

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

**ALLAN NERY  
FELIPE SOURIENT HOPNER**

**ANÁLISE DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS EM PLANTA  
INDUSTRIAL MODELADA POR FONTES DE CORRENTE**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**CURITIBA**

**2016**

**ALLAN NERY**  
**FELIPE SOURIENT HOPNER**

**ANÁLISE DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS EM PLANTA  
INDUSTRIAL MODELADA POR FONTES DE CORRENTE**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentada à disciplina Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de engenharia elétrica, do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Joaquim Eloir Rocha

**CURITIBA**

**2016**

ALLAN NERY  
FELIPE SOURIENT HOPNER

## Análise de distorções harmônicas em planta industrial modelada por fontes de corrente

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, 29 de novembro de 2016.

---

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

---

Profa. Annemarle 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

---

Profa. Annemarle Gehrke Castagna, Mestre  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Paulo Cícero Fritzen, Dr.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

## RESUMO

HOPNER, Felipe S.; NERY, Allan; Análise de Distorções Harmônicas em planta Industrial Modelada por fontes de Corrente. 118 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior de Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

Com o avanço da eletrônica de potência, têm-se observado nos últimos anos um crescente problema de distorções nas formas de onda de corrente e tensão. Este trabalho aborda o estudo de filtros para harmônicos de 3ª ordem, mostrando alternativas à utilização de transformadores isoladores. Com a implementação de filtros, existe a possibilidade de atenuação deste problema, resultando em maior durabilidade dos equipamentos e em maior eficiência energética. No decorrer do texto são apresentadas as topologias usuais de filtros passivos para a atenuação das distorções na forma de onda e também simulações através da ferramenta *Simulink* do MatLab. Para o estudo foi modelada uma planta industrial com parâmetros tipicamente encontrados em uma instalação fabril. Além de oferecer uma solução viável ao combate a harmônicos ao consumidor de baixa tensão, este trabalho tem por objetivo alertar aos perigos deste problema crescente, que é carente de legislação em território brasileiro.

**Palavras-chave:** Distorção, Filtro Passivo, Forma de Onda, Harmônicos, Reatância, Senóide.

## ABSTRACT

HOPNER, Felipe; NERY, Allan; Analysis of Harmonic Distorsions in Indusstrial Plant Modeled by Current Sources . 2016. 118 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior de Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

The use of power electronics systems has increased over the last few years. Because of that, there is a crescent problem about current and voltage waveforms distortions. This paper deals with the study of 3<sup>rd</sup> order harmonical filters, presenting alternatives to the use of isolating transformers. The application of filters, results in the attenuation of the problems causeds by the harmonical distortions, this fact does the durability of the equipments and the energetic efficiency increase. In the course of the text, there are the most famous topologies for passive filters for attenuation of harmonical distortions on the waveforms and simulations by the tool Simulink of Mat-Lab. In order to do this study, an industrial installation with common parameters was modelled. Besides offering to the low voltage consumer a viable action against the waveform distortions, this paper has the purpose of make the society aware of this increasing problem that is lack of legislation on Brazil.

**Key-words:** Distortion, Passive Filter, Waveform, Harmonics, Reactance, Sine Wave.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Conexão e circuito típico de filtro série .....	39
Figura 2 – conexão e circuito típico de filtro shunt.....	39
Figura 3 – Diagrama unifilar geral simplificado.....	44
Figura 4 – Perfil das tensões eficazes no ponto M2.....	45
Figura 5 – Perfil das distorções harmônicas totais das tensões no ponto M2.....	46
Figura 6 – Espectro de frequência dos valores P95% da tensão no ponto M2.....	47
Figura 7 – Perfil das correntes eficazes no ponto M2.....	48
Figura 8 – Perfil da distorção harmônica total das correntes de linha do ponto M2..	49
Figura 9– Espectro de frequência dos valores P95% da corrente do ponto M2.....	51
Figura 10 – Modelo do sistema elétrico: alimentação CHESF (Companhia Hidroelétrica do São Francisco), forno panela e forno EBT.....	52
Figura 11 – Diagrama unifilar da instalação elétrica fabril resultante após inserção do banco de capacitores.....	54
Figura 12 – Resposta em frequência do sistema com a inserção do banco de capacitores.....	55
Figura 13 – Sistema retificador alvo da simulação.....	56
Figura 14 – Tensão(vermelho) e corrente (verde) no ponto de conexão comum do sistema (PCC).....	57
Figura 15 – Componentes harmônicas de tensão % da fundamental.....	59
Figura 16 – Componentes harmônicas de corrente & da fundamental.....	59
Figura 17 – Forma de onda da corrente no neutro do sistema em estudo.....	60
Figura 18 – Topologia do filtro passivo RLC série shunt.....	60
Figura 19 – Topologia do circuito simplificado para o filtro.....	62
Figura 20 – Filtro duplamente sintonizado (DTF).....	63
Figura 21 – Aplicação de busca simplex ao ponto inicial estipulado.....	64
Figura 22– Configurações possíveis para conexão dos bancos de filtro RLC em combinação com o DTF e os reatores de linha.....	64
Figura 23 – Diagrama de força do conjunto de reatores de linha e banco de filtros.....	65
Figura 24 – Diagrama de comando do conjunto de reatores de linha e bancos de flitros.....	65
Figura 25 – Exemplo de distorção harmônica no HarmZ.....	67

Figura 26 – Interface gráfica do HarmZs.....	68
Figura 27 – Exemplo de harmônicos no MatLab.....	70
Figura 28 – Gráfico de intensidade das harmônicas no MatLab.....	70
Figura 29 – Ambiente do Pspice.....	71
Figura 30 – Espectro harmônico de um ar condicionado.....	75
Figura 31 – Espectro harmônico de um motor a indução.....	77
Figura 32 – Espectro harmônico de uma geladeira.....	78
Figura 33 – Circuito montado no <i>Simulink</i> para a empresa sem correção de fator de potência e seus harmônicos.....	81
Figura 34 – Corrente elétrica das lâmpadas fluorescentes compactas.....	82
Figura 35 – Corrente elétrica das lâmpadas de vapor de sódio.....	83
Figura 36 – Corrente elétrica da parte administrativa.....	84
Figura 37 – Corrente elétrica do circuito quase linear.....	85
Figura 38 – Corrente elétrica de refrigeração.....	86
Figura 39 – Corrente elétrica do motor de 50 cv.....	87
Figura 40 – Corrente elétrica do motor de 100 cv.....	88
Figura 41 – Circuito implementado para a carga total.....	89
Figura 42 – Forma de onda para a carga total.....	89
Figura 43 – Circuito elétrico com correção de reativo e de harmônico.....	93
Figura 44 – Corrente elétrica da fase com correção do 3º harmônico.....	93
Figura 45 – Forma de onda do circuito LFC com eliminação do 3º harmônico.....	97
Figura 46 – Forma de onda do circuito de lâmpadas de vapor de sódio com eliminação do 3º harmônico.....	98
Figura 47 – Forma de onda do circuito de administração com eliminação do 3º harmônico.....	99
Figura 48 – Forma de onda do circuito de refrigeração com eliminação do 3º harmônico.....	99
Figura 49 – Forma de onda do circuito do motor 50 cv com eliminação do 5º harmônico.....	100
Figura 50 – Forma de onda do circuito do motor 100 cv com eliminação do 5º harmônico.....	101
Figura 51 – Forma de onda do circuito do motor 100 cv com eliminação do 7º harmônico.....	102

Figura 52 – Forma de onda do circuito do motor 100 cv com eliminação do 5º e 7º harmônico.....	103
Figura 53 – Forma de onda do circuito quase linear com eliminação do 3º harmônico.....	104
Figura 54 – Corrente elétrica do circuito LFC com transformador isolado.....	105
Figura 55 – Corrente elétrica do circuito de lâmpada vapor de sódio com transformador isolado.....	106
Figura 56 – Corrente elétrica do circuito de administração com transformador isolado.....	107
Figura 57 – Corrente elétrica do circuito quase linear com transformador isolado..	108
Figura 58 – Corrente elétrica do circuito de refrigeração com transformador isolado.....	109

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores estatísticos das tensões eficazes no ponto M2.....	46
Tabela 2 – Valores estatísticos das distorções totais de tensão no ponto M2.....	46
Tabela 3 – Valores máximos, mínimos, médios e P95% das distorções individuais de tensão do ponto M2.....	47
Tabela 4 – Valores máximos, mínimos, médios e P95% das distorções individuais de tensão do ponto M2.....	49
Tabela 5 – Valores estatísticos da distorção total da corrente do ponto M2.....	50
Tabela 6 – Valores máximos, mínimos, médios e P95% das distorções individuais de corrente.....	50
Tabela 7 –Valores medidos e simulados no secundário do transformador que alimenta o forno EBT.....	53
Tabela 8 – Dados da carga obtidos por simulação no software PSpice.....	57
Tabela 9 – Componentes Fourier da tensão no PCC( Ponto de Conexão Comum) .....	58
Tabela 10 – Componentes Fourier da corrente no PCC( Ponto de Conexão Comum) .....	58
Tabela 11 – Distorção harmônica em lâmpada fluorescente compacta .....	73
Tabela 12 – Distorção harmônica em lâmpadas de vapor .....	74
Tabela 13 – Distorção harmônica em computador .....	76
Tabela 14 – Valores das cargas .....	79
Tabela 15 – Correntes harmônicas eficazes de acordo com a sua ordem .....	80
Tabela 16 – Valores necessários para correção do fator de potência de uma fase .....	91
Tabela 17 – Valores necessário para o indutor do filtro passivo por derivação para uma fase .....	92
Tabela 18 – Valores para a determinação do capacitor do filtro de bloqueio.....	95
Tabela 19 – Valores para a determinação do indutor do filtro de bloqueio.....	96
Tabela 20 – Resultados obtidos sem correção, com filtro passivo e com transformador isolador .....	110

## LISTA DE SIGLAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica  
CA – Corrente Alternada  
CC – Corrente Contínua  
CHESF – Companhia Hidroelétrica do São Francisco  
CLP – Controlador Lógico Programável  
DHI - Distorção Harmônica Individual  
DHT - Distorção Harmônica Total  
DTD - Distorção Total De Demanda  
DTF – Filtro Duplamente Sintonizado  
EBT - Eccentric Bottom Tapping  
IEEE - Institute of Electric and Electronic Engineers  
LFC – Lâmpada Fluorescente Compacta  
PCC – Ponto de Conexão Comum  
PWM - Pulse Width Modulation  
RLC – Resistor – Indutor – Capacitor (filtro)  
TDH<sub>i</sub> – Taxa de Distorção Harmônica na Corrente  
TDH<sub>v</sub> – Taxa de Distorção Harmônica na Tensão  
THD- Total Harmonic Distortion  
TN-C – aterramento do tipo onde o neutro e a proteção são o mesmo conductor  
TP – Transformador de Potência  
UPS - Uninterruptible Power Systems

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
<b>1.1. TEMA.....</b>	<b>14</b>
<b>1.1.1. DELIMITAÇÃO DO TEMA.....</b>	<b>17</b>
<b>1.2. PROBLEMAS E PREMISSAS.....</b>	<b>18</b>
<b>1.3. OBJETIVOS.....</b>	<b>18</b>
<b>1.3.1. OBJETIVO GERAL.....</b>	<b>18</b>
<b>1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....</b>	<b>19</b>
<b>1.4. JUSTIFICATIVA.....</b>	<b>19</b>
<b>1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....</b>	<b>20</b>
<b>1.6. ESTRUTURA DO TRABALHO.....</b>	<b>21</b>
<b>2. HARMÔNICOS.....</b>	<b>23</b>
<b>2.1. DEFINIÇÃO DE HARMÔNICOS.....</b>	<b>24</b>
<b>2.2. CARGAS GERADORAS DE HARMÔNICOS.....</b>	<b>25</b>
<b>2.2.1. SISTEMAS DE RETIFICAÇÃO E ACIONAMENTO CC.....</b>	<b>26</b>
<b>2.2.2. FONTES DE ALIMENTAÇÃO MONOFÁSICAS (CHAVEADAS).....</b>	<b>26</b>
<b>2.2.3. REATORES ELETRÔNICOS PARA ILUMINAÇÃO.....</b>	<b>27</b>
<b>2.2.4. CONTROLADORES DE TENSÃO (CONTROLE DE ILUMINAÇÃO E AQUECIMENTO).....</b>	<b>28</b>
<b>2.2.5. CONVERSORES TRIFÁSICOS E ACIONAMENTOS CA.....</b>	<b>28</b>
<b>2.2.6. DISPOSITIVOS COM PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO BASEADO EM ARCO ELÉTRICO (FORNOS A ARCO, SOLDAS A ARCO E LÂMPADAS DE DESCARGA).....</b>	<b>29</b>
<b>2.2.7. DISPOSITIVOS COM NÚCLEOS MAGNÉTICOS SATURADOS.....</b>	<b>30</b>
<b>2.3. EFEITOS DOS HARMÔNICOS OPERANDO EM COMPONENTES ELÉTRICAS.....</b>	<b>31</b>
<b>2.3.1. SOBREAQUECIMENTO DO CONDUTOR NEUTRO.....</b>	<b>31</b>
<b>2.3.2. TRANSFORMADORES.....</b>	<b>32</b>
<b>2.3.2.1. TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA.....</b>	<b>33</b>
<b>2.3.3. MEDIDORES DE ENERGIA.....</b>	<b>34</b>
<b>2.3.4. DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO.....</b>	<b>34</b>
<b>2.3.5. CABOS DE ALIMENTAÇÃO.....</b>	<b>35</b>
<b>2.3.6. MOTORES SÍNCRONOS.....</b>	<b>35</b>
<b>2.3.7. EQUIPAMENTOS ELETRÔNICOS.....</b>	<b>36</b>
<b>2.3.8. CAPACITORES.....</b>	<b>37</b>
<b>2.4. MEDIDAS DE COMBATE AOS HARMÔNICOS.....</b>	<b>37</b>

2.4.1. FILTROS PASSIVOS.....	38
2.4.2. FILTROS ATIVOS.....	40
2.4.3. FILTROS HÍBRIDOS.....	41
2.4.4. TRANSFORMADOR ISOLADOR.....	41
3. ESTUDOS DE CASO.....	43
.3.1. ANÁLISE DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS DE UM CONSUMIDOR INDUSTRIAL REALIZADA ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO NO SOFTWARE MATLAB.....	43
3.1.1. DIAGRAMA GERAL SIMPLIFICADO DA PLANTA INDUSTRIAL.....	43
3.1.1.1. MEDIÇÕES REAIS REALIZADAS NO SECUNDÁRIO DOS PRINCIPAIS TRANSFORMADORES.....	44
3.1.1.1.1. MEDIÇÕES REALIZADAS NO PONTO M2 (TRANSFORMADOR TR2) .....	45
3.1.1.1.1.1. ANÁLISE DE TENSÕES.....	45
3.1.1.1.1.2. ANÁLISE DAS CORRENTES.....	48
3.1.1.2. MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA PLANTA INDUSTRIAL ATRAVÉS DE SOFTWARE COMPUTACIONAL.....	52
3.2. ESTUDO DE CASO SOBRE PROJETO DE FILTROS PASSIVOS PARA ATENUAÇÃO DE HARMÔNICOS EM INSTALAÇÕES ELÉTRICAS INDUSTRIAIS UTILIZANDO O SOFTWARE PSPICE.....	55
3.2.1. MODELAGEM DO SISTEMA.....	56
3.2.2. ESTUDO E MODELAGEM DO FILTRO PASSIVO RLC SÉRIE SHUNT.....	60
3.2.3. ESTUDO E MODELAGEM DO FILTRO PASSIVO DUPLAMENTE SINTONIZADO.....	63
3.2.4. MODELO PROPOSTO PARA UTILIZAÇÃO DOS REATORES DE LINHA EM CONJUNTO COM O DTF E OS BANCOS DE FILTROS RLC SÉRIE SHUNT.....	64
4. PROGRAMAS COMPUTACIONAIS PARA HARMÔNICOS E FILTROS.....	66
4.1. HARMZS.....	66
4.2. SPECTRUM HARMONIC ANALYSIS SOFTWARE.....	68
4.3. MATLAB.....	69
4.4. PSPICE.....	71
5. PLANTA INDUSTRIAL E SEUS RESPECTIVOS CIRCUITOS.....	72
5.1 CIRCUITO DE ILUMINAÇÃO.....	72
5.2 CIRCUITO DE REFRIGERAÇÃO.....	74
5.3 CIRCUITO DA ÁREA ADMINISTRATIVA.....	75
5.4 CIRCUITO DOS MOTORES.....	76
5.5 CIRCUITO PARA CARGAS QUASE LINEARES .....	77
5.6 PLANTA INDUSTRIAL FINAL .....	78

<b>6 PROJETO E SIMULAÇÃO .....</b>	<b>79</b>
<b>6.1 EMPRESA SEM CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA E DOS HARMÔNICOS .....</b>	<b>79</b>
<b>6.2 CÁLCULO DO FILTRO HARMÔNICO PASSIVO POR DERIVAÇÃO .....</b>	<b>90</b>
<b>6.3 PLANTA INDUSTRIAL COM CORREÇÃO DOS HARMÔNICOS POR FILTRO PASSIVO POR DERIVAÇÃO .....</b>	<b>92</b>
<b>6.4 CÁLCULO DO FILTRO PASSIVO DE BLOQUEIO .....</b>	<b>94</b>
<b>6.5 PLANTA INDUSTRIAL COM FILTRO PASSIVO DE BLOQUEIO .....</b>	<b>96</b>
<b>6.6 PLANTA INDUSTRIAL COM TRANSFORMADOR ISOLADOR E COMPARAÇÕES .....</b>	<b>105</b>
<b>7 CONCLUSÃO .....</b>	<b>111</b>
<b>7.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>111</b>
<b>7.2 CONCLUSÃO.....</b>	<b>112</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>113</b>

## 1.INTRODUÇÃO

### 1.1. TEMA

O desenvolvimento da humanidade foi marcado pela ascensão de novas tecnologias, com o objetivo de alcançar uma maior qualidade de vida e gerar conforto. Ao se observar o desenvolvimento tecnológico dos últimos 40 anos é inegável que a eletrônica foi um dos campos do conhecimento humano que mais obteve avanço, fato este que permitiu à humanidade entrar na era da informação e da informática.

O avanço da eletrônica permitiu a popularização de equipamentos tais como computadores, aparelhos de televisão, fornos de micro-ondas, fornos elétricos com controle eletrônico de potência e reatores eletrônicos. A eletrônica permitiu que a sociedade desfrutasse de diversos equipamentos que facilitam o seu dia a dia, contudo tal desenvolvimento não ocorre sem efeitos colaterais.

Equipamentos eletrônicos se apresentam como cargas não lineares, as quais são “cargas elétricas que consomem corrente descontinuamente ou cuja impedância varia ao longo de um ciclo da forma de onda da tensão de entrada” (DUGAN, 2003, pg. 36). O autor em seu livro, relata que as cargas não lineares apresentam o grande problema de absorverem uma corrente não senoidal e, portanto, correntes harmônicas, mesmo quando são alimentadas por tensões puramente senoidais.

Correntes harmônicas são prejudiciais para sistemas elétricos, Arrillaga (2003) diz que os harmônicos podem causar má operação de importantes equipamentos de controle e proteção e uma sobrecarga nestes. Irwin (2004) assegura em seu livro que “a máxima transferência de potência ativa é transmitida para a carga quando a tensão e a corrente estão em fase e não distorcidas”. Quando existirem harmônicos de corrente, a frequência da onda de corrente será múltipla da onda de tensão e, conseqüentemente, a potência média será nula ao se observar um período completo na frequência fundamental, deste modo, harmônicos afetam a máxima transferência de potência para a carga, gerando potência reativa de distorção.

A existência de harmônicos acaba por resultar em uma corrente elétrica acima da necessária para a alimentação da carga, implicando em um baixo fator de potência.

É crescente a utilização de cargas eletrônicas em unidades residenciais e comerciais atendidas em baixa tensão. Estas cargas que são, geralmente, monofásicas injetam grande quantidade de 3ª harmônica no sistema e são elas que “comandam” a Taxa de Distorção Harmônica da Corrente (THD<sub>i</sub>). Valores de THD<sub>i</sub> da ordem de 20 a 35% são cada vez mais comuns, sendo que a 3ª harmônica é responsável por algo como 15 a 25%, tal que, em sendo filtradas, levariam a THD<sub>i</sub> para valores razoáveis, atendendo a IEEE519-1992 ( OLIVEIRA; KASSICK; EICHELBERGER, 2005, p. 01).

Hoevernaars (2002) indica que a presença de harmônicos em instalações elétricas de baixa tensão tem muitos efeitos negativos, pois com a existência de correntes acima dos valores requeridos pela carga, ocorrem maiores perdas nos cabos e transformadores, além da necessidade de sobredimensionamento dos mesmos.

“Talvez a consequência mais notável de harmônicos para sistemas de potência é a degradação da comunicação telefônica causada por ruído harmônico induzido” (DUGAN, 2003, p.12). A criação de campos eletromagnéticos resultantes de correntes harmônicas pode interferir em linhas de transmissão de dados, através da indução de correntes elétricas, em linhas próximas bem como causar o mau funcionamento dos equipamentos aos quais as linhas de dados estão conectadas.

De acordo com Fuchs (2008) os harmônicos de corrente podem causar o mau funcionamento de aparelhos que utilizam a forma de onda de tensão (ou corrente) senoidal como referência para gerar o controle de semicondutores ou como base de tempo para sincronizar certos sistemas.

Hoevernaars (2002) afirma que “é comumente conhecido que transformadores convencionais e condutores neutros podem ser sobrecarregados e aquecidos devido a harmônicos”, o que resulta na necessidade de se superdimensionar o condutor neutro e de se utilizar um transformador com maior potência para compensar os problemas decorrentes dos harmônicos.

Conforme explica Arrillaga (2003), a circulação de correntes harmônicas no neutro da instalação provoca queda de tensão neste condutor. Na situação em que ocorre sistema de aterramento do tipo TN-C (onde o neutro e a proteção são o mesmo condutor), acontece dos potenciais de terra dos diversos dispositivos não mais estarem na mesma referência, o que interfere na troca de informações e de sinais de inúmeros dispositivos tais quais os sensores, CLP's, microcomputadores e detectores. Outro problema para as instalações do tipo TN-C é a criação de campos eletromagnéticos perturbadores, os quais aparecem devido a corrente circulante nas estruturas metálicas da edificação.

Irwin (2004) em seu livro lembra que o baixo fator de potência de instalações exige normalmente a utilização de capacitores para elevar tal fator, contudo a impedância de um capacitor diminui com o aumento da frequência. Na existência de uma tensão distorcida, altas correntes harmônicas serão absorvidas pelos capacitores, diminuindo assim a vida útil dos mesmos. A utilização de bancos de capacitores para corrigir o fator de potência de uma instalação pode ser comprometida porque “as reatâncias da instalação elétrica podem trazer riscos de ressonância com esses capacitores, o que pode aumentar consideravelmente a amplitude das harmônicas em todos os equipamentos” (ENGEMATEC, 2015).

Geradores de corrente alternada sofrem com as correntes harmônicas conforme explica Engematec (2015), devido à criação de um torque pulsante numa frequência diferente da gerada no alternador, ocasionando vibrações e sobreaquecimentos nos enrolamentos de amortecimento. Isto ocorre devido ao fato da reatância subtransitória ser relativamente alta, a distorção harmônica total de tensão aumenta rapidamente com o acréscimo de correntes harmônicas.

Como visto, os harmônicos ocasionam inúmeros problemas às instalações elétricas, todavia deve-se notar que as correntes harmônicas ocasionam ainda perdas de cunho monetário, visto que com o aumento da potência requerida para as cargas existe uma maior parcela de compra de energia elétrica das concessionárias, causando assim um maior gasto com a fatura mensal da energia elétrica. Este fato é visto principalmente em setores industriais e comerciais.

O terceiro harmônico, conforme citado anteriormente, e seus múltiplos representam os maiores percentuais de correntes harmônicas para cargas monofásicas, e, por esse motivo, solucionar (ou amenizar) os harmônicos de terceira

ordem representam uma atitude eficiente de combate ao problema. Existem diversas soluções existentes para os consumidores que desejam amenizar os problemas decorrentes dos harmônicos, como filtros passivos, filtros ativos e transformadores isoladores delta-estrela, entretanto em diversas situações existem fatores limitantes, como custos e espaço físico, os quais tornam certos métodos de filtragem inviáveis.

Solução altamente utilizada na atualidade, os filtros passivos são formados a partir de resistores, capacitores e indutores, através de várias conexões em série e paralelo, conforme Belchior (2006). Os filtros passivos são dispositivos que devido à sua simplicidade, possuem baixo custo de implementação e de manutenção quando comparados a outras técnicas de filtragem de distorções.

Os filtros passivos apresentam ainda outra importante vantagem conforme explica Oliveira:

Além da supressão das harmônicas os filtros passivos são utilizados na compensação de reativos. Dessa forma, esta técnica tem sido amplamente utilizada na correção do fator de deslocamento do sistema juntamente com a correção do fator de distorção (OLIVEIRA; KASSICK; EICHELBERGER, 2005, p. 01).

Os filtros passivos apresentam algumas vantagens perante outros meios de filtragem, sendo relevante citar a robustez, a alta confiabilidade, a insensibilidade a surtos, a operação silenciosa e a ausência de elementos ativos (POMILIO, 1998). Outra vantagem é o reduzido tamanho do filtro perante os transformadores isoladores, os quais possuem grande massa e volume, o que pode representar um empecilho para a utilização deste método de filtragem, principalmente em locais com pequeno espaço disponível.

#### 1.1.1. Delimitação do Tema

Com este trabalho, procura-se discorrer sobre os danos causados pelas correntes harmônicas, com o enfoque na de terceira ordem. O principal objetivo foi o desenvolvimento (escolha de topologia e sintonia) de um filtro passivo para harmônicas de 3ª ordem, bem como a comparação de desempenho entre os principais métodos de combate a estas distorções na forma de onda.

Também se procura encontrar uma alternativa viável aos consumidores que não possuem a infraestrutura necessária à instalação de transformadores isoladores, que se apresenta como a solução mais difundida na atualidade.

O desenvolvimento desta pesquisa não tem por objetivo o levantamento de dados em campo para o desenvolvimento do filtro, mas sim o projeto e sintonia do mesmo. O projeto será desenvolvido com base em uma planta formada por parâmetros idealizados.

O desenvolvimento do filtro foi realizado com a ajuda de *software*, sendo a sua escolha parte da pesquisa. Durante a etapa de sintonia, foram realizadas simulações para ajuste de valores de componentes.

## 1.2. PROBLEMAS E PREMISSAS

Os projetos de filtros passivos apresentam inúmeras vantagens em relação ao método do transformador e custo mais reduzido quando comparado ao filtro ativo, contudo filtros de bloqueio apresentam inúmeras configurações possíveis de montagem (KASSICK, 2007).

Cada diferente tipo de instalação elétrica possui diferentes características tais quais a amplitude da corrente, a potência da carga e o fator de potência. Estes fatores acabam por causar diferentes distorções harmônicas, as quais devem ser amenizadas através de configurações diferentes, deste modo o filtro passivo de bloqueio de uma instalação terá componentes com valores diferentes em relação às outras, requerendo assim a necessidade de se projetar um filtro passivo para cada consumidor. Esta baixa versatilidade se apresenta como a principal desvantagem dos filtros passivos.

## 1.3. OBJETIVOS

### 1.3.1. Objetivo Geral

O principal objetivo deste trabalho se resume a projetar um filtro passivo de bloqueio para correntes de terceiro harmônico e realizar comparações entre os principais métodos empregados na atenuação deste tipo de distorção na forma de

onda, bem como encontrar uma alternativa à utilização de transformadores isoladores com relação de transformação unitária.

### 1.3.2. Objetivos Específicos

Para que seja atingido o objetivo geral citado acima, foi necessário que os seguintes objetivos fossem alcançados:

- Revisar a literatura;
- Definir uma planta elétrica com os parâmetros e os espectros harmônicos definidos;
- Encontrar o melhor programa computacional para se realizar as simulações;
- Modelar o problema de harmônicos de 3ª ordem;
- Escolher a topologia de circuito a ser empregada;
- Projetar um filtro passivo de bloqueio de 3ª ordem;
- Investigar outros métodos de filtragem de harmônicos bem como suas vantagens e desvantagens.

### 1.4. JUSTIFICATIVA

A crescente utilização de equipamentos que se utilizam da eletrônica de potência nas últimas décadas provocou o surgimento de correntes harmônicas nas instalações elétricas, contudo da mesma maneira que os equipamentos eletrônicos se desenvolvem, ocorre um processo de maior sensibilização das novas tecnologias a pequenas variações de tensão e corrente, podendo danificar de maneira irreparável produtos de alta tecnologia, acarretando prejuízos de ordem financeira (KUMAR, 2011). A preocupação em economizar energia elétrica torna cada vez mais interessante a busca por meios de se conseguir amenizar as distorções harmônicas.

A existência de distorções na corrente elétrica vem ocasionando a implementação de processos de filtragem das mesmas. Um dos métodos mais utilizados e populares para o combate aos harmônicos de sequência zero é a

utilização de transformadores delta-estrela com fator de transformação unitário. Este tipo de solução demonstra-se desfavorável em instalações existentes, devido aos problemas com espaço físico, tendo em vista que a necessidade de instalação de um equipamento extra em plantas de consumidores de baixa tensão, especialmente os presentes em grandes centros urbanos, implica na necessidade de reformas e adaptações, além da perda de área disponível. Estes fatos fazem com que este processo de filtragem de harmônicos de 3ª ordem seja inviável.

Filtros passivos de bloqueio apresentam-se como uma excelente alternativa para se combater os harmônicos de corrente em edificações já existentes, visto que existe a possibilidade de se alocar o filtro dentro de painéis, os quais ocupam menos espaço, além do fato destes filtros possuírem custo de implementação reduzido.

A utilização de filtros passivos de bloqueio se mostra uma opção viável quando comparada ao uso de filtros ativos (no aspecto de custo) e mais compacta quando confrontada aos transformadores delta-estrela (devido ao espaço reduzido e à maior segurança). A opção dos filtros passivos se mostra como uma possibilidade eficiente e econômica de se solucionar os inúmeros problemas ocasionados pelos harmônicos de corrente e cujos problemas técnicos restringem-se à hora de se desenvolver o circuito do filtro.

A utilização de simulações em programas computacionais possui a possibilidade de se projetar e observar o comportamento das correntes harmônicas em uma situação controlada e de fácil visualização, fato que permite projetar o filtro passivo mais indicado para cada situação, de maneira simplificada, operações matemáticas mais precisas e pré-visualização dos resultados obtidos a cada variação de parâmetros, sem a necessidade de se realizar um novo processo técnico matemático a partir do início.

## 1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A elaboração deste trabalho foi dividida em três etapas principais: a definição e delimitação do alvo de estudo, a pesquisa e fundamentação teórica e os testes dos filtros para correntes harmônicas de 3ª ordem.

O presente capítulo teve como objetivo pesquisar a respeito do tema escolhido e verificar a sua viabilidade como Trabalho de Conclusão de Curso (TCC).

Na segunda etapa, pretendeu-se priorizar a pesquisa e a fundamentação teórica a respeito de correntes harmônicas e de processos de filtragem das mesmas. A terceira etapa compreendeu basicamente o projeto e a simulação de um filtro passivo para harmônicos de 3ª ordem, realizando-se uma comparação entre os diferentes tipos de filtro, para uma mesma carga padrão.

Inicialmente o tema foi desenvolvido mantendo-se a prioridade no entendimento das componentes harmônicas de corrente, procurando-se enfatizar em suas origens e em seus efeitos sobre centros de carga tipicamente acometidos deste problema. Após a pesquisa citada anteriormente, foram abordados aspectos mais profundos, destacando-se a influência dos harmônicos na qualidade de energia elétrica, bem como o assunto é tratado ao redor do mundo, bem como aceções com relação ao futuro do mercado de filtros de correntes harmônicas.

Encerrada esta etapa de pesquisa inicial, baseada principalmente no conhecimento a respeito das causas, consequências e combate ao problema, foi iniciada a fase de estudo dos diferentes métodos de filtragem, incluindo as diferentes topologias de circuito desenvolvidas para tal fim. Foi nesta etapa que as bases do filtro passivo foram desenvolvidas. A busca de informações foi realizada principalmente através de bibliografia referente à qualidade de energia, procurando-se equacionar e explicar matematicamente o fenômeno alvo, encontrando-se a melhor solução (no aspecto técnico) para a tentativa de filtragem de correntes harmônicas. Durante o processo de projeto do filtro, a pesquisa foi majoritariamente a respeito do cálculo de parâmetros do circuito, encontrando-se os componentes necessários à simulação do filtro.

Ao fim do desenvolvimento do filtro a atenção foi concentrada na simulação da topologia de circuito escolhida. A escolha do *software* foi baseada na simplicidade de comandos bem como na gama de componentes e possibilidades matemáticas disponíveis. Durante a realização da simulação, foram realizados os testes e ajustes dos parâmetros calculados matematicamente.

Por fim foram apresentados os resultados referentes à simulação, realizando-se uma comparação dos filtros de bloqueio mais utilizados atualmente (com enfoque na utilização de transformadores delta-estrela com razão de transformação unitária) com o filtro desenvolvido pela equipe.

## 1.6. ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho foi estruturado em sete capítulos principais. O primeiro (Introdução) se baseia nos aspectos motivacionais que levaram ao estudo do tema e à importância do desenvolvimento de filtros para correntes harmônicas, sendo baseado principalmente nesta proposta.

O segundo capítulo (Harmônicos), apresenta uma visão mais teórica a respeito do tema, realçando a revisão da bibliografia. Foram partes componentes deste capítulo um breve histórico do estudo de correntes harmônicas de terceira ordem, a visão internacional e nacional a respeito do tema na atualidade, as principais causas de correntes harmônicas de terceira ordem e os efeitos provocados pelos harmônicos de corrente nas instalações elétricas. O terceiro capítulo, “Estudos de Caso”, foi representado através de dois estudos de caso, os quais se utilizaram de dois programas computacionais diferentes para auxiliar na determinação do melhor *software* a ser utilizado, bem como a análise dos estudos previamente realizados sobre o tema.

O quarto capítulo, “Programas Computacionais para Harmônicos e Filtros” versa sobre alguns dos inúmeros programas computacionais existentes, apresentando suas vantagens e desvantagens com o intuito de explicar a escolha do programa computacional escolhido pela equipe. O quinto capítulo, “Planta Industrial e seus Respectivos Circuitos”, aborda a delimitação dos circuitos referentes a planta industrial utilizada, apresentando os circuitos, a composição de cada circuito, a potência dos equipamentos, a quantidade de cada um deles e os níveis de distorção harmônica de cada frequência.

O sexto capítulo, “Projeto e Simulação”, buscou sobre apresentar a indústria hipotética antes de realizar qualquer correção para os harmônicos e o fator de potência, bem como a sintonia do filtro de bloqueio desenvolvido. Neste capítulo foi inclusa a simulação do método de filtragem, apresentou-se os resultados referentes ao projeto do filtro de bloqueio, a comparação de desempenho entre o filtro projetado e o uso do transformador isolador na planta elétrica escolhida.

O sétimo capítulo, “Conclusão”, versa sobre os comentários finais e conclusões pertinentes ao trabalho, apresentando a viabilidade da implementação do método do filtro passivo de bloqueio.

## 2. HARMÔNICOS

A tecnologia vem se desenvolvendo em larga escala no decorrer dos anos. Têm-se notado nas últimas décadas avanços em todas as frentes do conhecimento humano, desde a medicina até as telecomunicações, passando desde as mais rudimentares indústrias, tal qual a fabricação de molas, até as indústrias de alta complexibilidade, tais quais as indústrias de materiais médico-hospitalares.

Um dos setores que mais cresce na atualidade é o setor elétrico, através do desenvolvimento de novos serviços e produtos, bem como a mecanização de processos. O setor elétrico é extenso e engloba diversas áreas do conhecimento, tal como a eletrônica, a telecomunicação, a automação e o controle, a eletrotécnica e a computação, nota-se, portanto, o motivo com que o setor elétrico cresce tão rapidamente.

O desenvolvimento de novos equipamentos, serviços e produtos nas últimas décadas, permitiu a substituição de meios manuais e elementares por tecnologias novas e mais eficientes, como os fornos de micro-ondas, os fogões elétricos, as máquinas de lavar, secadores de cabelo, chuveiros elétricos, entre outros tantos equipamentos elétricos que substituíram itens e serviços que antes necessitavam de outras fontes de energia.

O surgimento da eletrônica revolucionou os conceitos relativos a eletricidade, devido ao fato de que os equipamentos eletrônicos passaram a reduzir os erros a eles associados a uma fração mínima, quando comparados aos equipamentos eletromecânicos. O aparecimento da eletrônica permitiu o desenvolvimento de equipamentos com tecnologia superior aos vistos anteriormente, ou mesmo a criação de novos itens, podendo-se citar como exemplo os telefones celulares, os computadores, os reatores eletrônicos e os controladores lógicos programáveis.

A eletrônica permitiu inúmeros avanços tecnológicos, bem como inúmeras vantagens à sociedade, permitindo maior processamento de dados, criação de novas interfaces, popularização de conceitos de comunicação à distância, redução do volume de equipamentos elétricos, bem como a maior eficiência destes.

Porém o desenvolvimento desses equipamentos com tecnologias econômicas trouxe problemas ao setor elétrico, devido ao fato de que tais

equipamentos se baseiam na utilização de elementos não lineares em sua construção. As cargas não lineares requerem correntes distorcidas da fonte à qual são conectadas, e uma vez conectadas à rede elétrica, podem alterar a forma de onda de tensão no ponto de acoplamento comum onde são ligadas várias cargas provenientes de vários consumidores diferentes.

A necessidade de se monitorar as distorções na forma de onda da tensão e da corrente elétrica, ocasionadas por consumidores, por muitos anos foi ignorada, tanto pelos consumidores de energia elétrica, como para as distribuidoras de energia. Entretanto, com o aumento da sensibilidade dos circuitos eletrônicos atuais, os distúrbios associados à baixa qualidade da energia causam inúmeras e graves influências aos mesmos, ocasionando uma drástica diminuição da vida útil dos aparelhos eletrônicos, existindo em alguns casos grandes chances de danificá-los de maneira irreversível.

Após o início do século XXI houve um aumento no crescimento da não linearidade das cargas residenciais, comerciais e industriais, o que acabou por alterar seus perfis típicos. Devido a esta mudança nas cargas, tem-se como consequência a necessidade de novos estudos, aprimoramentos e alterações em projetos de instalações elétricas (WANG, 2011).

## 2.1. DEFINIÇÃO DE HARMÔNICOS

Harmônico é a denominação utilizada para toda a forma de onda não senoidal cuja frequência é múltipla inteira da forma de onda de frequência fundamental. O termo provém da física, mais especificamente do estudo da ondulatória, devido ao fato de que quando uma partícula ou onda se propaga em uma oscilação periódica ao redor de um ponto de equilíbrio, este movimento pode ser descrito como uma combinação de senóides e cossenóides, e é denominado “movimento harmônico” (LI PENGHUI, 2010).

Importante fato sobre as distorções na forma de onda é que de maneira geral, harmônicos pares são extremamente raros, isto ocorre uma vez que os dispositivos eletrônicos que incorporam funções de retificação e/ou inversão, independentemente do número de fases, operam normalmente com retificações de onda completa e geram, na linha de alimentação, sinais distorcidos, todavia

simétricos e periódicos. Através da teoria de Fourier pode-se demonstrar matematicamente que para todo sinal que possua simetria de meia onda seus componentes pares são anulados. Deste modo, tem-se que a eventual presença de harmônicos pares é sinal de que o controle dos semicondutores nos dispositivos de retificação/ inversão encontram-se desajustados (ISONI, 2010).

As harmônicas de ordem mais elevada, e conseqüentemente, de frequência mais elevada, apresentam amplitudes reduzidas fundamentalmente porque são suavizadas pelas próprias indutâncias presentes nas redes elétricas. Isto ocorre devido ao fato de que quanto maior a frequência do harmônico, maior será a reatância indutiva da linha para tal frequência, acarretando uma maior dificuldade de passagem do harmônico, deste modo as principais harmônicas de um sistema correspondem aos valores mais próximos à fundamental.

A caracterização da presença de harmônicos pode ser feita através do tratamento individual ou total dos mesmos. Deste modo têm-se as distorções:

- **Distorção harmônica individual (DHI):** é obtida através da relação entre a amplitude da harmônica de ordem  $n$  ( $H_n$ ) e a correspondente fundamental ( $H_1$ ) (ISONI, 2010).

$$DHI = \frac{H_n}{H_1} * 100 \quad (1)$$

- **Distorção harmônica total (DHT):** tem por objetivo gerar uma variável representativa da ação conjunta de todas as frequências harmônicas presentes. O valor obtido é a distorção eficaz resultante, dado pela equação 3 (ISONI, 2010).

$$Q_{novo} = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (2)$$

## 2.2. CARGAS GERADORAS DE HARMÔNICOS

As cargas não lineares, presentes em grande escala nas unidades consumidoras de todos os portes, produzem distorções na forma de onda da corrente e tensão, ou seja, acabam por gerar harmônicos. Atualmente consumidores

industriais consomem potência elevada, e utilizam motores, acionadores, conversores, inversores de frequência e outros equipamentos que causam grande quantidade de distorção harmônica, motivo pelo qual são conhecidos como os principais geradores de harmônicos. Importante notar que consumidores comerciais acabam por gerar muito mais harmônicos que os residenciais, devido à necessidade da utilização de muitas lâmpadas fluorescentes, redes de computadores e equipamentos eletrônicos (PIRES, 2006).

### 2.2.1. Sistemas de Retificação e Acionamento CC

No processo de retificação de uma onda alternada, o retificador “corta” a onda da corrente e permite que ela passe em apenas alguns momentos do ciclo de tensão de alimentação. O resultado da entrada do retificador é uma onda de corrente distorcida, normalmente rica em conteúdo harmônico. Os níveis de distorção harmônica devido aos retificadores dependem da quantidade de pulsos utilizados na retificação (número de diodos ou de tiristores utilizados na (s) ponte (s) retificadora (s)), bem como do ajuste do ângulo dos tiristores.

Industrialmente é bastante usual a utilização de pontes retificadoras de 6 pulsos para, por exemplo, alimentar o enrolamento do rotor de motores de corrente contínua. Acionamentos de maior porte podem demandar 12 pulsos, o que reduz os regimes de condução de corrente de cada tiristor individualmente e minimiza algumas das mais significativas correntes harmônicas, tais quais as de 5ª e 7ª ordem. Um sistema que se utiliza de 12 pulsos terá um conteúdo harmônico total da ordem de 10% a 15%, para os casos de 18 pulsos conteúdo harmônico total não deverá passar de 10%, todavia deve-se constatar que quanto maior o número de pulsos adotados maior será o custo do retificador, devido a maior complexidade deste (ISONI, 2010).

### 2.2.2. Fontes De Alimentação Monofásicas (Chaveadas)

Equipamentos eletrônicos monofásicos como computadores, celulares, impressoras, televisores, copiadoras, aparelhos de videogame e outros equipamentos baseados em microprocessadores, empregam, em sua grande

maioria fontes de alimentação chaveadas. A fonte chaveada é uma sucessão de dispositivos situados na entrada dos equipamentos, os quais são ligados diretamente à rede de corrente alternada, sem a necessidade de transformadores, compondo-se basicamente por uma ponte retificadora monofásica a diodo com retificação em onda completa, capacitor, circuito de chaveamento (transformação do sinal retificado em sinal CA, porém com alta frequência) e um novo circuito retificador. As vantagens destas fontes é a redução do peso e tamanho, inexistência do transformador na entrada, operação eficiente e boa tolerância a possíveis variações de tensão de alimentação.

É preciso notar que, devido ao efeito da ponte retificadora e do capacitor, a corrente na entrada passa em pulsos de pequena duração, fato que a caracteriza como uma onda periódica não senoidal e por consequência gera conteúdo harmônico. Uma das principais características das fontes chaveadas é provocar um significativo conteúdo harmônico de 3ª ordem.

### 2.2.3. Reatores Eletrônicos para Iluminação

Reatores eletrônicos para iluminação são equipamentos que se utilizam de fontes chaveadas e que geram correntes harmônicas semelhantes aos consumidores. A tensão de saída para as lâmpadas é controlada e aplicada a altas frequências, o que se torna possível através do emprego de inversores tiristorizados. A utilização de tal tecnologia possibilita uma maior eficiência do sistema de iluminação, a falta do efeito estroboscópico nas lâmpadas, menor dissipação de calor do que nos reatores eletromagnéticos e a possibilidade de controles mais sofisticados como, por exemplo, a dimerização em alguns casos.

Devido ao fato de que na atualidade as lâmpadas fluorescentes e de *LED*, são as únicas produzidas e comercializadas no país, no setor comercial e de serviços, estes sistemas de iluminação podem representar algo próximo de 60% da carga instalada, tornando por consequência a principal causa de distorções harmônicas no setor comercial e residencial. Os fabricantes de reatores eletrônicos vêm buscando de maneiras contínuas melhorias dos projetos a fim de reduzir o conteúdo harmônico, sendo condizente adotar DHT não superior a 10% (ISONI, 2010).

#### 2.2.4. Controladores de Tensão (Controle de Iluminação e Aquecimento)

Os controladores de tensão vêm sendo cada vez mais aplicados nos ambientes residenciais e comerciais, tal qual a dimerização para o controle da iluminação ou o controle de temperatura interna em fornos e estufas. De modo geral são equipamentos monofásicos ou trifásicos, dotados de semicondutores conectados em configuração antiparalela (simples ou em ponte) de forma que o valor eficaz da onda de tensão em ambos os semiciclos possa ser variado por meio do ajuste dos instantes de gatilhamento dos tiristores. Para a redução do fluxo luminoso das lâmpadas ou a diminuição do calor gerado em resistências elétricas, faz-se com que os semicondutores operem por um tempo mais curto a cada semiciclo de tensão da rede, o que reduz a potência entregue à carga. Nessa situação, a corrente elétrica que passa do lado da rede apresenta uma forma de onda descontínua, não senoidal e dotada de conteúdo harmônico, sendo tanto mais distorcida quanto menor o tempo de condução dos tiristores dentro de um semiciclo da onda de tensão da rede.

#### 2.2.5. Conversores Trifásicos e Acionamentos CA

Equipamentos bastante significativos sob a ótica da geração de distorções harmônicas, destacam-se aqueles cuja topologia elétrica inclui a Ponte de Graetz, tais como os inversores de frequência para controle de velocidade dos motores elétricos de indução e os UPS – *Uninterruptible Power Systems* (popularmente conhecidos como no-break).

Na atualidade tem-se a predominância da corrente alternada nos mais variados campos de atuação da eletricidade, contudo a crescente utilização de correntes contínuas, seja para a retificação da tensão, ou seja, para a inversão de tensão para acionamentos de cargas.

Usualmente esse tipo de acionamento utiliza-se de uma ponte inversora que emprega técnicas PWM (*pulse width modulation*) que permitem transformar a tensão CC gerada no módulo retificador em sequências de grupos de pulsos CC positivos e negativos com a mesma amplitude de tensão CC original e com larguras (ou tempos de ocorrência) variáveis. O valor eficaz resultante simula o efeito de uma senóide.

Via de regra, a corrente na entrada do acionamento será não senoidal, possuirá conteúdo harmônico e a distorção gerada dependerá das características instantâneas de operação do motor, alterando-se para diferentes valores de torque e velocidade.

Conforme citado anteriormente em condições ideais os conversores naturalmente geram correntes harmônicas, contudo em situações não ideais pode-se observar nestes conversores, harmônicos não característicos, os quais não estão previstos na concepção original do projeto e por normalmente serem de sequência zero.

#### 2.2.6. Dispositivos com Princípio de Funcionamento Baseado em Arco Elétrico (Fornos a Arco, Soldas a Arco e Lâmpadas de Descarga)

As lâmpadas de descarga operando com reatores eletromagnéticos ou eletrônicos (lâmpadas fluorescentes, vapor de mercúrio, vapor de sódio e vapores metálicos), fornos a arco e equipamentos de solda a arco são cargas elétricas geradoras de distorções harmônicas uma vez que a tensão e a corrente dos arcos elétricos apresentam características não lineares. A partir do instante da ignição, a tensão decresce à medida que a corrente aumenta, situação que tende ao curto-circuito.

Para o caso das lâmpadas de descarga, os reatores operam como impedâncias externas limitadoras de corrente de forma que haja a estabilização do arco de acordo com as capacidades termomecânicas dos bulbos. Tanto os reatores eletromagnéticos como os eletrônicos produzem distorções harmônicas. Os eletromagnéticos as produzem em função do próprio comportamento do arco e os eletrônicos, que se utilizam de fontes chaveadas.

No caso de fornos industriais a arco, a impedância que limita a tendência de elevação contínua dos níveis de corrente do arco é composta, principalmente, pela impedância própria do sistema supridor, pela impedância de cabeamento de média tensão, pela impedância do transformador destinado à alimentação do forno e pela impedância de condutores secundários, barramentos e terminais de conexão. Correntes da ordem de 50.000 Amperes (nos eletrodos de um forno) são bastante frequentes. O conteúdo harmônico gerado é aleatório e amplamente variável em

função de uma série de fatores como as características do material a ser fundido e as condições de fusão, a posição dos eletrodos e as variações imprevisíveis no comportamento do arco elétrico entre tais eletrodos (ISONI, 2010).

A corrente em fornos a arco é não periódica com conteúdos harmônicos inteiros e fracionários (estes também conhecidos como inter-harmônicos). Os estudos técnicos indicam que na etapa de fusão as distorções harmônicas apresentam amplitudes típicas entre 8% e 10% da fundamental. Durante a etapa de refino do material fundido, a forma de onda se torna simétrica, desaparecendo as harmônicas pares, e a amplitude chega a cerca de 2% a 3% da fundamental. Deve-se salientar que esses valores podem alterar-se e atingir patamares bem mais significativos dependendo das características construtivas do forno, de sua rotina operacional e outras peculiaridades existentes (ARRILAGA, 2003).

#### 2.2.7. Dispositivos com Núcleos Magnéticos Saturados

Equipamentos e dispositivos dotados de núcleos laminados tais como transformadores e motores elétricos, também podem induzir correntes harmônicas quando sobre-excitados. Isso ocorre em função do comportamento não linear do aço, uma vez que, a partir de um determinado nível de tensão aplicada, o fluxo magnético gerado não varia na mesma proporção. Esse fenômeno é conhecido como “saturação magnética” e traduz a incapacidade físico-química do aço em manter a proporcionalidade entre a tensão aplicada e o campo magnético gerado pela corrente circulante. Em outras palavras, isso significa que há um limite a partir do qual uma elevação da tensão primária não mais incorre na elevação da magnetização do núcleo na mesma proporção, gerando-se correntes de magnetização desproporcionais à tensão e, portanto, não lineares. Essa distorção incorre no surgimento de tensões secundárias também distorcidas.

Os transformadores de força para utilização geral, com algumas exceções bastante específicas, projetadas para operar satisfatoriamente abaixo do ponto de saturação, com uma densidade de fluxo adequada à manutenção das proporcionalidades das grandezas elétricas envolvidas. A operação deste tipo de equipamento pode ser ajustada a eventuais sobretensões permanentes na rede de alimentação por meio da utilização de comutadores de “tap’s”, evitando-se danos

nas isolações, buscando-se manter um comportamento desejável entre as grandezas elétricas no primário e no secundário, minimizando a possibilidade de surgimento de distorções harmônicas.

Motores elétricos, em função de características construtivas próprias e principalmente quando submetidos a tensões mais elevadas que o projeto, também podem absorver da rede correntes elétricas distorcidas. Tais distorções apresentam conteúdos harmônicos cujas frequências são dependentes do número de ranhuras presentes no estator e no rotor.

### 2.3. EFEITOS DOS HARMÔNICOS OPERANDO EM COMPONENTES ELÉTRICAS

As correntes e tensões harmônicas podem causar inúmeros danos ao sistema elétrico, tanto na instalação elétrica quanto no sistema de distribuição de energia (CHAPMAN, 2005).

A presença de distorções harmônicas na rede elétrica significa a existência de perdas, seja através da redução da vida útil dos equipamentos e aparelhos, seja na dispersão de energia por efeito Joule nos condutores por onde passa a corrente. De acordo com a norma IEEE Std 519-1992, o grau de tolerância aos harmônicos depende da suscetibilidade da carga ao nível de distorção ao qual está submetida.

As cargas suscetíveis aos harmônicos são as que dependem de uma senóide pura e que assumem tal forma nas condições de projeto. Alguns dos equipamentos mais suscetíveis aos harmônicos são os dispositivos de comunicação e processadores de dados. Em contrapartida existem cargas que toleram altos níveis de distorção harmônica, sendo pouco suscetíveis às distorções, visto que a dissipação de energia auxilia em seus processos, como, por exemplo, chuveiros, fornos e outras cargas para aquecimento.

#### 2.3.1. Sobreaquecimento do Condutor Neutro

Para sistemas trifásicos equilibrados, as tensões e as correntes em cada fase estão defasadas em  $120^\circ$  entre si no tempo, não havendo, idealmente, passagem de corrente pelo condutor neutro, visto que a corrente fasorial no neutro é igual à corrente resultante da soma vetorial das correntes das três fases. Porém

quando o sistema está desbalanceado, a soma vetorial das correntes de fase não é nula, havendo, portanto, passagem de corrente pelo condutor neutro.

Os sistemas de distribuição são inevitavelmente desbalanceados, visto que existem diferentes comprimentos das linhas, bem como uma grande porcentagem de cargas que são monofásicas ou bifásicas, contudo busca-se sempre o melhor equilíbrio entre as fases. Anteriormente, os projetistas tinham por hábito dimensionar o condutor neutro como sendo metade da seção de um condutor de fase (PIRES, 2006). Tal fato se prova sensato tendo em vista que as correntes fundamentais se anulam, todavia o mesmo não se prova verdade para as correntes harmônicas.

Segundo Fortescue, todo sistema polifásico desbalanceado, de  $n$  fasores correlacionados, pode ser decomposto em  $n$  sistemas equilibrados, método o qual é conhecido como decomposição em componentes simétricas. O teorema de Fortescue para sistemas trifásicos mostra que sistemas desbalanceados podem ser decompostos em três conjuntos de sistemas equilibrados, os sistemas de sequência positiva, negativa e zero.

As componentes de sequência positiva consistem em três fasores de módulos iguais, defasados em  $120^\circ$  entre si e com a mesma sequência de fases que o sistema original. As componentes de sequência zero são compostas por três fasores de mesmo módulo, mesma direção e mesmo sentido, apresentado, portanto defasamento nulo. As componentes de sequência negativa, assim como as de sequência positiva são compostas de três fasores de mesmo módulo e defasados em  $120^\circ$ , contudo possuem sequência de fase invertida com relação ao original.

As correntes harmônicas de ordem múltipla de três são de sequência zero, compostas por três fasores de mesmo módulo, direção e sentido. O módulo da soma vetorial de tais componentes é igual à soma algébrica de suas intensidades, sendo que esta soma passa pelo condutor neutro do sistema trifásico. A partir de tal constatação, em sistemas que apresentarem cargas monofásicas não lineares, existirá harmônicos de corrente, deve-se dimensionar o condutor neutro de maneira correta, sendo, portanto, necessário que a bitola do condutor seja de uma ordem superior à planejada, acarretando custos adicionais à instalação elétrica.

### 2.3.2. Transformadores

Os transformadores são aparelhos robustos, os quais alteram o nível de tensão entre dois circuitos elétricos acoplados magneticamente, através do ajuste correto entre espiras no primário e no secundário. Para garantir um bom acoplamento magnético entre os enrolamentos, as bobinas são enroladas em um núcleo ferromagnético de alta permeabilidade magnética (LIE PEI, 2010). Os materiais ferromagnéticos apresentam o fenômeno da histerese, e neles podem surgir ainda as correntes de Foucault, efeitos considerados no projeto e fabricação de transformadores, contudo a presença de componentes harmônicas no transformador aumenta as perdas por histerese magnética e correntes parasitas.

As correntes harmônicas são responsáveis pelo aumento das perdas no cobre e das perdas envolvendo fluxos de dispersão, gerando sobreaquecimento por perdas de efeito Joule e também por perdas no ferro. Outro efeito que pode ocorrer são solicitações extras de isolamento, que ocorrem por dois motivos principais: as sobre tensões e as possíveis ressonâncias (entre os enrolamentos do transformador e as capacitâncias existentes nas linhas).

Os harmônicos de ordem três estão em fase nos enrolamentos do transformador conectado em delta. Isto implica no fato de que o transformador atua como um filtro para os harmônicos de terceira ordem e seus múltiplos, contudo, se os enrolamentos do transformador estiverem submetidos a correntes altas, os problemas de sobreaquecimento e de perdas da isolação interna são potencializados. A existência destes fatos faz com que a vida útil e o rendimento do equipamento sejam diminuídos.

#### 2.3.2.1. Transformadores de Potência

Os transformadores, conforme visto anteriormente, sofrem com o efeito de sobretensões e aumento de perdas, fato comum aos equipamentos expostos à presença de harmônicos, contudo nos transformadores tem-se o efeito da alteração da relação de transformação. Em um transformador de potência (TP), observa-se que a relação de transformação para certas frequências, pode ser de até três vezes o valor da relação nominal (vista na frequência fundamental)(ISONI,2010).

Percebe-se que a relação de transformação é alterada dramaticamente a partir de uma frequência de 750 Hz, fato que pode inserir erros nos sistemas de

proteção ou monitoramento que trabalhem com sinais provenientes de TP's, pois com o aumento da frequência, o sinal pode amplificar ou reduzir os harmônicos após a transformação. É importante ressaltar que os TP's capacitivos apresentam erros superiores aos indutivos, por esta razão são menos indicados para a utilização em medições de instalações que contenham harmônicos.

### 2.3.3. Medidores de Energia

Os medidores de energia elétrica, comumente utilizados nas residências, nos comércios e nas indústrias de pequeno porte são em sua maioria do tipo “kilowatt-hora indutivo”, o qual realiza as medições a partir da rotação de um disco que fica sujeito a torques eletromagnéticos originados pela circulação da corrente em uma bobina. O fato deste tipo de medidor depender de uma corrente, cria a possibilidade de que correntes harmônicas interfiram na medição, alterando o torque nesse disco, o qual será dotado de componentes harmônicas pela interação de fluxos em diversas frequências, resultando em uma indicação errônea de valores, os quais podem ser erros positivos ou negativos, conforme o tipo de medidor e o tipo de harmônico presente.

### 2.3.4. Dispositivos de Proteção

Os dispositivos de proteção diferencial trabalham a partir do reconhecimento de picos e de zeros das ondas de tensão e de corrente, supondo que as mesmas sejam senoidais (MADZIKANDA, 2012). A presença de harmônicos nos sinais de entrada de alguns equipamentos, assim como os relés, faz com que os pontos de referência sejam alterados, o que implica em perda de confiabilidade destes aparelhos. Vale ressaltar o fato de que não se pode prever o desempenho dos relés na presença de harmônicos, isto ocorre devido às diferenças entre fabricantes de relés e mesmo entre os próprios modelos dos fabricantes.

Em sistemas elétricos que apresentem conteúdo harmônico, podem acontecer falhas de relés de proteção em situações de falta, bem como a atuação indevida destes, acarretando em prejuízos para as redes e para os consumidores. Uma opção para diminuir os problemas dos relés de proteção, é a utilização de relés

digitais, pois estes possuem a capacidade de calcular o valor eficaz do sinal de entrada utilizando amplos espectros de frequência, em substituição aos relés eletromecânicos e os relés eletrônicos (EXPOSITO, 1999).

Outro equipamento de proteção, o fusível pode apresentar problemas na presença de harmônicos, isto ocorre através do aquecimento adicional do elo fusível, o que causa alterações nas características da curva tempo por corrente, ou seja, a presença de harmônicos resultará numa provável atuação do fusível para uma corrente menor do que a especificada. Em disjuntores, a presença de harmônicos de corrente soma-se à corrente fundamental, o que resulta num desarme precoce do mesmo. (EXPOSITO, 1999)

#### 2.3.5. Cabos de Alimentação

O efeito pelicular, ou efeito *skin*, é um fenômeno que ocorre em condutores que transmitem energia por corrente alternada, nos quais a corrente tende a circular pelas bordas (MERRIKHI, 2006).

Para frequências elevadas, especialmente acima de 350 Hz (acima do sexto harmônico, para o caso de frequência fundamental de 60 Hz), o efeito *skin* aumenta as perdas por efeito Joule. Outro efeito é conhecido como “efeito de proximidade”, o qual relaciona um aumento na resistência do condutor em função do efeito dos campos magnéticos produzidos pelos demais condutores colocados nas adjacências, motivo que torna desaconselhável utilizar o mesmo eletroduto para diversos cabos de alimentação.

#### 2.3.6. Motores Síncronos

Os motores de indução trifásicos possuem o seguinte princípio de funcionamento: as tensões nos enrolamentos rotóricos são induzidas a partir das tensões de alimentação dos enrolamentos estáticos. A alimentação de um motor de indução com uma fonte de tensão que contenha componentes harmônicas provoca um aumento das perdas nos núcleos por correntes de Foucault, e provoca perdas no cobre devido ao aumento da intensidade da corrente eficaz de entrada, o

que pode causar elevação da temperatura interna do motor e afetar a isolação dos condutores internos (MOLDER, 2010).

Os efeitos do sobreaquecimento variam conforme o tipo de rotor utilizado pela máquina. Os rotores bobinados são mais sensíveis aos efeitos térmicos do que os rotores do tipo gaiola de esquilo, que são mais robustos, e não necessitam de isolação como os rotores bobinados (FITZGERALD, 2006).

Existe a presença de campos magnéticos harmônicos nos enrolamentos do estator, cada um girando a uma velocidade diferente. Os campos magnéticos gerados pelas correntes harmônicas de sequência negativa induzem forças cujos conjugados tendem a fazer com que o motor gire em sentido contrário, influenciando o rendimento. A característica ruidosa da corrente de estator da máquina implica na combinação de campos magnéticos também ruidosos, resultando em um torque pulsante no eixo de rotação, o qual pode ser intolerável dependendo da máquina. Máquinas de altas potências e grande inércia, em geral, não mostram alta sensibilidade à pulsação do torque, pois a inércia do eixo de rotação atua como um filtro eletromecânico para as oscilações causadas pelas componentes harmônicas (ROBERTON, 1971).

### 2.3.7. Equipamentos Eletrônicos

Equipamentos eletrônicos podem ser muito sensíveis a distorções na forma de onda de tensão. O funcionamento destes equipamentos depende, em muitos casos, do cruzamento com o zero (ou outros aspectos da onda de tensão) para realizar alguma ação. Distorções na forma de onda podem alterar, ou mesmo inviabilizar, seu funcionamento (INMETRO, 2012).

As distorções harmônicas podem causar deslocamento do ponto de mudança de sinal, bem como do ponto no qual o sinal de uma fase se torna maior que o de outra fase. Os instantes em que ocorrem estes fenômenos são pontos críticos de diversos circuitos eletrônicos de controle, sendo que as distorções podem afetar o funcionamento adequado dos dispositivos.

Equipamentos da área médica requerem, em geral, alta precisão no funcionamento e intenso isolamento harmônico. Como resultado disso, inúmeros

testes e estudos sobre harmônicos são realizados em instalações médicas, e são instalados filtros para reduzir as distorções a níveis toleráveis (WANG, 2011).

#### 2.3.8. Capacitores

As cargas conectadas ao sistema elétrico, tanto na indústria como nas residências e comércio, possuem caráter predominantemente reativo indutivo. Para se compensar o atraso da corrente gerada pelas cargas indutivas, são instalados capacitores para a correção do fator de potência (HUANG, 2003).

Para que as perdas por efeito Joule sejam minimizadas e para que se mantenha o fator de potência dentro de valores regulamentados, é muito importante que se realize a sua medição. A reatância capacitiva é inversamente proporcional à frequência, enquanto que a indutiva é diretamente proporcional. Os capacitores instalados para a compensação de reativos deixam passar correntes de grande intensidade em alta frequência, o que acaba por danificá-los caso os mesmos não sejam projetados para altos valores de corrente. As correntes de alta frequência, que encontrarão um caminho de menor impedância pelos capacitores, elevarão as suas perdas ôhmicas. O decorrente aumento no aquecimento do dispositivo encurta a vida útil do capacitor (WANG, 2011).

Um efeito mais grave que pode ocorrer em bancos de capacitores é a ressonância harmônica entre o banco de capacitores e a indutância parasita da fonte de alimentação a uma das frequências harmônicas. Quando ocorrer este fenômeno, é possível que sejam geradas sobretensões e sobrecorrentes que danifiquem severamente o equipamento, levando a prejuízos técnicos e financeiros. Para se evitar o fenômeno da ressonância pode-se adicionar uma indutância em série ao banco de capacitor, com a finalidade que o novo conjunto seja indutivo na frequência de ordem significativa mais baixa. O intuito é deslocar a frequência de ressonância para valores mais elevados, nos quais a amplitude das harmônicas é desprezível (HUANG, 2003).

### 2.4. MEDIDAS DE COMBATE AOS HARMÔNICOS

Devido ao crescente emprego das cargas elétricas que geram distorções harmônicas, bem como o aumento dos efeitos prejudiciais dos mesmos para as instalações elétricas, surge a necessidade de adoção de medidas de controle e redução dos níveis de harmônicos. Para reduzir as amplitudes e os efeitos causados pelos harmônicos, utilizam-se técnicas para realizar a filtragem de uma ou mais frequências objetivando reduzir ou eliminar as distorções.

A instalação de filtros no sistema possui a finalidade de absorver os harmônicos de corrente, proporcionando um caminho de baixa impedância para esses harmônicos. Através disto, consegue-se o principal objetivo de reduzir a amplitude de uma ou mais frequências de correntes e/ou tensões harmônicas. Os filtros harmônicos, além de reduzir os problemas com estas distorções podem também compensar a energia reativa do sistema com a consequente melhoria do fator de potência da planta, ou seja, utiliza-se na constituição dos filtros os bancos de capacitores normalmente empregados para correção do fator de potência, minimizando os investimentos necessários (TEIXEIRA, 2009).

#### 2.4.1. Filtros Passivos

Os filtros passivos são circuitos projetados com elementos passivos, ou seja, resistores, capacitores e indutores. Este tipo de filtro possui custo mais baixo, enquadrando-se na categoria série ou na de derivação (shunt) (MORAES, 2011).

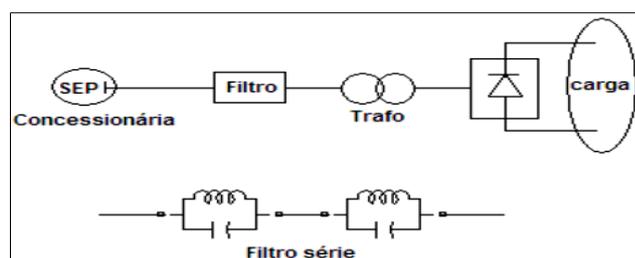
Filtros para harmônicos podem ser instalados tanto do lado da corrente alternada, quanto do lado da corrente contínua (no caso de conversores). Os filtros ligados no lado CA podem ser conectados no lado primário (da rede) dos transformadores retificadores, ou no enrolamento terciário, caso este exista. Filtros no enrolamento terciário têm a vantagem de possuir um menor custo, pois são isolados para tensões mais baixas, contudo os transformadores com enrolamentos terciários são mais caros. Além disso, esses enrolamentos têm normalmente uma alta reatância de dispersão que dificulta a verificação de possíveis ressonâncias entre os filtros e a rede de corrente alternada, sendo este fato uma consequência do posicionamento em série de “filtros shunt” com os enrolamentos.

Os filtros podem ser classificados de acordo com o modo de conexão que são ligados aos sistemas, podendo ser um filtro série ou um filtro “shunt”. O filtro

série é ligado com o sistema de forma a impedir a circulação de um determinado harmônico entre a carga e o sistema elétrico. Este filtro em questão pode ser formado por uma indutância e capacitância em paralelo e representa uma grande impedância para a frequência que se deseja evitar. A figura 1 exemplifica uma ligação do tipo série.

Figura 1 – Conexão e circuito típico de filtro série

Fonte: Teixeira, 2009.

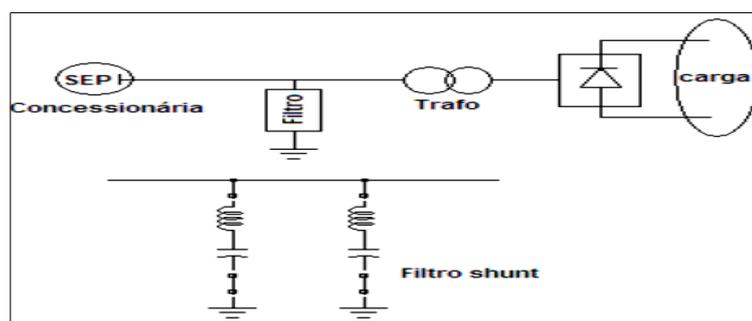


Uma desvantagem deste tipo de filtro é o fato de ser dimensionado para suportar a corrente a plena carga do circuito e, assim sendo, ser mais caro. Outra desvantagem é o fato de que a produção de harmônicos pelos componentes não lineares do sistema ocorre pela necessidade de circulação desses harmônicos para sua operação normal.

O filtro do tipo “shunt”, conforme demonstrado na figura 2, é ligado em paralelo ao sistema, o que propicia um caminho de baixa impedância para as frequências harmônicas, evitando a penetração destas no resto do sistema. Devido a sua menor complexidade e menor custo é o método mais utilizado para se combater os harmônicos.

Figura 2 – Conexão e circuito típico de filtro shunt

Fonte: Teixeira, 2009.



O filtro “shunt” é dimensionado para suportar somente a corrente harmônica para a qual está sintonizado, acrescida a uma corrente fundamental muito menor que a do circuito fundamental, logo o filtro “shunt” é mais barato que um filtro série de mesma eficiência. Uma vantagem dos filtros “shunt” CA sobre os filtros série, é o fato de que na frequência fundamental os filtros “shunt” fornecem potência reativa para a correção do fator de potência.

Os filtros para combater harmônicos podem ser classificados ainda de acordo com a largura da faixa de sintonia. O “filtro sintonizado” é sintonizado em faixas bastante estreitas para uma ou duas frequências harmônicas mais baixas, como as de 5ª e 7ª ordens. O filtro amortecido, também conhecido como passa alta, se conecta ao “shunt”, oferecendo uma baixa impedância sobre uma larga faixa de frequências, tal qual o 17º e harmônicos superiores.

#### 2.4.2. Filtros Ativos

Os filtros passivos são projetados para compensar uma ordem harmônica ou conjunto de ordens preestabelecidas, contudo, nos sistemas elétricos é comum encontrar um panorama inconsistente de harmônicos, devido à conexão simultânea de diversas cargas não lineares (ARRILAGA, 2003). Essas cargas apresentam componente harmônico variante no tempo, tornando difícil a previsão do conteúdo harmônico na instalação. Para se solucionar este problema, são utilizados filtros ativos série ou em derivação, os quais são constituídos por componentes passivos associados a dispositivos de controle digital (PIRES, 2006).

Para um filtro ativo em derivação, é instalado um transformador de corrente, com o intuito de reduzir a ordem de grandeza da corrente na carga a uma faixa de valores segura para a análise harmônica. A partir da forma de onda obtida e do espectro harmônico da onda de corrente, o bloco de controle produz, por meio de um gerador de corrente, uma réplica das correntes harmônicas, porém em sinal oposto. O sinal gerado tem como finalidade anular o efeito das correntes harmônicas inseridas na rede, fornecendo para a carga somente a corrente na frequência fundamental (WATANABE, 1998).

A utilização de filtros ativos pode reduzir em até 90% as componentes harmônicas de uma instalação elétrica, tendo em vista que a ação de controle não é

realizada em tempo real, mas no ciclo seguinte. Os filtros ativos devem possuir potência igual ou superior à carga a ser filtrada, o que pode inviabilizar sua implementação pelo alto custo requerido (LUOR, 2000).

Apesar do elevado custo dos filtros ativos perante os filtros passivos, os filtros ativos possuem rendimento constante independente da variabilidade da carga não linear na qual o filtro é conectado (PIRES, 2006).

#### 2.4.3. Filtros Híbridos

Com o objetivo de reduzir a potência a ser processada pelos filtros ativos, é possível utilizá-los em associação com os filtros passivos, de modo que a parte ativa atue somente sobre as componentes não corrigidas pelo filtro passivo (JAMALI, 2008).

A utilização de filtros híbridos é uma medida de ponderação entre os resultados obtidos na mitigação de harmônicos e os custos envolvidos na implementação. A eficiência dos filtros híbridos é superior à dos filtros puramente passivos e eles não necessitam da complexidade dos filtros puramente ativos, resultando em custos razoáveis e em eficiência mediana perante os filtros puramente passivos e ativos.

#### 2.4.4. Transformador Isolador

Os enrolamentos conectados em triângulo de um transformador trifásico servem como filtro natural para os componentes harmônicos de ordem múltipla de três, evitando que estes componentes se propaguem para fora da alimentação. Apesar das desvantagens que as correntes harmônicas apresentam nos transformadores (perdas ôhmicas e menor tempo de vida), existe a vantagem de se poder isolar as harmônicas de ordem múltipla de três no lado do primário, no qual geralmente é adotada a conexão triângulo (CREDER, 2007).

Em um sistema trifásico, Stevenson (1994) afirma que as correntes de sequência zero são iguais em módulo nas três fases do sistema. Portanto, só existe circulação dessas correntes se o caminho for fechado, característica de uma ligação em triângulo. A ligação em triângulo tem como finalidade criar um caminho sem

retorno, ou seja, um circuito fechado para a circulação das correntes harmônicas de sequência zero. Além disso, outra utilidade importante é fornecer um caminho fechado para as correntes de falta do sistema. Como o circuito é fechado, não há necessidade de criar um ponto de aterramento para o sistema, já que não existe um ponto comum entre as fases.

As componentes de sequência zero possuem a mesma fase, direção e sentido, ou seja, são vetores iguais. Por isso, pode-se dizer que o terceiro harmônico é igual à componente de sequência zero. Pela Lei de Kirchhoff das Correntes (LKC), sabe-se que a somatória das correntes que incidem em um nó de um circuito elétrico é sempre nula. Sendo assim, não existe corrente de terceiro harmônico na corrente de linha.

O mesmo efeito de isolamento pode ser encontrado em transformadores conectados em “zigzag”, os quais são autotransformadores conectados em configuração estrela, com uma relação de fase particular (KUMAR, 2011).

O emprego de transformadores para isolar os harmônicos de terceira ordem e seus múltiplos, possui a vantagem de acabar com alguns dos piores harmônicos possíveis para o sistema elétrico, entretanto o fato de os transformadores isoladores só poderem limitar uma parcela dos harmônicos é prejudicial. Em casos onde o 5º e o 7º harmônico são os de maior intensidade, a utilização do transformador isolador não acaba com o problema, se mostrando ineficaz. É importante salientar o fato de que a utilização de transformadores para reduzir os problemas com os harmônicos é uma solução cara, devido ao preço do transformador, bem como diminui o tempo de vida do transformador, se mostrando vantajoso somente em casos com grande quantidade de harmônicos de ordem múltipla de 3.

### 3. ESTUDOS DE CASO

Durante os últimos anos foram realizados diversos estudos de caso reais a respeito do monitoramento e de tentativas de correção do problema de distorções harmônicas. O objetivo deste capítulo é apresentar alguns destes casos como forma de criar a base necessária à simulação proposta inicialmente.

#### 3.1. ANÁLISE DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS DE UM CONSUMIDOR INDUSTRIAL REALIZADA ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO NO SOFTWARE MATLAB

O seguinte caso consiste na análise das distorções harmônicas de uma indústria siderúrgica localizada no Estado da Bahia. Este estudo foi realizado por Douglas Ângelo Teixeira para sua dissertação de mestrado para a UFMG (Universidade Federal de Minas Gerais).

A indústria em questão tem uma produção que gira em torno de 500.000 toneladas de aço por ano, sendo que a carga é predominantemente formada por fornos a arco.

Neste estudo, foram realizadas as medições de várias grandezas elétricas na planta industrial para posterior comparação com a simulação computacional. As monitorações foram realizadas no ano de 2008 (20 a 23 de maio e 4 de julho).

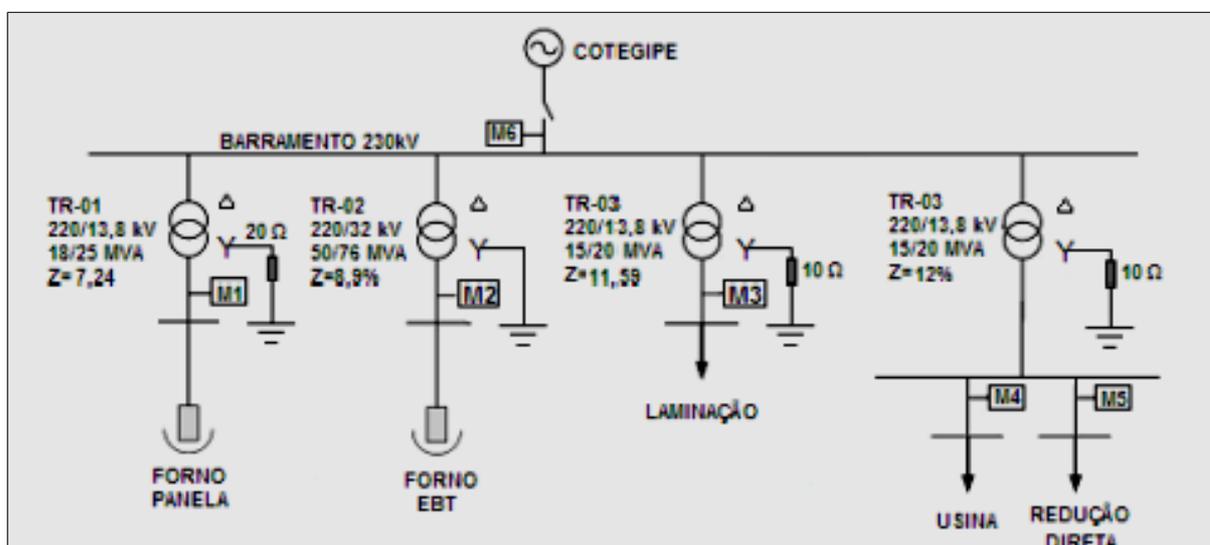
A instalação analisada possui filtros de harmônicos localizados nas saídas dos transformadores. Este conjunto de filtros é composto por um de 3º harmônico, para um forno elétrico a arco EBT (*Eccentric Bottom Tapping*) e filtros para 5º, 7º, 11º harmônicos para o setor de laminação.

##### 3.1.1. Diagrama Geral Simplificado da Planta Industrial

A seguir está o diagrama geral simplificado da planta industrial utilizada neste estudo de caso:

Figura 3 - Diagrama unifilar geral simplificado

Fonte: Teixeira, 2009.



O fornecimento de energia elétrica da indústria é realizado em 230 kV, pela CHESF, subestação de Cotegipe. As medições foram feitas nos pontos M1, M2, M3, M4, M5 e M6.

É importante salientar que o foco consistirá na solução computacional encontrada, sendo que os aspectos da medição são informados apenas para conhecimento.

### 3.1.1.1. Medições Reais Realizadas no Secundário dos Principais Transformadores

As grandezas elétricas monitoradas neste estudo são: tensões e correntes eficazes, distorções harmônicas totais das tensões e correntes, amplitudes individuais das harmônicas mais significativas das tensões e correntes, sendo registrados os valores máximos, mínimos, médios e do percentil 95%

Foi utilizado o registrador Marh 21: fabricante: RMS Sistemas Eletrônicos – Brasil; tensão de alimentação: c.a. 70 a 600 V, frequência: 50 Hz ou 60 Hz e c.c. 11 a 600 V; exatidão: classe 0,5 para tensões e correntes e classe 1 para potências”. Segundo Teixeira (2009), este equipamento é capaz de realizar medições de conteúdo harmônico de tensão e corrente até a 61ª ordem e variações momentâneas de tensão como “sag” e “swell”, dentre outras características.

### 3.1.1.1.1. Medições Realizadas no Ponto M2 (Transformador Tr2)

Para efeito de análise, neste trabalho será apresentado o comportamento do sistema no ponto de medição M2. Este ponto se localiza no secundário do transformador Tr2, o qual tem como principal carga um forno elétrico a arco EBT, que se mostra um grande problema no que se refere a problemas de flutuação de tensão e distorções harmônicas devido à oscilação no seu funcionamento.

A seguir são expostos os resultados das medições de: tensões e correntes eficazes, distorções harmônicas de tensão e corrente.

#### 3.1.1.1.1.1. Análise de Tensões

A seguir são apresentados os dados referentes à tensão no secundário do transformador Tr2, mais especificamente: o gráfico da tensão de linha (medida entre duas fases) pelo tempo e os valores estatísticos da tensão.

Figura 4 - Perfil das tensões eficazes no ponto M2

Fonte: Teixeira, 2009.

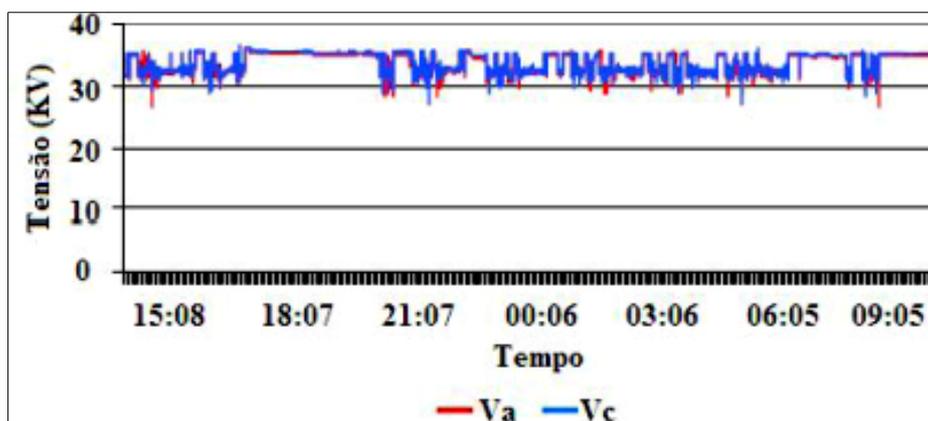


Tabela 1 - Valores estatísticos das tensões eficazes no ponto M2

Tensão	Va [V]	Vc [V]
Máximo	35694,55	36268,49
Mínimo	26359,92	26689,23
Médio	33491,57	33690,40
P95%	35233,31	35502,13

Fonte: Teixeira, 2009.

Logo abaixo é apresentado o gráfico das distorções harmônicas de tensão, bem como seus valores estatísticos. Nota-se que existem oscilações relevantes, podendo-se priorizar os harmônicos de 2<sup>a</sup> ordem.

Figura 5 - Perfil das distorções harmônicas totais das tensões do ponto M2

Fonte: Teixeira, 2009.

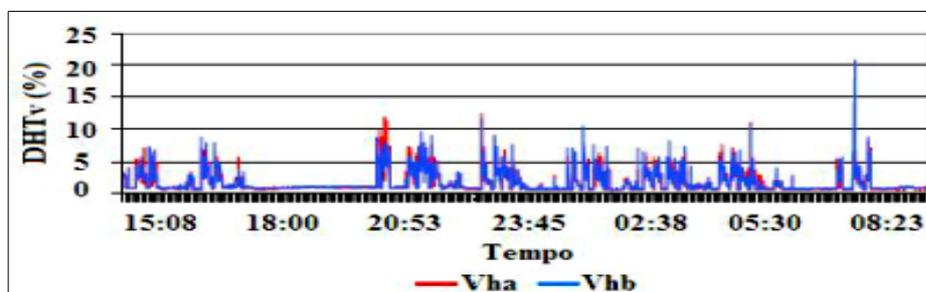


Tabela 2 - Valores estatísticos das distorções totais das tensões do ponto M2

Tensão	Va [%]	Vc [%]
Máximo	12,32	20,64
Mínimo	0,39	0,45
Médio	1,56	1,61
P95%	4,68	4,64

Fonte: Teixeira, 2009.

A seguir é apresentada uma tabela que possui dados separados para cada ordem harmônica, sendo acompanhada pelo espectro de frequências dos valores de distorção.

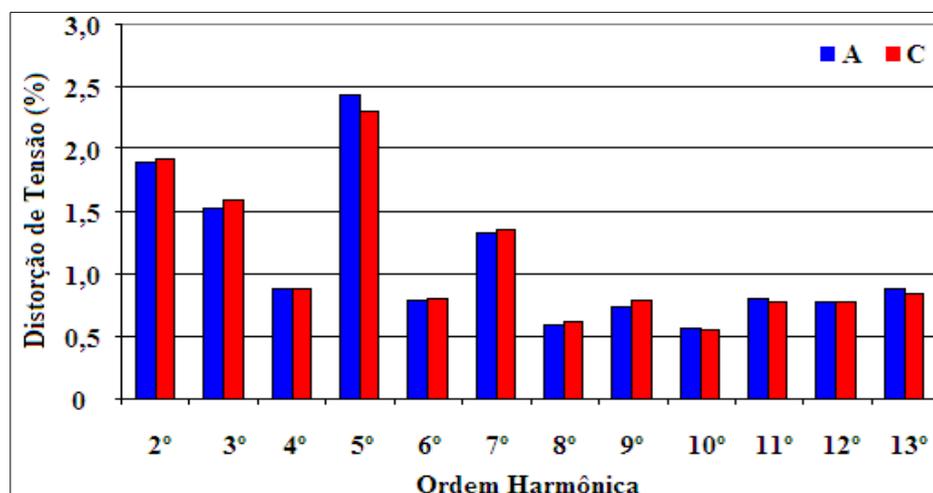
Tabela 3 - Valores máximos, mínimos, médios e P95% das distorções individuais de tensão do ponto M2

<b>Distorção Harmônica Individual de Tensão - Fase A</b>				
<b>Ordem Harmônica</b>	<b>Máximo (%)</b>	<b>Mínimo (%)</b>	<b>Médio (%)</b>	<b>P95 (%)</b>
2	10,34	0,00	0,39	1,89
3	6,33	0,00	0,35	1,53
4	4,09	0,00	0,19	0,87
5	4,52	0,00	0,95	2,43
6	4,16	0,00	0,17	0,79
7	3,31	0,00	0,36	1,33
8	2,28	0,00	0,13	0,59
9	3,34	0,00	0,18	0,74
10	2,88	0,00	0,13	0,57
11	3,20	0,00	0,24	0,80
12	4,25	0,00	0,15	0,78
13	3,92	0,00	0,23	0,88

Fonte: Teixeira, 2009.

Figura 6 - Espectro de frequência dos valores P95% da tensão do ponto M2

Fonte: Teixeira, 2009.



Segundo Teixeira (2009), os valores de tensão podem ser considerados críticos, visto que ultrapassam os limites estabelecidos pela Resolução – 505/2001 da ANEEL (que limita a tensão na faixa de 0,93 a 1,05 pu), que neste caso deveria variar entre 29,76 kV e 33,6 kV. Observa-se na Figura 6 – Valores estatísticos das tensões eficazes no ponto M2 que a tensão varia de 26,4kV (fase A) a 36,3kV (fase C).

Em uma observação simples da Figura 6 – Valores máximos, mínimos, médios e P95% das distorções individuais de tensão do ponto M2, é possível constatar que o perfil de distorção harmônica na tensão está dentro do tolerável pelas recomendações da ONS.

Em sua dissertação, Teixeira (2009) afirma que a causa das tensões de linha eficazes situarem-se em uma faixa indesejada é a falta de chaveamento do banco de capacitores em momentos de flutuação e desequilíbrio de tensão, como, por exemplo, os momentos em que nenhum metal é atingido pelo curto circuito (acentuando-se quando o forno aguarda o fornecimento de carga fria, no caso sucata) ou quando ocorre desligamento do forno.

#### 3.1.1.1.1.2. Análise das Correntes

Abaixo são apresentados os dados referentes à corrente no secundário do transformador Tr2, mais especificamente: o gráfico das correntes de linha eficazes (medida entre duas fases) pelo tempo e os valores estatísticos das correntes.

Figura 7 - Perfil das correntes eficazes do ponto M2

Fonte: Teixeira, 2009.

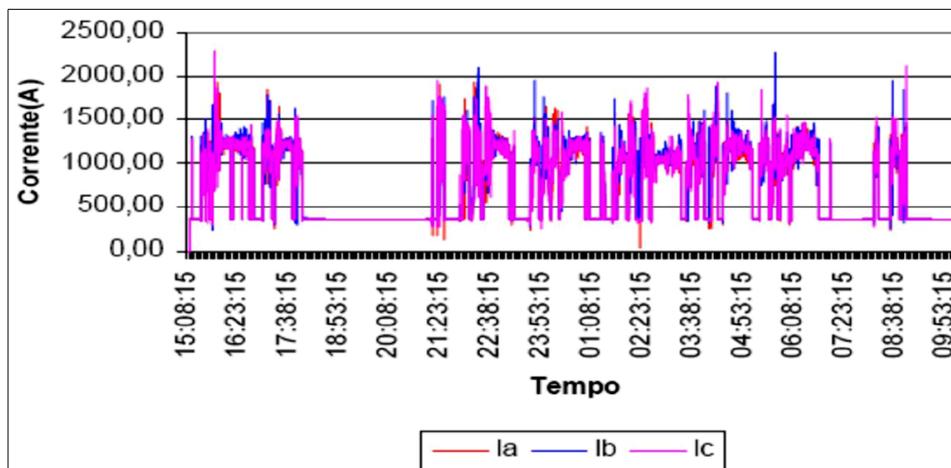


Tabela 4 - Valores máximos, mínimos, médios e P95% da corrente eficaz do ponto M2

RESUMO GERAL DO PERÍODO DE MONITORAÇÃO	
Corrente	Ia [A]
Máximo	1937,93
Mínimo	0,00
Médio	730,11
P95%	1296,13

Fonte: Teixeira, 2009.

A seguir é apresentado a figura 8, das distorções harmônicas de corrente, assim como seus valores estatísticos. É importante salientar que existe um comportamento oscilatório comprometedor, podendo-se priorizar os harmônicos de 2ª e de 3ª ordem.

Figura 8 - Perfil da distorção harmônica total das correntes de linha do ponto M2

Fonte: Teixeira, 2009.

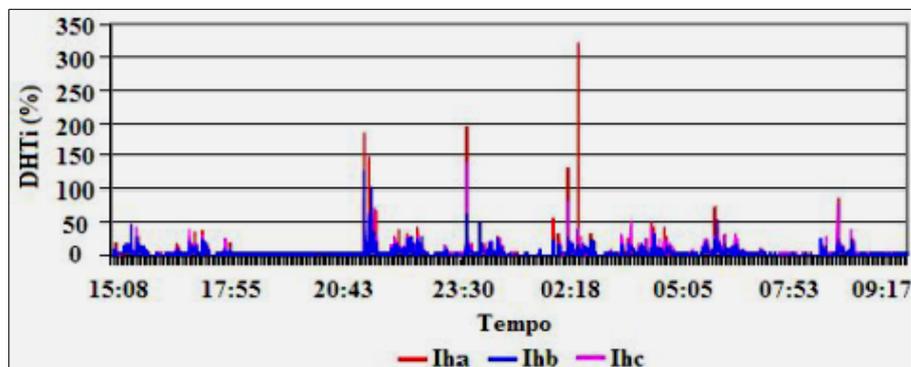


Tabela 5 - Valores estatísticos da distorção total da corrente do ponto M2

RESUMO GERAL DO PERÍODO DE MONITORAÇÃO	
Corrente	Ia [%]
Máximo	319,48
Mínimo	0,00
Médio	3,71
P95%	12,33

Fonte: Teixeira, 2009.

A seguir é apresentada uma tabela que possui dados separados para cada ordem harmônica, sendo acompanhada pelo espectro de frequências dos valores de distorção.

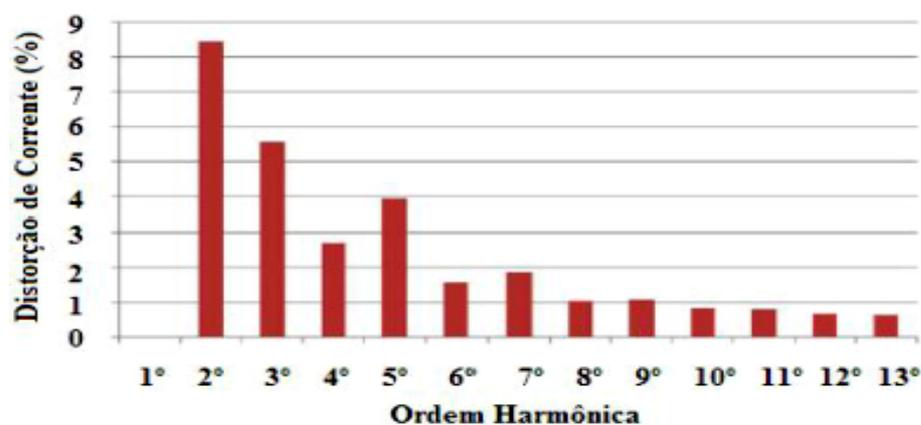
Tabela 6 - Valores máximos, mínimos, médios e P95% das distorções individuais de corrente

<b>Distorção Harmônica Individual de Corrente - Fase A</b>				
<b>Ordem Harmônica</b>	<b>Mínimo (%)</b>	<b>Médio (%)</b>	<b>Máximo (%)</b>	<b>P95 (%)</b>
2	0,00	1,93	194,65	8,42
3	0,00	1,62	227,49	5,55
4	0,00	0,62	69,29	2,70
5	0,00	1,66	58,21	3,91
6	0,00	0,37	50,80	1,57
7	0,00	0,49	30,57	1,87
8	0,00	0,26	42,64	1,04
9	0,00	0,26	12,88	1,07
10	0,00	0,20	14,45	0,82
11	0,00	0,21	13,08	0,80
12	0,00	0,17	17,32	0,65
13	0,00	0,17	15,41	0,62

Fonte: Teixeira, 2009.

Figura 9 - Espectro de frequência dos valores P95% da corrente do ponto M2

Fonte: Teixeira, 2009.



A relação entre a corrente de curto circuito e a corrente fundamental do sinal medido estabelece os valores máximos de distorção harmônica de correntes individuais para ordens pares e ímpares. Neste setor da instalação, a relação de correntes é 41,7 [A/A], fazendo com que os limites alcancem no máximo 7% para os harmônicos ímpares e 1,75% para os harmônicos pares, sendo que os harmônicos de ordem 2 e 4, ficaram acima dos valores máximos estabelecidos.

O principal motivo deste problema na DTD (Distorção Total de Demanda) pode ser considerado o desequilíbrio de tensão, que está intimamente relacionado com o comportamento irregular do forno.

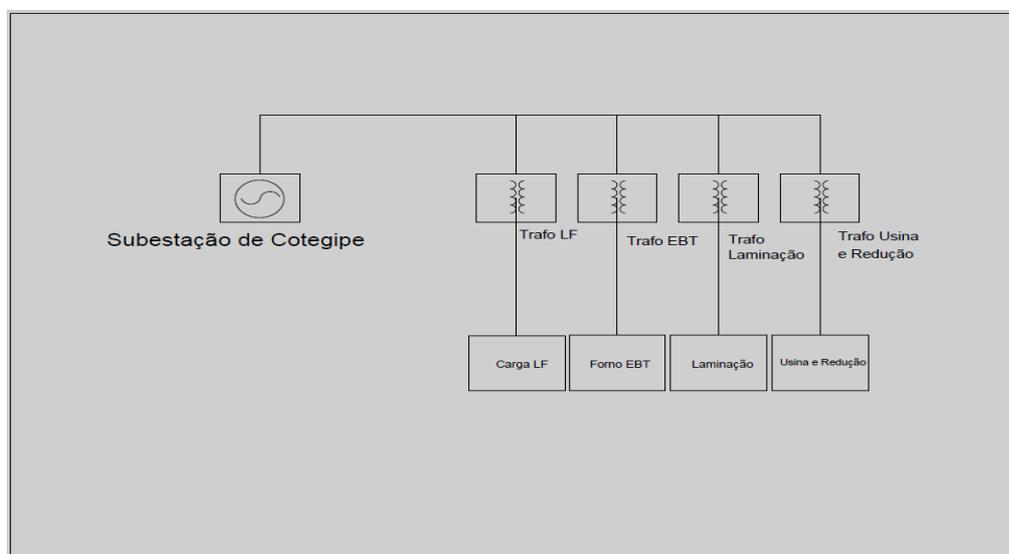
### 3.1.1.2. Modelagem e Simulação da Planta Industrial Através de *Software* Computacional

Com a análise dos dados reais coletados foi verificado que a instalação trabalha dentro da faixa estabelecida pela ANEEL com relação aos harmônicos, mas que existe um problema de desequilíbrio de tensão, bem como foi constatado que o fator de potência geral da instalação está muito próximo ao limite exigido. Para a correção deste problema foi realizada uma simulação computacional do sistema, utilizando-se o *software* MATLAB, mais especificamente a ferramenta Simulink.

A Figura 10 a seguir representa a modelagem do sistema elétrico de fornecimento de energia da indústria em questão. Neste modelo foram considerados: a linha de transmissão que conecta a subestação de Cotegipe à principal subestação presente na planta industrial modelada (representada por parâmetros concentrados, visto que a esta linha é passível de ser classificada como uma linha dita “curta”) e um modelo equivalente da subestação de Cotegipe (que foi apresentada como uma fonte de tensão e sua impedância de curto-circuito). A carga por sua vez foi apresentada no modelo por resistências (para a potência ativa) e por conjugações de capacitores (e indutores) com fontes de corrente (para simular as distorções harmônicas presentes).

Figura 10 - Modelo do Sistema Elétrico: Alimentação da Chesf (Companhia Hidroelétrica do São Francisco), Forno Panela e Forno EBT

Fonte: Moraes, 2011.



Nesta simulação foram apresentados vários setores, porém somente o forno a arco EBT será discutido neste trabalho.

A seguir está disposta uma tabela que possibilita a comparação entre os dados reais coletados e os obtidos pela simulação.

Tabela 7 - Valores Medidos e simulados no secundário do transformador que alimenta o Forno EBT

FORNO EBT		
Grandeza	Medido	
$V_{rms}$	25,10 kV	
$I_{rms}$	1296,13 A	
TDH <sub>v</sub>	Δ 64%	

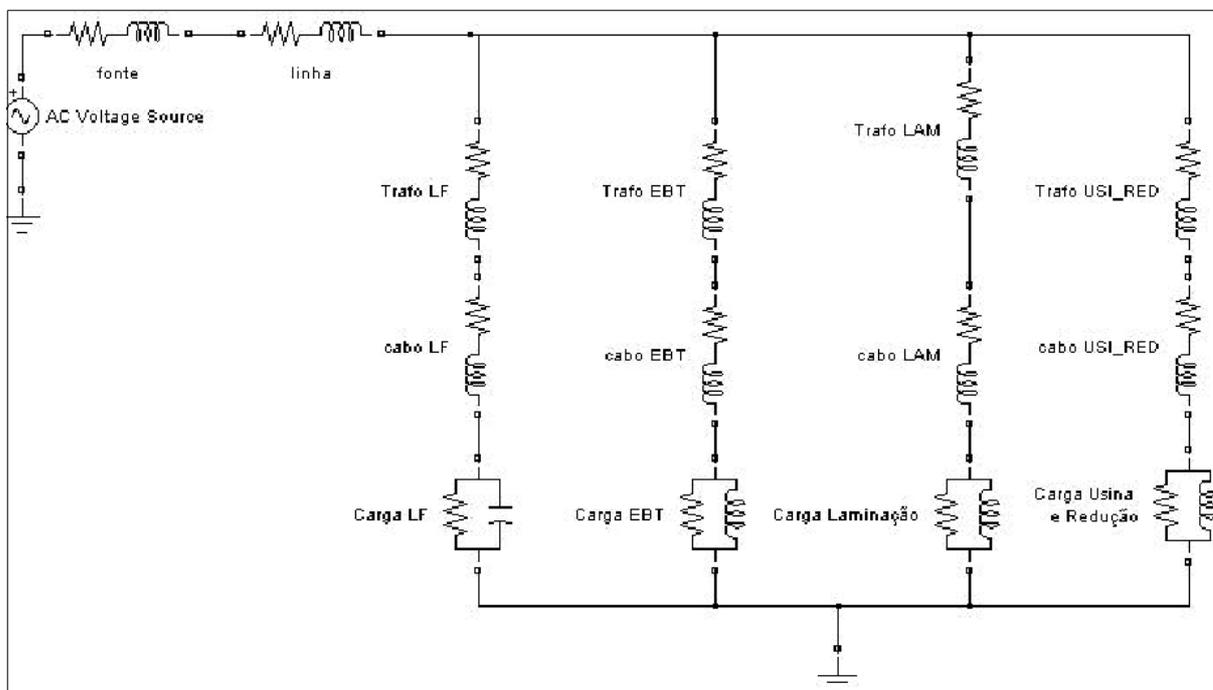
Fonte: Moraes, 2011.

Realizando-se a interpretação dos dados apresentados, é possível, com conhecimento de harmônicos, perceber que a simulação feita no MATLAB é próxima dos dados reais medidos em campo, podendo (dentro de limites propostos) ser utilizada em estudos de distorção harmônica (como o que é alvo deste trabalho de conclusão de curso). As diferenças podem ser vistas como frutos das limitações técnicas impostas pela modelagem e pelos diversos fatores aos quais a instalação está imersa em campo. Devido ao fator de potência estar muito próximo ao valor estabelecido como aceitável (0,92), a solução para o problema foi a inserção de bancos de capacitores para que fosse realizada a injeção de energia reativa na instalação. Devido a fugir dos objetivos deste trabalho, o cálculo do banco de capacitores não será demonstrado.

A energia reativa necessária encontrada foi de 8,27 MVar. A seguir está uma figura que representa a modelagem do diagrama unifilar da instalação fabril resultante após a inserção do banco de capacitores.

Figura 11 - Diagrama unifilar da instalação elétrica fabril resultante após a inserção do banco de capacitores

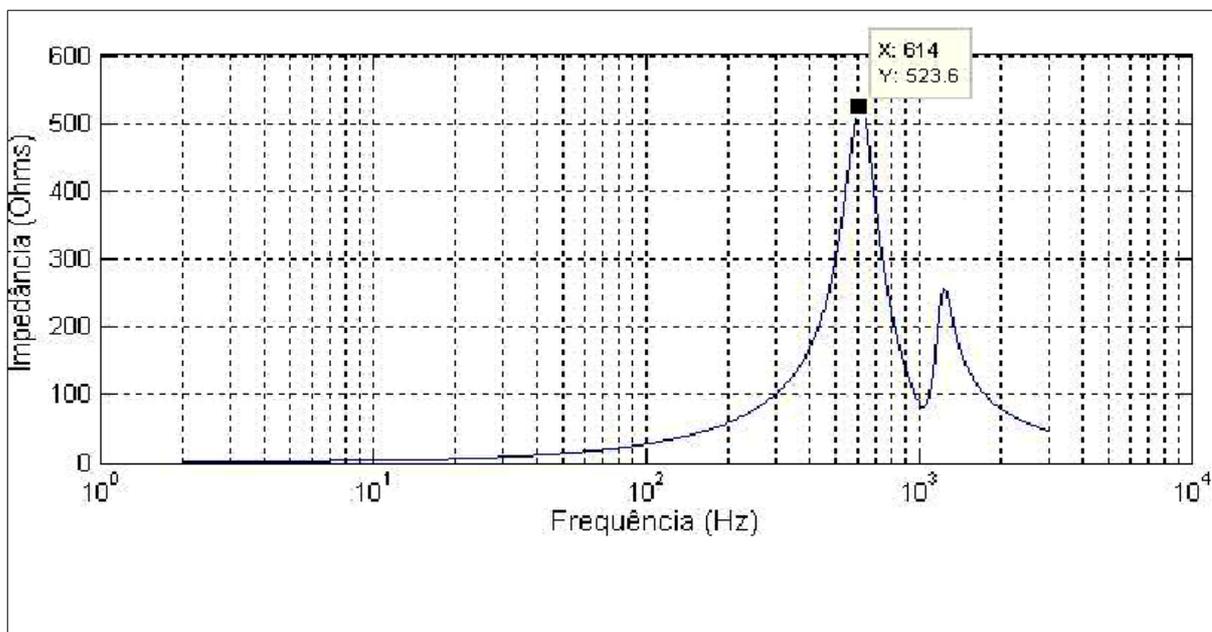
Fonte: Morais, 2011.



Com a utilização da ferramenta computacional MatLab foi possível a realização do gráfico da resposta em frequência do sistema com a inserção do banco de capacitores (figura apresentada na sequência), o que gerou uma ressonância próxima ao harmônico de ordem 10. Considerando-se que o 10º harmônico não é um harmônico característico não existe a necessidade da instalação de um filtro antirressonante nesta frequência (TEIXEIRA, 2009).

Figura 12 - Resposta em frequência do sistema com a inserção do banco de capacitores

Fonte: Moraes, 2011.



A simulação em *software* computacional permitiu uma segunda análise de dados, sendo que a THDv na entrada da Subestação foi modelada em 0,93% e THDi em 9,06 %. Além de uma maior flexibilidade na análise (devido ao fato de que na simulação existe a fácil troca de valores de componentes do sistema), a modelagem em ambiente computacional permitiu a possibilidade de teste de inserção de banco de capacitores para o aumento do fator de potência, mostrando que haveria um efeito colateral, a ressonância próxima ao 10<sup>o</sup> harmônico.

O uso do MatLab se mostrou promissor para os propósitos deste trabalho e será considerado no momento de se elaborar a simulação do filtro de harmônicos de 3<sup>a</sup> ordem.

### 3.2. ESTUDO DE CASO SOBRE PROJETO DE FILTROS PASSIVOS PARA ATENUAÇÃO DE HARMÔNICOS EM INSTALAÇÕES ELÉTRICAS INDUSTRIAIS UTILIZANDO O SOFTWARE PSPICE

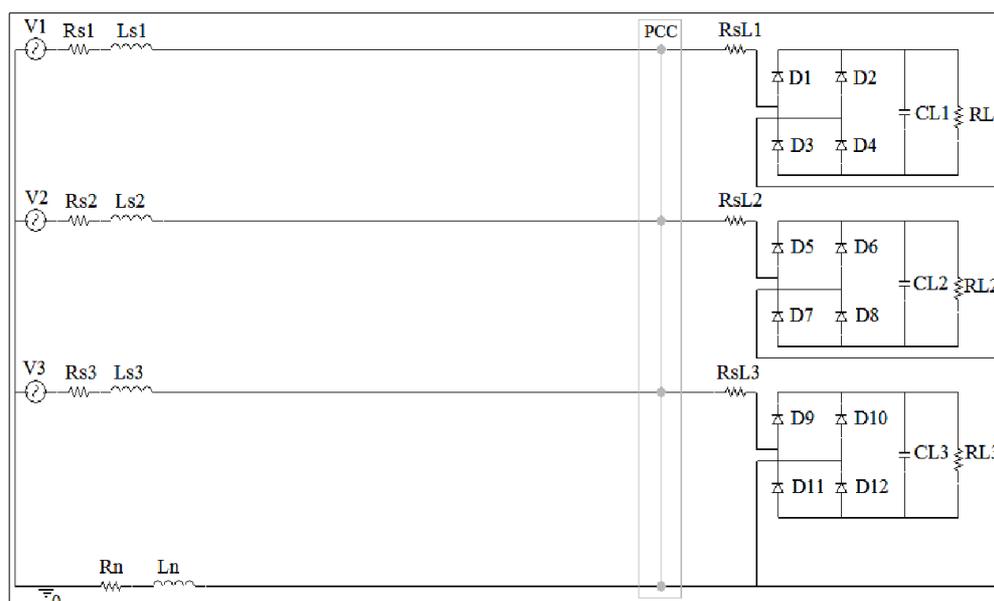
Esta simulação é fruto do trabalho de conclusão de curso de Ernande Eugenio Campelo Moraes para a UFC (Universidade Federal do Ceará).

### 3.2.1. Modelagem do Sistema

O estudo de caso a ser abordado possui como alvo uma carga trifásica subdividida em três retificadores monofásicos de onda completa. De acordo com Moraes (2011), cada retificador monofásico é composto por uma ponte de diodos cuja saída é ligada a um filtro capacitivo e uma carga resistiva. Logo abaixo é possível se identificar o circuito a ser estudado nesta seção.

Figura 13 - Sistema retificador alvo da simulação

Fonte: Moraes, 2011.



Os valores dos componentes que fazem parte da simulação se encontram abaixo:

$$R_L = 12\Omega$$

$$C_L = 4700\mu F$$

$$R_{sL} = 0,11\Omega$$

Tensão de fornecimento: 220 V – 3 Ø

Potência do transformador que distribui energia à carga de estudo: 225 kVA

A simulação foi realizada em duas formas, primeiramente utilizando-se filtros passivos RLC série em derivação com a carga e por segundo foi simulada uma combinação de filtros passivos RLC série shunt com um filtro duplamente sintonizado (DTF), instalado em série no neutro da carga trifásica (sendo que nesta segunda modelagem ainda foram usados reatores de linha).

O modelo da simulação foi feito com dados de resistência e capacitância diretamente da carga. A modelagem foi realizada em ambiente computacional PSPICE, e, na simulação, foram coletados valores como tensão, corrente, THD e valores percentuais de cada harmônica individualmente.

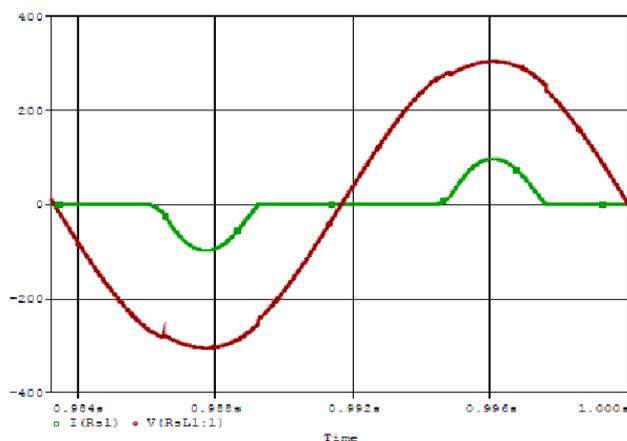
Tabela 8 - Dados da carga obtidos por simulação no *software* PSPICE

Dados	Fase 1
Tensão eficaz de fase [V]	219,32
Corrente eficaz de fase [A]	47,88
Potência aparente por fase [VA]	10502,00
Potência ativa por fase [W]	7088,10
Potência reativa por fase [VAr]	6864,26
Fator de potência total	0,67
THD de corrente [%]	98,02
THD de tensão [%]	2,03

Fonte: Moraes, 2011.

Figura 14 - Tensão (vermelho) e Corrente (verde) no ponto de conexão comum do sistema (PCC)

Fonte: Moraes, 2011.



Em uma rápida análise da tabela, pode-se perceber que a THD relacionada à corrente está relativamente alta, e que a THD relacionada à tensão está dentro dos limites aceitáveis pela IEEE 519, que estabelece os limites máximos em 5%. O uso do *software* PSPICE permitiu que fossem retirados dados relativos às principais ordens harmônicas, relacionando-as à componente fundamental. As tabelas a seguir exemplificam essa comparação.

Tabela 9 - Componentes Fourier da tensão no PCC (Ponto de Conexão Comum)

Ordem N°	Frequência [Hz]	Componente Fourier	Componente Normalizado	Ângulo Fase (°)
1	6,00E+01	3,10E+02	1,00E+00	1,80E+02
3	1,80E+02	3,87E+00	1,25E-02	-1,03E+02
5	3,00E+02	3,92E+00	1,26E-02	7,96E+01
7	4,20E+02	2,21E+00	7,13E-03	-9,92E+01
9	5,40E+02	2,15E-02	6,92E-05	1,77E+02
11	6,60E+02	1,20E+00	3,87E-03	7,60E+01
13	7,80E+02	1,03E+00	3,31E-03	-1,08E+02
15	9,00E+02	1,36E-01	4,39E-04	-1,05E+01
17	1,02E+03	7,03E-01	2,27E-03	8,15E+01
23	1,38E+03	5,26E-01	1,70E-03	8,57E+01
35	2,10E+03	2,80E-01	9,03E-04	7,72E+01

Fonte: Morais, 2011.

Tabela 10 - Componentes Fourier da corrente no PCC (Ponto de Conexão Comum)

Ordem N°	Frequência [Hz]	Componente Fourier	Componente Normalizado	Ângulo (°)
1	6,00E+01	4,41E+01	1,00E+00	1,80E+02
3	1,80E+02	3,57E+01	8,08E-01	-1,44E+00
5	3,00E+02	2,23E+01	5,05E-01	1,78E+02
7	4,20E+02	9,16E+00	2,08E-01	-3,03E+00
9	5,40E+02	3,50E-01	7,93E-03	-1,61E+02
11	6,60E+02	2,99E+00	6,79E-02	1,70E+02
13	7,80E+02	2,28E+00	5,16E-02	-1,33E+01
15	9,00E+02	2,99E-01	6,77E-03	1,27E+02
17	1,02E+03	1,06E+00	2,39E-02	1,75E+02
23	1,38E+03	5,19E-01	1,18E-02	-1,80E+02
35	2,10E+03	1,66E-01	3,76E-03	-1,65E+02

Fonte: Morais, 2011.

Figura 15 - Componentes harmônicas de tensão em % da fundamental

Fonte: Morais, 2011.

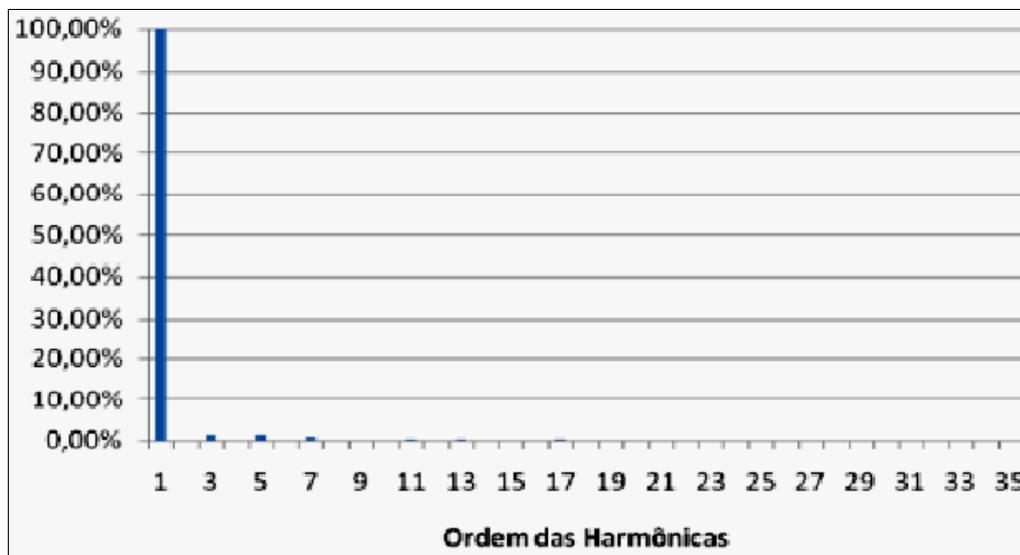
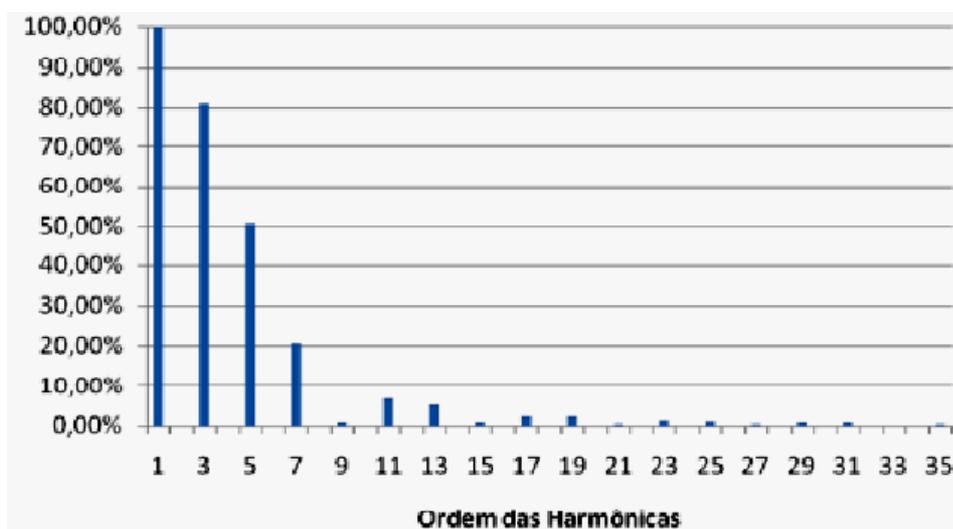


Figura 16 - Componentes harmônicas de corrente em % da fundamental

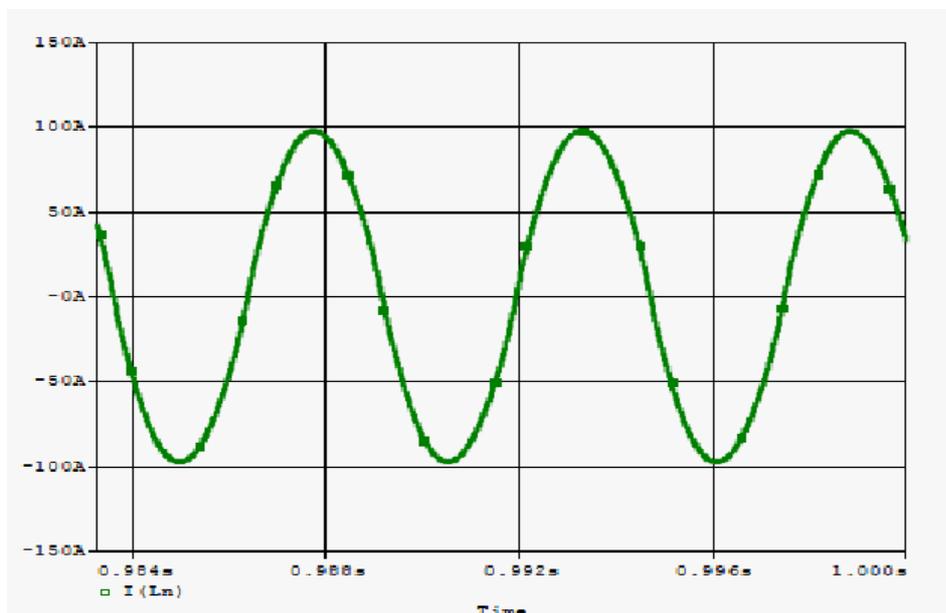
Fonte: Morais, 2011.



Esta simulação se encaixa perfeitamente nos propósitos de nosso trabalho, visto que a componente harmônica que mais afeta a instalação é a de 3ª ordem, sendo que este fato provavelmente é uma consequência da corrente que passa pelo neutro. A corrente eficaz no neutro é maior que a que flui nas fases. Abaixo está a forma de onda da corrente no neutro do sistema, retirada do PSPICE.

Figura 17 - Forma de onda da corrente no neutro do sistema em estudo

Fonte: Moraes, 2011.

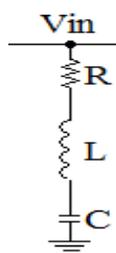


### 3.2.2. Estudo e Modelagem do Filtro Passivo RLC Série Shunt

Primeiramente foi realizada a simulação com o filtro em série shunt. Abaixo está disposta a topologia deste circuito:

Figura 18 - Topologia de filtro passivo RLC série shunt

Fonte: Moraes, 2011.



Basicamente este filtro consiste na utilização de um capacitor, com um indutor e um resistor (que é o representante das perdas internas, ocorridas devido à imperfeição do capacitor e indutor). O resistor está ligado ao conceito de fator de qualidade do filtro. A seguir, está a fórmula que determina  $X_n$ , que representa a reatância do indutor ou capacitor na frequência de sintonia:

$$X_n = \omega_n * L = \frac{1}{\omega_n * C} = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (3)$$

Onde:

$X_n$  = reatância do indutor ou capacitor na frequência de sintonia;

$\omega_n$  = frequência angular de sintonia;

L = indutância do filtro;

C = e capacitância do filtro.

A seguir está disposta a equação que representa o fator de qualidade do filtro:

$$X_C = \frac{V^2}{Q_{capacitivo}} \quad (4)$$

Onde:

Q: é o fator de qualidade do filtro ou reator;

R: resistência associada ao reator

$X_n$  = reatância do indutor ou capacitor na frequência de sintonia;

Na simulação e no projeto de filtros passivos RLC deve-se sempre lembrar da dessintonia, haja visto que um filtro passivo real não atuará perfeitamente na frequência para a qual foi modelado. Este desvio de frequência deve sempre ser levado em conta na hora de se fazer o projeto do filtro, para que este fato seja previsto deve-se fazer o cálculo do fator de dessintonia. Este fator de dessintonia é o resultado de três fatores centrais: a probabilidade do sistema possuir oscilações na frequência fundamental (modificando junto todas as ordens harmônicas), variações nos valores de indutância e capacitância (como consequência de desgastes naturais) e as imperfeições naturais dos elementos que não são ideais (que existem devido à tolerância e aos erros dos componentes eletrônicos utilizados nos filtros).

Abaixo é fornecida a equação que permite o cálculo do fator de dessintonia:

$$\delta = \frac{\Delta f}{f_n} + \frac{1}{2} * \left( \frac{\Delta L}{L_n} + \frac{\Delta C}{C_n} \right) \quad (5)$$

Onde:

$\delta$  = fator de dissintonia total considerando as variações de frequência, indutância e capacitância;

$\Delta f$  = variação de frequência com relação à fundamental;

$f_n$  = frequência fundamental;

$\Delta L$  = variação de indutância com relação à nominal;

$L_n$  = indutância nominal;

$\Delta C$  = variação de capacitância com relação à nominal;

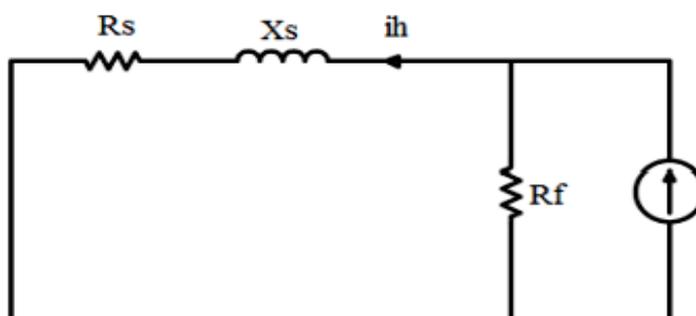
$C_n$  = capacitância nominal.

O filtro deve ser visto pelas componentes harmônicas como um caminho de baixa impedância, sendo que para frequências inferiores à qual foi projetado o filtro se comporta como um compensador de reativos e para frequências maiores o filtro apresenta comportamento indutivo.

A seguir é apresentada a topologia de circuito simplificada para o filtro em questão.

Figura 19 - Topologia de circuito simplificado para o filtro

Fonte: Moraes, 2011.



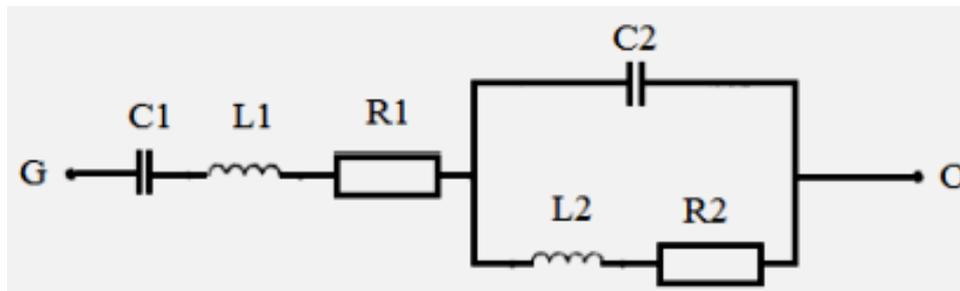
Deve ser ressaltado que este procedimento de projeto do filtro RLC série *shunt* para determinação da indutância e capacitância, bem como a resistência elétrica do indutor, consiste em um processo de “tentativa e erro”, até que se encontrem os melhores valores para o indutor, resistência e capacitor que reduza o harmônico em foco ao máximo possível e compense parcialmente os reativos na fundamental (MORAIS, 2011, p. 48 apud PEREIRA, 2009).

### 3.2.3. Estudo e Modelagem do Filtro Passivo Duplamente Sintonizado

Devido ao fato do filtro RLC passivo shunt não ter sido útil para atenuar os harmônicos ao mesmo tempo em que compensava a energia reativa, foi utilizada a seguinte topologia para a diminuição dos efeitos das componentes harmônicas ímpares (principalmente a de 3ª ordem):

Figura 20 - Filtro duplamente sintonizado (DTF)

Fonte: Morais, 2011.

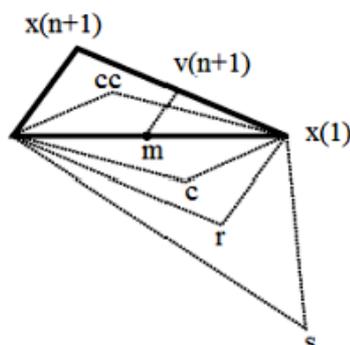


Este filtro apresenta um caminho de baixa impedância para a frequência fundamental, e barra as componentes ditas de sequência nula (3ª harmônica e suas múltiplas ímpares).

Nesta modelagem, além do PSPICE, foi utilizado o MATLAB, para a realização do cálculo da impedância do filtro. A função utilizada foi a “fminsearch()”, que a partir de um valor aleatório atribuído inicialmente, cria um poliedro ao redor do mesmo, para depois verificar qual dos vértices possui o melhor resultado para a minimização da função desejada, passando a ser este o ponto inicial, repetindo-se o processo até que se tenha o resultado desejado.

Figura 21 - Aplicação de busca simplex ao ponto inicial estipulado

Fonte: Morais, 2011.

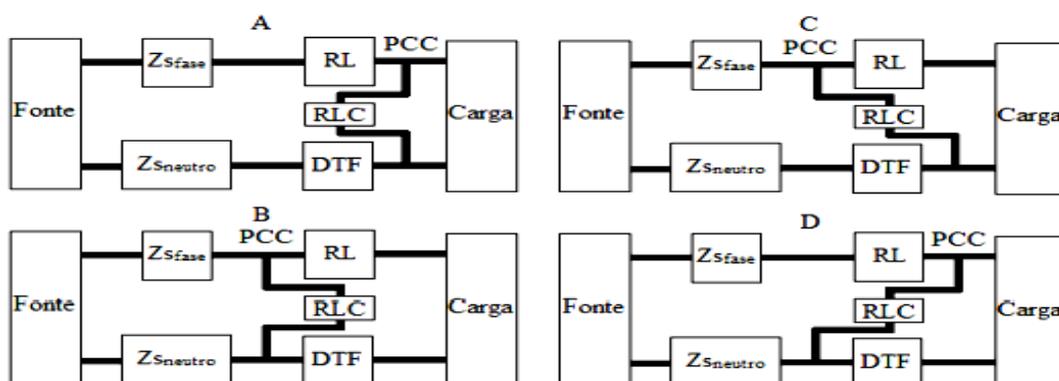


### 3.2.4. Modelo Proposto para Utilização dos Reatores de Linha em Conjunto com O DTF e Os Bancos de Filtros RLC Série Shunt

Visto que os modelos apresentados anteriormente não foram suficientes para que o severo problema de distorção harmônica da carga proposta fosse resolvido, foi realizada mais uma tentativa com um filtro duplamente sintonizado e com reatores de linha.

Figura 22 - Configurações possíveis para conexão dos bancos de filtro RLC em cominação com o DTF e os reatores de linha

Fonte: Morais, 2011.



Legenda:

$Z_{sfase}$ : Impedância de linha da fase;  
 $Z_{sneutro}$ : Impedância de linha do neutro;  
 RL: Reatores de linha;  
 RLC: Filtro RLC série *shunt*;  
 DTF: Filtro duplamente sintonizado;  
 A, B, C e D: Configurações;  
 PCC: Ponto de conexão comum.

É importante ressaltar que para cada valor testado, a impedância de linha era trocada, sendo que a capacidade de curto circuito do sistema foi recalculada para cada valor de reator de linha testado. (MORAIS, 2011)

Logo abaixo é possível que se observe o diagrama do sistema proposto com os reatores de linha:

Figura 23 - Diagrama de força do conjunto de reatores de linha e banco de filtros

Fonte: Morais, 2011.

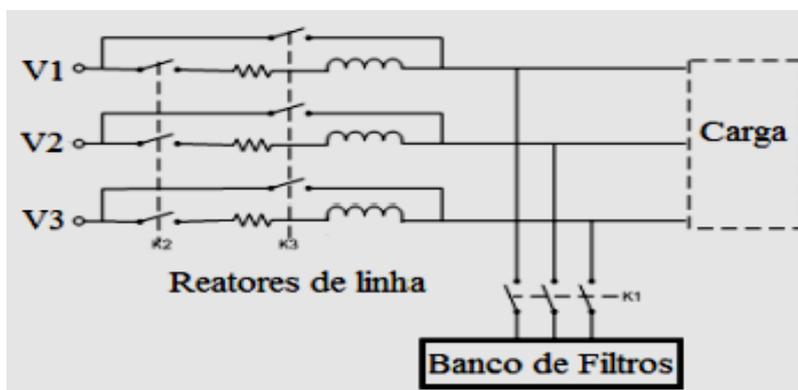
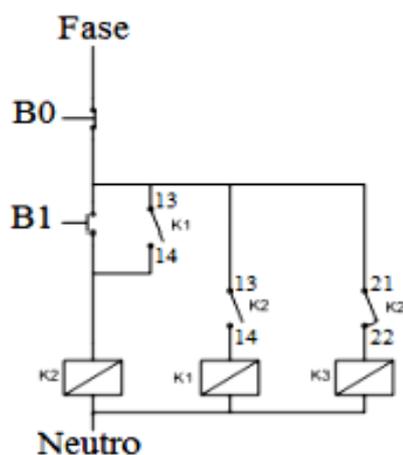


Figura 24 - Diagrama de comando do conjunto de reatores de linha e banco de filtros

Fonte: Morais, 2011.



As figuras descritas nas figuras 23 e 24, descrevem os diagramas de força e de comando para o conjunto de reatores de linha e banco de filtros, sendo assim possível se constatar a metodologia utilizada para se minimizar os problemas com harmônicos.

## 4. PROGRAMAS COMPUTACIONAIS PARA HARMÔNICOS E FILTROS

Os problemas ocasionados pelos harmônicos são severos e podem implicar em inúmeros tipos de perda, para tanto a eliminação e diminuição do efeito dos harmônicos é de fundamental importância. Os harmônicos requerem, para sua compreensão, a utilização de ferramentas matemáticas avançadas como a transformada de Fourier, cuja complexidade dificulta a análise e resolução de problemas de modo analítico e manual.

A utilização de ferramentas computacionais tem sido considerada cada vez mais aceita e difundida para problemas na área da eletricidade, ocorrendo o desenvolvimento de novas tecnologias que facilitam o trabalho dos profissionais da área. Devido à complexidade dos problemas matemáticos que envolvem harmônicos, inúmeros programas computacionais foram desenvolvidos nos últimos anos, com o intuito de simplificar e tornar mais acessível o uso de ferramentas para minimizar o efeito destas distorções.

A existência de inúmeras ferramentas computacionais oferece uma grande gama de possibilidades, contudo muitos destes programas apresentam vantagens e desvantagens distintas para cada caso, tornando necessária uma maior compreensão dos mesmos e suas aplicações, para tanto este capítulo busca fundamentar alguns dos programas disponíveis e identificar o melhor para a situação proposta inicialmente.

### 4.1. *HarmZs*

O programa *HarmZs* é uma ferramenta baseada em duas tecnologias de modelagem de redes elétricas denominadas matriz  $Y(s)$  e sistemas descritores, que permite que análises de redes elétricas sejam realizadas sobre todo o plano complexo  $s$ , em vez de apenas sobre o eixo imaginário  $j$ , como acontece em programas convencionais de análise de harmônicos. A maior vantagem deste domínio expandido é permitir a análise modal de redes elétricas de grande porte, modelando adequadamente a dependência dos seus parâmetros com a frequência.

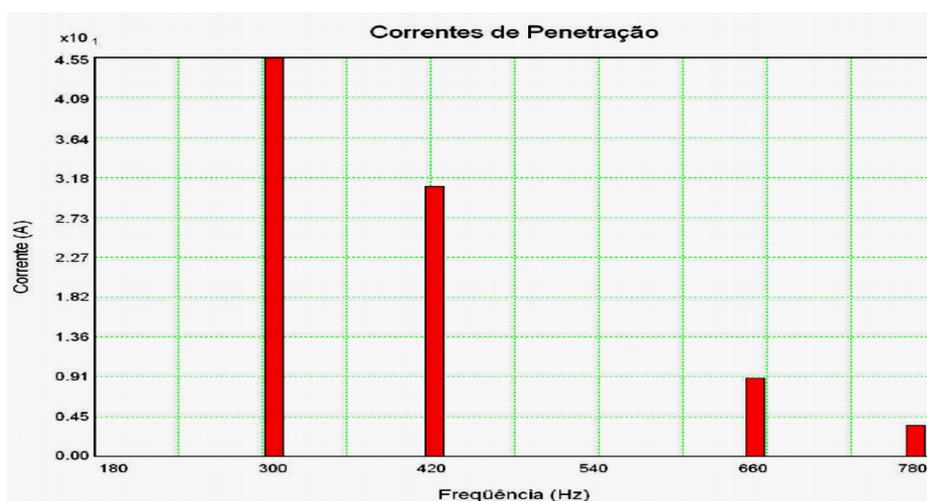
A análise modal propicia a obtenção de um conjunto de informações estruturais sobre o sistema que são difíceis de serem obtidas por outros métodos

convencionais como a simulação no tempo ou resposta em frequência. Estas informações compreendem os modos de oscilação natural (ressonâncias do sistema), os equipamentos que mais participam desses modos, as sensibilidades destes modos em relação a parâmetros do sistema, etc.

A possibilidade de se trabalhar com um programa que possa atender uma grande quantidade de dados e, a partir destes, realizar a modelagem do problema se apresenta como a principal vantagem do HarmZs. A possibilidade de se utilizar tantos dados distintos torna vantajosa a sua utilização para a análise de problemas de grandes localidades e que contenham muitos equipamentos.

Figura 25 – Exemplo de distorção harmônica no HarmZs

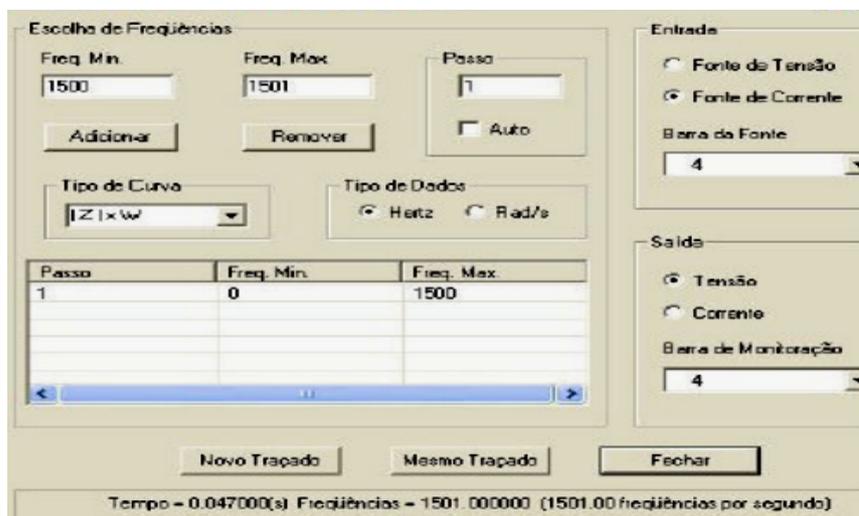
Fonte: Autoria Própria, 2015.



Apesar da grande possibilidade de dados ao qual o programa possa utilizar, o mesmo possui inúmeras desvantagens que acarretam em transtornos para o usuário. Uma das maiores desvantagens é o fato de requerer para a plotagem do gráfico os programas complementares EditCepel e PlotCepel, o que torna necessário um gasto adicional na hora de adquirir o programa, bem como a dependência de 3 programas distintos para a análise harmônica.

Figura 26 – Interface gráfica no HarmZs

Fonte: Autoria própria, 2015.



Uma desvantagem presente é o fato de que para se realizar a simulação no programa deve-se seguir passo a passo as instruções do problema, fato que torna difícil alterá-lo em apenas um pedaço sem mexer no todo. Na utilização do HarmZs, é encontrada dificuldade na hora de se encontrar erros cometidos na modelagem do problema, ou seja, o *software* não indica o local no qual ocorreu o erro, bem como torna difícil identificá-lo visualmente.

Um dos problemas mais importantes que o programa apresenta é o fato de que existe a incompatibilidade entre versões de anos diferentes (entre o simulador e o programa para plotar os gráficos mais especificamente), o que implica na necessidade de se manter o sistema de programas todo atualizado. O programa requer ainda a necessidade de se entrar com todos os dados de distorção, ou seja, obriga o que o usuário tenha em mãos, antes da simulação, todos os dados do sistema, necessitando haver um levantamento de dados preciso e completo.

#### 4.2. Spectrum Harmonic Analysis Software

O programa *Spectrum*, pertencente à empresa *EasyPower*, possui inúmeras aplicações ao redor do mundo, devido a sua facilidade de uso, sendo que através de

poucos comandos podem ser realizadas simulações para a análise de harmônicos e filtros, permitindo o diagnóstico de correntes harmônicas, tensões, correção do fator de potência evitando-se a ressonância, simular múltiplas configurações de condições dinâmicas e modelar filtros para o problema.

Outra vantagem do *software* é o fato de existir uma interface gráfica de fácil manuseio, bem como a modelagem de problemas trifásicos em sequências positivas, negativas e nulas. Apesar das vantagens do programa citado, existe a desvantagem da incompatibilidade do programa com alguns computadores, tornando o uso restrito, bem como o fato de que o programa necessita de uma grande quantidade de memória no computador, tornando-o desaconselhável para inúmeros computadores. O programa apresenta a desvantagem ainda do alto custo de obtenção do *software*, o que resulta em limitações para sua aplicação.

#### 4.3. MatLab

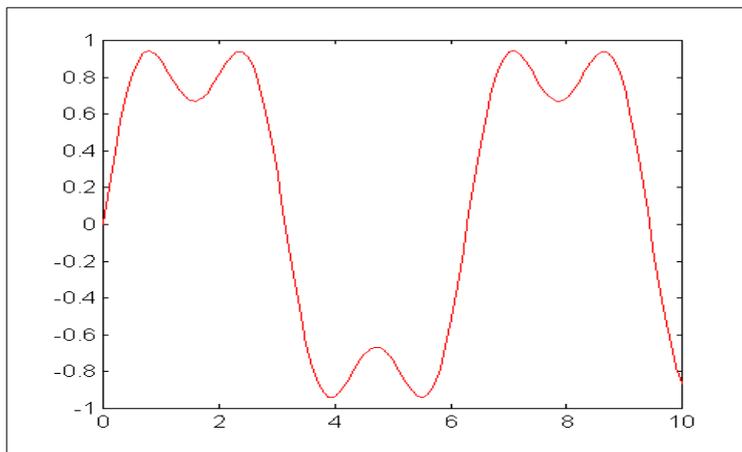
O programa MatLab é um dos mais conhecidos e utilizados programas computacionais na engenharia, devido a sua ampla capacidade de realizar cálculos, simulações avançadas e a grande quantidade de ferramentas dispostas, tornando-se o programa ideal para simulações. Uma vantagem do MatLab é a fácil programação do mesmo, ao se utilizar da linguagem C e comandos específicos para certas funções, diminuindo os erros e falhas.

O programa MatLab possui a vantagem de mostrar o local do erro nas linhas de programação, tornando sua implementação mais rápida e funcional. O *software* possui também uma ferramenta chamada SimuLink, que proporciona a montagem gráfica e em blocos de função de sistemas elétricos e eletrônicos, permitindo simular tensões, correntes, potências e formas de onda, tornando mais fácil a aquisição de dados.

A ferramenta SimuLink apresenta inúmeras funções para aplicações na engenharia, havendo a possibilidade de serem adquiridos dados de sistemas elétricos, sem a necessidade de se realizar a montagem física do circuito. A ferramenta permite mudanças de maneira rápida, fácil e direta, sem que o usuário tenha que se preocupar em realizá-las desde o início na programação.

Figura 27 – Exemplo de harmônico no MatLab

Fonte: EEE-UFG, 2014.

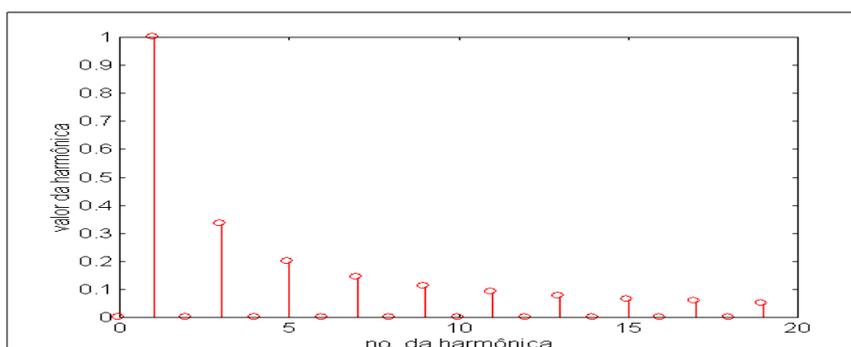


O MatLab, devido às inúmeras opções de programação e de ferramentas, é um dos programas mais utilizados para a realização de análises harmônicas e de dimensionamento de componentes para filtros, tornando a sua utilização prática e acessível. Apesar das vantagens listadas o *software* apresenta desvantagens como o alto custo de aquisição do programa, a ampla necessidade de memória para o computador e o fato de que as simulações mais complexas necessitam de um tempo maior de processamento, tornando o computador lento.

Uma desvantagem do MatLab é a necessidade de se realizar, em muitos casos, a montagem do equacionamento de modo programável, havendo a necessidade do conhecimento do programa, da teoria elétrica e de harmônicos, bem como conhecimento de programação.

Figura 28 – Gráfico da intensidade das harmônicas no MatLab

Fonte: EEE-UFG, 2014.



Apesar das desvantagens descritas acima, o programa MatLab é um dos melhores programas para a análise harmônica e para o projeto de filtros, seja pela ampla utilização do mesmo no mundo ou pelo fato de ser um programa de fácil utilização e programação, sem falar na facilidade em se conseguir informações (que reside no fato do MatLab ser difundido ao redor do planeta).

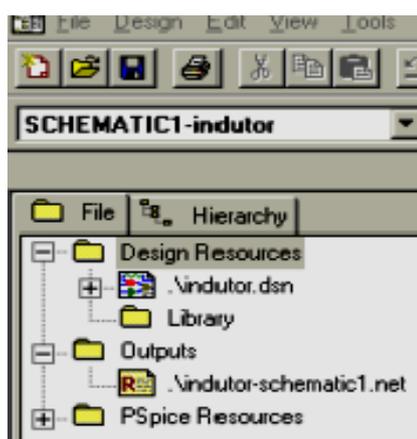
#### 4.4. PSPICE

Este *software* é um dos mais utilizados no mundo todo para simulação de circuitos elétricos, seja por estudantes, seja por profissionais. Conhecido por Orcad Pspice, este programa permite o gerenciamento de vários projetos simultâneos.

Um dos primeiros simuladores desenvolvidos foi o SPICE (Simulation Program with Integrated Circuits Emphasis), o qual até hoje é a plataforma utilizada pela maioria dos simuladores atuais, como seus conceitos são gerais, pode ser usado para qualquer rede que possa ser descrita em termos de elementos básicos de circuitos (resistores, capacitores, indutores, fontes dependentes e independentes).

Figura 29 - Ambiente do PSPICE.

Fonte: WESSLER, 2007.



Este *software* foi utilizado em um dos estudos de caso citados neste trabalho, conferindo ao mesmo a garantia de existir a possibilidade de seu uso para a simulação do filtro proposto inicialmente.

## 5. PLANTA INDUSTRIAL E SEUS RESPECTIVOS CIRCUITOS

Com a definição do programa computacional a ser utilizado no trabalho, é necessário definir a planta industrial a ser utilizada, bem como os seus circuitos com o intuito de realizar a correção dos harmônicos e comparar o transformador isolador, o filtro passivo tipo shunt e o filtro passivo de bloqueio.

O primeiro passo para definir a planta industrial é determinar a potência ativa consumida pela planta industrial no seu horário de pico, ou seja, a potência total demandada caso todos os equipamentos estejam funcionando simultaneamente, fato comum em empresas. Para determinar tal potência irá se utilizar de um total de 7 circuitos para a planta que funcionaram ao mesmo instante de tempo, sendo estes os circuitos de iluminação, o circuito de refrigeração, o circuito para a área administrativa, um circuito com cargas lineares e dois circuitos especiais para motores, comumente encontrados em indústrias de médio porte.

### 5.1. CIRCUITO DE ILUMINAÇÃO

Atualmente as lâmpadas utilizadas em grande escala pela população brasileira são as lâmpadas fluorescentes compactas, também conhecidas como LFC, devido a sua elevada eficiência luminosa, custo reduzido comparada as lâmpadas de *LED* e a proibição no Brasil de se comercializar lâmpadas incandescentes.

Em um levantamento realizado pela equipe ao visitar 3 empresas de médio porte, constatou-se que em 2 delas eram utilizadas lâmpadas fluorescentes compactas e na outra era utilizada lâmpada fluorescente tubular. As lâmpadas fluorescentes tubulares 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.

Para a realização deste trabalho a planta industrial considerará a presença de lâmpadas fluorescentes compactas para a área administrativa e interna. As lâmpadas fluorescentes compactas serão de 23 Watts e apresentam os seguintes dados de distorção harmônica.

Tabela 11 – Distorção harmônica em lâmpada fluorescente compacta

Harmônicos	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

As lâmpadas fluorescentes compactas da marca Empalux possuem o fator de potência de 0,55, assim sendo a potência aparente é de 41,818 VA e a potência reativa vale 34,925 var.

Em sistemas de iluminação industrial as lâmpadas mais utilizadas são as lâmpadas de vapor de sódio. Para a planta industrial será considerado a presença de lâmpadas de vapor de sódio, ou seja, a área das máquinas contará com a presença de tais lâmpadas de 90 Watts.

A tabela 12 apresenta os dados de distorção harmônicas levantadas por Pires em 2006.

Tabela 12 – Distorção harmônica em lâmpadas de vapor.

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.

As lâmpadas de vapor de sódio apresentam, junto com o seu reator, alto fator de potência, neste caso ele vale 0,92 e deste modo a potência aparente é de 97,826 VA e a potência reativa vale 38,339 var.

Considerando que para a planta industrial haverá 50 lâmpadas de vapor de sódio de 90 W, tem-se uma potência máxima deste circuito de 4500 W, 4891,3 VA e 1916,95 var. A planta industrial possuíra 75 lâmpadas fluorescentes compactas de 23 W, resultando em uma potência total de 1725 W, 3136,35 VA e 2619,375 var.

## 5.2. CIRCUITO DE REFRIGERAÇÃO

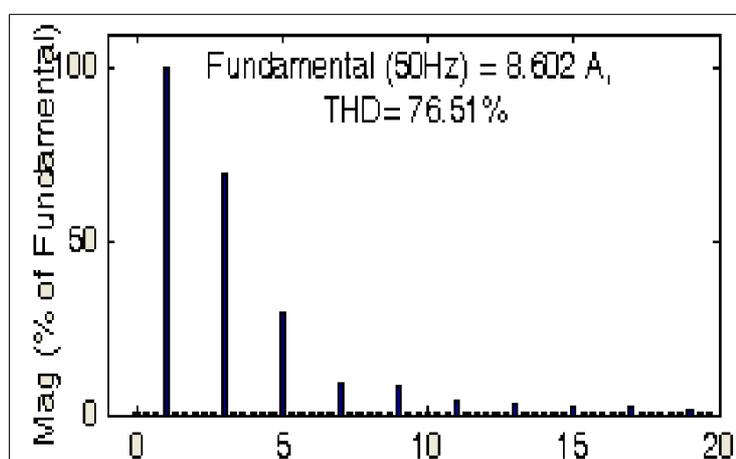
O barateamento dos ares-condicionados nos últimos anos têm permitido o acesso destes equipamentos para uso residencial e para uso comercial. As empresas atualmente estão instalando tais equipamentos em detrimento aos ventiladores pela comodidade e o conforto destes equipamentos oferecem. Existem

diversos tipos de ar-condicionado, contudo o tipo mais usualmente utilizado é o tipo janela, os quais contêm um controle de temperatura na qual desligam o seu compressor de resfriamento quando a temperatura ambiente chega a um certo nível.

Para o circuito de refrigeração na planta industrial considera-se a necessidade de se refrigerar um total de 6 ambientes, todos eles possuindo um inversor de frequência, sendo que cada ar-condicionado é de 21000 BTU. O espectro harmônico para este ar-condicionado será o seguinte.

Figura 30 – Espectro harmônico de um inversor de frequência

Fonte: SINGH, 2010



Cada ar-condicionado de 21000 BTU/h implementado corresponde a uma potência de 6150,9 W. O fator de potência para o ar-condicionado acoplado a um inversor de frequência é de 0,987. Conseqüentemente a potência aparente vale 6231,914 VA e a potência reativa vale 1001,594 var.

Para o caso da planta industrial tem-se uma potência ativa total de 36905,4W, 37391,484 VA e 6009,569 var instalada como carga de refrigeração.

### 5.3. CIRCUITO PARA ÁREA ADMINISTRATIVA

A área administrativa de qualquer empresa ou indústria possui uma grande concentração de cargas que geram harmônicos, tais quais computadores, impressoras e telefones sem fio. Para a planta industrial sendo realizada, tem-se que um total de 30 computadores, as quais são as principais cargas de qualquer

área administrativa. Os computadores da parte administrativa são Pentium 4 com 3 GHz e monitor 17 polegadas, os quais apresentam a seguinte tabela de distorção.

Tabela 13 – Distorção harmônica em computador

Harmônicos	$I_{rms} = 1,408 \text{ A}$	
	THD <sub>i</sub> = 94,42%	
	Fator de crista = 2,15	
	Módulo (%)	Ângulo (graus)
1	100,00	2,46
3	78,46	-174,73
5	45,08	9,40
7	13,74	-161,18
9	6,11	169,64
11	10,42	11,77
13	5,55	-154,47
15	2,09	139,21
17	4,50	7,39
19	3,00	-160,01
21	0,60	82,59
23	1,91	14,14
25	1,23	-151,58
27	0,57	153,49
29	1,55	28,31
31	1,18	-134,33

Fonte: PIRES, 2006.

Computadores possui potência em média de 150 W a 250 W caso possuam tela de LCD, contudo caso o monitor seja de tubo o computador possui potência de aproximadamente 300 W. Para o setor administrativo foi considerado computadores com monitor tubo, os quais possuem fator de potência de 0,65, potência aparente de 461,538 VA e potência reativa de 350,739 var. Assim sendo a planta industrial possui 9000 W de potência ativa, 10522,165 var de potência reativa e 13846,14 VA de potência aparente para computadores.

#### 5.4 CIRCUITOS PARA MOTORES

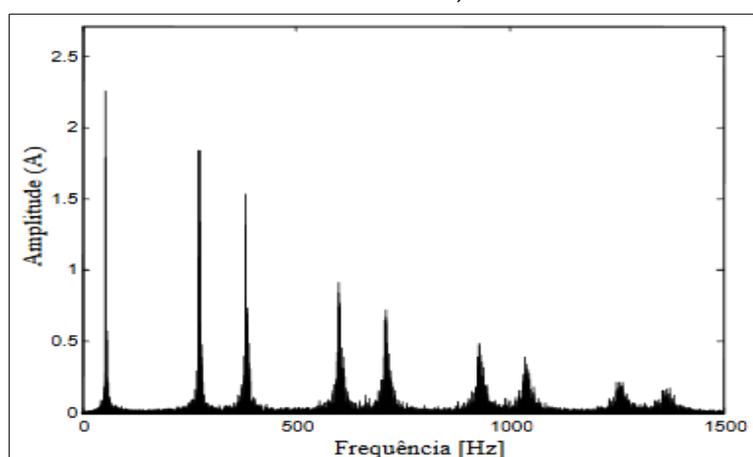
Para esta parte da planta industrial considera-se que são utilizados dois motores de alta potência, o primeiro possui 50 CV de potência e fator de potência de 0,81, o que equivale a 37,285 kW de potência ativa, 46,030 kVA de aparente e de 26,993 kvar de reativa.

O segundo possui 100 CV de potência e 0,84 de fator de potência, o que equivale a 74,57 kW de potência ativa, 88,773 kVA de aparente e de 48,167 kvar de potência reativa.

Os motores de indução normalmente são acoplados a inversores de frequência e com o acoplamento possuem a característica de dispor de um baixo terceiro harmônico e seus múltiplos, enquanto possui altos valores para o 5º e o 7º. Um exemplo é demonstrado pelo espectro harmônico abaixo.

Figura 31 – Espectro harmônico de um motor a indução

Fonte: KOPCAK, 2013.



Cada motor descrito na figura 31 representará um circuito próprio na planta industrial, devido as suas altas potências e níveis de distorção harmônicas. Como os valores do fator de potência que a instalação observa ocorrem devido ao inversor de frequência, ocorre do fator de potência dos circuitos dos motores serem substituídos pelo dos conversores, os quais foi decidido pela equipe que seria 0,93. Com este fator de potência diferente para o sistema dos motores tem-se que a potência aparente do circuito do motor de 50 CV é de 40091,39785 VA e a reativa é 14735,97491 var, já o circuito do motor de 100 CV possui 80192,7957 VA de potência aparente e 29471,9498 var de potência reativa.

## 5.5 CIRCUITO PARA CARGAS QUASE LINEARES

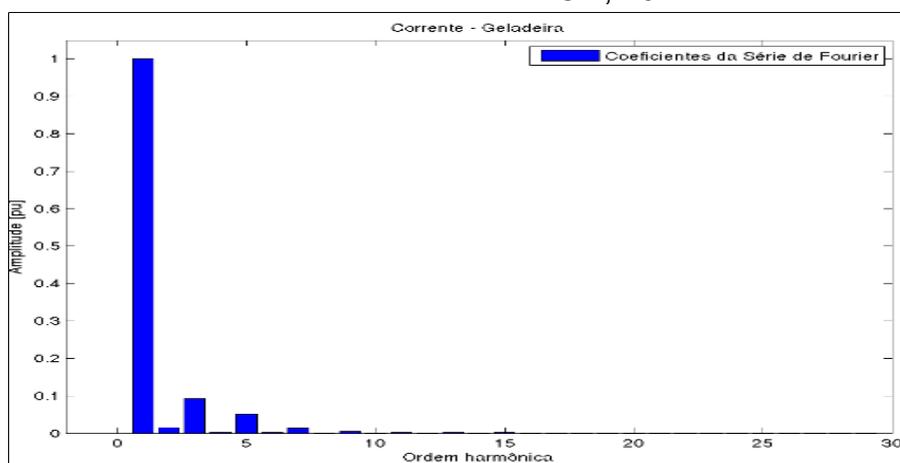
Apesar das cargas apresentadas anteriormente possuírem altos níveis de distorção harmônicas, muitos equipamentos elétricos apresentam comportamento

linear ou com baixos níveis de distorção harmônica, tais quais geladeiras, bebedouros, freezer, ventiladores e cafeteira que apresentam distorção harmônica total de corrente inferior a 12%. Para a realização deste trabalho convencionou-se que as cargas quase lineares são as que apresentam distorção harmônica total inferior a 12%. Os circuitos representados por estas cargas normalmente são alimentados por tomadas de uso geral ou algumas tomadas de uso específico, caso da geladeira e de bebedouro.

Para a planta industrial proposta a potência instalada será considerada o quádruplo da potência dos computadores, neste caso 36 kW, com fator de potência mínimo exigido pela norma de 0,92. A potência aparente é de 39130,438 VA e 15335,936 var. Com o intuito de ilustrar e servir de base para os cálculos envolvendo estas cargas utiliza-se da figura 32, a qual representa a distorção harmônica de uma geladeira, carga com maior nível de distorção harmônica das analisadas.

Figura 32: Espectro harmônico de uma geladeira

Fonte: SALVADOR, 2012.



## 5.6 PLANTA INDUSTRIAL FINAL

O circuito final da planta industrial é representado pela conjunção dos circuitos de iluminação, de cargas quase lineares, cargas de refrigeração, cargas de administração e das cargas dos motores, deste modo tem-se que a empresa possui uma potência ativa instalada de 199985,4 W, potência reativa de 83935,89 var, potência aparente de 215335,93 VA e fator de potência da instalação de 0,92871.

## 6. PROJETO E SIMULAÇÃO

### 6.1 EMPRESA SEM A CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA E DOS HARMÔNICOS

Com a definição da empresa, com os seus circuitos e valores de potência, o passo seguinte é realizar a simulação para averiguar a existência dos harmônicos de corrente, para tanto deve-se primeiramente calcular quanto vale a corrente fundamental que alimenta o circuito. A tensão para baixa tensão é de 127 V entre fase e terra e de 220 V entre as fases. Para a simulação foi considerada que a carga total, mesmo as monofásicas, foram distribuídas trifasicamente, de modo que a potência total dos circuitos é dividida pelas três fases, com o intuito de deixar o circuito equilibrado, evitando com que as cargas se concentrem em uma única fase.

Utilizando-se da equação característica da potência ativa, que consiste no produto da tensão eficaz pela corrente eficaz pelo fator de potência, adquire-se os valores de corrente eficaz conforme a tabela 14.

Tabela 14: Valores das cargas

Circuito	Potência Total (W)	Potência por fase (W)	Tensão (V)	FP	Corrente por fase (A)
Iluminação (LFC)	1725	575	127	0,55	8,2319
Iluminação (VS)	4500	1500	127	0,92	12,838
Refrigeração	30754,5	12301,8	220 bifásico	0,987	32,799
Administrativa	9000	3000	127	0,65	36,342
Quase-linear	36000	12000	127	0,92	102,704
Motor 50 CV	37285	12428,333	220 trifásico	0,93	35,070
Motor 100 CV	74570	24856,667	220 trifásico	0,93	70,142

Fonte: Autoria Própria, 2016.

Com a corrente fundamental calculada, a etapa seguinte consiste no cálculo das correntes harmônicas para cada ordem conforme as tabelas e espectros harmônicos anteriores. A equação utilizada consiste na multiplicação da porcentagem da taxa de distorção individual pela corrente fundamental. A equipe determinou que seria utilizado na simulação até o 25° harmônico, devido a limitação fornecida pelo espectro harmônico do inversor de frequência do ar-condicionado. Os valores adquiridos de corrente harmônica são apresentados na tabela 15.

Tabela 15: Correntes harmônicas eficazes de acordo com a sua ordem

Ordem harmônico	Ilu. (LFC)	Ilu.(VS)	Refrigeração	Administração	Motor 50 CV	Motor 100 CV	Quase linear
1	8,232	12,838	32,799	32,342	35,070	70,142	102,704
3	5,710	3,815	21,811	25,375	0	0	9,757
5	2,749	5,795	10,955	14,580	28,176	58,351	5,340
7	2,461	0,919	3,703	4,443	24,129	48,258	2,362
9	2,718	0,189	3,532	1,976	0	0	1,129
11	2,072	1	1,814	3,370	13,222	26,443	0,514
13	1,737	0,633	1,407	1,795	10,125	20,250	0,308
15	1,682	0,158	1,089	0,676	0	0	0,103
17	1,400	0,756	0,715	1,455	8,087	16,209	0,051
19	1,301	0,565	0,377	0,970	5,453	10,907	0,031
21	1,276	0,033	0,246	0,194	0	0	0,020
23	1,108	0,656	0,102	0,618	3,581	7,161	0,010
25	0,975	0,498	0,072	0,398	3,111	6,221	0,006

Fonte: Autoria Própria, 2016.

Conforme se observa pelos valores obtidos da corrente elétrica para cada harmônico acima, constata-se a existência de valores muito altos, para determinadas frequências, especialmente as mais próximas da frequência fundamental.

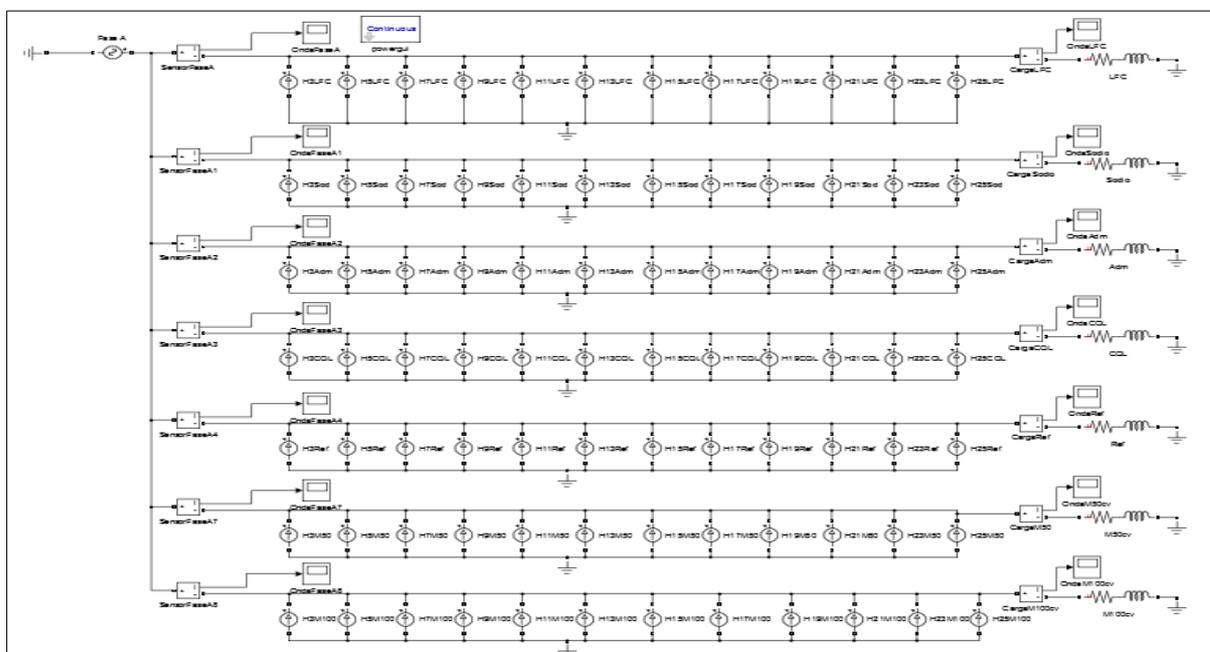
Após o cálculo das correntes harmônicas, realizou-se a montagem da simulação no programa MatLab, utilizando a ferramenta Simulink, para a simulação foi empregada uma fonte de tensão alternada com 127 V de tensão eficaz e 60 Hz

de frequência a qual representa no circuito a energia fornecida pela concessionária para a fase da indústria. Na simulação foi realizada somente em uma fase, tendo em vista a planta proposta ser trifásica equilibrada, ou seja, o que ocorre em uma fase ocorre nas outras duas.

Para representar a carga, foi utilizada uma carga RL em série, a qual consome a potência ativa e reativa calculada, sendo que ao utilizar a representação monofásica, cada fase contribui com um terço da potência total. Por fim a simulação vale-se de fontes de corrente alternada para representar e fornecer os harmônicos calculados anteriormente. Nas fontes de corrente utilizadas, os parâmetros utilizados foram a corrente calculada para cada harmônico e a frequência para cada uma destas, deste modo o circuito montado no Simulink é representado na figura 33 abaixo.

Figura 33: Circuito montado no Simulink para a empresa sem correção de fator de potência e seus harmônicos

Fonte: Autoria própria, 2016.

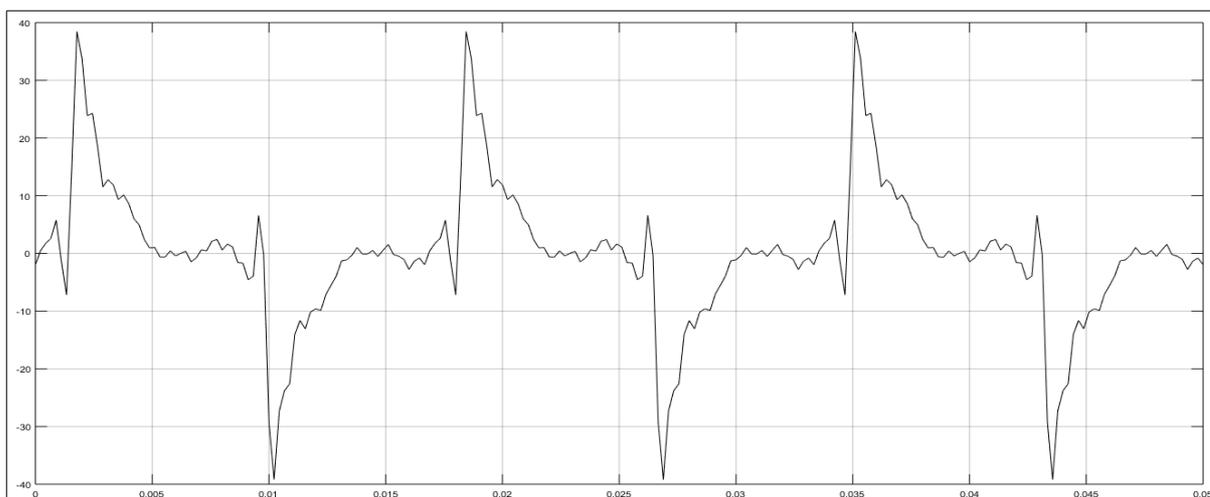


Através da simulação do circuito da figura 33, foram utilizados osciloscópios do simulink para realizar a medição da forma de onda resultante em cada circuito.

Primeiramente é apresentado na figura 35 a forma de onda do circuito de iluminação de lâmpadas fluorescentes compactas.

Figura 34: Corrente elétrica das lâmpadas fluorescentes compactas

Fonte: Autoria Própria, 2016.

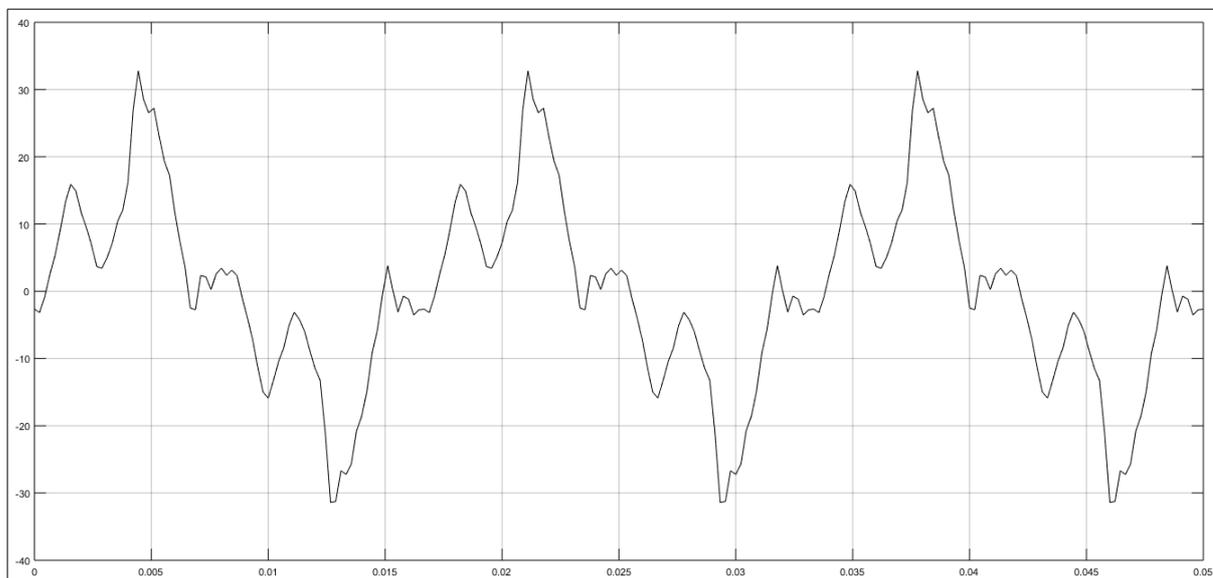


Conforme se observa na figura 34, percebe-se claramente a distorção harmônica da corrente provocada pelas lâmpadas fluorescentes compactas. Para a simulação foi considerado um tempo de 0,05 segundos, no qual ocorre a frequência fundamental de 60 Hz inverte seu valor de pico máximo e mínimo um total de 3 vezes.

Um dado de extrema importância é o valor de pico atingido por esta corrente, a qual chega a 38,4589 A, valor muito superior a corrente de pico da onda fundamental a qual assume valor de 11,6418 A. O baixo fator de potência da lâmpada, aliada aos altos índices de distorção harmônica resultam na necessidade, neste caso, de superdimensionar fios e as proteções do sistema, devido à presença de harmônicos.

Figura 35: Corrente elétrica das lâmpadas de vapor de sódio

Fonte: Autoria Própria, 2016.



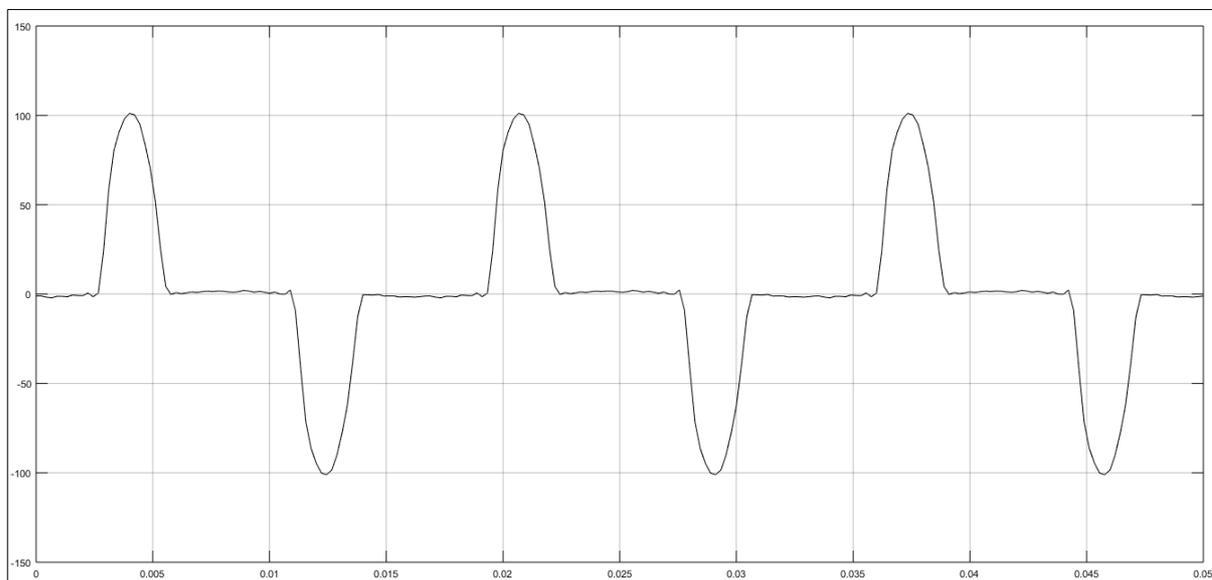
A figura de número 35 apresenta a forma de onda da corrente das lâmpadas de vapor de sódio, nesta figura é possível perceber que a forma de onda se aproxima mais de uma senóide, do que a forma de onda adquirida no circuito das lâmpadas fluorescentes compactas.

Através da comparação das formas de onda da corrente nas duas lâmpadas, constata-se que a lâmpada de vapor de sódio apresenta valor de pico inferior ao da lâmpada fluorescente compacta, mesmo a potência deste circuito ser superior, isto devido ao fato de que o fator de potência da lâmpada de vapor de sódio utilizada ser muito superior aos das lâmpadas fluorescentes, pois de acordo com portaria do INMETRO 471 de 2013, as lâmpadas fluorescentes compactas devem possuir fator de potência superior a 0,50 caso sejam menores que 25 W, caso sejam superior devem ter fator de potência de 0,92, já as lâmpadas de vapor metálico por outro lado são obrigadas pela mesma portaria a possuir fator de potência de 0,92.

Outro fato constatado consiste na distorção harmônica total da corrente no circuito das lâmpadas de vapor de sódio ser menor que a distorção das fluorescentes compactas, o que explica a visível diferença entre as formas de onda.

Figura 36: Corrente elétrica da parte administrativa

Fonte: Aatoria Própria, 2016.

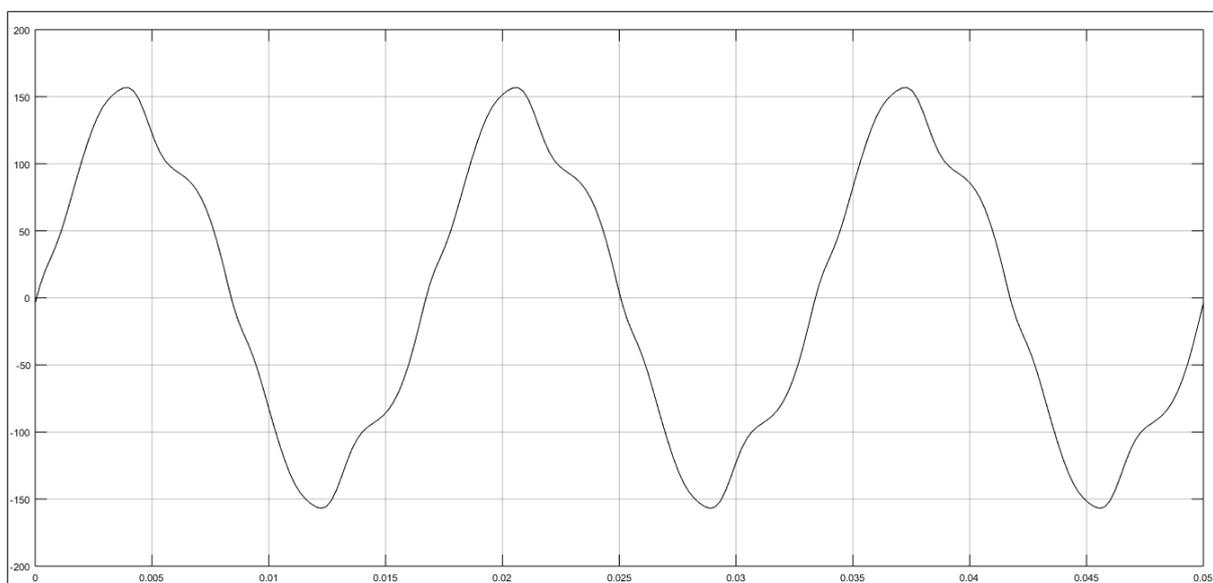


A forma de onda da corrente na parte administrativa apresentada na figura 36 consiste no circuito administrativo, o qual é composto unicamente por computadores. A análise desta forma de onda permite averiguar o impacto de uma elevada terceira harmônica no circuito, bem como uma distorção de tal modo que a senóide sofre retificações nos semi-ciclos.

Nota-se na figura o alto valor de pico da corrente, valor muito superior aos 45,738 A da fundamental, indicando o impacto direto das harmônicas no circuito, o que aliado ao baixo fator de potência dos computadores utilizados ( $FP = 0,65$ ), resultou na distorção e valores da forma de onda.

Figura 37: Corrente elétrica do circuito quase linear

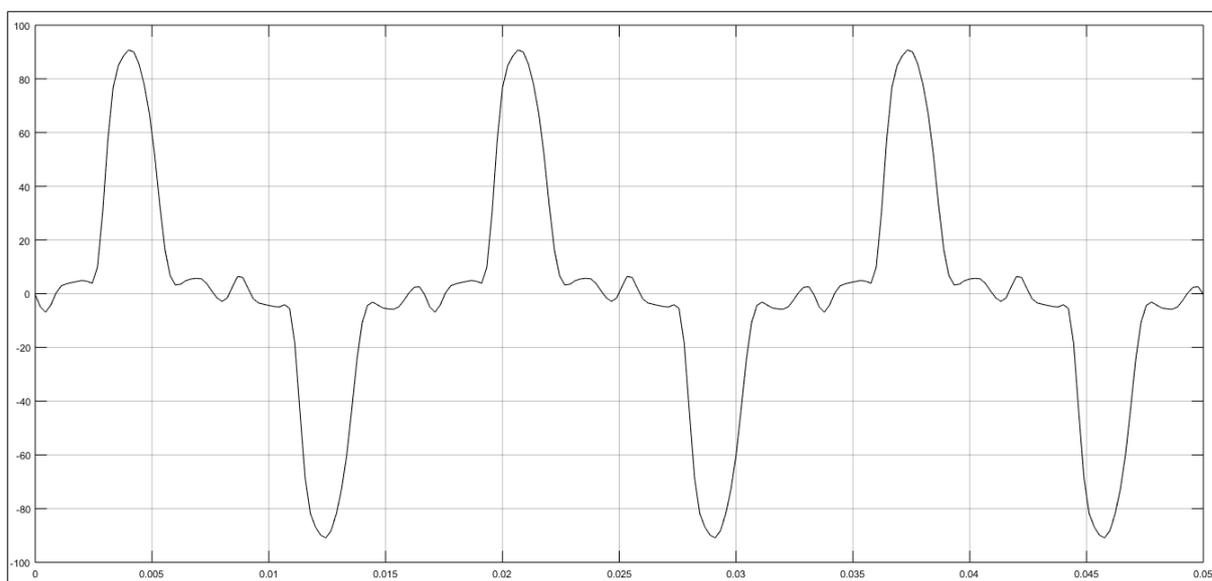
Fonte: Aatoria Própria.



Descrita na figura 37, a forma de onda do circuito quase linear, demonstra claramente a característica de senóide com uma pequena distorção harmônica, indicando que cargas, mesmos considerados resistivas ou semi-resistivas, possuem algum nível de distorção harmônica, por menor que esta seja. É possível se constatar no gráfico que o pico da corrente fundamental que é de 145,245 A está muito próximo do obtido, demonstrando que um fator de potência alto, aliado a uma baixa distorção harmônica tornam a forma de onda previsível e muito próxima do esperado.

Figura 38: Corrente elétrica de refrigeração

Fonte: Aatoria Própria, 2016.

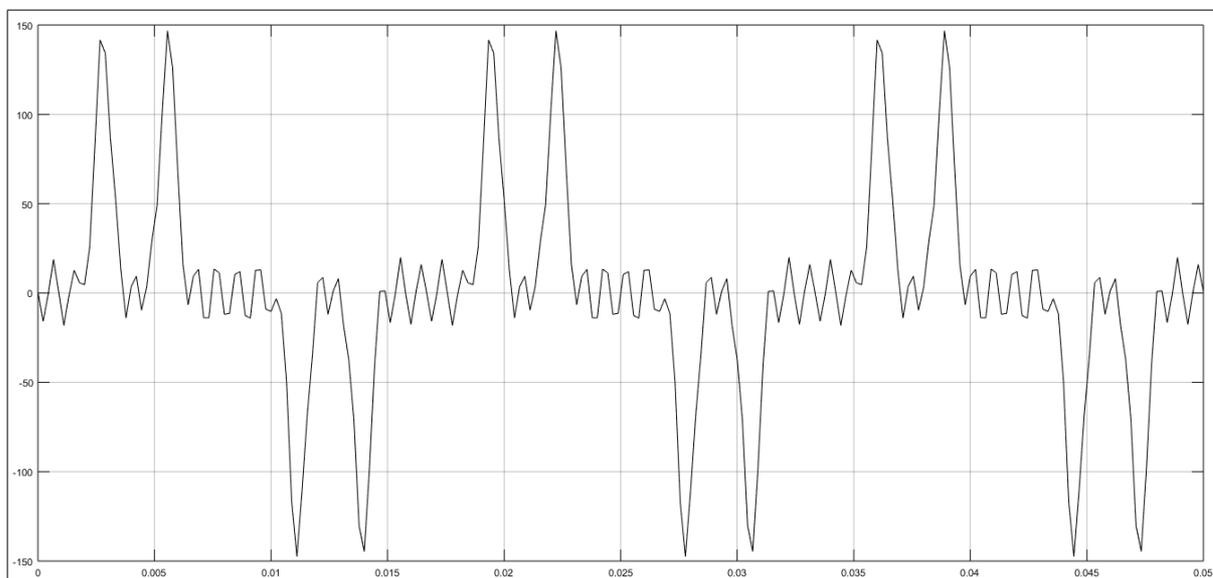


Apresentada na figura 38, a forma de onda da corrente no circuito de refrigeração para os ares-condicionados do tipo janela com conversor. A forma de onda da corrente obtida apresenta-se muito próxima do circuito de administração, sendo este fato devido aos altos valores das harmônicas de ordem mais baixas e o seu defasamento. Neste circuito o fator de potência foi quase unitário, sendo possível uma alta transferência de potência ativa, com baixos índices de reativa.

A utilização de um conversor nos ares-condicionados resulta na observação de um único pico de corrente, fato que pode comprometer a vida útil de equipamentos e das componentes da instalação elétrica, visto que a corrente de pico obtida na simulação foi praticamente o dobro do pico da fundamental que é de 46,384 A.

Figura 39: Corrente elétrica do motor de 50 CV.

Fonte: Aatoria Própria, 2016.

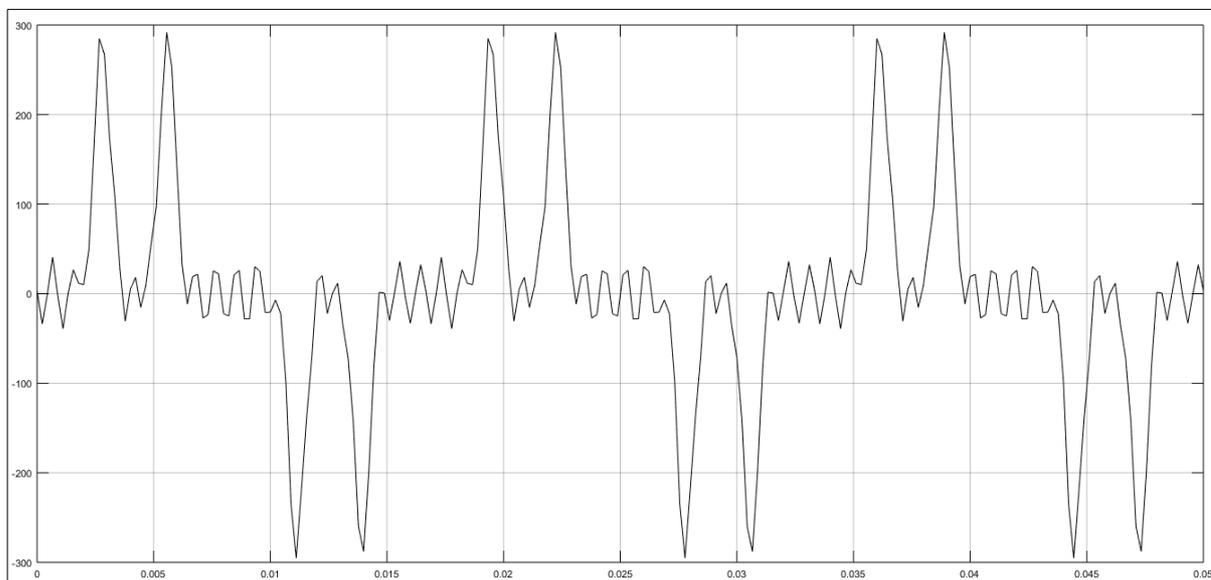


Através da análise da figura 39, o qual aborda a forma de onda da corrente elétrica do inversor do motor de 50 CV, nota-se que a forma de onda da corrente possui dois picos, enquanto que no período restante constata-se valores muito menores, o que ocorre devido ao fato de se utilizar um inversor de frequência no motor. A forma de onda obtida neste circuito se deve praticamente devido ao inversor de frequência, pois o motor por indução gera distorções harmônicas de pequena intensidade e deforma pouco a forma de onda.

A utilização de conversores que utilizam a eletrônica de potência são alguns dos principais geradores de harmônicos existentes, especialmente nas indústrias que os utilizam em grande quantidade, como neste caso.

Figura 40: Corrente elétrica do motor de 100 CV.

Fonte: Autoria Própria, 2016.

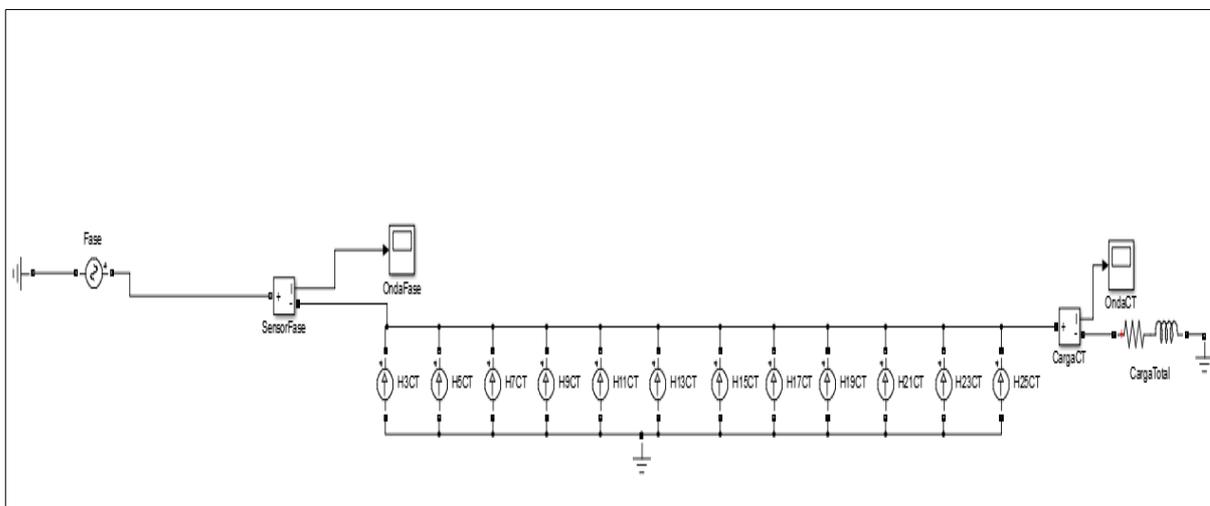


O último dos circuitos considerados na simulação foi o circuito do inversor do motor de 100 CV, o qual possui a forma de onda da corrente descrita na figura 40. O motor de 100 CV possui o dobro da potência de 50 CV e a mesma distribuição de harmônicos, havendo como único diferencial o fator de potência, o qual foi de 0,84 para o motor de 100 CV e de 0,81 para o motor de 50 CV. Mesmo havendo a diferença no fator de potência, o inversor de frequência é o mesmo para ambos os motores e, conseqüentemente, o mesmo fator de potência.

Conforme as formas de ondas dos circuitos levantadas observa-se uma elevada distorção harmônica na maior parte dos circuitos, contudo deve-se observar a distorção harmônica considerando a instalação elétrica como um todo. Para se obter a forma de onda da corrente para a instalação, a equipe realizou a soma fasorial da corrente fundamental e das correntes harmônicas, reduzindo o circuito da figura 33 para o circuito da figura 41.

Figura 41: Circuito implementado para a carga total

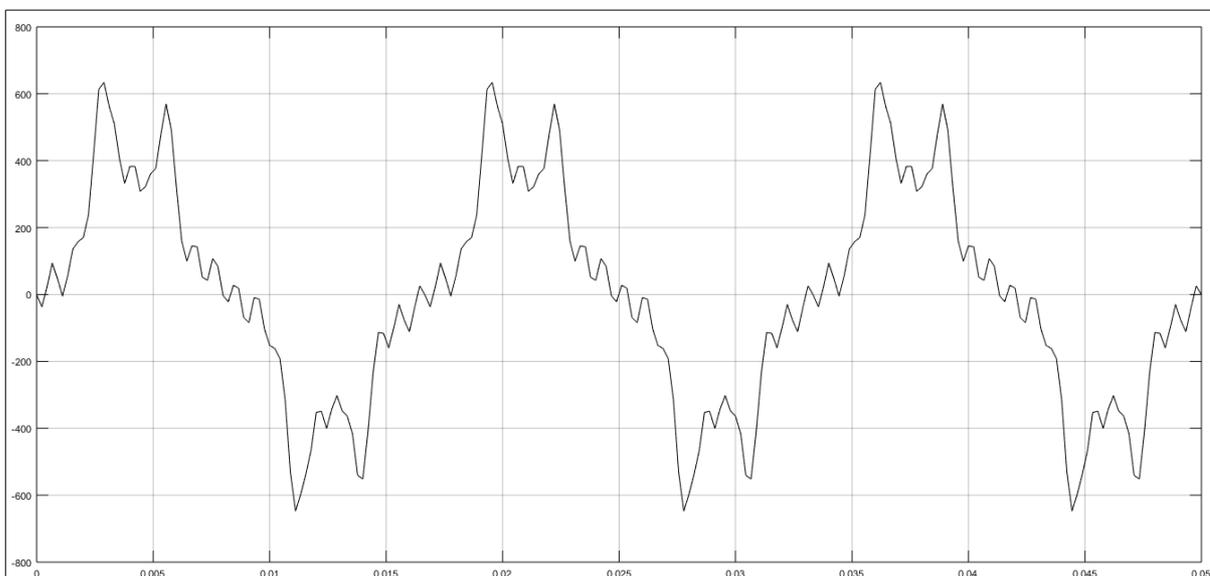
Fonte: Autoria própria, 2016.



Através da soma fasorial das correntes harmônicas, observa-se que as correntes múltiplas de 3 possuem baixo módulo quando comparada as harmônicas não múltiplas de 3, fato que ocorre devido aos elevados módulos dos valores de corrente harmônicas provenientes dos motores com inversores, pois estes circuitos possuem elevada corrente fundamental e conseqüentemente valores elevados de correntes harmônicas, fato comprovado na figura 42 que apresenta a forma de onda da corrente em uma das fases da instalação.

Figura 42: Forma de onda para a carga total

Fonte: Autoria própria, 2016.



A figura 42 permite se constatar o impacto dos motores com inversores de frequência, os quais tornam a forma de onda semelhantes às dos circuitos dos motores individuais, constatando-se ainda o baixo impacto da terceira harmônica e seus múltiplos no circuito como um todo. Apesar da forma de onda da corrente em uma das fases aparentar o pequeno impacto da terceira harmônica e seus múltiplos na instalação as formas de onda das correntes nos circuitos dos equipamentos demonstra o impacto da distorção provocada por estas, sendo especialmente impactante em instalações comerciais e residenciais.

## 6.2 CÁLCULO DO FILTRO HARMÔNICO PASSIVO POR DERIVAÇÃO

A correção ou amortização dos harmônicos é de fundamental importância para diversas cargas e ambientes, conforme descrito nos capítulos anteriores. O primeiro passo para obter o filtro passivo para harmônico consiste em encontrar a reatância capacitiva, a qual normalmente acaba por corrigir o fator de potência, ou seja, ao se projetar o filtro para as harmônicas aproveita-se para corrigir o fator de potência. Devido ao problema que os harmônicos ocasionam nos capacitores, o ideal é realizar a correção do fator de potência antes de se calcular o filtro. Para se corrigir o fator de potência, o primeiro passo consiste em calcular a potência reativa sem correção. Após o cálculo da potência reativa o passo seguinte consiste no cálculo de uma nova potência reativa, utilizando-se o fator de potência desejado, segundo a equação 6.

$$Q_{novo} = \sqrt{S_{novo}^2 - P^2} \quad (6)$$

$$Q_{capacitivo} = Q_{antigo} - Q_{novo} \quad (7)$$

A equação descrita acima necessita da potência ativa do circuito ( $P$ ), o ângulo do fator de potência inicial ( $\varphi_{inicial}$ ) e o ângulo do fator de potência desejado ( $\varphi_{novo}$ ). A seguir deve-se calcular a impedância capacitiva através da equação 8.

$$X_C = \frac{V^2}{Q_{capacitor}} \quad (8)$$

A última etapa consiste no cálculo da capacitância do banco de capacitores através da equação 9.

$$C = \frac{1}{2 * \pi * f * X_C} \quad (9)$$

Através do equacionamento proposto anteriormente é possível se encontrar o valor da capacitância para se utilizar no filtro passivo por derivação, entretanto uma das características fundamentais deste filtro consiste na impossibilidade de se realizar a filtragem para um único circuito ou se realizar a filtragem considerando os circuitos de forma individual. Isto ocorre devido ao fato de que as correntes harmônicas geradas por cada uma das cargas circulam como um todo na fase, e deste modo, a corrente harmônica acaba por ser a soma das harmônicas geradas por cada equipamento e circuito.

A impossibilidade de se filtrar as harmônicas de maneira individual e de maneira seletiva tornam este filtro amplamente utilizado um meio pouco eficaz para realizar a filtragem de correntes harmônicas provenientes de inúmeras cargas, sendo necessário, caso se decida por utilizar tal filtro, realizar o projeto do filtro para a instalação como um todo.

Com os conhecimentos de que o filtro funciona somente para a instalação como um todo, determinou-se pelo equacionamento proposto anteriormente os dados apresentados na tabela 16, o qual apresenta a capacitância, a impedância capacitiva e a nova potência reativa do circuito. Foi decidido pela equipe realizar a elevação do fator de potência da instalação de 0,92871 para 0,99, com o intuito de tornar o fator de potência dentro da norma e torná-lo quase unitário.

Tabela 16: Valores necessário para correção do fator de potência de uma fase

Circuito	FP <sub>antigo</sub>	FP <sub>novo</sub>	Q <sub>cap</sub> (VAr)	X <sub>C</sub> (Ω)	C(F)
Instalação por fase	0,92871	0,99	18479,83795	7,813921332	0,000339469

Fonte: Autoria Própria, 2016.

Realizados os cálculos para determinar o valor da capacitância do filtro, a etapa seguinte consiste na determinação da indutância do filtro passivo por derivação, para tanto deve-se determinar o valor da impedância indutiva do filtro, utilizando-se da impedância capacitiva previamente calculado e escolher a ordem harmônica a ser eliminada, através da equação 10.

$$X_L = \frac{X_C}{h^2} \quad (10)$$

Conforme proposta deste trabalho, busca-se eliminar o terceiro harmônico da instalação, devido ao fato deste ser o mais expressivo no circuito de iluminação por lâmpadas fluorescentes compactas, no circuito de administração, no circuito de refrigeração, no circuito quase-linear e ser um dos mais expressivos na iluminação por lâmpadas de vapor de sódio. A tabela 17 apresenta os valores obtidos para a impedância indutiva e a indutância do indutor.

Tabela 17: Valores necessário para o indutor do filtro passivo por derivação para uma fase

Fonte: Aatoria Própria, 2016.

Circuito	$X_C(\Omega)$	Harmônico	$X_L(\Omega)$	L(H)
Instalação por fase	7,813921332	3	0,868213481	0,002303008

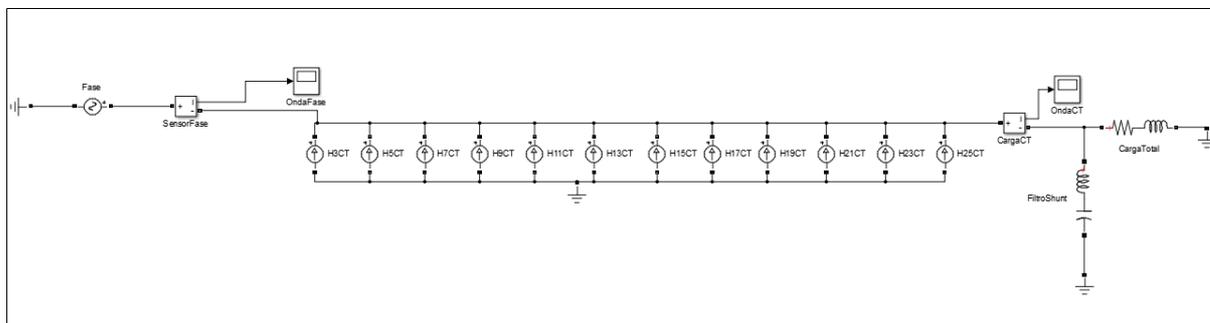
Fonte: Aatoria Própria, 2016

### 6.3 PLANTA INDUSTRIAL COM CORREÇÃO DOS HARMÔNICOS POR FILTRO PASSIVO POR DERIVAÇÃO

Conforme os cálculos realizados anteriormente, foi realizada a correção do fator de potência através de um banco de capacitores. Para acabar com o harmônico mais significativo foi incluso um indutor em série ao sistema, com o intuito de absorver o harmônico. A figura 43 apresenta o circuito corrigido implementado.

Figura 43: Circuito elétrico com correção de reativo e de harmônico.

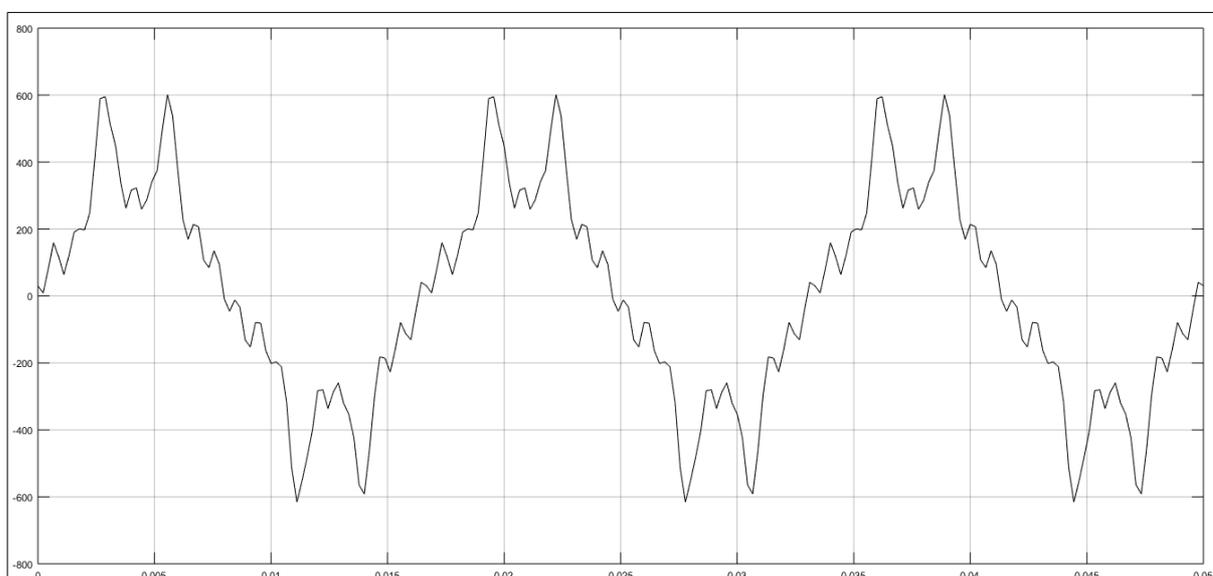
Fonte: Autoria Própria, 2016.



Através da simulação proposta acima, obteve-se a forma de onda da corrente com a correção do terceiro harmônico.

Figura 44: Corrente elétrica da fase com correção do 3º harmônico.

Fonte: Autoria Própria, 2016.



Através da análise da forma de onda obtida com a correção do terceiro harmônico, constata-se uma ligeira melhora com as correções propostas, de tal modo que a THDi da fase que anteriormente era de 39,405%, acabou sendo reduzido para 35,6158%. O resultado obtido demonstra que a instalação de um filtro passivo por derivação na instalação, de modo a eliminar o terceiro harmônico, acabou por melhorar a distorção harmônica total, contudo a redução foi de baixa

intensidade pelo fato das correntes dos motores tornarem a quinta e a sétima harmônica muito mais significativas que a terceira.

A utilização de um filtro passivo por derivação se mostra altamente benéfico caso não houvesse os circuitos dos motores controlados por inversores de frequência, deste modo este filtro se apresenta uma solução ineficaz, pois embora elimine o terceiro harmônico ocorre que as elevadas harmônicas de quinta e sétima ordem circulem pela fase podendo ocasionar inúmeros efeitos adversos como os descritos no capítulo 2.3. Este filtro se apresenta como uma solução viável em instalações sem a presença de cargas com elevadas harmônicas de quinta e sétima ordem, como em residências e instalações comerciais, mas não para indústrias ou instalações que apresentam elevadas ordens harmônicas distintas.

#### 6.4 CÁLCULO DO FILTRO HARMÔNICO PASSIVO DE BLOQUEIO

O filtro passivo de bloqueio conforme explicado no capítulo 2.4, consiste na utilização de um indutor em série com o circuito, de modo a bloquear a passagem da corrente harmônica para o resto da instalação. Este filtro normalmente é empregado em instalações elétricas de modo a impedir a propagação pela instalação do harmônico, podendo ser utilizado nos circuitos e não na instalação como no caso do filtro passivo por derivação.

Para o dimensionamento do filtro harmônico de bloqueio, o primeiro passo consiste no cálculo da reatância capacitiva para se determinar o valor do capacitor a ser empregado no filtro. A metodologia empregada para a determinação do capacitor do filtro foi a mesma da utilizada no cálculo da reatância capacitiva do filtro harmônico por derivação, sendo que os dados que os dados obtidos estão presentes na tabela 18.

Tabela 18: Valores para a determinação do capacitor do filtro de bloqueio.

<b>Circuito</b>	<b>FP<sub>antigo</sub></b>	<b>FP<sub>novo</sub></b>	<b>Q<sub>cap</sub>(VAr)</b>	<b>X<sub>c</sub>(Ω)</b>	<b>C(F)</b>
LFC	0,55	0,99	2373,575812	6,79523271	0,000390359
Vapor de Sódio	0,92	0,99	425,2445761	37,92876125	0,000069935
Refrigeração	0,987	0,99	250,2780976	193,3848805	0,000013716
Administração	0,65	0,99	3079,911152	5,236839377	0,000506524
Quase-linear	0,92	0,99	3402,071609	4,740934894	0,000559506
Motor 50 CV	0,93	0,99	7226,724462	19,98139002	0,000132753
Motor 100 CV	0,93	0,99	12513,78278	11,53927653	0,000229874

Fonte: Autoria Própria, 2016.

Com a realização dos cálculos propostos e determinado o valor do capacitor a ser empregado no filtro de bloqueio, deve-se determinar a indutância do indutor do filtro ao se igualar o valor da reatância indutiva com a reatância capacitiva conforme a equação 11.

$$X_L = X_C \quad (11)$$

Com a equação 11, pode-se determinar o valor do indutor de bloqueio do filtro, sendo que a frequência considerada no equacionamento é a frequência harmônica que se deseja eliminar. A equação 12 apresenta a de forma direta o cálculo para a determinação do indutor do filtro.

$$L = \frac{1}{4 * \pi^2 * f^2 * C} \quad (12)$$

Com os valores da tabela 18 e o equacionamento proposto acima, obtêm-se a tabela 19 com os valores necessários para o filtro harmônico de bloqueio.

Tabela 19: Valores para a determinação do indutor do filtro de bloqueio

<b>Circuito</b>	<b>C(F)</b>	<b>Frequência (Hz)</b>	<b>Harmônico</b>	<b>L(H)</b>
LFC	0,000390359	180	3	0,002002768
Vapor de Sódio	0,000069935	180	3	0,011178796
Refrigeração	0,000013716	180	3	0,056996592
Administração	0,000506524	180	3	0,001543461
Quase-linear	0,000559506	180	3	0,001397302
Motor 50 CV	0,000132753	300	5	0,002120091
Motor 100 CV	0,000229874	300	5	0,001224355
Motor 100 CV	0,000229874	420	7	0,000624671

Fonte: Aatoria Própria, 2016

## 6.5 PLANTA INDUSTRIAL COM FILTRO PASSIVO DE BLOQUEIO

Com os cálculos propostos e realizados no item 6.4, pode-se realizar a montagem do filtro de bloqueio ao se colocar o capacitor e o indutor calculados em paralelo um com outro e colocá-los em série com o circuito, de modo a bloquear a passagem do harmônico a ser filtrado para o resto da instalação.

A metodologia empregada pela equipe na realização deste trabalho utilizou-se de valores reais obtidos em outros trabalhos e medições, com o intuito de se obter a forma de onda o mais próximo possível da realidade com os valores reais.

Para a obtenção da forma de onda foi empregado o método das fontes de corrente, onde cada fonte injeta no circuito uma corrente harmônica, entretanto a metodologia utilizada não possibilita a realização da simulação utilizando o filtro de bloqueio, pois os valores de corrente são constantes, havendo caso se empregue o filtro no sistema uma deformação da forma de onda da tensão e uma piora na forma de onda da corrente.

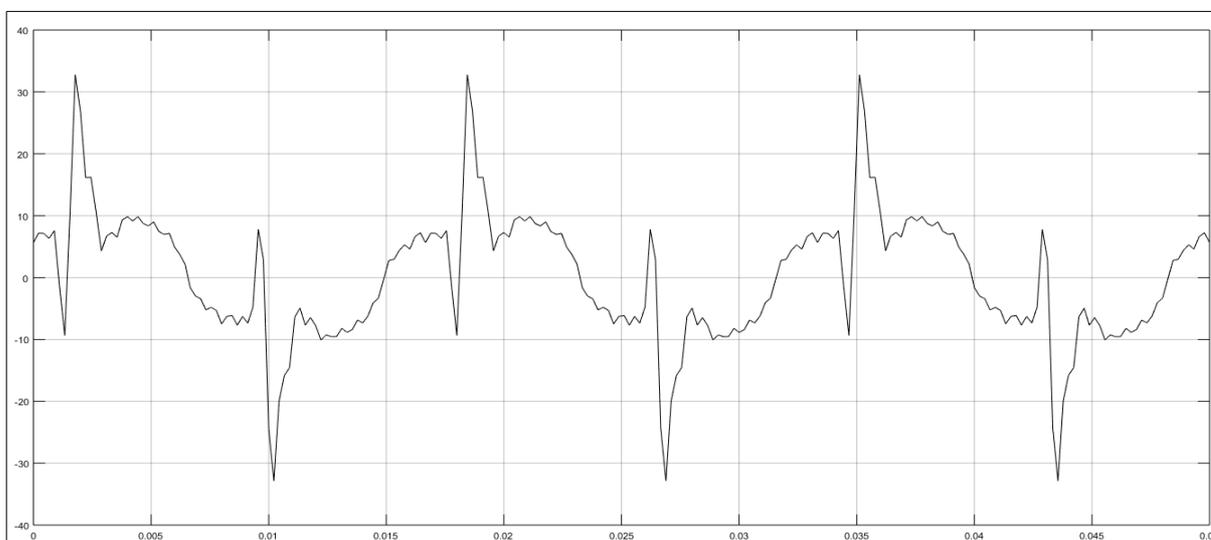
Para a realização da simulação empregando o filtro passivo de bloqueio seria necessário utilizar-se da metodologia da topologia do circuito, método no qual iria-se desenvolver um circuito de modo a obter-se a forma de onda desejada, porém

com os valores de distorção e de corrente menos próximos dos reais utilizados, havendo a necessidade de se realizar o dimensionamento de cada circuito de modo independente.

Embora a metodologia empregada não possibilite a realização da simulação de maneira desejada, é possível se obter a forma de onda e a distorção harmônica após a inserção do filtro ao se retirar a fonte de corrente harmônica a ser filtrada, obtendo-se as formas de onda que seriam observadas caso se realiza-se a medição após a inserção do filtro.

A figura 45 que é apresentada a seguir apresenta a forma de onda que se obteria ao se impedir a passagem da corrente harmônica de terceira ordem para a fase. Nesta figura é possível se constatar a melhoria da forma de onda obtida, com um comportamento mais senoidal, comprovado ao se obter a THD da forma de onda que foi reduzida de 111,21% para 75,47%.

Figura 45: Forma de onda do circuito LFC com eliminação do 3º harmônico



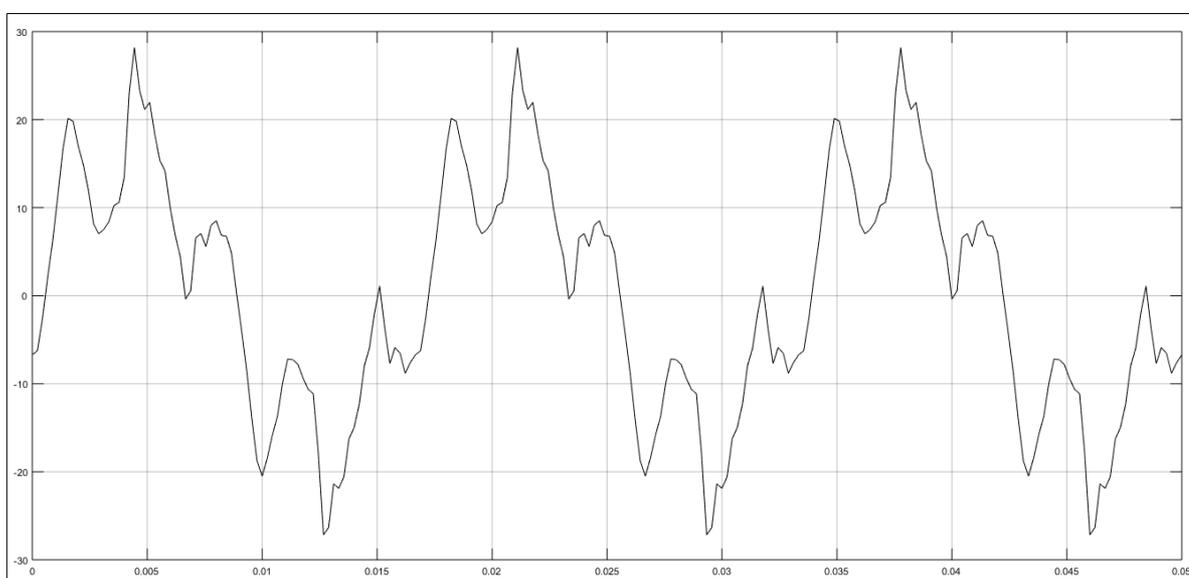
Fonte: Autoria Própria, 2016.

Embora o resultado obtido com a eliminação do terceiro harmônico seja expressiva, é necessário se observar a existência de um pico de corrente que permanece, visto que a distorção provocado pelo quinto e sétimo harmônico são significativas, contudo ao se utilizar os filtros passivos de bloqueio é possível a inclusão de outros filtros em série de modo a eliminar outras correntes harmônicas. A possibilidade de se incluir outros filtros de bloqueio no circuito para melhorar a forma

de onda na fase, sem a existência dos problemas atrelados ao filtro com derivação, onde cada nova inclusão de filtro acaba por interagir entre si, havendo a necessidade de cálculos mais avançados de modo a minimizar as iterações nocivas entre os filtros e a carga.

Figura 46: Forma de onda do circuito de lâmpadas de vapor de sódio com eliminação do 3º harmônico

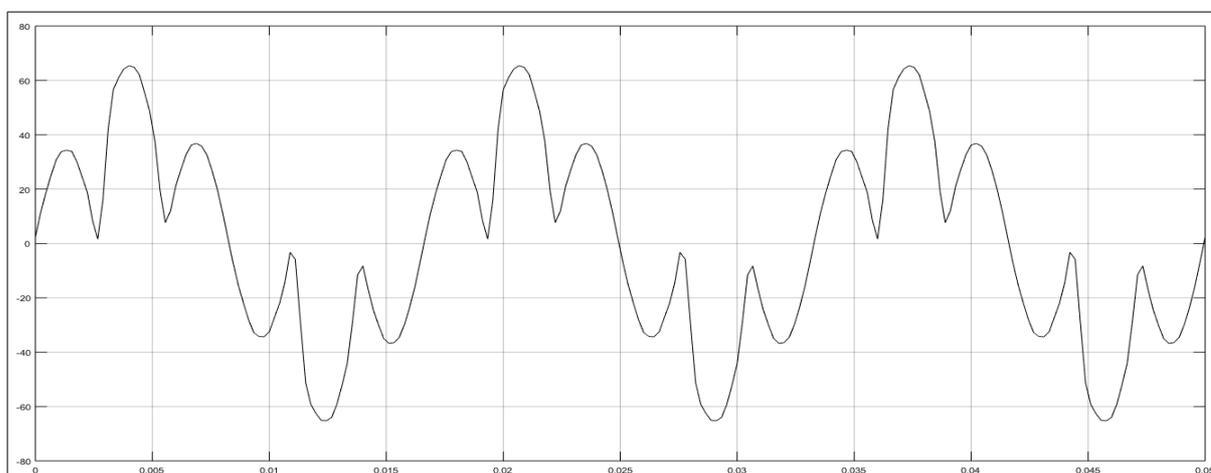
Fonte: Autoria Própria, 2016.



Com os métodos empregados propostos anteriormente, adquiriu-se a forma de onda da figura 46 para o circuito das lâmpadas vapor de sódio. É possível se observar que a eliminação do terceiro harmônico resultou em uma melhoria brusca da forma de onda da corrente, reduzindo-se a THD de corrente de 59,46% para 47,67%, valor que torna possível se constatar o impacto deste harmônico no circuito, contudo deve-se notar que o quinto harmônico é o mais impactante no circuito das lâmpadas de vapor de sódio, sendo que a filtragem deste harmônico acarretaria na redução mais significativa da distorção harmônica total.

Figura 47: Forma de onda do circuito de administração com eliminação do 3º harmônico

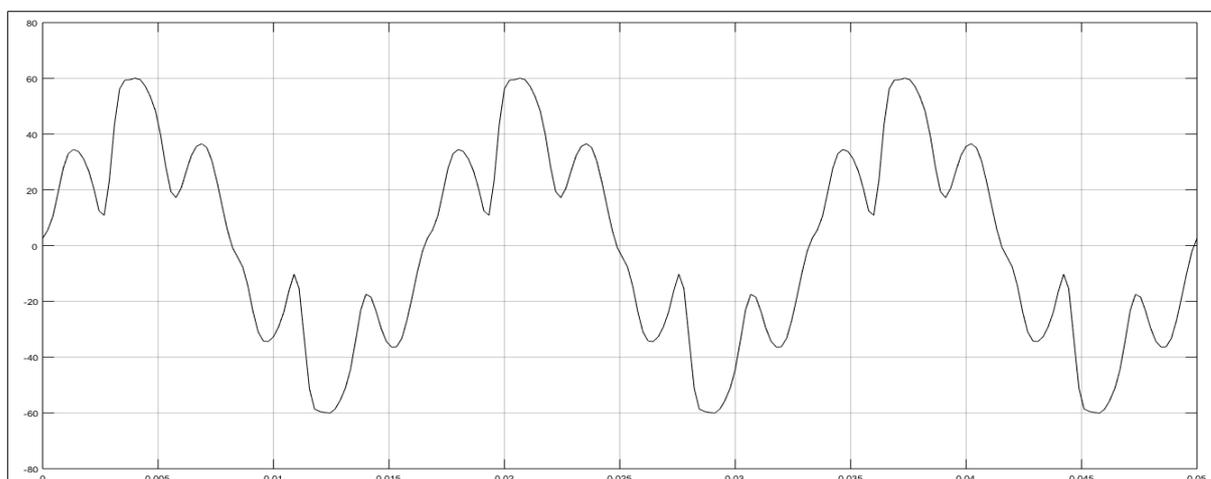
Fonte: Autoria Própria, 2016.



A figura 47 representa o circuito de administração a eliminação do terceiro harmônico. É possível se perceber pela análise da forma de onda obtida o formato mais próximo a senóide, quando comparado ao caso sem correção, onde existiam períodos retificados em zero, indicando que a utilização de um filtro para este harmônico provocou uma melhoria drástica no circuito, ocorrendo da THD do circuito ser de 49,36%, quando sem a correção era de 92,69%, indicando que este harmônico representa quase que metade da distorção existente.

Figura 48: Forma de onda do circuito de refrigeração com eliminação do 3º harmônico

Fonte: Autoria Própria, 2016.

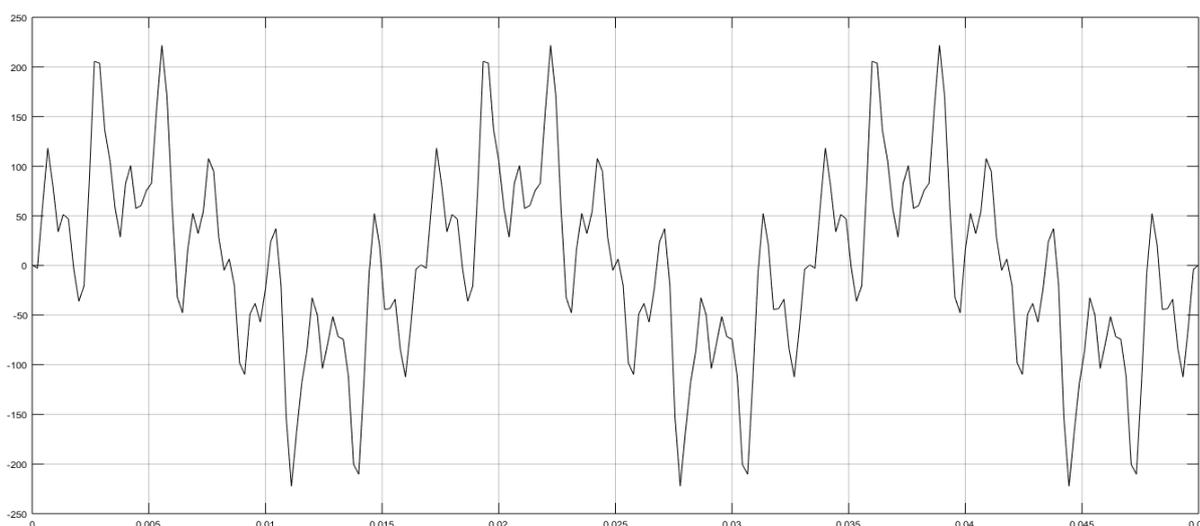


A forma de onda apresentada na figura 48 representa a forma da corrente no circuito de refrigeração, o resultado obtido demonstra o efeito do harmônico na forma de onda, visto que com a filtragem do terceiro harmônico o comportamento senoidal se tornou muito mais visível, havendo a redução da distorção harmônica total de 76,51% para 37,756%, uma redução de mais da metade da distorção harmônica total do circuito, o que indica o impacto deste harmônico no circuito.

Convém se observar que a forma de onda do circuito de refrigeração se aproxima muito da forma de onda dos circuitos de administração, devido ao fato de a eletrônica de potência ser amplamente utilizada tanto nos computadores como nos ares-condicionados de janela.

Figura 49: Forma de onda do circuito do motor 50 CV com eliminação do 5º harmônico

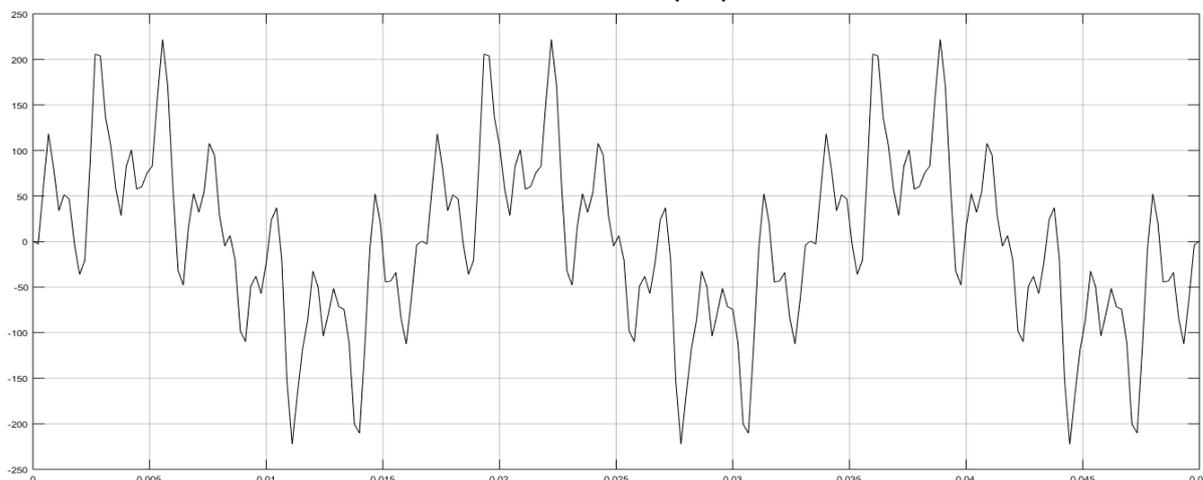
Fonte: Aatoria Própria, 2016.



A forma de onda obtida no circuito do motor de 50 CV com correção do fator de potência e a filtragem do 5º harmônico, representado na figura 49, indica um comportamento mais senoidal do circuito perante o proposto sem correção e filtragem. A distorção total anteriormente de 121,92% acabou por ser reduzida para 89,13%, uma redução muito significativa da distorção, porém com resultados ainda muito altos, especialmente para o sétimo harmônico, cujo valor da corrente no caso proposto foi de 24,129 A, valor que ao circular pelo circuito pode ocasionar problemas em equipamentos e na instalação.

Figura 50: Forma de onda do circuito do motor 100 CV com eliminação do 5º harmônico.

Fonte: A autoria própria, 2016.

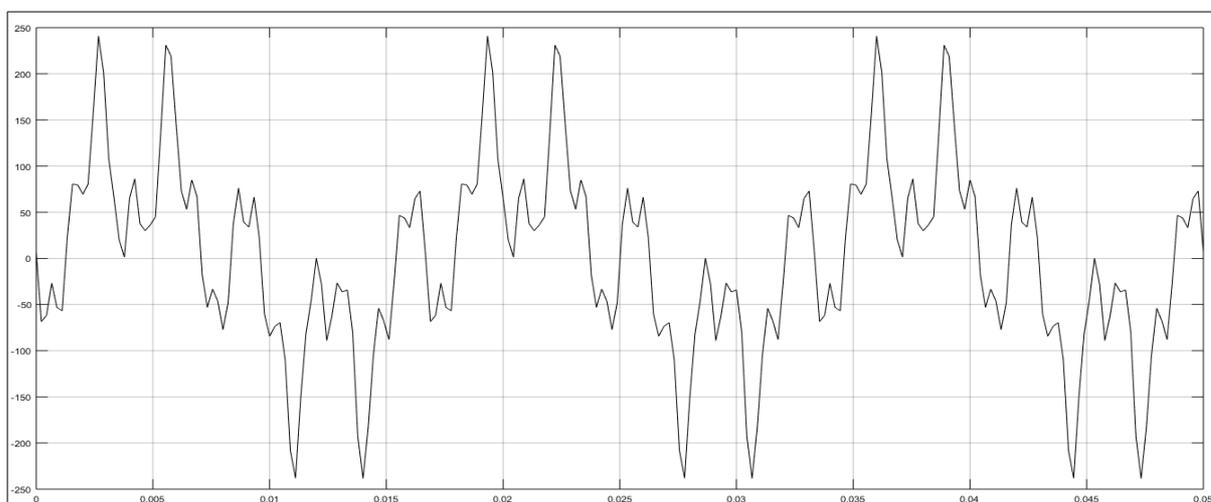


A forma de onda da figura 50 representa o resultado obtido pelo motor de 100 CV com a eliminação da propagação do 5º harmônico para a fase, constatando-se que a forma de onda adquirida foi praticamente a mesma para o motor de 50 CV, visto que a única diferença impactante é potência do motor de 100 CV ser o dobro do motor de 50 CV.

Para comprovar o impacto do 7º harmônico para os circuitos dos motores a figura 51 apresenta a forma de onda que se obteria ao se eliminar este harmônico e não o quinto.

Figura 51: Forma de onda do circuito do motor 100 CV com eliminação do 7º harmônico

Fonte: Autoria Própria, 2016.

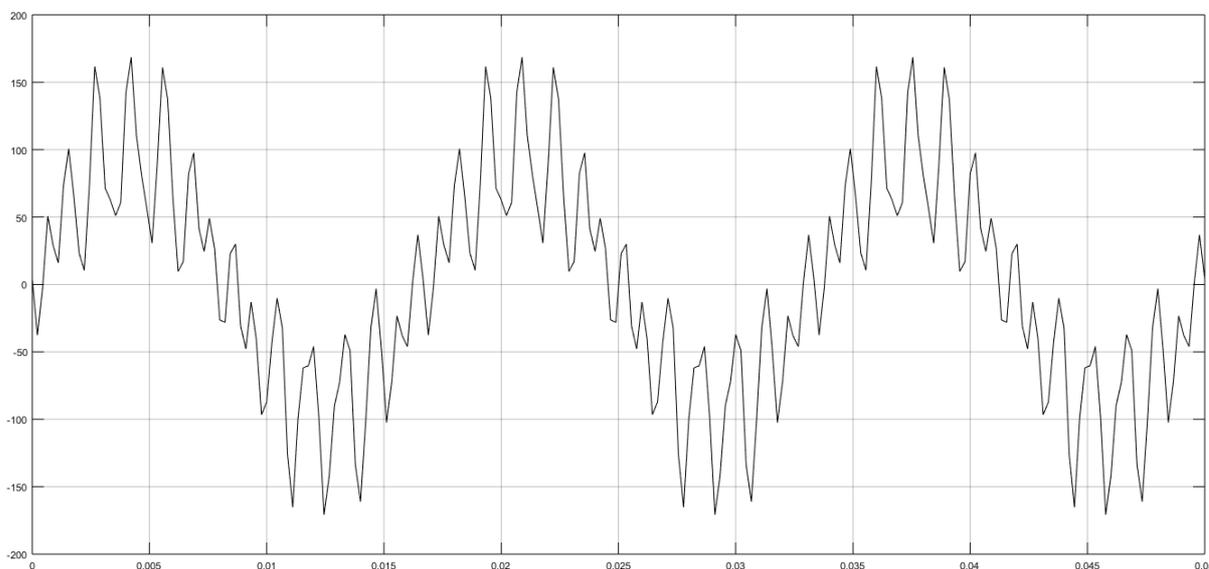


A THD da corrente do motor antes de haver a filtragem de qualquer harmônico foi de 121,92%, contudo a eliminação do sétimo harmônico acaba por reduzir a distorção total para 100,66%, valor muito significativo, indicando que, embora a eliminação do quinto harmônico ser a mais impactante, a eliminação do sétimo harmônico acarreta numa melhora significativa da forma de onda.

Para reduzir a THD do motor de 100CV ainda mais e impedir que uma corrente harmônica de alta intensidade circule pela instalação e danifique os equipamentos, foi realizada a filtragem do quinto e do sétimo harmônico, conforme a figura 52, a qual utiliza uma filtragem dupla para eliminar os mais impactantes valores de correntes harmônicas geradas pelos motores acoplados aos inversores de frequência.

Figura 52: Forma de onda do circuito do motor 100 CV com eliminação do 5º e 7º harmônico

Fonte: Aatoria Própria, 2016.

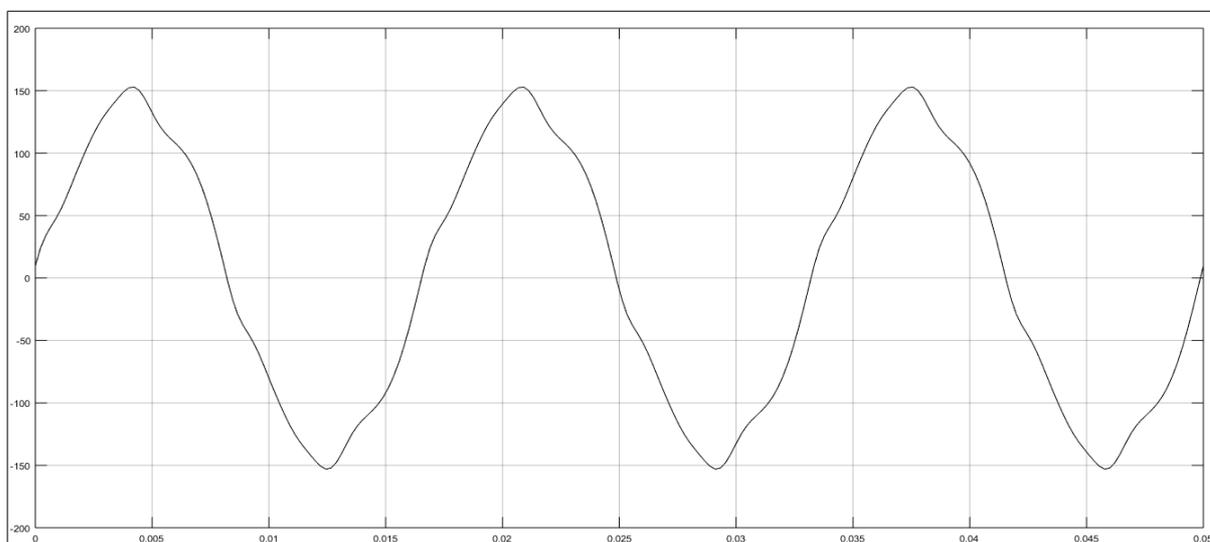


A eliminação do quinto e do sétimo harmônico, conforme a figura 48 demonstra, apresenta uma melhoria gigantesca, tendo em vista o comportamento claramente senoidal da corrente, mesmo com as distorções de ordem mais elevada, havendo a redução de 121,92% para 56,68%, valor muito inferior ao anterior. A eliminação de ambos os harmônicos impede que uma corrente harmônica muito alta circule pela instalação e pela fase, reduzindo os problemas e os efeitos dos harmônicos na instalação.

Uma análise da forma de onda adquirida com a utilização de dois filtros de bloqueio em série, ajustados para impedir que o 5º e 7º harmônico se propaguem para a fase, torna possível a constatação de que a forma de onda que se obtêm aproxima-se de uma onda senoidal. A THD, com a dupla filtragem dos harmônicos propostos, resulta no valor de 56,687%. A utilização de filtros de bloqueio para este caso se apresenta como uma solução de alta eficiência, pois limita-se o impacto negativo que os elevados valores de correntes harmônicas gerados pelo acoplamento do motor o inversor de frequência.

Figura 53: Forma de onda do circuito quase-linear com eliminação do 3º harmônico

Fonte: Autoria Própria, 2016.



A análise da forma de onda da corrente da figura 53, que representa o circuito quase linear, indica que para as cargas com distorção harmônica com valores baixos, a utilização do filtro acaba por melhorar a forma de onda obtida, porém sem grandes melhorias, visto que houve uma redução da THD anteriormente de 11,41% para 5,82%.

Embora a distorção harmônica total seja reduzida quase que pela metade, é importante se salientar que tal circuito apresenta cargas com menor nível de distorção harmônica, como chuveiros, cafeteiras e aquecedores que possuem níveis muito menores de distorção harmônica que a utilizada, por serem cargas muito mais resistivas que indutivas. Para as cargas como a geladeira, a qual apresentam valores de indutância, as THDs são muito inferiores as obtidas, visto que para este trabalho foi considerado que o circuito quase linear possui uma distorção como a geladeira, equipamento de maior THD dos eletrodomésticos de características resistivas ou com comportamento quase resistivo, de tal modo que o resultado obtido da THD foi muito mais significativo que a realidade, e mesmo no caso simulado, os valores obtidos foram muito menos significativos que os circuitos propostos anteriormente.

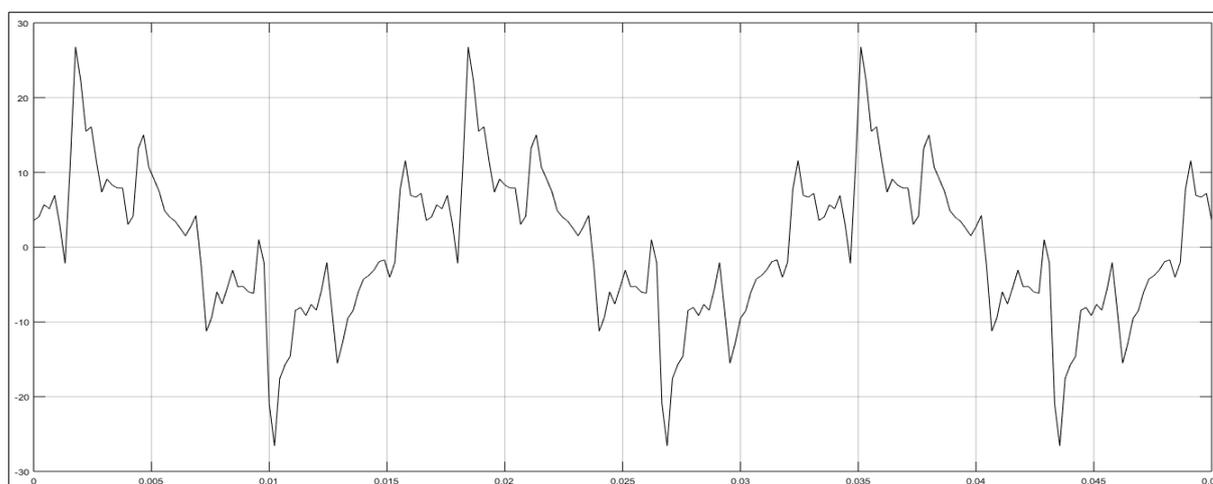
## 6.6 PLANTA INDUSTRIAL COM TRANSFORMADOR ISOLADOR E COMPARAÇÕES

A utilização de transformadores com o intuito de se isolar os harmônicos é um meio extremamente eficaz de se limitar as correntes harmônicas de modo a proteger o sistema e a instalação contra este problema. Existem duas maneiras de os transformadores isoladores funcionarem, a primeira consiste em limitar o terceiro harmônico e suas múltiplas no lado delta, o segundo consiste em transformadores para acabar ou mitigar o efeito de determinados harmônicos do sistema e deste modo impedir a circulação destas harmônicas no sistema.

Para a realização deste trabalho foi considerado somente a utilização de transformadores estrela-delta, com relação de transformação 1 para 1. Conforme explicado no item 2.4.4 o transformador isolador possui a característica de aprisionar os harmônicos múltiplos de três no lado de delta, evitando assim a propagação destes harmônicos para a fase.

Figura 54: Corrente elétrica do circuito das LFC com transformador isolador

Fonte: Autoria Própria, 2016.



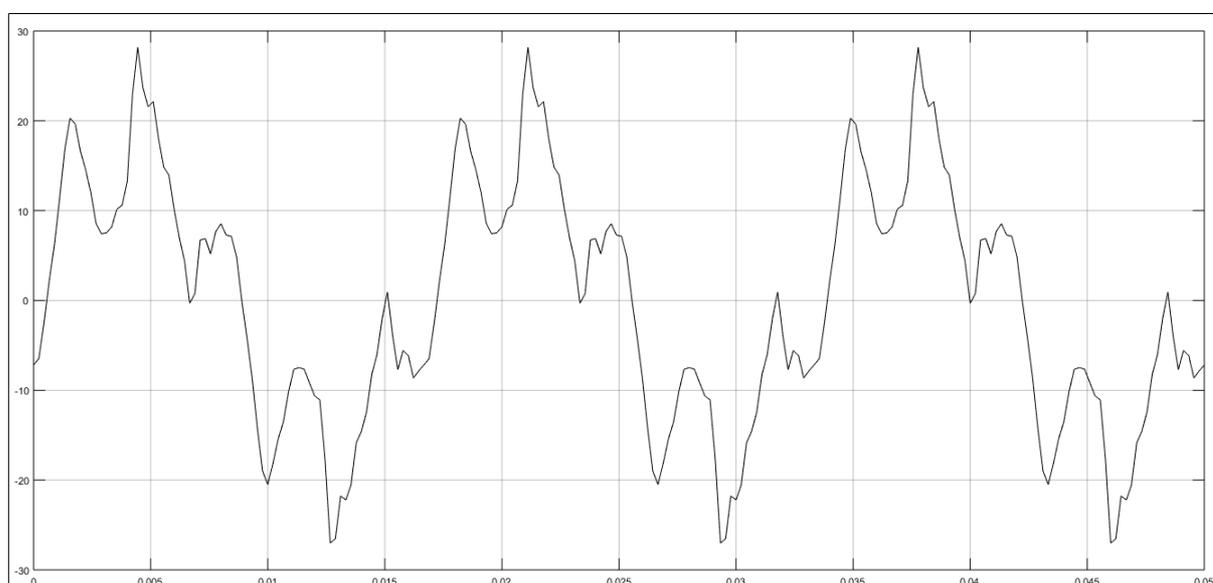
Devido à presença da terceira harmônica no circuito das lâmpadas fluorescentes compactas, foi considerado para a simulação um transformador isolador que elimine o terceiro harmônico e seus múltiplos, adquirindo-se a forma de onda apresentada na figura 54. É possível se constatar a melhora da forma de onda, havendo um comportamento mais senoidal da corrente. Através dos cálculos e dos

levantamentos realizados na simulação determinou-se que com a ausência do terceiro harmônico e seus múltiplos a THD foi reduzida de 111,21% para 62,84% uma redução mais significativa que a inclusão do filtro passivo que reduziu para 75,47%.

A inclusão de um transformador isolador se mostrou benéfico para o sistema, contudo a baixa potência ativa do circuito (1725 W) e o módulo das correntes harmônicas, torna a inclusão do transformador isolador uma solução cara e desnecessária, principalmente considerando que a terceira harmônica é muito mais significativa que as suas múltiplas, não havendo no caso do circuito das lâmpadas fluorescentes compactas a necessidade de um transformador somente para o circuito.

Figura 55: Corrente elétrica do circuito das lâmpadas de vapor de sódio com transformador isolador.

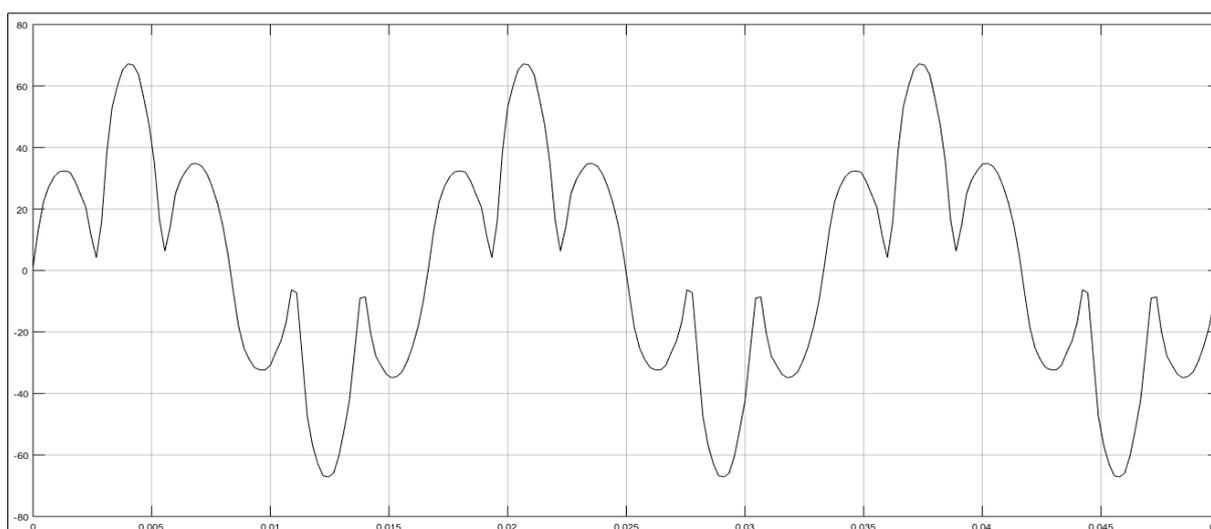
Fonte: Autoria Própria, 2016.



Conforme a figura 55, a retirada dos harmônicos de terceira ordem e seus múltiplos apresentou uma melhoria na forma de onda, havendo uma redução da THD de corrente de 59,46% para 47,67%, contudo a melhoria foi muito pequena perante a filtragem do terceiro harmônico, o qual apresentou THD de corrente de

47,633%. A análise das THD e das formas de ondas adquiridas indica não haver a necessidade de se utilizar um transformador, sendo que a simples colocação de um filtro de terceira ordem se apresenta como uma solução mais do que suficiente para o circuito.

Figura 56: Corrente elétrica do circuito de administração com transformador isolador  
Fonte: Autoria Própria, 2016.

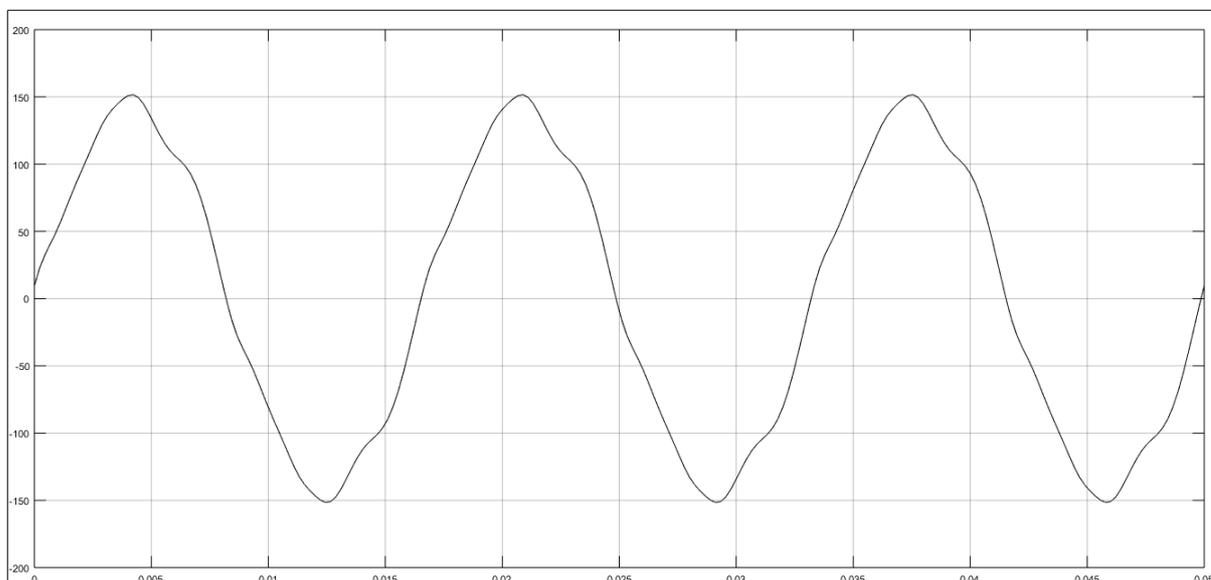


A utilização de um transformador isolador para limitar as correntes harmônicas no circuito de administração, apresentado na figura 56, resultou na melhoria da forma de onda e na diminuição da THD de 92,69% para 48,93% um valor ligeiramente melhor que o caso com um filtro de terceira ordem que reduziu a distorção harmônica total para 49,36%. A melhora apresentada pela inclusão de um transformador para limitar o terceiro e seus múltiplos se mostra como uma opção inviável, devido a pequena melhoria ofertada pelo filtro perante os custos e possíveis problemas de um transformador isolador no circuito.

Para se obter um valor menor de distorção harmônica de corrente, pode-se realizar o dimensionamento de um filtro para o quinto harmônico caso no qual haveria uma redução da THD do circuito para 20,11% valor muito melhor do que a inclusão do transformador e de custo reduzido.

Figura 57: Corrente elétrica do circuito quase linear com transformador isolador

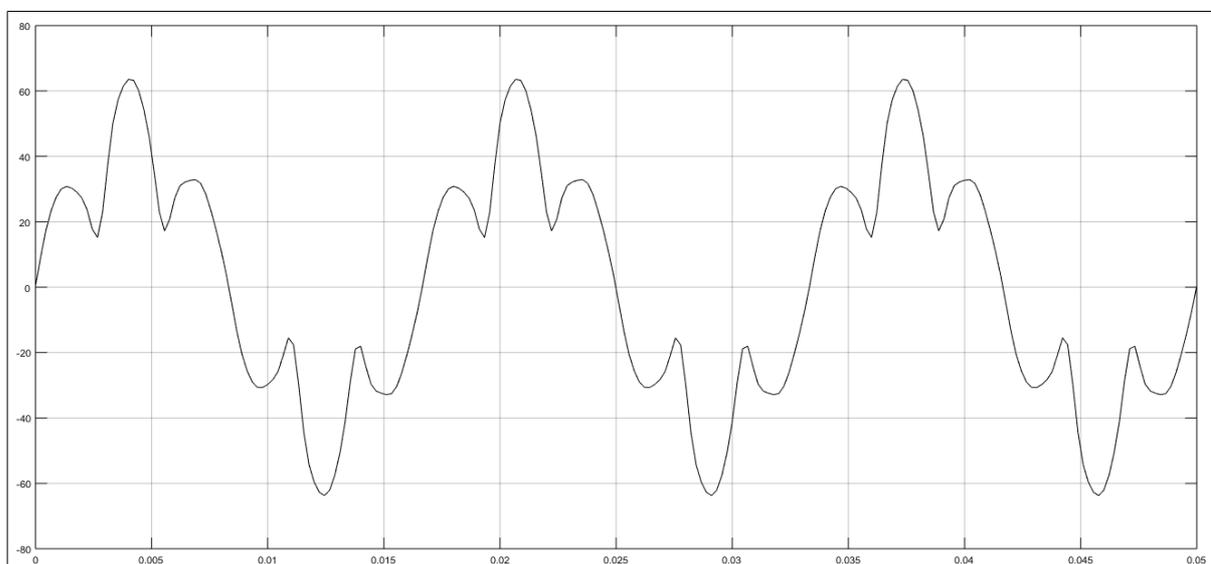
Fonte: Autoria Própria, 2016.



A figura 57 demonstra a forma de onda da corrente do circuito quase-linear com a utilização de um transformador quase linear que apresenta THD de 5,71% valor menor que os 11,14% do circuito sem correção alguma e os 5,82% do circuito com filtro para o terceiro harmônico. Embora exista uma melhoria da THD do circuito, a utilização de um transformador isolador apresenta-se como um meio inviável para se reduzir as distorções harmônicas, tendo em vista os baixíssimos valores proporcionais de corrente para os múltiplos do 3º harmônico. Conforme afirmado anteriormente o caso proposto para o sistema é o pior caso possível para este tipo de carga, havendo uma distorção harmônica muito menor.

Figura 58: Corrente elétrica do circuito de refrigeração com transformador isolador

Fonte: Aatoria Própria, 2016.



O circuito de refrigeração, apresentado na figura 58, resultou na melhoria da forma de onda e na diminuição da THD de 76,51% para 36,03% um valor ligeiramente melhor que o caso com um filtro de terceira ordem que reduziu a distorção harmônica total para 37,756%. A melhora apresentada pela inclusão de um transformador para limitar o terceiro e seus múltiplos se mostra como uma opção inviável, devido a pequena melhoria ofertada pelo filtro perante os custos, aliado ao fato de que a utilização de um filtro de bloqueio apresentar resultados semelhantes.

Com o intuito de facilitar a visualização dos resultados obtidos nas simulações é fornecida a tabela 20 que apresenta os valores de THD sem correção alguma, com filtro passivo e com transformador isolador.

Tabela 20: Resultados obtidos sem correção, com filtro passivo e com transformador isolador

Circuito	THD sem correção	THD com filtro	THD com transformador
LFC	111,21%	75,47%	62,84%
Vapor de Sódio	59,46%	47,67%	47,633%
Administração	92,69%	49,36%	48,93%
Quase linear	11,14%	5,82%	5,71%
Refrigeração	76,51%	37,759%	36,03%
Motor 50 CV	121,92%	89,13%	
Motor 100 CV	121,92%	89,13%	
Motor 100 CV 7°	121,92%	100,66%	
Motor 100 CV 5° e 7°	121,92%	56,687%	

Fonte: Autoria Própria, 2016.

Com base na tabela anterior e nas observações anteriores é possível se constatar que não é necessário a correção das distorções harmônicas para cargas quase lineares, que a utilização de filtros passivos para os circuitos de administração, lâmpadas fluorescentes compactas, lâmpadas de vapor de sódio, para a refrigeração e a utilização de transformadores isoladores para os casos dos motores.

## **7. CONCLUSÃO**

### **7.1 CONSIDERAÇÕES**

O presente trabalho buscou fornecer um conhecimento mais aprofundado dos harmônicos, devido à crescente utilização de equipamentos que se utilizam da eletrônica de potência nas últimas décadas e que provocam o surgimento de correntes harmônicas nas instalações elétricas, o que ocasionam inúmeros problemas, custos e perdas.

O primeiro capítulo buscou explicar os motivos com que impulsionaram a equipe a realizar o trabalho, delimitando o tema os objetivos e o método de se realizar este trabalho.

O segundo capítulo buscou tentar explicar o que são harmônicos, quais as causas e consequências de tais distorções elétricas, explicar os métodos para se eliminar ou mitigar os efeitos dos harmônicos e as soluções usualmente empregadas.

O capítulo 3 teve por objetivo realizar um estudo de casos anteriores sobre o assunto, desde o levantamento de dados, métodos utilizados, suposições consideradas, resultados obtidos e programas empregados. Possibilitando uma análise mais aprofundada sobre as abordagens existentes e sobre como o conhecimento sobre o tema é aplicado.

O capítulo de número 4 teve por intuito realizar uma comparação entre programas computacionais utilizados nos cálculos e levantamentos de dados, buscando explicar de maneira sucinta as vantagens e desvantagens de cada programa e explicar a escolha do programa a que este trabalho utilizou.

O quinto capítulo abordou o desenvolvimento de uma planta industrial fictícia, indicando os equipamentos utilizados, a distorção harmônica de corrente de cada circuito, as potências ativas, reativas e aparentes de cada circuito e da planta industrial.

O sexto capítulo buscou apresentar as simulações primeiramente sem filtro indicando as distorções harmônicas em cada circuito e explicando o resultado obtido, seguido pela metodologia de cálculos de modo a se corrigir o fator de potência, evitar a ressonância do banco de capacitores no circuito e calcular o valor

da indutância para o filtro passivo por derivação. O capítulo buscou apresentar ainda as simulações com a utilização de filtros e a utilização de transformadores isoladores, explicando quando utilizar determinado método e o motivo para tanto.

## **7.2 CONCLUSÃO**

Na realização deste trabalho atender a todos os objetivos propostos, realizando uma análise mais aprofundada sobre o tema dos harmônicos e realizou a comparação das configurações passivas mais utilizadas para se combater os harmônicos. A utilização da metodologia de fontes de correntes apresentou alguns problemas na hora de se realizar as simulações, motivo que prejudicou parte das simulações.

Através das simulações realizadas e com base nos dados experimentais provenientes de medições de outros trabalhos foi possível se constatar a existência de erros nas formas de onda tanto das simulações como nos resultados práticos. O erro observado ocorre devido aos ângulos medidos não serem exatamente iguais aos ângulos reais, o que acaba por resultar em distorções na forma de picos nas formas de ondas obtidas, fato que não ocorre na realidade, sendo que tais distorções se apresentam como curvas.

A utilização de filtros passivos provou-se como um meio eficaz de combate aos harmônicos de corrente, especialmente quando comparado ao transformador isolador e ao filtro ativo, sendo tais soluções mais compactas e de menor custo para a implementação.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, L. E. José, Dissertação de Mestrado – **Utilização de Lâmpadas Fluorescentes Compactas (LFCs) Associadas a Outras Cargas Não Lineares – seus Impactos em um Sistema de Distribuição**. Itajubá 2004.

ARRILLAGA J. & WATSON N. R., **“Power Systems Harmonics”**, 2nd Edition, Wiley, 2003

BELCHIOR, F. N. **“Uma nova abordagem à filtragem de harmônicos através de dispositivos eletromagnéticos”**, *Tese de doutorado*, Universidade Federal de Uberlândia, 2006.

BRACEWELL, R. **“The Fourier Transform and its Applications”** 3<sup>rd</sup>. Ed., New York: McGraw-Hill, 2000

CHAPMAN, D, **“Qualidade de energia – Harmônicos” Schneider Electric Workshop**, 2005.

CREDER, H. **“Instalações Elétricas”**, 15<sup>o</sup> edição, Editora LTC, 2007

DUGAN, R. C.; MCGRANACHAN, M. F.; SANTOSO, S.; BEATY, H. W.. **“Electrical power systems quality”** – 2nd ed., *McGraw-Hill*, New York, 2003

EXPOSITO A. G.; MACIAS, J.A.R **“Fast harmonic computation for digital relaying”** Power Delivery, IEEE Transactions on, volume 14, 1999

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C.; UMANS, S. D. **“Máquinas elétricas – Com introdução a eletrônica de potência”** 6<sup>o</sup> edição, 2006

FUCHS, E. F.; MASOUM, M. A. S. **“Power quality in power systems and electrical machines”**, 1e, Elsevier, USA, March 2008

GRAINGER, J. J.; STEVENSON W. D. "**Power System Analysis**", Mc Graw-Hill Ed., 1994.

**Harmônicos em Instalações Elétricas**. Disponível em <>. Acesso em: 03 out. 2015, 22:15.

HOEVENAARS T., "**3º Harmonic Blocking Filter is the Cure Worse than the Disease?**"-IAEI News, 2002

HUANG, Z.; XU, W.; DINAHAHI, V.R. "**A practical harmonic resonance guideline for shunt capacitor application**" Power Delivery, IEEE Transactions on, volume 18, 2003

INMETRO - **Portaria nº 188 de 9 de novembro de 2004**. Disponível em: <>. Acesso em 14 de maio de 2016.

IRWIN, J. David. "**Análise de circuitos em engenharia**". 4a ed. São Paulo: Makron Books do Brasil, 2004.

ISONI, M., "**Distorções Harmônicas – Uma revisão de Conceitos Gerais**". Instituto Federal do Norte de Minas Gerais, 2010.

JAMALI, S.; MASOUM, M. A. S.; MOUSAVI S. A. "**Influence of Controller High Pass Filter on the Performance of Shunt Hybrid Power Filter**" Power Enginneering Conference, 2008

KOPKAK, I; FREITAS, M. A. A. DE; SILVA, W. G. **Correntes harmônicas causadas pelo motor de indução alimentado por inversor de frequência no contexto das recomendações da norma IEEE STANDARD 519-92**. Artigo, XIV Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica, Goiania, 2013.

KUMAR B., "**Design of Harmonic Filters for Renewable Energy Applications**", *Tese de mestrado*, Gotlan University Sweden, 2011.

KUMAR, S. R.; SURENDHAR, S.; NEGI, A; RAJA, P. **“ZigZag Transformer Performance Analysis on Harmonic Reduction in Distribution Load”**, Electrical, Control and Computer Engineering (INECCE), 2011 International Conference

LUOR, T. S. **“Influence of Load Characteristics on the Application of Passive and Active Harmonic Filter”**, Proceedings of 9<sup>o</sup> IEEE International Conference on Harmonics and Quality Power, 2000

MADZIKANDA, E.; NEGNEVITSKY, M. **“A practical look at harmonics in power transformer differential protection”** Power System Technology (POWERCON), 2012 IEEE International Conference on, 2012

MERRIKHI, J.; MOGHANI J.S.; FALLAH, E. **“Modelling Flux Skin Effect on the Harmonic Currents of TCR”**, Power Electronics Systems and Applications, 2006

MÖLDER, H; VINNAL, T.; BELDJAJEV, V. **“Harmonic losses in induction motors caused by voltage waveform distortion”** Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ), 2010

MORAIS, E. E. C. **“Estudo e projeto de filtros passivos para a atenuação de harmônicos em instalações elétricas industriais”** Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Ceará, 2011

OLIVEIRA, R. H.; KASSICK, E. V.; EICHELBERGER R., **“Filtragem Passiva da Terceira Harmônica de Corrente em Sistemas Comerciais e Residenciais Utilizando Filtro Shunt 3C1L”** INEP, 2007

PEI, L.; GUODONG, L.; Xu Yonghai; SHUJUN, Y., **“Method Comparison and Simulation of transformer Harmonic Losses”** Power and Energy Engineering Conference, 2010

PIRES, I. A. **“Caracterização de harmônicos causados por equipamentos eletroeletrônicos residenciais e comerciais no sistema de distribuição de energia”**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, 2006.

POMILIO, J. A. **Filtros passivos**, 1998. Disponível em <>. Acesso em 04 out. 2015, 18:37

ROBERTON, Stuart D. T.; HEBBAR, K.M. **“Torque Pulsation in Induction Motors with Inverter Drive”** Industry and General Application, IEEE Transactions, 1971

SALVADOR, J. P. L. **“Investigação de metodologia para caracterização de cargas elétricas residenciais”**. Projeto de Graduação. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012

SINGH, S; SINGH, B **“Single fase SEPIC Based PFC Converter for PMBLDCM Drive in Air-Conditioning System”**. Artigo. Research Gate, 2010.

TEIXEIRA, D. A. **“Análise das distorções harmônicas – estudo de caso de um sistema industrial”** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2009

WANG, R. **“Harmonic Impact of Modern Residential Loads on Distribution Power System and Mitigation Solution”**. Dissertação Mestrado. Department of Electrical & Computer Engineering. University of Alberta. Edmond, Alberta, 2011

WATANABE, E. H.; AREDES, M. **“Teoria de Potência Ativa e Reativa Instantânea e Aplicações – Filtros Ativos e FACTS”** XII Congresso Brasileiro Automática, Uberlândia-MG, 14-18 de setembro de 1998

WESSLER, Fernando; BOUDEC, Rafael. **Minicurso: Orcad PSPICE**. Joinville, UDESC: PET Engenharia Elétrica, 2007. 62 pág. Apostila.

