador. Foi realizado um modelo térmico relacionado à frequência, servindo de base para a interação dos harmônicos com o aumento da temperatura do transformador, relacionando este aumento de temperatura com a diminuição na vida útil do transformador. Os resultados obtidos indicaram que, com tensões harmônicas

(normalmente encontradas no sistema de distribuição), maior que os 5%, a vida útil do transformador não é muito afetada. Porém, para correntes harmônicas acima do valor recomendado, que é de 5% de distorção em relação à corrente fundamental na norma IEEE C57.12.00 (2000), com um valor de 30% de distorção na corrente nominal, a vida útil do transformador cai aproximadamente 50% (PIRES, 2006).

### 3.2 CARACTERIZAÇÃO DO HARMÔNICO DE CORRENTE EM APARELHOS ELETRODOMÉSTICOS

Devido à falta de normas brasileiras que tratem do assunto de harmônicos de corrente, não há regulamentação quanto aos níveis de harmônicos que aparelhos eletrodomésticos podem gerar. Para a mensuração do nível de harmônico produzido por tipo de eletrodoméstico, é necessário a medição de forma individual e de iniciativa experimental.

Os dados representados nos Itens 3.2.1 a 3.2.9, foram retirados de PIRES, 2006, para servirem de referência quanto distorções harmônicas geradas pelos eletrodomésticos mais comuns, nas residências e salas comerciais, e que tem característica de carga não linear.

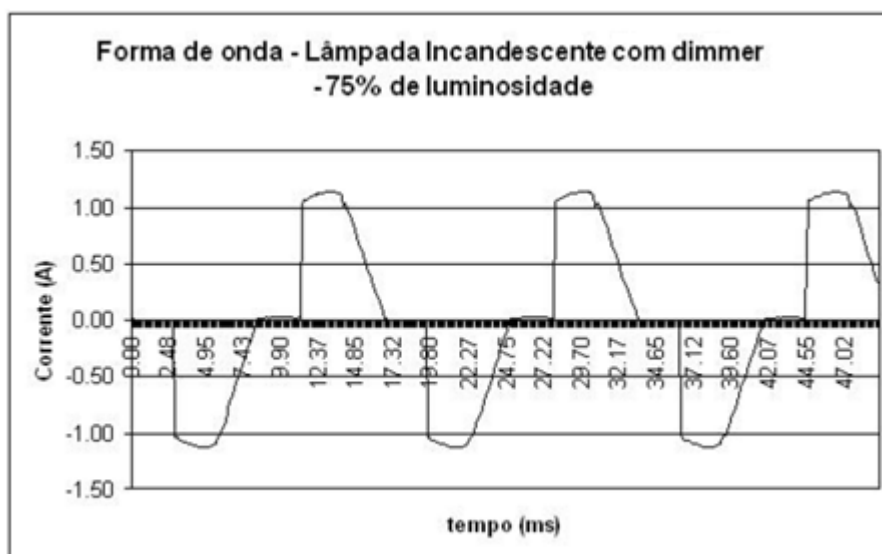
#### 3.2.1. Lâmpadas Incandescentes

As lâmpadas incandescentes são cargas puramente resistivas, tendo um comportamento linear conforme medição realizada (GONZALEZ, 2005). Este fato também se confirma quando se compara o conteúdo harmônico da tensão e corrente.

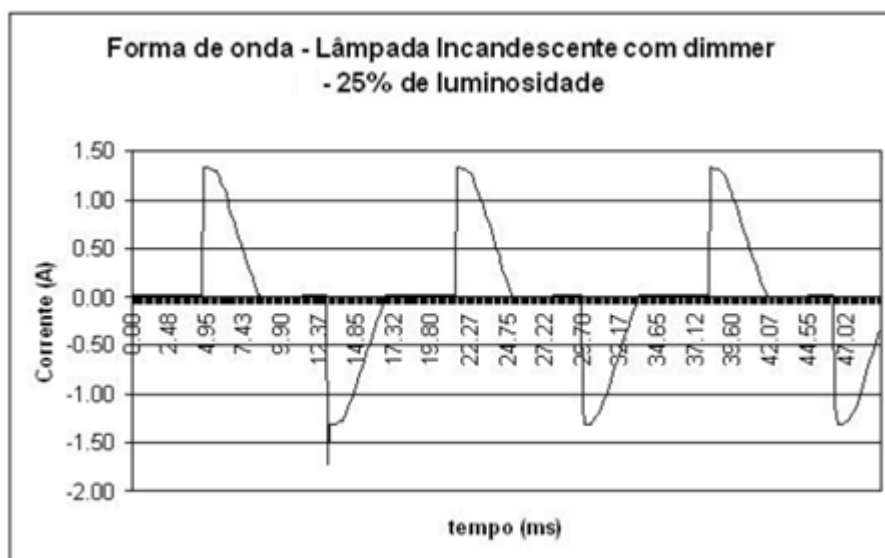
Entretanto, quando essas lâmpadas são dimerizadas, o conjunto lâmpada incandescente + dimmer passa a ter um comportamento de carga não linear. As Figuras 11 e 12 mostram a forma de onda de corrente de uma lâmpada de 100 W sendo dimerizada com 75% e 25% do nível de iluminação total.

A Tabela 03 apresenta o conteúdo harmônico em cada situação de iluminação. É interessante notar o aumento dos harmônicos quando se abaixa o iluminação de 75% para 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 11 - Lâmpada incandescente dimerizada em 75% de iluminamento**  
**Fonte: PIRES, 2006**



**Figura 12- Lâmpada incandescente dimerizada em 25% de iluminamento**  
**Fonte: PIRES, 2006**

**Tabela 3 - Conteúdo harmônico da lâmpada incandescente (tipo cristal 100 W) com dimmer (tipo deslizante)**

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)
<b>1</b>	100,00	-15,75	100,00	-34,89
<b>3</b>	29,13	146,91	62,52	79,18
<b>5</b>	14,29	68,76	24,47	-133,26
<b>7</b>	9,03	-54,47	18,62	45,10
<b>9</b>	7,76	174,37	12,90	-157,24
<b>11</b>	6,55	63,30	10,76	20,29
<b>13</b>	4,81	-54,28	9,14	179,97
<b>15</b>	4,63	-179,61	7,62	-5,34
<b>17</b>	4,15	63,50	7,26	157,07
<b>19</b>	3,29	-53,03	6,28	-32,83
<b>21</b>	3,27	-175,79	6,22	130,05
<b>23</b>	3,08	65,28	5,28	-62,97
<b>25</b>	2,47	-52,43	5,11	103,73
<b>27</b>	2,55	-171,98	4,46	-89,61
<b>29</b>	2,46	65,85	4,34	78,98
<b>31</b>	1,98	-50,60	3,99	-115,23

Fonte: PIRES, 2006

Analisando os gráficos apresentados nas Figuras 11 e 12 pode ser verificado que quanto menor é o nível de iluminamento, pelo uso do dimmer, maior é a distorção da forma de onda de corrente tornando a carga não linear. Na Tabela 03 pode ser verificado também que o percentual de cada harmônico é quase o dobro da situação de 75% para a de 25% de iluminamento.

### 3.2.2. Lâmpadas Fluorescentes Compactas (LFCs)

As lâmpadas fluorescentes compactas são lâmpadas com elevada eficiência luminosa. Porém, são cargas não lineares (FUJIWARA, 1998), com uma alta distorção de corrente, da ordem de 100%. A Figura 13 mostra a forma de onda de corrente típica encontrada nas mesmas.

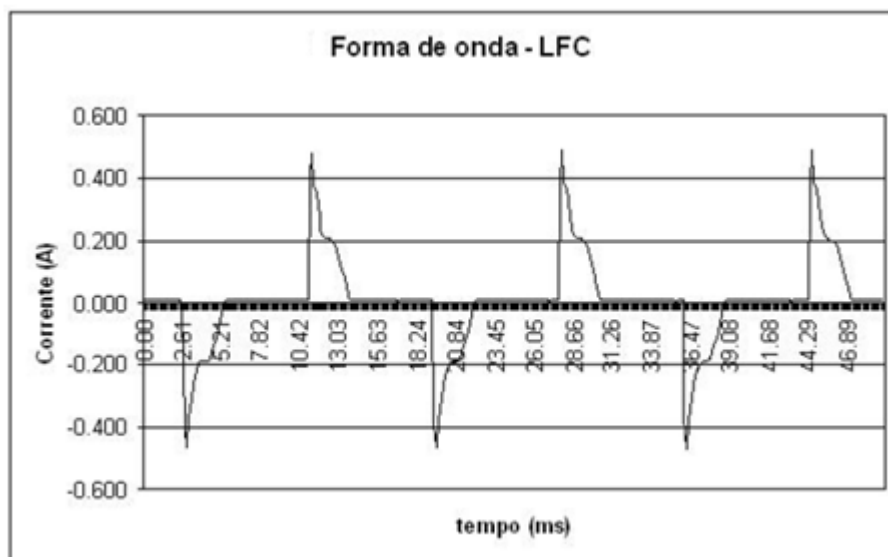


Figura 13 - Forma de onda de corrente típica de uma LFC  
Fonte: PIRES, 2006

Na Tabela 04 é demonstrado o conteúdo harmônico de uma LFC.

Tabela 4 - Conteúdo harmônico da lâmpada fluorescente compacta

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

Fonte: PIRES, 2006

Analisando a forma de onda demonstrada na Figura 13 é verificado que este tipo de lâmpada tem grande distorção harmônica em seu funcionamento. Pela Tabela 04 observa-se que os níveis de distorção são altos e tem valores significativos até grandes ordens de harmônicos, o que torna este tipo de lâmpada muito ruim para o sistema.

### 3.2.3. 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 (BRONZEADO, 1999).

As Figuras 14 e 15 apresentam formas de onda de corrente típica de lâmpadas fluorescentes convencionais trabalhando com reatores eletromagnéticos e eletrônicos, respectivamente.

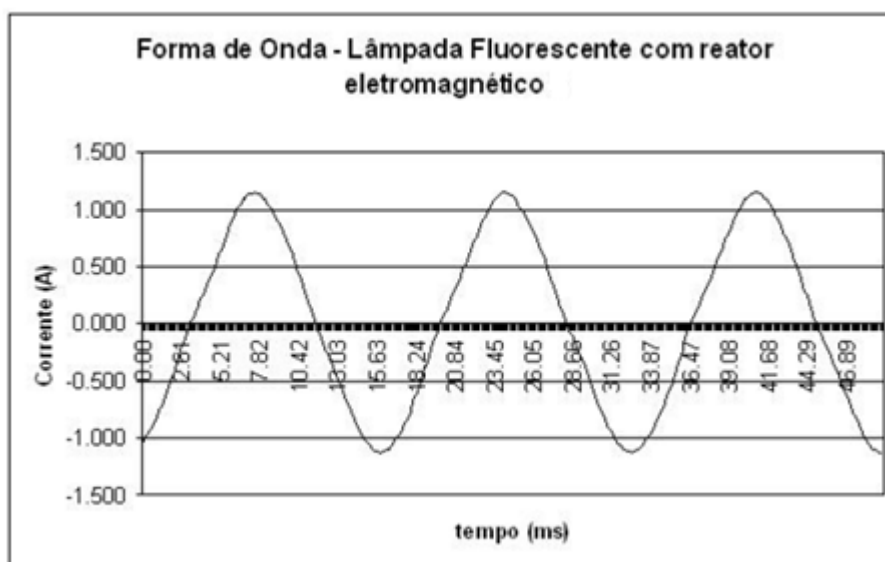


Figura 14 - Forma de onda de corrente típica de lâmpadas fluorescentes convencionais com reatores eletromagnéticos

Fonte: PIRES, 2006

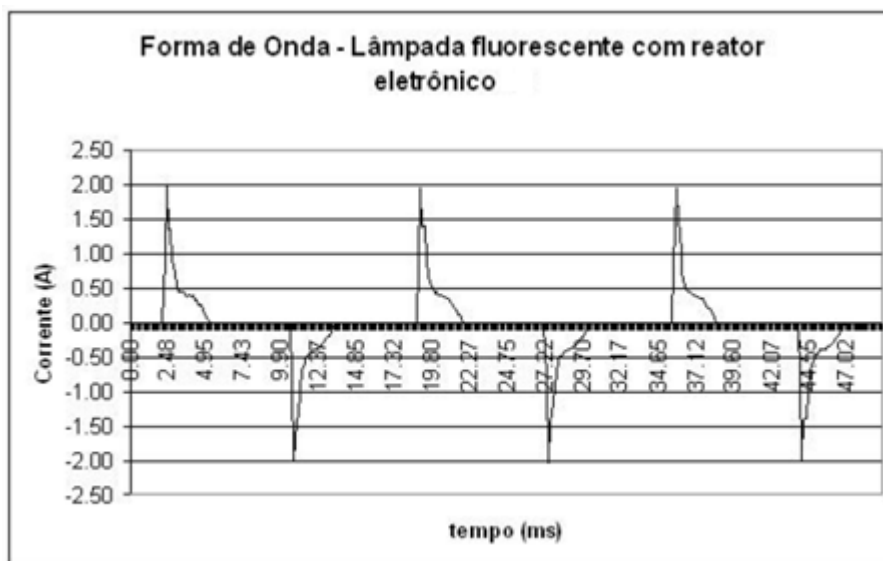


Figura 15 - Forma de onda de corrente típica de lâmpadas fluorescentes convencionais com reatores eletrônicos

Fonte: PIRES, 2006

A Tabela 05 traz o espectro harmônico das correntes apresentadas nas Figuras 14 e 15. Nota-se a diferença nos harmônicos entre os dois reatores mencionados, destacando o alto índice de harmônicos no reator eletrônico.

Tabela 5 - 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)
1	100,00	-64,40	100,00	33,37
3	11,89	-51,00	65,98	-70,65
5	1,28	-94,18	42,40	-144,53
7	0,80	27,15	40,10	135,49
9	0,39	-24,25	28,29	47,01
11	0,35	-163,32	19,55	-21,39
13	-	-	15,32	-91,57
15	-	-	10,95	-149,73
17	-	-	10,20	150,10
19	-	-	10,70	86,96
21	-	-	12,34	15,53
23	-	-	11,80	-63,76
25	-	-	10,85	-138,37
27	-	-	7,90	145,93
29	-	-	6,36	83,12
31	-	-	3,99	-115,23

Fonte: PIRES, 2006

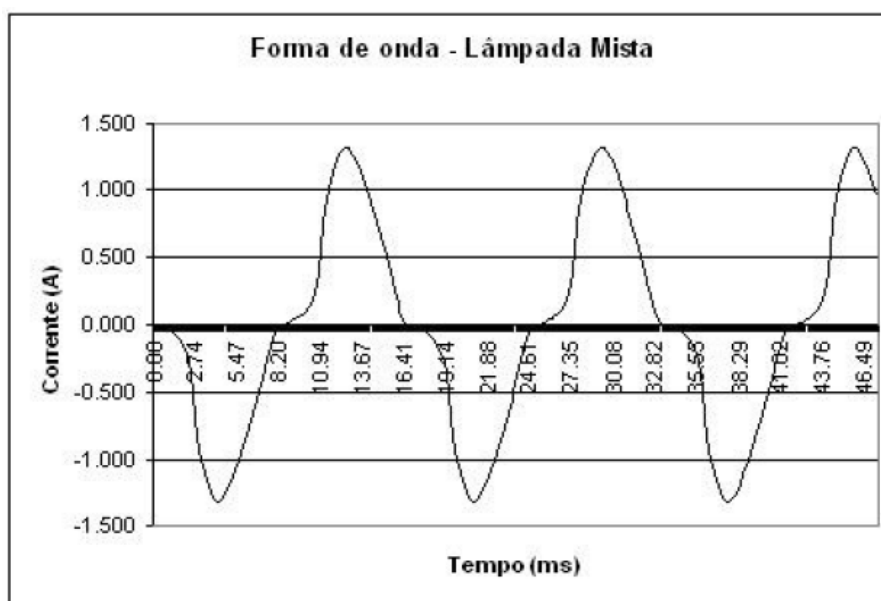
Comparando as formas de onda apresentadas nas Figuras 14 e 15 pode-se concluir que o uso do reator eletromagnético é melhor, pois causa uma pequena

distorção da forma de onda, sendo a forma final da mesma semelhante a uma onda senoidal pura. Os dados da Tabela 05 demonstram que o reator eletromagnético tem melhor funcionamento, pois gera uma quantidade menor de harmônicos e em uma intensidade menor do que o reator eletrônico.

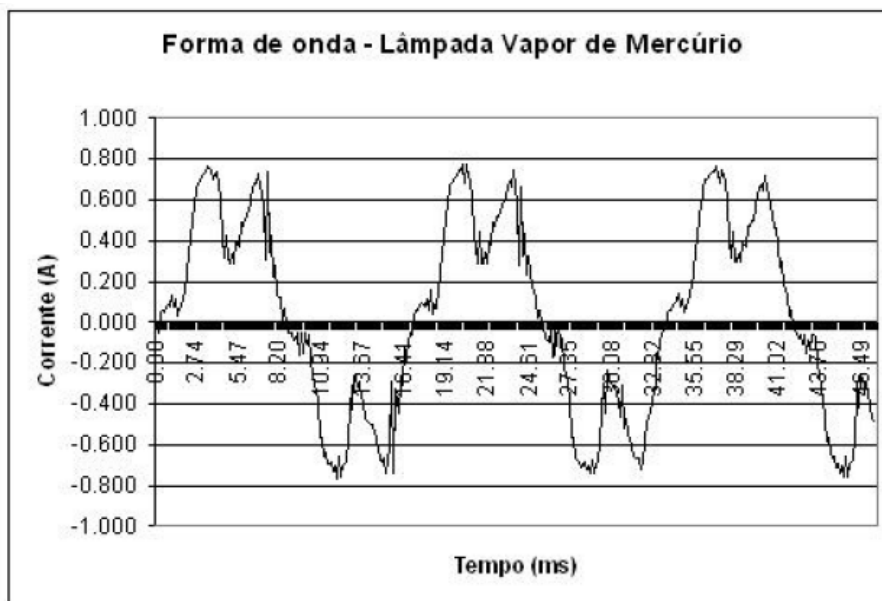
### 3.2.4. Lâmpadas de Vapor de Mercúrio, Sódio e Mista

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 (TOSTES, 2002) em seu programa de Gerenciamento pelo Lado da Demanda – GLD. As lâmpadas de vapor de sódio são mais eficientes, porém, como em outros casos já analisados, com um conteúdo harmônico maior que as outras duas lâmpadas mencionadas (TOSTES, 2002).

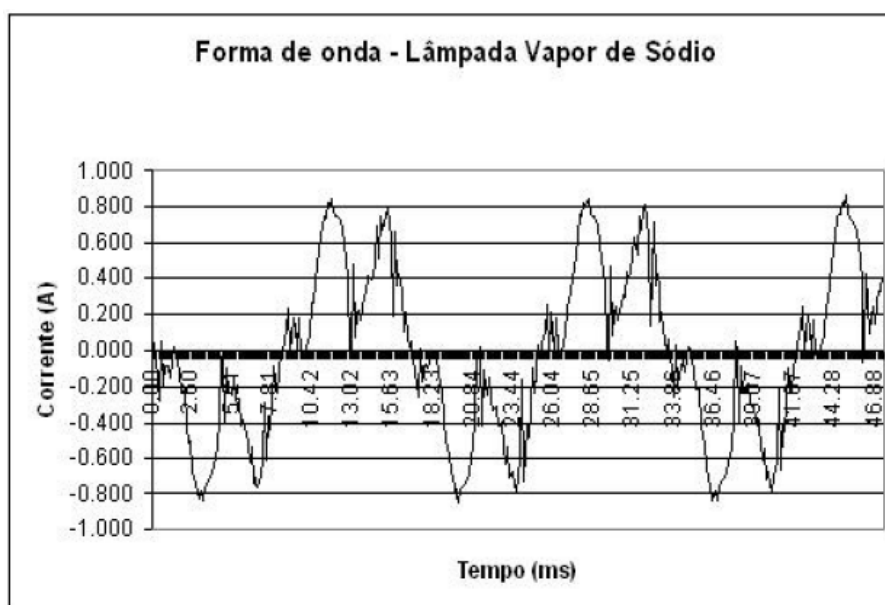
As Figuras 16, 17 e 18 mostram as correntes das lâmpadas mista, de vapor de mercúrio e vapor de sódio. A Tabela 06 traz o conteúdo harmônico das correntes apresentadas nas Figuras 16, 17 e 18.



**Figura 16 - Forma de onda de corrente da lâmpada mista**  
**Fonte: PIRES, 2006**



**Figura 17- Forma de onda de corrente da lâmpada vapor de mercúrio**  
**Fonte: PIRES, 2006**



**Figura 18 - Forma de onda de corrente da lâmpada vapor de sódio**  
**Fonte: PIRES, 2006**

**Tabela 6 - Conteúdo harmônico de lâmpada 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

Fonte: PIRES, 2006

Verificando as formas de onda apresentadas nas Figuras 16, 17 e 18 pode-se notar que a lâmpada mista tem a onda de corrente menos distorcida e mais semelhante a uma onda senoidal pura, o que representa menor distorção harmônica. Pelos dados da Tabela 06, é verificado que a lâmpada mista tem o menor THDi dos três tipos de lâmpada, enquanto que a lâmpada de vapor de sódio é a que apresenta os mais altos índices de distorção, gerando níveis consideráveis de distorção até o 31º harmônico, o que a torna uma grande geradora de harmônicos para a rede de distribuição pela iluminação pública.

### 3.2.5. Eletrônicos

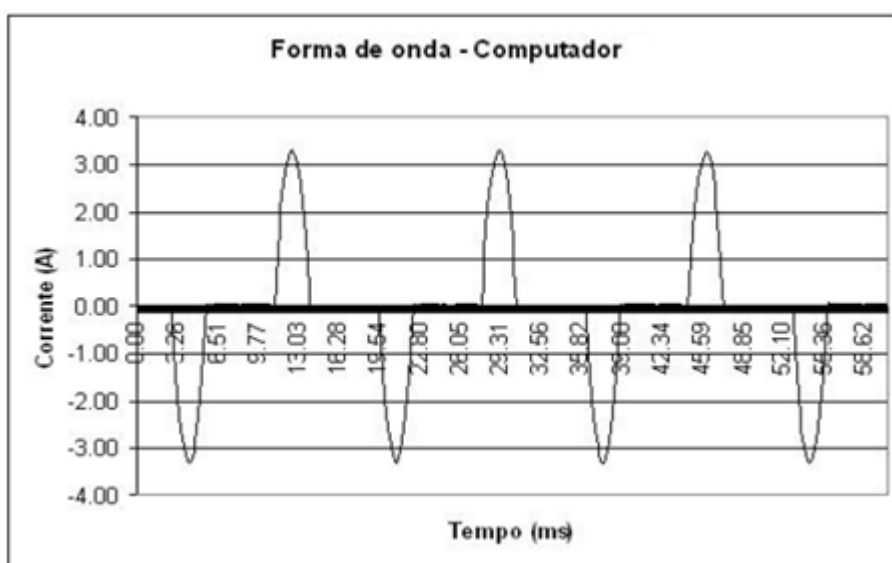
Os aparelhos eletrônicos apresentam altos THDs de corrente. Isto se explica por sua forma de conversão CA-CC utilizada na fonte de alimentação: ponte de diodos com filtro capacitivo (DUGAN, 2003). Esta categoria de eletrodomésticos constitui a



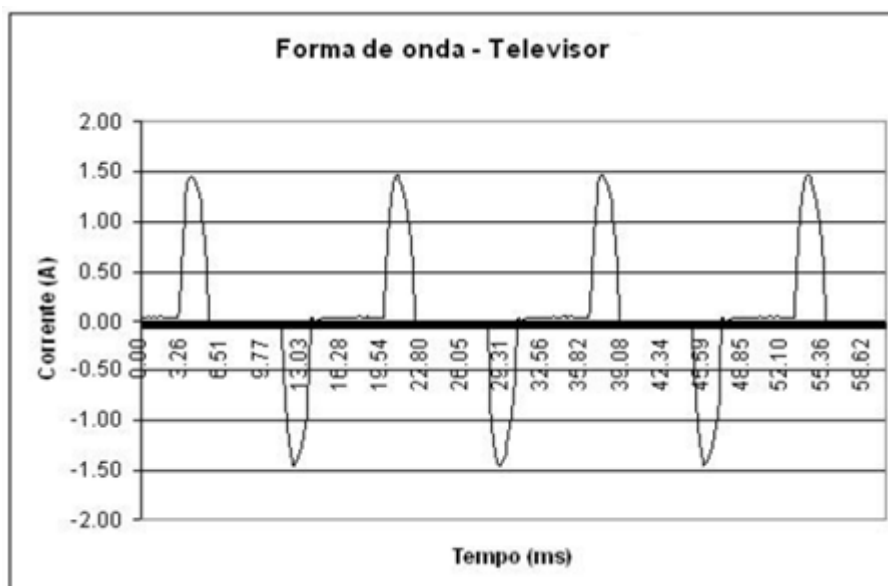
principal carga não linear em consumidores residenciais e comerciais de pequeno porte, e, conseqüentemente, na rede de distribuição que os abastece.

As Figuras 19 e 20 trazem as curvas de corrente de um computador e de um televisor, cargas mais representativas deste grupo de eletrônicos. Os outros aparelhos eletrônicos têm a forma de onda um pouco diferente do computador e do televisor, tendo o formato apresentado na Figura 21, para um aparelho de som.

A Tabela 07 apresenta os harmônicos das formas de onda de corrente apresentadas.



**Figura 19- Forma de onda de corrente típica de um computador**  
Fonte: PIRES, 2006



**Figura 20- Forma de onda de corrente típica de um televisor**  
Fonte: PIRES, 2006

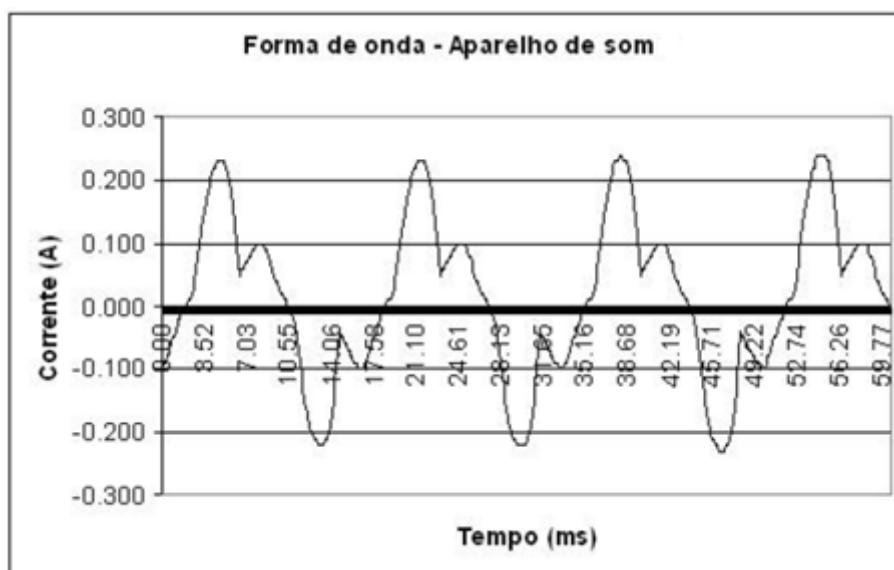


Figura 21 - Forma de onda de corrente típica dos outros aparelhos eletrônicos representados pelo aparelho de som

Fonte: PIRES, 2006

Tabela 7- Conteúdo harmônico de computador, televisão e aparelho de som

Harmônicos	Computador		Televisor		Aparelho de som	
	$I_{rms} = 1,408 \text{ A}$		$I_{rms} = 0,621 \text{ A}$		$I_{rms} = 0,127 \text{ A}$	
	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

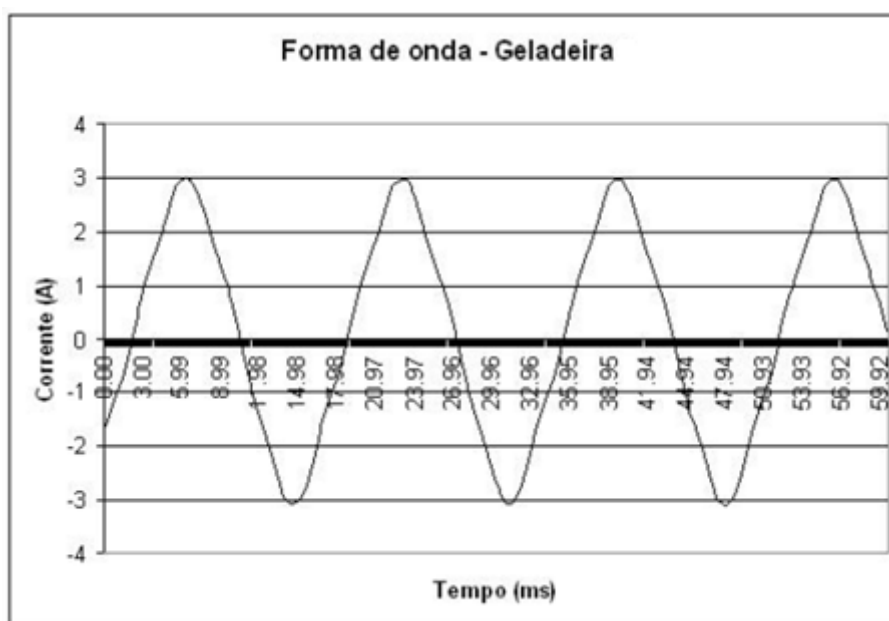
Fonte: PIRES, 2006

Comparando as três formas de onda é verificado que as das Figuras 19 e 20 são bem parecidas e que a da Figura 21 difere das duas anteriores, mas ambas não têm o formato de uma senóide, e com isso apresentam distorções harmônicas. Pelos

dados da Tabela 07 verificamos que o computador e a televisão têm grande percentual de 3° harmônico, e que os demais níveis são bem significativos, demonstrando que estes dois aparelhos geram grandes distorções de corrente.

### 3.2.6. Refrigeradores

Refrigeradores estão constituídos entre os importantes eletrodomésticos residenciais, sendo presente na maioria dos lares brasileiros. Segundo o IBGE, em 2011, 95,75% dos lares brasileiros possuíam uma geladeira. Neste trabalho os refrigeradores estão sendo chamados de geladeiras, freezers, frigobares e bebedouros, sendo estes dois últimos comuns em consumidores comerciais. A Figura 22 mostra a forma de onda de corrente típica deste grupo de eletrodomésticos. Estas cargas não podem ser consideradas não lineares apesar da sua distorção de corrente, pois apresentam baixos THDs de corrente.



**Figura 22 -Forma de onda de corrente típica de aparelhos refrigeradores**  
**Fonte: PIRES, 2006**

A Figura 23 apresenta a corrente eficaz da geladeira, durante um período de quinze 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.

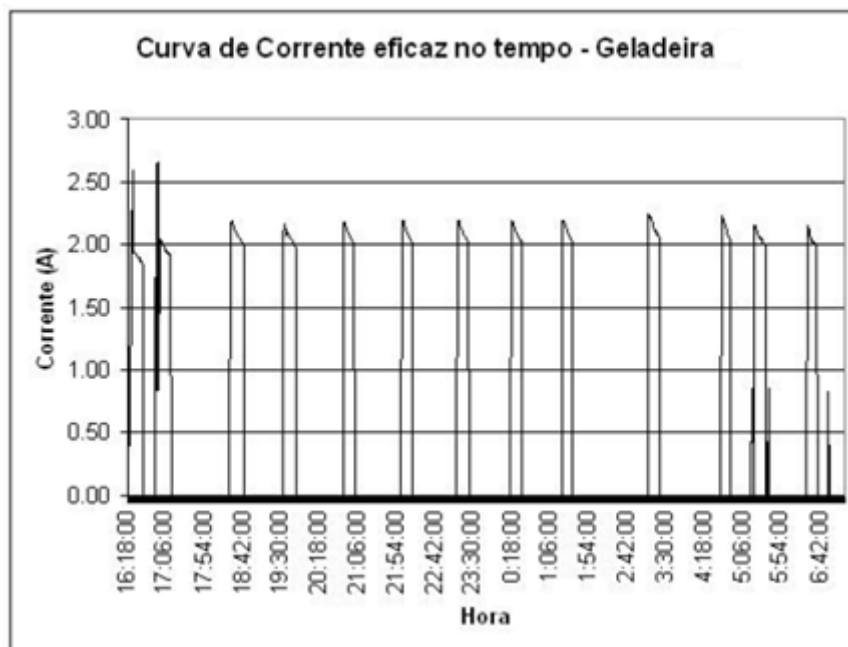


Figura 23 - Corrente eficaz ao longo do tempo  
Fonte: PIRES, 2006

O conteúdo harmônico da forma de onda da Figura 23 é mostrado na Tabela 08. Este foi apresentado até o 9º harmônico, pois os harmônicos 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 8 - 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

Fonte: PIRES, 2006

Pela forma de onda verificada na Figura 23 é comprovado que este tipo de aparelho não é uma carga não linear, visto que sua onda de corrente é muito semelhante a uma senóide, e, com isso, apresenta uma baixa distorção harmônica de corrente. Pelos dados da Tabela 08 verifica-se que o nível harmônico de maior significado é o 3º harmônico e que os demais harmônicos não têm níveis altos.

### 3.2.7. Condicionadores de Ar

Contêm um controle de temperatura na qual desligam o seu compressor de resfriamento quando a temperatura ambiente chega ao nível estipulado. Esses aparelhos possuem 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. As Figuras 24 e 25 mostram as formas de onda de corrente nos modos resfriar e ventilar respectivamente.

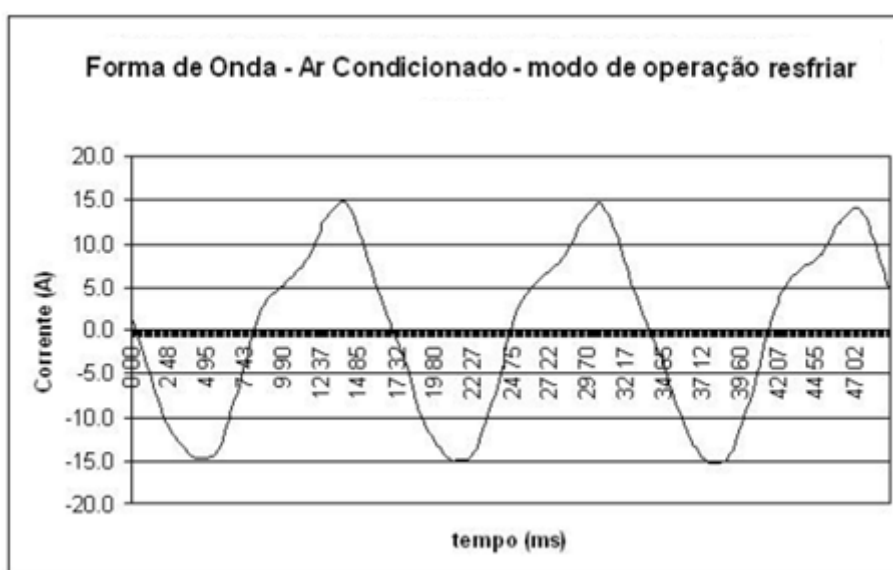


Figura 24- Forma de onda de corrente de um condicionador de ar no modo resfriar  
Fonte: PIRES, 2006

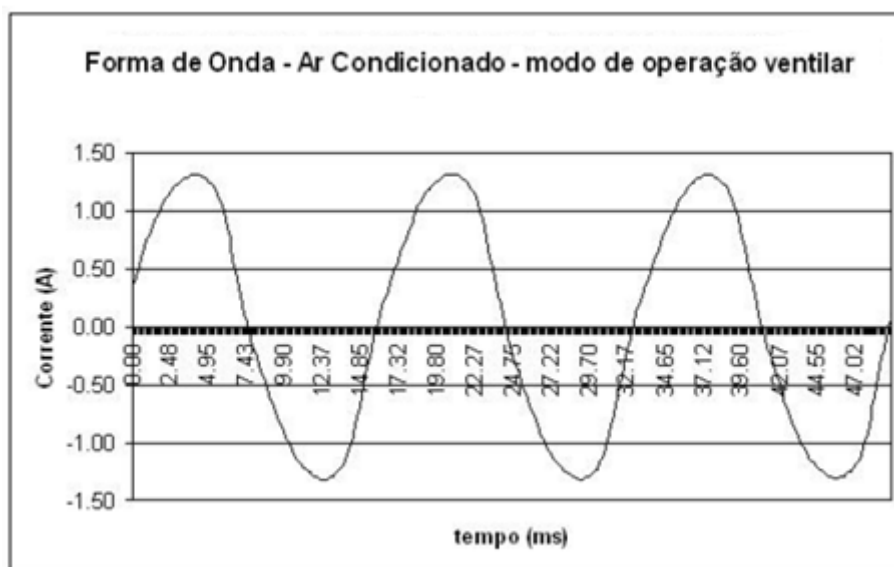


Figura 25 - Forma de onda de corrente de um condicionador de ar no modo ventilar  
Fonte: PIRES, 2006

Na Figura 24 percebe-se a diferença entre o semiciclo positivo e negativo da forma de onda apresentada. Este fato é melhor visualizado no conteúdo harmônico desta forma de onda, apresentado na Tabela 09. Decompondo a forma de onda, a presença de um harmônico de ordem par representa uma diferença entre os semiciclos. Também foi incluído o conteúdo harmônico da Figura 25. Nos dois casos, o último harmônico apresentado foi o 9°.

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

Harmônicos	Resfriar		Ventilar	
	$I_{rms} = 9,856 \text{ A}$		$I_{rms} = 0,967 \text{ A}$	
	THD <sub>i</sub> = 17,31%		THD <sub>i</sub> = 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

Fonte: PIRES, 2006

As ondas de corrente verificadas nas Figuras 24 e 25 demonstram que há distorção harmônica no funcionamento deste tipo de aparelho, e que a distorção é maior no modo de resfriar, mas ambas as ondas se assemelham a uma onda senoidal

demonstrando que este tipo de aparelho não é uma carga não linear. Pelos dados da Tabela 09 é verificado que ambos os modos de funcionamento têm maior grau de distorção no 3º harmônico, e que o modo resfriar tem um grande nível de 2º harmônico.

### 3.2.8. 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. Uma exceção neste grupo seria o aparelho de micro-ondas. Sua distorção de corrente é facilmente explicada por não utilizar uma resistência, e sim um propulsor de micro-ondas para aquecer os alimentos.

A curva de corrente do aparelho de micro-ondas é mostrada na Figura 26 e seu conteúdo harmônico na Tabela 10. Também há uma pequena distorção do semiciclo positivo para o semiciclo negativo, imperceptível na Figura 26, porém evidenciado quando analisado o espectro harmônico de corrente, que demonstra a presença de harmônico de ordem par. O último harmônico mais significativo foi o 11º, sendo os outros harmônicos com valores menores que 1%.

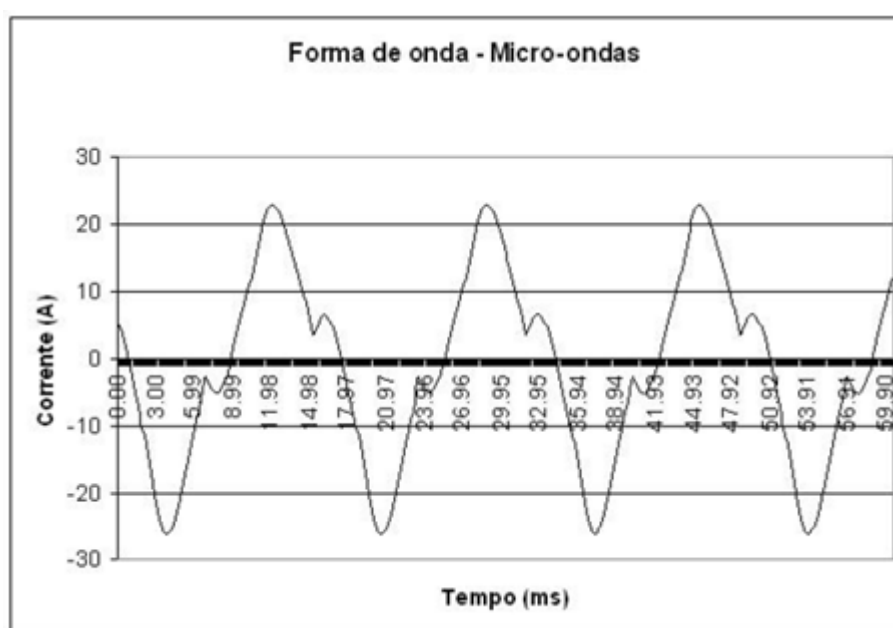


Figura 26 - Forma de onda de corrente de um aparelho de micro-ondas  
Fonte: PIRES, 2006

**Tabela 10– Conteúdo harmônico de um aparelho de micro-ondas**

Harmônicos	$I_{rms} = 13,459 \text{ A}$	
	$THD_i = 29,24\%$	
	Fator de crista = 1,64	
	<b>Módulo (%)</b>	<b>Ângulo (graus)</b>
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

Fonte: PIRES, 2006

A onda de corrente verificada na Figura 26 demonstra que há distorção harmônica no funcionamento deste tipo de aparelho, mas que a mesma tem semelhança com uma onda senoidal, demonstrando que este tipo de aparelho tem baixa distorção harmônica. Os dados da Tabela 10 demonstram que o maior grau de distorção deste tipo de aparelho é no 3º harmônico, e que os demais harmônicos também têm um nível considerável de distorção principalmente o de 2º harmônico.

### 3.2.9. Motores

Esta última categoria de eletrodomésticos emprega algum tipo de motor para seu funcionamento. A distorção de corrente nesta categoria é geralmente baixa.

A Figura 27 mostra a curva de corrente típica desta categoria, sendo a curva de uma lavadora de roupas. Seu espectro harmônico é apresentado na Tabela 11, limitado ao 7º harmônico, pois os de maior ordem apresentam valores insignificantes, abaixo de 0,90%.



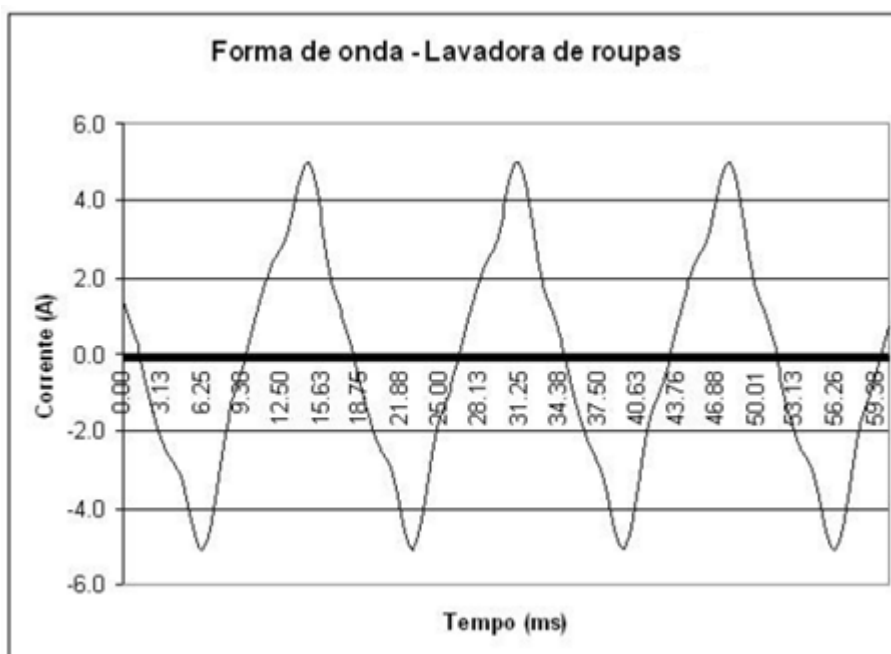


Figura 27- Forma de onda de corrente típica de eletrodomésticos com motores  
Fonte: PIRES, 2006

Tabela 11- Conteúdo harmônico de uma lavadora de roupas

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

Fonte: PIRES, 2006

Verificando a forma de onda de corrente da Figura 27 observa-se uma pequena distorção harmônica no funcionamento deste tipo de aparelho; com isso, a sua forma tem semelhança com a forma de uma onda senoidal, demonstrando que este tipo de aparelho não é uma carga não linear. Os dados da Tabela 11 demonstram que o maior grau de distorção deste tipo de aparelho é no 3º harmônico, e que o 5º harmônico também têm um nível considerável de distorção, o que pode ocasionar problemas no funcionamento.

### 3.3 NORMALIZAÇÃO DE HARMÔNICOS

Atualmente existem normas que estabelecem critérios de avaliação e medição dos distúrbios causados pelas cargas não lineares, conforme descritos a seguir (HADDAD, 2004).

- EN50160: é uma nova norma que engloba flicker, inter-harmônicos<sup>4</sup>, desvios/variações de tensão.
- IEC 61000-2-2: é uma norma para sistemas públicos de baixa tensão (240 a 420 V) quanto aos níveis de compatibilidade de interferências eletromagnéticas de baixa frequência (0 kHz à 9 kHz).
- IEC 61000-3-2: é a norma que define limites de correntes harmônicas que podem ser emitidos por aparelhos que trabalham com uma corrente eficaz menor que 16 A por fase.
- IEC 61000-3-4: é a norma que define limites de correntes harmônicas que podem ser emitidos por aparelhos que trabalham com uma corrente eficaz acima de 16 A, e abaixo de 75 A por fase.
- IEC 61000-4-15: é uma norma de medição de flicker que inclui especificações para medidores.
- IEC 61000-4-7: descreve uma técnica de medição padrão para harmônicos.
- IEC 868: oferece especificações para aparelhos de medição de flicker. Escrita em 1986, foi substituída pela IEC 61000-4-15.
- IEEE 519 (2014): é uma prática recomendada pela IEEE; descreve níveis aceitáveis de harmônicos para o ponto de entrega de energia pela concessionária; esta é a norma atualmente mais utilizada pelas concessionárias de energia nos EUA.
- IEEE 1159 (1995): é uma prática recomendada pela IEEE para monitoração e interpretação apropriada dos fenômenos que causam problemas de qualidade de energia; três grupos da IEEE estão expandindo a norma 1159, com foco na

---

<sup>4</sup> Inter-harmônicos são diferenciados dos harmônicos de rede por possuírem frequência múltiplas não-inteiras da fundamental. São provocados pela presença na rede de circuitos ciclo conversores, filtros ativos, drivers lineares de motores, ou dispositivos à base de arco voltaico.

medição (P1159.1), caracterização (P1159.2), e intercâmbio de informações (P1159.3) de qualidade de energia.

- CBEMA: Computer and Business Equipment Manufacturers Association; a CBEMA virou ITI em 1994; a curva CBEMA descreve tensões de operação aceitáveis em termos de variação de magnitude ao longo do tempo; distúrbios que caíam fora da curva podem causar danos aos aparelhos.

### 3.3.1. Recomendação da Norma IEEE 519-2014

O aspecto fundamental e inovador da norma IEEE-519, é a divisão da responsabilidade do problema de harmônicos entre os consumidores e a concessionária. Neste caso, os limites de distorções de tensão no ponto de ligação, conforme Tabela 12, são de responsabilidade da concessionária, e os limites de distorção de corrente, conforme Tabela 13, neste mesmo ponto, são de responsabilidade dos consumidores. A recomendação da norma IEEE 519 limita a distorção dos harmônicos no Ponto de Acoplamento Comum (PAC – Ponto físico que liga a concessionária e o consumidor), sem levar em consideração cada consumidor individualmente (HADDAD, 2004).

**Tabela 12 - Limites de distorção de tensão – IEEE 519-2014**

Faixa de tensão	Distorção Individual por harmônico (%)	Distorção total de tensão – THD <sub>v</sub> (%)
$V \leq 69 \text{ kV}$	3,0	5,0
$69 \text{ kV} < V < 161 \text{ kV}$	1,5	2,0
$V \geq 161 \text{ kV}$	1,0	1,5

**Fonte: IEEE 519, 2014**

**Tabela 13 - Limites de distorção de corrente para sistemas de distribuição com tensão menor que 69 kV – IEEE 519-2014**

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

**Fonte: IEEE 519, 2014**

### 3.3.2. Recomendação da Norma IEC 61000-2-2

A norma europeia IEC1000, referência mundial para as medições dos níveis harmônicos em sistemas de distribuição, fornece as principais características da tensão, no ponto de entrega ao consumidor, em baixa tensão, conforme Tabela 14, e em média tensão, sob condições normais de operação (HADDAD, 2004).

**Tabela 14 - Limites de harmônicos individuais em sistemas públicos de baixa tensão (240 à 420 V) – IEC 61000-2-2**

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	$0,2 + 1,3 \times 25/h$				
THDv (até o 40º harmônico) < 8%					

\* Valores em relação à tensão fundamental

**Fonte: IEC 61000-2-2, 2004**

### 3.3.3. Recomendação da Norma IEC 61000-3-2

Aparelhos que trabalham com uma corrente eficaz menor que 16 A por fase são divididos nas quatro classes a seguir (PIRES, 2006):

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

Os limites para os equipamentos classe A estão expostos na Tabela 15. Para os equipamentos classe B basta utilizar os índices da Tabela 15 e multiplicá-los por 1,5. A Tabela 16 apresenta os limites para equipamentos classe C enquanto que a Tabela 17 mostra os limites para os equipamentos classe D (PIRES, 2006).

**Tabela 15 - Limites de corrente harmônica para equipamentos classe A conforme norma IEC 61000-3-2**

Ordem harmônica (h)	Máxima corrente (A)	Ordem harmônica (h)	Máxima corrente (A)
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		

Fonte: PIRES, 2006

**Tabela 16 - Limites de corrente harmônica para equipamentos classe C conforme norma IEC 61000-3-2**

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

Fonte: PIRES, 2006

**Tabela 17 - Limites de corrente harmônica para equipamentos classe D conforme norma IEC 61000-3-2**

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

**Fonte: PIRES, 2006**

#### 3.3.4. Recomendação da Norma IEC 61000-3-4:

Aparelhos que trabalham com uma corrente eficaz maior que 16 A e menor que 75 A tem seus limites harmônicos fixados conforme a Tabela 18 (PIRES, 2006):

**Tabela 18 - Limites de corrente harmônica para equipamentos com corrente entre 16 A e 75 A conforme norma IEC 61000-3-4**

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

**Fonte: PIRES, 2006**

#### 3.3.5. Recomendação da ANEEL

A recomendação brasileira através do PRODIST – Módulo 8 (ANEEL, 2010) sugere limites harmônicos por consumidor, conforme a Tabela 19, e globais, conforme a Tabela 20, para sistemas de tensões que variam de menos de 1 kV até 230 kV.

**Tabela 19 – Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em percentagem da tensão fundamental)**

Ordem Harmônica	Distorção Harmônica Individual de Tensão [%]				
	$V_n \leq 1 \text{ kV}$	$1 \text{ kV} < V_n \leq 13,8 \text{ kV}$	$13,8 \text{ kV} < V_n \leq 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} < V_n < 230 \text{ kV}$	
Ímpares não múltiplas de 3	5	7,5	6	4,5	2,5
	7	6,5	5	4	2
	11	4,5	3,5	3	1,5
	13	4	3	2,5	1,5
	17	2,5	2	1,5	1
	19	2	1,5	1,5	1
	23	2	1,5	1,5	1
	25	2	1,5	1,5	1
	>25	1,5	1	1	0,5
Ímpares múltiplas de 3	3	6,5	5	4	2
	9	2	1,5	1,5	1
	15	1	0,5	0,5	0,5
	21	1	0,5	0,5	0,5
	>21	1	0,5	0,5	0,5
Pares	2	2,5	2	1,5	1
	4	1,5	1	1	0,5
	6	1	0,5	0,5	0,5
	8	1	0,5	0,5	0,5
	10	1	0,5	0,5	0,5
	12	1	0,5	0,5	0,5
	>12	1	0,5	0,5	0,5

Fonte: ANEEL, 2010

**Tabela 20 – Valores de referência globais das distorções harmônicas totais (em percentagem da tensão fundamental)**

<i>Tensão nominal do Barramento</i>	<i>Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT) [%]</i>
$V_N \leq 1 \text{ kV}$	10
$1 \text{ kV} < V_N \leq 13,8 \text{ kV}$	8
$13,8 \text{ kV} < V_N \leq 69 \text{ kV}$	6
$69 \text{ kV} < V_N < 230 \text{ kV}$	3

Fonte: ANEEL, 2010

#### **4. ANÁLISE DE HARMÔNICOS DE CORRENTE EM TRANSFORMADORES DO SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO**

As diferentes cargas não lineares que compõem uma carga residencial ou uma carga comercial de pequeno porte não podem ser analisadas individualmente para o projeto de um filtro de harmônicos. Essas cargas devem ser analisadas como uma carga única para uma mensuração correta dos níveis de harmônicos que a instalação possui, mas o projeto de um filtro individual para cada tipo de instalação não viabiliza a correção dos níveis de harmônicos na rede secundária de distribuição visto que a quantidade de cada nível de harmônico injetado na rede pelas instalações é diferente.

Para a correta mensuração dos níveis de harmônicos encontrados na rede secundária de distribuição é necessário que a medição desses níveis seja feita no secundário do transformador da rede.

##### **4.1 HARMÔNICOS DE CORRENTE GERADOS POR CONSUMIDORES**

A quantidade de harmônicos de correntes gerados pelos consumidores residenciais e comerciais de pequeno porte é diferente para cada tipo de consumidor, depende do horário em que as cargas não lineares estão sendo utilizadas e também do nível de consumo que cada um tem.

Para a análise dos harmônicos de corrente dos consumidores, serão utilizados os dados colhidos em medição de campo pela REDE-CELPA (BEZERRA, 2001) no conjunto Carmelândia, no edifício Miracy e no edifício Santa Lúcia da cidade de Belém no estado do Pará. Esses dados são referentes a consumidores residenciais com padrão de renda baixo, médio e alto.

As medições foram feitas nas caixas de medição dos consumidores com a utilização de instrumento de análise de qualidade de energia – FLUKE 43, modelo monofásico, com capacidade nominal para 600 V e 500 A. Este instrumento faz decomposição harmônica até a 51ª ordem, e expressa esta decomposição espectral em um gráfico de barras.



#### 4.1.1. Níveis Harmônicos de Consumidores de Baixa Renda

As medições realizadas no conjunto residencial Carmelândia foram realizadas em 12 diferentes residências com um total de 180 medições, a Figura 28 demonstra os níveis harmônicos característicos de consumidores de baixa renda. Analisando os níveis harmônicos apresentados é verificado que os níveis mais significativos são os de 3ª, 5ª e 7ª ordem e que seu THDi é de 19,20%.

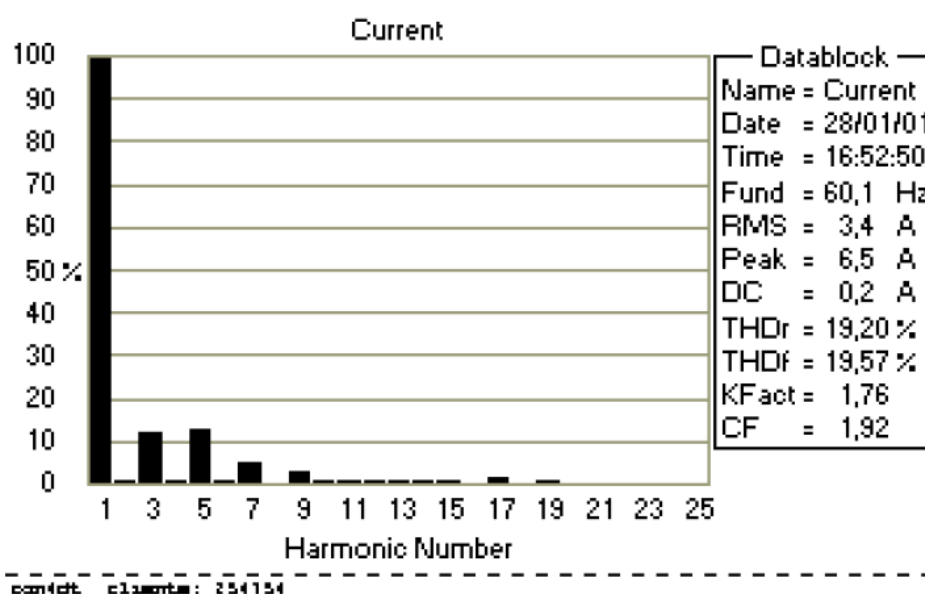


Figura 28 – Espectro de corrente - Consumidor do conjunto residencial Carmelândia  
Fonte: BEZERRA, 2001

#### 4.1.2. Níveis Harmônicos de Consumidores de Média Renda

As medições realizadas no edifício Miracy foram realizadas em 12 diferentes apartamentos, no quadro de bombas, no quadro do elevador e no quadro geral do condomínio, com um total de 300 medições. Para a caracterização dos níveis harmônicos foi selecionado o espectro harmônico de um dos apartamentos. A Figura 29 demonstra os níveis harmônicos característicos de consumidores de média renda. Analisando os níveis harmônicos apresentados é verificado que os níveis mais significativos são os de 3ª, 5ª e 7ª ordem e que seu THDi é de 20,35%.

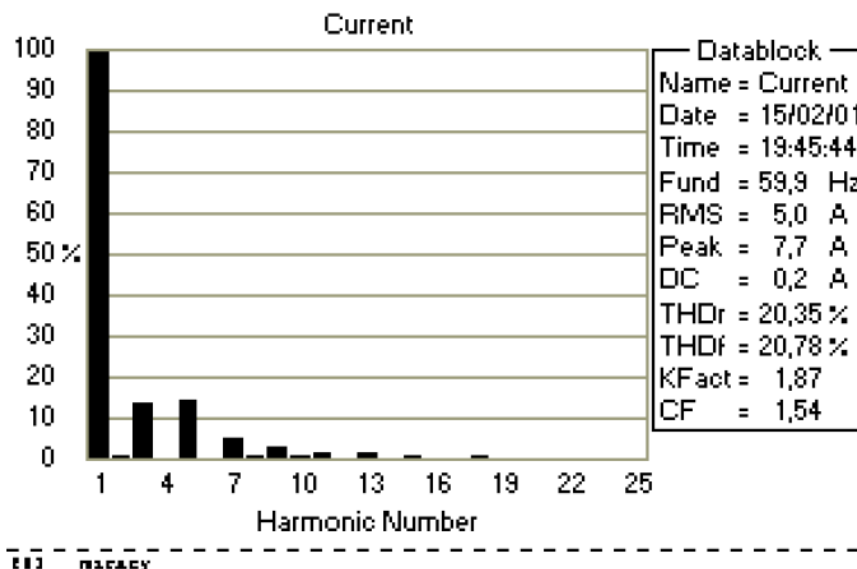


Figura 29 – Espectro de corrente - Consumidor de renda média do edifício Miracy  
Fonte: BEZERRA, 2001

#### 4.1.3. Níveis Harmônicos de Consumidores de Alta Renda

As medições realizadas no edifício Santa Lúcia – Bloco A foram realizadas em 12 diferentes apartamentos, no quadro de bombas, no quadro do elevador e no quadro geral do condomínio, com um total de 660 medições. Para a caracterização dos níveis harmônicos foi selecionado o espectro harmônico de um dos apartamentos. A Figura 30 demonstra os níveis harmônicos característicos de consumidores de alta renda. Analisando os níveis harmônicos apresentados é verificado que os níveis mais significativos são os de 3ª, 5ª, 7ª e 9ª ordem e que seu THDi é de 30,81%.

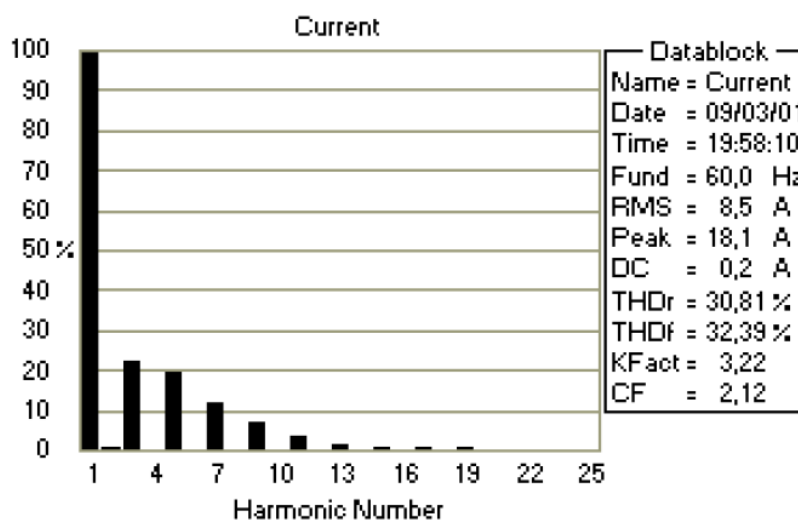


Figura 30 – Espectro de corrente - Consumidor de renda alta do edifício Santa Lúcia  
Fonte: BEZERRA, 2001

#### 4.1.4. Níveis Harmônicos no Secundário do Transformador

Para a mensuração correta dos níveis de harmônicos que são injetados na rede pelo conjunto de cada tipo de consumidor, conforme as classes, foram feitas medições no secundário do transformador de distribuição. Para a comparação entre os diferentes níveis de harmônicos foram utilizados os espectros harmônicos do transformador do edifício Miracy e do transformador do edifício Santa Lúcia. Na Figura 31 é mostrado os níveis harmônicos do secundário do transformador do edifício Miracy, que possui THDi de 10,78%. Na Figura 32 é mostrado os níveis harmônicos do secundário do transformador do edifício Santa Lúcia, que possui THDi de 12,60%.

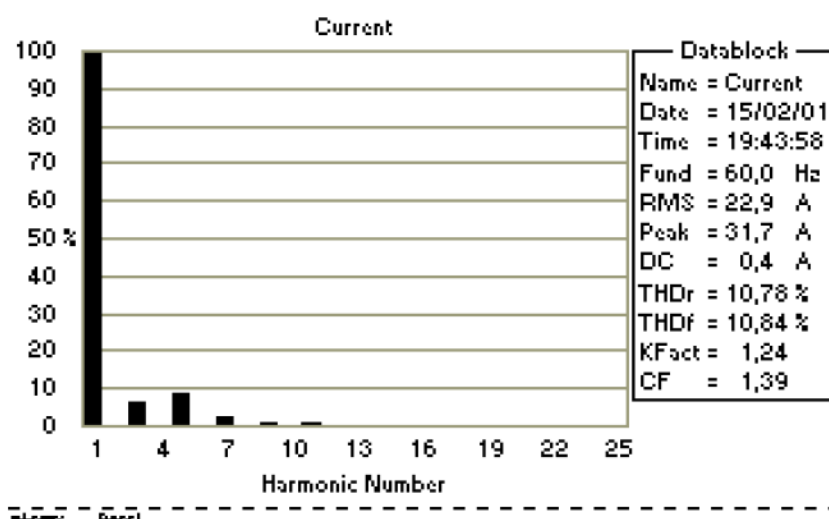


Figura 31 – Espectro de corrente – Secundário do transformador do edifício Miracy  
Fonte: BEZERRA, 2001

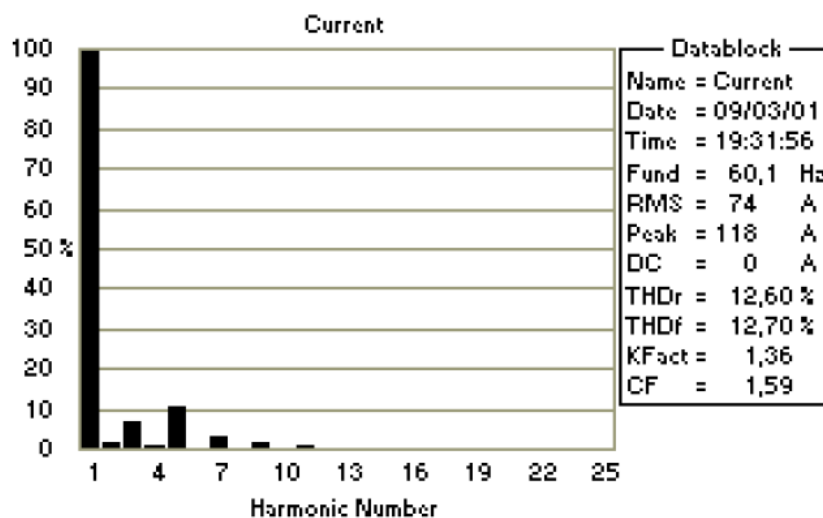


Figura 32 – Espectro de corrente – Secundário do transformador do edifício Santa Lúcia  
Fonte: BEZERRA, 2001

## 4.2 FILTRO PASSIVO RLC SINTONIZADO DE HARMÔNICO

Para a correção das distorções de harmônicos encontradas no secundário dos transformadores do edifício Miracy e Santa Lúcia será projetado um filtro passivo do tipo RLC com sua sintonia ajustada para a frequência um pouco abaixo do 5º harmônico. Para cada um dos transformadores será projetado um filtro em separado devido ao diferente nível harmônico que apresentam.

### 4.2.1. Cálculo dos Parâmetros dos Filtros

Para o cálculo dos parâmetros do filtro são necessários os dados de placa do transformador no qual o filtro será acoplado. Devido à falta dos dados dos transformadores do edifício Miracy e Santa Lúcia será adotado os dados construtivos de transformadores de distribuição da marca WEG. Para o edifício Miracy estão sendo utilizados os dados de um transformador de 75 kVA e para o edifício Santa Lúcia estão sendo utilizados os dados de um transformador de 112,5 kVA conforme a Tabela 21.

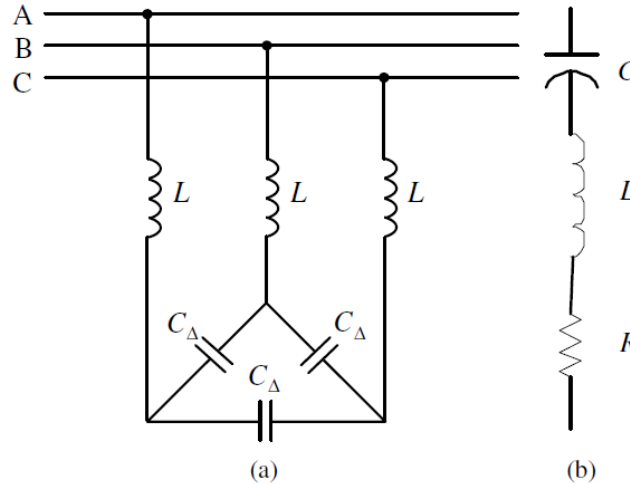
**Tabela 21 - Características dos transformadores de 75 kVA e 112,5 kVA**

	Transformador Edifício Miracy	Transformador Edifício Santa Lúcia
Potência	75 kVA	112,5 kVA
Norma de fabricação	NBR 5440	NBR 5440
Refrigeração	ONAN - Óleo natural, ar natural - Imerso em óleo isolante mineral	ONAN - Óleo natural, ar natural - Imerso em óleo isolante mineral
Classe de tensão	15 kV	15 kV
Tensão primária	13,8 / 13,2 / 12,6 kV	13,8 / 13,2 / 12,6 kV
Tensão secundária	220 / 127 V	220 / 127 V
Primário	Triângulo (delta)	Triângulo (delta)
Secundário	Estrela com neutro acessível	Estrela com neutro acessível
Deslocamento angular	30°	30°
Frequência nominal	60 Hz	60 Hz
Perdas em vazio (perdas no ferro)	295 W	390 W
Perdas totais	1395 W	1890 W
Corrente de excitação	2,7 %	2,5 %
Impedância a 75°C	3,5 %	3,5 %

Fonte: Adaptado de WEG, 2016

A configuração do filtro a ser utilizado na rede secundária de cada um dos transformadores é a com a ligação dos capacitores em  $\Delta$  (delta) conforme

demonstrado na Figura 33(a), o circuito demonstrado na Figura 33(b) é a representação do filtro por fase.



**Figura 33 - Modelos de circuito do filtro. (a) Configuração trifásica. (b) Circuito equivalente por fase com a resistência efetiva do filtro.**  
**Fonte: ALVES, 2010**

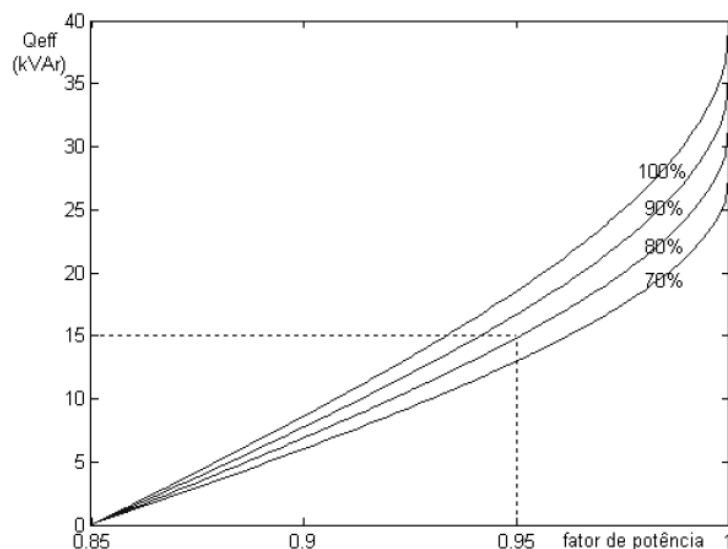
Esta configuração foi escolhida por razões de custo, visto que na configuração  $\Delta$  a capacitância do circuito possui  $\frac{1}{3}$  da capacitância da configuração em Y, o que reduz a quantidade de material necessário para se obter a mesma potência reativa. Este fato é válido apenas para tensões abaixo de 600 V (ALVES, 2010).

Para o cálculo dos parâmetros do filtro está sendo considerado que o carregamento de cada um dos transformadores é de 100% da sua potência nominal, e a correção de fator de potência é para 95% ( $FP = 0,95$ ). A potência reativa requerida para compensação pelo filtro é o primeiro parâmetro a ser determinado, esta potência requerida é a potência efetiva do filtro ( $Q_{eff}$ ). Esta potência é determinada pela expressão a seguir (ALVES, 2010):

$$Q_{eff} = \gamma |S| fp_0 \left[ \tan(\arccos fp_0) - \frac{\sqrt{1-fp^2}}{fp} \right]$$

Nesta expressão  $\gamma$  é o carregamento do transformador,  $|S|$  é a potência aparente nominal do transformador,  $fp_0$  é o fator de potência antes da compensação reativa, e  $fp$  é o fator de potência desejado.

Na Figura 34 é demonstrado os gráficos de potência reativa de compensação em função do fator de potência, parametrizados com carregamentos de 70, 80, 90 e 100% para um transformador de 75 kVA, nestes gráficos é suposto que o valor inicial de fator de potência é igual a 0,85 (ALVES, 2010).



**Figura 34 - Potência reativa efetiva de projeto versus fator de potência para um transformador de 75 kVA**  
**Fonte: ALVES, 2010**

Na Tabela 22 são demonstrados os valores de reatância efetiva para transformadores de 45 kVA, 75 kVA e 112,5 kVA com o carregamento de 70, 80, 90 e 100% com a correção de fator de potência para 0,95.

**Tabela 22 - Potências reativas a frequência fundamental para diferentes transformadores e fator de potência final de 0,95**

Potência do transformador (kVA)	Potência reativa efetiva do filtro (kVAr) versus carregamento $\gamma$			
	70%	80%	90%	100%
45	8	9	10	12
75	13	15	17	19
112,5	20	23	25	28

**Fonte: ALVES, 2010**

Após a definição da potência efetiva do filtro ( $Q_{\text{eff}}$ ) pela Tabela 22 é feito o cálculo da reatância efetiva do filtro ( $X_{\text{eff}}$ ) por fase utilizando-se a expressão a seguir:

$$X_{eff} = \frac{V_{ff}^2}{Q_{eff}} \quad (5)$$

A frequência de ressonância do filtro ( $f_r$ ) é a verdadeira frequência de sintonia do filtro e sua ordem de harmônico é  $h_r$ . Conforme verificado nos gráficos apresentados nas Figuras 31 e 32 o harmônico a ser filtrado em ambos os transformadores é o de 5ª ordem que possui a frequência de 300 Hz. Para se evitar a ressonância entre o filtro e a rede na qual o mesmo será instalado, considerando que com o passar do tempo existem alterações nos parâmetros do filtro, é escolhida uma frequência um pouco abaixo da frequência do harmônico a ser filtrado, neste caso a frequência  $f_r$  escolhida é de 288 Hz e o  $h_r$  é de 4,8.

Com estes dois parâmetros definidos é necessário o cálculo da capacitância  $C$  e da indutância  $L$  do filtro de modo que o aparelho apresente uma baixa impedância para a componente harmônica da corrente a ser filtrada. Isto lhe confere uma importante característica que é de se comportar de modo capacitivo abaixo de sua frequência de ressonância, contribuindo para a compensação da potência reativa em relação à frequência da rede e quando acima da frequência de ressonância o comportamento do filtro será indutivo (PIRES, 2010).

A partir do valor da reatância efetiva do filtro podemos calcular os valores de reatância do capacitor ( $X_C$ ) e de reatância do indutor ( $X_L$ ) pelas expressões a seguir:

$$X_{eff} = X_C - X_L \quad (6)$$

$$X_C = h_r^2 \cdot X_L \quad (7)$$

$$X_C = \frac{X_{eff} \cdot h_r^2}{h_r^2 - 1} \quad (8)$$

$$\text{definindo: } a = \frac{h_r^2}{h_r^2 - 1} \quad (9)$$

$$X_C = a X_{eff} \quad (10)$$

$$X_L = \frac{X_C}{h_r^2} \quad (11)$$

Para o cálculo dos valores de  $C$  e de  $L$  são utilizadas as expressões a seguir:

$$C = \frac{1}{\omega X_C}, \text{ sendo } \omega = 2\pi f \quad (12)$$

$$C_{\Delta} = \frac{C}{3} \quad (13)$$

$$fr = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{LC}} \quad (14)$$

$$L = \frac{1}{4\pi^2 \cdot fr^2 \cdot C} \quad (15)$$

*Sendo  $f$  a frequência fundamental da rede e  $C_{\Delta}$  o valor da capacitância na ligação em triângulo.*

Com os parâmetros de  $C$  e  $L$  calculados é então calculada a potência reativa do capacitor ( $Q_C$ ) e do indutor ( $Q_L$ ). A potência reativa do capacitor à frequência fundamental da rede, quando ligado em  $\Delta$ , é calculada pela expressão a seguir:

$$Q_C = 3 \cdot \omega \cdot C_{\Delta} \cdot a^2 \cdot V_{ff}^2 \quad (16)$$

A potência reativa do indutor é calculada pela diferença entre o valor de  $Q_C$  e de  $Q_{eff}$  conforme a expressão a seguir:

$$Q_L = Q_C - Q_{eff} \quad (17)$$

A seletividade do filtro é definida pelo fator de qualidade do filtro  $Q$ . Este fator de qualidade tem um valor elevado nos filtros passivos sintonizados variando entre 30 e 80, para o filtro que está sendo projetado foi definido o valor 55 que é a média entre o valor máximo e mínimo apresentado (PIRES, 2010). Utilizando a expressão do fator de qualidade do filtro é calculado o valor da resistência  $R$  do circuito equivalente por fase do filtro mostrado na Figura 33(b). A expressão é mostrada a seguir:

$$Q = \frac{\sqrt{\frac{L}{C}}}{R} \quad (18)$$

No circuito do filtro, os capacitores e os indutores são ligados em série, implicando que esses elementos individualmente estarão a tensões fundamentais diferentes da tensão da rede.



Podemos calcular o valor da tensão sobre o capacitor ( $V_C$ ) pela expressão a seguir:

$$V_C = X_C \cdot I_C \quad (19)$$

*Sendo  $I_C$  a corrente que passa pelo capacitor*

A tensão no capacitor na configuração trifásica em ligação  $\Delta$  é obtida substituindo a expressão (8) na expressão (19) e tendo  $I_C = I_{ff}$ , conforme as expressões a seguir:

$$V_C = \frac{X_{eff} \cdot hr^2}{hr^2 - 1} \cdot I_{ff} \quad (20)$$

$$V_{ff} = X_{eff} \cdot I_{ff} \quad (21)$$

$$V_C = \frac{V_{ff} \cdot hr^2}{hr^2 - 1} \quad (22)$$

$$V_C = a \cdot V_{ff} \quad (23)$$

*Sendo  $I_{ff}$  a corrente de linha e  $V_{ff}$  a tensão de linha nominal da rede*

Os resultados obtidos dos cálculos para a montagem do filtro RLC passivo sintonizado, para cada um dos transformadores, são apresentados na Tabela 23.

**Tabela 23 - Dados construtivos do filtro RLC**

	Transformador			Transformador	
	75 kVA	112,5 kVA		75 kVA	112,5 kVA
$V_{ff}$	220 V	220 V	$X_L$	0,116 $\Omega$	0,078 $\Omega$
Fator de qualidade – Q	55	55	C	996,06 $\mu F$	1,468 mF
$Q_{eff}$	19 kvar	28 kvar	$C_{\Delta}$	332,02 $\mu F$	489,33 $\mu F$
$X_{eff}$	2,547 $\Omega$	1,729 $\Omega$	L	306,62 $\mu H$	208,04 $\mu H$
Fr	288 Hz	288 Hz	$Q_C$	19,86 kvar	29,27 kvar
Hr	4,8	4,8	$Q_L$	0,86 kvar	1,27 kvar
A	1,0454	1,0454	R	10,09 m $\Omega$	6,845 m $\Omega$
$X_C$	2,663 $\Omega$	1,807 $\Omega$	$V_C$	230 V	230 V

**Fonte: Autoria própria, 2016**

## 5. SIMULAÇÃO E RESULTADOS DO FILTRO PASSIVO RLC SINTONIZADO

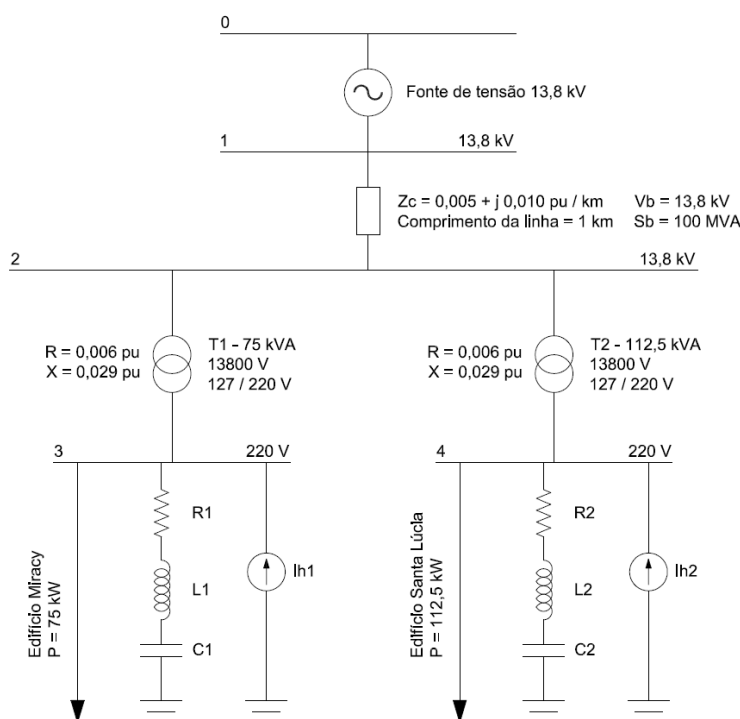
Com os filtros passivos calculados é necessário a simulação dos mesmos para se verificar o desempenho na rede para a mitigação dos harmônicos medidos no transformador do edifício Miracy e do edifício Santa Lúcia.

A simulação dos filtros foi feita com o uso do *software* HarmZs® do Cepel em um dos laboratórios da instituição UTFPR do campus Curitiba. Os dados coletados e os resultados obtidos com a simulação dos filtros estão demonstrados neste capítulo.

### 5.1 DADOS PARA A SIMULAÇÃO DO FILTRO

Para a simulação do filtro através do *software* HarmZs® é necessário o cálculo dos valores de corrente de cada harmônico e dos valores de impedância dos transformadores para elaboração do programa de simulação.

A rede elétrica, os transformadores, os filtros, a carga de cada prédio e a fonte dos harmônicos estão representados no diagrama unifilar da Figura 35 para maior facilidade da visualização da rede analisada.



**Figura 35 - Diagrama unifilar da rede para simulação dos filtros**  
**Fonte: Autoria própria, 20016**

### 5.1.1. Dados dos Transformadores de Distribuição

A partir dos dados construtivos de cada um dos transformadores, apresentados na Tabela 21, e considerando a relação de 1/5 entre os valores de  $R_{pu}$  e de  $X_{pu}$ , foram obtidos os valores de impedância, tensão de linha no secundário, e corrente nominal no lado secundário dos transformadores conforme apresentado na Tabela 24.

**Tabela 24 - Dados dos transformadores para simulação dos filtros**

	Transformador	
	75 kVA	112,5 kVA
$I_n$	196,82 A	295,24 A
$V_{ff}$	220 V	220 V
DTHi	10,78%	12,60%
$Z_{pu}$	0,035 pu	0,035 pu
$R_{pu}$	0,006 pu	0,006 pu
$X_{pu}$	0,029 pu	0,029 pu
$Z_B$	0,6453 $\Omega$	0,4302 $\Omega$
$Z_{\Omega}$	0,02259 $\Omega$	0,01506 $\Omega$

Fonte: Autoria própria, 2016

Na Tabela 24 o parâmetro  $Z_B$  representa a impedância base, calculada pela divisão do quadrado de  $V_{ff}$  pelo valor da potência nominal do transformador, usada para a conversão do valor de impedância  $Z_{pu}$  para o valor de impedância em ohms que é representado pelo parâmetro  $Z_{\Omega}$ .

### 5.1.2. Cálculo dos Harmônicos de Corrente nos Transformadores

A partir dos gráficos de espectro harmônico dos transformadores, apresentados nas Figuras 31 e 32, foram calculados os valores de corrente dos níveis harmônicos de cada um dos mesmos obedecendo a DHTi de 10,78% para o transformador do edifício Miracy e a DHTi de 12,60% para o transformador do edifício Santa Lúcia. Os valores encontrados estão representados na Tabela 25.

Tabela 25 - Dados dos harmônicos de corrente para simulação do filtro

Transformador Edifício Miracy			Transformador Edifício Santa Lúcia		
Potência nominal	75 kVA		Potência nominal	112,5 kVA	
DHTi	10,78%		DHTi	12,60%	
Ordem do harmônico	Percentual de distorção	Corrente	Ordem do harmônico	Percentual de distorção	Corrente
3°	5%	9,84 A	3°	6%	17,71 A
5°	9%	17,71 A	5°	11%	32,48 A
7°	3%	5,90 A	7°	3%	8,86 A
9°	1%	1,97 A	9°	1%	2,95 A

Fonte: Autoria própria, 2016

Os harmônicos de 11° ordem, de ambos os transformadores, não foram considerados para a simulação do filtro por apresentarem um percentual de distorção muito baixo.

### 5.1.3. Simulação do Filtro com o Programa HarmZs®

Nesta seção é apresentado o código fonte elaborado para a simulação do filtro no *software* Harmzs®. Neste código foi incluído uma carga resistiva, em cada um dos transformadores, com o valor nominal do transformador devido a característica de programação do simulador. As linhas de programação estão apresentadas em duas colunas. Os códigos e os parâmetros usados descrevem para o programa a configuração elétrica a ser simulada.

DGERAIS  
60.0000 100 0 0  
FIM

DBAR  
1 "BAR 1" 13.8 0 1 1  
2 "BAR 2" 13.8 0 1 1  
3 "BAR 3" 0.22 0 2 3  
4 "BAR 4" 0.22 0 2 3  
FIM

DGBT  
1 13.8  
2 0.22  
FIM

DARE  
1 Area\_Media\_Tensao

3 Area\_Baixa\_Tensao  
FIM

DMAQ  
1 1  
FIM

DLIN  
1 2 1 1 0.005 0.010 0 1 0  
FIM

DTR2  
2 13.8 0 3 0.22 30 0.006 0.029 0.075 1 1  
2 13.8 0 4 0.22 30 0.006 0.029 0.1125 1 1  
FIM

DEQP

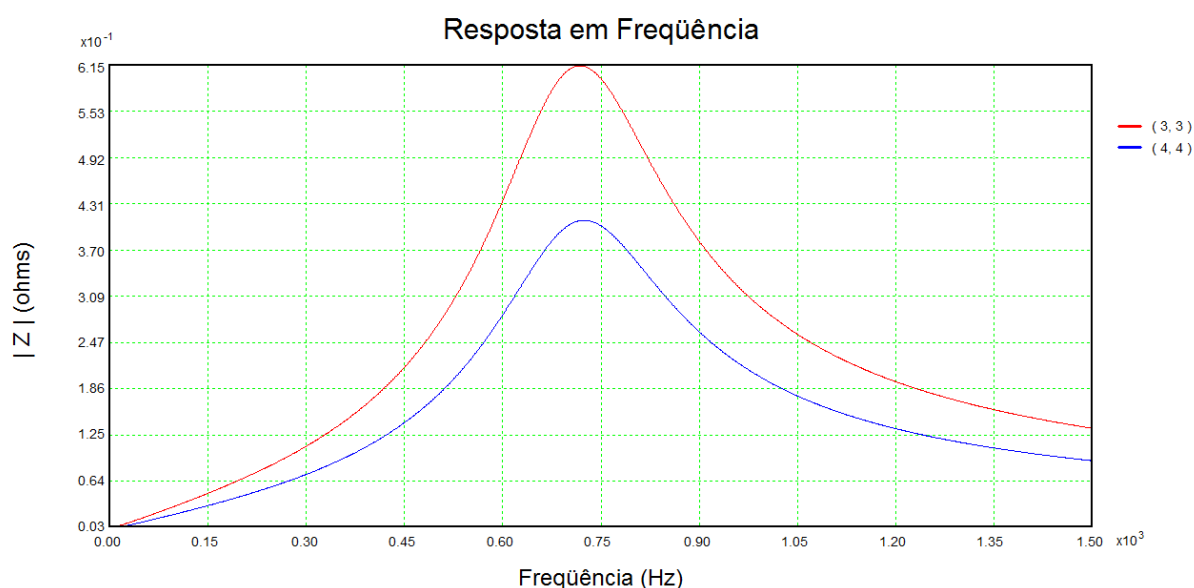
3 0 1 1 0.01009	0.116	996.062	300.00	17.71	0.0000
4 0 1 1 0.006845	0.078	1468 2	420.00	5.90	0.0000
FIM			540.00	1.97	0.0000
			FIMP		
DCRG					
3 1 1 0.075	0 1		4 0 1 1 1		
4 1 1 0.1125	0 1		180.00	17.71	0.0000
FIM			300.00	32.48	0.0000
			420.00	8.86	0.0000
DSRC			540.00	2.95	0.0000
3 0 1 1 1			FIMP		
180.00	9.84	0.0000	FIM		

## 5.2 RESULTADOS OBTIDOS NA SIMULAÇÃO DOS FILTROS

Nesta secção serão apresentados os resultados obtidos na simulação dos filtros quanto as correntes no secundário de cada um dos transformadores e as curvas de resposta em frequência para a situação do filtro sintonizado em início de uso, e para a situação do filtro com um certo envelhecimento dos componentes.

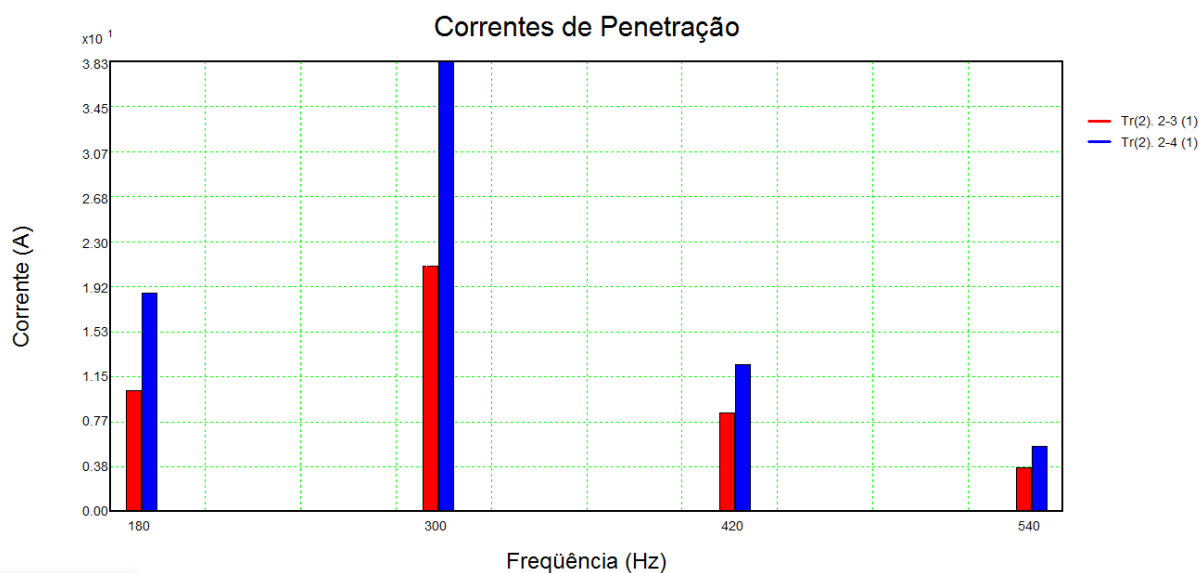
### 5.2.1. Filtro Sintonizado

Através da simulação dos filtros no *software* HarmZs®, foi possível a verificação do desempenho de cada um dos filtros, quanto à mitigação dos harmônicos encontrados no transformador do edifício Miracy e do edifício Santa Lúcia. Para uma melhor comparação do desempenho dos filtros, foi realizada a simulação do circuito de ambos os transformadores no *software* HarmZs® somente com a instalação do capacitor necessário para a correção do valor de reatância de cada um dos circuitos. Na Figura 36 são demonstradas as curvas de resposta em frequência de ambos os transformadores somente com a instalação do capacitor. A curva vermelha representa o capacitor instalado junto ao transformador do edifício Miracy e a curva azul representa o capacitor instalado junto ao transformador do edifício Santa Lúcia.



**Figura 36 - Gráfico da resposta em frequência apenas com o capacitor**  
**Fonte: Autoria própria, 2016**

Na Figura 37 são verificados os gráficos dos níveis harmônicos de corrente no secundário de cada um dos transformadores. Os gráficos em vermelho representam as distorções no transformador do edifício Miracy e os gráficos em azul representam as distorções no transformador do edifício Santa Lúcia.



**Figura 37 - Gráfico das correntes harmônicas no secundário de cada transformador**  
**Fonte: Autoria própria, 2016**

Na Tabela 26 são mostrados os valores, encontrados na simulação apenas com a aplicação do capacitor, de percentual de distorção de corrente, os valores de corrente para cada nível de harmônico, os valores percentuais de distorção harmônica

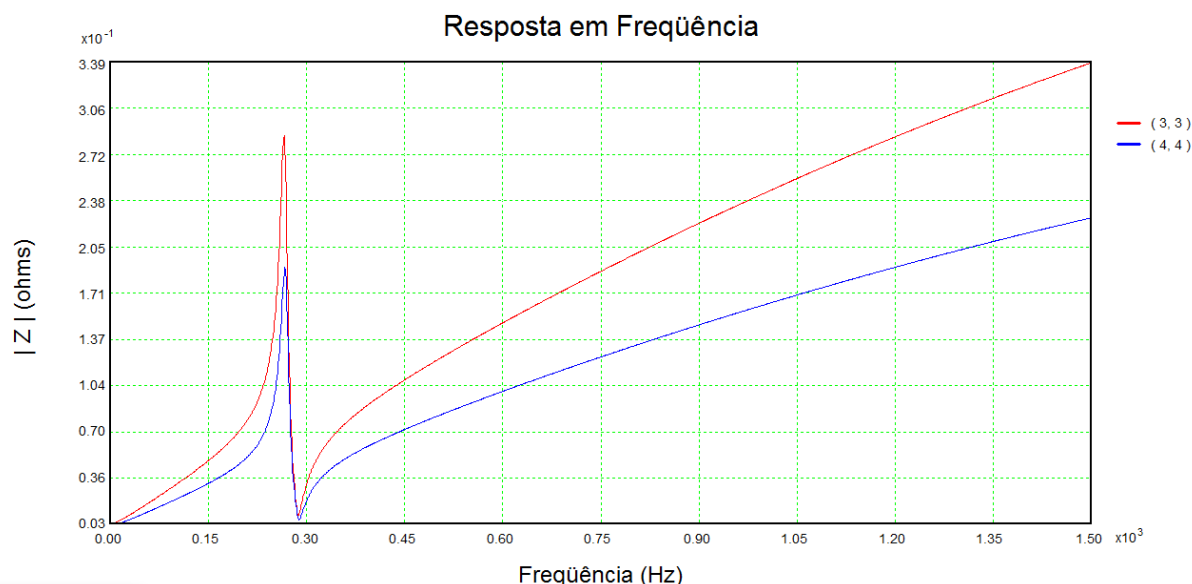
total de corrente (DHTi) e o valor eficaz da corrente total de harmônico ( $I_{RMSH}$ ) em cada um dos transformadores.

**Tabela 26 - Valores dos parâmetros do circuito na simulação apenas com o capacitor**

Transformador Edifício Miracy			Transformador Edifício Santa Lúcia		
Potência nominal	75 kVA		Potência nominal	112,5 kVA	
DHTi	12,80%		DHTi	15,19%	
Ordem do harmônico	Percentual de distorção	Corrente	Ordem do harmônico	Percentual de distorção	Corrente
3°	5,28%	10,39 A	3°	6,33%	18,68 A
5°	10,66%	20,98 A	5°	12,98%	38,34 A
7°	4,31%	8,49 A	7°	4,28%	12,64 A
9°	1,94%	3,82 A	9°	1,91%	5,63 A
$I_{RMSH}$	25,195 A		$I_{RMSH}$	44,838 A	

Fonte: Autoria própria, 2016

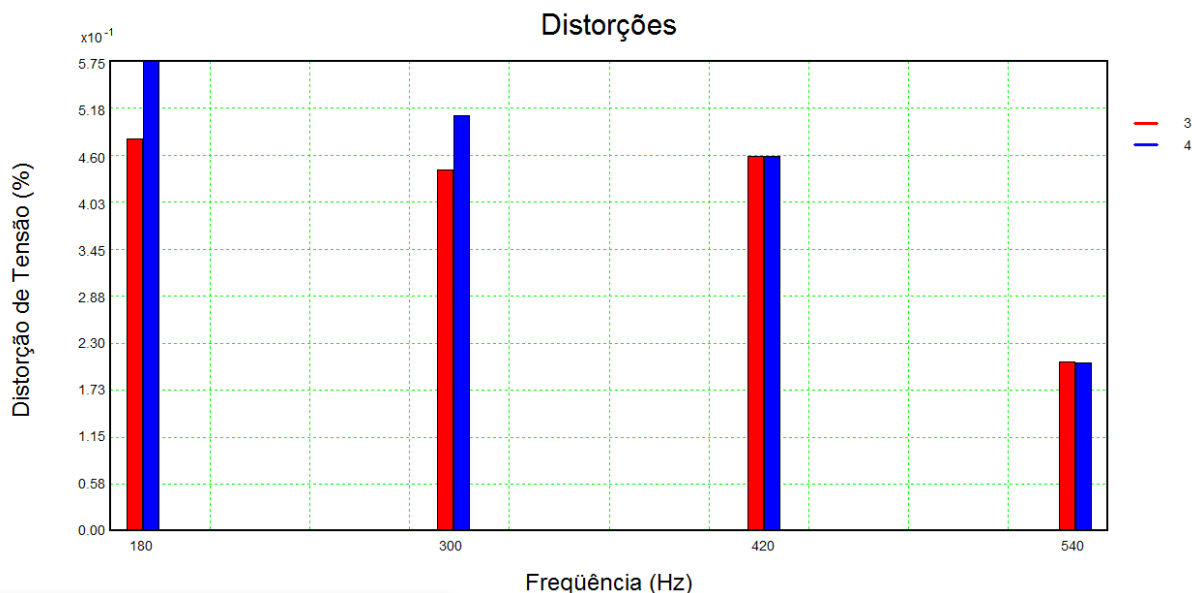
Na Figura 38 são verificadas as curvas de resposta em frequência com a instalação dos filtros sintonizados, de ambos os transformadores. A curva vermelha representa o filtro instalado junto ao transformador do edifício Miracy e a curva azul representa o filtro instalado junto ao transformador do edifício Santa Lúcia.



Fonte: Autoria própria, 2016

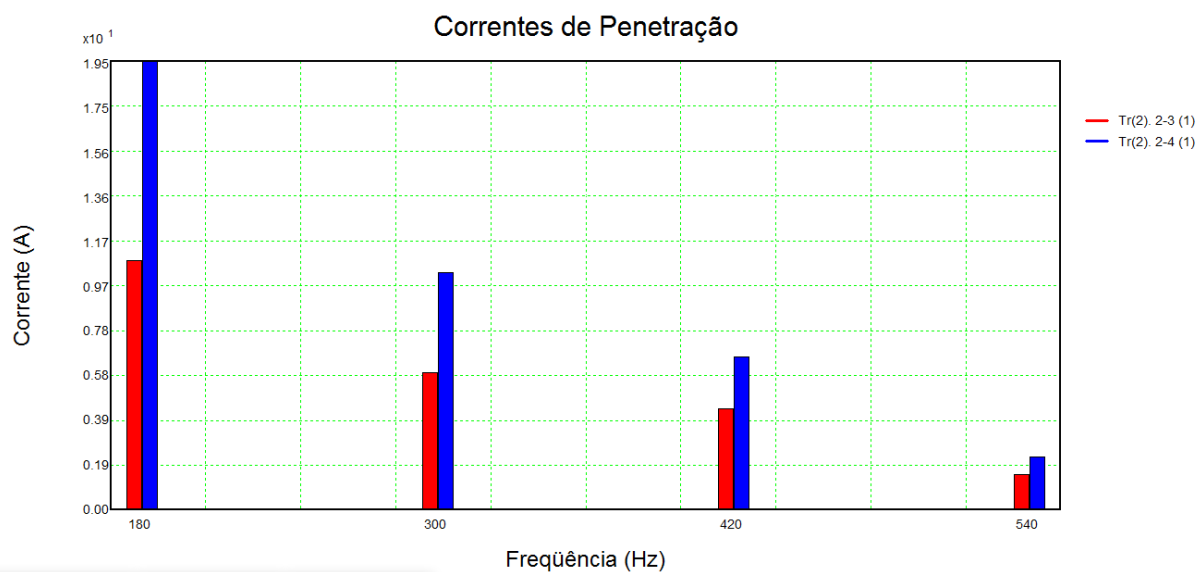
Na Figura 39 são verificados os gráficos dos níveis de distorção dos harmônicos de tensão, em valores percentuais, no secundário de cada um dos transformadores. Os gráficos em vermelho representam as distorções no

transformador do edifício Miracy e os gráficos em azul representam as distorções no transformador do edifício Santa Lúcia.



**Figura 39 - Gráfico dos níveis de distorção dos harmônicos de tensão no secundário de cada transformador com o uso do filtro sintonizado**  
**Fonte: Autoria própria, 2016**

Na Figura 40 são verificados os gráficos dos níveis harmônicos de corrente no secundário de cada um dos transformadores. Os gráficos em vermelho representam as distorções no transformador do edifício Miracy e os gráficos em azul representam as distorções no transformador do edifício Santa Lúcia.



**Figura 40 – Gráfico dos níveis das correntes harmônicas no secundário de cada transformador com o uso do filtro sintonizado**  
**Fonte: Autoria própria, 2016**



Na Tabela 27 são mostrados os valores encontrados de percentual de distorção de corrente, os valores de corrente e a distorção harmônica individual (DHI) de tensão para cada nível de harmônico, os valores percentuais de distorção harmônica total de tensão ( $DHT_T$ ) e de corrente ( $DHT_i$ ), e o valor eficaz da corrente total de harmônico ( $I_{RMSH}$ ) em cada um dos transformadores.

**Tabela 27 - Valores dos parâmetros do circuito na simulação com o filtro sintonizado**

Transformador Edifício Miracy				Transformador Edifício Santa Lúcia			
Potência nominal	75 kVA			Potência nominal	112,5 kVA		
$DHT_T$	0,8256%			$DHT_T$	0,9191%		
$DHT_i$	6,74%			$DHT_i$	7,85%		
Ordem do harmônico	Percentual de distorção	Corrente	DHI (tensão)	Ordem do harmônico	Percentual de distorção	Corrente	DHI (tensão)
3°	5,51%	10,85 A	0,48%	3°	6,59%	19,47 A	0,58%
5°	3,05%	6,00 A	0,44%	5°	3,51%	10,35 A	0,51%
7°	2,26%	4,45 A	0,46%	7°	2,27%	6,69 A	0,46%
9°	0,80%	1,57 A	0,21%	9°	0,80%	2,35 A	0,21%
$I_{RMSH}$	13,265 A			$I_{RMSH}$	23,161 A		

Fonte: Autoria própria, 2016

Fazendo a comparação dos valores apresentados nas Tabelas 25, 26 e 27 é verificado que apenas a aplicação do capacitor, para a correção do valor de reativo do circuito, não basta para a correção dos níveis de harmônicos. Isso mostra que capacitores não devem ser utilizados com a finalidade de reduzir harmônicos. Os capacitores são prejudicados em sua vida útil com a presença de harmônicos e, também, podem gerar ressonâncias com a amplificação de determinados harmônicos.

Após a aplicação do filtro sintonizado no secundário de cada um dos transformadores, foi verificada a mitigação dos níveis de harmônicos de corrente, e também uma melhora geral na qualidade de energia de cada circuito.

Os valores de  $DHT_i$  sofreram aumento no seu valor, quando somente o capacitor foi utilizado, passando de 10,78% para 12,80% no circuito do transformador do edifício Miracy e de 12,60% para 15,19% no circuito do edifício Santa Lúcia.

Fica evidente que houve uma pequena amplificação dos harmônicos devidos as bandas laterais da frequência de ressonância observada na Figura 36. Com a aplicação do filtro sintonizado, este valor baixou para 6,74% no circuito do edifício Miracy, e para 7,85% no circuito do edifício Santa Lúcia, apresentando uma redução de 62,52% no nível de distorção harmônica no circuito do transformador do edifício

Miracy, e de 62,30% no nível de distorção harmônica no circuito do transformador do edifício Santa Lúcia em relação aos valores iniciais de DHTi.

Ao se analisar os valores individuais de corrente, para cada ordem de harmônico, é percebido um aumento nos valores de corrente do 3º harmônico; este aumento é devido a própria característica do filtro, conforme se verifica no gráfico da Figura 38, que tem um grande aumento de impedância na região entre as frequências de 180 Hz e de 267 Hz.

Isso é consequência de se optar em corrigir o quinto harmônico.

Sintonizando o filtro próximo ao quinto harmônico, haverá uma ressonância paralela próximo ao terceiro harmônico. Embora essa situação não seja ideal, deve-se lembrar que o transformador tem conexão delta-estrela e, portanto, o terceiro harmônico ficará confinado no delta sem circular pelo circuito de média tensão.

Para as demais ordens de harmônicos houve a redução dos valores de corrente, principalmente no 5º harmônico, para o qual o filtro projetado foi sintonizado. No quinto harmônico a corrente teve seu valor reduzido de 17,71 A para 6 A no circuito do transformador do edifício Miracy, e de 32,48 A para 10,35 A, no circuito do edifício Santa Lúcia demonstrando a eficácia de cada filtro na mitigação destes valores de corrente.

### 5.2.2. Filtro Sintonizado com Envelhecimento dos Componentes

O filtro, assim como qualquer outro aparelho elétrico, pode ter suas características construtivas alteradas com o decorrer do tempo e do uso. No caso do filtro sintonizado, as principais características que sofrem alteração são o valor da capacitância dos capacitores e o valor da indutância dos indutores.

Essas alterações podem ocasionar a modificação da frequência de sintonia do filtro, que, por sua vez, pode fazer o filtro não ter mais o funcionamento adequado para a mitigação dos níveis harmônicos para o qual foi projetado. A alteração dos valores dos parâmetros do filtro sempre ocorre no sentido de aumentar o valor da frequência de sintonia.

Afim de se verificar a funcionalidade dos filtros com suas características alteradas, foi realizada uma simulação do circuito com a frequência  $f_r$  dos filtros alterada para 294 Hz e o  $h_r$  para 4,9. Para a obtenção dos novos parâmetros do filtro,

foram novamente feitos os cálculos apresentados na secção 4.2.1, mantendo-se os mesmos valores de  $V_{ff}$ ,  $Q_{eff}$ , e do fator de qualidade do filtro sintonizado em 288 Hz. Na Tabela 28 são apresentados os parâmetros do filtro de cada transformador com a sintonia de 294 Hz.

**Tabela 28 - Dados do filtro RLC com a frequência modificada para 294 Hz**

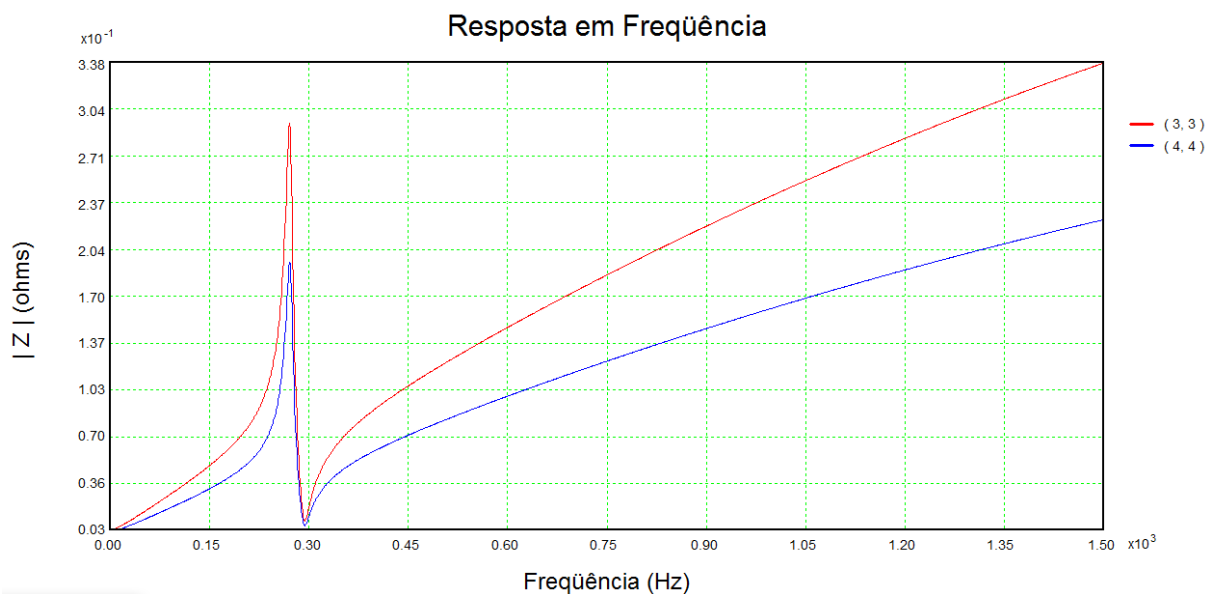
	Transformador			Transformador	
	75 kVA	112,5 kVA		75 kVA	112,5 kVA
$V_{ff}$	220 V	220 V	$X_L$	0,1107 $\Omega$	75,144 m $\Omega$
Fator de qualidade – Q	55	55	C	998,013 $\mu$ F	1,4702 mF
$Q_{eff}$	19 kvar	28 kvar	$C_{\Delta}$	332,671 $\mu$ F	490,07 $\mu$ F
$X_{eff}$	2,547 $\Omega$	1,729 $\Omega$	L	293,653 $\mu$ H	199,34 $\mu$ H
fr	294 Hz	294 Hz	$Q_C$	19,83 kvar	29,211 kvar
hr	4,9	4,9	$Q_L$	0,83 kvar	1,211 kvar
A	1,0435	1,0435	R	9,862 m $\Omega$	6,695 m $\Omega$
$X_c$	2,6578 $\Omega$	1,8042 $\Omega$	$V_c$	230 V	230 V

**Fonte: Autoria própria, 2016**

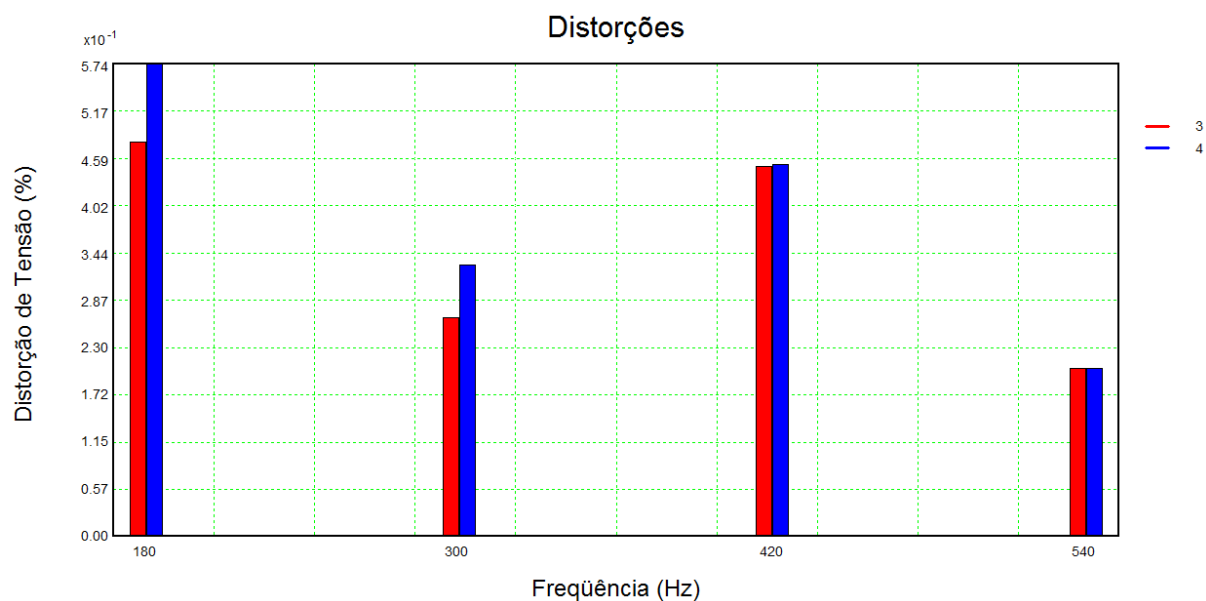
No código fonte do programa HarmZs® foi feita a alteração apenas das linhas de comando do parâmetro DEQP, para atualização do filtro, conforme demonstrado a seguir:

```
DEQP
3 0 1 1 0.009862    0.1107    998.013    2
4 0 1 1 0.006695    0.075144    1470,2    2
FIM
```

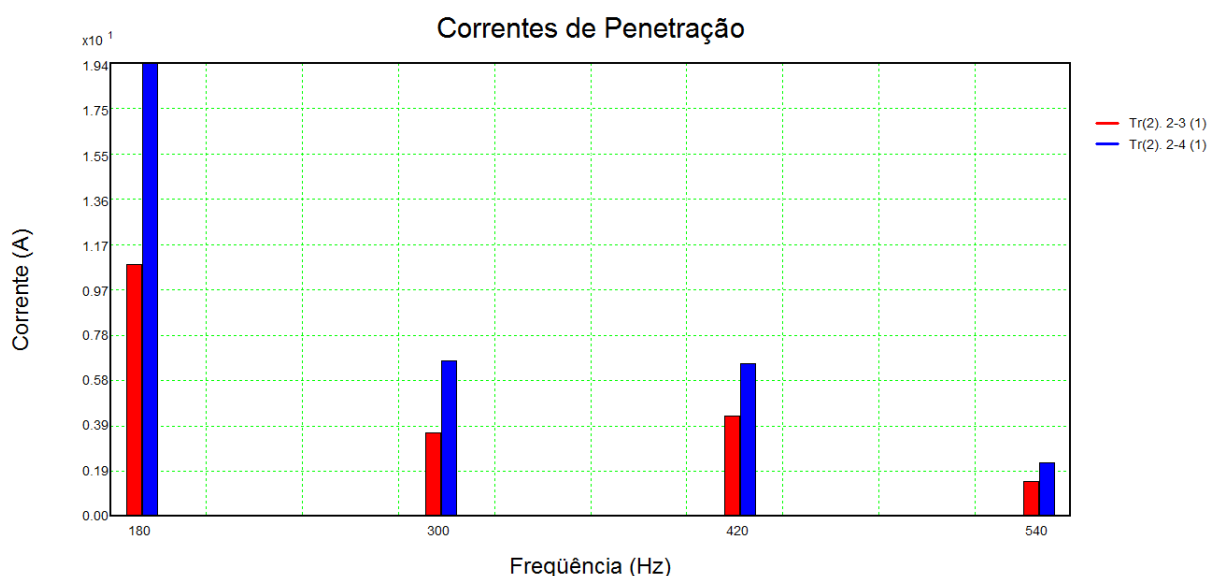
Após estas modificações, procedeu-se com a simulação do circuito para verificação do comportamento dos filtros quanto a mitigação dos efeitos dos harmônicos. Na Figura 41 são verificadas as curvas de resposta em frequência para as novas configurações dos filtros sintonizados, de ambos os transformadores. A curva vermelha representa o filtro instalado junto ao transformador do edifício Miracy e a curva azul representa o filtro instalado junto ao transformador do edifício Santa Lúcia.



Na Figura 42 são verificados os gráficos dos níveis de distorção dos harmônicos de tensão, em valores percentuais, no secundário de cada um dos transformadores com as novas configurações dos filtros. Os gráficos em vermelho representam as distorções no transformador do edifício Miracy e os gráficos em azul representam as distorções no transformador do edifício Santa Lúcia.



Na Figura 43 são verificados os gráficos dos níveis harmônicos de corrente no secundário de cada um dos transformadores com as novas configurações dos filtros. Os gráficos em vermelho representam as distorções no transformador do edifício Miracy e os gráficos em azul representam as distorções no transformador do edifício Santa Lúcia.



**Figura 43 – Gráfico dos níveis das correntes harmônicas no secundário de cada transformador com o filtro sintonizado na frequência de 294 Hz**  
**Fonte: Autoria própria, 2016**

Na Tabela 29 são mostrados os valores encontrados de percentual de distorção de corrente, os valores de corrente, a distorção harmônica individual (DHI) de tensão para cada nível de harmônico, os valores percentuais de distorção harmônica total de tensão ( $DHT_T$ ) e de corrente ( $DHT_i$ ) e o valor eficaz da corrente total de harmônico ( $I_{RMSH}$ ) em cada um dos transformadores com as novas configurações dos filtros.

**Tabela 29 - Valores dos parâmetros do circuito na simulação do filtro sintonizado em 294 Hz**

Transformador Edifício Miracy				Transformador Edifício Santa Lúcia			
Potência nominal	75 kVA			Potência nominal	112,5 kVA		
$DHT_T$	0,7389%			$DHT_T$	0,8282%		
$DHT_i$	6,25%			$DHT_i$	7,35%		
Ordem do harmônico	Percentual de distorção	Corrente	DHI (tensão)	Ordem do harmônico	Percentual de distorção	Corrente	DHI (tensão)
3°	5,50%	10,82 A	0,48%	3°	6,58%	19,43 A	0,58%
5°	1,84%	3,62 A	0,27%	5°	2,28%	6,72 A	0,33%
7°	2,22%	4,36 A	0,45%	7°	2,23%	6,58 A	0,45%
9°	0,788%	1,55 A	0,20%	9°	0,786%	2,32 A	0,20%
$I_{RMSH}$	12,309 A			$I_{RMSH}$	21,708 A		

**Fonte: Autoria própria, 2016**

Fazendo a comparação dos valores apresentados nas Tabelas 27 e 29, é verificado que mesmo com a alteração dos parâmetros dos filtros a mitigação dos níveis de harmônicos de corrente ocorreu e a melhora geral na qualidade de energia de cada circuito continua sendo obtida.

Os valores de DHTi sofreram uma pequena queda, sendo que este valor baixou para 6,25% no circuito do edifício Miracy e para 7,35% no circuito do edifício Santa Lúcia, apresentando uma redução de 7,27% no nível de distorção harmônica no circuito do transformador do edifício Miracy e de 6,37% no nível de distorção harmônica no circuito do transformador do edifício Santa Lúcia, em relação aos valores encontrados com os filtros sintonizados em 288 Hz.

Ao se analisar os valores individuais de corrente, para cada ordem de harmônico, é percebido uma ligeira diminuição nos valores de corrente do 3°, 7° e 9° harmônico. No 5° harmônico a corrente teve seu valor reduzido significativamente passando de 6 A para 3,62 A no circuito do transformador do edifício Miracy e de 10,35 A para 6,72 A no circuito do edifício Santa Lúcia, demonstrando que mesmo com a alteração dos parâmetros de capacitância e indutância, devido ao envelhecimento dos componentes, a eficácia de cada filtro na mitigação destes valores de corrente foi maior.

Esta análise nos mostra que, com o passar do tempo, e o envelhecimento dos componentes do filtro a sua frequência de sintonia sofrem um aumento de valor, deslocando-se para ordens maiores de harmônicos. Com isso, é verificado que este tipo de filtro não deve ser projetado inicialmente para a frequência exata do nível harmônico que se deseja combater, pois com o passar do tempo e o envelhecimento de seus componentes, rapidamente irá perder sua eficácia podendo vir até a aumentar o nível da distorção do harmônico para o qual foi projetado.

### 5.3 DIFICULDADES E DESAFIOS FUTUROS

Para a realização deste trabalho, uma das principais dificuldades encontradas foi a obtenção de valores reais de distorção de corrente no ponto de entrega de energia dos consumidores residenciais e comerciais de pequeno porte, assim como os valores de distorção de corrente nos circuitos secundários dos transformadores das concessionárias. Devido à falta de normas regulamentadoras brasileiras para as

distorções de corrente na rede elétrica de baixa tensão as concessionárias procuram apenas sanar os problemas decorrentes de nível de tensão e interrupção de fornecimento, fazendo poucas pesquisas e estudos quanto aos níveis de distorção harmônica de corrente em suas redes de distribuição.

O pequeno número de informações reais de campo impediu uma maior comparação entre diferentes situações de níveis harmônicos na rede, assim como uma melhor simulação da eficácia dos filtros a serem projetados para cada tipo situação.

O custo de construção de um filtro real e a impossibilidade de teste em situação real na rede da concessionária, também são impeditivos de se obter melhores dados quanto a eficácia do filtro, e até mesmo a verificação de possíveis problemas construtivos devido aos materiais dos componentes, assim como qual tipo de componente tem um melhor desempenho para o funcionamento do filtro.

Para futuros projetos, uma proposta seria a construção de um filtro real e o teste do mesmo em situação laboratorial, para se verificar real eficácia do filtro, assim como o comportamento dos componentes utilizado quanto a seu tipo construtivo.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foram apresentados dados que demonstram que os aparelhos eletroeletrônicos que possuímos atualmente, em sua maioria, geram distorções na corrente senoidal que os alimentam durante o seu funcionamento. Estas distorções por sua vez são devolvidas à rede elétrica, causando distorções na corrente elétrica da rede de distribuição, ocasionando diversos tipos de problemas aos aparelhos das concessionárias conectados à rede, e diminuindo a qualidade da energia distribuída.

A maioria destes aparelhos eletroeletrônicos, estão nas residências e nos comércios de pequeno porte, e sua contribuição para a diminuição da qualidade de energia elétrica é bastante significativa, e, devido à falta de normas regulamentadoras quanto a distorção de corrente elétrica nas redes de distribuição, este problema não é estudado e combatido pelas concessionárias.

Com o objetivo de se verificar a eficácia do uso de um filtro passivo sintonizado do tipo RLC, junto ao transformador da rede de distribuição, para a mitigação dos níveis de harmônicos de corrente, foram efetuados o projeto e a simulação de um filtro e examinados os resultados encontrados. Esses resultados demonstraram que o uso do filtro passivo sintonizado, junto ao secundário de um transformador de distribuição, é eficaz para a mitigação dos níveis de harmônicos de corrente que o circuito possui, promovendo uma melhora bastante significativa da qualidade da energia distribuída naquele circuito.

Na avaliação dos dados das simulações efetuadas, também ficou demonstrado que para uma melhor eficácia do filtro e durabilidade de seu tempo de uso, o mesmo deve ser projetado para uma faixa de frequência abaixo da frequência do nível harmônico, ao qual se pretende fazer a mitigação dos efeitos, visto que, com o tempo, seus componentes sofrem envelhecimento e suas características de funcionamento se alteram para uma ordem de harmônico maior do que a ordem para o qual foi projetado.

Para melhores resultados quanto à eficácia dos filtros, seria necessário o uso de mais dados reais, quanto às distorções harmônicas de corrente nos circuitos dos transformadores de distribuição das concessionárias. Mas, apesar desta deficiência de dados, as informações colhidas e os resultados obtidos durante a elaboração deste trabalho, demonstram que as distorções de harmônicos de corrente são um problema real e crescente nos circuitos da rede de distribuição de baixa tensão das



concessionárias, e que este problema pode ser resolvido ou mesmo diminuído com o uso de filtro sintonizado, adequadamente projetado para o circuito problemático, o que provavelmente diminuiria custos de investimento em redes cada vez mais robustas, melhoraria a eficiência da rede quanto ao atendimento da demanda de carga existente e a própria qualidade da energia distribuída pela concessionária.

## REFERÊNCIAS

ALVES, Antônio C. B.; SANTOS, Euler B. dos; GARCIA, Flávio, R.; NIELSON, Rafael. **Dimensionamento e especificação de filtro sintonizado para instalação na rede secundária**. XVIII Congresso Brasileiro de Automática, CBA 2010.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8 - Qualidade de Energia**, 2010.

BEZERRA, Ubiratan Holanda; TOSTES, Maria Emília de Lima; ARAÚJO, Ana Cristina S.; GARCEZ, Jurandir N.; MESQUITA, J. E.; TUPIASSÚ, Aramando A.. **Harmônicos gerados por consumidores em baixa tensão da rede metropolitana de distribuição de energia de Belém (PA)**. I Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (Citenel). Brasil. 2001.

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. 1999.

CARVALHO, Ricardo Silva. **Análise harmônica em redes de distribuição de energia elétrica**, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos. 2013.

DELAIBA A. C. et alli, **The Effect of Harmonics on Power Transformers Loss of Life**, 38th Midwest Symposium on Circuits and System, v. 1, p.p. 933-936. Rio de Janeiro. 1995.

DUGAN, R.C. et alli, **Electrical Power Systems Quality**, second edition, McGraw-Hill. 2003.

FUJIWARA, J. K. et alli, **Interferência causada pelo uso de fluorescentes compactas em residências**, Eletricidade Moderna, pag. 134-142, Setembro, 1998.

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, Foz do Iguaçu/PR. 1999.

GONZALEZ, M. L. y, PIRES, I. A., et alli, **Correntes harmônicas em aparelhos eletrodomésticos**, VI SBQEE – Seminário Brasileiro sobre Qualidade de Energia Elétrica. Belém – PA. 2005.

GRANDI, A. L. Z.; CARNEIRO, Jules Renato V. **Caracterização das Distorções Harmônicas de Tensão em Circuitos Secundários de Baixa Tensão**. Em: VIII CBQEE-CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA, Blumenau/SC. 2009.

HADDAD, Jamil. **Energia Elétrica: Conceitos, Qualidade e Tarifação**, Ministério de Minas e Energia – MME - PROCEL – Rio de Janeiro, dezembro/2004.

IEEE std. 519-2014, **IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems**.

IBGE – Séries Históricas e Estatísticas – Famílias e Domicílios - Bens duráveis existentes no domicílio - **Domicílios particulares permanentes, por posse de geladeira – 2001 a 2011**. Disponível em:

<<http://serieestatisticas.ibge.gov.br/series.aspx?no=6&op=0&vcodigo=PD279&t=do-micilios-particulares-permanentes-posse-geladeira>>. Acesso em 20 de maio de 2016

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.

IEEE std C57.12.00-2000 **IEEE Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power and Regulating Transformers**. 2000.

ISONI, Marcos. **A eficiência energética e seus possíveis efeitos sobre equipamentos e instalações**, Revista Eletricidade Moderna, nº 363, Editora Aranda, São Paulo-SP, Junho de 2004.

KARL JOHNSON, et. alli.; "**Assessing the Impacts of Nonlinear Loads on Power Quality in Commercial Buildings - An Overview**", IEEE Transactions. California. 1991.

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.

LEÃO, Ruth; SAMPAIO, Raimundo; ANTUNES, Fernando. **Harmônicos em sistemas elétricos** – 1. Ed – Elsevier. Rio de Janeiro. 2014.

PINTO, Tales Dos Santos. "**O apagão energético de 2001**"; *Brasil Escola*. Disponível em <<http://www.brasilecola.com/historiab/apagao.htm>>. Acesso em 3 de outubro de 2015.

PIRES, Igor Amariz. **Caracterização de harmônicos causados por equipamentos eletro-eletrônicos residenciais e comerciais no sistema de distribuição de energia elétrica**. Belo Horizonte, 2006.

PIRES, Igor Amariz. **Medidas de mitigação de harmônicos**. O setor elétrico, v. 60, 2010.

POMILIO, J. A. **Pré-reguladores de Fator de Potência – Cap. 1**, Unicamp. Disponível em: < <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor>>. Acesso em 16 de maio de 2016.

POMILIO, José Antenor; PAREDES, Helmo Kelis Morales; DECKMANN, Sigmar Maurer. **Eletrônica de Potência para Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica**. 2013.

RIBEIRO, Cristiano Felipe. **Influência dos harmônicos na qualidade da energia elétrica**, Universidade Federal de Ouro Preto, 2007.

SAMIR DATTA, Senior Member, IEEE California Polytechnic State University - "**Power Pollution Caused by Lighting Control Systems**", IEEE Transactions. 1991.

STAROSTA, José. **Correntes harmônicas em instalações elétricas – Parte 1 – Quando e como filtrar? Filtros passivos ou filtros ativos?**, Revista O Setor Elétrico, Edição 68, Setembro de 2011. Disponível em: <<http://www.osestoreletrico.com.br/web/colunistas/jose-starosta/701-correntes-harmonicas-em-instalacoes-eletricas--parte-1-quando-e-como-filtrar-filtros-passivos-ou-filtros-ativos.html>>. Acesso em 15 de junho de 2016.

THOMAS S. KEY, et. alli.; "**Costs and Benefits of Harmonic Current Reduction for Switch-Mode Power Supplies in a Commercial Office Building**", IEEE Transactions on Ind. Applications, vol.32, nº5. 1996.

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. Brasil. 2002.