



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
E DE COMPUTAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso

ANÁLISE HARMÔNICA EM REDES DE
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Autor
Ricardo Silva Carvalho

Orientador
Prof. Dr. José Carlos de Melo Vieira Júnior

São Carlos, 2013

RICARDO SILVA CARVALHO

ANÁLISE HARMÔNICA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola de Engenharia de São Carlos, da
Universidade de São Paulo

Curso de Engenharia Elétrica com Ênfase em
Sistemas de Energia e Automação

ORIENTADOR: Prof. Dr. José Carlos de Melo Vieira Júnior

São Carlos
2013

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTA TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

C331a Carvalho, Ricardo Silva
Análise harmônica em redes de distribuição de
energia elétrica / Ricardo Silva Carvalho; orientador
José Carlos de Mello Vieira Júnior. São Carlos, 2013.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com
ênfase em Sistemas de Energia e Automação) -- Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,
2013.

1. Qualidade da energia elétrica. 2. Distorções
harmônicas. 3. Sistemas de distribuição de energia
elétrica. 4. Fluxo de carga harmônico. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Ricardo Silva Carvalho

Título: "Análise harmônica em redes de distribuição de energia elétrica"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 18 / 11 / 2013,

com NOTA 6,5 (seis, cinco), pela Comissão Julgadora:

Prof. Dr. José Carlos de Melo Vieira Júnior - (Orientador - SEL/EESC/USP)

Prof. Dr. Ricardo Augusto Souza Fernandes - (UFSCar)

Mestre Jäder Fernando Dias Breda - (Doutorando - SEL/EESC/USP)

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Prof. Associado Homero Schiabel

Dedicatória

Dedico este trabalho a meus pais Jorge (*in memoriam*) e Júlia, por me ensinarem tudo o que sei através do bom exemplo; e ao meu irmão João Henrique, por me abrir as portas para o mundo universitário.

Agradecimentos

Agradeço a Deus pela minha vida e por tudo o que vivi.

À Universidade de São Paulo pelo amadurecimento, responsabilidade e preparo que obtive durante o curso de graduação.

Ao professor José Carlos de Mello Vieira Júnior por ter sido um excelente orientador, professor e amigo, paciente e comprometido com a sua função de educador.

Aos meus pais por terem me dado todo o suporte necessário para concluir meus estudos, e pelo incentivo e confiança presentes desde o início das minhas escolhas.

À minha amiga e irmã Liciane C. Pataca pelo constante incentivo, pelos anos de vida que ganhei graças às infinitas risadas nos momentos de alegria e pragueja nos momentos de desespero, pela ajuda nos estudos e pelo companheirismo sempre presente.

Ao amigo Adriano G. Bruschi, vulgo Marginal, pela amizade, incentivo e pelo exemplo de esperança.

Ao amigo João Felipe C. Moraes, merecedor de uma parte de meu diploma, pelo inestimável auxílio prestado durante os primeiros anos de graduação e pela sincera amizade, sempre com muita paciência e bondade.

Ao amigo Bruno B. Zuim pelas tantas caronas e risadas que demos desde o início do nosso curso.

Aos amigos Míriam A. Carrascoza e Sandro M. Portaluri, Evandro Navarro e Luciano N. Mesquita, por serem grandes companheiros e incentivadores dos meus estudos de engenharia, sempre dando força para continuar meu caminho de cabeça erguida.

A todos os amigos e familiares que acreditaram em mim.

Resumo

CARVALHO, R. S. **Análise Harmônica em Redes de Distribuição de Energia Elétrica**. Trabalho de Conclusão de Curso –Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013, 129 p.

Este trabalho apresenta um estudo relativo à Qualidade da Energia Elétrica, especificamente de distúrbios relacionados às Distorções Harmônicas em sistemas de distribuição de energia elétrica. Os conceitos envolvidos foram inicialmente expostos e contextualizados, bem como as diferentes normas nacionais e internacionais relativas à permissividade de ocorrência dos distúrbios. Posteriormente foi simulado um sistema de distribuição de energia utilizando perfis harmônicos reais, de diferentes faixas de consumo, com a finalidade de analisar os impactos das cargas harmônicas em sistemas de distribuição, utilizando as ferramentas de 'Fluxo de Carga' e 'Fluxo de Carga Harmônico' do programa DIgSILENT PowerFactory®, e os resultados foram comparados com os limites impostos pelo PRODIST referentes às distorções harmônicas. Além disso, foi feito um estudo sobre a influência do carregamento do transformador sobre o índice de distorção harmônica das barras da rede secundária de distribuição. Concluiu-se que as cargas residenciais típicas podem ocasionar inadequações às normas referentes aos limites de distorções harmônicas nos sistemas de distribuição, nos momentos críticos de consumo de correntes harmônicas. Além disso, concluiu-se que o carregamento do transformador aumenta o índice de distorção harmônica total nas barras da rede secundária.

Palavras-Chave: Qualidade da Energia Elétrica, Distorções Harmônicas, Sistemas de Distribuição de Energia, Fluxo de Carga Harmônico

Abstract

CARVALHO, R. S. **Harmonic Analysis in Power Distribution Networks**. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013, 129 p.

This work presents a study on Power Quality, specifically disorders related to Harmonic Distortions in Power Distribution Systems. The concepts involved were initially exposed and contextualized, as well as the different national and international standards related to the permissiveness of occurrence of disturbances. Afterwards, a power distribution system was simulated, using real harmonic spectra of different power consumption ranges in order to analyze the impacts of harmonic loads in distribution systems, by using “Load Flow” and “Harmonic Load Flow” tools from DigSILENT PowerFactory ®. The results were compared with the limits imposed by PRODIST regarding harmonic distortion, and then it was performed a study on the influence of the transformer’s loading on the harmonic distortion rate of the secondary network distribution’s bars. It was concluded that the typical residential loads can be responsible for exceeding today’s allowable harmonic distortion limits in distribution systems during the critical moments of harmonic currents’ consumption. Moreover, it was observed that the loading of the transformer increases the rate of total harmonic distortion of the secondary bars.

Keywords: Power Quality, Harmonic Distortions, Power Distribution Systems, Harmonic Load Flow.

Lista de Figuras

Figura 1 - Forma de onda de lâmpada incandescente com dimmer, a 75% de luminosidade [15]	22
Figura 2 - Forma de onda de lâmpada incandescente com dimmer, a 25% de luminosidade [15]	22
Figura 3 - Forma de onda de corrente de lâmpada fluorescente com reator eletromagnético [15]	24
Figura 4 - Forma de onda de corrente de lâmpada fluorescente com reator eletrônico [15]	25
Figura 5 - Forma de onda de corrente de lâmpada fluorescente compacta [15]	26
Figura 6 - Forma de onda de corrente de lâmpada a vapor de mercúrio [15]	27
Figura 7 - Forma de onda de corrente de lâmpada a vapor de sódio [15]	28
Figura 8 - Forma de onda de corrente de um televisor [15]	30
Figura 9 - Forma de onda de corrente de uma geladeira [15]	31
Figura 10 - Forma de onda de corrente de aparelho condicionador de ar na função "resfriar" [15]	32
Figura 11 - Forma de onda de corrente de aparelho condicionador de ar na função "ventilar" [15]	33
Figura 12 - Forma de onda de corrente de lavadora de roupas [15]	35
Figura 13 - Esquema de ligações de um transformador na configuração "Delta-Estrela"	49
Figura 14 - Esquema de ligações de um transformador na configuração "Zigue-Zague"	50
Figura 15 - Rede de distribuição utilizada nas simulações.	57
Figura 16 - Botões de acesso rápido do programa DIgSILENT PowerFactory®	62
Figura 17 - Janela do programa DIgSILENT PowerFactory® para inserção dos parâmetros dos cabos.	64
Figura 18 - Janelas do programa DIgSILENT PowerFactory® para a inserção dos perfis harmônicos.	64
Figura 19 - Janela do programa DIgSILENT PowerFactory® para a inserção dos dados de potência de uma carga.	65
Figura 20 - Opções da ferramenta "Load Flow" do programa DIgSILENT PowerFactory® ..	65
Figura 21 - Opções da ferramenta "Harmonic Load Flow", do programa DIgSILENT PowerFactory®	66
Figura 22 - Gráficos de tensões eficazes - Estudo 1	69

Figura 23 - Gráficos de DHT de tensão e corrente - Estudo 1	70
Figura 24 - Gráficos de distorção harmônica individual de tensão nas barras – Estudo 1 ...	73
Figura 25 - Gráficos de tensões eficazes nas barras – Estudo 2.....	74
Figura 26 - Gráficos de DHT de tensão de corrente - Estudo 2.....	75
Figura 27 - Gráficos de distorções harmônicas individuais de tensão - Estudo 2	78
Figura 28 - Tensões eficazes nas barras - Estudo 3	79
Figura 29 - Gráficos de DHT de tensão e corrente - Estudo 3.....	80
Figura 30 - Gráfico de distorções individuais de tensão - Estudo 3	81
Figura 31 - Gráficos de tensões RMS nas barras - Estudo 4.....	83
Figura 32 - Gráficos de DHT de tensão e corrente - Estudo 4.....	84
Figura 33 - Gráficos de Distorção Harmônica Individual de Tensão nas barras – Estudo 4.	87
Figura 34 - Gráficos de DHT de tensão - Estudo 5.....	90

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Conteúdo dos módulos do PRODIST [5].	8
Tabela 2 - Parâmetros relativos aos harmônicos considerados pelo PRODIST [6].	9
Tabela 3 - Limites para distorções harmônicas individuais de tensão – PRODIST [6].	10
Tabela 4 - Limites para distorção harmônica total de tensão – PRODIST [6].	10
Tabela 5 - Limites para distorções harmônicas individuais e total para $V < 69\text{kV}$ – ONS [8].	11
Tabela 6 - Limites para distorções harmônicas individuais e total para $V \geq 69\text{kV}$ – ONS [8].	12
Tabela 7 - Limites para Distorções individuais de corrente, acima de 120V e menores que 69kV – IEEE [10].	13
Tabela 8 - Limites para distorções individuais de corrente, de 69kV até 121kV – IEEE [10].	13
Tabela 9 - Limites para distorções individuais de corrente, acima de 121kV – IEEE [10].	13
Tabela 10 - Limites para distorções harmônicas individuais e total de tensão – IEEE [10].	14
Tabela 11 - Limites de correntes harmônicas de ordens ímpares em equipamentos da classe A – IEC [12].	15
Tabela 12 - Limites de correntes harmônicas de ordens pares em equipamentos da classe A – IEC [12].	15
Tabela 13 - Limites de correntes harmônicas em equipamentos da classe C – IEC [12].	16
Tabela 14 - Limites de correntes harmônicas em equipamentos da classe D – IEC [12].	16
Tabela 15 - Distorção harmônica total de corrente de lâmpadas incandescentes [15].	21
Tabela 16 - Distorção harmônica total de corrente para lâmpadas incandescentes dimerizadas[15].	23
Tabela 17 - Valores de distorção harmônica total de corrente de lâmpadas fluorescentes com reatores eletromagnéticos [15].	24
Tabela 18 - Valores de distorção harmônica total de corrente de lâmpadas fluorescentes com reatores eletrônicos [15].	25
Tabela 19 - Valores de distorção harmônica total de corrente de lâmpadas fluorescentes compactas [15].	26

Tabela 20 - Valores de distorção harmônica total de corrente de lâmpadas a vapor de mercúrio e a vapor de sódio [15].	27
Tabela 21 - Valores de distorção harmônica total de corrente de aparelhos eletrônicos típicos do cenário residencial e comercial [15].	29
Tabela 22 - Valores de distorção harmônica total de corrente para equipamentos refrigeradores [15].	30
Tabela 23 - Valores de distorção harmônica total de corrente para equipamentos condicionadores de ar [15].	32
Tabela 24 - Valores de distorção harmônica total de corrente para equipamentos que contêm motores [15].	34
Tabela 25 - Consumo médio mensal de energia para os consumidores analisados em [15].	52
Tabela 26 - Perfil harmônico de residência de baixo consumo [15].	53
Tabela 27 - Perfil harmônico de residência de médio consumo 1 [15].	53
Tabela 28 - Perfil harmônico de residência de médio consumo 2 [15].	54
Tabela 29 - Perfil harmônico de residência de alto consumo [15].	55
Tabela 30 - Localização e potência ativa consumida por cada carga.	55
Tabela 31 - Distribuição dos perfis harmônicos no estudo 2.	61
Tabela 32 - Distribuição dos perfis harmônicos no estudo 4.	62
Tabela 33 - Detalhamento dos casos referentes ao estudo 5.	62
Tabela 34 - Fluxo de carga - Estudo 1.	68
Tabela 35 - Fluxo de carga harmônico - Estudo 1.	68
Tabela 36 - Distorção harmônica total de tensão - Estudo 1.	69
Tabela 37 - Distorção harmônica total de corrente - Estudo 1.	70
Tabela 38 - Distorções individuais de tensão na fase A - Estudo 1.	71
Tabela 39 - Distorções individuais de tensão na fase B - Estudo 1.	71
Tabela 40 - Distorções individuais de tensão na fase C - Estudo 1.	72
Tabela 41 - Fluxo de carga - Estudo 2.	74
Tabela 42 - Fluxo de carga harmônico - Estudo 2.	74
Tabela 43 - Distorção harmônica total de tensão - Estudo 2.	75
Tabela 44 - Distorção harmônica total de corrente - Estudo 2.	75
Tabela 45 - Distorções individuais de tensão na fase A - Estudo 2.	76
Tabela 46 - Distorções individuais de tensão na fase B - Estudo 2.	77
Tabela 47 - Distorções individuais de tensão na fase C - Estudo 2.	77
Tabela 48 - Fluxo de carga - Estudo 3.	79
Tabela 49 - Fluxo de carga harmônico - Estudo 3.	79
Tabela 50 - Distorção harmônica total de tensão - Estudo 3.	79
Tabela 51 - Distorção harmônica total de corrente - Estudo 3.	80
Tabela 52 - Distorções individuais de tensão - Estudo 3.	81
Tabela 53 - Fluxo de carga - Estudo 4.	82
Tabela 54 - Fluxo de carga harmônico - Estudo 4.	82
Tabela 55 - Distorção harmônica total de tensão - Estudo 4.	83
Tabela 56 - Distorção harmônica total de corrente - Estudo 4.	84
Tabela 57 - Distorções individuais de tensão na fase A - Estudo 4.	85

Tabela 58 - Distorções individuais de tensão na fase B - Estudo 4.	85
Tabela 59 - Distorções individuais de tensão na fase C - Estudo 4.	86
Tabela 60 - Distorção harmônica total de tensão - Estudo 5, Caso 1.	87
Tabela 61 - Distorção harmônica total de tensão - Estudo 5, Caso 2.	88
Tabela 62 - Distorção harmônica total de tensão - Estudo 5, Caso 3.	88
Tabela 63 - Distorção harmônica total de tensão - Estudo 5, Caso 4.	89
Tabela 64 - Cabeamento da rede secundária.	99
Tabela 65 - Dados de resistência e reatância dos cabos.	100
Tabela 66 - Características da residência de alto consumo.	100
Tabela 67 - Características da residência de médio consumo 1.	100
Tabela 68 - Características da residência de médio consumo 2.	100
Tabela 69 - Características da residência de baixo consumo.	101

Lista de Abreviaturas e Siglas

AIEE	<i>American Institute os Electrical Engineers</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
Al	Alumínio
BTU	<i>British Thermal Unit</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
Cu	Cobre
DHT	Distorção Harmônica Total
DlgSILENT	<i>Digital SimuLation and Electrical NeTwork calculation program</i>
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
DIT _h	Distorção Harmônica Individual de Tensão de ordem h
DTT	Distorção Harmônica Total de Tensão
fp	Fator de potência
HD	<i>Harmonic Distortion</i>
IEC	<i>Internacional Electrotechnical Comission</i>
IEE	<i>Institution of Electrical Engineers</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
IRE	<i>Institute of Radio Engineers</i>
LED	<i>Light-Emitting Diode</i>
LFC	Lâmpada Fluorescente Compacta
ONS	Operador Nacional do Sistema
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
PRODIST	Procedimentos de Distribuição
RMS	<i>Root Mean Square</i>
SIN	Sistema Interligado Nacional
TC	Transformador de corrente
THD _i	<i>Total Harmonic Distortion of Current</i>
XLPE	<i>Cross-Linked Polyethylene</i>

Lista de Símbolos

V_h	Tensão harmônica de ordem h
H, n	Ordem harmônica
$H_{\text{máx}}$	Ordem harmônica máxima
H_{min}	Ordem harmônica mínima
V_1	Tensão na frequência fundamental
V_N	Tensão nominal entre linhas
I_{CC}	Corrente de curto-circuito
I_{carga}	Componente fundamental da corrente de carga
f_1	Frequência fundamental expressa em Hz
f_i	Frequência na ordem i expressa em Hz
P_{tot}	Potência ativa total
$P(f_i)$	Potência ativa consumida na frequência i
I_h	Magnitude da corrente na ordem harmônica h
φ_h	Ângulo de fase da corrente na ordem harmônica h
$\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C$	Ângulo de fase da corrente das fases A, B e C respectivamente
$\theta_{VA}, \theta_{VB}, \theta_{VC}$	Ângulo de fase da tensão das fases A, B e C respectivamente

Sumário

Resumo	v
Abstract	vii
Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xi
Lista de Abreviaturas e Siglas	xv
Lista de Símbolos	xvii
Sumário	xix
Capítulo 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1. Contexto Geral	1
1.1.1. Cargas lineares e não-lineares	2
1.1.2. O conceito de “harmônico”	3
1.2. Proposta do Trabalho	4
1.3. Estrutura da Monografia	4
Capítulo 2 – NORMAS, ÍNDICES E LIMITES RELACIONADOS ÀS DISTORÇÕES HARMÔNICAS	7
2.1. O PRODIST	7
2.2. O ONS	11
2.3. O IEEE	11
2.4. O IEC	14
2.5. Comparações	16
Capítulo 3 – AS CARGAS GERADORAS DE HARMÔNICOS	19
3.1. Os cenários residencial e comercial	20
3.1.1. Lâmpadas Incandescentes	20
3.1.2. Lâmpadas Fluorescentes	23

3.1.3.	Lâmpadas Fluorescentes Compactas.....	26
3.1.4.	Lâmpadas a Vapor de Mercúrio e de Vapor de Sódio.....	27
3.1.5.	Cargas Eletrônicas	28
3.1.6.	Refrigeradores.....	30
3.1.7.	Condicionadores de ar.....	31
3.1.8.	Motores	33
3.2.	Considerações Finais sobre o Capítulo	35
Capítulo 4 – IMPACTOS DE ELEVADOS NÍVEIS DE DISTORÇÃO HARMÔNICA NOS SISTEMAS ELÉTRICOS		37
4.1.	Sobreaquecimento dos condutores neutros.....	38
4.2.	Os efeitos em transformadores.....	39
4.3.	Sobrecarga de capacitores para compensação de potência reativa	40
4.4.	Efeitos em dispositivos de proteção.....	41
4.5.	Os efeitos em cabos de alimentação	41
4.6.	Os efeitos em motores de indução	42
4.7.	Os efeitos em equipamentos eletrônicos	43
4.8.	Considerações Finais sobre o Capítulo	44
Capítulo 5 – MEDIDAS MITIGADORAS DE ELEVADOS ÍNDICES DE DISTORÇÃO HARMÔNICA		45
5.1.	Filtros Passivos	46
5.2.	Filtros Ativos	47
5.3.	Filtros Híbridos	48
5.4.	Transformadores de Isolamento	48
5.5.	Considerações Finais sobre o Capítulo	50
Capítulo 6 – ANÁLISE HARMÔNICA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....		51
6.1.	As cargas residenciais.....	51
6.2.	O sistema de distribuição.....	52
6.3.	O Fluxo de Carga	55
6.4.	O Fluxo de Carga Harmônico	56

6.5. Análise dos Resultados	60
6.6. A simulação computacional	62
6.6.1. Parâmetros dos cabos	63
6.6.2. Os parâmetros das cargas	63
6.6.3. Fluxo de Carga	65
6.6.4. Fluxo de Carga Harmônico	66
Capítulo 7 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	67
7.1. Estudo 1	67
7.1.1. Tensões nas barras	67
7.1.2. Distorções Harmônicas Totais de Tensão e Corrente	69
7.1.3. Distorções Individuais de Tensão	70
7.2. Estudo 2	73
7.2.1. Tensões nas barras	73
7.2.2. Distorções Harmônicas Totais de Tensão e Corrente	75
7.2.3. Distorções Individuais de Tensão	76
7.3. Estudo 3	78
7.3.1. Tensões nas barras	78
7.3.2. Distorções Harmônicas Totais de Tensão e Corrente	79
7.3.3. Distorções Individuais de Tensão	80
7.4. Estudo 4	82
7.4.1. Tensões nas barras	82
7.4.2. Distorções Harmônicas Totais de Tensão e Corrente	83
7.4.3. Distorções Individuais de Tensão	84
7.5. Estudo 5	86
Capítulo 8 - CONCLUSÕES	91
REFERÊNCIAS	93

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1. Contexto Geral

A tecnologia vem se desenvolvendo em larga escala no decorrer dos anos. A base da implementação de novos sistemas é a facilitação da execução de tarefas pelo homem, bem como a possibilidade de ampliação e criação de novos mercados com a utilização de máquinas, automóveis, indústrias, usinas, entre outros.

No ramo de energia, tornou-se necessário o investimento maciço em melhorias no setor elétrico, uma vez que a população como um todo conquistou o acesso a aparelhos movidos a energia elétrica. Cidades diversas passaram a receber energia gerada em pontos distantes através de linhas de transmissão, e a instalação de indústrias e empresas tornou-se mais viável.

Em meio ao processo de crescimento do setor elétrico, a engenharia tenta balancear diversas soluções criativas para a resolução de problemas com o fator econômico, pois os projetos financiados pelo setor privado visam sempre ao maior lucro possível.

O surgimento da eletrônica revolucionou os conceitos relativos à eletricidade, pois os equipamentos de medidas eletrônicos passaram a reduzir os erros a eles associados a uma fração mínima quando comparados a equipamentos eletromecânicos. Os microcomputadores passaram a apresentar processamento mais rápido, novas interfaces foram criadas, o conceito de comunicação à distância tornou-se popular, e a eletrônica permitiu reduzir substancialmente o volume físico de aparelhos elétricos, além de aumentar a eficiência dos mesmos.

Porém o desenvolvimento desses equipamentos com tecnologias extremamente econômicas trouxe problemas para o sistema elétrico, pois se baseiam em elementos não lineares em sua construção. Cargas não lineares solicitam correntes distorcidas da fonte na

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.

Durante muito tempo não existiu a preocupação com distorções harmônicas causadas por consumidores convencionais (residenciais e comerciais) no ponto de acoplamento comum, muito menos com o monitoramento da rede de distribuição de energia elétrica nesse quesito. Contudo, com a sensibilidade dos circuitos eletrônicos atuais, os distúrbios associados à má qualidade da energia elétrica causam graves influências no funcionamento dos mesmos, ocasionando uma severa diminuição da vida útil dos aparelhos eletrônicos, podendo até danificá-los irreversivelmente. Além disso, tomando os consumidores convencionais como potenciais fontes harmônicas, tem-se um ambiente em que tais fontes estão dispersas no sistema de distribuição de energia elétrica, criando-se uma dificuldade no monitoramento e identificação das mesmas.

Ademais, após o início do século XXI houve um drástico crescimento de não-linearidades nas cargas residenciais, alterando seus perfis típicos. Como consequência tem-se a necessidade de novos estudos, aprimoramentos e alterações em projetos de instalações elétricas no sistema elétrico [1].

Para que as interferências geradas pelas cargas não lineares não sejam prejudiciais aos consumidores e equipamentos elétricos conectados no sistema, foram criados limites para as distorções harmônicas de tensão e corrente, de acordo com a classe de tensão. Além disso, foram impostos limites de componentes harmônicos, considerando-se o percentual de cada ordem com relação à componente fundamental. Dessa forma pode-se diminuir os danos causados pelas correntes harmônicas no sistema elétrico, melhorando a qualidade da energia elétrica.

A tendência para um futuro próximo é o aumento de cargas geradoras de componentes harmônicas no sistema, e consequente empobrecimento da qualidade da energia elétrica. No Brasil, cabe à Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) a fiscalização e imposição de limites e normas cada vez mais exigentes para que os consumidores, em todas as classes de tensão, não sejam prejudicados.

1.1.1. Cargas lineares e não-lineares

A linearidade de uma carga elétrica consiste na proporcionalidade entre a tensão em seus terminais e a corrente por ela absorvida. Em sistemas elétricos de potência, que utilizam corrente alternada, as cargas lineares são alimentadas por tensão senoidal na frequência fundamental e absorvem corrente senoidal na mesma frequência [2].

São exemplos de cargas lineares cargas resistivas como lâmpadas incandescentes, bem como outros aparelhos que possuam natureza reativa capacitiva ou indutiva, contanto que as formas de onda de tensão e corrente do aparelho sejam senóides puras, tolerando-se defasagem de ângulo de fase.

Quando a carga solicita do sistema uma corrente não senoidal, mesmo sendo alimentada por tensão senoidal, esta é considerada carga não-linear. Esta característica pode ser encontrada em aparelhos que possuem chaveamento de corrente, como retificadores controlados e não controlados, conversores CA-CA, inversores de frequência, eletroímãs, fontes chaveadas, controladores de tensão, dispositivo para partidas suaves de motores (*soft-starters*), conversores de corrente contínua, máquinas de solda, lâmpadas fluorescentes, entre outras.

No âmbito da qualidade da energia elétrica, deve-se garantir que as diferentes cargas conectadas a um determinado nó da rede elétrica não interfiram entre si o suficiente para prejudicar o funcionamento das mesmas. Este nó em que as cargas são conectadas é denominado ponto de acoplamento comum (PAC).

A interação entre a corrente drenada por cargas não lineares e a impedância do alimentador que fornece tensão no ponto de acoplamento resulta em uma distorção da forma de onda da tensão neste ponto. Dessa forma, se o ponto de acoplamento for comum a outras cargas, a tensão de alimentação no PAC não será puramente senoidal, o que pode prejudicar o funcionamento das cargas conectadas, como será visto no capítulo 4.

1.1.2. O conceito de “harmônico”

Denomina-se harmônico toda forma de onda senoidal cuja frequência é múltipla inteira da forma de onda de frequência fundamental.

O termo “harmônico” é proveniente da física, particularmente do estudo da ondulatória. Quando uma partícula ou uma onda se propaga em uma oscilação periódica ao redor de um ponto de equilíbrio, este movimento pode ser descrito por uma combinação de senóides e cossenóides, e é denominado “movimento harmônico” [2].

Segundo Fourier [3], todo sinal periódico pode ser decomposto em um somatório infinito de senóides e cossenóides, e seus termos e coeficientes são dados pela equação 1.

$$f(t) = \frac{1}{2}A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_1 t + b_n \sin n\omega_1 t) \quad (1)$$

Nota-se que o termo A_0 representa o “nível CC” do sinal, quando existente. A frequência ω_1 é a frequência fundamental do sinal.

Nos sistemas elétricos de potência, a frequência fundamental pode ser de 50 Hz ou 60 Hz. Como no Brasil a frequência adotada é de 60 Hz, esta foi tomada como fundamental neste trabalho.

Dessa forma, o primeiro harmônico de uma senóide de 60 Hz é uma senóide na própria frequência fundamental; o segundo harmônico possui frequência de 120 Hz, o terceiro na frequência de 180 Hz, e assim por diante.

1.2. Proposta do Trabalho

Os objetivos específicos deste trabalho de conclusão de curso são:

- O conhecimento de diferentes instituições normativas, bem como o levantamento das diferentes abordagens adotadas por essas instituições nacionais e internacionais no que diz respeito aos procedimentos e aos limites toleráveis de distorções harmônicas de tensão e/ou corrente.
- O estudo dos danos causados pela presença de harmônicos nos sistemas elétricos, bem como medidas mitigadoras. Para isso foi realizado um levantamento bibliográfico, proporcionando um contato com publicações acadêmicas.
- A análise de um sistema de distribuição, com cargas residenciais portadoras de diferentes perfis harmônicos reais, através de simulação computacional e utilização da ferramenta “*Harmonic Load Flow*”, do programa PowerFactory DlgSILENT ®. O intuito da análise foi verificar a influência das cargas residenciais nos pontos de acoplamento comum do ramo secundário do alimentador de um sistema de distribuição radial, comparando os valores de distorção harmônica total e individual com os limites estabelecidos pelo PRODIST (Procedimentos de Distribuição), que é um conjunto de documentos elaborados pela ANEEL para normatizar e padronizar as atividades técnicas relacionadas ao desempenho e ao funcionamento dos sistemas de distribuição de energia elétrica [5].
- A análise da influência do carregamento do transformador no índice de distorção harmônica total de tensão das barras da rede secundária de um sistema de distribuição de energia elétrica.

1.3. Estrutura da Monografia

O texto foi organizado de maneira a apresentar inicialmente os principais conceitos relacionados ao assunto tratado.

Procurou-se inserir o leitor ao contexto atual, no que diz respeito ao conhecimento gradual dos distúrbios harmônicos, levando ao ponto da análise harmônica de um sistema utilizando simulação computacional.

Na sequência segue a descrição dos capítulos que compõem o texto:

- **Capítulo 2:** Neste capítulo foram apresentadas instituições nacionais e internacionais que publicam orientações técnicas na área de eletricidade. Foram apresentados também índices para a mensuração, bem como os limites toleráveis para distorções harmônicas.
- **Capítulo 3:** Foram apresentadas as cargas mais comuns que geram correntes não senoidais nos cenários residencial e comercial.
- **Capítulo 4:** Os danos causados pelas correntes harmônicas ou pelo fornecimento de tensão não senoidal na alimentação de cargas foram apresentados neste capítulo.
- **Capítulo 5:** Foram mostradas técnicas de mitigação de harmônicos em sistemas elétricos.
- **Capítulo 6:** Contém a análise harmônica de um sistema teste de distribuição, através da simulação computacional de cargas residenciais com perfis harmônicos reais. A simulação computacional foi realizada através da modelagem do sistema e posterior utilização das ferramentas “*Load Flow*” e “*Harmonic Load Flow*”, do programa PowerFactory DlgSILENT®.
- **Capítulo 7:** Foram apresentados os resultados e discussões acerca das simulações computacionais.
- **Capítulo 8:** Conclusões do trabalho.

Capítulo 2

NORMAS, ÍNDICES E LIMITES RELACIONADOS ÀS DISTORÇÕES HARMÔNICAS

No contexto de Qualidade da Energia Elétrica surgiu a necessidade de mensurar a distorção das ondas de tensão e/ou corrente de um determinado ponto ou carga.

Dessa forma pode-se estabelecer limites para que equipamentos que se enquadrem no grupo de geradores de harmônicos não prejudiquem demasiadamente outras cargas conectadas ao mesmo ponto de acoplamento.

Como a influência dos componentes harmônicos é um objeto de estudo na atualidade, há divergência no que diz respeito aos limites toleráveis de distorção harmônica entre diferentes normas. Diferentes órgãos estabelecem diferentes análises e limites toleráveis, e neste capítulo serão mostrados alguns deles.

2.1. O PRODIST

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) é uma autarquia em regime especial vinculada ao ministério das Minas e Energia. Foi criada em 1997, com a finalidade de regular o setor elétrico brasileiro, por meio da Lei nº 9.427/1996 e do decreto nº 2.335/1997 [4].

As atribuições da ANEEL são regular a geração, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica, fiscalizar as concessões, permissões e os serviços de energia elétrica, implementar as políticas e diretrizes do governo federal relativas à exploração da energia elétrica e ao aproveitamento dos potenciais hidráulicos, estabelecer tarifas, promover as atividades relativas às outorgas de concessão, permissão e autorização

de empreendimentos e serviços de energia elétrica e mediar, na esfera administrativa, os conflitos entre os agentes e os consumidores de energia elétrica [4].

O PRODIST (Procedimentos de Distribuição) é um conjunto de documentos elaborados pela ANEEL para normatizar e padronizar as atividades técnicas relacionadas ao desempenho e ao funcionamento dos sistemas de distribuição de energia elétrica. É composto por nove módulos, apresentados na tabela 1 [5].

Módulo	Assunto tratado
1	Introdução
2	Planejamento da Expansão do Sistema de Distribuição
3	Acesso ao Sistema de Distribuição
4	Procedimentos Operativos do Sistema de Distribuição
5	Sistemas de Medição
6	Informações Requeridas e Obrigações
7	Cálculo de Perdas na Distribuição
8	Qualidade da Energia Elétrica
9	Ressarcimento de Danos Elétricos

Tabela 1 - Conteúdo dos módulos do PRODIST [5].

Neste trabalho foi analisado apenas o módulo 8 do PRODIST [6], que trata da área de Qualidade da Energia Elétrica, definindo termos e limites toleráveis relativos à qualidade do produto e do serviço prestado pelas empresas concessionárias de energia elétrica.

Em relação à qualidade do produto, o módulo propõe mecanismos para possibilitar a fixação de padrões nacionais de indicadores de qualidade de energia elétrica, no que diz respeito à conformidade da forma de onda de tensão em regime permanente oferecida ao consumidor. São definidos distúrbios, parâmetros e valores de referência, bem como a terminologia adequada referente à área.

O módulo estabelece, tratando-se da qualidade do serviço, a metodologia para a apuração dos indicadores de continuidade e dos tempos de atendimento a ocorrências emergenciais.

Neste trabalho, porém, foram considerados apenas os padrões e indicadores referentes às distorções harmônicas nos sistemas elétricos.

Segundo o PRODIST [6], as distorções harmônicas de tensão devem ser mensuradas segundo os parâmetros apresentados na tabela 2.

Identificação da Grandeza	Símbolo
Distorção Harmônica Individual de Tensão de ordem h	$DIT_h\%$
Distorção Harmônica Total de Tensão	$DTT\%$
Tensão Harmônica de ordem h	V_h
Ordem Harmônica	H
Ordem Harmônica Máxima	$H_{máx}$
Ordem Harmônica Mínima	H_{min}
Tensão Fundamental Medida	V_1

Tabela 2 - Parâmetros relativos aos harmônicos considerados pelo PRODIST [6].

A Distorção Harmônica Individual de Tensão de ordem h é a razão percentual entre a amplitude de um determinado componente harmônico de tensão e a amplitude da componente fundamental.

$$DIT_h(\%) = \frac{V_h}{V_1} \times 100 \quad (2)$$

O PRODIST estabelece limites para as distorções harmônicas individuais de tensão, de acordo com o nível de tensão do barramento analisado. Os valores limítrofes aceitáveis podem ser encontrados na tabela 3.

A Distorção Harmônica Total de Tensão (DHT de tensão, ou DTT) é a razão entre a raiz quadrada do somatório dos quadrados das amplitudes dos componentes harmônicos e a amplitude do componente fundamental da forma de onda de tensão, conforme apresentado na equação 3.

$$DTT(\%) = \frac{1}{V_1} \times \sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} V_h^2} \times 100 \quad (3)$$

Para o índice supracitado ser considerado válido para efeito regulatório, deve-se considerar um espectro de frequências que abrange até, no mínimo, a vigésima quinta ordem harmônica.

De acordo com o item 4.4.3 do módulo 8 do PRODIST, as medições das distorções harmônicas em sistemas trifásicos conectados em estrela aterrada devem ser realizadas entre fase e neutro, e para as demais conexões deve-se medir as distorções entre fases.

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

Tabela 3 - Limites para distorções harmônicas individuais de tensão – PRODIST [6].

Na tabela 4 encontram-se os valores limites para a distorção harmônica total de tensão, de acordo com a tensão nominal do barramento analisado.

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

Tabela 4 - Limites para distorção harmônica total de tensão – PRODIST [6].

2.2. O ONS

O Operador Nacional do Sistema (ONS) é uma pessoa jurídica de direito privado, sob a forma de associação civil, sem fins lucrativos, criado em 1998 pela Lei nº 9.648/98, com as alterações introduzidas pela Lei nº 10.848/04 e regulamentado pelo Decreto nº 5.081/04 [7].

É o órgão responsável pela coordenação e controle da operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN), sob a fiscalização e regulação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

O ONS desenvolve uma série de estudos e ações a serem exercidos sobre o sistema e seus agentes para manejar o estoque de energia de forma a garantir a segurança do suprimento contínuo em todo o país. Através dos Procedimentos de Rede [8], que são documentos normativos, define os procedimentos e requisitos necessários para que a operação do sistema ocorra de forma continuada e segura.

Na tabela 5 encontram-se os valores limites estabelecidos pelo ONS para distorções individuais de tensão, na classe de tensão inferior a 69 kV. O limite de distorção total de tensão para esta classe é de 6%.

V < 69 kV			
Ímpares		Pares	
Ordem	Valor por harmônico [%]	Ordem	Valor por harmônico [%]
3, 5, 7	5	2, 4, 6	2
9, 11, 13	3		
15, 17, 19, 21, 23, 25	2		
≥ 27	1	≥ 8	1
DTT = 6% (máximo)			

Tabela 5 - Limites para distorções harmônicas individuais e total para V<69kV – ONS [8].

Na tabela 6 encontram-se os limites para classes de tensão acima de 69 kV. A máxima distorção total de tensão permitida para essa classe é de 3%.

2.3. O IEEE

O IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) foi fundado no ano de 1963, devido à fusão entre a AIEE (*American Institute of Electrical Engineers*) e a IRE (*Institute of Radio Engineers*) [9].

V ≥ 69 kV			
Ímpares		Pares	
Ordem	Valor por harmônico [%]	Ordem	Valor por harmônico [%]
3, 5, 7	2,0	2, 4, 6	1,0
9, 11, 13	1,5		
15, 17, 19, 21, 23, 25	1,0		
≥ 27	0,5	≥ 8	0,5
DTT = 3% (máximo)			

Tabela 6 - Limites para distorções harmônicas individuais e total para V≥69kV – ONS [8].

É uma organização científica e educacional, sem fins lucrativos, direcionada para o avanço da teoria e prática das engenharias elétrica, eletrônica, de computação e de comunicações, assim como ciências da computação, outras engenharias e ciências relacionadas.

Foi criada para o aperfeiçoamento da tecnologia, no âmbito da eletricidade, e atualmente possui mais de 360000 membros, em 175 países, tornando-se o maior divulgador de jornais científicos e organizador de conferências na área de eletricidade. Além disso, é grande desenvolvedor de normas técnicas [9].

No âmbito da qualidade da energia elétrica, pode ser citada a norma IEEE Std 519 – 1992 [10], que aborda requisitos e práticas recomendadas para o controle de harmônicos nos sistemas elétricos de potência.

A norma possui finalidade de estabelecer metas para os projetos de sistemas elétricos com cargas lineares e não lineares, e define a qualidade de energia que deve ser fornecida no ponto de acoplamento comum.

Os limites apresentados na norma são relativos ao funcionamento do sistema em regime permanente, ou seja, em caso de transitórios as amplitudes harmônicas podem extrapolar os limites definidos pela norma.

A relação entre a corrente de curto-circuito e a componente fundamental da corrente de carga na frequência fundamental no ponto de acoplamento da mesma é o aspecto mais importante no que diz respeito à imposição dos limites de qualidade de energia referentes às cargas.

Nota-se que a norma não se atenta ao interior da instalação elétrica, mas sim no que esta reflete para as outras cargas conectadas ao ponto de acoplamento comum.

Os limites determinados pela norma variam de acordo com o nível de tensão do ponto de acoplamento comum, bem como pela intensidade da corrente de curto-circuito. Quanto maior a corrente de curto-circuito, maior é o limite tolerável.

As tabelas de 7 a 9 mostram limites toleráveis para as componentes harmônicas individuais ímpares de corrente. Para as componentes pares, os valores limites são 25% dos apresentados nas tabelas.

A tabela 7 mostra os valores limites para uma faixa de tensão acima de 120V e inferiores a 69 kV.

I_{cc}/I_{carga}	$n < 11$ [%]	$11 \leq n < 17$ [%]	$17 \leq n < 23$ [%]	$23 \leq n < 35$ [%]	$n \geq 35$ [%]	TDD [%]
<20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20 – 50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50 – 100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100 – 1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
>1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

Tabela 7 - Limites para Distorções individuais de corrente, acima de 120V e menores que 69kV – IEEE [10].

Para o nível de tensão maior que 69 kV, e até 121 kV, os limites foram os apresentados na tabela 8.

I_{cc}/I_{carga}	$n < 11$ [%]	$11 \leq n < 17$ [%]	$17 \leq n < 23$ [%]	$23 \leq n < 35$ [%]	$n \geq 35$ [%]	TDD [%]
<20	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
20 – 50	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4,0
50 – 100	5,0	2,25	2,0	0,75	0,35	6,0
100 – 1000	6,0	2,75	2,5	1,0	0,5	7,5
>1000	7,0	3,5	3,0	1,25	0,7	10,0

Tabela 8 - Limites para distorções individuais de corrente, de 69kV até 121kV – IEEE [10].

Para sistemas de distribuição considerados de alta tensão, ou seja, com nível de tensão maior do que 121 kV, os limites para a relação entre as correntes foram apresentados na tabela 9, porém não foram de interesse neste trabalho.

I_{cc}/I_{carga}	$n < 11$ [%]	$11 \leq n < 17$ [%]	$17 \leq n < 23$ [%]	$23 \leq n < 35$ [%]	$n \geq 35$ [%]	TDD [%]
<50	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
>50	3,0	1,5	1,15	0,45	0,22	3,75

Tabela 9 - Limites para distorções individuais de corrente, acima de 121kV – IEEE [10].

A concessionária de energia elétrica, por sua vez, possui a responsabilidade de manter dentro de um limite tolerável a qualidade da energia fornecida na forma de tensão de alimentação aos consumidores. Tais limites encontram-se na tabela 10.

Tensão no PAC	Harmônicas Individuais [%]	DHT [%]
$V_N \leq 69 \text{ kV}$	3,0	5,0
$69 \text{ kV} < V_N < 161 \text{ kV}$	1,5	2,5
$V_N > 161 \text{ kV}$	1,0	1,5

Tabela 10 - Limites para distorções harmônicas individuais e total de tensão – IEEE [10].

2.4. O IEC

O IEC (*International Electrotechnical Commission*) foi fundado em 26 de junho de 1906, devido a discordâncias entre o IEEE americano, o IEE (*Institution of Electrical Engineers*) britânico e outras instituições relacionadas a assuntos de eletricidade.

Consiste em uma instituição não governamental sem fins lucrativos, de normatização internacional, que publica e elabora normas técnicas para assuntos de eletrônica, eletricidade e áreas relacionadas [11].

No âmbito de qualidade de energia elétrica, especificamente no contexto de componentes harmônicas, o IEC propõe os padrões técnicos IEC 61000-3-2 [12], e IEC 61000-3-4, impondo limites de correntes harmônicas para classes de equipamentos, definidas a seguir.

Os equipamentos abrangidos pelo padrão IEC 61000-3-2 possuem a restrição de corrente de até 16 A por fase, conectados em sistemas de distribuição de baixa tensão. Equipamentos com tensão de alimentação nominal inferior a 220 V não são abrangidos pelo padrão.

As classes são denominadas A, B, C ou D, e os equipamentos são nelas alocados de acordo com os seguintes critérios:

- i. Quantidade de equipamentos utilizados pelos consumidores;
- ii. Duração do uso, medida em horas;
- iii. Simultaneidade do uso (os equipamentos que são geralmente utilizados em um mesmo período alocados no mesmo grupo segundo este critério);
- iv. Consumo de potência;
- v. Espectro harmônico da corrente de entrada, incluindo características de fase.

Pertencem à classe A os equipamentos trifásicos balanceados, equipamentos de uso residencial que não pertençam à classe D, *dimmers* para lâmpadas incandescentes,

ferramentas e equipamentos de áudio. Também pertencem à classe A todos os equipamentos que não se enquadram nas outras categorias.

Os limites de correntes harmônicas para equipamentos da classe A estão apresentados nas tabelas 11 e 12.

Ordem Harmônica (n)	Máxima corrente harmônica permitida [A]
3	2,30
5	1,14
7	0,77
9	0,40
11	0,33
13	0,21
$15 \leq n \leq 39$	$0,15 \times \frac{15}{n}$

Tabela 11 - Limites de correntes harmônicas de ordens ímpares em equipamentos da classe A – IEC [12].

Ordem Harmônica (n)	Máxima corrente harmônica permitida [A]
2	1,08
4	0,43
6	0,30
$8 \leq n \leq 40$	$0,23 \times \frac{8}{n}$

Tabela 12 - Limites de correntes harmônicas de ordens pares em equipamentos da classe A – IEC [12].

Para equipamentos da classe B, os limites de correntes harmônicas são 150% dos limites dos equipamentos de classe A, apresentados nas tabelas 11 e 12.

São considerados equipamentos da classe B equipamentos de arco de solda não profissionais e outras ferramentas portáteis.

Na classe C estão contidos os equipamentos de iluminação do tipo incandescente, de descarga e LEDs. Os valores de potência ativa de entrada considerados estão acima de 25 W. Os limites de correntes harmônicas para equipamentos da classe C, expressos percentualmente em relação à corrente na frequência fundamental, foram apresentados na tabela 13.

Na classe D estão incluídos equipamentos com potência especificada de acordo com o item 6.2.2 da norma IEC 61000-3-2, e com consumo de potência de até 600 W. São exemplos de equipamentos pertencentes à classe D monitores, equipamentos de televisão e

computadores pessoais. Na tabela 14 encontram-se os limites de corrente estabelecidos para tais equipamentos.

Ordem Harmônica (n)	Máxima corrente harmônica permitida em relação à corrente na frequência fundamental [%]
2	2
3	$30 \times fp^*$
5	10
7	7
9	5
$11 \leq n \leq 39$ (somente harmônicos ímpares)	3

fp : fator de potência do circuito.

Tabela 13 - Limites de correntes harmônicas em equipamentos da classe C – IEC [12].

Ordem Harmônica (n)	Máxima corrente permitida por Watt [mA/W]	Máxima corrente harmônica permitida [A]
3	3,4	2,30
5	1,9	1,14
7	1,0	0,77
9	0,5	0,40
11	0,35	0,33
13	$\frac{0,35}{13}$	0,21
$15 \leq n \leq 39$	$\frac{3,85}{n}$	Ver tabelas 11 e 12

Tabela 14 - Limites de correntes harmônicas em equipamentos da classe D – IEC [12].

2.5. Comparações

As normas técnicas citadas neste capítulo apresentam diferentes abordagens referentes à tolerância dos distúrbios harmônicos nos sistemas elétricos.

Enquanto a norma IEC 6001-3-2 estabelece limites para as componentes harmônicas individuais de corrente para equipamentos que drenam corrente de até 16 A por fase, dividindo-os em diferentes classes relativas ao uso, o módulo 8 do PRODIST, a norma IEEE Std. 519-1992 e os “Procedimentos de Rede” da ONS estabelecem limites de

distorção harmônica total de tensão para diferentes níveis de tensão do sistema elétrico analisado.

O IEC, através do padrão técnico IEC 61000-3-4, estabelece definições e limites em sistemas cujos equipamentos podem drenar correntes superiores a 16 A por fase. Porém neste capítulo foi utilizado o padrão IEC 61000-3-2 apenas para fins de comparação de diferentes abordagens acerca dos distúrbios harmônicos.

O padrão ONS é mais rígido do que o PRODIST para as classes de tensão abaixo de 13,8 kV, pois o último permite um nível de distorção harmônica total de até 8% para tensões nominais no intervalo $1 \text{ kV} < V_N \leq 13,8 \text{ kV}$, e até 10% para $V_N \leq 1 \text{ kV}$. O padrão ONS, por sua vez, fixa em 6% o valor máximo de distorção harmônica total nos barramentos de tensão nominal abaixo de 69 kV.

Em [13] e [14] encontraram-se estudos comparativos entre os padrões IEEE Std. 516-1992 [10] e IEC 61000-3-2 [12]. Concluiu-se em [13] que o padrão IEEE Std. 516-1992 é mais abrangente do que o IEC 61000-3-2, do ponto de vista do sistema de distribuição, uma vez que a primeira prima pela qualidade da energia no ponto de acoplamento comum a outras cargas, enquanto o segundo diz respeito apenas às injeções de componentes harmônicos dos equipamentos conectados ao sistema elétrico. Em [14], no entanto, foi levantado um ponto favorável à filosofia do padrão IEC 61000-3-2, que considera as possíveis cargas conectadas no sistema de distribuição futuramente. As conclusões dos estudos convergiram para a ideia de que o padrão IEC 61000-3-2 possui um embasamento teórico mais forte, porém o padrão IEEE Std. 516-1992 é mais prático e facilmente aplicável nos sistemas elétricos.

Capítulo 3

AS CARGAS GERADORAS DE HARMÔNICOS

As cargas não-lineares, ou seja, geradoras de harmônicos, manifestavam efeitos praticamente desprezíveis no sistema elétrico até aproximadamente a metade do século XX [1].

Estas cargas se localizavam no setor industrial, geralmente em aplicações de eletrometalurgia ou eletroquímica, e não apresentavam efeitos significativos no sistema elétrico devido ao fato de que a indústria não possuía o alto grau de desenvolvimento tal como na atualidade.

Dessa forma, a área de Qualidade de Energia Elétrica não estava inserida no contexto dos sistemas elétricos de forma substancial.

Aos poucos surgiram reatores para iluminação de descarga e outros equipamentos que introduziram no setor comercial as características de não-linearidade. O setor industrial cresceu, e passou a implementar os conceitos de eletrônica de potência para viabilizar seus processos, reduzindo assim as perdas na produção [15].

Atualmente, consumidores industriais consomem potência elevada e utilizam motores, acionadores, conversores, inversores de frequência e outros equipamentos que injetam grande quantidade de harmônicos na rede elétrica, e por isso são considerados os principais geradores de harmônicos.

Consumidores comerciais injetam maior quantidade de harmônicos na rede elétrica quando comparados aos residenciais, devido à necessidade da utilização de muitas lâmpadas fluorescentes, redes de computadores e outros aparelhos eletrônicos [15].

Neste capítulo foram apresentadas algumas cargas geradoras de harmônicas nos cenários residencial e comercial, no que diz respeito à distorção harmônica total de corrente,

bem como as assinaturas harmônicas das cargas, ou seja, as formas de onda de corrente típicas.

As tabelas 15 a 24 e figuras 1 a 12 foram extraídas de [15], e possuem caráter meramente ilustrativo neste trabalho. Os valores de distorção harmônica total de corrente apresentados nas tabelas 15 a 21 podem não corresponder com os valores típicos medidos em laboratório (ambiente controlado), pois não há especificação relativa ao isolamento e controle dos experimentos de medição de harmônicos em [15]. As formas de onda de corrente das lâmpadas de vapor de sódio e mercúrio (figuras 6 e 7) sugerem que pode haver ruído nas medições, podendo haver comprometimento dos valores apresentados.

Nota-se que os fabricantes de mesma numeração em tabelas distintas não são os mesmos, ou seja, o “Fabricante 1” de uma tabela não é o mesmo “Fabricante 1” de outra tabela de dados, por exemplo.

3.1. Os cenários residencial e comercial

Apesar da pequena participação do cenário residencial no setor elétrico, no que diz respeito à injeção de correntes harmônicas nos grandes sistemas de energia, as cargas não lineares são muito utilizadas no cotidiano da população em geral.

A eletrônica moderna alcançou um nível de desenvolvimento e difusão que abriu ao público comum a possibilidade de obtenção de aparelhos sofisticados, aliando conforto à eficiência energética.

A seguir estão descritas algumas das principais cargas não lineares encontradas no cenário residencial.

3.1.1. Lâmpadas Incandescentes

As lâmpadas incandescentes possuem, em geral, comportamento resistivo, ou seja, há uma relação linear entre a tensão aplicada aos seus terminais e a corrente por elas drenada.

As formas de onda de tensão e corrente de lâmpadas incandescentes são, portanto, senoidais, o que as caracteriza como cargas lineares.

Na tabela 15 encontram-se dados de um conjunto de cinco lâmpadas incandescentes, de 40 a 100 Watts de potência, e os valores de distorção harmônica total (DHT) de tensão e corrente para cada lâmpada.

	Fabricante / Tipo	Potência [W]	DHT de Corrente [%]
1	Fabricante 1 – Tipo clara	40	3,67
2	Fabricante 2 – Tipo clara	40	3,95
3	Fabricante 3 – Tipo bulbo translúcido	60	3,64
4	Fabricante 3 – Tipo cristal	100	3,15
5	Fabricante 1 – Tipo bulbo translúcido	100	3,66

Tabela 15 - Distorção harmônica total de corrente de lâmpadas incandescentes [15].

Nota-se que as ordens de grandeza das distorções de corrente e tensão são as mesmas, e a proximidade dos valores sugere que a não equivalência ocorre devido a erros de medição.

A utilização de um *dimmer* para o controle da potência injetada na lâmpada, porém, resulta na descaracterização da linearidade da carga, devido ao chaveamento de corrente proporcionado pelo mesmo.

Dimmers são controladores CA de estado sólido, aparelhos desenvolvidos utilizando técnicas de eletrônica de potência para regular a potência fornecida à carga, e são aplicados principalmente no controle da luminosidade de lâmpadas [16].

A seguir, Pires analisou em [15] duas situações: lâmpadas incandescentes dimerizadas funcionando com 75% da luminosidade nominal e com 25%.

i. Lâmpada incandescente dimerizada - 75% de luminosidade

Na figura 1 encontra-se a forma de onda da corrente drenada por uma lâmpada incandescente dimerizada, operando com 75% da luminosidade. Pode-se observar o efeito de “recortamento” da senóide, resultado do chaveamento de corrente realizado pelo controlador CA.

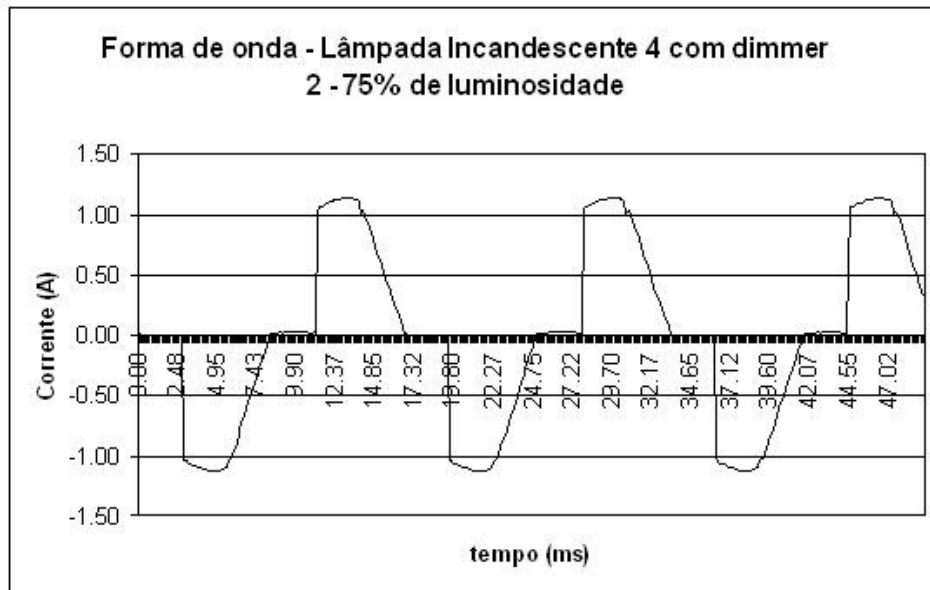


Figura 1 - Forma de onda de lâmpada incandescente dimerizada, a 75% de luminosidade [15].

ii. Lâmpada incandescente dimerizada - 25% de luminosidade

Na figura 2 encontra-se a forma de onda da corrente drenada pela mesma lâmpada incandescente dimerizada, operando agora com 25% da luminosidade. Para reduzir a potência injetada, o “recortamento” feito pelo chaveamento de corrente é ainda maior do que no caso anterior, o que torna a forma de onda de corrente muito menos parecida com a senóide da alimentação.

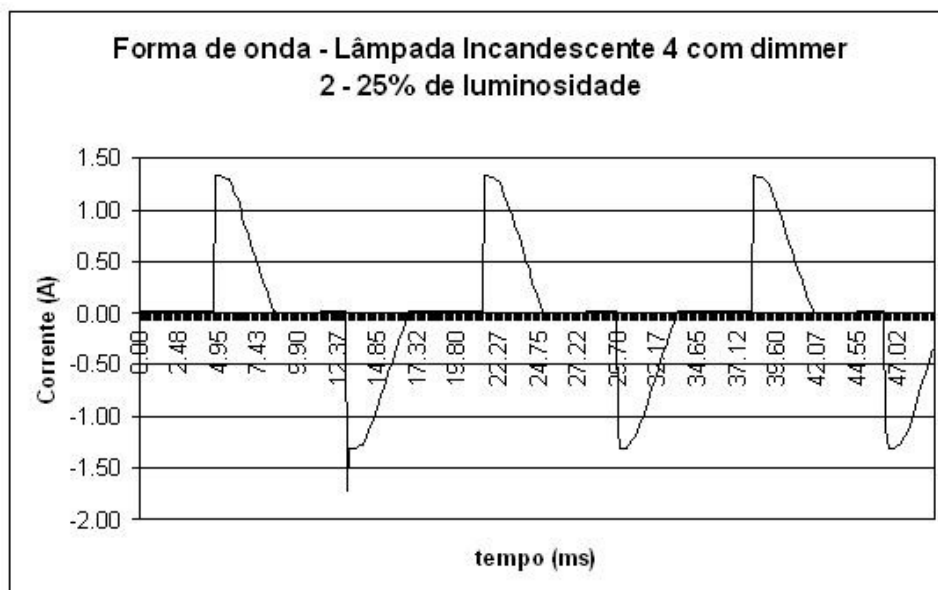


Figura 2 - Forma de onda de lâmpada incandescente dimerizada, a 25% de luminosidade [15].

Na tabela 16 encontram-se os valores de distorção harmônica total de tensão e corrente nas lâmpadas incandescentes dimerizadas, comparando três modelos de dimmers diferentes

Nota-se que os valores de distorção harmônica de tensão são equivalentes aos apresentados na tabela 15, evidenciando o controle da injeção de potência por chaveamento de corrente através dos dimmers.

	Fabricante / Tipo	Iluminação: 75%	Iluminação: 25%
		DHT Corrente [%]	DHT Corrente [%]
1	Fabricante 1 – Tipo rotativo	26,62	78,03
2	Fabricante 2 – Tipo deslizante	37,86	76,72
3	Fabricante 2 – Tipo rotativo	33,74	74,86

Tabela 16 - Distorção harmônica total de corrente para lâmpadas incandescentes dimerizadas [15].

3.1.2. Lâmpadas Fluorescentes

As lâmpadas fluorescentes não são compostas meramente por resistências elétricas que emitem energia luminosa na presença de corrente elétrica, tais como as incandescentes. Ao invés disso, utilizam a descarga elétrica através de um gás para produzir energia luminosa [17].

Para as lâmpadas fluorescentes consideradas de “partida lenta” funcionarem, elas necessitam de dois dispositivos: o *starter* e o reator.

Existem dois tipos de reatores: os eletromagnéticos e os eletrônicos. A seguir são descritas as características harmônicas de cada tipo.

i. Reatores Eletromagnéticos

Os reatores eletromagnéticos são bobinas com núcleo de ferro, ligadas em série com a alimentação da lâmpada, com a finalidade de elevar a tensão durante a ignição e reduzir a corrente durante o tempo de funcionamento da lâmpada [17].

A indutância do enrolamento do reator, no entanto, consome potência reativa da rede elétrica, reduzindo o fator de potência da instalação.

Na tabela 17 podem ser observados os valores de distorção harmônica total de tensão e corrente para lâmpadas fluorescentes com reatores eletromagnéticos.

	Fabricante / Tipo	Lâmpadas	DHT Corrente [%]
1	Fabricante 1 – Tipo 1	1 x 20W	5,45
2	Fabricante 2 – Tipo 1	1 x 40W	11,25
3	Fabricante 1 – Tipo 2	1 x 40W	12,30
4	Fabricante 1 – Tipo 3	1 x 40W	12,20
5	Fabricante 2 – Tipo 2	2 x 20W	11,70

Tabela 17 - Valores de distorção harmônica total de corrente de lâmpadas fluorescentes com reatores eletromagnéticos [15].

Na figura 3 pode-se observar a forma de onda típica da corrente solicitada por uma lâmpada fluorescente com reator eletromagnético.

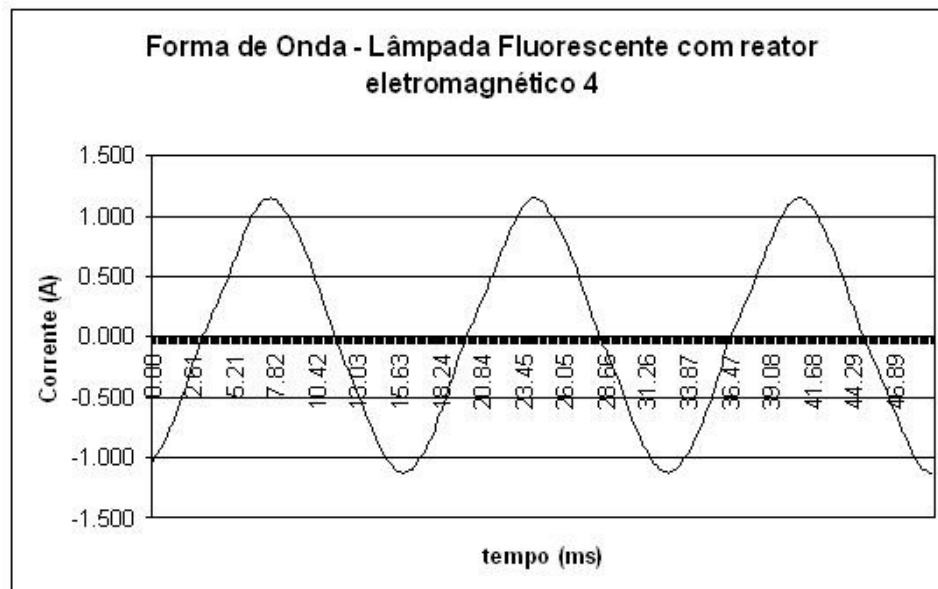


Figura 3 - Forma de onda de corrente de lâmpada fluorescente com reator eletromagnético [15].

ii. Reatores Eletrônicos

Os reatores eletrônicos possuem a mesma função dos reatores eletromagnéticos, ou seja, elevar a tensão durante a ignição e reduzir a corrente durante o funcionamento da lâmpada. No entanto, consistem em um circuito de retificação e um inversor oscilante [17].

As lâmpadas fluorescentes com reatores eletrônicos são mais eficientes energeticamente, ou seja, gastam menos energia do que as de reatores eletromagnéticos. Além disso, apresentam menor ruído audível, menor aquecimento, menores níveis de interferência eletromagnética e menor cintilação [17].

Todavia, a eficiência energética é compensada na injeção de harmônicos na instalação. A tabela 18 apresenta valores de distorção harmônica de tensão e corrente para quatro configurações.

	Fabricante / Tipo	Lâmpadas	DHT Corrente [%]
1	Fabricante 1 – Tipo 1	1 x 20W	131,83
2	Fabricante 1 – Tipo 2	1 x 40W	125,86
3	Fabricante 2 – Tipo 1	1 x 40W	103,88
4	Fabricante 2 – Tipo 2	2 x 40W	15,78

Tabela 18 - Valores de distorção harmônica total de corrente de lâmpadas fluorescentes com reatores eletrônicos [15].

Nota-se que os valores de distorção harmônica de corrente ultrapassaram o valor de 100%, sinalizando que a eficiência energética obtida traz consigo consequências negativas.

O baixo valor de distorção harmônica de corrente do quarto item da tabela 18 é decorrente da portaria nº 188 de 9 de novembro de 2004, do INMETRO. A portaria determina que os reatores eletrônicos que alimentem lâmpadas fluorescentes convencionais, cujo conjunto reator-lâmpada consuma potência ativa superior a 56 W, devem ser fabricados para possuírem fator de potência elevado [18].

Na figura 4 pode ser observada a forma de onda da corrente solicitada pela mesma lâmpada utilizada na figura 3, porém utilizando um reator eletrônico. Mostrou-se evidente que a distorção harmônica de corrente utilizando reatores eletrônicos foi maior do que utilizando reatores eletromagnéticos.

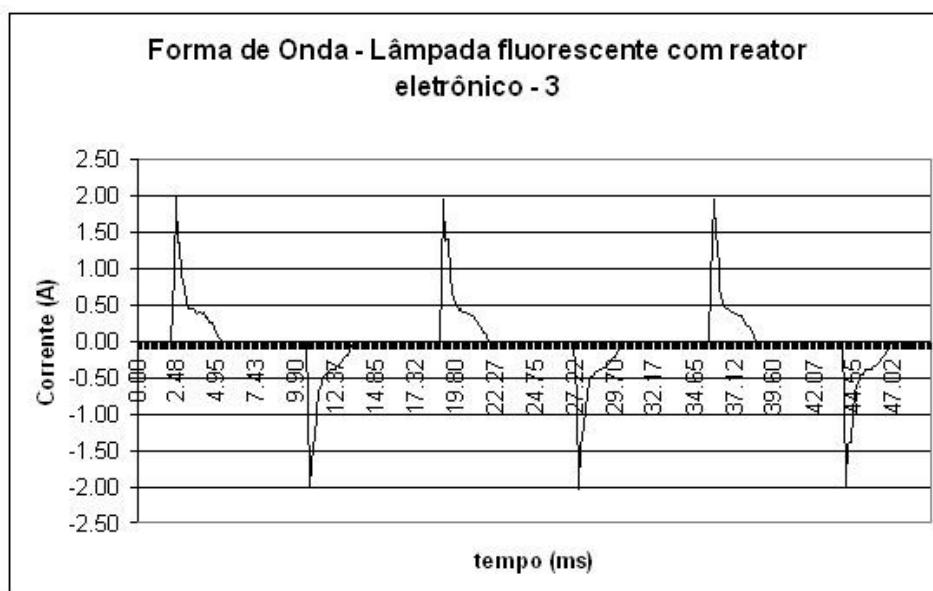


Figura 4 - Forma de onda de corrente de lâmpada fluorescente com reator eletrônico [15].

3.1.3. Lâmpadas Fluorescentes Compactas

As lâmpadas fluorescentes compactas (LFC) possuem, em geral, um desempenho melhor do que as lâmpadas fluorescentes convencionais, pois foram feitas especialmente para obterem alto desempenho energético. Apesar desse desempenho, são cargas que possuem altas distorções harmônicas nas formas de onda de corrente [19].

Na tabela 19 encontram-se os valores de distorção harmônica total de tensão e corrente para lâmpadas de diferentes fabricantes e potências.

	Fabricante / Tipo	Potência [W]	DHT Corrente [%]
1	Fabricante 1 – Tipo 1	5	103,05
2	Fabricante 2 – Tipo 1	11	89,58
3	Fabricante 3 – Tipo 1	15	105,09
4	Fabricante 4 – Tipo 1	15	111,21
5	Fabricante 5 – Tipo 1	15	133,30
6	Fabricante 6 – Tipo 1	18	126,94
7	Fabricante 5 – Tipo 2	25	114,96

Tabela 19 - Valores de distorção harmônica total de corrente de lâmpadas fluorescentes compactas [15].

Os altos valores de distorção harmônica de corrente são expressivos. A forma de onda de uma lâmpada fluorescente compacta típica pode ser vista na figura 5.

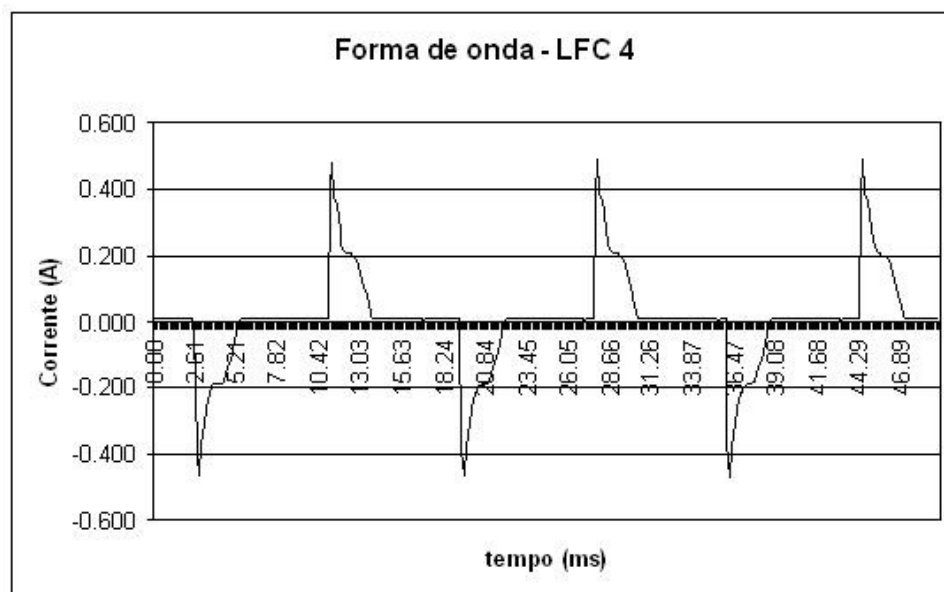


Figura 5 - Forma de onda de corrente de lâmpada fluorescente compacta [15].

3.1.4. Lâmpadas a Vapor de Mercúrio e de Vapor de Sódio

As lâmpadas de vapor de mercúrio são compostas por um tubo de descarga feito de quartzo para suportar altas temperaturas. Em cada extremidade há um eletrodo principal, de tungstênio recoberto com material emissor de elétrons [17].

As lâmpadas de vapor de sódio foram feitas para substituir as lâmpadas de vapor de mercúrio. Possuem tubo de descarga de óxido de alumínio sinterizado, encapsulado por um bulbo oval de vidro. O tubo de descarga é preenchido por um amálgama de sódio-mercúrio, e uma mistura gasosa de neônio e argônio [17].

Na tabela 20 constam os valores de distorção harmônica total de tensão e corrente medidos para uma lâmpada fluorescente a vapor de mercúrio e a vapor de sódio.

	Lâmpada	Potência [W]	DHT Corrente [%]
1	Vapor de Mercúrio	80	38,04
2	Vapor de Sódio	70	59,46

Tabela 20 - Valores de distorção harmônica total de corrente de lâmpadas a vapor de mercúrio e a vapor de sódio [15].

As formas de onda da corrente absorvida pelas lâmpadas podem ser observadas nas figuras 6 e 7.

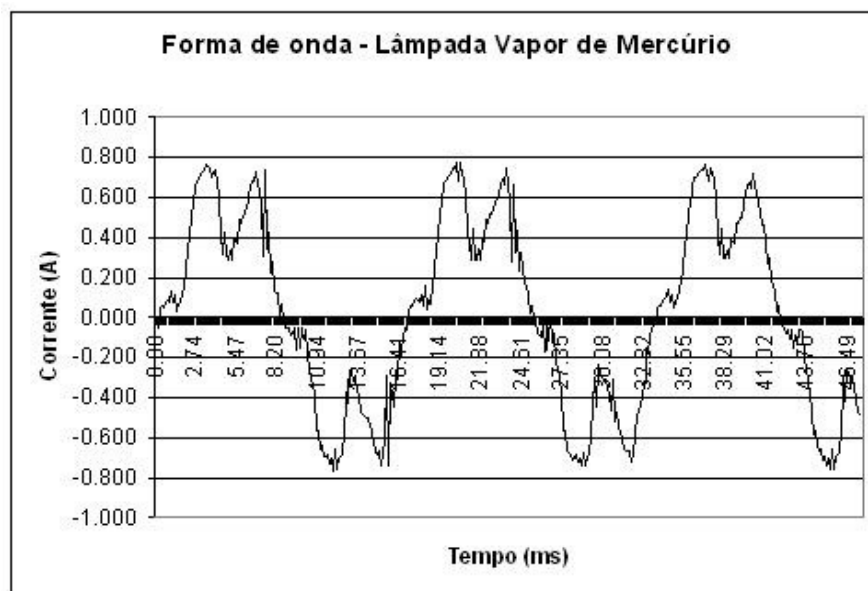


Figura 6 - Forma de onda de corrente de lâmpada a vapor de mercúrio [15].

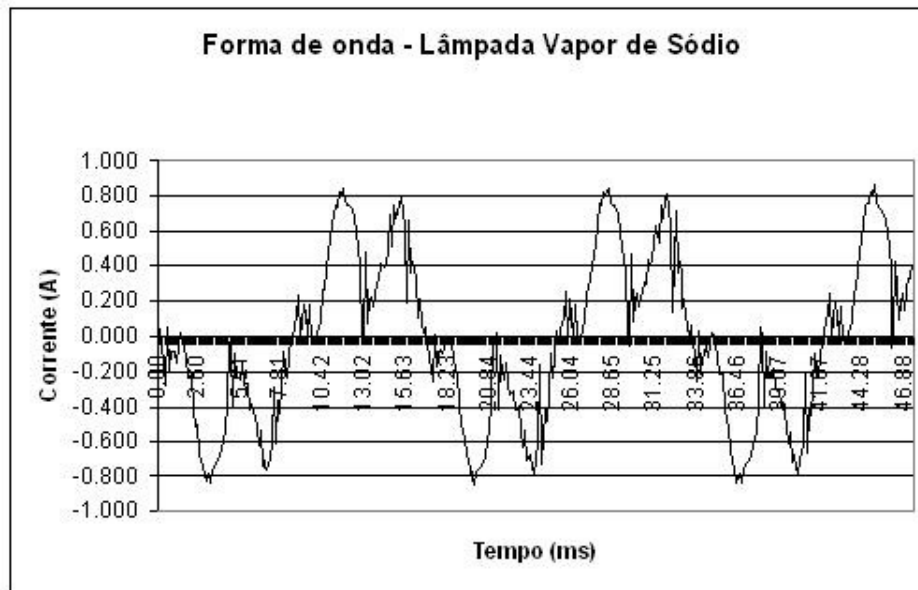


Figura 7 - Forma de onda de corrente de lâmpada a vapor de sódio [15].

3.1.5. Cargas Eletrônicas

A seguir, na tabela 21, foram apresentados os valores de distorção harmônica total de tensão e corrente em aparelhos eletrônicos típicos do cenário residencial e comercial.

As cargas levantadas neste item possuem características harmônicas semelhantes, no que diz respeito às assinaturas harmônicas.

Na figura 8 pode-se observar a forma de onda de corrente de um tipo analisado de televisor.

Aparelho / Fabricante		DHT Corrente [%]
Computadores		
1	Athlon 1,8 GHz	89,27
2	Pentium 166 MHz – 14”	98,47
3	Pentium 300 MHz – 14”	98,10
4	Pentium 3 – 1 GHz – 15”	114,32
5	Pentium 3 – 1 GHz – 17”	94,06
6	Pentium 4 – 2,7 GHz – 17”	119,96
7	Pentium 4 – 3 GHz – 17”	94,42
Televisores		
1	Fabricante 1 – 14”	111,63
2	Fabricante 2 – 14”	95,96
3	Fabricante 3 – 14”	103,29
4	Fabricante 4 – 20”	103,00
5	Fabricante 5 – 20”	136,17
Aparelhos de som		
1	Fabricante 1	43,20
2	Fabricante 2	61,18
3	Fabricante 3	42,80
4	Fabricante 4	35,97
Impressora a Laser		
1	Fabricante 1	111,60
Notebook		
1	Pentium 4 – 3 GHz – 15”	10,00
Rádio Relógio		
1	Fabricante 1	51,03
Telefones sem fio		
1	Fabricante 1	26,18
2	Fabricante 2	29,15
3	Fabricante 3	37,84
Vídeo Cassete		
1	Fabricante 1	135,23
2	Fabricante 2	56,28
Vídeo Game		
1	Fabricante 1	45,30
2	Fabricante 2	56,92

Tabela 21 - Valores de distorção harmônica total de corrente de aparelhos eletrônicos típicos do cenário residencial e comercial [15].

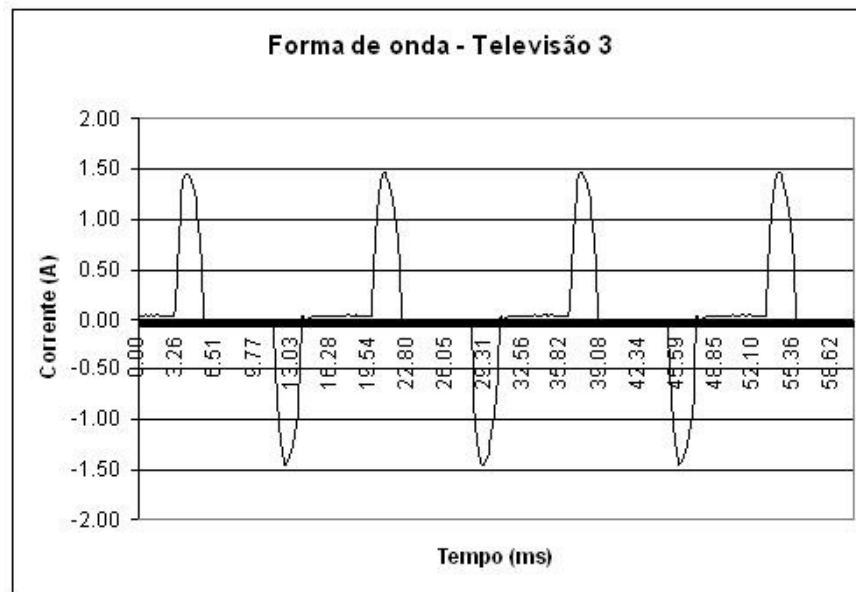


Figura 8 - Forma de onda de corrente de um televisor [15].

3.1.6. Refrigeradores

Os equipamentos refrigeradores possuem índices de distorção harmônica total de tensão e corrente baixos comparados às cargas eletrônicas. Os valores em diferentes aparelhos, fabricantes e modelos foram apresentados na tabela 22.

Aparelho / Fabricante		DHT Corrente [%]
Geladeiras		
1	Fabricante 1 – Tipo 1 (1 porta)	4,74
2	Fabricante 1 – Tipo 2 (1 porta)	8,01
3	Fabricante 1 – Tipo 3 (1 porta)	15,80
4	Fabricante 1 – Tipo 4 (1 porta)	8,50
5	Fabricante 2 – Tipo 1 (2 portas)	8,30
Freezers		
1	Fabricante 1	7,49
2	Fabricante 2	14,47
Frigobar		
1	Fabricante 1	7,2
Bebedouros		
1	Fabricante 1	4,19
2	Fabricante 2	7,99

Tabela 22 - Valores de distorção harmônica total de corrente para equipamentos refrigeradores [15].

A forma de onda típica de equipamentos refrigeradores pode ser vista na figura 9 que segue.

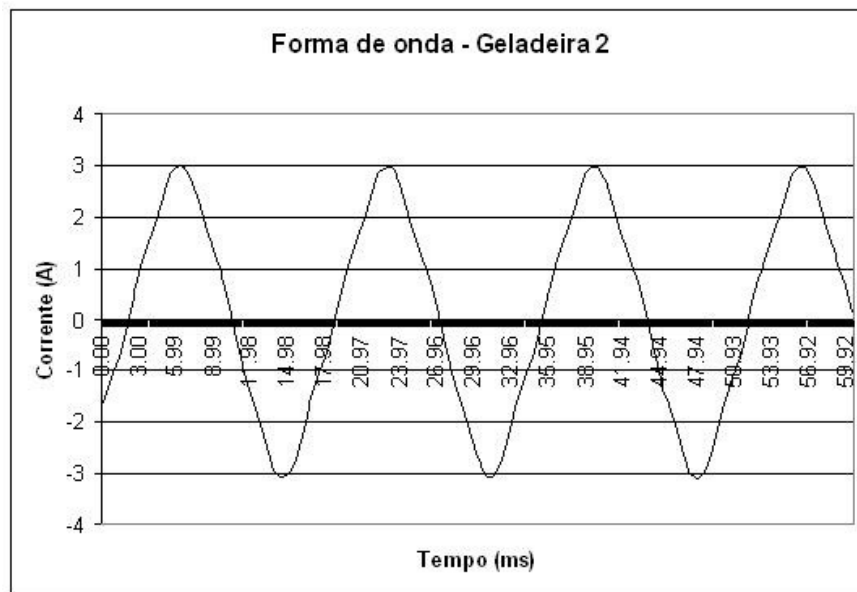


Figura 9 - Forma de onda de corrente de uma geladeira [15].

3.1.7. Condicionadores de ar

Os aparelhos condicionadores de ar possuem, em geral, duas funções básicas: a de resfriar e a de ventilar os ambientes nos quais estão instalados.

A função de resfriar implica em um decremento de temperatura interna do ambiente, exigindo do equipamento um trabalho elétrico maior, devido ao acionamento de um compressor simultaneamente ao funcionamento do ventilador.

A função de ventilar, por sua vez, está relacionada apenas à circulação do ar no ambiente, e requer menos esforço do equipamento.

Na tabela 23 foram apresentadas as distorções harmônicas de tensão e corrente de nove aparelhos condicionadores de ar, de diferentes tipos e fabricantes.

	Fabricante / Tipo	BTU	Resfriar	Ventilar
			DHT Corrente [%]	DHT Corrente [%]
1	Fabricante 1 – Tipo 1	7500	12,70	5,40
2	Fabricante 2 – Tipo 1	7500	11,26	1,89
3	Fabricante 2 – Tipo 2	7500	13,08	5,21
4	Fabricante 2 – Tipo 3	10500	12,20	-
5	Fabricante 2 – Tipo 4	10500	15,40	-
6	Fabricante 2 – Tipo 5	15000	16,30	4,90
7	Fabricante 2 – Tipo 6	18000	10,65	2,07
8	Fabricante 1 – Tipo 2	18000	15,38	6,05
9	Fabricante 1 – Tipo 3	21000	17,31	7,87

Tabela 23 - Valores de distorção harmônica total de corrente para equipamentos condicionadores de ar [15].

Nas figuras 10 e 11 foram apresentadas as formas de onda de corrente de um determinado aparelho condicionador de ar, inicialmente trabalhando na função “resfriar”, e em seguida na função “ventilar”.

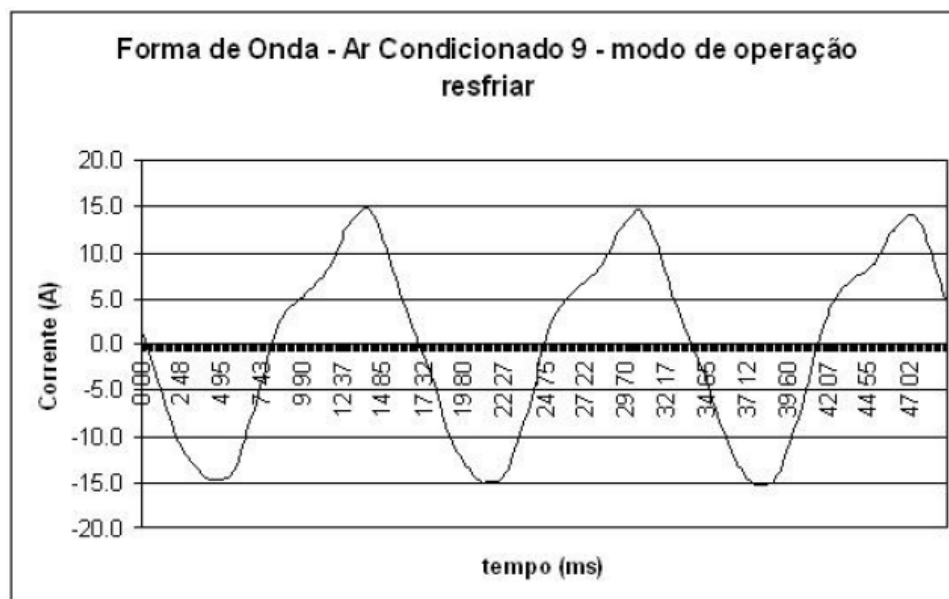


Figura 10 - Forma de onda de corrente de aparelho condicionador de ar na função "resfriar" [15].

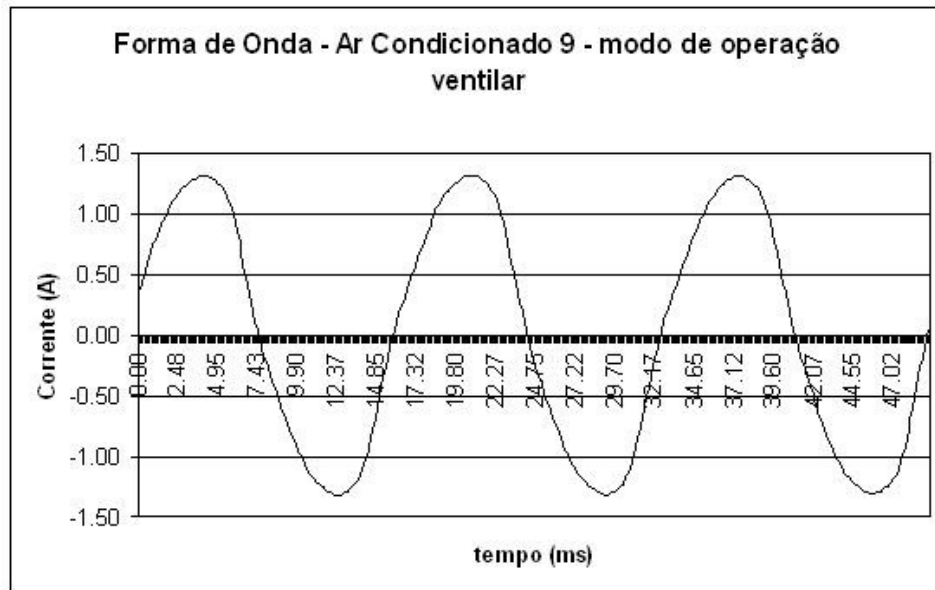


Figura 11 - Forma de onda de corrente de aparelho condicionador de ar na função "ventilar" [15].

É notável a maior distorção da forma de onda no primeiro caso, no qual há maior exigência do equipamento.

3.1.8. Motores

No cenário residencial encontram-se ainda aparelhos que possuem motores, em geral motores de corrente contínua alimentados por corrente alternada, também denominados "motores universais".

Os motores também são cargas geradoras de harmônicos, devido às características de saturação de seus núcleos ferromagnéticos [19].

Na tabela 24 constam alguns aparelhos domésticos que contêm motores, e seus respectivos valores de distorção harmônica total de tensão e corrente.

Como exemplo visual da distorção harmônica de corrente das cargas da tabela 24, a forma de onda da corrente absorvida por uma máquina lavadora de roupas analisada pode ser observada na figura 12.

Aparelho / Fabricante		DHT Corrente [%]
Aspirador de pó		
1	Fabricante 1	22,68
Batedeira		
1	Fabricante 1	5,62
Circulador de Ar		
1	Fabricante 1	3,80
Enceradeira		
1	Fabricante 1	11,26
Espremedor de laranja		
1	Fabricante 1	10,16
Exaustor de Fogão		
1	Fabricante 1	7,80
Liquidificador		
1	Fabricante 1	13,51
2	Fabricante 2	16,85
Lavadora de roupas		
1	Fabricante 1	5,56
2	Fabricante 2	17,06
Tanquinho		
1	Fabricante 1	8,98
Ventilador de teto		
1	Fabricante 1	4,21
Ventilador pequeno		
1	Fabricante 1	2,24
2	Fabricante 2	3,90
3	Fabricante 3	5,49

Tabela 24 - Valores de distorção harmônica total de corrente para equipamentos que contêm motores [15].

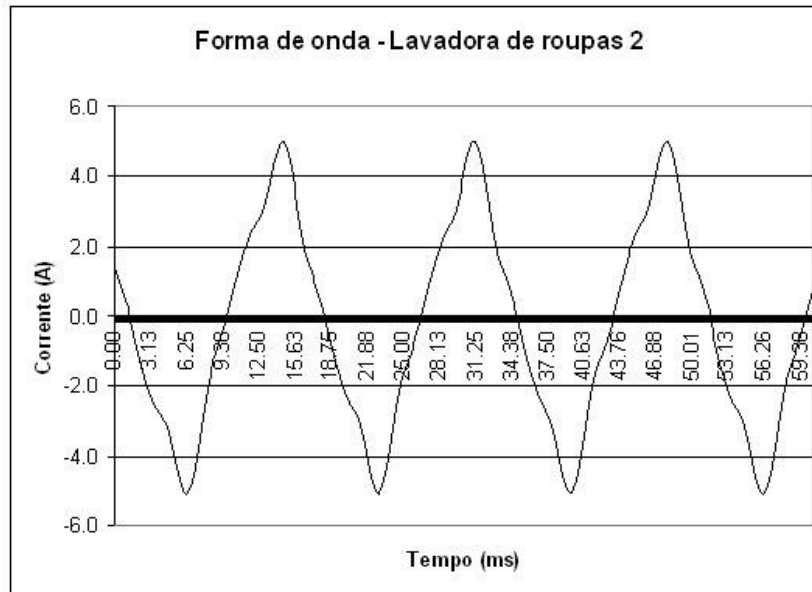


Figura 12 - Forma de onda de corrente de lavadora de roupas [15].

3.2. Considerações Finais sobre o Capítulo

Neste capítulo foi possível entender como os equipamentos utilizados rotineiramente nos cenários comercial e residencial contribuem para o empobrecimento da qualidade da energia elétrica, através da apresentação dos dados de distorção harmônica total e das formas de onda distorcidas de uma série de equipamentos, de diferentes modelos e fabricantes.

Deve-se ter em mente que as cargas utilizadas nas simulações deste trabalho possuem perfis harmônicos reais, e os aparelhos elétricos utilizados nas residências estudadas possuem assinaturas harmônicas semelhantes às apresentadas neste capítulo.

Capítulo 4

IMPACTOS DE ELEVADOS NÍVEIS DE DISTORÇÃO HARMÔNICA NOS SISTEMAS ELÉTRICOS

As correntes e tensões harmônicas podem causar diversos danos nos sistemas elétricos, tanto no nível da instalação elétrica quanto no sistema de distribuição de energia [19].

Além disso, a presença de distorção harmônica na rede elétrica significa que há perdas, tanto na redução da vida útil dos equipamentos quanto na dispersão de energia por efeito joule nos condutores pelos quais fluem essas correntes.

De acordo com a norma IEEE Std 519-1992 [10], o grau de tolerância aos harmônicos depende da susceptibilidade da carga ao nível de distorção ao qual esta se submete.

Cargas susceptíveis aos harmônicos são aquelas que dependem de uma alimentação puramente senoidal, e assumem tal condição em seus projetos. Como exemplos de cargas altamente susceptíveis a harmônicos se encaixam processadores de dados e dispositivos de comunicação.

Em contrapartida há cargas que toleram um alto grau de distorção harmônica, ou seja, são pouco susceptíveis às distorções, uma vez que a dissipação de energia das correntes harmônicas ajuda em seus processos. Como exemplos podem ser citados fornos, chuveiros elétricos e outras cargas de aquecimento.

As máquinas rotativas de torque elevado são, de certo modo, tolerantes à presença de harmônicos, estando entre os dois extremos supracitados.

As subseções apresentadas a seguir abordam a descrição de alguns danos causados pela presença de correntes e tensões harmônicas, tanto na instalação elétrica quanto na rede de distribuição de energia elétrica.

4.1. Sobreaquecimento dos condutores neutros

Em sistemas trifásicos equilibrados, as tensões e correntes em cada fase são perfeitamente senoidais e defasadas de 120° entre si no tempo, e idealmente não há passagem de corrente através do condutor neutro, uma vez que a corrente fasorial no neutro é igual à corrente resultante da soma vetorial das correntes das três fases.

Quando o sistema está desbalanceado, a soma vetorial das correntes de fase não é nula, e há, portanto, corrente circulando pelo condutor neutro.

Os sistemas de distribuição são inevitavelmente desbalanceados, uma vez que as linhas são assimétricas e a maior parte das cargas são monofásicas ou bifásicas. Porém a distribuição das cargas entre os condutores é feita sempre na tentativa de manter o sistema o mais perto possível do equilíbrio entre as fases.

No passado, os projetistas de redes elétricas dimensionavam os condutores neutros com a metade da seção dos condutores das fases [15]. Porém apesar das correntes fundamentais se anularem entre si, as correntes harmônicas não se comportam da mesma maneira.

Segundo Fortescue [20], todo sistema polifásico desbalanceado, de n fasores correlacionados, pode ser decomposto em n sistemas equilibrados. Tais sistemas são denominados de “componentes simétricos” dos fasores originais.

Restringindo a abordagem para os sistemas trifásicos, o teorema de Fortescue mostra que os sistemas elétricos trifásicos desequilibrados podem ser decompostos em três conjuntos de sistemas equilibrados, denominados de componentes de sequência positiva, sequência negativa e sequência zero, descritos a seguir.

Os componentes de sequência positiva consistem em três fasores de módulos iguais, defasados entre si de 120° e com a mesma sequência de fase do sistema original desbalanceado.

Os componentes de sequência negativa, assim como os de sequência positiva, são compostos de três fasores de mesmo módulo e defasados de 120° , porém possuem sequência de fase invertida em relação ao sistema original.

Os componentes de sequência zero, por sua vez, são compostos por três fasores de mesmo módulo, mesma direção e sentido, ou seja, possuem defasagem nula entre si.

As correntes harmônicas de ordem múltipla de três são correntes de sequência zero, compostas por três vetores de mesma intensidade, direção e sentido. O módulo da soma

vetorial entre estes componentes, portanto, é igual à soma algébrica de suas intensidades, e esta soma passa pelo condutor neutro do sistema desequilibrado em questão.

Portanto, em sistemas desequilibrados que possuem correntes harmônicas, não se deve negligenciar o correto dimensionamento do cabo neutro. Uma vez que a soma algébrica das intensidades das correntes harmônicas passa por este condutor, este deve possuir bitola maior na presença de harmônicos na instalação.

Em [21] encontrou-se um estudo sobre as correntes harmônicas drenadas por computadores pessoais, e seus efeitos no neutro de sistemas de distribuição de energia. Foi observado que em computadores pessoais a intensidade da corrente de terceiro harmônico drenada pode chegar a 87% da corrente fundamental, e as correntes nos condutores neutros pode passar de 1,7 vezes a corrente nominal das fases. Concluiu-se, portanto, que em escritórios e em centros de computação as correntes de terceiro harmônico podem superaquecer os condutores neutros, podendo causar incêndios. Foi recomendado o aumento da ampacidade dos condutores neutros, ou a instalação de um segundo condutor neutro nas áreas críticas, para que a corrente circulante seja dividida.

4.2. Os efeitos em transformadores

Os transformadores são, em geral, equipamentos robustos que alteram o nível de tensão entre dois circuitos elétricos magneticamente acoplados, através do ajuste correto da relação de espiras entre os enrolamentos primário e secundário.

Para garantir um bom acoplamento magnético entre os enrolamentos, as bobinas são enroladas em um núcleo ferromagnético de permeabilidade magnética alta [22].

Porém os materiais ferromagnéticos apresentam o fenômeno da histerese, e neles também podem surgir correntes parasitas, ou correntes de Foucault. Estes efeitos são levados em consideração nos projetos. A presença de componentes harmônicas na tensão de alimentação de transformadores causa um aumento das perdas por histerese e por correntes de Foucault.

Já as componentes harmônicas na corrente geram perdas ôhmicas extras nos enrolamentos, ou perdas no cobre, devido ao efeito pelicular. As correntes harmônicas causam também um aumento da temperatura interna do equipamento, prejudicando a isolação do mesmo.

Outro efeito importante observado nos transformadores diz respeito aos harmônicos de ordem múltipla de três. Estas componentes estão em fase nos enrolamentos do transformador conectado na configuração delta, ou triângulo.

Dessa forma, o transformador funciona como um filtro para estas componentes, impedindo-as de se propagarem para a rede de alimentação, se o sistema estiver

balanceado. Apesar de este efeito ser vantajoso no sentido de isolamento, os enrolamentos do transformador conectados em triângulo são submetidos a correntes altas, potencializando os problemas de sobreaquecimento e perda de isolamento interna do transformador.

Todos esses efeitos, quando considerados simultaneamente, refletem uma diminuição da vida útil do equipamento, bem como o comprometimento de seu rendimento.

Em [23-26] encontraram-se estudos realizados em transformadores de potência utilizados em sistemas de distribuição, através de simulações computacionais com espectros harmônicos conhecidos nas formas de onda de tensão e/ou corrente de entrada, analisando as perdas referentes à injeção de harmônicos, bem como a relação entre a presença de componentes harmônicas na alimentação e a vida útil desses equipamentos. Em todos os estudos houve a conclusão de que as perdas nos transformadores aumentam com a injeção de harmônicos na alimentação dos mesmos. Além disso, nas simulações de [23] e [24] foi observado o deslocamento da temperatura interna dos transformadores no ponto de operação, mostrando que há de fato o comprometimento da vida útil e isolamento de tais equipamentos.

4.3. Sobrecarga de capacitores para compensação de potência reativa

As cargas conectadas ao sistema elétrico em geral, tanto na indústria como nos cenários residencial e comercial, possuem caráter predominantemente reativo indutivo. Para compensar o atraso da corrente gerado pelas cargas indutivas, são instalados capacitores para a correção de fator de potência nos sistemas elétricos [27].

Essa medida é muito comum para que o fator de potência de uma dada instalação ou região permaneça acima do limiar aceito pelo órgão regulador, para que as perdas por efeito Joule sejam reduzidas.

A reatância capacitiva é inversamente proporcional à frequência, enquanto a reatância indutiva é diretamente proporcional. Dessa forma, é possível que os capacitores instalados para compensação de reativos deixem passar correntes de grande intensidade em altas frequências, danificando-os intensamente, se os mesmos não forem projetados especialmente para suportarem estes altos valores de corrente [1].

Um outro efeito mais grave que pode ocorrer nos bancos de capacitores é o fenômeno da ressonância harmônica entre o banco de capacitores e a indutância parasita da fonte de alimentação a uma das frequências harmônicas. Quando isso ocorre, podem ser geradas sobretensões e sobrecorrentes que danificam severamente o equipamento, levando a prejuízos diversos [28].

É possível evitar tal ressonância adicionando uma indutância em série com o capacitor, ou banco de capacitores, de modo que o novo conjunto seja indutivo na frequência de ordem significativa mais baixa. Ou seja, o intuito é deslocar a frequência de ressonância para valores mais elevados, nos quais a amplitude das harmônicas seja desprezível [28].

4.4. Efeitos em dispositivos de proteção

Os dispositivos de proteção diferencial trabalham a partir do reconhecimento de picos e zeros de ondas de tensão ou corrente, supondo que estas são senoidais [29].

A presença de componentes harmônicas nos sinais de entrada de alguns equipamentos, como relés, faz com que estes pontos de referência sejam deslocados, implicando em uma perda de confiabilidade nestes dispositivos de proteção.

O desempenho dos relés na presença de componentes harmônicas, entretanto, não pode ser previsto, já que há diferenças de comportamento entre relés de fabricantes diferentes e até entre relés de mesmo fabricante e modelo.

Em sistemas elétricos com distorções harmônicas, pode ocorrer a falha de relés de proteção em situações de falta, bem como a atuação indevida dos mesmos, resultando em prejuízos para a rede e para os consumidores.

Para contornar este problema sugere-se a utilização de relés digitais que possuam a capacidade de calcular o valor eficaz do sinal de entrada utilizando um amplo espectro de frequências, em substituição aos relés eletromecânicos e eletromagnéticos convencionais [30].

Outros dispositivos de proteção estão sujeitos a falhas de operação devido à presença de distorção harmônica, como fusíveis e disjuntores. As correntes harmônicas são somadas à corrente na frequência fundamental, e os picos indesejados podem forçar a atuação destes dispositivos.

4.5. Os efeitos em 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 pela área externa de sua seção transversal [31].

Na frequência fundamental este efeito possui pequena significância, porém nas frequências acima de 350 Hz, ou seja, acima do sexto harmônico, esse efeito se mostra considerável, causando sobreaquecimento e perdas adicionais.

Em presença de correntes harmônicas deve-se levar em conta este efeito, reduzindo o carregamento nos cabos e dimensionando-os adequadamente.

Outro efeito que causa o sobreaquecimento de cabos é o efeito de proximidade, que consiste na redistribuição da corrente elétrica de condutores devido à influência do campo magnético de condutores próximos. Em cabos com condutores circulares, o efeito de proximidade é menor do que o efeito pelicular [32].

Os cabos de potência, utilizados na transmissão e distribuição de energia, podem ser submetidos a um *stress* de tensão e efeito corona que possibilitam a ruptura dielétrica, quando submetidos a ressonância harmônica [10].

Em [33] foi realizado um estudo em cabos isolados por polietileno reticulado via processos químicos, comumente denominados cabos XLPE. O estudo é sobre o comportamento da temperatura do cabo na presença de correntes harmônicas. Foi concluído que de fato há a redução da vida útil do mesmo.

4.6. Os efeitos em motores de indução

Os motores de indução trifásicos possuem o princípio de funcionamento semelhante aos transformadores trifásicos: as tensões dos enrolamentos rotóricos, assim como os enrolamentos secundários, são induzidas a partir das tensões de alimentação dos enrolamentos estatóricos, ou primários. Dessa forma, a alimentação de um motor de indução com uma fonte de tensão que contenha componentes harmônicas provoca também um aumento das perdas no núcleo por correntes de Foucault, e provoca também 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 isolamento dos condutores internos [34].

Os efeitos de sobreaquecimento dos motores diferem dependendo do tipo de rotor que a máquina possui. 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 isolamento como os rotores bobinados [35].

Além disso, há a presença de campos magnéticos harmônicos nos enrolamentos de 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 negativamente no rendimento do motor.

Vale lembrar que as componentes de sequência negativa são fasores que possuem sequência de fase invertida em relação às de sequência positiva. Campos girantes estatóricos harmônicos de sequência negativa induzem, portanto, tensões rotóricas harmônicas com polaridade invertida, interferindo no desempenho do motor.

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. Essa pulsação pode ser intolerável dependendo da aplicação da máquina [36].

Em geral, máquinas de grande inércia e altas potências não mostram alta sensibilidade à pulsação de torque, pois a inércia do eixo de rotação atua como um filtro eletromecânico para as oscilações causadas pelas componentes harmônicas [36].

Na presença de distorções harmônicas na fonte de alimentação, os motores devem ser dimensionados corretamente durante a fase de projeto, para que tais efeitos sejam minimizados e causem menos danos e perdas.

4.7. Os efeitos em equipamentos eletrônicos

Os equipamentos eletrônicos são susceptíveis a falhas de operação na presença de componentes harmônicos na forma de onda de tensão de alimentação. O funcionamento desses equipamentos é, geralmente, dependente da precisão do ponto de transição do sinal, ou seja, dos pontos nos quais a forma de onda cruza o zero, ou ainda de outros pontos específicos da forma de onda, como o pico [18].

As distorções harmônicas podem causar deslocamento do ponto de mudança do sinal, bem como do ponto no qual o sinal de uma fase se torna maior que o de outra fase. Esses instantes representam pontos críticos de diversos tipos de circuitos eletrônicos de controle, e as distorções harmônicas podem prejudicar o funcionamento adequado destes dispositivos.

Computadores e equipamentos similares, como controladores lógicos programáveis, muito utilizados em processos de automação e controle industrial, frequentemente requerem fontes alternadas com níveis de distorção harmônica total inferiores a 5% e com nível harmônico de distorção individual inferior a 3%. Altas ordens harmônicas podem causar mal funcionamento de equipamentos, e em alguns casos levar a sérias consequências, como acionamentos indevidos e medições incorretas de sinais, levando os programas de controle desses equipamentos a interpretações errôneas sobre o comportamento real do sistema [1].

Os equipamentos utilizados na área médica requerem, em geral, alta precisão no funcionamento, e intenso isolamento de componentes harmônicos. Em decorrência disso, são realizados diversos estudos de harmônicas em instalações médicas, e são instalados filtros para reduzir as distorções harmônicas a níveis toleráveis [1].

Em [37] foi realizado um estudo em uma instalação elétrica hospitalar, através da análise da qualidade da em pontos distintos da mesma. Observou-se que o problema mais agravante era o de distorções harmônicas. O estudo apresentou um guia para a instalação de novos equipamentos em fases de expansão da planta hospitalar analisada.

4.8. Considerações Finais sobre o Capítulo

Apesar das cargas geradoras de harmônicos estarem cada vez mais presentes nos sistemas elétricos, seja no campo residencial, comercial ou industrial, é necessário o conhecimento dos efeitos negativos que estas cargas podem causar a outros consumidores.

Neste capítulo foram apresentados alguns efeitos danosos causados pela presença de componentes harmônicas em sistemas elétricos. Tais danos justificam a necessidade de normas técnicas relativas à permissividade dessas componentes, bem como a devida fiscalização e garantia de padrões de qualidade nos PACs.

Capítulo 5

MEDIDAS MITIGADORAS DE ELEVADOS ÍNDICES DE DISTORÇÃO HARMÔNICA

Embora as cargas não lineares estejam cada vez mais presentes nos sistemas elétricos, existem métodos para reduzir os componentes harmônicos nesses sistemas, com o intuito de restaurar a integridade das formas de onda de tensão e corrente.

A análise harmônica de sistemas elétricos, por sua vez, requer inicialmente a identificação dos pontos críticos do sistema em relação à inserção de componentes harmônicos. Muitos estudos são feitos para detectar fontes de distorção harmônica, utilizando algoritmos computacionais avançados ou técnicas de redes neurais artificiais, como pode ser observado em [38] e [39].

Em [38] encontrou-se um estudo no qual é realizado um fluxo de carga harmônico reverso, com a finalidade de identificar as fontes de harmônicos em sistemas de distribuição de energia. Foi desenvolvido um programa chamado “*HARMFIND*”, que possui forte aplicabilidade, uma vez que identifica o tipo e a localização de harmônicos nos sistemas. Esta identificação é essencial para que as empresas responsáveis pelas redes intervenham de forma a mitigar os problemas.

Em [39] houve uma revisão das técnicas comuns de localização de fontes harmônicas e a apresentação de um novo método de localização de fontes múltiplas de harmônicos. As pesquisas acerca de novos algoritmos e técnicas de localização e identificação de fontes harmônicas são de alta valia para que a concessionária possa agir diretamente no problema a ser mitigado.

Quando as fontes harmônicas em um sistema elétrico são encontradas, deve-se propor soluções para a redução da distorção harmônica causada pelas mesmas.

A seguir serão apresentadas algumas técnicas de mitigação de harmônicos em determinados pontos do sistema elétrico. As principais técnicas são a implementação de filtros, que possuem como principal objetivo reduzir a amplitude de tensões e correntes de uma ou mais frequências harmônicas [40].

Os filtros podem ser conectados em série ou em paralelo, também denominados “em derivação”. Os filtros podem ser considerados ainda passivos, ativos ou híbridos. A aplicação de cada um é dependente do nível de distorção harmônicas encontrado no sistema e da viabilidade econômica da implementação do filtro [40].

Os filtros série possuem finalidade de representar uma alta impedância para as correntes harmônicas, ou seja, possuem função de bloqueio. Porém, toda a corrente que flui pelo ponto de instalação do filtro passa pelo mesmo, implicando em um projeto com custo elevado [40].

Os filtros em derivação, por sua vez, fornecem um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas, e são os tipos mais utilizados [40].

5.1. Filtros Passivos

Os filtros passivos são circuitos projetados com elementos passivos, ou seja, resistores, capacitores e indutores. São os tipos de filtro de custo mais baixo, e podem ser de duas categorias: série ou derivação [41].

Os filtros série são utilizados para evitar o acesso de correntes em determinadas frequências a certos pontos do sistema. São compostos, em geral, por um capacitor e um indutor em paralelo, e são raramente utilizados devido ao alto custo associado [41].

Os filtros passivos em derivação são caminhos de baixa impedância para correntes harmônicas. A utilização desses filtros serve para direcionar estas correntes em um sentido diferente do restante do circuito.

O projeto de filtros passivos pode ter como objetivo reduzir a influência de uma ordem harmônica específica ou de uma faixa de valores de frequência, dependendo das necessidades do ponto de inserção do filtro.

Em [41] foram apresentadas análises de causas e efeitos das harmônicas em um sistema elétrico teste, com enfoque no estudo detalhado da modelagem de filtros passivos, utilizando ferramentas computacionais como o MatLab®, MathCad® e PSPICE®. Tal estudo é complemento das simulações feitas no referido trabalho, e é de alta importância em termos de mitigação de harmônicos em sistemas elétricos.

Os procedimentos para o projeto de um filtro passivo, considerando os limites de distorções harmônicas impostos pelas normas nacionais e internacionais citadas no capítulo 2, podem ser encontrados em [42].

5.2. Filtros Ativos

Os filtros passivos são projetados para a compensação de uma ordem harmônica ou conjunto de ordens pré-determinadas. Porém, nos sistemas elétricos costuma-se encontrar um panorama inconstante referente aos harmônicos, resultado da conexão simultânea de diversas cargas não lineares [40].

Estas cargas apresentam componentes harmônicas variantes no tempo, o que torna difícil a previsão do conteúdo harmônico da instalação. A “previsão” do comportamento da carga é um foco de estudos recentes, e um desafio para o desenvolvimento de novos filtros ativos com maior rendimento [15].

Para solucionar este problema são utilizados filtros ativos série ou em derivação. Os filtros ativos são compostos por componentes passivos associados a dispositivos de controle digital.

Em um filtro ativo em derivação, um transformador de corrente é instalado de modo a reduzir a ordem de grandeza da corrente de carga a uma faixa de valores segura para a análise do conteúdo harmônico. A partir da forma de onda obtida e do espectro harmônico da onda de corrente, o bloco de controle produz, a partir de um gerador de corrente, uma réplica das correntes harmônicas, porém em sinal oposto. Este sinal gerado possui a finalidade de anular o efeito das correntes harmônicas inseridas na rede, fornecendo para a carga apenas a corrente na frequência fundamental. Estes filtros foram inicialmente propostos por Akagi, na configuração em paralelo em 1984 e série em 1988, em conjunto com o filtro paralelo [43][44].

Os filtros ativos em série funcionam de maneira similar aos filtros em derivação, por consistirem no conceito dual destes [15].

Em [45] foi proposta uma otimização de filtros ativos conectados em série em sistemas desbalanceados, para filtrar ativamente a corrente circulante no cabo neutro de um sistema trifásico a quatro fios.

Na prática, a compensação da corrente por filtros ativos pode reduzir em até 90% as componentes harmônicas de uma instalação, uma vez que a ação de controle não é realizada em tempo real, mas no ciclo posterior ao analisado [46].

Em contrapartida, os filtros ativos devem ter potência igual ou superior à carga linear a ser filtrada, o que pode ocasionar a inviabilidade econômica em sua implementação.[46]

Apesar de mais caros do que os filtros passivos, os filtros ativos possuem rendimento constante independentemente da variabilidade da carga não linear na qual o filtro for conectado [15].

Em [47] foram apresentados os desempenhos de filtros passivos e ativos para a redução de harmônicos em sistemas de distribuição. Os filtros foram comparados através de

simulação computacional, e foi ressaltado o diferencial dos filtros ativos de neutralizar faixas do espectro harmônico, enquanto os filtros passivos são geralmente projetados para ordens harmônicas previamente especificada durante a fase de projeto dos mesmos.

Em [48] encontrou-se um estudo de controle de corrente harmônica, utilizando compensadores de ressonância através de filtros ativos em derivação.

Em [49] foram projetados dois filtros ativos paralelos, com controle de corrente por valores médios instantâneos. Os controles foram feitos de duas maneiras: através do controle analógico tradicional e do controle digital utilizando um processador digital de sinais. Os filtros foram implementados, e os resultados experimentais comparados. Foi também apresentado um breve estudo dos filtros ativos aplicados na correção das componentes harmônicas de corrente.

Em [46] comparou-se um filtro passivo de 54 kVAr com um filtro ativo de 50 kVAr, que foram utilizados para reduzir os harmônicos de corrente injetados na rede elétrica por um retificador trifásico de 110 kVA. Nos resultados foi possível observar a maior eficiência do filtro ativo na mitigação dos harmônicos.

5.3. Filtros Híbridos

Com a finalidade de reduzir a potência a ser processada pelo filtro ativo, é possível utilizá-lo em associação com filtros passivos, de modo que a parte ativa atue apenas sobre as componentes não corrigidas pelo filtro passivo [50].

A utilização de filtros híbridos é uma medida de ponderação entre os resultados da mitigação de harmônicos e os custos envolvidos na implementação prática. A eficiência dos filtros híbridos é melhor do que a de filtros puramente passivos, e não necessitam da complexidade dos filtros puramente ativos. Dessa forma, são considerados medianos tanto em complexidade quanto em custos.

5.4. Transformadores de Isolamento

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 a fonte de alimentação [51].

A figura 13 mostra o esquema de ligações de um transformador delta-estrela.

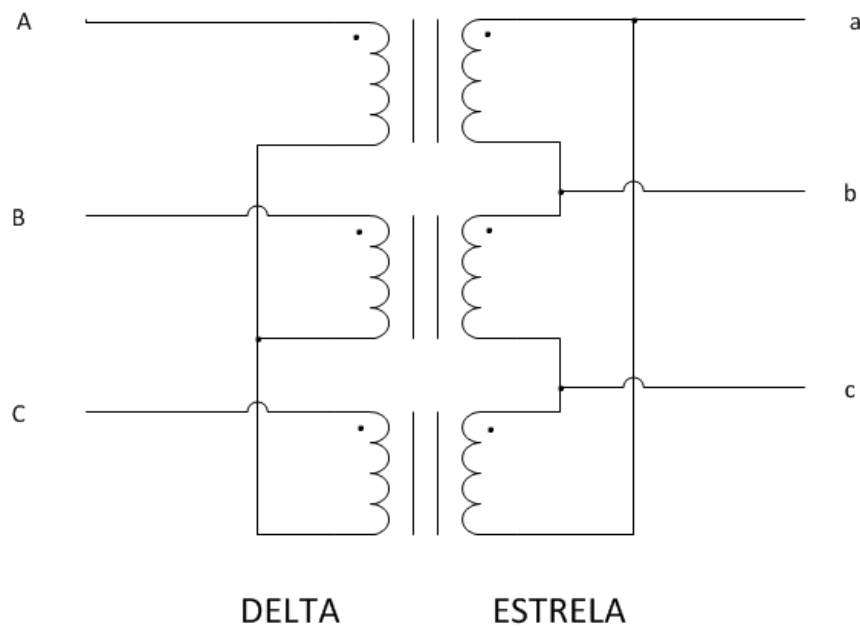


Figura 13 - Esquema de ligações de um transformador na configuração “delta-estrela”.

Apesar da corrente harmônica circulante no interior do enrolamento em triângulo se mostrar um problema para os projetistas de transformadores, uma vez que há um aumento de perdas ôhmicas e redução da vida útil do equipamento, é também uma vantagem para os projetistas das redes elétricas, devido ao isolamento das harmônicas de ordem múltipla de três no lado primário, no qual geralmente é adotada a conexão em triângulo [51].

Em [52] foi proposto um artifício para minimizar as correntes harmônicas de ordem múltipla de três em sistemas trifásicos a quatro condutores, utilizando uma combinação de dois transformadores: um possuindo impedância de sequência zero muito baixa, conectado em derivação, e outro possuindo impedância de sequência zero muito alta, conectado em série com a fonte harmônica. O primeiro propicia um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas nas frequências múltiplas de três, enquanto o segundo se comporta como um bloqueador destas correntes.

O mesmo efeito de isolamento pode ser encontrado em transformadores conectados em “zigue-zague”, que são autotransformadores na configuração estrela, com uma relação particular de fase [53].

A conexão “zigue-zague” é definida pela ligação trifásica dos enrolamentos, nos quais cada bobina de fase possui duas partes com defasamento. Este defasamento é normalmente de 120° , e as bobinas são conectadas a um terminal comum, ou seja, ao neutro [53].

A figura 14 mostra o esquema de ligações do transformador zigue-zague.

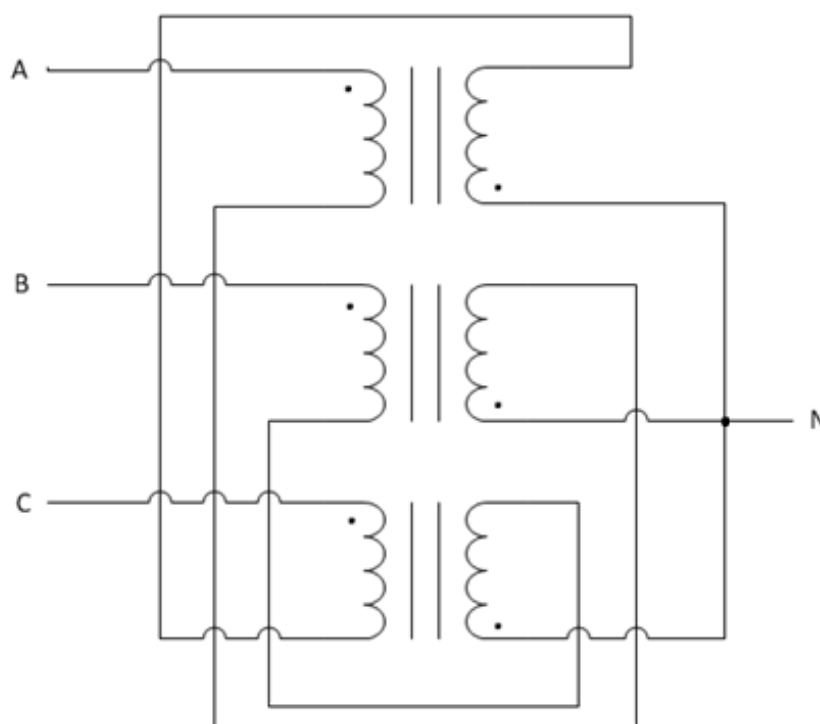


Figura 14 - Esquema de ligações de um transformador na configuração "zigue-zague".

Em [53] apresentou-se também uma análise do desempenho de um transformador na configuração zigue-zague na redução de componentes harmônicas em um sistema de distribuição, utilizando simulações no programa MatLab®. O sistema foi analisado na condição de balanço e desbalanço. Foi observado que as não linearidades do sistema reduziram significativamente com a utilização de transformadores zigue-zague, e o efeito de filtro de harmônicas de sequência zero ajudou no balanceamento das correntes de fase.

5.5. Considerações Finais sobre o Capítulo

Neste capítulo foram apresentadas algumas técnicas mitigadoras de harmônicos mais utilizadas nos sistemas elétricos. Vale ressaltar a importância da ponderação entre a necessidade real da aplicação de técnicas mitigadoras e os custos envolvidos.

Capítulo 6

ANÁLISE HARMÔNICA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Este capítulo apresenta uma análise computacional de um sistema de distribuição de energia elétrica, com cargas modeladas a partir de perfis harmônicos reais, para a execução do fluxo de carga harmônico na rede.

O intuito da análise computacional foi avaliar os impactos da inserção de cargas harmônicas em redes de distribuição através da ferramenta de fluxo de carga harmônico do programa DIgSILENT PowerFactory ®.

6.1. As cargas residenciais

No sistema analisado foram adotados quatro tipos de cargas residenciais cujos perfis harmônicos foram encontrados em [15].

De acordo com [15], os espectros harmônicos considerados foram obtidos por meio de medição, diretamente no ramal que alimenta o padrão do consumidor, no período de 24 horas. As medições foram realizadas utilizando-se um TC de janela junto ao instrumento de medição, e foram registradas de hora em hora a fim de obter-se a curva de consumo e distorção de corrente do consumidor.

Os consumidores foram posteriormente entrevistados sobre a quantidade de equipamentos eletrônicos que possuíam, validando a hipótese de que o índice de distorção harmônico é função crescente do consumo.

Foram considerados quatro consumidores, sendo um de baixo consumo, dois de médio consumo e um de alto consumo.

O consumo mensal médio das residências analisadas encontra-se na tabela 25.

Consumidor	Consumo Mensal Médio [kWh/mês]
BAIXO	89
MÉDIO 1	212
MÉDIO 2	296
ALTO	690

Tabela 25 - Consumo médio mensal de energia para os consumidores analisados em [15].

A definição dos patamares de consumo seguiu da seguinte forma:

- Consumo **BAIXO**: Abaixo de 200 kWh/mês;
- Consumo **MÉDIO**: Entre 200 kWh/mês e 500 kWh/mês;
- Consumo **ALTO**: Acima de 500 kWh/mês.

Na residência de baixo consumo havia apenas um televisor e um rádio como cargas harmônicas, sendo a iluminação constituída essencialmente por lâmpadas incandescentes. A alimentação era monofásica.

Na tabela 26 encontra-se o perfil harmônico da residência de baixo consumo. A medição foi realizada às 13:00h.

Nas residências de médio consumo havia alguns eletrodomésticos a mais, como utensílios de cozinha (batedeira, liquidificador, entre outros), computador, ventilador e lâmpadas fluorescentes compactas. A alimentação também era monofásica.

Nas tabelas 27 e 28 encontram-se os perfis harmônicos das residências de médio consumo. Ambas as medições foram realizadas às 13:00h.

Segue na tabela 29 a composição harmônica da residência de alto consumo, nas três fases. A medição foi realizada às 12:00h.

Nota-se que os padrões harmônicos adotados foram obtidos a partir das medições nos períodos de maior distorção harmônica, e não necessariamente de maior consumo de potência ativa no horizonte de 24 horas considerado em [15].

6.2. O sistema de distribuição

As cargas, cujos perfis harmônicos foram apresentados no item 6.1, foram conectadas ao sistema de distribuição encontrado em [54].

O sistema era composto por um transformador de 250 kVA que alimentava três ramos em paralelo. Os ramos são caracterizados pelos tipos de consumidores a eles conectados: no primeiro encontraram-se cargas residenciais, no segundo cargas industriais, e no terceiro cargas comerciais.

Ordem harmônica Baixo consumo	I(rms) = 0,857 A	
	DHT = 105,15 %	
	Módulo (%)	Ângulo (°)
1	100,00	0,22
3	79,83	-169,31
5	56,76	16,04
7	31,61	-158,61
9	10,62	22,66
11	3,00	106,33
13	6,55	-122,02
15	4,79	58,37
17	0,46	-124,27
19	2,38	-102,81
21	2,95	78,94
23	1,39	-105,43
25	0,54	17,92
27	1,55	134,46
29	1,42	-57,20
31	0,45	127,73

Tabela 26 - Perfil harmônico de residência de baixo consumo [15].

Ordem harmônica Médio 1	I(rms) = 1,259 A	
	DHT = 105,27 %	
	Módulo (%)	Ângulo (°)
1	100,00	0,45
3	80,03	10,78
5	57,48	16,47
7	33,03	21,89
9	12,03	22,75
11	2,29	87,31
13	6,37	121,33
15	5,06	119,58
17	1,33	116,86
19	1,97	75,89
21	2,83	78,99
23	1,85	77,37
25	0,48	0,23
27	1,25	53,21
29	1,42	52,06
31	0,53	38,32

Tabela 27 - Perfil harmônico de residência de médio consumo 1 [15].

Ordem harmônica Médio 2	I(rms) = 0,510 A	
	DHT = 121,48 %	
	Módulo (%)	Ângulo (°)
1	100,00	-6,31
3	82,73	-169,04
5	66,41	16,19
7	48,34	-155,97
9	28,24	33,49
11	12,48	-130,33
13	3,12	134,16
15	6,96	19,03
17	8,77	-144,18
19	6,57	48,35
21	3,15	-127,25
23	1,07	-163,19
25	2,52	55,44
27	3,29	-114,64
29	2,32	83,17
31	0,89	-89,40

Tabela 28 - Perfil harmônico de residência de médio consumo 2 [15].

Neste trabalho foram analisados os efeitos apenas de cargas com perfil residencial, ou seja, apenas o primeiro ramo do sistema de distribuição de [54] foi considerado.

A rede primária foi da classe de tensão de 20 kV, enquanto a rede secundária foi da classe de 400 V. As tensões consideradas foram entre linhas.

O diagrama unifilar da rede simulada foi apresentado na figura 15.

Os valores de potência ativa consumida por cada carga, bem como a localização das mesmas no sistema, foram apresentadas na tabela 30. Todas as cargas estão ligadas simultaneamente, e os valores de potência ativa apresentados na tabela 30 foram considerados constantes durante todas as simulações.

Os dados foram inseridos no programa através da modelagem das cargas, sendo fornecidos pelo usuário os dados de potência ativa e $\cos(\phi)$ (fator de potência calculado para a frequência fundamental).

Para o cálculo da distribuição das cargas entre os diferentes perfis harmônicos, foram considerados os valores de corrente eficaz medidos no ramal de entrada das residências amostradas em [15]. O detalhamento dos cálculos encontra-se no Apêndice A, juntamente com os dados do sistema elétrico.

Ordem	FASE A		FASE B		FASE C	
	I(rms) = 7,607 A		I(rms) = 1,962 A		I(rms) = 0,312 A	
	THD = 4,17%		THD = 6,08%		THD = 75,89 %	
	Mod. (%)	Ang. (°)	Mod. (%)	Ang. (°)	Mod. (%)	Ang. (°)
1	100,00	5,37	100,00	-130,78	100,00	89,94
3	3,64	83,43	4,49	68,21	43,30	27,53
5	1,49	-18,78	3,83	-73,43	40,33	-116,97
7	0,00	0,00	0,00	0,00	33,92	134,72
9	0,00	0,00	0,00	0,00	24,06	18,18
11	0,00	0,00	0,00	0,00	17,40	-99,08
13	0,00	0,00	0,00	0,00	12,03	148,18
15	0,00	0,00	0,00	0,00	6,70	35,80
17	0,00	0,00	0,00	0,00	3,50	-77,71
19	0,00	0,00	0,00	0,00	2,14	-168,33
21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,80	140,04
23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,98	64,15
25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,92	-25,44
27	0,00	0,00	0,00	0,00	1,50	-127,59
29	0,00	0,00	0,00	0,00	1,31	115,70
31	0,00	0,00	0,00	0,00	1,32	0,28

Tabela 29 - Perfil harmônico de residência de alto consumo [15].

Carga	Barra	Potência [kVA]
1	03	4,845
2	05	48,45
3	07	21,25
4	09	4,845
5	11	21,25

Tabela 30 - Localização e potência ativa consumida por cada carga.

6.3. O Fluxo de Carga

O fluxo de carga, ou fluxo de potência, é uma ferramenta utilizada nos sistemas elétricos de potência (SEPs) para analisar estaticamente o estado de determinada rede elétrica.

Esta ferramenta consiste na determinação dos valores de tensão, correntes e potências ativa e reativa da rede elétrica analisada, na frequência fundamental.

A modelagem estática se justifica devido à hipótese inicial de que não há fenômenos transitórios perturbando o estado da rede, assim não se faz necessária uma análise dinâmica do sistema em questão.

Outras características do fluxo de carga, bem como a modelagem matemática dos sistemas elétricos de potência e os métodos numéricos para a solução das inequações e posterior determinação do estado da rede, podem ser encontradas em [55-57]. Em [58] pode-se encontrar uma aplicação desta ferramenta em análise de contingência de redes.

Para o estudo corrente, no entanto, a análise do fluxo de carga foi utilizada apenas para verificar se há incongruências na simulação, no tocante a valores de tensão nas barras, cabeamento, potências ativas e reativas, entre outros fatores. Ou seja, para mostrar que os parâmetros do sistema teste são compatíveis com uma rede elétrica real.

As simulações da rede de distribuição de energia elétrica foram realizadas com o auxílio do programa DlgSILENT PowerFactory®, e o fluxo de carga foi realizado utilizando-se a ferramenta “Load Flow”, após a inserção dos modelos de linhas de distribuição, barramentos e cargas, bem como o transformador que conecta o ramo analisado ao restante do sistema elétrico. Para fins de simulação considerou-se que o transformador foi conectado a um barramento infinito.

6.4. O Fluxo de Carga Harmônico

Posteriormente utilizou-se a ferramenta “Harmonic Load Flow” do programa DlgSILENT PowerFactory® para a análise dos valores de distorção harmônica total em cada barra.

As equações apresentadas neste item foram referentes aos cálculos realizados pelo programa ao utilizar a ferramenta supracitada, e foram retiradas de [59].

A distorção harmônica individual de corrente é quantificada através do cálculo da Distorção Harmônica (HD – “Harmonic Distortion”) para uma referida frequência, conforme a equação 4.

$$HD_I(f_i) = \frac{|I(f_i)|}{|I(f_1)|} \quad (4)$$

Sendo $I(f_i)$ o valor da amplitude da corrente harmônica de ordem i , e $I(f_1)$ a amplitude da corrente na frequência fundamental.

A distorção harmônica total de corrente (THD – “Total Harmonic Distortion”) é calculada conforme a equação 5.

$$THD_I = \frac{1}{I_{ref}} \times \sqrt{I_{rms}^2 - I^2(f_1)} \quad (5)$$

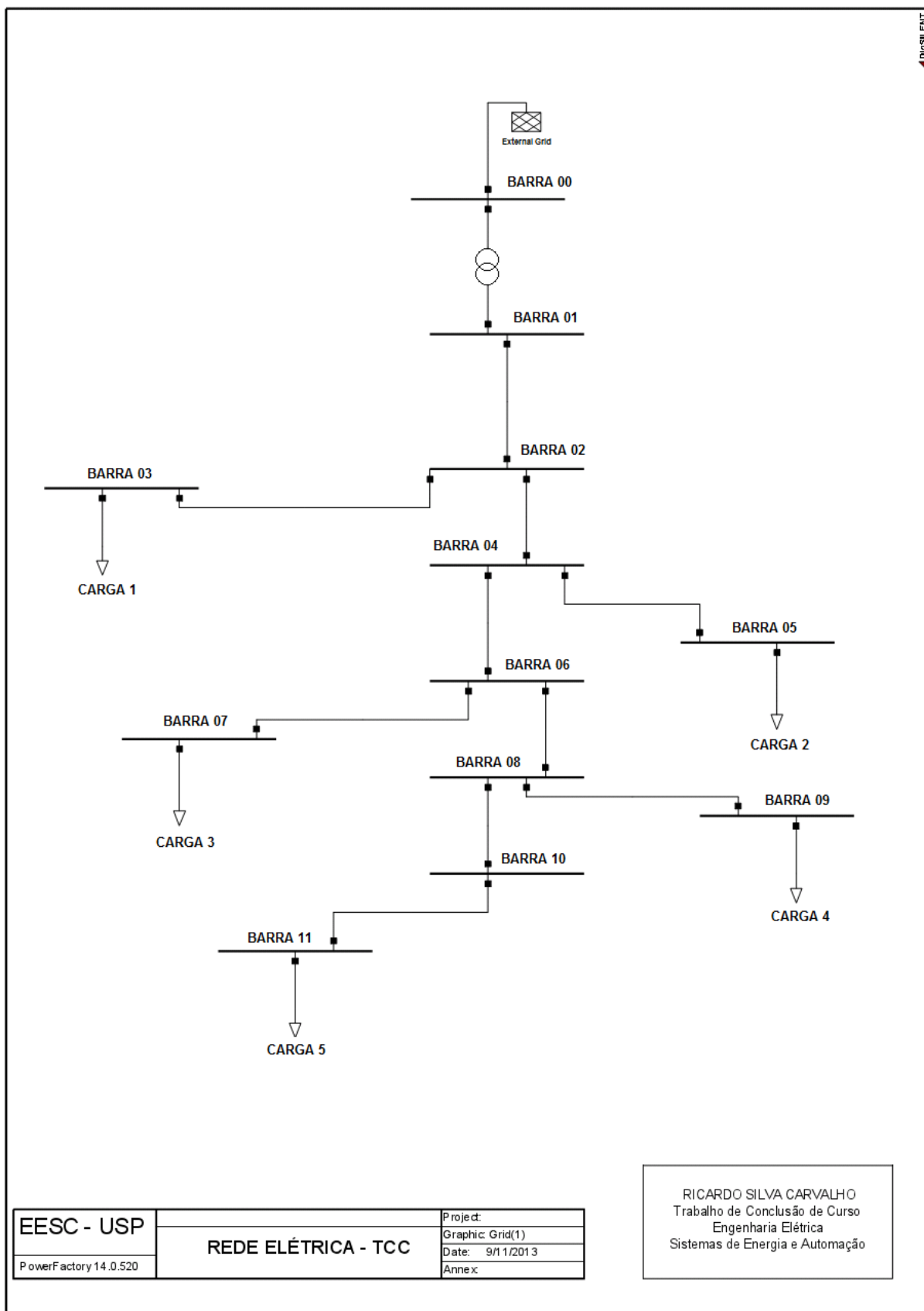


Figura 15 - Rede de distribuição utilizada nas simulações.

Sendo $I_{ref} = |I(f_1)|$ nos padrões IEEE e $I_{ref} = I_{rms}$ nos padrões DIN (*Deutsches Institut für Normung* – Instituto Alemão para Normalização).

Neste trabalho será utilizado o padrão IEEE para I_{ref} .

O valor I_{rms} é o valor eficaz da corrente, ou seja,

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{i=1}^n I^2(f_i)} \quad (6)$$

Um outro valor de importância no cálculo do fluxo de carga harmônico é o valor da potência total absorvida pelas componentes harmônicas de 1 a n:

$$P_{tot} = \sum_{i=1}^n P(f_i) \quad (7)$$

O valor de corrente a uma frequência harmônica f_h é calculado por

$$I_h = k_h \cdot e^{\Delta\varphi_h} \cdot I_1 \cdot e^{\varphi_1} \quad (8)$$

Sendo

$$k_h = \begin{cases} \frac{I_h}{I_1}, & \text{se balanceado} \\ \frac{I_{ah}}{I_{a1}}, & \text{para fase A, se desbalanceado} \\ \frac{I_{bh}}{I_{b1}}, & \text{para fase B, se desbalanceado} \\ \frac{I_{ch}}{I_{c1}}, & \text{para fase C, se desbalanceado} \end{cases}$$

$$\Delta\varphi_h = \begin{cases} \varphi_h - \varphi_1, & \text{se balanceado} \\ \varphi_{ah} - \varphi_{a1}, & \text{para fase A, se desbalanceado} \\ \varphi_{bh} - \varphi_{b1}, & \text{para fase B, se desbalanceado} \\ \varphi_{ch} - \varphi_{c1}, & \text{para fase C, se desbalanceado} \end{cases}$$

Os valores I_1 e φ_1 são os valores de módulo e fase da corrente na frequência fundamental, obtidos através da execução prévia do fluxo de carga normal, que é parte do fluxo de carga harmônico.

Os valores de resistência de cabos variam conforme a frequência, devido ao efeito pelicular citado no capítulo 4. Estes valores, assim como as indutâncias e capacitâncias, são parâmetros dependentes da frequência harmônica, e podem ser modelados no programa de duas formas distintas, descritas a seguir.

i. Característica Polinomial

Nesta forma de modelagem o programa adota uma aproximação polinomial para o comportamento do espectro harmônico.

Para a determinação do valor da resistência de um cabo a determinada frequência, é realizado o cálculo do fator multiplicativo $y(f_h)$, definido por:

$$y(f_h) = (1 - a) + a \cdot \left(\frac{f_h}{f_1}\right)^b \quad (9)$$

Os valores das constantes a e b são entradas do usuário para ajustar a influência harmônica nos parâmetros.

O fator multiplicativo $y(f_h)$ é expresso como uma porcentagem do parâmetro analisado. Um valor de resistência, por exemplo, a uma dada frequência de operação, é calculado pela equação 10:

$$R(f_h) = R \times y(f_h) \quad (10)$$

Sendo R o valor da resistência na frequência fundamental de operação.

ii. Tabela de Frequências

Neste modo de modelagem os valores dos parâmetros são calculados a partir de uma tabela de frequências harmônicas fornecida pelo usuário. Esta tabela contém as ordens harmônicas consideradas, bem como as intensidades dos harmônicos expressos em porcentagem da componente fundamental.

Este tipo de modelagem requer o conhecimento prévio do perfil harmônico da fonte inserida na simulação.

Como as cargas residenciais consideradas na análise computacional deste trabalho são conhecidas em termos de assinatura harmônica de corrente, a modelagem dos parâmetros da rede simulada foi feita a partir da tabela de frequências.

A formulação matemática do fluxo de carga harmônico em sistemas trifásicos desequilibrados pode ser encontrada em [60].

Em [61] foram encontradas as formulações para o fluxo de carga harmônico monofásico e trifásico, assumindo a hipótese de balanceamento do sistema.

Em [62] encontrou-se um método rápido para a execução do fluxo de carga harmônico, com o intuito de realizar uma análise harmônica em tempo real no sistema de distribuição industrial poupando esforço computacional.

É relevante o fato de que o sistema de distribuição analisado neste trabalho é radial, e as cargas foram conectadas diretamente ao alimentador, sem a conexão de transformadores de isolamento, que poderiam filtrar as correntes harmônicas e evitar a perda de qualidade da energia fornecida a cargas a montante.

Apesar da ausência dos transformadores de isolamento nos pontos de acoplamento simulados, as impedâncias das ramificações do alimentador amortecem as harmônicas de ordem superior, uma vez que a impedância da linha, que possui característica indutiva, aumenta de acordo com a frequência.

Dessa forma, para correntes harmônicas de ordem elevada, a alta impedância da linha amortece o efeito de queda de tensão harmônica na mesma.

6.5. Análise dos Resultados

Foram feitos cinco estudos de caso para avaliar os diferentes perfis harmônicos simulados nas cargas do sistema de distribuição. As potências ativas das cargas foram mantidas constantes conforme o sistema original, o que sugere que cada carga representa um grupo de residências com os perfis harmônicos simulados.

Em cada estudo foram avaliadas as tensões nas barras do sistema, inicialmente desconsiderando as componentes harmônicas, para posterior comparação gráfica com a presença de distorções harmônicas.

Além disso, foram levantados os gráficos de distorção harmônica total de tensão por fase em cada barra do sistema, e de distorção harmônica total de corrente por fase no alimentador principal.

Foram levantados, por fim, os valores de distorção individual de tensão por barra, em cada fase do sistema.

i. Estudo 1

Neste estudo todas as cargas do sistema são de perfil harmônico de alto consumo. É importante ressaltar que o desbalanço acentuado entre as fases da residência portadora do perfil harmônico de alto consumo medido permaneceu na simulação.

ii. Estudo 2

Neste estudo todas as cargas do sistema são de perfil harmônico de médio consumo. Como há dois perfis harmônicos nesta categoria, os mesmos foram atribuídos às cargas de acordo com a tabela 31.

Carga	Perfil Harmônico		
	Fase A	Fase B	Fase C
1	Médio 1	Médio 1	Médio 1
2	Médio 2	Médio 2	Médio 2
3	Médio 1	Médio 2	Médio 1
4	Médio 2	Médio 1	Médio 2
5	Médio 1	Médio 2	Médio 1

Tabela 31 - Distribuição dos perfis harmônicos no estudo 2.

Devido à distribuição não homogênea das cargas entre as fases, o sistema de distribuição é considerado desbalanceado.

iii. Estudo 3

Neste estudo todas as cargas do sistema são de perfil harmônico de baixo consumo. Como este perfil é monofásico e único, as cargas do sistema de distribuição foram simuladas com o mesmo perfil harmônico nas três fases, e a potência de cada carga igualmente distribuída entre as fases.

iv. Estudo 4

Neste estudo as cargas possuem perfis harmônicos diferentes, de modo que as cargas que drenam maior potência foram simuladas com perfil harmônico de alto consumo, as cargas de potência intermediária foram simuladas com perfil harmônico de médio consumo, e as cargas de menores potências foram simuladas com perfil harmônico de baixo consumo.

A distribuição dos perfis harmônicos neste estudo encontra-se na tabela 32.

Carga	Perfil Harmônico		
	Fase A	Fase B	Fase C
1	Baixo	Baixo	Baixo
2	Alto (Fase A)	Alto (Fase B)	Alto (Fase C)
3	Médio 1	Médio 1	Médio 1
4	Baixo	Baixo	Baixo
5	Médio 2	Médio 2	Médio 2

Tabela 32 - Distribuição dos perfis harmônicos no estudo 4.

v. Estudo 5

Neste estudo buscou-se analisar a influência do carregamento do transformador sobre os valores de distorção harmônica total de tensão nas barras do sistema.

Ao invés de variar a potência total do sistema, alterou-se na simulação o valor de potência nominal do transformador mantendo o consumo das cargas constante, obtendo-se 4 casos, conforme indicados na Tabela 33.

Caso	Potência Nominal [kVA]	Carregamento [%]
1	250	56,34
2	200	70,43
3	150	93,92
4	100	140,93

Tabela 33 - Detalhamento dos casos referentes ao estudo 5.

6.6. A simulação computacional

O programa DlgSILENT PowerFactory® possui uma interface gráfica sugestiva e relativamente simples. A rede elétrica é representada por diagrama unifilar, e os elementos são inseridos através de blocos.

As principais ferramentas são encontradas nos botões de acesso rápido, apresentado na figura 16.



Figura 16 - Botões de acesso rápido do programa DlgSILENT PowerFactory®.

A seta vermelha da esquerda indica o ícone relativo ao fluxo de carga, e a seta da direita indica o fluxo de carga harmônico. Estas foram as ferramentas utilizadas para a obtenção dos resultados deste trabalho.

6.6.1. Parâmetros dos cabos

A cada trecho do sistema o usuário deve fornecer os dados de cabeamento, como o comprimento do cabo, a resistência e reatância do mesmo, o número de condutores e o modelo equivalente utilizado. O programa possui uma biblioteca com diversos tipos de cabos, uma ampla faixa de tensão nominal, porém como o sistema teste simulado neste trabalho foi encontrado em [54], os parâmetros dos cabos foram inseridos manualmente.

A janela na qual são inseridos os parâmetros dos cabos está apresentada na figura 17.

6.6.2. Os parâmetros das cargas

As cargas trifásicas simuladas foram consideradas fontes de corrente, com potência ativa e $\cos\phi$ constantes.

Foram inseridos os perfis harmônicos de corrente de cada fase na guia “Harmonics”, como pode ser observado na figura 18.

Nota-se que foi configurado o perfil harmônico de cada fase da carga, entrando com os dados da fração da componente fundamental de cada harmônico e o ângulo correspondente.

No caso de cargas monofásicas deve-se apenas inserir os dados na fase em questão.

Na figura 19 pode-se ver a guia de potências da carga. Neste caso foi inserida uma carga trifásica desbalanceada, e os dados inseridos foram de potência ativa e fator de potência por fase.

Figura 17 - Janela do programa DlgSILENT PowerFactory® para inserção dos parâmetros dos cabos.

Harmonic Order	Ia _h /Ia ₁	Ib _h /Ib ₁	Ic _h /Ic ₁	phiA _h -phiA ₁	phiB _h -phiB ₁	phiC _h -phiC ₁
1	100	100	100	5,37	130,78	
2	3,64	4,49	43,3	83,43	68,21	
3	1,49	3,83	40,33	-18,78	-73,43	
4	0	0	33,92	0	0	
5	0	0	24,06	0	0	
6	11	0	17,4	0	0	
7	13	0	12,03	0	0	
8	15	0	6,7	0	0	
9	17	0	3,5	0	0	
10	19	0	2,14	0	0	
11	21	0	0,8	0	0	
12	23	0	0,98	0	0	
13	25	0	0,92	0	0	

Figura 18 - Janelas do programa DlgSILENT PowerFactory® para a inserção dos perfis harmônicos.

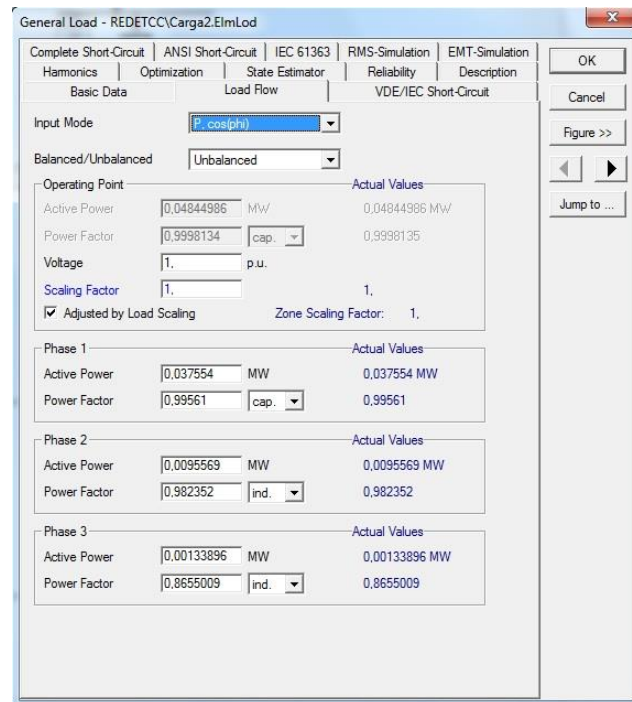


Figura 19 - Janela do programa DlgSILENT PowerFactory® para a inserção dos dados de potência de uma carga.

6.6.3. Fluxo de Carga

Nas opções da ferramenta “*Load Flow*”, apresentadas na figura 20, foi selecionada a opção de fluxo de carga desbalanceado, na frequência fundamental de 60 Hz.

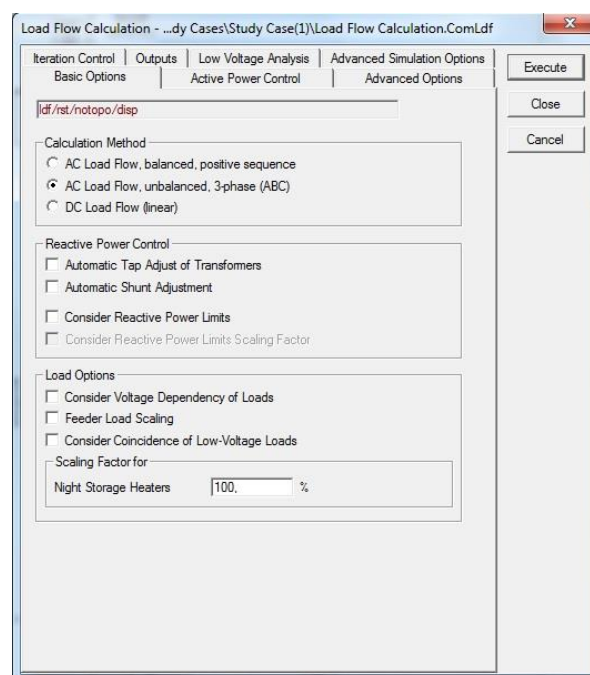


Figura 20 - Opções da ferramenta “*Load Flow*” do programa DlgSILENT PowerFactory®.

6.6.4. Fluxo de Carga Harmônico

Nas opções da ferramenta “*Harmonic Load Flow*”, apresentadas na figura 21, foi selecionada a opção de fluxo de carga harmônico trifásico, desbalanceado, e calculado em todas as frequências do espectro.

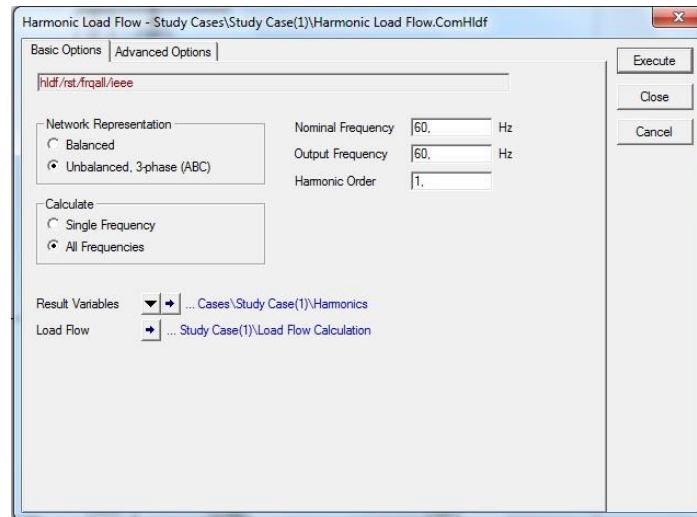


Figura 21 - Opções da ferramenta "*Harmonic Load Flow*", do programa DlgSILENT PowerFactory®.

Capítulo 7

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos a partir das simulações dos diferentes estudos foram comparados com os limites estabelecidos pelo PRODIST, que foram apresentados no capítulo 2.

A apresentação dos resultados dos cinco estudos foi feita de duas maneiras: através de tabelas e de gráficos de barras. Nas tabelas de resultados, os valores contidos em células de fundo verde satisfazem os limites estabelecidos pelo PRODIST, ao passo que os contidos em células de fundo vermelho extrapolam os mesmos.

Os gráficos de barras foram confeccionados de modo a permitir uma melhor visualização do comportamento da distorção harmônica ao longo das barras do alimentador.

Os valores de DHT de tensão são referentes às tensões nas barras indicadas. Os valores de DHT de corrente, por sua vez, dizem respeito à corrente que entra em cada barra do alimentador principal, ou seja, nas barras 1, 2, 4, 6 e 8.

7.1. Estudo 1

As cargas simuladas neste estudo apresentaram perfil harmônico real medido em uma residência de alto consumo, respeitando a ordem das fases, isto é, não houve tentativa de equilibrar as fases do sistema.

7.1.1. Tensões nas barras

Nas tabelas 34 e 35 pode ser avaliado o efeito da presença de harmônicos no sistema, através da comparação dos valores eficazes de tensão nas barras na ausência e na presença de componentes harmônicos no fluxo de carga.

A tabela 34 apresenta os valores de tensão das barras desconsiderando o efeito dos harmônicos, enquanto a tabela 35 apresenta os resultados do fluxo de carga harmônico, considerando as distorções no cálculo das tensões eficazes das barras.

Fluxo de Carga – Tensões [p.u.]												
Barra	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Fase A	1,0000	1,0006	0,9993	0,9954	0,9934	0,9766	0,9877	0,9839	0,9830	0,9791	0,9817	0,9754
Fase B	1,0000	0,9916	0,9696	0,9642	0,9591	0,9321	0,9487	0,9430	0,9401	0,9346	0,9378	0,9287
Fase C	1,0000	0,9961	0,9911	0,9899	0,9887	0,9827	0,9863	0,9851	0,9843	0,9832	0,9838	0,9819

Tabela 34 - Fluxo de carga - Estudo 1.

Fluxo de Carga Harmônico – Tensões [p.u.]												
Barra	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Fase A	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
Fase B	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
Fase C	1,0000	1,0045	1,0222	1,0267	1,0309	1,0544	1,0396	1,0446	1,0470	1,0519	1,0491	1,0573

Tabela 35 - Fluxo de carga harmônico - Estudo 1.

Nos gráficos da figura 22 observa-se claramente o efeito das componentes harmônicas nas tensões das barras do sistema. Quando os harmônicos são considerados, ocorre uma elevação da tensão eficaz das barras.

Na fase B, desconsiderando o efeito dos harmônicos, houve significativa queda de tensão a partir da barra 5, e as cargas conectadas a jusante não foram alimentadas com um nível de tensão tolerável. Ou seja, as barras de 5 a 11 possuem nível de tensão abaixo de 0,95 p.u.. Uma possível solução para este problema seria a correta distribuição das fases entre as cargas, de maneira a equilibrar o sistema e evitar a sobrecarga da fase B isolada, visto que as fases A e C do sistema sofreram pequenas quedas de tensão ao longo do alimentador.

Nota-se que o efeito dos harmônicos nas tensões das barras foi mais acentuado na fase C devido ao perfil harmônico simulado, no qual há um evidente desbalanço de carga entre as fases.

Este aumento considerável do valor de tensão nos barramentos não é desejável, pois não se deve extrapolar a marca de 1,05 p.u., o que ocorre nas barras 5 e 11, na fase C. O nível de tensão muito superior ao nominal pode danificar equipamentos conectados aos barramentos em questão.

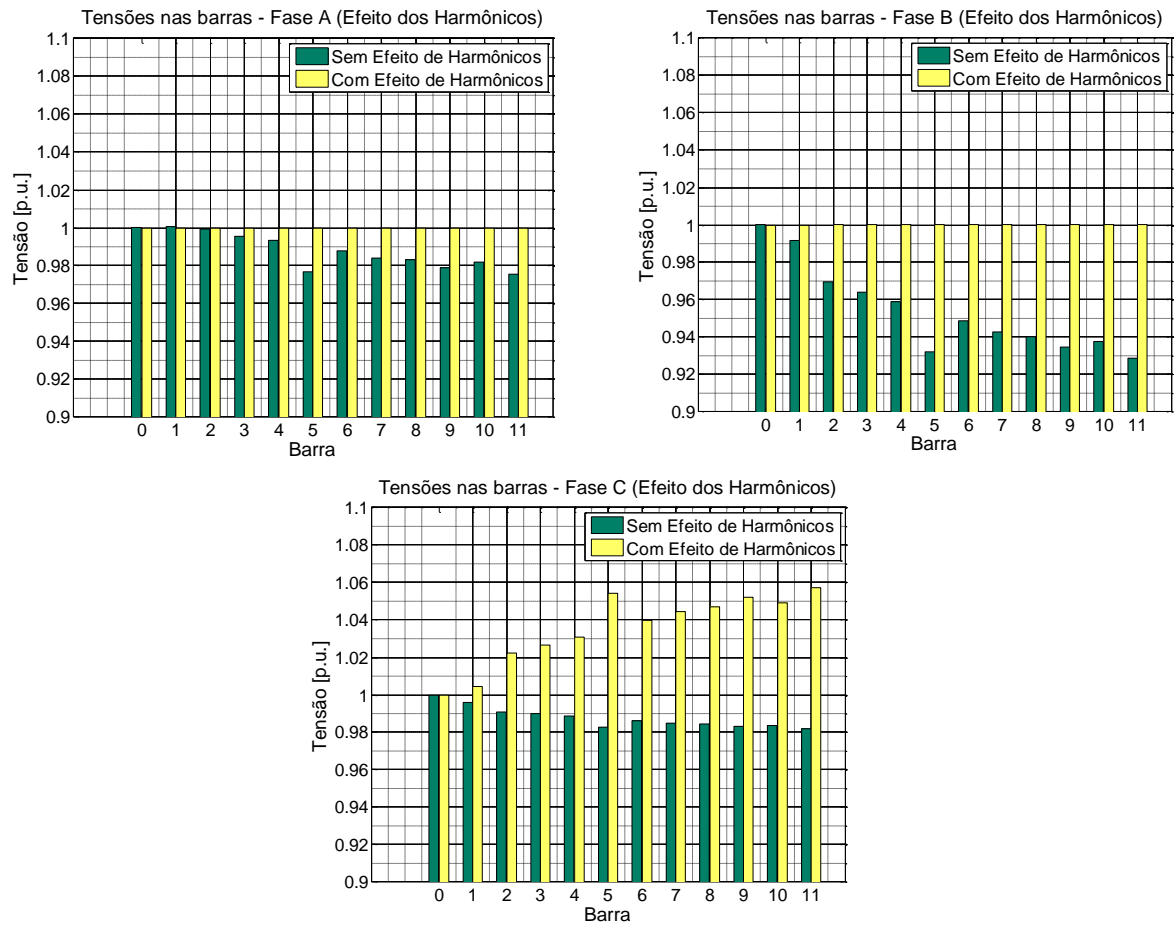


Figura 22 - Gráficos de tensões eficazes - Estudo 1.

7.1.2. Distorções Harmônicas Totais de Tensão e Corrente

Nas tabelas 36 e 37 encontram-se, respectivamente, os valores de distorção harmônica total de tensão e corrente nas barras indicadas.

Nos gráficos da figura 23 pode-se observar o desbalanço de cargas harmônicas entre as fases das cargas. A fase C apresenta uma quantidade muito maior de componentes harmônicas, e seu índice de distorção harmônica total é expressivamente maior do que as outras fases.

DHT - Tensão [%]												
Barra	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Fase A	0,0013	1,0764	1,3449	1,3592	1,4794	1,7289	1,6152	1,6505	1,7308	1,7519	1,7625	1,8114
Fase B	0,0004	1,3121	1,6570	1,6792	1,8325	2,1687	2,0119	2,0615	2,1653	2,1966	2,2076	2,2771
Fase C	0,0014	2,2238	2,7557	2,7760	3,0183	3,4773	3,2814	3,3419	3,5031	3,5330	3,5638	3,6412

Tabela 36 - Distorção harmônica total de tensão - Estudo 1.

Barra	DHT - Corrente [%]				
	1	2	4	6	8
Fase A	8,26	8,26	8,27	8,27	8,29
Fase B	8,63	8,63	8,62	8,64	8,60
Fase C	52,86	52,86	52,86	52,87	52,84

Tabela 37 - Distorção harmônica total de corrente - Estudo 1.

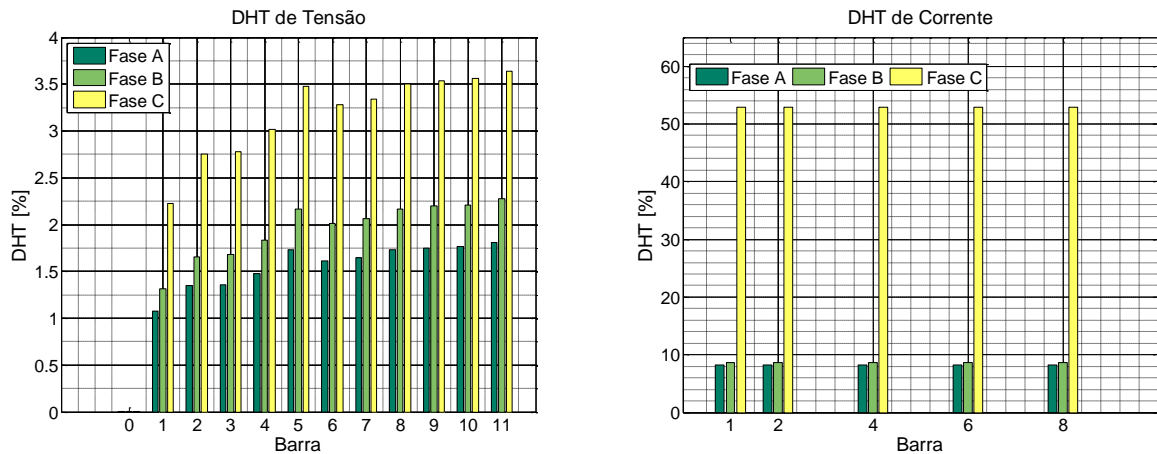


Figura 23 - Gráficos de DHT de tensão e corrente - Estudo 1.

Apesar da discrepância entre os valores de distorção harmônica total entre as fases, tanto em tensão quanto em corrente, neste estudo não há extrapolação dos limites de distorção harmônica de tensão impostos pelo PRODIST. Vale lembrar que os limites estabelecidos pelo PRODIST são referentes apenas aos valores de distorção harmônica de tensão.

7.1.3. Distorções Individuais de Tensão

Neste estudo também não foi observada extrapolação dos limites de distorção individual de tensão impostos pelo PRODIST, conforme pode ser observado nas tabelas 38, 39 e 40 e nos gráficos da figura 24.

Distorções Harmônicas Individuais de Tensão [%] - Fase A												
Ordem	Barra 00	Barra 01	Barra 02	Barra 03	Barra 04	Barra 05	Barra 06	Barra 07	Barra 08	Barra 09	Barra 10	Barra 11
3	0,0004	0,4278	0,5430	0,5540	0,6049	0,7378	0,6690	0,6906	0,7245	0,7413	0,7399	0,7735
5	0,0005	0,3125	0,3913	0,3954	0,4312	0,5073	0,4716	0,4823	0,5065	0,5134	0,5161	0,5319
7	0,0006	0,5163	0,6439	0,6500	0,7071	0,8215	0,7708	0,7866	0,8246	0,8335	0,8394	0,8606
9	0,0006	0,4708	0,5862	0,5912	0,6429	0,7434	0,6998	0,7133	0,7479	0,7549	0,7610	0,7786
11	0,0005	0,4161	0,5177	0,5219	0,5674	0,6544	0,6172	0,6287	0,6591	0,6649	0,6706	0,6854
13	0,0004	0,3400	0,4228	0,4261	0,4632	0,5334	0,5036	0,5128	0,5376	0,5421	0,5470	0,5587
15	0,0003	0,2185	0,2716	0,2736	0,2975	0,3423	0,3233	0,3292	0,3451	0,3479	0,3511	0,3585
17	0,0002	0,1293	0,1607	0,1619	0,1760	0,2024	0,1913	0,1947	0,2042	0,2058	0,2077	0,2120
19	0,0001	0,0884	0,1098	0,1106	0,1202	0,1382	0,1307	0,1330	0,1394	0,1405	0,1418	0,1448
21	0,0000	0,0365	0,0454	0,0457	0,0497	0,0571	0,0540	0,0549	0,0576	0,0580	0,0586	0,0598
23	0,0001	0,0490	0,0608	0,0613	0,0666	0,0765	0,0724	0,0737	0,0772	0,0778	0,0786	0,0802
25	0,0001	0,0500	0,0621	0,0625	0,0680	0,0781	0,0738	0,0751	0,0788	0,0794	0,0801	0,0818
27	0,0001	0,0880	0,1093	0,1101	0,1196	0,1374	0,1300	0,1323	0,1387	0,1397	0,1410	0,1439
29	0,0001	0,0825	0,1025	0,1032	0,1122	0,1288	0,1219	0,1240	0,1300	0,1310	0,1323	0,1349
31	0,0001	0,0888	0,1104	0,1111	0,1208	0,1387	0,1312	0,1336	0,1400	0,1411	0,1424	0,1453

Tabela 38 - Distorções individuais de tensão na fase A - Estudo 1.

Distorções Harmônicas Individuais de Tensão [%] - Fase B												
Ordem	Barra0	Barra01	Barra 02	Barra03	Barra04	Barra05	Barra06	Barra07	Barra08	Barra09	Barra10	Barra11
3	0,0002	0,4266	0,5470	0,5598	0,6123	0,7547	0,6807	0,7046	0,7398	0,7584	0,7562	0,7928
5	0,0003	0,7911	1,0005	1,0154	1,1077	1,3161	1,2177	1,2491	1,3116	1,3320	1,3376	1,3818
7	0,0000	0,5267	0,6636	0,6710	0,7324	0,8608	0,8024	0,8207	0,8623	0,8731	0,8787	0,9039
9	0,0000	0,4803	0,6042	0,6104	0,6660	0,7789	0,7286	0,7443	0,7820	0,7908	0,7967	0,8178
11	0,0000	0,4245	0,5335	0,5388	0,5877	0,6857	0,6425	0,6560	0,6892	0,6965	0,7020	0,7199
13	0,0000	0,3468	0,4357	0,4399	0,4798	0,5589	0,5243	0,5351	0,5622	0,5679	0,5726	0,5868
15	0,0000	0,2229	0,2799	0,2825	0,3081	0,3586	0,3366	0,3435	0,3609	0,3645	0,3675	0,3765
17	0,0000	0,1319	0,1657	0,1672	0,1823	0,2121	0,1992	0,2032	0,2135	0,2156	0,2174	0,2227
19	0,0000	0,0901	0,1132	0,1142	0,1246	0,1448	0,1360	0,1388	0,1458	0,1472	0,1485	0,1520
21	0,0000	0,0372	0,0467	0,0472	0,0514	0,0598	0,0562	0,0573	0,0602	0,0608	0,0613	0,0628
23	0,0000	0,0500	0,0627	0,0633	0,0690	0,0802	0,0754	0,0769	0,0807	0,0815	0,0822	0,0842
25	0,0000	0,0510	0,0640	0,0645	0,0704	0,0818	0,0769	0,0784	0,0824	0,0832	0,0839	0,0859
27	0,0000	0,0897	0,1126	0,1136	0,1239	0,1440	0,1353	0,1380	0,1450	0,1464	0,1477	0,1511
29	0,0000	0,0842	0,1056	0,1066	0,1162	0,1350	0,1269	0,1294	0,1360	0,1372	0,1385	0,1417
31	0,0000	0,0906	0,1137	0,1147	0,1251	0,1454	0,1366	0,1393	0,1464	0,1478	0,1491	0,1526

Tabela 39 - Distorções individuais de tensão na fase B - Estudo 1.

Distorções Harmônicas Individuais de Tensão [%] - Fase C												
Ordem	Barra0	Barra01	Barra 02	Barra03	Barra04	Barra05	Barra06	Barra07	Barra08	Barra09	Barra10	Barra11
3	0,0004	0,6065	0,7777	0,7944	0,8707	1,0739	0,9679	1,0014	1,0525	1,0789	1,0760	1,1285
5	0,0007	0,9837	1,2441	1,2613	1,3776	1,6374	1,5143	1,5530	1,6316	1,6569	1,6640	1,7195
7	0,0006	1,0534	1,3271	1,3420	1,4649	1,7216	1,6049	1,6413	1,7245	1,7462	1,7575	1,8078
9	0,0006	0,9606	1,2083	1,2207	1,3319	1,5578	1,4572	1,4886	1,5639	1,5816	1,5933	1,6356
11	0,0005	0,8491	1,0671	1,0775	1,1755	1,3714	1,2851	1,3120	1,3784	1,3930	1,4041	1,4398
13	0,0004	0,6937	0,8714	0,8797	0,9596	1,1179	1,0486	1,0702	1,1243	1,1358	1,1452	1,1736
15	0,0003	0,4457	0,5598	0,5650	0,6162	0,7173	0,6732	0,6869	0,7217	0,7289	0,7350	0,7530
17	0,0002	0,2639	0,3313	0,3344	0,3647	0,4242	0,3983	0,4064	0,4269	0,4311	0,4348	0,4453
19	0,0001	0,1803	0,2263	0,2284	0,2491	0,2896	0,2721	0,2775	0,2916	0,2944	0,2970	0,3041
21	0,0000	0,0745	0,0935	0,0943	0,1029	0,1196	0,1124	0,1146	0,1204	0,1216	0,1226	0,1256
23	0,0001	0,0999	0,1254	0,1265	0,1380	0,1604	0,1507	0,1537	0,1615	0,1630	0,1645	0,1684
25	0,0001	0,1019	0,1279	0,1291	0,1408	0,1636	0,1537	0,1568	0,1647	0,1663	0,1678	0,1717
27	0,0001	0,1795	0,2252	0,2273	0,2478	0,2879	0,2706	0,2760	0,2900	0,2927	0,2953	0,3023
29	0,0001	0,1683	0,2112	0,2131	0,2324	0,2700	0,2538	0,2588	0,2719	0,2745	0,2769	0,2834
31	0,0001	0,1813	0,2275	0,2295	0,2503	0,2907	0,2733	0,2787	0,2928	0,2956	0,2982	0,3052

Tabela 40 - Distorções individuais de tensão na fase C - Estudo 1.

Segue na figura 24 a representação gráfica dos valores de distorções individuais de tensão nas barras do sistema. Vale observar que a distorção aumenta ao longo do alimentador, havendo um pico na barra 5, que é a de maior carga.

A redistribuição das cargas entre as fases amenizaria os efeitos de queda de tensão ao longo da rede, uma vez que as fases seriam igualmente carregadas. Relativamente às distorções harmônicas, no entanto, não há necessidade de tomar nenhuma medida corretiva neste caso.

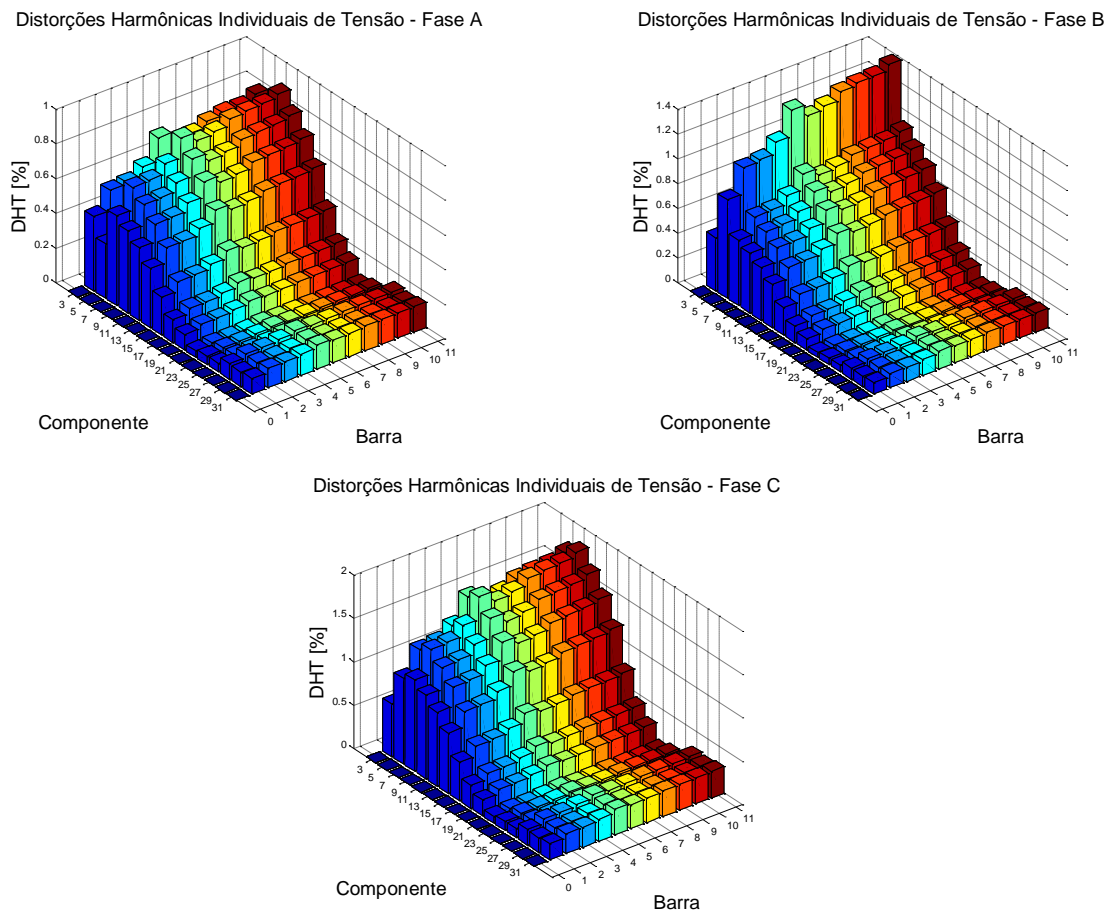


Figura 24 - Gráficos de distorção harmônica individual de tensão nas barras – Estudo 1.

7.2. Estudo 2

Neste estudo foram simuladas cargas com dois perfis harmônicos reais, medidos em residências de médio consumo.

As cargas residenciais medidas eram monofásicas, e na simulação houve uma distribuição aleatória desses perfis harmônicos entre as fases. Tal distribuição foi apresentada no item 6.5, tabela 31.

7.2.1. Tensões nas barras

Nas tabelas 41 e 42 encontram-se os valores de tensão eficaz das barras do sistema, e a comparação entre esses valores encontra-se nos gráficos da figura 25.

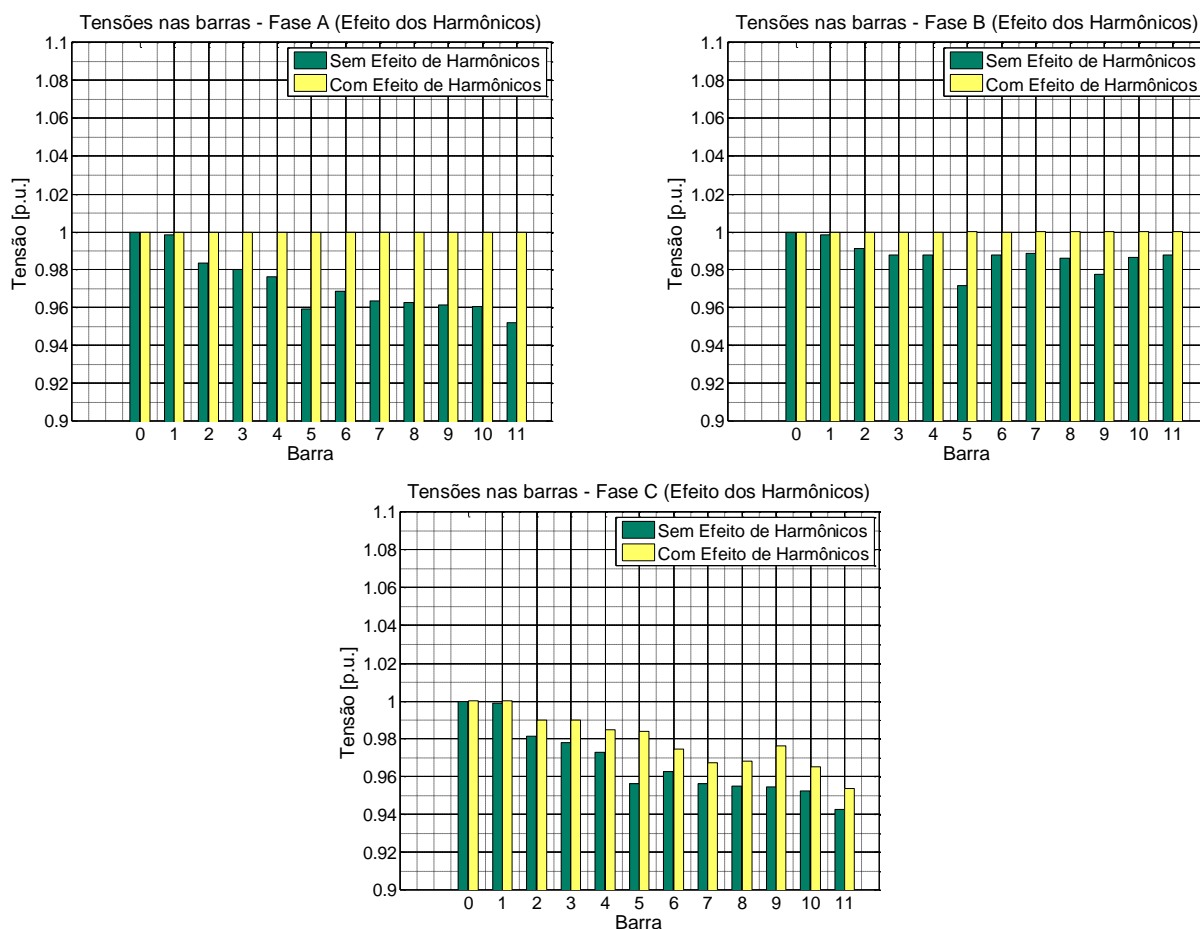
Fluxo de Carga – Tensões [p.u.]												
Barra	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Fase A	1,0000	0,9984	0,9835	0,9801	0,9764	0,9594	0,9687	0,9634	0,9626	0,9614	0,9608	0,9520
Fase B	1,0000	0,9987	0,9914	0,9880	0,9881	0,9716	0,9877	0,9886	0,9863	0,9776	0,9866	0,9881
Fase C	1,0000	0,9991	0,9816	0,9781	0,9731	0,9563	0,9627	0,9564	0,9550	0,9545	0,9524	0,9426

Tabela 41 - Fluxo de carga - Estudo 2.

Fluxo de Carga Harmônico – Tensões [p.u.]												
Barra	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Fase A	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
Fase B	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
Fase C	1,0000	1,0004	0,9901	0,9900	0,9849	0,9842	0,9747	0,9675	0,9683	0,9765	0,9653	0,9539

Tabela 42 - Fluxo de carga harmônico - Estudo 2.

Nota-se que somente a fase C apresentou queda de tensão ligeiramente superior a 5%, e apenas na última barra do ramo. Este problema provavelmente também poderia ser resolvido através de remanejamento das cargas entre as fases, uma vez que a fase B apresentou pequena queda de tensão ao longo do alimentador, mantendo o nível de tensão acima dos 0,98 p.u. na última barra.

**Figura 25** - Gráficos de tensões eficazes nas barras – Estudo 2.

7.2.2. Distorções Harmônicas Totais de Tensão e Corrente

Conforme apresentado na tabela 43, a partir da barra 2 do sistema há extrapolação do limite imposto pelo PRODIST em relação às distorções harmônicas totais de tensão. Na figura 26 podem ser observados graficamente os valores de DHT de tensão e corrente.

DHT - Tensão [%]												
Barra	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Fase A	0,004	6,932	10,959	11,032	13,219	20,480	15,158	15,743	16,912	17,041	17,498	18,404
Fase B	0,004	7,209	10,998	10,910	13,203	21,095	14,216	14,425	15,142	15,302	15,444	15,839
Fase C	0,005	7,047	10,842	10,899	12,987	20,289	14,702	15,285	16,439	16,487	16,992	18,025

Tabela 43 - Distorção harmônica total de tensão - Estudo 2.

DHT - Corrente [%]					
Barra	1	2	4	6	8
Fase A	66,27	66,27	66,69	97,06	90,47
Fase B	98,02	98,02	105,23	82,19	69,50
Fase C	66,38	66,38	66,79	97,11	90,55

Tabela 44 - Distorção harmônica total de corrente - Estudo 2.

Os elevados níveis de distorção harmônica de tensão se justificam devido ao fato de que os perfis harmônicos de médio consumo medidos e utilizados na simulação foram obtidos em um período de uso intenso de equipamentos geradores de harmônicos.

Nota-se que, para fins de simulação, foram analisados os piores casos em termos de distorção harmônica, em momentos que não são necessariamente coincidentes com os picos de consumo de energia.

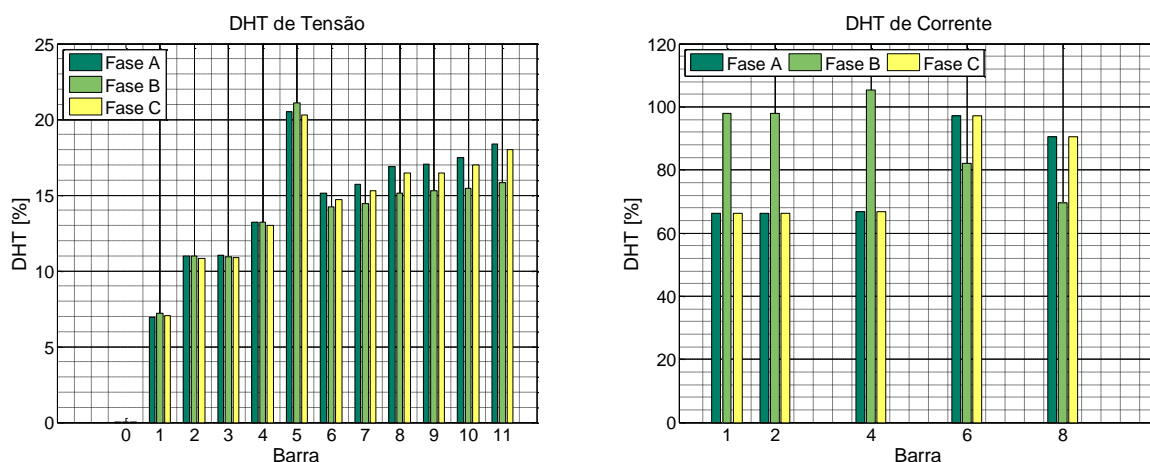


Figura 26 - Gráficos de DHT de tensão de corrente - Estudo 2.

7.2.3. Distorções Individuais de Tensão

Os valores de distorções harmônicas totais de tensão foram apresentados nas tabelas 45, 46 e 47, e a distribuição das distorções ao longo do sistema pode ser visualizada nos gráficos da figura 27.

Os componentes harmônicos que apresentaram maior relevância foram as de ordem 5, nas fases A e C, e a de ordem 9 nas três fases. Os componentes de ordem 21 e 27 ultrapassaram os limites nas três fases, e a componente de ordem 15 só não foi significativa na fase A.

Vale destacar que houve extrapolação dos limites individuais de distorção harmônica de tensão principalmente na barra 5, devido à sobrecarga da mesma.

Distorções Harmônicas Individuais de Tensão [%] - Fase A												
Ordem	Barra 00	Barra 01	Barra 02	Barra 03	Barra 04	Barra 05	Barra 06	Barra 07	Barra 08	Barra 09	Barra 10	Barra 11
3	0,0000	0,6753	1,9079	1,1301	2,6028	10,2740	2,6557	2,7973	3,6618	3,8832	4,0748	4,8165
5	0,0036	5,3972	7,0751	7,2176	7,9702	9,0500	9,1945	9,6087	10,0725	10,0381	10,3899	10,8936
7	0,0014	1,8279	2,9309	2,8377	3,5553	4,9000	4,3404	4,4754	4,9661	5,0238	5,2422	5,4487
9	0,0001	2,5879	6,2275	6,3984	8,0588	12,3412	9,3229	9,6762	10,4169	10,5244	10,7080	11,2154
11	0,0009	1,3053	1,4522	1,4522	1,5313	1,9911	1,4196	1,3918	1,3542	1,3832	1,3142	1,2520
13	0,0007	0,9912	1,2389	1,2608	1,3569	1,4090	1,5639	1,6317	1,7343	1,7020	1,7901	1,8768
15	0,0001	0,2041	0,6724	0,6019	0,9458	2,6601	0,6089	0,5343	0,4833	0,5181	0,4869	0,4547
17	0,0010	1,5263	1,8009	1,8103	1,9450	2,3984	1,9588	1,9716	1,9834	1,9892	1,9787	1,9746
19	0,0006	0,8161	1,0120	1,0160	1,1276	1,5672	1,0982	1,0634	1,1685	1,2037	1,1742	1,1848
21	0,0001	0,9787	2,1640	2,2034	2,7434	3,8395	3,2802	3,4063	3,6961	3,7351	3,8071	3,9329
23	0,0004	0,5970	0,8331	0,8420	0,9572	1,0349	1,1675	1,2189	1,3288	1,3222	1,3895	1,4498
25	0,0004	0,5354	0,6985	0,7024	0,7852	1,0158	0,8204	0,8157	0,8971	0,9091	0,9140	0,9383
27	0,0002	0,9322	2,0935	2,1178	2,6746	4,1054	3,0033	3,0904	3,2358	3,2691	3,2855	3,3537
29	0,0002	0,3277	0,4066	0,4119	0,4526	0,4958	0,5774	0,6351	0,6585	0,6327	0,7002	0,7549
31	0,0003	0,3661	0,4979	0,5012	0,5635	0,6844	0,6237	0,6370	0,6738	0,6751	0,6889	0,7078

Tabela 45 - Distorções individuais de tensão na fase A - Estudo 2.

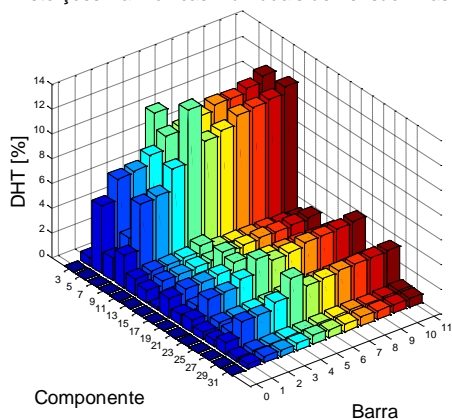
Distorções Harmônicas Individuais de Tensão [%] - Fase B												
Ordem	Barra 00	Barra 01	Barra 02	Barra 03	Barra 04	Barra 05	Barra 06	Barra 07	Barra 08	Barra 09	Barra 10	Barra 11
3	0,0010	2,2626	3,5195	2,7544	4,4804	12,0155	3,3599	2,8624	2,5089	1,9647	2,2998	1,5696
5	0,0033	4,3994	4,9125	5,0647	5,1687	6,3487	5,0608	4,9031	5,1230	5,6327	5,0538	4,8999
7	0,0013	3,3840	5,0343	4,9471	5,8890	7,1887	6,8704	7,1885	7,4600	7,1854	7,7577	8,2193
9	0,0000	2,5704	6,1481	6,3174	7,9313	12,1625	9,0989	9,3590	10,1116	10,3531	10,3684	10,7373
11	0,0011	1,5314	2,0007	2,0015	2,2372	2,6459	2,4727	2,5300	2,6402	2,6387	2,7069	2,8077
13	0,0006	0,5434	0,6052	0,6312	0,6357	0,7780	0,6174	0,5941	0,6305	0,7115	0,6192	0,5978
15	0,0003	0,9090	1,5243	1,4737	1,8804	3,5571	1,6080	1,5549	1,3602	1,3366	1,2865	1,2394
17	0,0012	1,6305	2,0239	2,0336	2,2214	2,6407	2,3693	2,4035	2,4623	2,4913	2,4978	2,5580
19	0,0007	1,2055	1,6649	1,6706	1,8999	2,3810	2,0811	2,1295	2,1632	2,1848	2,2064	2,2613
21	0,0003	0,6533	1,7023	1,7289	2,2234	3,2807	2,6433	2,7264	2,9640	3,0214	3,0366	3,0997
23	0,0004	0,3509	0,2911	0,2974	0,2605	0,3247	0,1749	0,1573	0,1772	0,1782	0,1832	0,2100
25	0,0003	0,5954	0,8074	0,8114	0,9147	1,1710	0,9753	0,9948	0,9928	1,0066	1,0021	1,0193
27	0,0003	0,7714	1,8451	1,8628	2,3886	3,7670	2,6537	2,7176	2,8118	2,8580	2,8367	2,8622
29	0,0003	0,5289	0,7462	0,7462	0,8602	1,0450	0,9821	1,0276	0,9904	0,9883	1,0119	1,0296
31	0,0002	0,2750	0,3683	0,3705	0,4142	0,5352	0,4339	0,4423	0,4357	0,4399	0,4335	0,4361

Tabela 46 - Distorções individuais de tensão na fase B - Estudo 2.

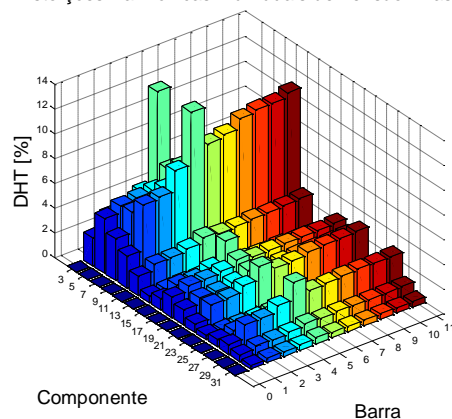
Distorções Harmônicas Individuais de Tensão [%] - Fase C												
Ordem	Barra 00	Barra 01	Barra 02	Barra 03	Barra 04	Barra 05	Barra 06	Barra 07	Barra 08	Barra 09	Barra 10	Barra 11
3	0,0010	0,7576	2,0182	1,2251	2,7155	10,2883	2,7440	2,8343	3,6918	3,9367	4,0799	4,7242
5	0,0035	5,4168	7,0790	7,2086	7,8901	8,9725	8,8904	9,2679	9,7176	9,6058	9,9757	10,5319
7	0,0022	2,2672	1,9477	1,8526	1,8091	2,9590	1,2154	0,9609	1,3305	1,6708	1,4488	1,4601
9	0,0001	2,5361	6,0677	6,2327	7,8399	11,9986	9,0264	9,3118	10,0548	10,2328	10,3171	10,6983
11	0,0009	1,2923	1,7368	1,7377	1,9676	2,5485	2,1101	2,1060	2,2838	2,3476	2,3324	2,3486
13	0,0004	0,9389	1,2285	1,2470	1,3714	1,4324	1,6217	1,6888	1,7709	1,7774	1,8331	1,8939
15	0,0003	0,3361	0,8184	0,7485	1,0936	2,7733	0,8227	0,7570	0,7319	0,7702	0,7266	0,6688
17	0,0010	1,4854	1,9924	2,0033	2,2476	2,8804	2,3809	2,3765	2,5796	2,6323	2,6252	2,6607
19	0,0007	0,7814	0,8345	0,8388	0,8657	1,1257	0,7815	0,7977	0,6840	0,6640	0,6527	0,6459
21	0,0002	1,0045	2,1886	2,2217	2,7620	3,8439	3,2756	3,3768	3,6774	3,7407	3,7811	3,8676
23	0,0003	0,5779	0,8396	0,8485	0,9681	1,0649	1,1716	1,2135	1,3493	1,3516	1,4084	1,4671
25	0,0004	0,5170	0,5646	0,5677	0,5887	0,7116	0,5615	0,5650	0,5267	0,5264	0,5132	0,5012
27	0,0002	0,9538	2,1252	2,1467	2,7028	4,1147	3,0171	3,0834	3,2443	3,2997	3,2905	3,3284
29	0,0003	0,2155	0,1954	0,1931	0,1995	0,5129	0,0875	0,1104	0,1209	0,1104	0,1615	0,1938
31	0,0003	0,4030	0,4554	0,4577	0,4812	0,5336	0,5021	0,5037	0,5272	0,5343	0,5347	0,5381

Tabela 47 - Distorções individuais de tensão na fase C - Estudo 2.

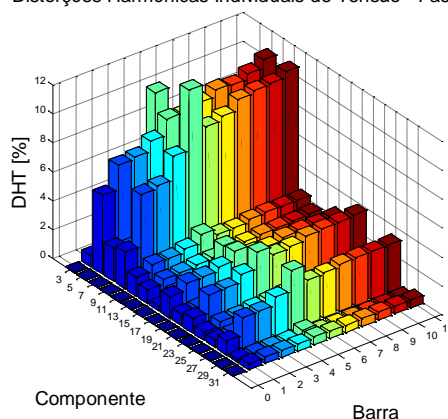
Distorções Harmônicas Individuais de Tensão - Fase A



Distorções Harmônicas Individuais de Tensão - Fase B



Distorções Harmônicas Individuais de Tensão - Fase C

**Figura 27** - Gráficos de distorções harmônicas individuais de tensão - Estudo 2.

7.3. Estudo 3

Neste estudo todas as cargas foram simuladas com perfil harmônico real de uma residência de baixo consumo.

A residência na qual foi realizado o monitoramento recebia alimentação monofásica. Como foi utilizado o mesmo perfil harmônico nas três fases de cada carga, as cargas do sistema simulado foram perfeitamente equilibradas, e não houve necessidade de discriminar as fases na apresentação dos resultados.

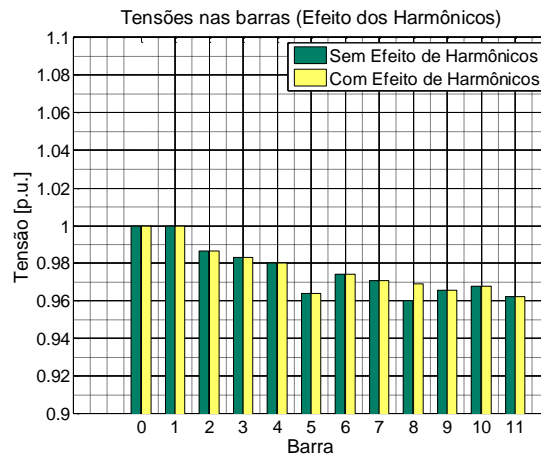
7.3.1. Tensões nas barras

Conforme apresentado nas tabelas 48 e 49, assim como nos gráficos da figura 28, não houve queda excessiva de tensão ao longo do alimentador, ou seja, todas as barras possuem nível de tensão superior a 0,95 p.u..

Fluxo de Carga – Tensões [p.u.]												
Barra	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Fase A	1,0000	0,9996	0,9866	0,9832	0,9804	0,9640	0,9743	0,9707	0,9603	0,9658	0,9679	0,9622
Fase B	1,0000	0,9996	0,9866	0,9832	0,9804	0,9640	0,9743	0,9707	0,9603	0,9658	0,9679	0,9622
Fase C	1,0000	0,9996	0,9866	0,9832	0,9804	0,9640	0,9743	0,9707	0,9603	0,9658	0,9679	0,9622

Tabela 48 - Fluxo de carga - Estudo 3.

Fluxo de Carga Harmônico – Tensões [p.u.]												
Barra	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Fase A	1,0000	0,9996	0,9866	0,9832	0,9804	0,9640	0,9743	0,9707	0,9693	0,9658	0,9679	0,9622
Fase B	1,0000	0,9996	0,9866	0,9832	0,9804	0,9640	0,9743	0,9707	0,9693	0,9658	0,9679	0,9622
Fase C	1,0000	0,9996	0,9866	0,9832	0,9804	0,9640	0,9743	0,9707	0,9693	0,9658	0,9679	0,9622

Tabela 49 - Fluxo de carga harmônico - Estudo 3.**Figura 28** - Tensões eficazes nas barras - Estudo 3.

7.3.2. Distorções Harmônicas Totais de Tensão e Corrente

A tabela 50 apresenta os dados de distorção harmônica total de tensão nas barras do sistema, e a tabela 51 apresenta os dados de corrente. Os gráficos da figura 29 apresentam a distribuição dos valores de distorção ao longo do sistema.

DHT - Tensão [%]												
Barra	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Fase A	0,000000	7,44	12,94	13,5	16,07	23,27	19,31	20,36	22,07	22,79	22,83	24,37
Fase B	0,000000	7,44	12,94	13,5	16,07	23,27	19,31	20,36	22,07	22,79	22,83	24,37
Fase C	0,000000	7,44	12,94	13,5	16,07	23,27	19,31	20,36	22,07	22,79	22,83	24,37

Tabela 50 - Distorção harmônica total de tensão - Estudo 3.

Barra	DHT - Corrente [%]				
	1	2	4	6	8
Fase A	103,94	103,94	103,94	103,94	103,94
Fase B	103,93	103,93	103,94	103,94	103,94
Fase C	103,95	103,95	103,95	103,95	103,95

Tabela 51 - Distorção harmônica total de corrente - Estudo 3.

A partir da barra 2 nota-se a extrapolação dos limites de distorção harmônica de tensão. Isto se deve ao fato de que quando o perfil harmônico da residência de baixo consumo foi registrado, o consumo de tal residência era baixo, porém havia uma alta quantidade de componentes harmônicos. Provavelmente havia apenas um televisor ou outro equipamento eletrônico ligado no momento da análise.

Este resultado mostra que as residências de baixo consumo não devem ser negligenciadas no que se refere ao estudo e planejamento dos sistemas elétricos no âmbito da qualidade de energia. Durante a ocorrência de grandes eventos televisionados, como jogos de futebol, o índice de distorção harmônica dos sistemas de distribuição pode aumentar substancialmente.

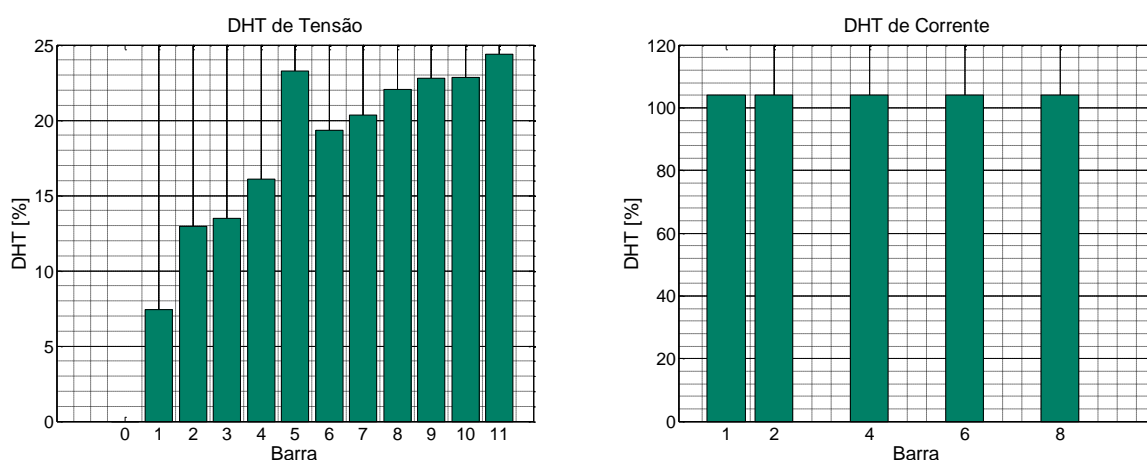


Figura 29 - Gráficos de DHT de tensão e corrente - Estudo 3.

7.3.3. Distorções Individuais de Tensão

A tabela 52 apresenta os valores de distorções individuais de tensão neste estudo, e a figura 30 mostra graficamente a distribuição espacial de cada ordem harmônica.

Distorções Harmônicas Individuais de Tensão [%]												
Ordem	Barra0	Barra01	Barra 02	Barra03	Barra04	Barra05	Barra06	Barra07	Barra08	Barra09	Barra10	Barra11
3	0,0000	3,3932	9,0735	9,7203	12,0417	19,1062	15,0377	16,1028	17,5631	18,3350	18,2549	19,8389
5	0,0032	4,7338	5,9306	6,0082	6,5360	7,6754	7,1517	7,3189	7,6739	7,7757	7,8176	8,0451
7	0,0025	3,6907	4,6060	4,6560	5,0601	5,8748	5,5182	5,6321	5,9047	5,9654	6,0107	6,1565
9	0,0000	1,3542	3,2603	3,3440	4,1969	5,8981	5,1351	5,3509	5,9230	6,0196	6,1386	6,4009
11	0,0004	0,5504	0,6852	0,6917	0,7513	0,8658	0,8175	0,8330	0,8732	0,8805	0,8885	0,9072
13	0,0010	1,4202	1,7673	1,7834	1,9368	2,2289	2,1068	2,1458	2,2495	2,2674	2,2885	2,3354
15	0,0000	1,0179	2,4276	2,4785	3,1152	4,3128	3,8030	3,9502	4,3802	4,4374	4,5381	4,7082
17	0,0001	0,1304	0,1622	0,1636	0,1777	0,2042	0,1932	0,1967	0,2062	0,2078	0,2098	0,2139
19	0,0005	0,7541	0,9378	0,9460	1,0273	1,1799	1,1168	1,1370	1,1919	1,2007	1,2124	1,2362
21	0,0000	0,8775	2,0872	2,1282	2,6761	3,6890	3,2649	3,3883	3,7590	3,8045	3,8941	4,0341
23	0,0004	0,5331	0,6628	0,6685	0,7259	0,8333	0,7890	0,8032	0,8419	0,8481	0,8564	0,8730
25	0,0002	0,2251	0,2799	0,2823	0,3065	0,3518	0,3331	0,3391	0,3555	0,3581	0,3616	0,3686
27	0,0000	0,5926	1,4082	1,4350	1,8049	2,4836	2,2014	2,2837	2,5341	2,5638	2,6251	2,7178
29	0,0005	0,6865	0,8534	0,8607	0,9346	1,0724	1,0157	1,0338	1,0837	1,0915	1,1023	1,1235
31	0,0002	0,2325	0,2891	0,2916	0,3166	0,3632	0,3441	0,3502	0,3671	0,3697	0,3734	0,3805

Tabela 52 - Distorções individuais de tensão - Estudo 3.

Neste estudo destacou-se a presença dos componentes harmônicos de ordem 3, 9, 15, 21 e 27.

Vale ressaltar que este estudo reflete um caso crítico e isolado, uma vez que o perfil harmônico utilizado na simulação, apesar de apresentar alta distorção, foi registrado em um instante de pouco consumo de energia elétrica.

Distorções Harmônicas Individuais de Tensão

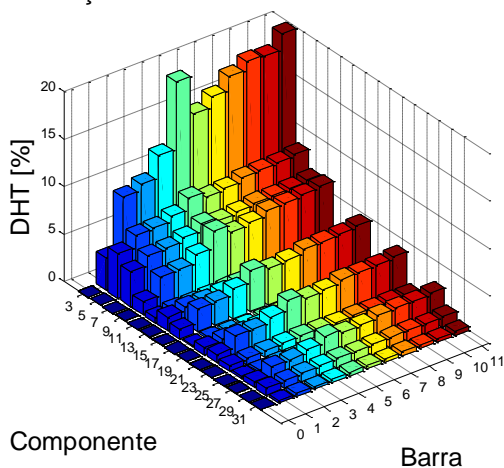


Figura 30 - Gráfico de distorções individuais de tensão - Estudo 3.

7.4. Estudo 4

Neste estudo foi estabelecido um critério de distribuição dos perfis harmônicos compatível com as cargas reais: a carga de maior consumo foi simulada com perfil harmônico real de uma residência de alto consumo, as cargas intermediárias foram simuladas com perfis harmônicos reais de residências de médio consumo, e as cargas de menor consumo receberam perfil harmônico real de uma residência de baixo consumo.

A distribuição detalhada dos perfis entre as cargas consta na tabela 34 do item 6.5.

7.4.1. Tensões nas barras

Nas tabelas 53 e 54 encontram-se os valores de tensão eficaz das barras do sistema, e a comparação entre esses valores encontra-se nos gráficos da figura 31.

Fluxo de Carga – Tensões [p.u.]												
Barra	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Fase A	1,0000	1,0051	0,9925	0,9892	0,9866	0,9699	0,9805	0,9770	0,9754	0,9720	0,9740	0,9684
Fase B	1,0000	0,9955	0,9778	0,9743	0,9692	0,9499	0,9628	0,9590	0,9573	0,9537	0,9559	0,9500
Fase C	0,9999	0,9976	0,9886	0,9852	0,9844	0,9785	0,9784	0,9749	0,9733	0,9699	0,9719	0,9663

Tabela 53 - Fluxo de carga - Estudo 4.

Fluxo de Carga Harmônico – Tensões [p.u.]												
Barra	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Fase A	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
Fase B	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
Fase C	1,0000	1,0022	1,0111	1,0113	1,0156	1,0384	1,0162	1,0165	1,0167	1,0170	1,0168	1,0173

Tabela 54 - Fluxo de carga harmônico - Estudo 4.

Pode-se observar a diferença entre as tensões na presença e na ausência de componentes harmônicas. O aumento da tensão nas barras não provocou extrapolação dos limites superiores de tensão, ou seja, 1,05 p.u..

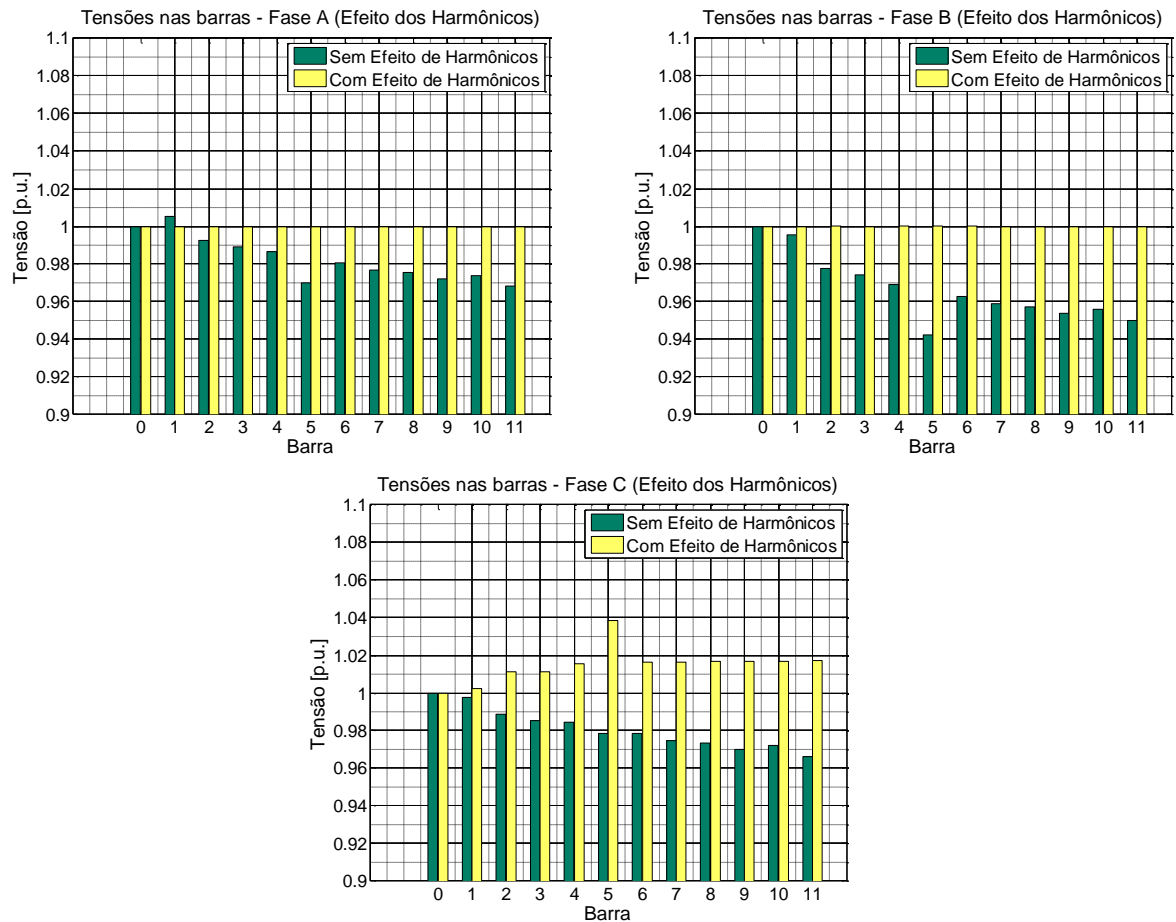


Figura 31 - Gráficos de tensões RMS nas barras - Estudo 4.

7.4.2. Distorções Harmônicas Totais de Tensão e Corrente

Os valores de distorção harmônica total de tensão encontram-se na tabela 55, e os valores de distorção harmônica total de corrente encontram-se na tabela 56. Os correspondentes gráficos foram apresentados na figura 32, para melhor visualização dos resultados.

DHT - Tensão [%]												
Barra	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Fase A	0,002	3,278	4,967	5,498	5,846	6,035	7,641	7,718	10,378	11,078	11,253	12,780
Fase B	0,002	3,006	4,686	5,238	5,571	5,573	7,454	7,569	10,245	10,970	11,147	12,763
Fase C	0,002	3,494	5,135	5,553	6,004	6,207	7,766	7,960	10,357	11,002	11,204	12,617

Tabela 55 - Distorção harmônica total de tensão - Estudo 4.

Barra	DHT - Corrente [%]				
	1	2	4	6	8
Fase A	32,73	32,73	30,94	66,04	115,92
Fase B	24,21	24,21	22,95	66,04	115,91
Fase C	53,5	53,5	52,35	66,03	115,91

Tabela 56 - Distorção harmônica total de corrente - Estudo 4.

Nota-se que, a partir da barra 8, a distorção harmônica total de tensão ultrapassa o limite do PRODIST.

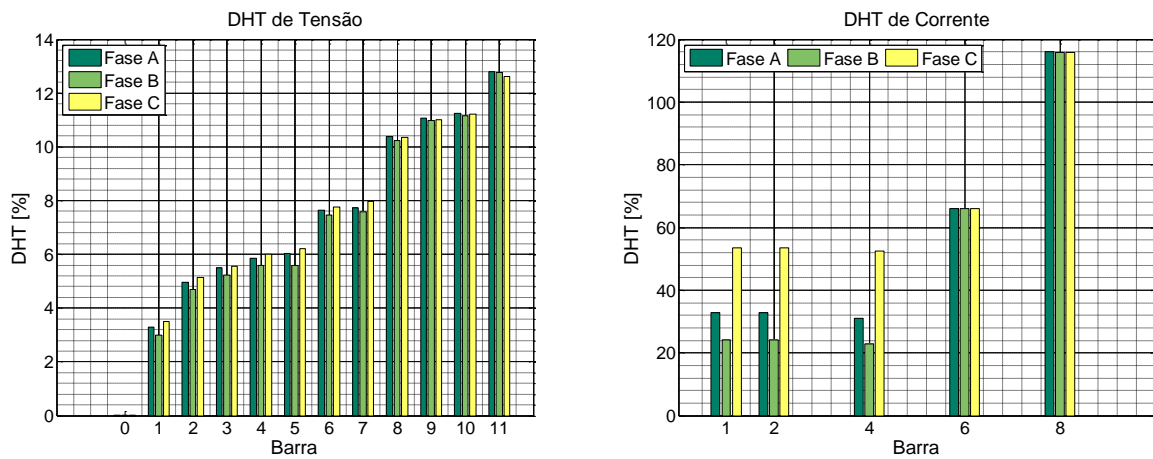


Figura 32 - Gráficos de DHT de tensão e corrente - Estudo 4.

7.4.3. Distorções Individuais de Tensão

Os valores de distorções harmônicas individuais de tensão foram apresentados nas tabelas 57, 58 e 59, bem como nos gráficos da figura 34. A representação gráfica mostra a distribuição das distorções ao longo do sistema.

Distorções Harmônicas Individuais de Tensão [%] - Fase A												
Ordem	Barra 00	Barra 01	Barra 02	Barra 03	Barra 04	Barra 05	Barra 06	Barra 07	Barra 08	Barra 09	Barra 10	Barra 11
3	0,0002	0,6042	1,3381	2,3343	1,6118	1,7716	2,1250	0,9309	4,5806	5,6200	5,2802	7,1280
5	0,0019	2,5995	3,2740	3,3827	3,6022	3,7432	4,2278	4,4338	4,7496	4,8953	4,8951	5,0477
7	0,0008	1,0973	1,3338	1,4340	1,4402	1,5799	1,6001	1,4710	2,0879	2,1982	2,2334	2,4478
9	0,0003	1,0691	2,6287	2,7682	3,3849	3,3921	4,9152	5,1857	6,6530	6,8129	7,1998	7,7735
11	0,0003	0,3835	0,4880	0,4842	0,5409	0,5074	0,6831	0,6824	0,8929	0,8912	0,9614	1,0400
13	0,0003	0,2321	0,2876	0,2911	0,3223	0,3267	0,3899	0,4247	0,4037	0,4082	0,4138	0,4180
15	0,0001	0,0671	0,0389	0,1008	0,0148	0,0383	0,1320	0,0863	0,6939	0,7057	0,9142	1,1391
17	0,0004	0,6487	0,8345	0,8381	0,9305	0,9706	1,1063	1,1208	1,3360	1,3415	1,4136	1,4881
19	0,0003	0,3740	0,4468	0,4483	0,4824	0,4836	0,5562	0,5526	0,6975	0,6997	0,7427	0,7861
21	0,0001	0,4430	1,0622	1,0963	1,3492	1,3670	1,9254	2,0356	2,4294	2,4642	2,5692	2,7156
23	0,0001	0,1946	0,2550	0,2507	0,2898	0,3031	0,3534	0,3758	0,3792	0,3755	0,3919	0,4031
25	0,0001	0,1840	0,2179	0,2199	0,2364	0,2346	0,2771	0,2800	0,3378	0,3403	0,3590	0,3772
27	0,0001	0,4241	0,9578	0,9846	1,2226	1,2593	1,7421	1,8029	2,3235	2,3572	2,5089	2,6836
29	0,0001	0,1956	0,2589	0,2673	0,2864	0,3043	0,3323	0,3254	0,4499	0,4595	0,4858	0,5153
31	0,0001	0,1475	0,1782	0,1806	0,1946	0,1965	0,2282	0,2329	0,2635	0,2665	0,2745	0,2854

Tabela 57 - Distorções individuais de tensão na fase A - Estudo 4.

Distorções Harmônicas Individuais de Tensão [%] - Fase B												
Ordem	Barra 00	Barra 01	Barra 02	Barra 03	Barra 04	Barra 05	Barra 06	Barra 07	Barra 08	Barra 09	Barra 10	Barra 11
3	0,0001	0,4416	1,1775	2,2214	1,4484	1,4293	2,0133	0,9319	4,4364	5,5184	5,1465	7,0887
5	0,0016	2,3026	2,8504	2,9751	3,1133	2,9865	3,7263	3,9360	4,2474	4,4051	4,3933	4,5828
7	0,0006	0,7099	0,9249	1,0496	1,0196	0,9565	1,2704	1,1212	1,8851	2,0226	2,0731	2,3808
9	0,0000	1,0905	2,6841	2,8255	3,4637	3,5079	5,0313	5,3104	6,8092	6,9749	7,3688	7,9570
11	0,0004	0,7603	0,9258	0,9243	1,0101	1,1244	1,1226	1,1242	1,2844	1,2848	1,3371	1,3994
13	0,0002	0,4372	0,5658	0,5857	0,6355	0,7170	0,7322	0,7778	0,7398	0,7592	0,7471	0,7421
15	0,0000	0,0668	0,0398	0,1062	0,0233	0,0440	0,1392	0,0816	0,7183	0,7308	0,9441	1,1752
17	0,0004	0,5906	0,6971	0,7002	0,7523	0,7598	0,8638	0,8740	1,0089	1,0133	1,0576	1,1084
19	0,0003	0,4340	0,5785	0,5810	0,6482	0,6831	0,7726	0,7629	1,0154	1,0201	1,0918	1,1659
21	0,0000	0,4546	1,0891	1,1222	1,3862	1,4199	1,9776	2,0904	2,4961	2,5320	2,6401	2,7912
23	0,0001	0,1625	0,1862	0,1841	0,2006	0,1986	0,2321	0,2436	0,2455	0,2436	0,2519	0,2579
25	0,0001	0,2233	0,3043	0,3069	0,3466	0,3646	0,4234	0,4261	0,5419	0,5454	0,5826	0,6192
27	0,0000	0,4404	0,9888	1,0173	1,2623	1,3147	1,7951	1,8574	2,3932	2,4289	2,5835	2,7632
29	0,0001	0,1336	0,1496	0,1539	0,1555	0,1461	0,1745	0,1724	0,2209	0,2256	0,2350	0,2464
31	0,0001	0,2037	0,2798	0,2836	0,3180	0,3432	0,3819	0,3916	0,4457	0,4505	0,4659	0,4859

Tabela 58 - Distorções individuais de tensão na fase B - Estudo 4.

Distorções Harmônicas Individuais de Tensão [%] - Fase C												
Ordem	Barra 00	Barra 01	Barra 02	Barra 03	Barra 04	Barra 05	Barra 06	Barra 07	Barra 08	Barra 09	Barra 10	Barra 11
3	0,0002	0,3362	0,8344	1,7990	1,0347	1,1094	1,5160	0,2788	4,0602	5,1043	4,7769	6,6265
5	0,0017	2,7492	3,4862	3,6321	3,8441	3,9278	4,5210	4,7543	5,1003	5,2750	5,2624	5,4849
7	0,0004	0,9128	1,1659	1,2598	1,2760	1,4964	1,4275	1,2943	1,9305	2,0394	2,0803	2,2801
9	0,0003	1,3639	2,8851	3,0017	3,6679	3,9330	5,1795	5,4594	6,8607	7,0168	7,3939	7,8910
11	0,0006	0,7145	0,9176	0,9129	1,0213	1,2036	1,1465	1,1451	1,3383	1,3360	1,4020	1,4626
13	0,0004	0,4886	0,5970	0,5956	0,6602	0,7673	0,7247	0,7603	0,7500	0,7499	0,7658	0,7789
15	0,0001	0,2516	0,3606	0,3247	0,4503	0,5432	0,5778	0,4765	1,0898	1,0822	1,3089	1,5609
17	0,0004	0,6578	0,8394	0,8426	0,9330	0,9737	1,1020	1,1167	1,3244	1,3298	1,3994	1,4821
19	0,0003	0,4285	0,5256	0,5313	0,5713	0,5953	0,6523	0,6423	0,8208	0,8266	0,8732	0,9314
21	0,0001	0,4925	1,1196	1,1482	1,4184	1,4717	2,0044	2,1141	2,5210	2,5550	2,6649	2,8133
23	0,0001	0,1752	0,2252	0,2203	0,2538	0,2591	0,3106	0,3307	0,3404	0,3359	0,3538	0,3672
25	0,0001	0,2022	0,2454	0,2463	0,2689	0,2738	0,3159	0,3155	0,3969	0,3988	0,4250	0,4531
27	0,0001	0,3079	0,8091	0,8379	1,0616	1,0593	1,5870	1,6473	2,1796	2,2147	2,3679	2,5442
29	0,0001	0,1491	0,1880	0,1954	0,2060	0,2085	0,2434	0,2266	0,3674	0,3765	0,4056	0,4408
31	0,0001	0,1948	0,2320	0,2337	0,2520	0,2713	0,2838	0,2913	0,3136	0,3161	0,3243	0,3379

Tabela 59 - Distorções individuais de tensão na fase C - Estudo 4.

Nota-se a presença significativa e acima dos limites do PRODIST dos componentes harmônicos de ordem 9 e 21 nas três fases, seguidas da componente de ordem 27.

Este resultado sugere que é possível mitigar o problema e enquadrar o sistema na norma do PRODIST através da implementação de filtros para a 9ª e 21ª harmônicas principalmente.

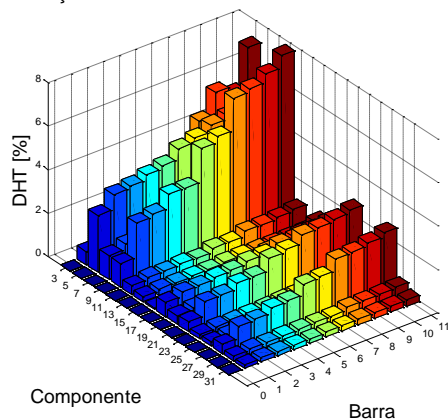
7.5. Estudo 5

Neste estudo foi feita uma análise acerca da influência do carregamento do transformador sobre o índice das distorções harmônicas nas barras da rede secundária.

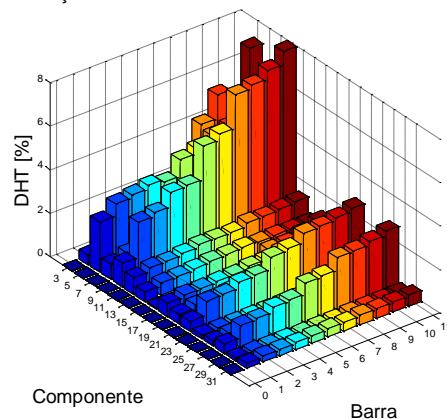
Nos estudos de 1 a 4 o transformador utilizado no sistema possuía potência nominal de 250 kVA, apresentando um carregamento de 56,54%. No estudo 5 foram analisados quatro casos com diferentes valores de potência nominal do transformador.

Este estudo visou justificar o uso de transformadores com potência nominal demasiado acima da carga consumida na presença de harmônicos, uma vez que se nota o aumento da distorção harmônica total nas barras à medida em que a carga do transformador é aumentada.

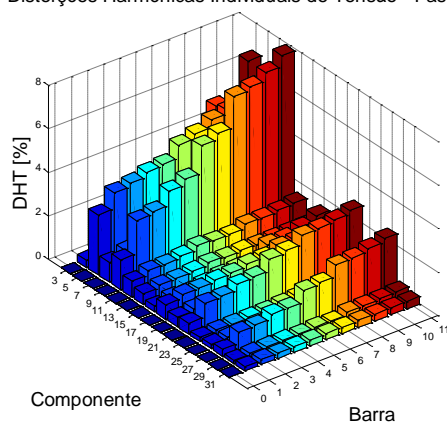
Distorções Harmônicas Individuais de Tensão - Fase A



Distorções Harmônicas Individuais de Tensão - Fase B



Distorções Harmônicas Individuais de Tensão - Fase C

**Figura 33** - Gráficos de Distorção Harmônica Individual de Tensão nas barras – Estudo 4.**i. Caso 1**

Neste primeiro caso o transformador encontrou-se com carregamento de 56,54%, com potência nominal de 250 kVA.

Trata-se do mesmo sistema cujos resultados foram apresentados na seção 7.4.

Os valores de distorção harmônica total estão apresentados na tabela 60. Nota-se que a partir da barra 8, nas três fases, o índice de distorção harmônica total de tensão extrapola os limites estabelecidos pelo PRODIST.

DHT - Tensão [%]												
Barra	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Fase A	0,002	3,278	4,967	5,498	5,846	6,035	7,641	7,718	10,378	11,078	11,253	12,780
Fase B	0,002	3,006	4,686	5,238	5,571	5,573	7,454	7,569	10,245	10,970	11,147	12,763
Fase C	0,002	3,494	5,135	5,553	6,004	6,207	7,766	7,960	10,357	11,002	11,204	12,617

Tabela 60 - Distorção harmônica total de tensão - Estudo 5, Caso 1.

ii. Caso 2

Neste caso o transformador utilizado trabalhou com um carregamento de 70,43%, com potência nominal de 200 kVA.

Os valores de distorção harmônica total foram apresentados na tabela 61. Os limites de DHT impostos pelo PRODIST foram extrapolados a partir da barra 8, assim como no caso 1. No entanto, vale ressaltar que os valores de DHT são maiores em relação ao caso 1.

Barra	DHT - Tensão [%]											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Fase A	0,002	4,086	5,751	6,254	6,610	6,815	8,367	8,441	11,049	11,049	11,907	13,387
Fase B	0,002	3,770	5,428	5,957	6,298	6,316	8,153	8,264	10,903	11,615	11,793	13,376
Fase C	0,002	4,374	5,981	3,369	6,828	7,033	8,547	8,745	11,066	11,688	11,892	13,247

Tabela 61 - Distorção harmônica total de tensão - Estudo 5, Caso 2.

iii. Caso 3

Neste caso o transformador trabalhou com carregamento de 93,92%, com potência nominal de 150 kVA.

Os valores de distorção harmônica total foram apresentados na tabela 62. Vale ressaltar que neste caso houve extrapolação dos limites de DHT a partir da barra 7, na fase C do sistema.

Barra	DHT - Tensão [%]											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Fase A	0,002	5,426	7,066	7,538	7,904	8,134	9,607	9,679	12,205	12,860	13,038	14,444
Fase B	0,002	5,057	6,697	7,196	7,549	7,596	9,363	9,470	12,050	12,743	12,921	14,453
Fase C	0,002	5,847	7,420	7,772	8,234	8,449	9,897	10,103	12,308	12,896	13,103	14,370

Tabela 62 - Distorção harmônica total de tensão - Estudo 5, Caso 3.

iv. Caso 4

Neste caso o transformador trabalhou sobrecarregado, com 140,93% de carga, e potência nominal de 100 kVA.

Os valores de distorção harmônica total foram apresentados na tabela 63. Nota-se que o alto carregamento do transformador ocasionou a extrapolação dos limites do PRODIST para DHT a partir da barra 2, evidenciando que o aumento do carregamento implica o aumento dos valores de DHT nas barras da rede secundária.

	DHT - Tensão [%]											
Barra	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Fase A	0,002	8,078	9,706	10,139	10,521	10,798	12,150	12,223	14,610	15,219	15,397	16,683
Fase B	0,002	7,683	9,321	9,787	10,158	10,274	11,912	12,015	14,496	15,157	15,334	16,780
Fase C	0,002	8,822	10,363	10,676	11,149	11,372	12,720	12,939	14,963	15,498	15,703	16,820

Tabela 63 - Distorção harmônica total de tensão - Estudo 5, Caso 4.

v. Comparação

Nos gráficos da figura 34 pode-se notar claramente o efeito da elevação do carregamento do transformador no índice de distorção harmônica total das barras do sistema.

A linha em vermelho indica o limite do PRODIST em relação à distorção harmônica total de tensão nas barras de um sistema de distribuição, para a classe de tensão estudada.

Observou-se claramente que houve aumento da distorção harmônica total nas barras do sistema com o aumento da carga do transformador.

Também ocorre elevação das perdas internas do transformador, uma vez que na condição de sobrecarga as correntes circulantes são maiores do que as previstas por projeto. Isso é prejudicial para o transformador, uma vez que o ponto de operação térmico deste é elevado, o que causa desgaste na isolação interna e redução da vida útil do equipamento.

Para reduzir os efeitos dos componentes harmônicos nos transformadores, são utilizados frequentemente equipamentos superdimensionados, ou seja, trabalha-se abaixo da capacidade nominal do transformador [63].

A redução da potência do transformador pode ser estimada utilizando o 'K-factor' da carga na construção especial do transformador, e este é calculado de acordo com o espectro harmônico da corrente de carga. Este fator reflete as perdas adicionais existentes em um transformador bobinado tradicional. Detalhes sobre o cálculo do 'K-factor' podem ser obtidos em [64].

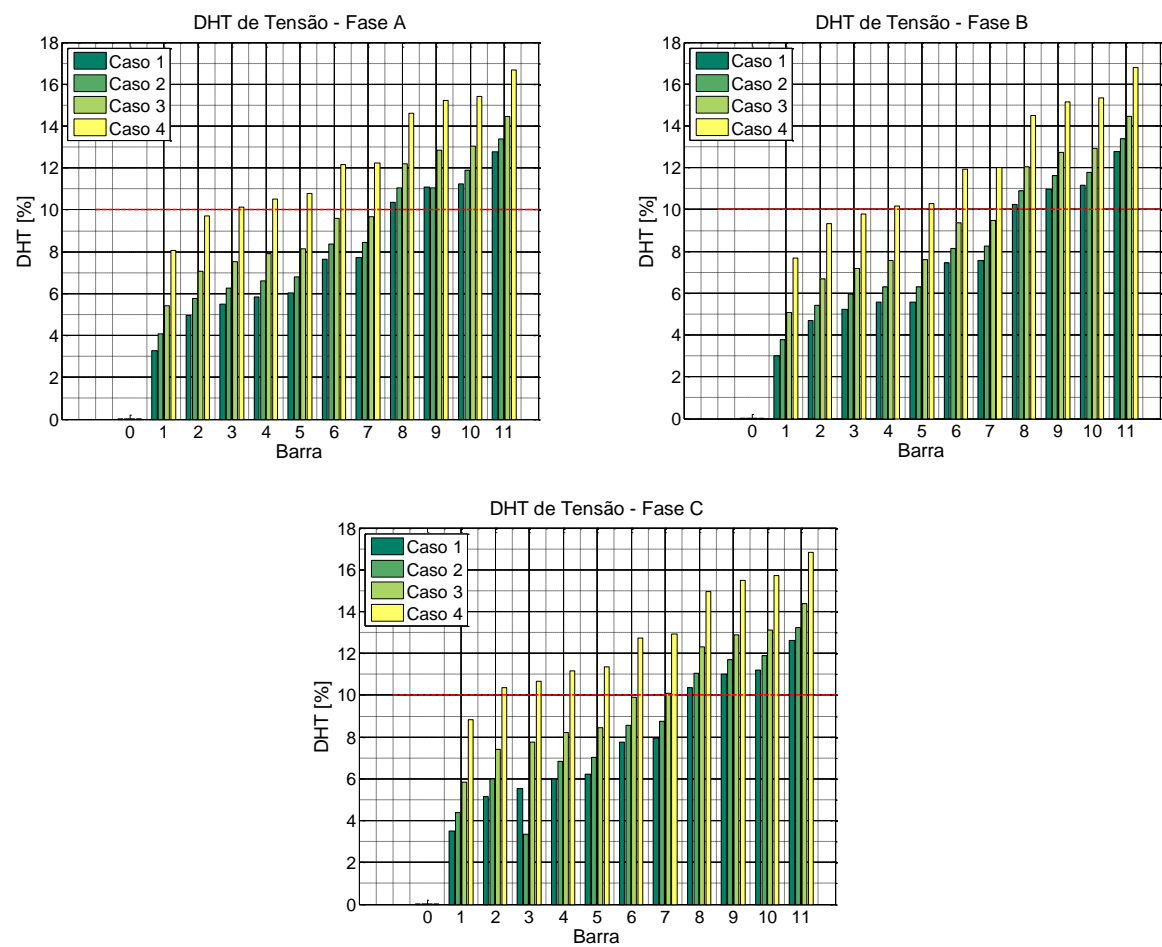


Figura 34 - Gráficos de DHT de tensão - Estudo 5.

Capítulo 8

CONCLUSÕES

Neste trabalho foram levantados os conceitos relativos aos componentes harmônicos de sinais elétricos de tensão e corrente, bem como índices relativos à mensuração da distorção das formas de onda das grandezas mencionadas.

Foram citadas as principais organizações nacionais e internacionais que publicam normas técnicas, e que estabelecem limites toleráveis para a ocorrência das distorções harmônicas, a fim de que estas não prejudiquem outros consumidores através da inserção de componentes harmônicos nos pontos de acoplamento comum. Foram levadas em consideração as diferentes abordagens das normas técnicas, e os limites propostos por estas foram comparados.

Também foram listados os principais equipamentos que geram os distúrbios harmônicos, nos âmbitos residencial, comercial e industrial. Posteriormente, foram levantados os prejuízos causados pelas correntes e tensões não senoidais nos sistemas elétricos, bem como as medidas mitigadoras para tais problemas.

Foi realizada uma análise computacional de um sistema teste de distribuição, a partir da modelagem de cargas com perfis harmônicos residenciais reais.

Concluiu-se que as cargas residenciais podem apresentar um alto valor de distorção harmônica, apesar do baixo consumo quando comparadas às indústrias. Porém se houver simultaneidade entre os consumidores residenciais, somado aos efeitos de desbalanço entre as fases, os resultados podem depreciar demasiadamente a qualidade da energia elétrica da rede.

Pode-se notar que nem todas as barras da rede secundária violaram os limites de distorção harmônica total de tensão nos estudos realizados. Isso mostra que a instalação de medidores de qualidade de energia elétrica não pode ser feita em apenas alguns pontos fixos da rede, por exemplo, na barra a qual está conectado o secundário do transformador, que manteve-se dentro das normas em todos os casos. O monitoramento dos componentes harmônicos deve ser mais amplo ao longo do sistema de distribuição.

Concluiu-se, também, que a capacidade de carga do transformador que alimenta a rede secundária de distribuição influencia no índice de distorção harmônica total das barras. Transformadores que operam próximo a suas capacidades nominais ou que foram subdimensionados ocasionam elevação da distorção harmônica total nas barras da rede secundária, ou seja, prejudicam a qualidade da energia do sistema.

Como perspectivas futuras deste trabalho, tem-se a possibilidade da ampliação do mesmo para os âmbitos comercial e industrial, através da simulação de novas cargas com perfis típicos de cargas comerciais e plantas industriais com grandes retificadores e inversores de frequência, bem como acionadores de motores com potência nominal elevada por partida suave.

Pode-se também realizar simulações variando o distanciamento entre as cargas, para analisar a influência das impedâncias dos alimentadores nos valores de distorção harmônica nas barras, respeitando o limite máximo de 5% de queda de tensão nos pontos de acoplamento.

Sugere-se ainda o aumento da complexidade da rede, através da inserção de transformadores isoladores e do projeto de filtros ativos e passivos, ou alterando a configuração da rede radial para malhada. Além disso, sugere-se a inserção de blocos capacitores para compensação de fator de potência, para o estudo de ressonâncias harmônicas na rede.

Nos casos nos quais haja desrespeito às normas vigentes, sugere-se a proposição de estratégias para a mitigação dos harmônicos, ponderando a eficácia da solução com os custos de projeto envolvidos.

Referências

- [1] WANG, R. **Harmonic Impact of Modern Residential Loads on Distribution Power System and Mitigation Solutions**. 2011. 179 f. Dissertação (Mestrado). Department of Electrical & Computer Engineering. University of Alberta. Edmonton, Alberta. 2011.
- [2] Li Penghui; Zhao Lijie; Bai Haijun; Zhang Yanhua, **Power Quality Monitoring of Power System Based on Spectrum Analysis**, E-Product E-Service and E-Entertainment (ICEEE), 2010 International Conference on , pp.1,4, 7-9. 2010.
- [3] BRACEWELL, R. **The Fourier Transform and its Applications**, 3rd. Ed., New York: McGraw-Hill, 2000, Cap. 2, p. 5, 6.2000.
- [4] ANEEL – Institucional. **Atribuições**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=636&idPerfil=3>>. Acessado em 20 dezembro 2012;
- [5] ANEEL – **Procedimentos de Distribuição (PRODIST) > Atribuições**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=82>>. Acessado em 23 dezembro 2012.
- [6] ANEEL - **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica**, 2007.
- [7] ONS. Institucional. Disponível em: <http://www.ons.org.br/institucional/o_que_e_o_ons.aspx>. Visitado em 12 janeiro 2013.
- [8] ONS. **Procedimentos de Rede – Padrões de Desempenho da Rede Básica**. Sub-módulo 2.2, 2002.
- [9] IEEE – **About us**. Disponível em: <http://www.ieee.org/about/ieee_history.html>. Acessado em 13 janeiro 2013.
- [10] IEEE Std. 519-1992. **Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems**. Abril. 1993.
- [11] IEC – Home Page. Disponível em: <<http://www.iec.org/>>. Acessado em 20 fevereiro 2013.
- [12] IEC 61000-3-2 – Electromagnetic Compatibility (EMC), Part 2, Section 2: **Limits for Harmonic Current Emissions (Equipment Input Current ≤ 16 A per phase)**, Edition 3.0, 2005.
- [13] SANTOS, F. M. F. **Qualidade de Energia – Comparação das Normas IEC 61000-3-2 e IEEE 519**. Trabalho de Conclusão de Curso. Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro - RJ. 2007.

- [14] WILSON XU, **Comparisons and comments on harmonic standards IEC 1000-3-6 and IEEE Std. 519**, HARMONICS AND QUALITY OF POWER, 2000. Proceedings. Ninth International Conference on , vol.1, p.260-263. 2000.
- [15] PIRES, I A. **Caracterização de harmônicos causados por equipamentos eletroeletrônicos residenciais e comerciais no sistema de distribuição de energia elétrica**. Dissertação (Mestrado). Departamento de Pós Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). 2006.
- [16] CHAU-SHING WANG, **Flicker-Insensitive Light Dimmer for Incandescent Lamps**, Industrial Electronics, IEEE Transactions on , vol.55, no.2, p.767-772, 2008.
- [17] MOREIRA, V. A. **Iluminação e Fotometria – Teoria e Aplicações**. Edgard Blucher. 1987.
- [18] INMETRO - **Portaria nº 188 de 9 de novembro de 2004**. Disponível em <http://www.inmetro.gov.br/rtac/detalhe.asp?seq_classe=1&seq_ato=920>. Acessado em 20 fevereiro 2012.
- [19] CHAPMAN, D. **Qualidade de Energia – Harmônicos**. Schneider Electric Workshop, 2005.
- [20] FORTESCUE, C. L. **Method of Symmetrical Coordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks**. Trans. AIEE, vol. 37, p. 1027-1140, 1918.
- [21] AINTABLIAN, H.O.; HILL, H.W., JR., **Harmonic currents generated by personal computers and their effects on the distribution system neutral current**, INDUSTRY APPLICATIONS SOCIETY ANNUAL MEETING, 1993., Conference Record of the 1993 IEEE, p.1483-1489, vol.2, 1993.
- [22] KOSOW, I L. **Máquinas Elétricas e Transformadores**. Edição 1. Tradução:Felipe L. Daiello. Porto Alegre. EditoraGlobo. 1982.
- [23] SAID, D.M.; NOR, K.M.; MAJID, M.S., **Analysis of distribution transformer losses and life expectancy using measured harmonic data**, Harmonics And Quality Of Power (Ichqp), 2010 14th International Conference On , vol., no., p.1-6, 26-29. 2010.
- [24] YAZDANI-ASRAMI, M.; MIRZAIE, M.; AKMAL, A.A.S., **Investigation on impact of current harmonic contents on the distribution transformer losses and remaining life**, Power and Energy (PECon), 2010 IEEE International Conference on, p.689-694, 2010.
- [25] LI PEI; LI GUODONG; XU YONGHAI; YAO SHUJUN, **Methods Comparison and Simulation of Transformer Harmonic Losses**, Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2010 Asia-Pacific, p.1,4, 28-31. 2010.
- [26] MASOUM, M. A S; FUCHS, E.F., **Transformer magnetizing current and iron-core losses in harmonic power flow**, Power Delivery, IEEE Transactions on , vol.9, no.1, p.10-20. 1994.
- [27] T. J. MILLER, **Reactive power Control in Electric Systems**, John Willey& Sons, 1982.

- [28] ZHENYU HUANG; WILSON XU; DINAVAH, V.R., **A practical harmonic resonance guideline for shunt capacitor applications**, Power Delivery, IEEE Transactions on , vol.18, no.4, p.1382-1387, 2003.
- [29] MADZIKANDA, E.; NEGNEVITSKY, M., **A practical look at harmonics in power transformer differential protection**, Power System Technology (POWERCON), 2012 IEEE International Conference on. p.1-6, 2012.
- [30] EXPOSITO, A.G.; MACIAS, J.A.R., **Fast harmonic computation for digital relaying**, Power Delivery, IEEE Transactions on , vol.14, no.4, p.1263-1268, 1999.
- [31] MERRIKHI, J.; MOGHANI, J.S.; FALLAH, E., **Modeling Flux Skin Effect on the Harmonic Currents of TCR**, Power Electronics Systems and Applications, 2006. ICPEA '06.2nd International Conference on.p.113-114, 2006.
- [32] IEEE - TASK FORCE ON THE EFFECTS OF HARMONICS ON EQUIPMENT, **Effects of Harmonics on Equipment**, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 8, nº 2, 1993.
- [33] PATIL, K. D.; GANDHARE, W. Z., **Effects of harmonics in distribution systems on temperature rise and life of XLPE power cables**, Power and Energy Systems (ICPS), 2011 International Conference on. p.1-6, 2011.
- [34] MÖLDER, H.; VINNAL, T.; BELDJAJEV, V., **Harmonic losses in induction motors caused by voltage waveform distortions**, Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ), 2010. p.143-150, 2010.
- [35] FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C.; UMANS, S. D. **MÁQUINAS ELÉTRICAS – Com Introdução à Eletrônica de Potência**. Tradução Anátolio Laschuk. 6ª edição, p. 648. Porto Alegre. Bookman, 2006.
- [36] ROBERTSON, STUART D T; HEBBAR, K.M., **Torque Pulsations in Induction Motors with Inverter Drives**, Industry and General Applications, IEEE Transactions on , vol.IGA-7, no.2, p.318-323, 1971.
- [37] RAMIREZ-CASTRO, D.; O'NEILL-CARRILLO, E.; SANTIAGO-PEREZ, J., **Assessment of harmonics at a medical facility**, Harmonics and Quality of Power, 2000. Proceedings. Ninth International Conference on , vol.2, p. 619-624, vol.2, 2000.
- [38] ISLAM, K.M.S.; SAMRA, A.-H., **Identification of harmonic sources in power distribution systems**, Southeastcon '97. ENGINEERING NEW NEWCENTURY., Proceedings. IEEE , p.301-303, 1997.
- [39] PYZALSKI, T.; WILKOSZ, K., **Identification of harmonic sources in a power system: A new method**, Power Tech, 2005 IEEE Russia , p.1-6, 2005.
- [40] ARRILLAGA, J. et al., **Power System Harmonics**, John Wiley & Sons, 1985.
- [41] MORAES, E. E. C. **Estudo e Projeto de Filtros Passivos para Atenuação de Harmônicos em Instalações Elétricas Industriais**. 2011,137f. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Ceará (UFCE) – CE, Fortaleza, 2011.

- [42] ATAIDE, M. V.; POMILIO, J.A., **Single-phase shunt active filter: a design procedure considering harmonics and EMI standards**, Industrial Electronics, 1997. ISIE '97., Proceedings of the IEEE International Symposium on , vol.2, p.422-427. 1997.
- [43] CASARAVILLA, G.; SALVIA, A.; BRIOZZO, C.; WATANABE, E.H., **Series and parallel calculations methods for the reference current values in a selective shunt active filter**, Industrial Electronics, 2003. ISIE '03. 2003 IEEE International Symposium on , vol.2. p.841-847. 2003.
- [44] WATANABE, E. H e AREDES, M., **Teoria de Potência Ativa e Reativa Instantânea e Aplicações – Filtros Ativos e FACTS**, XII Congresso Brasileiro de Automática, Uberlândia, Brasil, Setembro 14-18, 1998.
- [45] DA SILVA, C.H.; DA SILVA, V.F.; BORGES DA SILVA, L.E.; LAMBERT-TORRES, G.; TAKAUTI, E.H., **Optimizing the Series Active Filters Under Unbalanced Conditions Acting in the Neutral Current**, Industrial Electronics, 2007. ISIE 2007. IEEE International Symposium on, p.943-948, 2007.
- [46] LUOR, T. S., **Influence of Load Characteristics on the Applications of Passive and Active Harmonic Filters**, Proceedings of 9o IEEE International Conference on Harmonics and Quality of Power, 2000.
- [47] IZHAR, M.; HADZER, C.M.; SYAFRUDIN, M.; TAIB, S.; IDRIS, S., **Performance for passive and active power filter in reducing harmonics in the distribution system**, Power and Energy Conference, 2004. PECon 2004.Proceedings.National, p.104-108, 2004.
- [48] LENWARI, W.; SUMNER, M.; ZANCHETTA, P.; CULEA, M., **A High Performance Harmonic Current Control for Shunt Active Filters Based on Resonant Compensators**, IEEE Industrial Electronics, IECON 2006 - 32nd Annual Conference on. p. 2109-2114, 2006.
- [49] LINDEKE, D. **Projeto de Filtro Ativo Paralelo de 1 kVA Usando Técnicas de Controle Analógico e Digital**. 2003. Dissertação (Mestrado). Instituto de Eletrônica de Potência. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Florianópolis, 2003.
- [50] JAMALI, S.; MASOUM, M. A S; MOUSAVI, S.A., **Influence of controller high pass filter on the performance of shunt hybrid power filter**, Power Engineering Conference, 2008. AUPEC '08. Australasian Universities. p.1-6, 2008.
- [51] CREDER, H. **Instalações Elétricas**. 15ª Edição, Editora LTC, 2007.
- [52] DAHONO, P.A.; WIDJAYA, R.E.; SYAFRUDIN; QAMARUZZAMAN, **A practical approach to minimize the zero-sequence current harmonics in power distribution systems**, Power Conversion Conference - Nagaoka1997.,Proceedings of the , vol.2, p.68-686. 1997.

- [53] 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 on. p.107-112, 2011.
- [54] S. PAPATHANASSIOU, N. HATZIARGYRIOU AND K. STRUNZ, **A Bench-mark Low Voltage microgrid network**.CIGRE Symposium “Power Systems with Dispersed Generation.2005.
- [55]MONTICELLI, A. e GARCIA, A. 2003. **Introdução a Sistemas de Energia Elétrica**. Campinas: Editora Unicamp, 2003.
- [56] MONTICELLI, A. 1983. **Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica**.S.1. : Edgar Blucher, 1983.
- [57] STEVENSON, W. D. 1982. **Elements of Power System Analysis**.S.1. : McGraw-Hill, 1982.
- [58] PATACA, L. C. **Análise de Contingências com Critério N-1 em Sistemas Elétricos de Potência Utilizando Computação Paralela em MATLAB**. Trabalho de Conclusão de curso– Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.
- [59] POWER FACTORY. DlgSILENT Power Factory – Version 14.0. **User’s Manual**. 2008.
- [60] CHUO-YEAN CHANG; JEN-HAO TENG, **Three-phase harmonic load flow method**, Industrial Technology, 2002. IEEE ICIT '02. 2002 IEEE International Conference on , vol.2, p.839-844. 2002.
- [61] HERRAIZ, S.; SAINZ, L.; CLUA, J., **Review of harmonic load flow formulations**, Power Delivery, IEEE Transactions on , vol.18, no.3, p.1079-1087, 2003.
- [62] JEN-HAO TENG; CHUO-YEAN CHANG, **A fast harmonic load flow method for industrial distribution systems**, Power System Technology, 2000. Proceedings.PowerCon 2000. International Conference on , vol.3, p.1149-1154. 2000.
- [63] L. F. Blume et al, **Transformer Engineering**, 2nd edition, New York. P. 55-65. 1981.
- [64] S. P. Kennedy; C. I. Ivey, **Application design and rating of transformers containing harmonic currents**, in Conference IEEE Pulp, Paper Ind. Tech., p. 19-31. 1991.

Apêndice A - Dados do Sistema Elétrico

- Configuração aérea trifásica a três condutores;
- Frequência de operação: 60 Hz
- Tensão entre linhas na rede secundária: 400 V;
- Cabeamento:

Trecho entre barras	Distância [m]	Cabo
1-2	35	3x120 mm ² Al XLPE Trançado
2-3	30	3x6 mm ² Cu
2-4	35	3x120 mm ² Al XLPE Trançado
4-5	105	3x70 mm ² Al XLPE
4-6	70	3x120 mm ² Al XLPE Trançado
6-7	30	3x25 mm ² Cu
6-8	105	3x120 mm ² Al XLPE Trançado
8-9	30	3x6 mm ² Cu
8-10	35	3x120 mm ² Al XLPE Trançado
10-11	30	3x16 mm ² Cu

Tabela 64 - Cabeamento da rede secundária.

- Dados dos cabos:

Tipo de cabo	R [Ω /km]	X [Ω /km]	R ₀ [Ω /km]	X ₀ [Ω /km]
3x120 mm ² Al XLPE Trançado	0,284	0,083	1,136	0,417
3x6 mm ² Cu	3,690	0,094	13,640	0,472
3x70 mm ² Al XLPE	0,497	0,086	2,387	0,447
3x25 mm ² Cu	0,871	0,081	3,480	0,419
3x16 mm ² Cu	1,380	0,082	5,520	0,418

Tabela 65 - Dados de resistência e reatância dos cabos.

- Modelagem das cargas:

Condições iniciais: $\theta_{VA} = 0^\circ$, $\theta_{VB} = -120^\circ$, $\theta_{VC} = +120^\circ$.

Tensão de fase eficaz das residências medidas em [15]: 127 V.

Valores de I_{ef} foram fornecidos em [15].

Os valores de potência ativa podem ser calculados pela equação 11.

$$P = I_{ef} \cdot V_{Fef} \cdot \cos\phi \quad (11)$$

- Residência de alto consumo:

FASE	θ_i [°]	ϕ [°]	$\cos\phi$	I_{ef} [A]	$P_{1\phi}$ [W]	$P_{1\phi}/P_t$ [%]
A	5,37	-5,37	0,99561	7,607	961,85	77,5109
B	-130,78	10,78	0,98235	1,962	244,78	19,7254
C	89,94	30,06	0,86550	0,312	34,295	2,7636

Tabela 66 – Características da residência de alto consumo.

- Residência de médio consumo 1:

FASE	θ_i [°]	ϕ [°]	$\cos\phi$	I_{ef} [A]	$P_{1\phi}$ [W]
-	0,45	-0,45	0,99997	1,259	159,88

Tabela 67 – Características da residência de médio consumo 1.

- Residência de médio consumo 2:

FASE	θ_i [°]	ϕ [°]	$\cos\phi$	I_{ef} [A]	$P_{1\phi}$ [W]
-	-6,31	6,31	0,993942	0,510	64,38

Tabela 68 - Características da residência de médio consumo 2.

- Residência de baixo consumo:

FASE	$\theta_i [^\circ]$	$\phi [^\circ]$	$\cos\phi$	$I_{ef} [A]$	$P_{1\phi} [W]$
-	0,22	-0,22	0,99999	0,857	108,84

Tabela 69 - Características da residência de baixo consumo.

A partir dos valores de potência ativa e fator de potência na frequência fundamental das residências, apresentados nas tabelas 66 a 69, pode-se ponderar as cargas no sistema de distribuição da figura 15, respeitando as distribuições dos perfis harmônicos de cada estudo e os valores de potência ativa e $\cos\phi$ em cada fase das cargas trifásicas simuladas.

As cargas com perfis harmônicos de alto consumo simuladas respeitaram a distribuição dos valores entre as fases de acordo com a tabela 66, ou seja, não houve alternância de perfis harmônicos entre as fases ao longo do sistema no estudo 1.

As cargas simuladas com perfil harmônico de baixo consumo (estudo 3) possuem mesmo consumo entre as fases, e são consideradas cargas balanceadas. O mesmo ocorre para as cargas 1 e 2 do estudo 2, e para as cargas do estudo 4, com exceção da carga 2 trifásica com perfil harmônico de alto consumo.