

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

MARTINS DARIO GONÇALVES GALINDO

**AVALIAÇÃO DA DISTORÇÃO HARMÔNICA EM UM  
TRANSFORMADOR DE 300 kVA DA UNIVERSIDADE  
TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ, CAMPUS CURITIBA, SEDE  
CENTRO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2016

MARTINS DARIO GONÇALVES GALINDO

**AVALIAÇÃO DA DISTORÇÃO HARMÔNICA EM UM  
TRANSFORMADOR DE 300 kVA DA UNIVERSIDADE  
TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ, CAMPUS CURITIBA, SEDE  
CENTRO**

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

Orientador: Prof. Dr. Joaquim Eloir Rocha

CURITIBA

2016

**Martins Dario Gonçalves Galindo**

**AVALIAÇÃO DA DISTORÇÃO HARMÔNICA EM UM  
TRANSFORMADOR DE 300 kVA DA UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA  
FEDERAL DO PARANÁ, CAMPUS CURITIBA, SEDE CENTRO**

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

Curitiba, 28 de setembro de 2016.

---

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

---

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

*ORIENTAÇÃO*

---

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

*BANCA EXAMINADORA*

---

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

---

Julio Cesar Nitsch, Dr.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Jaime Favretto, Mestre.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

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

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho a minha mãe e a minha esposa que sempre apoiaram minhas escolhas.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao prof. Dr. Joaquim por suas orientações precisas e fundamentais para que eu pudesse desenvolver meu trabalho com mais confiança e certeza de que fui pelo caminho certo.

Ao setor de projetos da UTFPR por disponibilizarem acesso à subestação de energia elétrica sempre que necessário.

## RESUMO

GALINDO, Martins Dario Gonçalves. Avaliação da Distorção Harmônica em um Transformador de 300 kVA da Universidade Federal Tecnológica Federal do Paraná, campus Curitiba, sede Centro. 2016. 88 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

Este trabalho apresenta uma pesquisa de campo realizada com um analisador de energia classe A para obter dados da distorção harmônica de corrente e de tensão em uma instalação elétrica alimentada por um transformador de 300 kVA e para compará-las com as recomendações do *IEEE std 519-2014*, do módulo 8 do PRODIST e do *IEC 61000-3-6*. Verifica-se qual a capacidade desse transformador suprir potência à carga sem sofrer aquecimentos adicionais ocasionados pelos harmônicos de corrente, conforme orientações do *IEEE Std C57.110-1998*. Aborda-se os conceitos matemáticos sobre harmônicos, os principais causadores desse fenômeno, métodos de atenuação e um estudo de caso em uma instalação elétrica com características similares a da UTFPR. Demonstra-se o dimensionamento de um filtro passivo do tipo shunt para confinar o 3º harmônico de corrente, simula-se computacionalmente as distorções harmônicas de corrente e tensão após a implementação do filtro e qual a nova capacidade do transformador suprir potência à carga sem aquecimentos adicionais.

**Palavras-chave:** Distorção harmônica de corrente. Distorção harmônica de tensão. Transformador. 3º harmônico. Filtro passivo do tipo Shunt.

## ABSTRACT

GALINDO, Martins Dario Gonçalves. Evaluation of Harmonic Distortion in a 300 kVA Transformer of the Federal Technological University of Paraná, Curitiba campus, Downtown. 2016. 88 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

This paper shows a field research using a class A power analyzer to get data from current and voltage harmonic distortion in an electrical installation supplied by a 300 kVA transformer and compare them with the *IEEE std 519-2014*, the PRODIST 8 module and the *IEC 61000-3-6* recommendations. It is observed what the transformer capability to provide load without overheating due to harmonic currents, following the *IEEE Std C57.110-1998* recommendations. Approaches to the mathematical concepts of harmonics, the main causes of this phenomenon, mitigation methods and a case study on an electrical installation with similar characteristics to the UTFPR. Sizing of a shunt passive filter to trap the 3<sup>rd</sup> harmonic current is developed, computational simulation is used to get the current and voltage harmonic distortion after the filter application and what is the new transformer capability to provide power to the load without overheating.

**keywords:** Current harmonic distortion. Voltage harmonic distortion. Transformer. 3<sup>rd</sup> harmonic. Shunt passive filter.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Oscilografia dos harmônicos de corrente no neutro do transformador 1.....	20
Figura 2 - Séries de Fourier representando função não senoidal.....	25
Figura 3 - Tensão e corrente na frequência fundamental, onda puramente senoidal .....	25
Figura 4 - Triângulo de potências.....	27
Figura 5 - Esquema tridimensional das potências considerando os harmônicos.....	28
Figura 6 - PAC localizado no primário e no secundário do transformador .....	29
Figura 7 - Fluxo de harmônicos de 3ª ordem no primário e no secundário do transformador.	30
Figura 8 - Exemplo de formato de onda especial para equipamentos da classe D.....	35
Figura 9 – (a) Forma de onda da corrente e (b) espectro dos harmônicos de corrente de uma lâmpada fluorescente com reator magnético .....	40
Figura 10 – Retificador monofásico .....	41
Figura 11 - Formas de ondas características de tensão e corrente em retificadores monofásicos .....	41
Figura 12 - Espectro harmônico característico de uma fonte chaveada.....	42
Figura 13 - Retificador trifásico de 6 pulsos .....	42
Figura 14 - Topologia de um inversor de frequência.....	43
Figura 15 - (a) forma de onda da corrente e (b) espectro harmônico .....	44
Figura 16 - Curva de excitação do transformador .....	45
Figura 17 - Curva de Histerese e forma de onda de corrente do transformador à vazio .....	45
Figura 18 - Corrente contínua e corrente alternada, com efeito pelicular, em condutor elétrico .....	47
Figura 19 - Corrente no condutor neutro contendo harmônicos de 3ª ordem .....	48
Figura 20 - Resposta em frequência de uma instalação elétrica sem banco de capacitores.....	50
Figura 21 - Espectro harmônico da instalação elétrica sem banco de capacitores.....	50
Figura 22 - Ressonância paralela no 9º harmônico devido a banco de capacitores de 50 kvar	51
Figura 23 - Espectro harmônico da instalação elétrica com banco de capacitores de 50 kvar	51
Figura 24 - Distorção de corrente em função do reator de linha utilizado.....	54
Figura 25 - Reator de linha da Schaffner RWK 212-35-KL com corrente nominal de 35 A ..	54
Figura 26 - Filtros passivos do tipo shunt .....	55
Figura 27 - Resposta em frequência com e sem filtro de sintonia.....	56
Figura 28 - Filtro passivo série.....	57



Figura 29 - Filtro ativo alimentando carga não linear com uma corrente distorcida.....	57
Figura 30 - Transformador Zig-Zag conectado a carga monofásica não linear .....	58
Figura 31 - Diagrama unifilar da instalação elétrica em estudo.....	59
Figura 32 - Filtro de bloqueio posicionado no condutor neutro.....	61
Figura 33 - Resposta em frequência da aplicação do filtro série sintonizado no 3° harmônico .....	61
Figura 34 – DHT <sub>V</sub> na fase ‘a’ .....	62
Figura 35 - DHT <sub>I</sub> na fase ‘a’ .....	62
Figura 36 - Forma de onda de corrente na fase 'a' com e sem o uso do filtro .....	63
Figura 37 - DHT <sub>I</sub> na fase 'a'.....	63
Figura 38 – Formas de onda de corrente na fase ‘a’ e no condutor neutro antes e depois do uso autotransformador em Zig-Zag.....	64
Figura 39 - Diagrama unifilar simplificado da SE da UTFPR .....	65
Figura 40 - Oscilografia da potência aparente e do fator de potência do transformador 1 .....	66
Figura 41 - Espectro harmônico de corrente nas fases .....	66
Figura 42 - Oscilografia dos harmônicos de corrente presentes no condutor neutro .....	68
Figura 43 – Resposta em frequência da análise do transformador 1 .....	70
Figura 44 - DHT <sub>V</sub> nas fases A, B e C.....	70
Figura 45 - Oscilografia das potências no transformador 1 .....	71
Figura 46 - Diagrama multifilar com aplicação de filtro passivo do tipo shunt.....	73
Figura 47 - circuito equivalente monofásico da UTFPR .....	74
Figura 48 - Resposta em frequência com filtro sintonizado em 180 Hz.....	78
Figura 49 – DHT <sub>V</sub> no primário do transformador 1 .....	79
Figura 50 - Correntes drenadas pelo filtro em função da frequência .....	79
Figura 51 - Harmônicos de corrente que circulam no secundário do transformador 1 .....	80
Figura 52 – Fluxo de harmônicos de corrente no primário do transformador 1 .....	81

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fluxo dos harmônicos de corrente no condutor neutro, valores máximos encontrados .....	19
Tabela 2 - Distorção harmônica de tensão em % da tensão nominal na frequência fundamental .....	32
Tabela 3 - DTD em % da máxima demanda de corrente $I_L$ na frequência fundamental .....	33
Tabela 4 - Níveis de compatibilidade para harmônicos de tensão individuais em sistemas de distribuição de baixa-tensão de acordo com o IEC 61000-2-2*.....	34
Tabela 5 - Limites para harmônicos de corrente para equipamentos classe A.....	34
Tabela 6 - Limites para harmônicos de corrente para equipamentos classe C.....	35
Tabela 7 - Limites para harmônicos de corrente para equipamentos classe D.....	35
Tabela 8 - Limites para harmônicos de corrente para equipamentos com corrente maior que 16 A.....	36
Tabela 9 - Níveis de planejamento para harmônicos de tensão (% da fundamental) para MT	36
Tabela 10 - Níveis de planejamento para harmônicos de tensão (% da fundamental) para AT e EAT .....	37
Tabela 11 - Valores de referência globais das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental).....	37
Tabela 12 - Níveis de referência distorções harmônicas individuais de tensão (em % da tensão fundamental).....	38
Tabela 13 - Fator $f_h$ para determinação da corrente no condutor neutro.....	39
Tabela 14 - Valores $DHT_I$ e $DHI_I$ em função da impedância percentual dos reatores de linha	55
Tabela 15 - DTD, $DHI_I$ e os harmônicos de corrente nas fases A, B e C .....	67
Tabela 16 - Valores médios de corrente $rms$ dos harmônicos no condutor neutro.....	69
Tabela 17 - Distribuição dos harmônicos de corrente para a determinação do $F_{HL}$ .....	72
Tabela 18 - Comparação com a recomendação do IEEE 18-2012 .....	77
Tabela 19 - Comparação do sistema elétrico do transformador 1 sem o filtro e com o filtro..	81
Tabela 20 - Distribuição dos harmônicos de corrente para a determinação do $F_{HL}$ com o uso do filtro passivo do tipo shunt .....	82

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AQEE – Analisador de Qualidade de Energia Elétrica

AT – Alta Tensão

BT – Baixa Tensão

c.a. – corrente alternada

c.c. – corrente contínua

CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

DHIv – Distorção Harmônica Individual de Tensão

DHTv – Distorção Harmônica Total de Tensão

DTD – Distorção Total de Demanda

EAT – Extra Alta Tensão

EMC – Compatibilidade Eletromagnética

IEC – Comitê Internacional de Eletrotécnica

IEEE – Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos

MT – Média Tensão

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

PAC – Ponto de Acoplamento Comum

PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Nacional

PWM – Modulação por Largura de Pulso

QEE – Qualidade de Energia Elétrica

SE – Subestação de energia elétrica

TPs – Transformadores de Potencial

TCs – Transformadores de Corrente

UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a_0$	valor médio da função
$a_n$	componente retangular
$b_n$	componente retangular
$A_n$	módulo da amplitude
$\Phi_n$	ângulo de defasagem
$v(t)$	tensão em função do tempo
$i(t)$	corrente em função do tempo
$V_1$	tensão de pico
$I_1$	corrente de pico
$V_{1\_rms}$	tensão <i>rms</i> na frequência fundamental
$I_{1\_rms}$	corrente <i>rms</i> na frequência fundamental
$P_1$	potência ativa na frequência fundamental
$Q_1$	potência reativa na frequência fundamental
$S_1$	potência aparente na frequência fundamental
$\cos\Phi$	fator de deslocamento
FP	fator de potência
$V_{rms}$	tensão <i>rms</i>
$I_{rms}$	corrente <i>rms</i>
$V_h$	harmônico de tensão
$I_h$	harmônico de corrente
$h$	ordem do harmônico
$P$	potência ativa
$Q$	potência reativa
$S$	potência aparente
$D$	potência de distorção
$I_0$	corrente de sequência zero
$V_n$	tensão nominal
$I_{SC}$	corrente de curto-circuito
$I_L$	demanda máxima de corrente na frequência fundamental
$I_n$	corrente <i>rms</i> no condutor neutro
$I_B$	corrente de projeto

$f_h$	fator para determinação da corrente no condutor neutro
$I_\phi$	corrente de excitação
$R_{ca}$	resistência em corrente alternada
$R_{cc}$	resistência em corrente contínua
$r$	raio do condutor
$\delta$	profundidade de penetração da corrente
$\rho$	resistividade elétrica
$\mu$	permissividade do material
$\omega$	frequência angular
$l$	comprimento do condutor
$A$	seção nominal do condutor
$I_{3f}$	harmônicos de corrente de 3ª ordem nas fases
$X_C$	reatância capacitiva
$X_L$	reatância indutiva
$f_p$	ressonância paralela
$L$	indutância
$C$	capacitância
$h_r$	harmônico ressonante
$kVA_{tr}$	potência nominal do transformador
$kvar_{cap}$	potência reativa do banco de capacitores
$Z\%_{tr}$	impedância percentual do transformador
$P_{NL}$	perdas sem carga
$P_{LL}$	perdas com carga
$P_{EC}$	perdas nos enrolamentos por correntes de Foucault
$P_{EC-R}$	perdas nos enrolamentos por correntes de Foucault em condições nominais
$I_R$	corrente nominal <i>rms</i> na frequência fundamental
$P_{OSL}$	outras perdas por dispersão de fluxo
$P_{OSL-R}$	outras perdas por dispersão de fluxo para valores nominais de carga
$FQ$	fator de qualidade
$R$	resistência do filtro
$h_s$	harmônico sintonizado
$S_b$	potência base
$V_b$	tensão base

$I_{cc3\phi\_simétrico}$	corrente de curto-circuito simétrico
$Z_{ponto\ de\ entrega}$	impedância no ponto de entrega em pu
$V_{primário}$	tensão no primário do transformador
$V_{secundário}$	tensão no secundário do transformador
$F_{HL}$	fator de perdas por harmônicos
$X_{ponto\ de\ entrega}$	reatância no ponto de entrega
$X_P$	reatância do primário do transformador
$X_S$	reatância do secundário do transformador
$X_{reator}$	reatância do reator
$I_{L2}$	demanda máxima de corrente no secundário do transformador
$\cos\Phi_{mínimo}$	fator de deslocamento mínimo
$\cos\Phi_{esperado}$	fator de deslocamento esperado
$P_{1\phi\_1}$	potência ativa monofásica na frequência fundamental
$Q_{1\phi\_1}$	potência reativa monofásica na frequência fundamental
$tg$	tangente
$acos$	arco-cosseno
$\Phi_{mínimo}$	defasagem angular mínima entre tensão e corrente
$\Phi_{esperado}$	defasagem angular esperada entre tensão e corrente
$Q_{c\_necessário}$	potência reativa necessária
$Q_c$	potência reativa do banco de capacitores
$Q_{1\phi\_corrigido}$	potência reativa corrigida
$S_{1\phi\_corrigido\_1}$	potência aparente monofásica corrigida na frequência fundamental
$\cos\Phi_{corrigido}$	fator de deslocamento corrigido
$Q_{filtro}$	potência reativa liberada pelo filtro passivo do tipo shunt
$I_{filtro}$	corrente nominal do filtro passivo do tipo shunt
$I_c$	corrente nominal do banco de capacitores
$I_{filtro\_rms}$	corrente <i>rms</i> do filtro passivo do tipo shunt
$V_c$	tensão no banco de capacitores na frequência fundamental
$V_{c\_3}$	tensão no 3º harmônico no banco de capacitores
$V_{c\_rms}$	tensão <i>rms</i> no banco de capacitores
$V_{c\_pico}$	tensão de pico no banco de capacitores
$Q_{c\_filtro}$	potência reativa liberada pelo banco de capacitores como parte do filtro

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	17
1.1	TEMA.....	18
1.1.1	Delimitação do tema.....	18
1.2	PROBLEMA .....	19
1.3	OBJETIVOS.....	20
1.3.1	Objetivo Geral.....	20
1.3.2	Objetivos Específicos .....	21
1.4	JUSTIFICATIVA .....	21
1.5	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....	22
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	22
2.	REFERENCIAL TEÓRICO.....	24
2.1	SÉRIES DE FOURIER.....	24
2.2	INFLUÊNCIA DOS HARMÔNICOS NOS SISTEMAS DE POTÊNCIA.....	26
2.2.1	Sistemas elétricos de potência sem harmônicos.....	26
2.2.1	Sistemas de potência com harmônicos .....	27
2.3	INDICADORES SOBRE DISTORÇÃO HARMÔNICA .....	29
2.3.1	Distorção Harmônica Total (DHT) .....	30
2.3.2	Distorção Total de Demanda (DTD) .....	31
2.4	PADRÕES RECOMENDADOS SOBRE DISTORÇÃO HARMÔNICA.....	32
2.4.1	IEEE Std 519-2014.....	32
2.4.2	IEC 61000 .....	33
2.4.3	Módulo 8 do PRODIST .....	37
2.4.4	NBR 5410 .....	38
2.5	FONTES GERADORAS DE HARMÔNICOS DE CORRENTE .....	39
2.5.1	Lâmpadas fluorescentes.....	40
2.5.2	Retificadores monofásicos .....	41
2.5.3	Retificadores trifásicos .....	42
2.5.4	Conversores de frequência .....	43
2.5.5	Transformador.....	44
2.6	EFEITOS PROVOCADOS PELOS HARMÔNICOS.....	46
2.6.1	Efeito pelicular .....	46

2.6.2	Sobreaquecimento no condutor neutro .....	47
2.6.3	Impacto nos capacitores.....	48
2.6.3	Ressonância.....	49
2.6.5	Impacto em motores elétricos .....	53
2.7	MÉTODOS PARA ATENUAR A DISTORÇÃO HARMÔNICA .....	53
2.7.1	Reatores de linha .....	53
2.7.2	Filtros passivos.....	55
2.7.3	Filtros ativos.....	57
2.7.4	Transformador em Zig-Zag.....	58
3.	ESTUDO DE CASO .....	59
3.1	EFICÁCIA NA ATENUAÇÃO DE HARMÔNICOS EM EQUIPAMENTOS DE ESCRITÓRIOS EM EDIFÍCIOS COMERCIAIS .....	59
3.1.1	Filtro de bloqueio de corrente no neutro (NCF).....	61
3.1.2	Autotransformador em Zig-Zag (ZZF) .....	63
4.	ANÁLISE DA DISTORÇÃO HARMÔNICA NO TRANSFORMADOR 1 .....	65
5.	ANÁLISE DA DISTORÇÃO HARMÔNICA COM APLICAÇÃO DE FILTRO.....	73
6.	CONCLUSÃO .....	83
7.	REFERÊNCIAS.....	86



## 1. INTRODUÇÃO

Cada vez mais o termo eficiência energética é empregado quando se refere ao bom aproveitamento da energia elétrica. Tendência esta que visa a redução de custos através de sistemas elétricos mais eficientes e eficazes que resultem em melhorias para a concessionária de energia e o consumidor final.

Uma maneira de melhorar a eficiência energética é através da Qualidade de Energia Elétrica (QEE), que segundo o Módulo 8 do PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Nacional) – Qualidade de Energia Elétrica – é mensurada através dos seguintes indicadores, seja em regime permanente ou transitório:

1. Tensão em regime permanente;
2. Fator de potência;
3. Harmônicos;
4. Desequilíbrios de tensão;
5. Flutuação de tensão;
6. Variações de tensão de curta duração;
7. Variação de frequência.

Este trabalho aborda o item 3, harmônicos. Estes podem ser definidos da seguinte forma:

“Um harmônico é definido como um componente com uma frequência que é um múltiplo inteiro (chamado de harmônico de ordem  $n$ ) da frequência fundamental. O número do harmônico indica a frequência harmônica: o primeiro harmônico é a frequência fundamental (50 ou 60 Hz), o segundo harmônico é a componente com frequência duas vezes a fundamental (100 ou 120 Hz) e assim por diante”. (BAGINNI, 2008, p. 187)

Os harmônicos estão presentes em todo o tipo de instalação elétrica (residencial, comercial e industrial) que possua cargas não lineares. Segundo *IEEE Std 519-2014*, tais cargas são responsáveis por:

“Alterar a natureza senoidal da corrente alternada (e conseqüentemente a queda de tensão c.a.) resultando dessa forma no fluxo de harmônicos de corrente no sistema de potência c.a. que pode causar interferência em circuitos de comunicação e outros tipos de equipamentos. Estes harmônicos de corrente podem também levar ao aumento de perdas e aquecimento em numerosos sistemas eletromagnéticos (motores, transformadores, etc.)”.

## 1.1 TEMA

“O crescente uso de conversores estáticos em cargas industriais alimentadas por pequenos e médios transformadores têm resultado em um aumento significativo de conteúdo harmônico de corrente. Sabe-se que um elevado conteúdo harmônico de corrente aumenta as perdas nos enrolamentos, devido às correntes de Foucault, e a dispersão de fluxo que, conseqüentemente, elevam as temperaturas de operação no transformador”. (IEEE Std C57-110-1998, 1998, p. iii)

Avaliações das distorções harmônicas de corrente e tensão podem ser realizadas em um transformador com o uso de um analisador de energia, que colete dados de corrente e tensão em frequências múltiplas da fundamental. De posse desses dados, pode-se verificar se as distorções harmônicas de corrente e tensão atendem as recomendações existentes e o quanto afetam a capacidade do transformador suprir potência ativa à carga.

### 1.1.1 Delimitação do tema

A medição dos harmônicos de corrente e tensão foi realizada na subestação de energia elétrica (SE) da UTFPR, que possui as seguintes características:

- Do tipo rebaixadora.
- Tensão base de 13,8 kV, potência base de 100 MVA.
- Impedância no ponto de entrega de  $0,1961 + j0,8297$  pu.
- Transformador 1: 300 kVA, 13200/220 – 127 V e impedância percentual de 4,53%.
- Transformador 2: 300 kVA, 13200/220 – 127 V e impedância percentual de 4,78%.
- Transformador 3: 300 kVA, 13200/380 – 220 V e impedância percentual de 4,5%.
- Transformador 4: 300 kVA, 13200/220 – 127 V e impedância percentual de 4,5%.
- Dois bancos de capacitores de 20 kvar, instalados nos transformadores 1 e 2.

As distorções harmônicas foram medidas no transformador 1 até o 25º harmônico por cinco dias. Os seguintes parâmetros foram medidos:

- Distorção harmônica individual de corrente ( $DHI_I$ ).
- Distorção total de demanda (DTD).
- Distorção harmônica total de tensão ( $DHT_V$ ).

Após a realização das medições, compararam-se os valores das  $DHI_I$  e DTD com as recomendações do *IEEE Std 519-2014* e as  $DHT_V$  com as recomendações do módulo 8 do PRODIST e do *IEC 61000-3-6*. Ainda, verificou-se a capacidade do transformador 1 suprir potência ativa à carga considerando os harmônicos de corrente conforme recomendações do *IEEE Std C57-110-1998*.

Simulou-se computacionalmente com o programa *HarmZs*, da CEPEL, a distorção harmônica de corrente e tensão com um filtro passivo do tipo shunt para o 3º harmônico no transformador 1 e qual a capacidade deste em suprir potência à carga sem aquecimentos adicionais ocasionados pelos harmônicos de corrente.

## 1.2 PROBLEMA

“Os harmônicos aumentam o sobreaquecimento nos condutores elétricos, motores e transformadores, resultando em uma ruptura prematura da isolamento do material e em uma considerável redução na vida útil de motores elétricos e de transformadores”. (ACHA, MADRIGAL, 2001, p. 5)

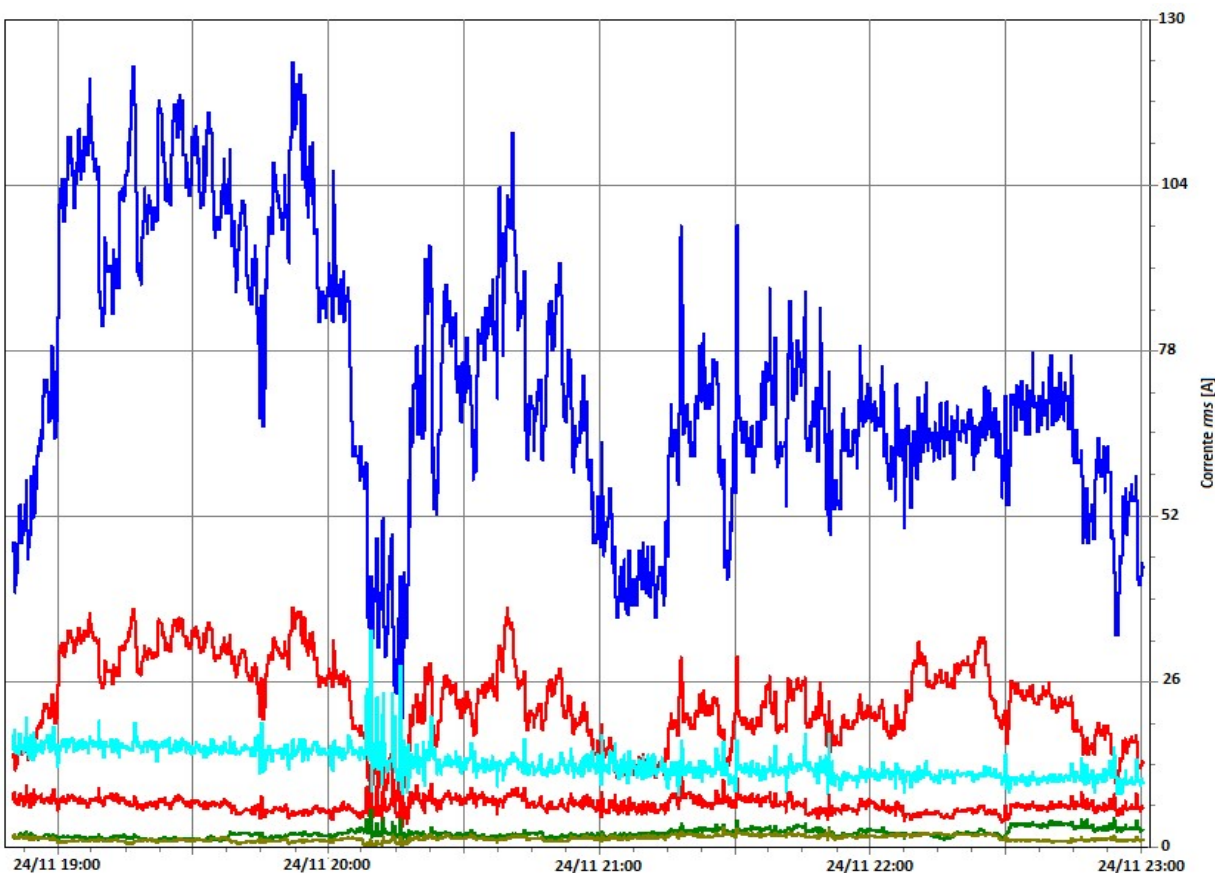
A maioria das cargas presentes na UTFPR são não lineares e monofásicas. Estas apresentam um elevado conteúdo harmônico de corrente de 3ª ordem. A figura 1 apresenta a oscilografia dos harmônicos de corrente que circulam no condutor neutro do transformador 1 e nota-se que o 3º harmônico (cor azul escuro) tem o maior valor entre os outros harmônicos, inclusive o 1º harmônico (frequência fundamental); e na tabela 1 são apresentados os valores máximos dos harmônicos de corrente medidos.

**Tabela 1 - Fluxo dos harmônicos de corrente no condutor neutro, valores máximos encontrados**

Cor na oscilografia	Harmônico	<i>I<sub>rms</sub></i> [A]
Vermelho – traço espesso	1º	100
Azul escuro	3º	327,67
Vermelho – traço fino	5º	31,4
Verde escuro	7º	6,83
Azul claro	9º	109,78
Verde	11º	9,59

Fonte: Autoria própria (2016)

Observa-se que além do 3º harmônico existem outros harmônicos presentes. Todos esses harmônicos circulam pelo secundário do transformador 1 e resultam na diminuição da capacidade de suprir potência ativa à carga.



**Figura 1 - Oscilografia dos harmônicos de corrente no neutro do transformador 1**  
Fonte: Autoria própria (2016)

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo Geral

Avaliar a distorção harmônica presente no transformador 1 e simular computacionalmente os valores das distorções harmônicas de tensão e corrente com a adoção de um filtro passivo do tipo shunt para o 3º harmônico e a capacidade do transformador suprir potência ativa à carga.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Pesquisar a literatura técnica sobre o fluxo harmônico.
- Realizar medições do conteúdo harmônico com um Analisador de Qualidade de Energia Elétrica (AQEE).
- Comparar os valores obtidos com os recomendados pelo *IEEE Std 519-2014*, pelo módulo 8 do PRODIST e pelo *IEC 61000-3-6*.
- Verificar a capacidade do transformador 1 em suprir potência à carga.
- Propor um método de atenuação para o conteúdo harmônico gerado.
- Simular computacionalmente a solução proposta para verificar a efetividade da atenuação dos harmônicos.
- Verificar a capacidade do transformador 1 em suprir potência à carga com a adoção do filtro passivo do tipo shunt.

## 1.4 JUSTIFICATIVA

Em 28 de novembro de 2015, realizou-se uma oscilografia no condutor neutro do transformador 1 (figura 1) e constatou-se que há uma elevada distorção harmônica de corrente, especialmente o 3º harmônico, que apresenta valores três vezes maiores que a corrente na frequência fundamental, isto é, por desbalanceamento de fases.

Portanto, um estudo que avalie a distorção harmônica e compare com as recomendações existentes, fornecerá informações acerca do estado da instalação elétrica e do transformador 1, que poderá ser útil para o setor de projetos da UTFPR em trabalhos futuros de ampliação ou manutenção da instalação elétrica.

## 1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Realizou-se uma pesquisa na literatura sobre harmônicos nos sistemas elétricos de potência, quais os níveis de distorção harmônica considerados aceitáveis e quais os métodos de atenuação.

Coletaram-se dados da distorção harmônica na UTFPR, campus Curitiba, sede Centro, com o AQEE Fluke 435 Series II no transformador 1 e seus resultados foram avaliados e tratados com o programa Fluke Power Log e comparados com as recomendações existentes.

Simulou-se com o programa *HarmZs* quais seriam os níveis de distorção harmônica presentes com adoção de um filtro passivo do tipo shunt no transformador 1 e qual seria capacidade deste suprir potência ativa à carga sem aquecimentos adicionais devido aos harmônicos de corrente.

## 1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho apresentará, conforme normas internas da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, a seguinte estrutura:

Capítulo 1: Introdução - apresentação e contextualização inicial do trabalho, tema, delimitação do tema, problemas e premissas, objetivos, justificativa e procedimentos metodológicos.

Capítulo 2: Referencial Teórico – Séries de Fourier, conceitos sobre harmônicos de tensão e corrente, indicadores de distorção harmônica, recomendações sobre limites de distorção harmônica, fontes geradoras de harmônicos, métodos para atenuação dos harmônicos.

Capítulo 3: Estudo de caso – métodos aplicados para atenuar a distorção harmônica em uma instalação elétrica com características similares à da UTFPR.

Capítulo 4: Análise da distorção harmônica no transformador 1 – diagrama unifilar da instalação elétrica sob estudo, distorções harmônicas de corrente e de tensão obtidos no secundário do transformador 1, comparação com as recomendações do *IEEE Std 519-2014*, do módulo 8 do PRODIST e do *IEC 61000-3-6*, capacidade do transformador 1 suprir potência ativa à carga.

Capítulo 5: Análise da distorção harmônica com aplicação do filtro – dimensionamento do filtro passivo do tipo shunt, distorções harmônicas de corrente e tensão, resposta em frequência, capacidade do transformador 1 suprir potência ativa à carga.

Capítulo 6: Conclusões.

Capítulo 7: Referências.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 SÉRIES DE FOURIER

“Em meados de 1800, o matemático francês, Jean Baptiste Fourier enunciou que uma função periódica não senoidal de frequência fundamental  $f$  pode ser expressa como a soma de funções senoidais de frequências que são múltiplas dessa frequência fundamental  $f$ ” (SANKARAN, p. 80). Essa aplicação é conhecida como Séries de Fourier, uma das ferramentas matemáticas utilizadas para se avaliar os harmônicos em sistemas elétricos de potência.

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left( a_n \cos\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) + b_n \text{sen}\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) \right) \quad (2.1)$$

- $a_0$  – valor médio da função;
- $a_n$  e  $b_n$  – componentes retangulares da função, fornecem a amplitude ( $A_n$ ) e o ângulo de defasagem da função ( $\phi_n$ ).

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (2.2)$$

$$\phi_n = \text{arctg}\left(\frac{a_n}{b_n}\right) \quad (2.3)$$

Os valores de  $a_0$ ,  $a_n$  e  $b_n$  podem ser encontrados através das seguintes fórmulas:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) dt \quad (2.4)$$

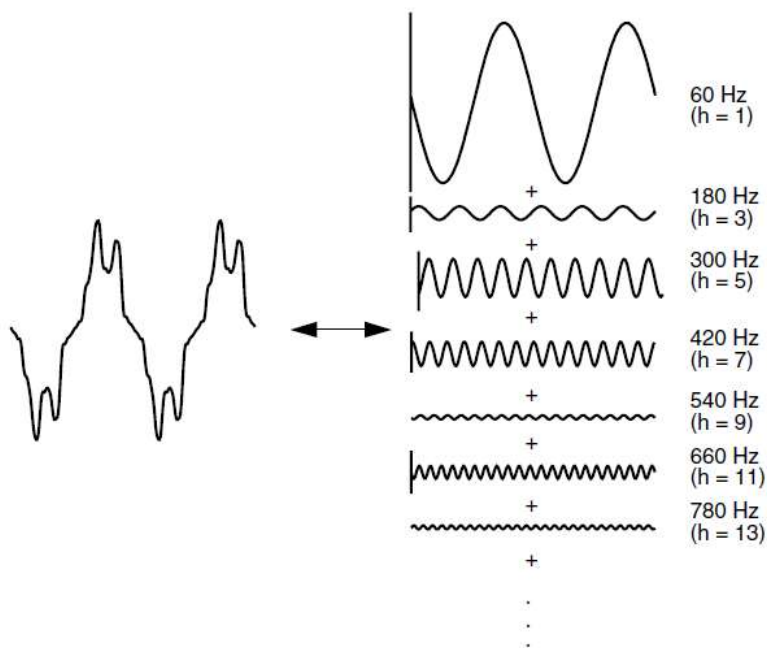
$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cos\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) dt \quad (2.5)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \text{sen}\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) dt \quad (2.6)$$

A figura 2 apresenta uma aplicação das Séries de Fourier. À esquerda tem-se uma onda distorcida e periódica com frequência fundamental de 60 Hz e à direita a decomposição dessa em frequências múltiplas, harmônicos, da frequência fundamental. Os harmônicos (1, 3, 5, 7, ...)



existentes e seus valores eficazes diminuem à medida que se afastam da frequência fundamental (isso não é uma regra).

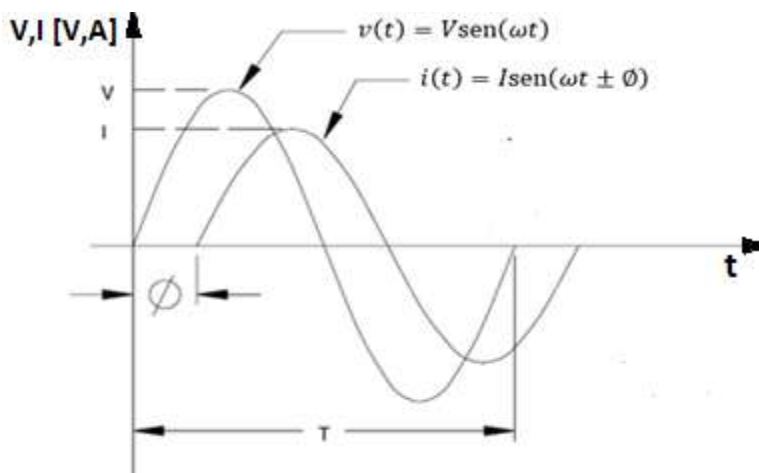


**Figura 2 - Séries de Fourier representando função não senoidal**  
**Fonte: DUGAN et al (2004, p. 170)**

Como tensão e corrente são expressas em função do tempo, as seguintes equações são utilizadas:

$$v(t) = V\text{sen}(\omega t) \quad (2.7)$$

$$i(t) = I\text{sen}(\omega t \pm \phi) \quad (2.8)$$



**Figura 3 - Tensão e corrente na frequência fundamental, onda puramente senoidal**  
**Fonte: SANKARAN (2002, p. 81)**

A figura 3 apresenta ondas senoidais de tensão  $V$  e corrente  $I$ . Como tais ondas são senóides puras, não é necessário a aplicação das Séries de Fourier para se determinar os valores de tensão e corrente. Estes podem ser determinados com uso das equações 2.7 e 2.8.

No entanto, as equações 2.7 e 2.8 não podem ser utilizadas quando há uma forma de onda de tensão ou de corrente como a apresentada na figura 2. Para tal análise, as Séries de Fourier devem ser aplicadas conforme equações 2.9 e 2.10:

$$v(t) = v_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)) \quad (2.9)$$

$$i(t) = i_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)) \quad (2.10)$$

## 2.2 INFLUÊNCIA DOS HARMÔNICOS NOS SISTEMAS DE POTÊNCIA

### 2.2.1 Sistemas elétricos de potência sem harmônicos

Quando a frequência envolvida é apenas a fundamental, as seguintes relações são válidas:

$$V_{1_{rms}} = \frac{1}{\sqrt{2}} V_1 \quad (2.11)$$

$$I_{1_{rms}} = \frac{1}{\sqrt{2}} I_1 \quad (2.12)$$

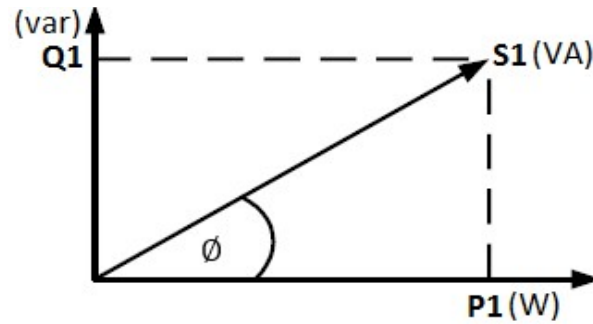
Onde  $V_1$  e  $I_1$  são, respectivamente, os valores de pico e  $V_{1_{rms}}$  e  $I_{1_{rms}}$  são a tensão e a corrente *rms* na frequência fundamental, respectivamente. As relações de potência são dadas por:

$$P_1 = V_{1_{rms}} I_{1_{rms}} \cos \phi \quad (2.13)$$

$$Q_1 = V_{1_{rms}} I_{1_{rms}} \sin \phi \quad (2.14)$$

$$S_1 = V_{1_{rms}} I_{1_{rms}} = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2} \quad (2.15)$$

- $P_1$  – potência ativa na frequência fundamental.
- $Q_1$  – potência reativa na frequência fundamental.
- $S_1$  – potência aparente na frequência fundamental.



**Figura 4 - Triângulo de potências**  
**Fonte: DUGAN et al (2004, P.176)**

Sem a presença de harmônicos, o *fator de deslocamento* – defasamento angular entre a tensão e a corrente – é dado por:

$$\cos\phi = \frac{P_1}{S_1} \quad (2.16)$$

### 2.2.1 Sistemas de potência com harmônicos

Quando há distorções nas formas de onda de tensão e corrente, é necessário considerar os harmônicos presentes. Logo, são utilizadas as seguintes equações:

$$V_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{máx}} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} V_h\right)^2} \quad (2.17)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{máx}} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} I_h\right)^2} \quad (2.18)$$

- $V_{rms}$  – tensão *rms*.
- $I_{rms}$  – corrente *rms*.
- $V_h$  – harmônico de tensão.
- $I_h$  – harmônico de corrente.

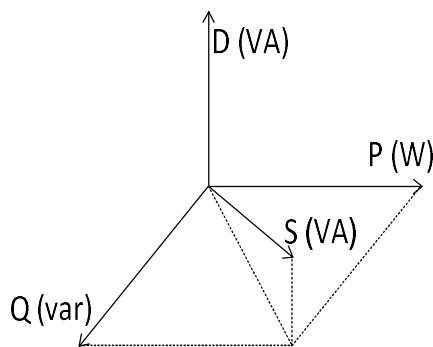
$$P = V_{rms} I_{rms} \cos\phi \quad (2.19)$$

$$Q = V_{rms}I_{rms}\text{sen}\phi \quad (2.20)$$

Com a presença de harmônicos uma componente é somada vetorialmente para determinação da potência aparente  $S$  e denominada de *potência de distorção* ou *volt-ampères distorção* ( $D$ ) e sua unidade de medida é o volt-ampère [VA], “porém não é estritamente apropriado referir-se a ela como potência, porque ela não flui no sistema como a potência o faz ...  $D$  representa todos os produtos entre tensão e corrente em frequências distintas, os quais não produzem potência média” (DUGAN et al, 2004, p. 176).

$$S = V_{rms}I_{rms} = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (2.21)$$

A equação 2.21 apresenta a equação que define como a potência aparente  $S$  pode ser determinada para funções não senoidais. Logo, é compreensível que a figura 4 não faça mais sentido para cargas não-lineares, uma vez que ela apenas inclui as componentes na frequência fundamental. Dessa forma, a figura 5 contém a representação tridimensional de como a potência aparente  $S$  é constituída.



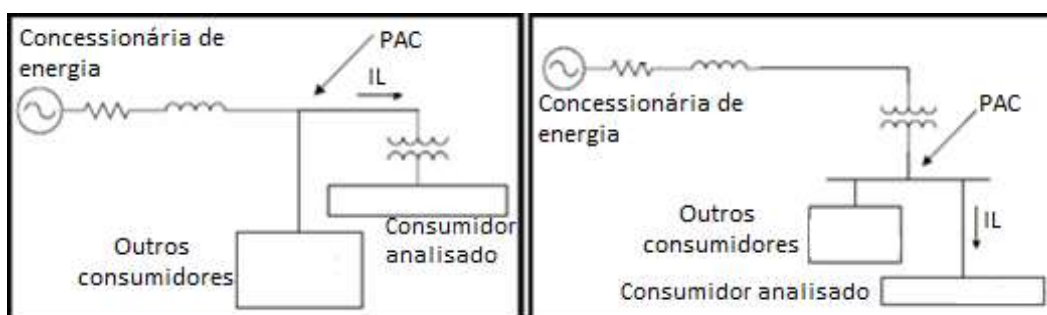
**Figura 5 - Esquema tridimensional das potências considerando os harmônicos**  
**Fonte: DUGAN et al (2004, p. 177)**

Para o cálculo do fator de potência, que é diferente do fator de deslocamento, a seguinte fórmula é utilizada:

$$\cos\phi \neq FP = \frac{P}{S} \quad (2.22)$$

## 2.3 INDICADORES SOBRE DISTORÇÃO HARMÔNICA

Para a realização das medições na SE da UTFPR serão utilizados como referência os indicadores presentes no *IEEE-P519A-D5 “Guide for Applying Harmonic Limits on Power Systems”*. Porém, antes de apresentá-los, é interessante definir PAC, ponto de acoplamento comum. Este é o local onde um consumidor ou mais são alimentados pela concessionária de energia. O PAC pode ser localizado tanto no lado primário como no secundário do transformador. A figura 6 apresenta as duas localizações do PAC.

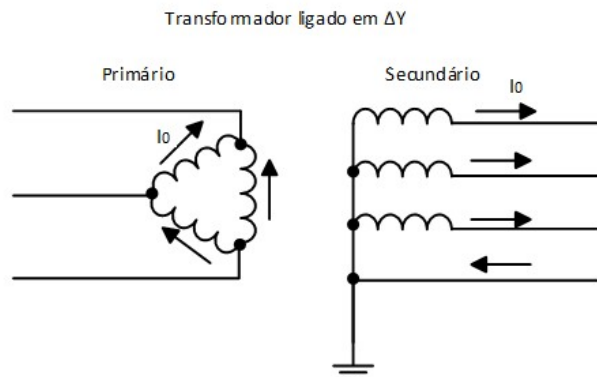


**Figura 6 - PAC localizado no primário e no secundário do transformador**

Fonte: IEEE Standard 519-2014, IEEE

Normalmente, as medições de harmônicos são realizadas no PAC e dependendo da posição deste os resultados obtidos podem variar. Por exemplo:

- O lado esquerdo da figura 6 possui o PAC conectado em um nó que interliga outros consumidores e o primário do transformador de distribuição. Considerando que o transformador esteja ligado em  $\Delta Y$  e o consumidor analisado possua em sua maioria cargas monofásicas, a medição realizada no PAC não será adequada. Os harmônicos de 3ª ordem fluem pelo neutro do secundário do transformador ligado em Y, porém ao serem refletidos para o primário do transformador ligado em  $\Delta$ , eles serão confinados, caso a carga esteja equilibrada, e a medição não identificará tais harmônicos. Caso a carga seja desequilibrada, parte dos harmônicos de 3ª ordem poderão ser medidos.



**Figura 7 - Fluxo de harmônicos de 3ª ordem no primário e no secundário do transformador**  
**Fonte: Autoria própria (2016)**

- O lado direito da figura 6 possui o PAC conectado em um nó que interliga outros consumidores, o consumidor sob análise e o secundário do transformador de distribuição. Considerando que o transformador esteja ligado em  $\Delta Y$  e o consumidor analisado possua em sua maioria cargas monofásicas, a medição realizada no PAC será mais adequada que a anterior, pois os harmônicos de 3ª ordem serão medidos em sua totalidade, pois fluem pelo neutro em direção ao secundário do transformador.

Outro aspecto a ser considerado durante a escolha do PAC para a medição dos harmônicos é a presença de banco de capacitores. Estes tendem a drenar harmônicos de corrente devido a reatância capacitiva ser inversamente proporcional à frequência. Portanto, é interessante medir os harmônicos drenados pelo banco de capacitores para que se obtenha o valor total dos harmônicos de corrente presentes na instalação elétrica.

### 2.3.1 Distorção Harmônica Total (DHT)

DHT é a razão entre o valor *rms* dos componentes harmônicos (a partir do 2º harmônico) em uma onda distorcida e o valor *rms* da componente de frequência fundamental (1º harmônico). Tal indicador pode ser utilizado tanto para a tensão ( $DHT_V$ ) como para a corrente ( $DHT_I$ ). Ele quantifica o quão distante se está de uma senóide pura na frequência fundamental.

$$DHT_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} V_h^2}}{V_1} \quad (2.23)$$

$$DHT_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} I_h^2}}{I_1} \quad (2.24)$$

- $h$  – ordem do harmônico.
- $V_h$  – harmônico de tensão.
- $I_h$  – harmônico de corrente.
- $V_{1\_rms}$  – valor *rms* da tensão na frequência fundamental.
- $I_{1\_rms}$  – valor *rms* da corrente na frequência fundamental.

A uso da DHT possui um significado mais concreto quando utilizada para tensão, pois essa não apresenta variações significativas independente do período ou da carga alimentada.

Quando se utiliza a  $DHT_I$ , a análise deve ser mais cautelosa. Para correntes com baixa intensidade, às vezes a  $DHT_I$  pode ser bem elevada. Por exemplo, caso a corrente na frequência fundamental seja de 2 A e existisse uma  $DHT_I$  de 300%, em primeiro momento essa distorção pode causar preocupação. No entanto, a corrente total seria de 6 A e dependendo do sistema elétrico sob análise, esse valor de corrente é insignificante.

### 2.3.2 Distorção Total de Demanda (DTD)

A DTD é um indicador utilizado para verificar a distorção harmônica de corrente com base na demanda máxima de corrente ou corrente nominal, que é um parâmetro fixo durante toda análise.

$$DTD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} I_h^2}}{I_L} \quad (2.25)$$

“ $I_L$  é a demanda máxima de corrente (componente de frequência fundamental) no ponto de acoplamento comum. Ela pode ser calculada como a média da máxima demanda mensal de corrente dos últimos 12 meses ou pode ser estimada”. (IEEE Std 519-2014, 1996, p. 12)

## 2.4 PADRÕES RECOMENDADOS SOBRE DISTORÇÃO HARMÔNICA

Esta seção discorrerá sobre as recomendações estabelecidas sobre os níveis de distorção harmônica de acordo com as seguintes organizações:

- *IEEE Std 519-2014.*
- *IEC 61000.*
- PRODIST módulo 8.
- NBR 5410.

### 2.4.1 IEEE Std 519-2014

Esta recomendação divide responsabilidades entre a concessionária de energia e o consumidor quanto aos níveis dos harmônicos de tensão e corrente. O primeiro deve manter níveis adequados de distorção harmônica de tensão e o segundo é responsável quanto a injeção de harmônicos de corrente no sistema elétrico de potência. Os níveis de distorção harmônica de tensão e de corrente são apresentados nas tabelas 1 e 2, respectivamente.

**Tabela 2 - Distorção harmônica de tensão em % da tensão nominal na frequência fundamental**

PAC no barramento de tensão	Distorção Harmônica Individual de Tensão (%)	Distorção Harmônica Total de Tensão - DHTv (%)
$V_n \leq 69kV$	3.0	5.0
$69kV < V_n \leq 161kV$	1.5	2.5
$V_n > 161kV$	1.0	1.5

Fonte: IEEE Std 519-2014, IEEE

Na tabela 2 estão descritos os limites distorção harmônica de tensão que são considerados aceitáveis. A manutenção dentro desses limites é de responsabilidade da concessionária de energia.



**Tabela 3 - DTD em % da máxima demanda de corrente  $I_L$  na frequência fundamental**

$V_n \leq 69kV$						
$I_{sc} / I_L$	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	$TDD$
<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
$69kV < V_n \leq 161kV$						
<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	1.25	0.35	6.0
100-1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
>1000	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0
$V_n > 161kV$						
<50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
$\leq 50$	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0

Fonte: IEEE Std 519-2014, IEEE

- $I_{SC}$  – corrente de curto-circuito no ponto de acoplamento comum.

Na tabela 3 são apresentados os níveis de distorção harmônica de corrente que podem ser injetados no sistema elétrico de potência pelo consumidor. Tais níveis variam de acordo com a tensão de alimentação, os respectivos harmônicos de corrente e a razão da corrente de curto-circuito  $I_{SC}$  e máxima demanda de corrente  $I_L$ . Por exemplo, para  $V_n < 69$  kV e  $I_{SC}/I_L < 20$ , a máxima DTD é 5 %.

## 2.4.2 IEC 61000

O Comitê Internacional de Eletrotécnica (IEC) definiu padrões a respeito de problemas em qualidade de energia elétrica por meio da categoria *Compatibilidade Eletromagnética (EMC)*. Os padrões IEC série 6000 são divididos em seis partes, dos quais quatro tratam acerca dos harmônicos, são eles:

- IEC 61000-2-2 (1993) – trata os níveis de harmônicos de tensão individuais em sistemas elétricos de baixa-tensão (BT). A  $DHT_V$  é dada em função da frequência fundamental.

**Tabela 4 - Níveis de compatibilidade para harmônicos de tensão individuais em sistemas de distribuição de baixa-tensão de acordo com o IEC 61000-2-2\***

Não múltiplo de 3		Múltiplo de 3			
Ordem ímpar $h$	Tensão harmônica (%)	Ordem ímpar $h$	Tensão harmônica (%)	Ordem par $h$	Tensão harmônica (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.3	6	0.5
13	3	21	0.2	8	0.5
17	2	>21	0.2	10	0.2
19	1.5			12	0.2
23	1.5			>12	0.2
25	1.5				
>25	$0.2 + 1.3 \times 25/h$				

A  $DHT_v$  da fonte de tensão incluindo todos os harmônicos até o 40° deve ser menor que 8%.  
Fonte: IEC 61000, IEC

- *IEC 61000-3-2 (2000)* – define os limites de injeção de harmônicos de corrente por equipamentos com corrente nominal até 16 A por fase e classifica-os em quatro categorias:
  - ✓ *Classe A* – equipamentos trifásicos balanceados e todos os outros equipamentos não pertencentes às classes B, C e D;

**Tabela 5 - Limites para harmônicos de corrente para equipamentos classe A**

Ordem ímpar $h$	Valor máximo permitido para harmônico de corrente (A)	Ordem par $h$	Valor máximo permitido de ordem harmônica (A)
3	2.3	2	1.08
5	1.14	4	0.43
7	0.77	6	0.3
9	0.4	8–40	$0.23 \times 8/h$
11	0.33		
13	0.21		
15–39	$0.15 \times 15/h$		

Fonte: IEC 61000, IEC

- ✓ *Classe B* – ferramentas portáteis;
- ✓ *Classe C* – equipamentos de iluminação, incluindo os que possuam dimmer;

Tabela 6 - Limites para harmônicos de corrente para equipamentos classe C

Ordem harmônica h	Valor máximo permitido de harmônico de corrente* (%)
2	2
3	$30 \times$ fator de potência do circuito
5	10
7	7
9	5
11-39	3

\* Porcentagem da corrente nominal na frequência fundamental

Fonte: IEC 61000, IEC

- ✓ *Classe D* – equipamentos que possuam corrente nominal com um formato de onda “especial” e potência ativa menor que 600 W.

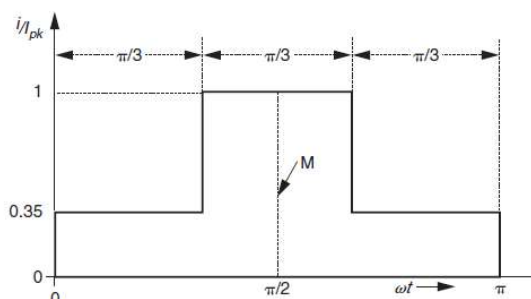


Figura 8 - Exemplo de formato de onda especial para equipamentos da classe D  
Fonte: DUGAN et al (2004, p. 288)

Tabela 7 - Limites para harmônicos de corrente para equipamentos classe D

Ordem harmônica h	Valor máximo permitido de corrente harmônica	
	Por Watt (mA/W)	(A)
2	3.4	2.3
5	1.9	1.14
7	1.0	0.77
9	0.50	0.40
13	0.35	0.33
11-39	$3.86/h$	Ver tabela 4

Fonte: IEC 61000, IEC

- *IEC 61000-3-4 (1998)* - define os limites de injeção de harmônicos de corrente por equipamentos com corrente nominal maior 16 A por fase.

Tabela 8 - Limites para harmônicos de corrente para equipamentos com corrente maior que 16 A

Ordem harmônica h	Valor máximo permitido de corrente harmônica* (%)	Ordem harmônica h	Valor máximo permitido de corrente harmônica* (%)
3	21.6	19	1.1
5	10.7	21	0.6
7	7.2	23	0.9
9	3.8	25	0.8
11	3.1	27	0.6
13	2	29	0.7
15	0.7	31	0.7
17	1.2	33	0.6

\* Porcentagem da corrente nominal na frequência fundamental

Fonte: IEC 61000, IEC

- *IEC 61000-3-6 (1996)* - define os limites da  $DHT_V$  para equipamentos conectados à MT, entre 1 e 35 kV, e Alta Tensão (AT), entre 35 e 235 kV. Tensões acima de 235 kV são consideradas Extra Alta Tensão (EAT).

Tabela 9 - Níveis de planejamento para harmônicos de tensão (% da fundamental) para MT

Harmônicos ímpares					
Não múltiplos de 3		Múltiplos de 3		Harmônicos pares	
Ordem h	Tensão harmônica (%)	Ordem h	Tensão harmônica (%)	Ordem h	Tensão harmônica (%)
5	5	3	4	2	1.6
7	4	9	1.2	4	1
11	3	15	0.3	6	0.5
13	2.5	21	0.2	8	0.4
17	1.6	>21	0.2	10	0.4
19	1.2			12	0.2
23	1.2			>12	0.2
25	1.2				
>25	$0.2 + 0.5 \times 25/h$				

\*O limite da distorção harmônica total é 6,5 %.

Fonte: IEC 61000, IEC

Tabela 10 - Níveis de planejamento para harmônicos de tensão (% da fundamental) para AT e EAT

Harmônicos ímpares					
Não múltiplos de 3		Múltiplos de 3		Harmônicos pares	
Ordem h	Tensão harmônica (%)	Ordem h	Tensão harmônica (%)	Ordem h	Tensão harmônica (%)
5	2	3	2	2	1.6
7	2	9	1	4	1
11	1.5	15	0.3	6	0.5
13	1.5	21	0.2	8	0.4
17	1	>21	0.2	10	0.4
19	1			12	0.2
23	0.7			>12	0.2
25	0.7				
>25	$0.2 + 0.5 \times 25/h$				

\*O limite da distorção harmônica total é 6,5 %.

Fonte: IEC 61000, IEC

### 2.4.3 Módulo 8 do PRODIST

O módulo 8 do PRODIST trata dos limites das distorções harmônicas de tensão que a concessionária de energia deve atender. No entanto, não há recomendações quanto aos harmônicos de corrente ou quais os níveis considerados aceitáveis em caso de injeção de harmônicos por parte dos consumidores.

Tabela 11 - Valores de referência globais das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental).

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

Fonte: PRODIST Módulo 8, ANEEL

**Tabela 12 - Níveis de referência distorções harmônicas individuais de tensão (em % da tensão fundamental).**

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

Fonte: PRODIST Módulo 8, ANEEL

#### 2.4.4 NBR 5410

Esta norma trata sobre Instalações Elétricas de Baixa Tensão e em sua seção 6.2.6, condutores de fase e condutor neutro, discorre algumas recomendações sobre harmônicos:

##### 6.2.6.1 Seção dos condutores fase

6.2.6.1.2 A seção dos condutores deve ser determinada de forma a que sejam atendidos, no mínimo, todos os seguintes critérios:

a) capacidade de condução de corrente dos condutores deve ser igual ou superior à corrente de projeto do circuito, incluindo as componentes harmônicas, afetada dos fatores de correção aplicáveis.

##### 6.2.6.2 Condutor neutro

Para sistemas trifásicos, se a  $DHT_I$  nas fases estiver entre 15% e 33%, o condutor neutro não deve ter seção nominal inferior à dos condutores das fases; para circuitos trifásicos com neutro e circuitos com duas fases e o neutro, caso  $DHT_I$  nas fases esteja superior a 33%, a corrente que

circula no neutro será maior que de fase. Para estimar a corrente no neutro utiliza-se a seguinte equação.

$$I_n = f_h I_B \quad (2.26)$$

- $I_n$  – corrente no condutor neutro.
- $I_B$  – corrente de projeto:

$$I_B = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_h^2} \quad (2.27)$$

- $I_1$  – corrente na frequência fundamental.
- $I_h$  – corrente na frequência harmônica.
- $f_h$  – fator para determinação da corrente no condutor neutro, conforme tabela 13.

**Tabela 13 - Fator  $f_h$  para determinação da corrente no condutor neutro**

Taxa de terceira harmônica	$f_h$	
	Circuito trifásico com neutro	Circuito com duas fases e neutro
33% a 35%	1,15	1,15
36% a 40%	1,19	1,19
41% a 45%	1,24	1,23
46% a 50%	1,35	1,27
51% a 55%	1,45	1,30
56% a 60%	1,55	1,34
61% a 65%	1,64	1,38
≥ 66%	1,73	1,41

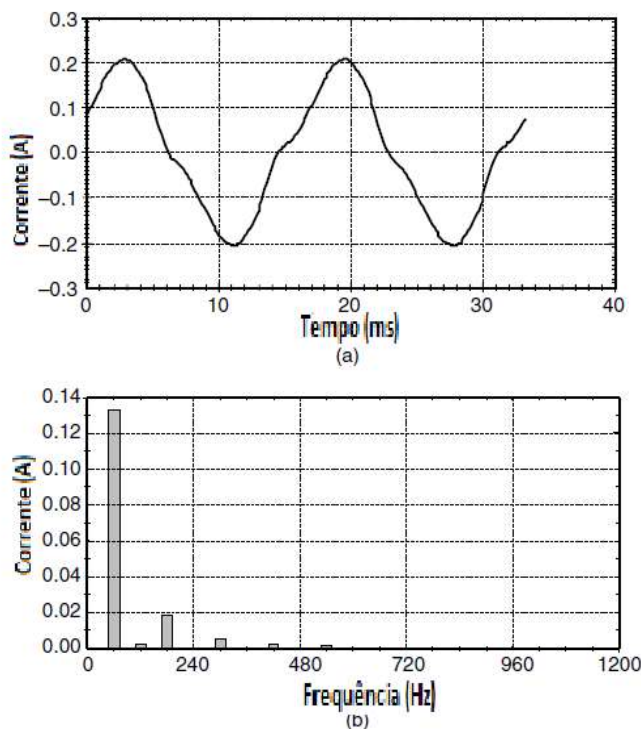
Fonte: Anexo F da NBR 5410 (2008, p. 196)

## 2.5 FONTES GERADORAS DE HARMÔNICOS DE CORRENTE

“Muitas cargas instaladas nos atuais sistemas de potência são geradoras de harmônicos de corrente. Combinados com a impedância do sistema elétrico, as cargas também produzem harmônicos de tensão. As cargas não lineares podem, portanto, ser vistas ambas como geradoras de harmônicos de corrente e de tensão (SANKARAN, 2002, p. 92)”. Nos subitens a seguir serão apresentadas algumas assinaturas harmônicas características.

### 2.5.1 Lâmpadas fluorescentes

As lâmpadas fluorescentes possuem reatores magnéticos para limitar e estabilizar a corrente e as lâmpadas com reatores eletrônicos possuem retificadores monofásicos, sendo a DHT<sub>1</sub> de aproximadamente 15% e 144 % (DUGAN et al, 2004, 187), respectivamente.



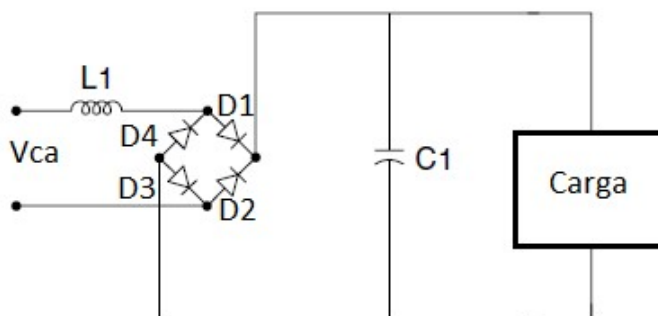
**Figura 9 – (a) Forma de onda da corrente e (b) espectro dos harmônicos de corrente de uma lâmpada fluorescente com reator magnético**  
**Fonte: DUGAN et al (2004, p.188)**

A figura 9 (a) apresenta o comportamento não linear da corrente em função do tempo para uma lâmpada fluorescente com reator magnético. Tal distorção ocorre devido à presença de material ferromagnético que apresenta características não lineares intrínsecas. Na figura 9 (b) apresenta-se o espectro harmônico da corrente em função da frequência. A corrente fundamental é de aproximadamente 0,13 A, o 2º harmônico possui uma corrente inferior a 0,01 A, no 3º harmônico a corrente é aproximadamente 0,02 A e, ainda, estão presentes os 5º, 7º e 9º harmônicos com valores de corrente inferiores ao 3º harmônico.



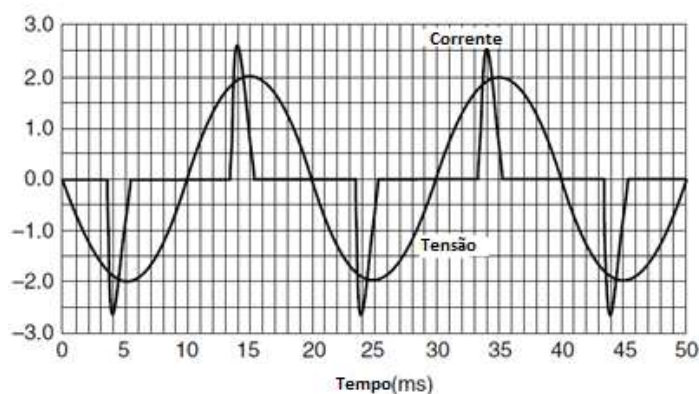
## 2.5.2 Retificadores monofásicos

Os retificadores monofásicos são os maiores causadores de injeção de harmônicos de corrente de 3ª ordem. Eles estão presentes na maioria dos equipamentos eletrônicos, desde PCs, lâmpadas fluorescentes, carregadores de celular, impressoras etc.



**Figura 10 – Retificador monofásico**  
 Fonte: Adaptado de ARRILLAGA, WATSON (2003, p.80)

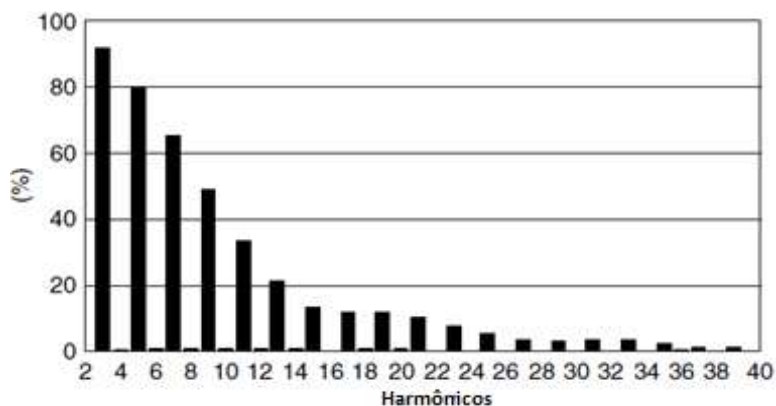
A figura 11 apresenta a forma de onda de corrente característica dos retificadores monofásicos, figura 10. Nota-se que a forma de onda está longe de ser uma senoide e assemelha-se a estreitos pulsos com um pico acentuado. Tal situação ocorre devido ao capacitor C1 (figura 10) ser carregado apenas quando o valor de tensão da fonte ultrapassa o nível de tensão c.c. que ocorre próximo ao valor de pico da tensão senoidal (ARRILLAGA, WATSON, 2003, p. 80).



**Figura 11 - Formas de ondas características de tensão e corrente em retificadores monofásicos**  
 Fonte: BAGGINI (2008, p. 205)

Na figura 12 são apresentados os valores das  $DHI_I$  da figura 11. Observa-se que além do 3º harmônico, aproximadamente 90% de  $DHI_I$ , o 5º e o 7º apresentam 80% e 65%,

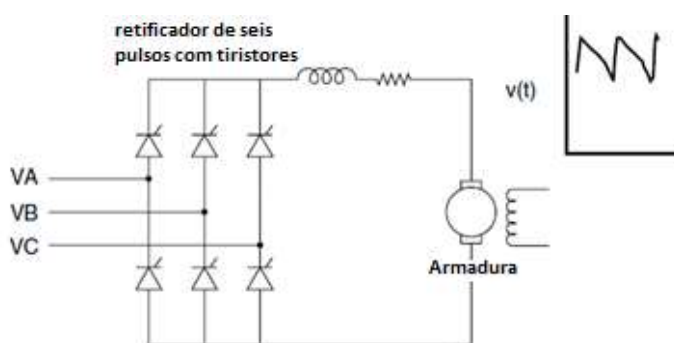
respectivamente. Os outros harmônicos até o 11° ainda contêm uma distorção harmônica de corrente considerável, que dependendo da amplitude de corrente merece ser levada em consideração em uma análise.



**Figura 12 - Espectro harmônico característico de uma fonte chaveada**  
 Fonte: BAGGINI (2008, p. 205)

### 2.5.3 Retificadores trifásicos

Os retificadores trifásicos retificam a tensão c.a. em tensão c.c. através da ponte retificadora de 6 pulsos (figura 13) que pode ser não controlada, por meio de diodos, ou controlada, através de tiristores.



**Figura 13 - Retificador trifásico de 6 pulsos**  
 Fonte: DUGAN et al (2004, p.192)

A vantagem dos retificadores trifásicos é que eles não produzem harmônicos de corrente de 3ª ordem (DUGAN et al, 2004, p. 190). Os harmônicos de corrente gerados seguem a seguinte equação abaixo:

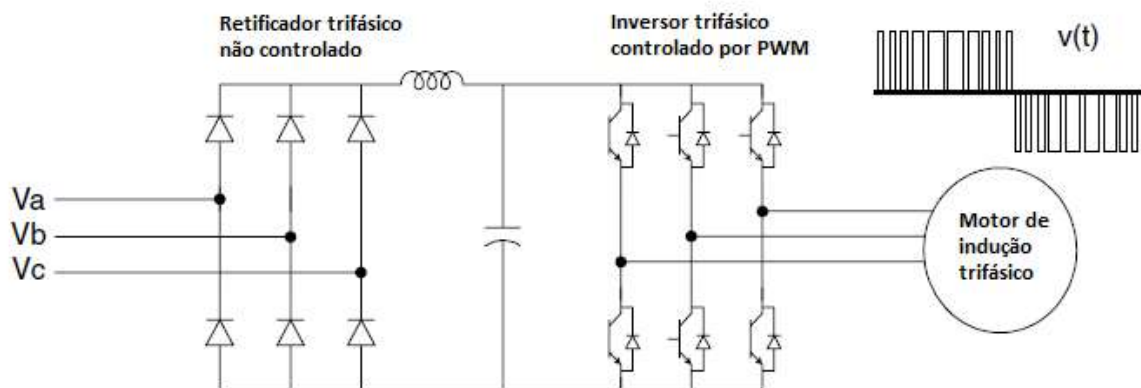
$$h = 6n \pm 1 \quad (2.28)$$

- $h$  – ordem do harmônico;
- $n$  – número inteiro.

#### 2.5.4 Conversores de frequência

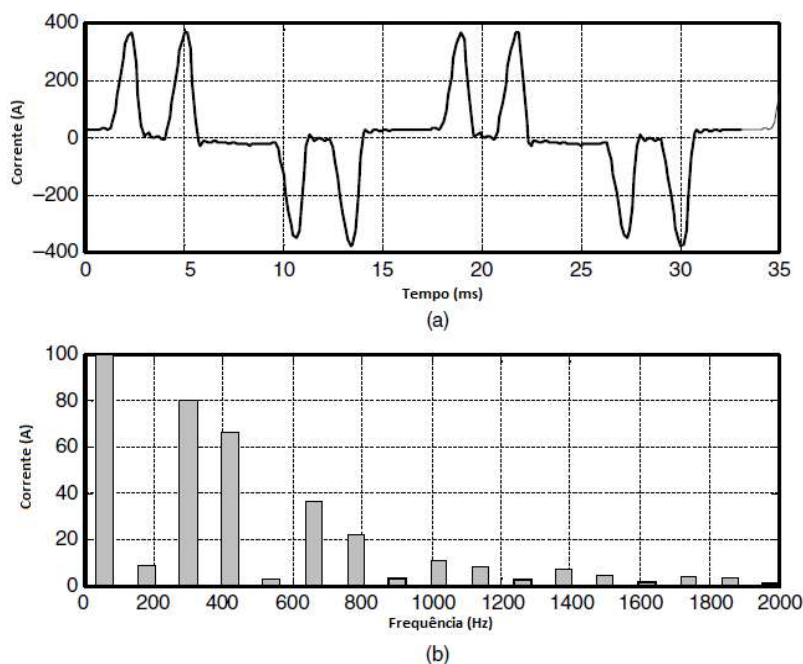
Os conversores ou inversores de frequência são utilizados em aplicações onde há necessidade de controle de velocidade de um motor elétrico. Ele consiste de um retificador trifásico, controlado ou não, um barramento c.c., com um capacitor ou um filtro LC, e um conversor c.c./c.a. controlado.

A figura 14 apresenta a topologia de um inversor de frequência que possui seu conversor c.c./c.a. controlado por um *PWM* (*Pulse Width-Modulation*). A função deste é modular a tensão de saída do inversor de frequência para o motor através de trem de pulsos com largura variável.



**Figura 14 - Topologia de um inversor de frequência**  
**Fonte: DUGAN et al (2004, p.191)**

A figura 15 (a) apresenta a forma de onda da corrente de um inversor de frequência alimentando um motor elétrico de 500 cv. A forma de onda possui um formato com dois picos de corrente que ocorrem devido a presença do capacitor, que é carregado em pulsos muito rápidos (DUGAN et al. 2004, p. 191). Em (b), no espectro harmônico demonstrado a presença do 3º harmônico de corrente é inferior a 10 A, enquanto o 5º e o 7º apresentam aproximadamente 80 A e 65 A, respectivamente.



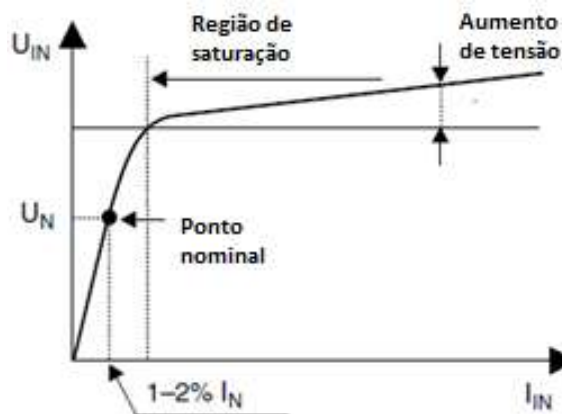
**Figura 15 - (a) forma de onda da corrente e (b) espectro harmônico**  
**Fonte: DUGAN et al (2004, p.192)**

### 2.5.5 Transformador

Os transformadores foram os primeiros causadores de harmônicos de corrente (BAGGINI, 2008, p. 200). Estes são produzidos devido às características não lineares que o material ferromagnético presente no núcleo do transformador apresenta.

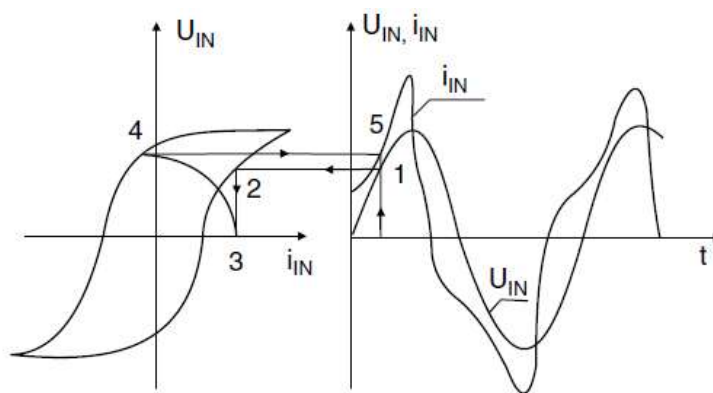
“Para se produzir fluxo magnético no núcleo, é necessário que uma corrente, conhecida como corrente de excitação,  $I_{\phi}$ , esteja presente no enrolamento de excitação. As propriedades magnéticas não-lineares do núcleo requerem que a forma de onda de excitação seja diferente da forma de onda senoidal do fluxo” (FITZGERALD, KINGSLEY, UMANS, 2008, p. 37).

Na figura 16, observa-se que a curva de tensão  $U_{IN}$  e corrente  $I_{IN}$  apresenta características lineares até o ponto nominal ( $I_N$ ,  $U_N$ ). Após esse valor, o comportamento da curva adquire características não lineares que para determinado valor de corrente o núcleo do transformador alcançará sua região de saturação. Quando esta é atingida, o aumento de tensão  $U_{IN}$  ocorre em proporções bem menores que a corrente  $I_{IN}$  e as perdas no núcleo por efeito Joule se elevam.



**Figura 16 - Curva de excitação do transformador**  
**Fonte: BAGGINI, (2008, p.200)**

Uma vez que é necessária uma corrente de excitação para que seja produzido o fluxo magnético no núcleo do transformador, é possível determinar-se a partir do ciclo de histerese como será essa corrente de excitação (quando o transformador opera à vazio), que possui amplitude entre 1% e 2 % da corrente nominal do transformador.



**Figura 17 - Curva de Histerese e forma de onda de corrente do transformador à vazio**  
**Fonte: BAGGINI (2008, p. 201)**

A figura 17 ilustra a relação existente entre o ciclo de histerese e a corrente de excitação nos transformadores, assim para cada valor de corrente de excitação há uma tensão  $U_{IN}$ , logo pode-se obter valores correspondentes de  $U_{IN}$  e  $I_{IN}$  (corrente de excitação). “Como o laço de histerese achata-se devido aos efeitos da saturação, observe que a forma de onda da corrente de excitação apresenta picos acentuados” (FITZGERALD, KINGSLEY, UMANS, 2008, p. 40).

## 2.6 EFEITOS PROVOCADOS PELOS HARMÔNICOS

### 2.6.1 Efeito pelicular

O efeito Joule ( $I^2R$ ) está presente quando ocorre fluxo de corrente em um condutor. Quando há presença de harmônicos de corrente, o valor *rms* da corrente aumenta conforme a equação 2.18. Logo, haverá um aumento na potência dissipada pelo condutor que causará um aquecimento mais elevado.

Outro fator que agrava o sobreaquecimento em condutores é o efeito pelicular (*skin effect*), que é a “tendência de a corrente alternada fluir na parte mais externa da superfície do condutor” (BAGGINI, 2008, p. 218). Com a presença de harmônicos, a frequência aumenta a oposição à passagem de corrente e o valor da resistência de acordo com a seguinte equação:

$$R_{ca} = \frac{r}{\delta} R_{cc} \quad (2.25)$$

- $R_{ca}$  – resistência em corrente alternada [ $\Omega$ ].
- $R_{cc}$  – resistência em corrente contínua [ $\Omega$ ].
- $r$  – raio do condutor [m].
- $\delta$  – profundidade de penetração da corrente [m]:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \quad (2.26)$$

- $\rho$  – resistividade elétrica [ $\Omega \cdot m$ ].
- $\mu$  - permissividade do material [H/m].
- $\omega$  – frequência angular [rad/s].

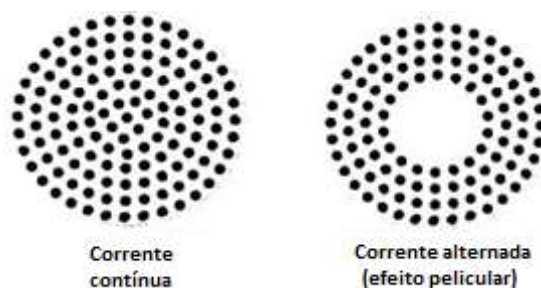
A resistência em corrente contínua pode ser determinada através da equação abaixo:

$$R_{cc} = \frac{\rho l}{A} \quad (2.27)$$

- $l$  – comprimento do condutor [m].
- $A$  – seção nominal do condutor [m<sup>2</sup>].

Nota-se a partir da equação 2.26 que a profundidade de penetração da corrente alternada no condutor é inversamente proporcional à frequência angular  $\omega$  ( $2\pi f$ ), ou seja, quanto maior o valor do harmônico menor será a profundidade de penetração da c.a. no condutor e maior será o valor da resistência no condutor.

Na figura 18 apresenta-se a circulação de corrente em condutores percorridos por corrente contínua, sem efeito pelicular, e corrente alternada, com efeito pelicular. Observa-se que no centro do condutor percorrido por c.a. na frequência fundamental não há passagem de corrente. Com a presença de harmônicos, a área disponível para a circulação de corrente tende a ser menor.



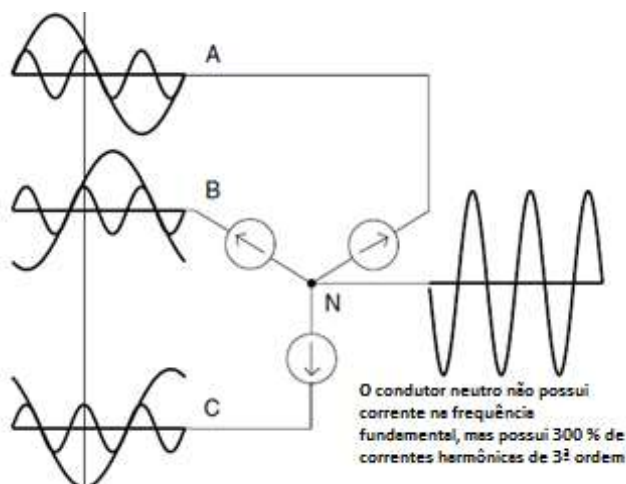
**Figura 18 - Corrente contínua e corrente alternada, com efeito pelicular, em condutor elétrico**  
 Fonte: <http://www.titanengineering.net/titanengineering/engineering/cables/71ca12.htm>

### 2.6.2 Sobreaquecimento no condutor neutro

O sobreaquecimento no condutor neutro além do efeito pelicular é principalmente afetado pelos harmônicos de corrente de 3ª ordem, que por serem de sequência zero somam-se no neutro.

$$I_n = 3I_{3f} \quad (2.32)$$

- $I_{3f}$  – harmônicos de corrente de 3ª ordem nas fases;
- $I_n$  – corrente no condutor neutro.



**Figura 19 - Corrente no condutor neutro contendo harmônicos de 3ª ordem**  
**Fonte: DUGAN et al (2004, p. 180)**

A figura 19 apresenta um sistema trifásico equilibrado com condutor neutro. A fase A, apresenta uma senoide grande e uma senoide pequena. A primeira, a qual consideraremos como frequência fundamental  $f$  e a segunda com menor amplitude possui uma frequência  $3f$ . Para as fases B e C, existem os mesmos formatos de onda, porém as senóides na frequência fundamental estão defasadas de  $120^\circ$ , que resulta na anulação dessas no ponto N. No entanto, as senóides com frequência  $3f$  estão em fase e no ponto N, elas se somam.

Já para cargas desequilibradas, situação distinta da figura 19, a corrente que circulará no condutor neutro possuirá uma componente na frequência fundamental  $f$ , ocasionada pelo desbalanceamento de fases. E se a carga não for linear, existirão outros componentes harmônicos além do 3º e seus múltiplos.

### 2.6.3 Impacto nos capacitores

Os capacitores são instalados nos sistemas elétricos de potência para compensar a potência reativa necessária que determinadas cargas necessitam e evitar penalidades por parte da concessionária de energia devido ao baixo fator de potência.

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C} \quad (2.33)$$



A equação 2.33 demonstra que a reatância capacitiva é inversamente proporcional à frequência. Quando há harmônicos, a oposição à passagem de corrente nos bancos de capacitores pode ser menor que nos condutores, uma vez que a impedância destes aumenta devido ao efeito pelicular e a reatância indutiva:

$$X_L = 2\pi fL \quad (2.34)$$

A presença de harmônicos de corrente nos sistemas elétricos de potência pode ser drenada pelos capacitores. Assim, pode ocorrer sobreaquecimento, reduzindo a vida útil devido a deterioração do dielétrico e a falha dos capacitores.

O *IEEE Std 18-2012* recomenda que os capacitores devam suportar os seguintes valores:

- 135% do valor nominal do kvar;
- 110% do valor nominal da tensão *rms* (incluindo os harmônicos);
- 180% do valor nominal da corrente *rms* (incluindo os harmônicos);
- 120% do valor de pico da tensão (incluindo os harmônicos).

### 2.6.3 Ressonância

Outro fenômeno que pode ocorrer devido a presença de capacitores é a ressonância  $f_p$ . Esta surge quando as reatâncias indutiva e capacitiva se igualam em uma determinada frequência, que pode ser determinada conforme a equação 2.35.

$$f_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (2.35)$$

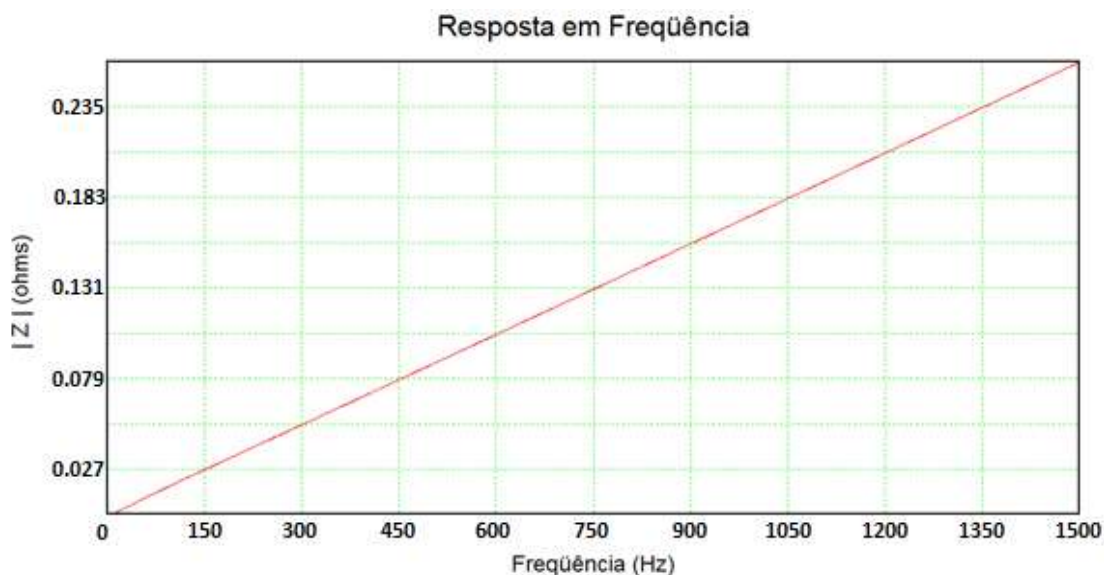
Uma aproximação utilizada por analistas de harmônicos para a determinação em qual harmônico ocorrerá ressonância é através da seguinte equação:

$$h_r \approx \sqrt{\frac{kVA_{tr} * 100}{kvar_{cap} * Z\%_{tr}}} \quad (2.36)$$

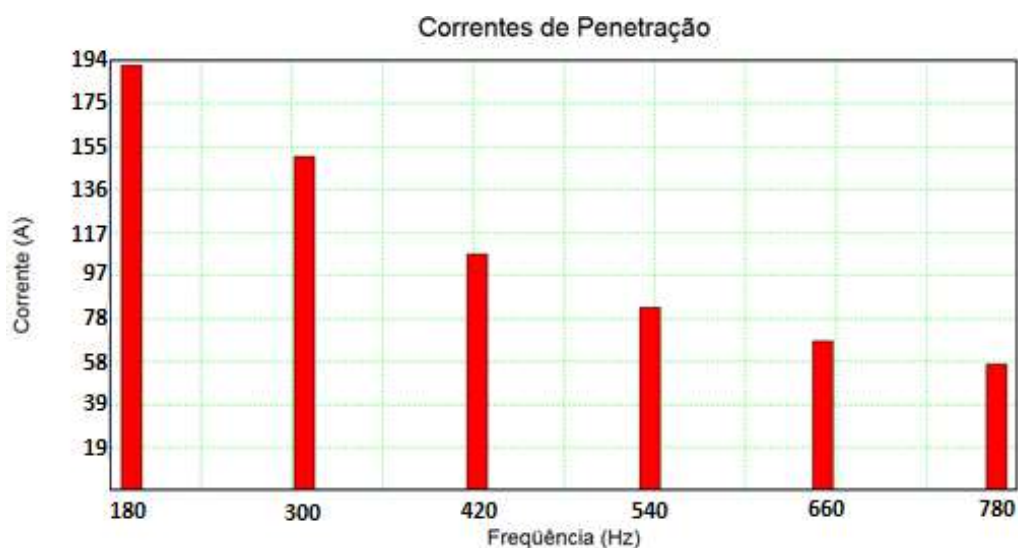
- $h_r$  – harmônico ressonante;
- $kVA_{tr}$  – potência nominal do transformador;

- $kvar_{cap}$  – potência do banco de capacitores;
- $Z\%_{tr}$  – impedância percentual do transformador.

As figuras 20 e 21 apresentam, respectivamente, a resposta em frequência e o espectro harmônico de uma instalação elétrica sem banco capacitores. Os harmônicos de corrente presentes são: o 3º harmônico com 194 A, o 5º harmônico com 154 A, o 7º harmônico com 105 A e assim por diante.



**Figura 20 - Resposta em frequência de uma instalação elétrica sem banco de capacitores**  
**Fonte: Autoria própria (2016)**



**Figura 21 - Espectro harmônico da instalação elétrica sem banco de capacitores**  
**Fonte: Autoria própria (2016)**

Nas figuras 22 e 23 são apresentados a resposta em frequência e o espectro harmônico da mesma instalação elétrica com a adição de um banco de capacitores de 50 kvar. Observa-se que a resposta em frequência não é mais linear e ocorre uma ressonância paralela no 9º harmônico, que eleva a impedância da instalação para 2,38  $\Omega$ , anteriormente era aproximadamente 0,09  $\Omega$ . Já o espectro harmônico demonstra que a corrente do 9º harmônico aumentou para 952 A, antes era aproximadamente 80 A. Os outros harmônicos de corrente mantiveram os valores anteriores.

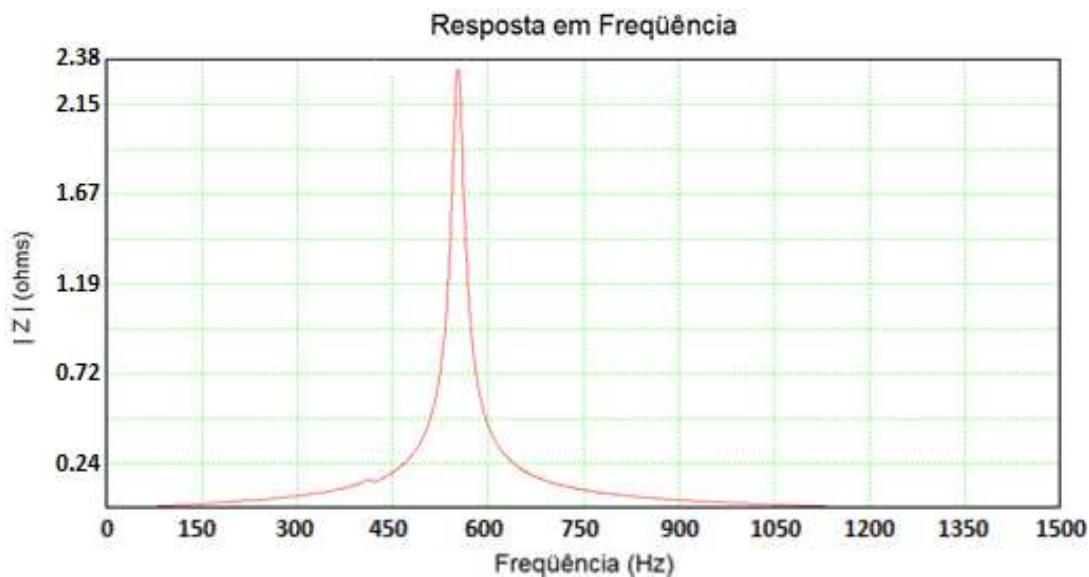


Figura 22 - Ressonância paralela no 9º harmônico devido a banco de capacitores de 50 kvar  
Fonte: Autoria própria (2016)

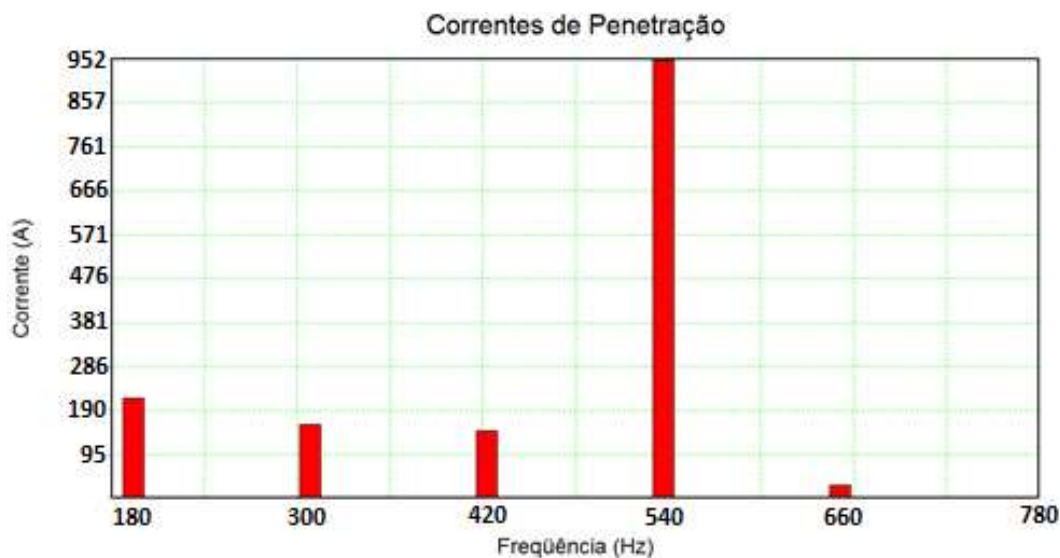


Figura 23 - Espectro harmônico da instalação elétrica com banco de capacitores de 50 kvar  
Fonte: Autoria própria (2016)

### 2.6.4 Impacto nos transformadores

“Os transformadores são projetados para fornecer a potência solicitada pelas cargas conectadas com perdas mínimas na frequência fundamental. Distorção harmônica de corrente, em particular, bem como de tensão contribuirão significativamente para aquecimento adicional” (BAGGINI, 2008, p. 211).

O *IEEE Std C57.12.90-1993* e o *IEEE Std C57.12.91-1995* dividem as perdas no transformador em duas categorias: Perdas sem carga ( $P_{NL}$ ), o transformador opera em vazio, e perdas com carga ( $P_{LL}$ ). Estas são divididas em perdas por efeito Joule,  $I^2R$ , e outras perdas por dispersão de fluxo ( $P_{OSL}$ ), conforme equação 2.37:

$$P_{LL} = I^2R + P_{EC} + P_{OSL} \quad (2.37)$$

- $P_{EC}$  – perdas nos enrolamentos por correntes de Foucault:

$$P_{EC} = P_{EC-R} \sum_{h=1}^{h=h_{m\acute{a}x}} \left( \frac{I_h}{I_R} \right)^2 h^2 \quad (2.38)$$

- $P_{EC-R}$  – perdas nos enrolamentos por correntes de Foucault em condições nominais.
- $I_R$  – corrente nominal *rms* na frequência fundamental.
- $I_h$  – harmônico de corrente.
- $h$  – ordem harmônica.

- $P_{OSL}$  – outras perdas por dispersão de fluxo:

$$P_{OSL} = P_{OSL-R} \sum_{h=1}^{h=h_{m\acute{a}x}} \left( \frac{I_h}{I_R} \right)^2 h^{0,8} \quad (2.39)$$

- $P_{OSL-R}$  – outras perdas por dispersão de fluxo para valores nominais de carga.

As equações descritas acima servem para quantificar como um transformador pode ser afetado pela injeção de harmônicos e, de acordo com Arrillaga e Watson, alguns efeitos são apresentados pelos transformadores com elevada injeção de harmônicos:

- Sobreaquecimento.
- Possíveis ressonâncias entre a impedância do transformador e banco de capacitores.
- Estresse mecânico na isolação dos enrolamentos e das lâminas do núcleo.
- Pequenas vibrações no núcleo.
- Aumento das perdas por histerese e pelas correntes de Foucault.
- Aumento das perdas no cobre.
- Pontos quentes no tanque do transformador.
- Dispersão de fluxo.

### **2.6.5 Impacto em motores elétricos**

“Distorções harmônicas de tensão nos terminais do motor são transferidos para fluxos harmônicos dentro do motor” (DUGAN et al, 2004, p. 216). Para distorções harmônicas de tensão maiores que 5%, os seguintes problemas são ocasionados nos motores elétricos de c.a.:

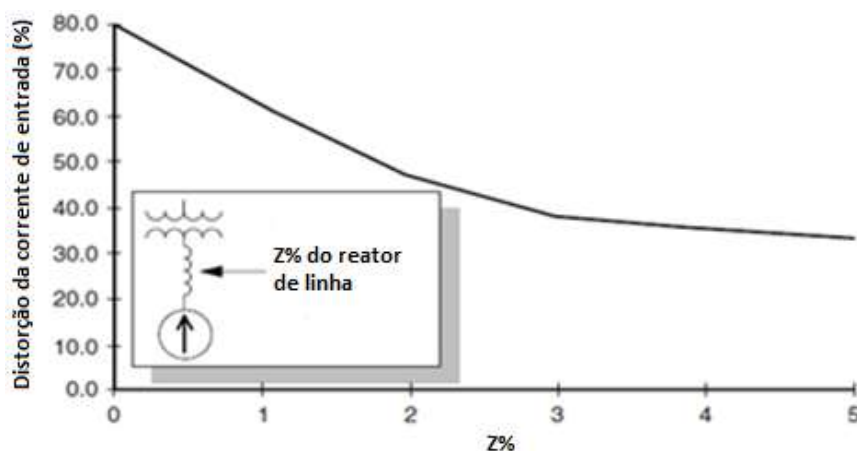
- Sobreaquecimento.
- Perdas adicionais nas bobinas estatórica e rotórica.
- Perdas adicionais por dispersão do fluxo das bobinas estatórica e rotórica.
- Torque pulsante.
- Ruídos.
- Redução da vida útil dos enrolamentos.
- Redução da vida útil dos rolamentos devido a vibração.

## **2.7 MÉTODOS PARA ATENUAR A DISTORÇÃO HARMÔNICA**

### **2.7.1 Reatores de linha**

Os reatores de linha são ligados em série com os inversores de frequência e diminuem a taxa que o capacitor do barramento c.c. é carregado, que diminui a corrente e a  $DHT_I$  (DUGAN et al, 2004, p. 249). A aplicação desse filtro representa uma impedância elevada para os harmônicos

produzidos pelo inversor de frequência. A escolha do reator de linha pode ser feita em função da potência aparente em kVA ou da corrente nominal do inversor de frequência.



**Figura 24 - Distorção de corrente em função do reator de linha utilizado**  
**Fonte: DUGAN et al (2004, p.249)**

A figura 24 apresenta um gráfico da corrente de entrada do inversor em função da impedância percentual do reator de linha. Nota-se que sem o uso do reator de linha, a  $DHT_I$  é de 80%. A medida que a impedância percentual do reator de linha aumenta a  $DHT_I$  diminui. Com 5% de impedância percentual, o reator de linha reduz a  $DHT_I$  para 40%.



**Figura 25 - Reator de linha da Schaffner RWK 212-35-KL com corrente nominal de 35 A**  
**Fonte: <http://www.schaffner.com/products/configurator/>**

A tabela 14 apresenta os valores da  $DHT_I$  e  $DHI_I$  de acordo com a impedância percentual dos reatores de linha da SCHAFFNER. Por exemplo, para um reator de linha com impedância

percentual de 4% a  $DHT_1$  será 37,31% e a  $DHI_1$  para o 5º harmônico será de 34%, ambos com relação a corrente fundamental.

**Tabela 14 - Valores  $DHT_1$  e  $DHI_1$  em função da impedância percentual dos reatores de linha**

Harmônico	Impedância reator de linha / harmônicos restantes (%)										
	0.5%	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%	9%	10%
5°	80	60	46	40	34	32	30	28	26	24	23
7°	60	37	22	16	13	12	11	10	9	8.3	7.5
11°	18	12	9	7.3	6.3	5.8	5.2	5	4.3	4.2	4
13°	10	7.5	5.8	4.9	4.2	3.9	3.6	3.3	3.15	3	2.8
17°	7.3	5.2	3.6	3	2.4	2.2	2.1	0.9	0.7	0.5	0.4
19°	6	4.2	2.8	2.2	2	0.8	0.7	0.4	0.3	0.25	0.2
$DHT_1$	102.5	72.2	52.3	44.13	37.31	34.96	32.65	30.35	28.04	25.92	24.68

Fonte: DataSheet AC Line Reactors RWK 112 SCHAFFNER

## 2.7.2 Filtros passivos

“Os filtros passivos são elementos indutivos, capacitivos e resistivos configurados e sintonizados para controlar os harmônicos de corrente” (DUGAN et al, 2004, p.252). A desvantagem é a possibilidade de ressonância em uma determinada frequência.

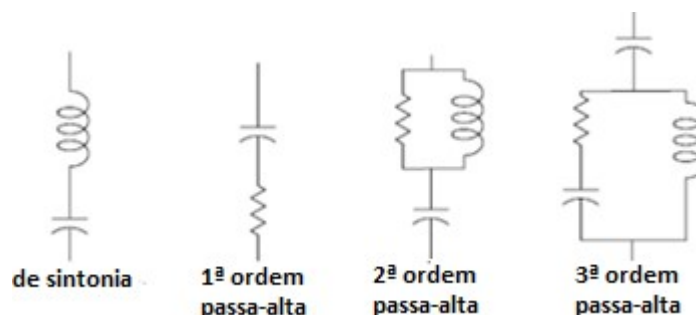


Figura 26 - Filtros passivos do tipo shunt

Fonte: DUGAN et al (2004, p.252)

Os filtros passivos possuem um fator de qualidade  $FQ$  que determina a intensidade da sintonia necessária para bloquear os harmônicos. Filtros com  $FQ$  elevado são utilizados para baixas frequências e filtros com  $FQ$  reduzido são utilizados para frequências acima de 17º harmônico. (ARRILLAGA, WATSON, 2003).

$$FQ = \frac{h_s X_L}{R} \quad (2.40)$$

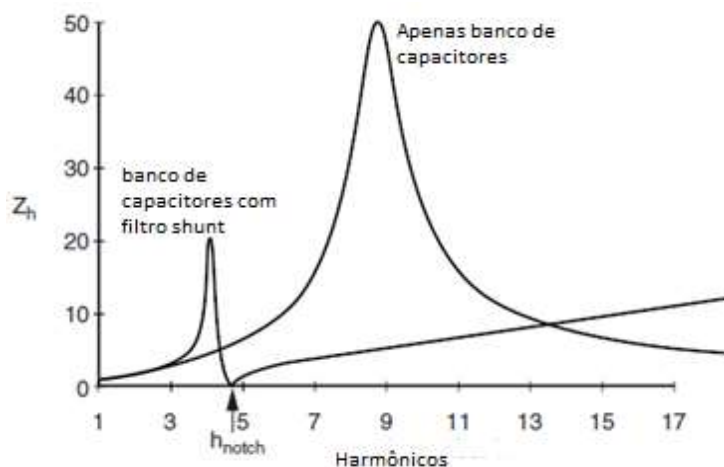
- $X_L$  – reatância indutiva do filtro.
- $R$  – resistência do filtro.
- $h_s$  – harmônico sintonizado.

Os filtros do tipo shunt confinam o fluxo dos harmônicos de corrente de acordo com o harmônico sintonizado, pois proporcionam um caminho de baixa impedância. O filtro de sintonia é um exemplo de filtro shunt.

- *Filtro de sintonia* – são conectados em paralelo e sintonizados na frequência do harmônico que se deseja filtrar. Se há mais harmônicos presentes, serão necessários mais filtros. Para se determinar o filtro de sintonia, utiliza-se a seguinte equação:

$$h_s = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad (2.41)$$

- $r$  – fator utilizado para minimizar a possibilidade de ser produzida uma ressonância harmônica indesejada (usualmente, para o 5º harmônico esse valor é 0,94).

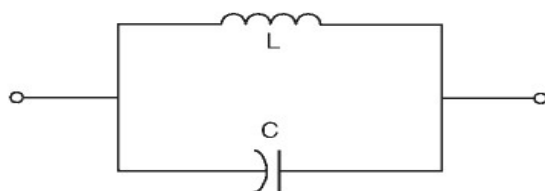


**Figura 27 - Resposta em frequência com e sem filtro de sintonia**  
**Fonte: DUGAN et al (2004, p.252)**

A figura 27 mostra a resposta em frequência de uma instalação elétrica com e sem o uso do filtro de sintonia. Sem o uso do filtro, existe uma ressonância no 9º harmônico; com o uso do filtro sintonizado no 5º harmônico, a ressonância é deslocada para o 4º harmônico.



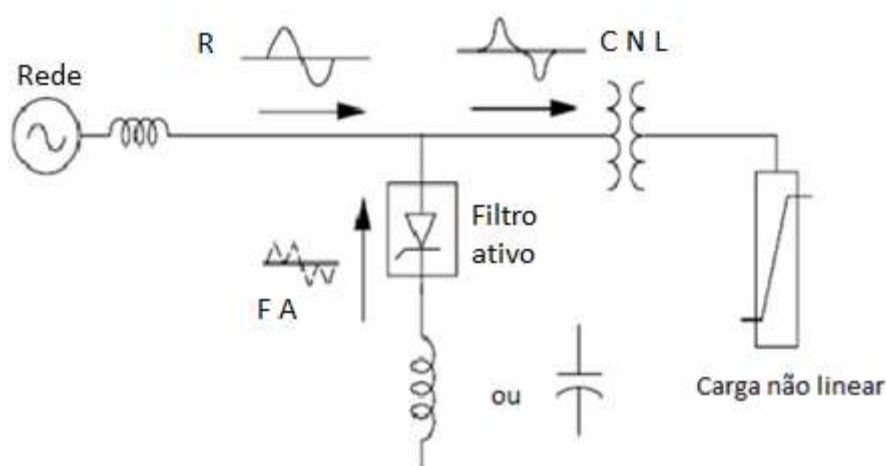
Já os filtros em série bloqueiam os harmônicos de corrente pois oferecem uma impedância mais elevada para o harmônico sintonizado. São mais utilizados para sistemas monofásicos.



**Figura 28 - Filtro passivo série**  
Fonte: Dugan et al (204, p. 257)

### 2.7.3 Filtros ativos

Os filtros ativos são baseados em eletrônica de potência e não há necessidade de preocupar-se com a ressonância com o sistema, pois funcionam como uma fonte de corrente para alimentar a carga com os harmônicos demandados por ela. Para isso, os filtros ativos monitoram a tensão e corrente e através dessas informações injetam a corrente distorcida necessária à carga.



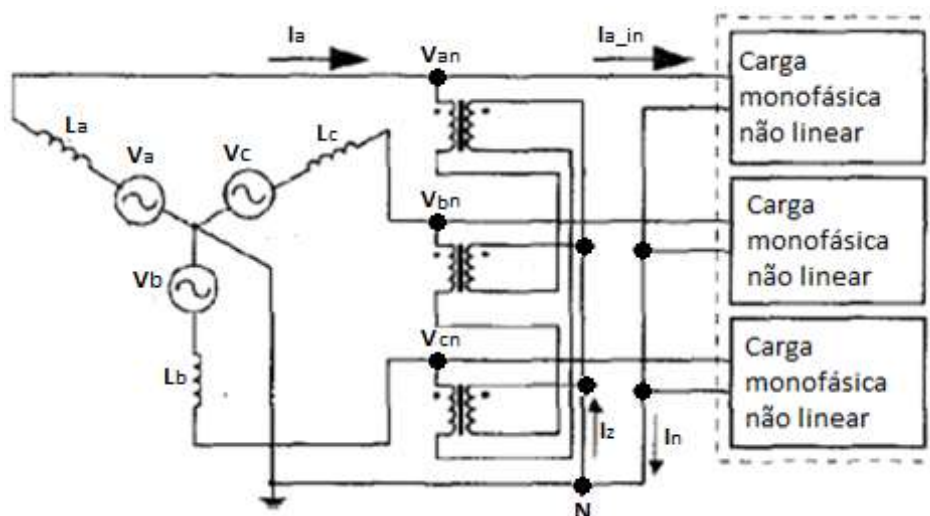
**Figura 29 - Filtro ativo alimentando carga não linear com uma corrente distorcida**  
Fonte: adaptado de DUGAN et al (2004, p. 264)

A figura 29 apresenta um filtro ativo em paralelo com uma carga não linear. Nessa figura há três formas de onda de corrente denominadas por R, FA e CNL, que representam, respectivamente, as formas de onda de corrente fornecidas pela rede, pelo filtro ativo e a absorvida pela carga não linear. O filtro ativo fornece parte da corrente, forma de onda FA, que a carga não

linear necessita e a rede fornece o restante, forma de onda R. A soma dessas duas formas de onda produz CNL, que é a forma de onda de corrente solicitada pela carga.

#### 2.7.4 Transformador em Zig-Zag

“Outra maneira de proteger o transformador e o condutor neutro dos harmônicos de 3ª ordem é cancelá-los próximo a carga” (KEY, LAY, 1998, p. 894). O transformador em Zig-Zag pode ser utilizado para a atenuação dos harmônicos de 3ª ordem, pois age como um filtro para a corrente de sequência zero devido a sua baixa impedância.



**Figura 30 - Transformador Zig-Zag conectado a carga monofásica não linear**  
 Fonte: KEY, LAY (IEEE, 1998)

Na figura 30 é mostrada a configuração de um autotransformador ligado em Zig-Zag conectado entre a carga e o secundário do transformador de entrada da instalação elétrica. Caso o sistema esteja equilibrado, a corrente  $I_z$  tem aproximadamente a mesma intensidade que a corrente  $I_N$ , porém com sentido oposto. Esse defasamento angular permite que os harmônicos de corrente de 3ª ordem sejam cancelados; já em sistemas trifásicos desequilibrados, se a corrente for baixa, a  $DHT_I$  pode aumentar (KEY, LAY, 1998, p. 894).

### 3. ESTUDO DE CASO

No subitem a seguir é apresentado um estudo de caso, modelado e simulado computacionalmente, com duas técnicas aplicadas para atenuação da distorção harmônica em instalações elétricas com características similares à da UTFPR, isto é, com elevada distorção do 3º harmônico de corrente.

#### 3.1 EFICÁCIA NA ATENUAÇÃO DE HARMÔNICOS EM EQUIPAMENTOS DE ESCRITÓRIOS EM EDIFÍCIOS COMERCIAIS

O estudo de caso apresentado neste subitem – *Effectiveness for Harmonics Mitigation Equipment for Commercial Office Buildings* – foi realizado por Thomas Key, membro sênior do *IEEE*, e Jhi-Sheng Lai, membro sênior do *IEEE*.

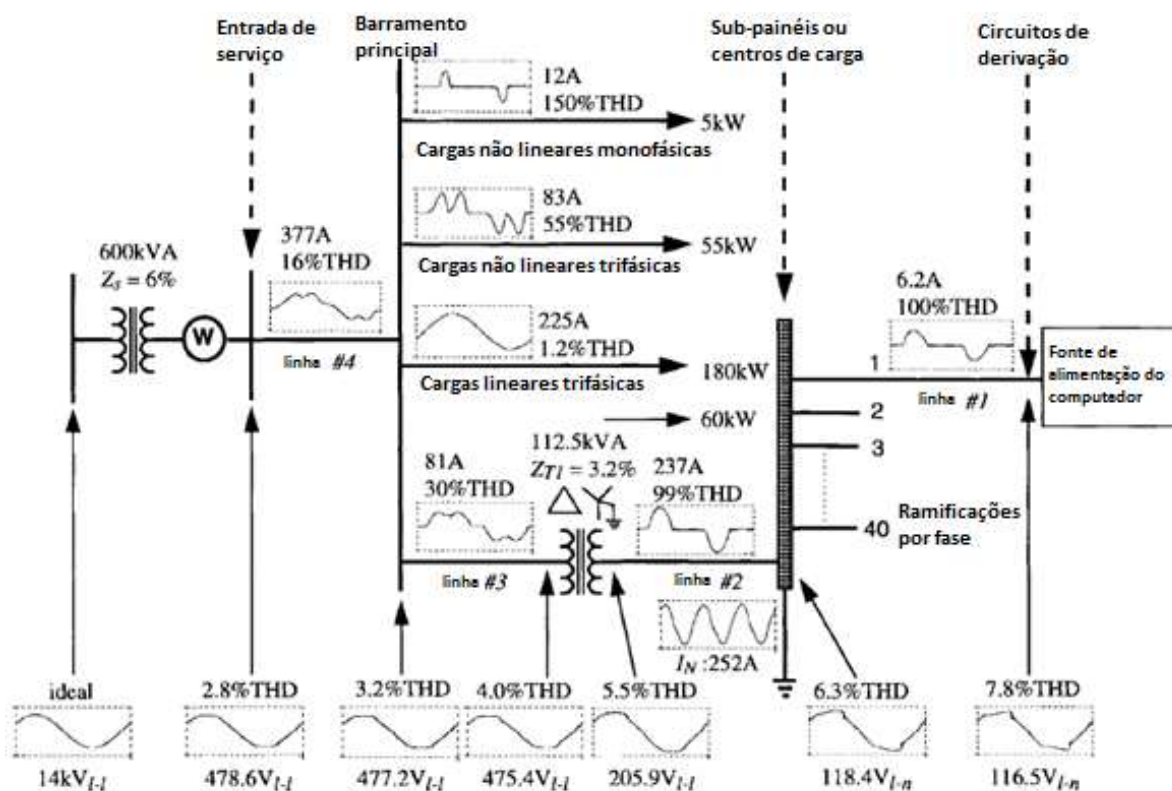


Figura 31 - Diagrama unifilar da instalação elétrica em estudo  
Fonte: KEY, LAI (IEEE, 1997)

A figura 31 apresenta o diagrama unifilar de um instalação elétrica alimentada em 14 kV com um transformador de 600 kVA 480/208 V. Essa instalação está dividida em quatro alimentadores a partir do barramento principal:

1. *Cargas não lineares monofásicas* – demanda de 5 kW e  $DHT_I$  de 150%.
2. *Cargas não lineares trifásicas* – demanda de 55 kW e  $DHT_I$  de 55%.
3. *Cargas lineares trifásicas* – demanda de 180 kW e  $DHT_I$  de 1,2%.
4. *Centros de carga* (objeto da análise) – demanda de 60 kW e  $DHT_I$  de 30% no primário e  $DHT_I$  de 99% no secundário do transformador de 112,5 kVA.

O transformador de 112 kVA alimenta o barramento denominado centro de carga que alimenta 40 ramificações por fase dos quais são derivados circuitos para a fonte de alimentação do computador. Este se localiza na linha #1 e possui corrente nominal de 6,2 A com  $DHT_I$  de 100% e  $DHT_V$  fase-neutro de 7,8 %. A medida que se prossegue em direção à fonte de alimentação, as seguintes medições são obtidas:

- *Barramento centros de carga* –  $DHT_I$  de 99% (linha #2) e  $DHT_V$  (fase-neutro) de 6,3%.  
Nota-se que o valor de corrente no neutro é de 252 A enquanto a corrente nas fases é 237 A.
- *Transformador de 112,5 kVA* –  $DHT_V$  de 5,5% (secundário) e  $DHT_V$  de 4% (primário);
- *Barramento principal* –  $DHT_I$  de 30% (linha #3),  $DHT_I$  de 16% (linha #4) e  $DHT_V$  de 3,2%;
- *Barramento entrada de serviço* –  $DHT_V$  de 2,8%.

A partir das informações do diagrama unifilar, observa-se que as  $DHT_V$  excedem os limites estabelecidos pelo *IEEE Standard 519-2014*, tabela 2, pois são maiores que 5%.

Nas  $DHT_I$  se observa que os maiores valores são com cargas monofásicas, uma com 5 kW e a outra com 60 kW que apresentam, respectivamente,  $DHT_I$  de 150% e 100%. Ao se aproximar do secundário do transformador trifásico  $\Delta$ -Y 112,5 kVA, a  $DHT_I$  diminui para 99% e no primário esse o valor é 30%, pois os harmônicos de 3ª ordem são confinados na ligação delta do transformador.

### 3.1.1 Filtro de bloqueio de corrente no neutro (NCF)

A figura 32 apresenta um filtro série composto de resistor, capacitor e indutor, que representa uma alta impedância para 3º harmônico. A localização desse filtro é no condutor neutro.

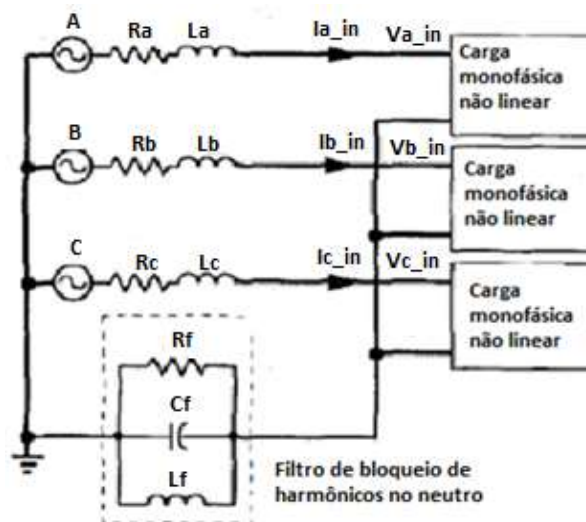


Figura 32 - Filtro de bloqueio posicionado no condutor neutro  
Fonte: KEY, LAI (IEEE, 1998)

Na figura 33 é apresentada a resposta em frequência da aplicação do filtro NCF sintonizado em 180 Hz, cuja impedância é maior que para as outras frequências. No entanto, existe uma ressonância série em 900 Hz (15º harmônico), que pode causar sobrecorrente e sobretensão nessa frequência.

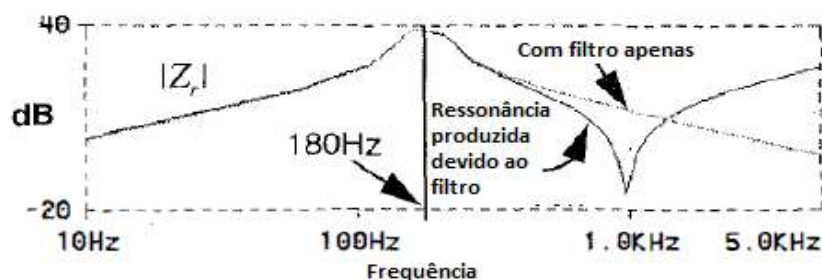
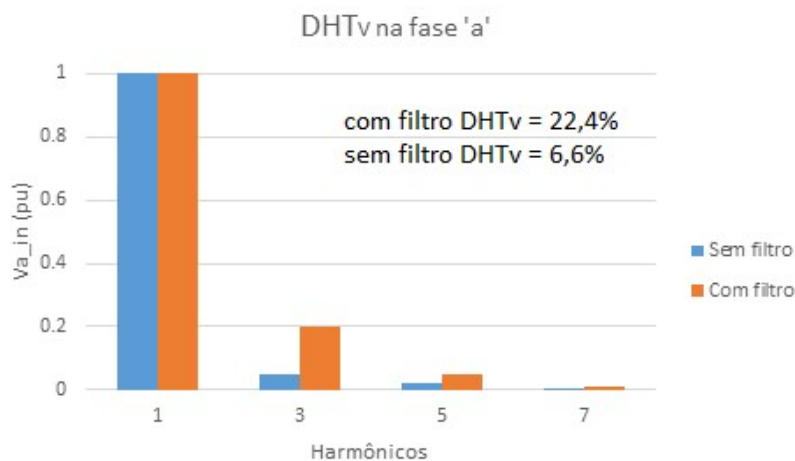


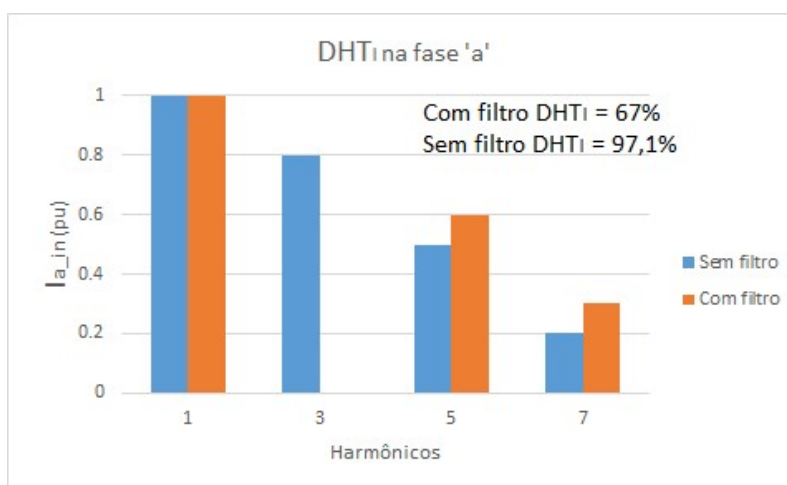
Figura 33 - Resposta em frequência da aplicação do filtro série sintonizado no 3º harmônico  
Fonte: KEY, LAI (IEEE, 1998)

Nas figuras 34 e 35 são apresentados os espectros harmônicos na fase 'a' de tensão e corrente com e sem a presença do filtro NCF. Observa-se que a  $DHT_V$  aumenta, pois os filtros

passivos tendem a distorcer a forma de onda de tensão (KEY, LAI, 1998, p.896), e a  $DHT_I$  é reduzida em 30,1%, o 3º harmônico foi totalmente suprimido, apesar do 5º e 7º harmônicos terem aumentado seus valores de corrente.



**Figura 34 – DHTv na fase ‘a’**  
**Fonte: KEY, LAI (IEEE, 1998, p. 894)**



**Figura 35 - DHTi na fase ‘a’**  
**Fonte: KEY, LAI (IEEE, 1998, p. 894)**

Na figura 36 é apresentada a forma de onda de corrente na fase ‘a’ com e sem o uso do filtro NCF. Nota-se que sem o uso do filtro NFC, a corrente apresenta um pico devido à presença do capacitor existente após a ponte retificadora, conforme apresentado na figura 11. Com o uso do filtro NCF, a forma de onda de corrente assemelha-se com as geradas por retificadores trifásicos, isto é, sem a presença do 3º harmônico.

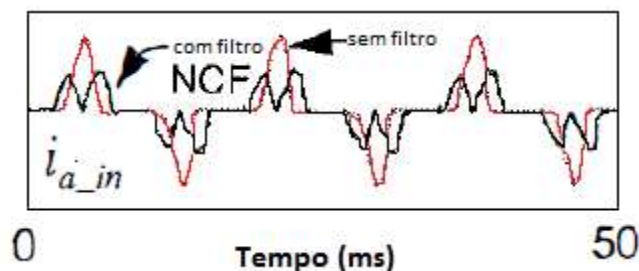


Figura 36 - Forma de onda de corrente na fase 'a' com e sem o uso do filtro  
 Fonte: KEY, LAI (IEEE, 1998, p. 894)

### 3.1.2 Autotransformador em Zig-Zag (ZZF)

A figura 37 ilustra o espectro harmônico de corrente na fase 'a'. Observa-se que com o uso do autotransformador em Zig-Zag, a corrente  $I_a$  é maior devido a corrente de excitação. No entanto,  $DHT_I$  diminui de 102,1% para 30,8% devido a redução do 3º harmônico. O 5º e o 7º harmônicos de corrente não sofreram alterações em seus valores.

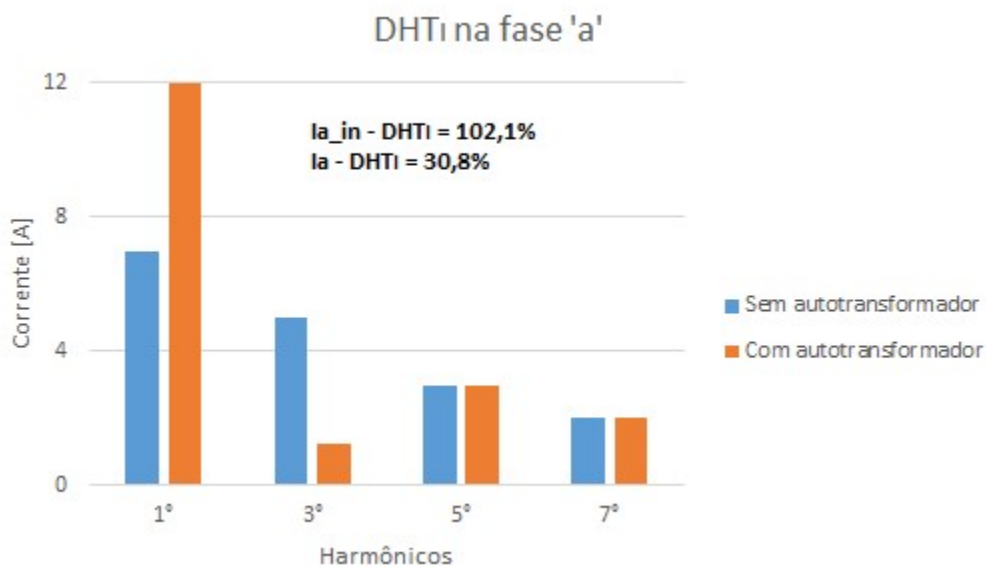


Figura 37 - DHT<sub>I</sub> na fase 'a'  
 Fonte: KEY, LAI (IEEE, 1998)

Na figura 38 são apresentadas as formas de onda de corrente na fase 'a' e no condutor neutro antes e depois da aplicação do ZZF:

- A primeira e segunda oscilografia apresentam as formas de onda de corrente sem o uso do ZZF;

- A terceira oscilografia apresenta duas formas de onda de corrente,  $I_a$  e  $I_{a\_in}$ , que são as correntes vistas pela fonte e pela carga, respectivamente. Observa-se que o módulo da corrente  $I_a$  é maior que  $I_{a\_in}$ , pois na primeira existe a parcela de corrente de excitação do autotransformador que irá induzir a corrente  $I_Z$  para anular a corrente de 3º harmônico que circula no neutro.
- A quarta oscilografia apresenta as formas de onda de corrente  $I_N$  e  $I_Z$  defasadas de  $180^\circ$ , o que causa o cancelamento do 3º harmônico de corrente.

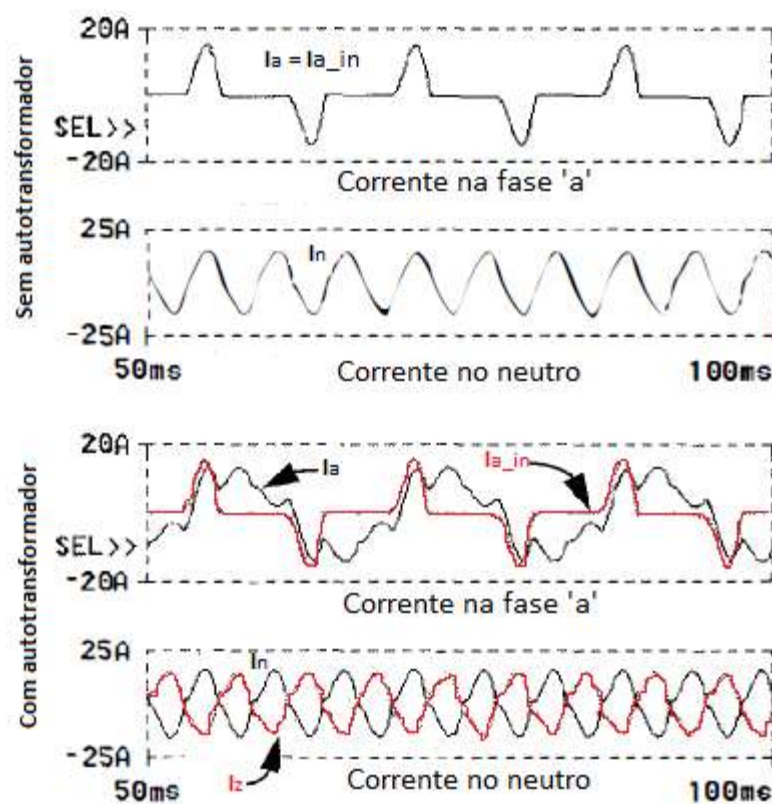
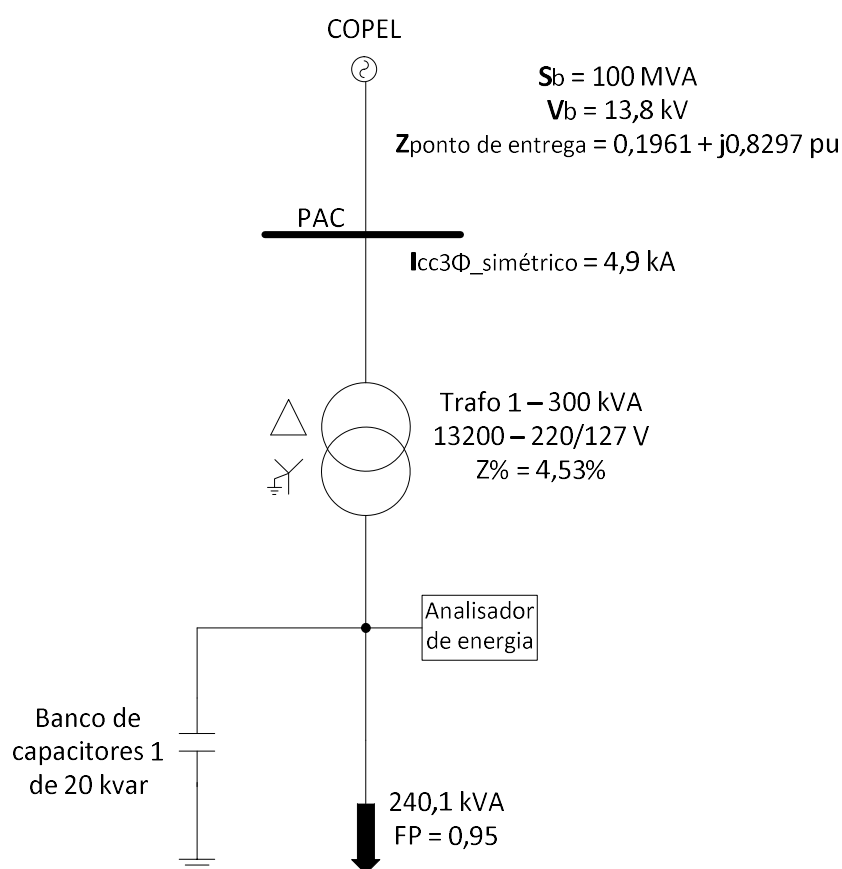


Figura 38 – Formas de onda de corrente na fase 'a' e no condutor neutro antes e depois do uso autotransformador em Zig-Zag  
 Fonte: KEY, LAI (IEEE, 1998, p. 895)



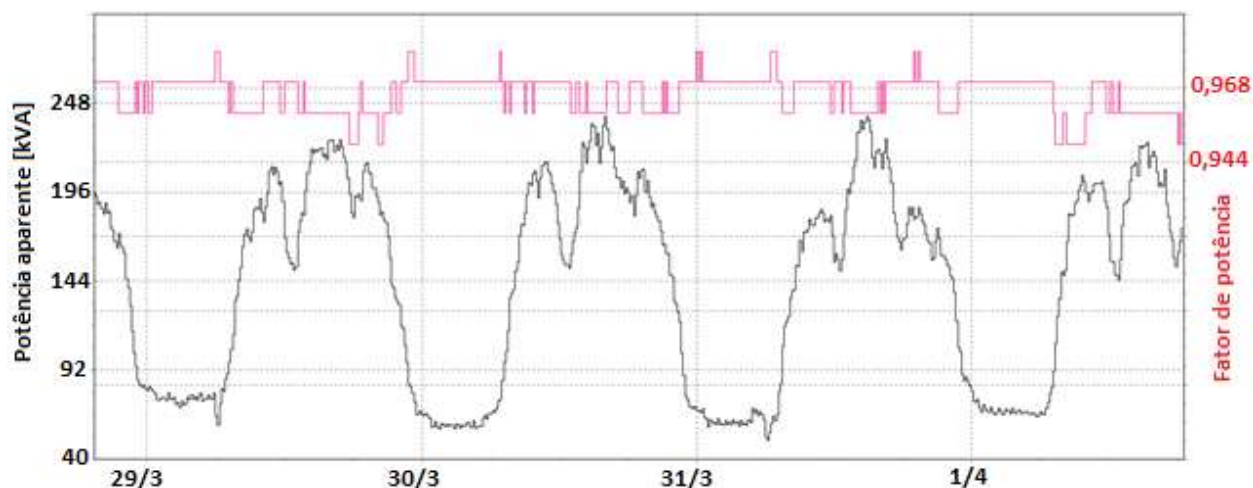
#### 4. ANÁLISE DA DISTORÇÃO HARMÔNICA NO TRANSFORMADOR 1

A análise da distorção harmônica foi realizada no transformador 1 da SE da UTFPR. A figura 39 apresenta o diagrama unifilar simplificado da SE onde foram realizadas as medições. O valor da impedância no ponto de entrega foi fornecido pelo setor de projetos da UTFPR e os valores da demanda de potência aparente e fator de potência foram adquiridos através da medição realizada durante cinco dias ininterruptos no secundário do transformador 1.



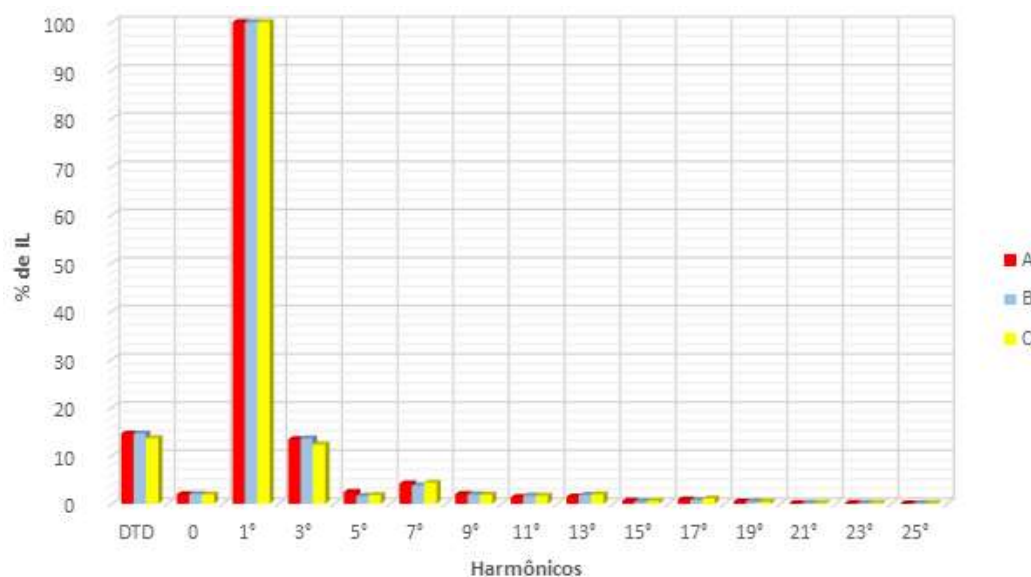
**Figura 39 - Diagrama unifilar simplificado da SE da UTFPR**  
**Fonte: Autoria própria (2016)**

Na figura 40 é demonstrada a oscilografia realizada para a determinação da demanda de potência aparente solicitada pelas cargas. A demanda adotada para a análise da distorção harmônica foi de 240,1 kVA.



**Figura 40 - Oscilografia da potência aparente e do fator de potência do transformador 1**  
**Fonte: Autoria própria (2016)**

A coleta de dados foi realizada entre os dias 28 de março de 2016 (19 horas 27 minutos e 37 segundos, horário de Brasília) e 1º de abril de 2016 (18 horas 27 minutos e 37 segundos) sem interrupção. As máximas demandas de corrente  $I_{L2}$  (corrente no secundário do transformador 1) foram 442,97 A, 406,86 A e 407,67 A para as fases A, B e C, respectivamente. A partir dessa coleta de dados, elaborou-se a figura 41 que apresenta o espectro harmônico de corrente do transformador 1 em nas fases A, B e C e na tabela 15 são apresentados as  $DH_{I1}$  em relação a corrente  $I_{L2}$  e as corrente harmônicas isoladamente.



**Figura 41 - Espectro harmônico de corrente nas fases**  
**Fonte: Autoria própria (2016)**

Tabela 15 – DTD,  $DH_I$  e os harmônicos de corrente nas fases A, B e C

DTD	A	B	C	$I_{rms}$ [A]		
	A	B	C	A	B	C
0	1,98%	2,02%	1,93%	8,76	8,17	7,89
1°	100%	100%	100%	442,97	403,86	407,67
3°	13,38%	13,57%	12,28%	59,25	54,80	50,08
5°	2,39%	1,65%	1,81%	10,61	6,66	7,38
7°	4,20%	3,81%	4,34%	18,61	15,40	17,68
9°	1,98%	1,95%	1,90%	8,78	7,89	7,75
11°	1,36%	1,69%	1,67%	6,00	6,84	6,80
13°	1,47%	1,83%	1,95%	6,50	7,39	7,95
15°	0,59%	0,49%	0,59%	2,62	1,97	2,39
17°	0,87%	0,80%	1,08%	3,84	3,22	4,39
19°	0,43%	0,51%	0,39%	1,89	2,04	1,60
21°	0,11%	0,14%	0,14%	0,49	0,55	0,57
23°	0,14%	0,14%	0,17%	0,63	0,56	0,68
25°	0,07%	0,08%	0,09%	0,33	0,33	0,38

Fonte: Autoria própria (2016)

As recomendações sobre os níveis de distorção harmônica do *IEEE Std 519-2014* são baseadas na razão entre a corrente de curto-circuito ( $I_{SC}$ ) e a demanda máxima de corrente ( $I_L$ ), ambos no PAC. Como a corrente  $I_{L2}$  determinada é referida ao secundário do transformador 1, é necessário utilizar-se a relação de transformação para se determinar a corrente  $I_L$  no PAC, logo:

$$\frac{V_{\text{primário}}}{V_{\text{secundário}}} = \frac{I_{L2}}{I_L}$$

$$\frac{13200}{220} = \frac{442,97}{I_L}$$

$$I_L = 7,38 \text{ A}$$

Em seguida, determina-se o valor da razão  $I_{SC}/I_L$ :

$$\frac{I_{SC}}{I_L} = \frac{4900}{7,38}$$

$$\frac{I_{SC}}{I_L} \approx 663,96$$

Com o valor da razão  $I_{SC}/I_L$ , verifica-se a tabela 3 com as recomendações do *IEEE*. O valor máximo aceitável até o 11° harmônico é de 12% e a DTD de 15% para valores de  $I_{SC}/I_L$  entre

100 e 1000. Portanto, ao se comparar os limites estabelecidos com as medições da tabela 15, verifica-se que a distorção harmônica de corrente do 3º harmônico, na BT, é superior ao recomendado. Deve ser observado que no lado do primário do transformador 1, local do PAC, o 3º harmônico de corrente fica confinado na ligação delta, logo não seriam ultrapassados os limites estabelecidos pelo *IEEE*, porém o primário do transformador 1 não está livre do 3º harmônico.

Os valores médios da corrente *rms* do 3º harmônico para as fases A, B e C, são 59,25 A, 54,80 A e 50,08 A, respectivamente. Assim, é esperado que a corrente desse harmônico no neutro seja aproximadamente a soma desses valores. A figura 42 apresenta a oscilografia no condutor neutro do transformador 1 e verifica-se que o 3º harmônico (cor azul escuro) possui a maior amplitude entre os demais, que têm seus valores médios descritos na tabela 15.

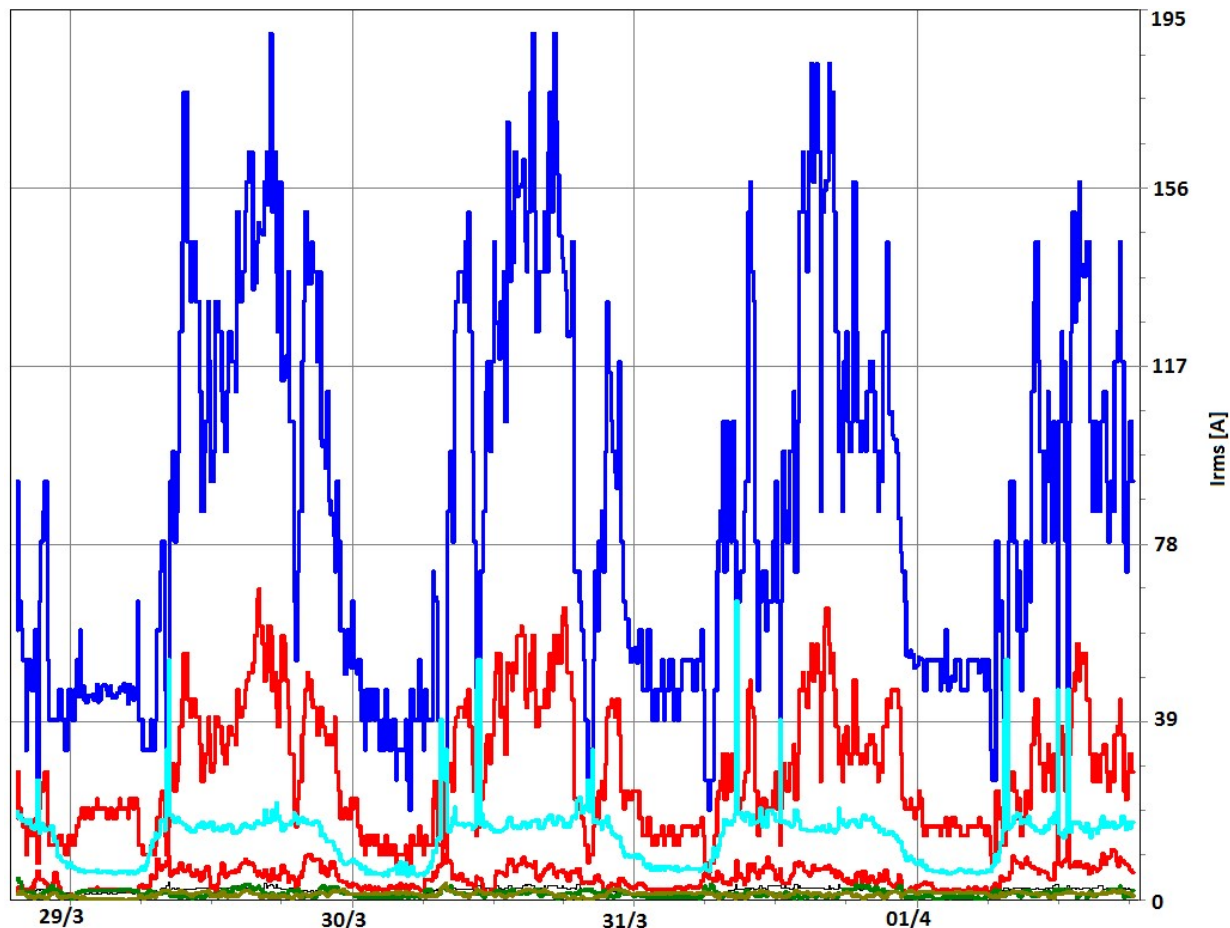


Figura 42 - Oscilografia dos harmônicos de corrente presentes no condutor neutro  
Fonte: Autoria própria (2016)

Tabela 16 – Valores médios de corrente *rms* dos harmônicos no condutor neutro

Cor na oscilografia	Harmônico	<i>I<sub>rms</sub></i> [A]
Preto	0	8,03
Vermelho – traço grosso	1°	44,53
Azul escuro	3°	142,31
Vermelho – traço fino	5°	13,96
Verde escuro	7°	4,24
Azul claro	9°	35,71
Verde	11°	3,35

Fonte: Autoria própria (2016)

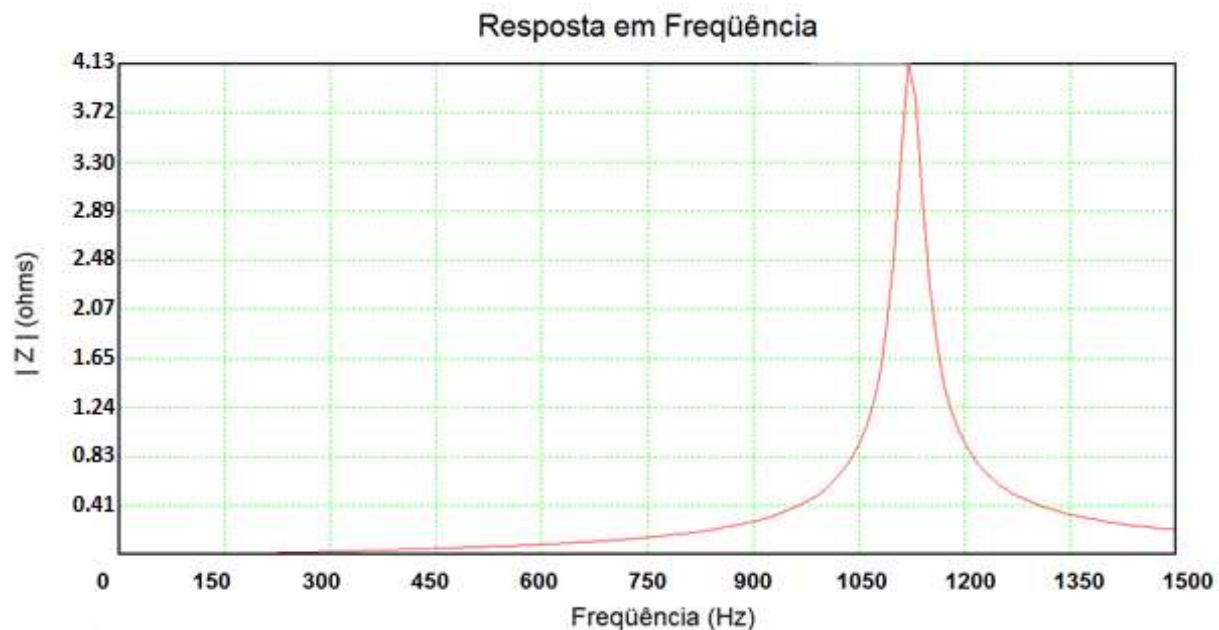
Para se determinar em qual harmônico ocorre ressonância entre a impedância da concessionária, o transformador 1 e o banco de capacitores, utiliza-se a equação 2.36:

$$h_r \approx \sqrt{\frac{kVA_{tr} * 100}{kvar_{cap} * Z\%_{tr}}}$$

$$h_r \approx \sqrt{\frac{300 * 100}{20 * 4,53}}$$

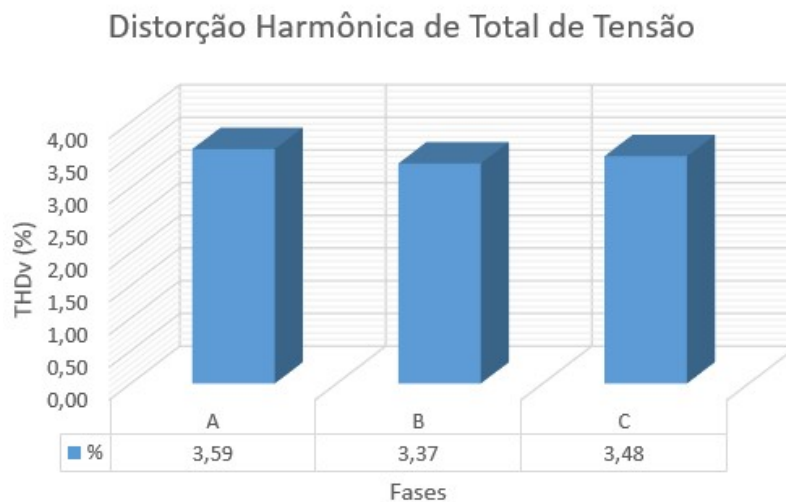
$$h_r \approx 18,2$$

A ressonância ocorre no 18,2° harmônico, 1092 Hz, no qual não foi detectado harmônico de corrente durante as medições, o que miniza a possibilidade de ocorrer sobretensões e sobrecorrentes no capacitor devido à ressonância paralela nessa frequência. Também, utilizou-se o *HarmZs* para plotar a resposta em frequência do sistema elétrico analisado, conforme pode ser visto na figura 43. Verifica-se que a frequência ressonante é de 1120 Hz, 18,6° harmônico, e a impedância nesse ponto é de 4,13 Ω.



**Figura 43 – Resposta em frequência da análise do transformador 1**  
**Fonte: Autoria própria (2016)**

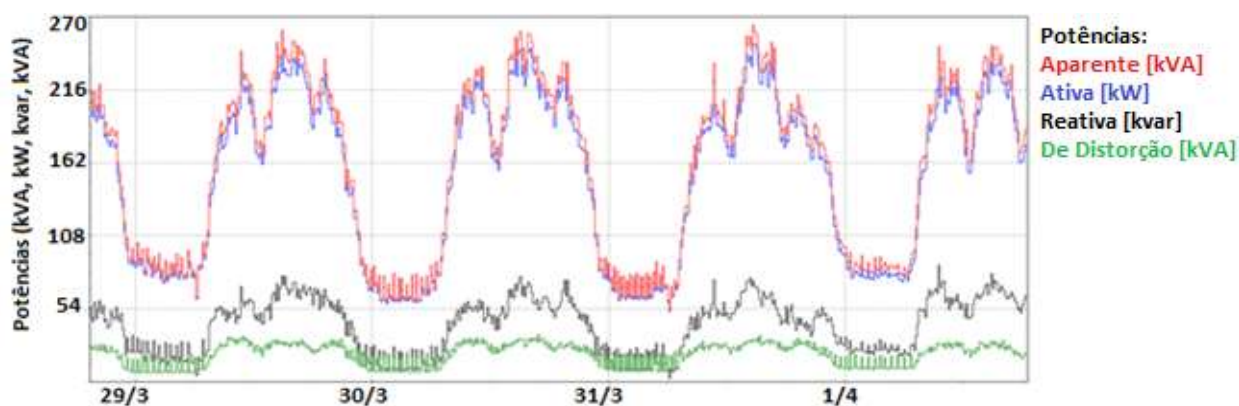
Na figura 44 apresentam-se as  $DHT_V$  nas fases A, B e C, que são de 3,69%, 3,37% e 3,48%, respectivamente. Esses valores foram medidos no lado de BT e se forem refletidos para o lado de MT, a distorção na tensão não irá aumentar. Os valores obtidos estão dentro dos limites estabelecidos pelo módulo 8 do PRODIST, conforme tabela 11, que é de 8% para tensões entre 1 kV e 13,8 kV e pelo *IEC 61000-3-6*, conforme tabela 9, que é de 6,5% para sistemas elétricos em MT.



**Figura 44 -  $DHT_V$  nas fases A, B e C**  
**Fonte: Autoria própria (2016)**

Como foi demonstrado na tabela 15 e na figura 44, existe distorção harmônica de corrente e de tensão. Portanto, como a potência aparente  $S$  é a soma vetorial das potências ativa  $P$ , reativa  $Q$  e de distorção  $D$ , conforme demonstra a equação 2.21, é possível se verificar, através de uma oscilografia das potências, como os harmônicos de corrente e de tensão podem afetar a capacidade nominal de um transformador.

A figura 45 apresenta as demandas das potências aparente, ativa, reativa e de distorção no transformador 1. Em verde, a potência de distorção, que é o produto entre tensão e corrente em frequências distintas, isto é, não realiza trabalho, possui um valor médio de 20,94 kVA; em preto, a potência reativa possui um valor médio de 42,38 kvar; em azul, a potência ativa apresenta um valor médio de 150,94 kW; e, em vermelho, a potência aparente tem um valor médio de 158,67 kVA.



**Figura 45 - Oscilografia das potências no transformador 1**  
**Fonte: Autoria própria (2016)**

Observa-se na figura 45 que existe uma potência de distorção que é praticamente constante durante todo o período de tempo medido, independente das oscilações de potência ativa que ocorrem durante o dia, quando a UTFPR está aberta, e durante a madrugada, período em que está fechada (seria interessante uma análise mais detalhada sobre esse aspecto). Portanto,

“é conveniente definir um único valor que possa ser utilizado para determinar a capacidade de o transformador suprir potência para a carga. O  $F_{HL}$ , fator de perda por harmônicos, é o fator de proporcionalidade aplicado para as perdas nos enrolamentos por correntes de Foucault, as quais representam o aquecimento eficaz devido aos harmônicos de corrente da carga”. (IEEE std C57.110-1998, 1998, p. 6)

Para a determinação do  $F_{HL}$ , utiliza-se a equação 2.42:

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{h_{\max}} \left( \frac{I_h}{I_{rms}} \right)^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h_{\max}} \left( \frac{I_h}{I_{rms}} \right)^2} \quad (2.42)$$

A partir da equação 2.42 produziu-se a tabela 17 para encontrar o valor do  $F_{HL}$ . Os valores dos harmônicos de corrente utilizados foram os medidos na fase A da tabela 15. O valor base  $I_{rms}$  adotado foi 787,3 A (corrente nominal do transformador 1 na BT) que equivale a 1 pu.

**Tabela 17 - Distribuição dos harmônicos de corrente para a determinação do  $F_{HL}$**

$h$	$I_h [A]$	$I_h / I_{rms} (pu)$	$(I_h / I_{rms})^2 (pu)$	$h^2$	$(I_h / I_{rms})^2 h^2$
1	442,97	0,56264	0,3165688	1	0,316569
3	59,25	0,07526	0,0056636	9	0,050973
5	10,61	0,01348	0,0001816	25	0,00454
7	18,61	0,02364	0,0005587	49	0,027378
9	8,78	0,01115	0,0001244	81	0,010074
11	6	0,00762	0,0000581	121	0,007028
13	6,5	0,00826	0,0000682	169	0,011519
15	2,62	0,00333	0,0000111	225	0,002492
17	3,84	0,00488	0,0000238	289	0,006875
19	1,89	0,00240	0,0000058	361	0,00208
21	0,49	0,00062	0,0000004	441	0,000171
23	0,63	0,00080	0,0000006	529	0,000339
25	0,33	0,00042	0,0000002	625	0,00011
$\Sigma$	-	-	0,3232653		0,440148

**Fonte: Autoria própria (2016)**

Logo, o valor de  $F_{HL}$  determinado é de

$$F_{HL} = \frac{0,440148}{0,3232653}$$

$$F_{HL} = 1,36156899$$

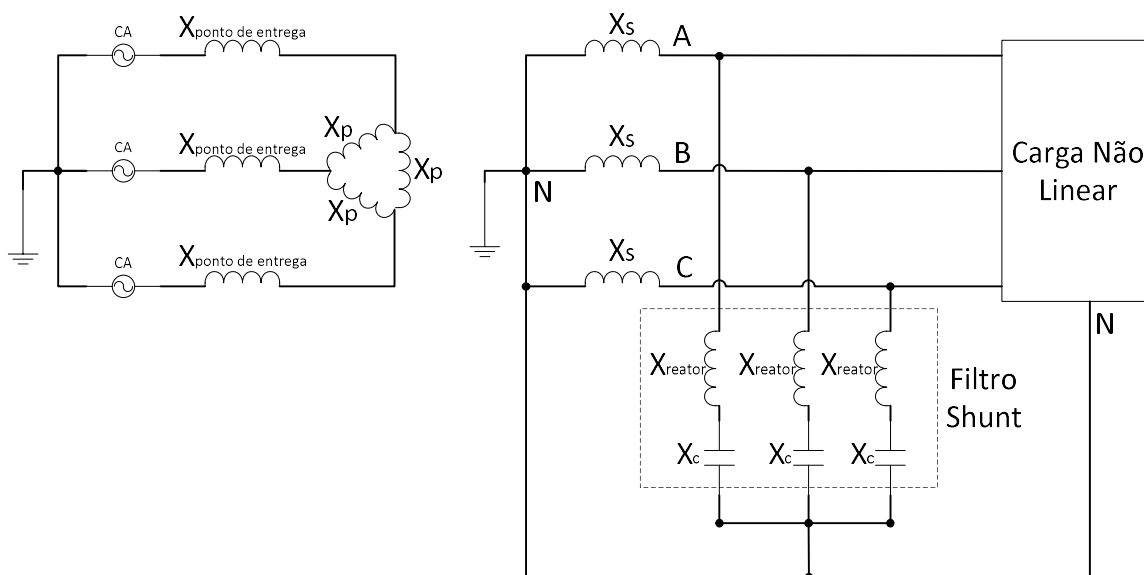
Esse valor significa que o transformador 1 é capaz de suprir 73,44% (1/1,36156899) de potência ativa sem sofrer aquecimentos adicionais em seus enrolamentos, considerando os harmônicos de corrente presentes nessa instalação, devido às correntes de *Foucault*.



## 5. ANÁLISE DA DISTRORÇÃO HARMÔNICA COM APLICAÇÃO DE FILTRO

Como observado no capítulo anterior, o 3º harmônico de corrente é o mais expressivo entre os outros harmônicos, com exceção do 1º, nas fases A, B e C. Portanto, é necessário um método que atenuar esse harmônico para aumentar a capacidade do transformador suprir potência à carga.

O método proposto é o uso de um filtro passivo do tipo shunt, associação em série de um reator e um banco de capacitores. Para tal, será necessário conectar o banco de capacitores em estrela, pois o fluxo do 3º harmônico de corrente é pelo condutor neutro. A figura 46, apresenta o diagrama multifilar da instalação elétrica com a inserção do filtro.



**Figura 46 - Diagrama multifilar com aplicação de filtro passivo do tipo shunt**  
**Fonte: Autoria própria (2016)**

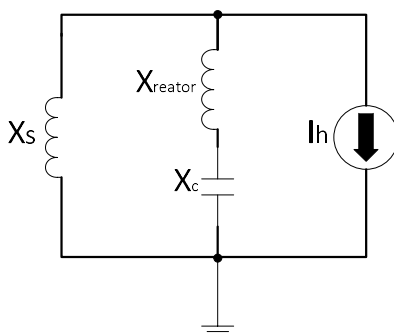
- $X_{\text{ponto de entrega}}$  – reatância no ponto de entrega.
- $X_P$  – reatância do primário do transformador.
- $X_S$  – reatância do secundário do transformador.
- $X_{\text{reator}}$  – reatância do reator.
- $X_C$  – reatância do banco de capacitores.

Para o dimensionamento do filtro, as seguintes premissas foram adotadas:

1. Desprezaram-se as resistências e as reatâncias dos cabos.

2. Desprezaram-se as resistências dos enrolamentos do transformador 1 e dos reatores ligados em série com os capacitores monofásicos.
3. A corrente do 3º harmônico considerada é de 59,25 A, conforme tabela 15.
4. O fator de deslocamento considerado é 0,91.
5. Removou-se o banco de capacitores de 20 kvar.

A partir das premissas adotadas, tem-se o circuito equivalente da instalação elétrica da UTFPR e pode-se prosseguir com o dimensionamento do filtro, de acordo com as seguintes etapas:



**Figura 47 - circuito equivalente monofásico da UTFPR**  
**Fonte: Autoria própria (2016)**

- *Correção do fator de deslocamento:* o fator de deslocamento mínimo para evitar cobranças por potência reativa por parte da concessionária de energia elétrica é de 0,92. Logo, será dimensionado um banco de capacitores para elevar esse valor para 0,95.

$$\cos\phi_{\text{mínimo}} = 0,91$$

$$\cos\phi_{\text{esperado}} = 0,95$$

$$P_{1\phi_1} = 96 \text{ kW}$$

$$Q_{1\phi_1} = 43,7 \text{ kvar}$$

$$Q_{c\_necessário} = P_{1\phi}(tg(\text{acos}(\phi_{\text{mínimo}})) - tg(\text{acos}(\phi_{\text{esperado}}))) \quad (2.43)$$

$$Q_{c\_necessário} \cong 12,2 \text{ kvar}$$

Utilizando os capacitores monofásicos disponíveis no mercado, o encontrado possui tensão nominal de 220 V e 6,67 kvar da WEG. Logo, é necessário uma associação em paralelo para aumentar a potência reativa e o cálculo desta quando aplicada tensão nominal de 127 V.

$$Q_c = 6 * 6670 * \left(\frac{127}{220}\right)^2$$

$$Q_c = 13,3 \text{ kvar}$$

$$Q_{1\phi\_corrigido} = Q_{1\phi} - Q_c \quad (2.44)$$

$$Q_{1\phi\_corrigido} = 43,7 - 13,3$$

$$Q_{1\phi\_corrigido} = 30,4 \text{ kvar}$$

$$S_{1\phi\_corrigido\_1} = \sqrt{P_{1\phi\_1}^2 + Q_{1\phi\_corrigido}^2} \quad (2.45)$$

$$S_{1\phi\_corrigido\_1} = \sqrt{96^2 + 30,4^2}$$

$$S_{1\phi\_corrigido\_1} = 100,7 \text{ kVA}$$

$$\cos\phi_{corrigido} = \frac{P_{1\phi\_1}}{S_{1\phi\_corrigido\_1}} \quad (2.46)$$

$$\cos\phi_{corrigido} = \frac{96}{100,7}$$

$$\cos\phi_{corrigido} = 0,953$$

- *Cálculo do filtro:* este deve ser sintonizado em 180 Hz, para que o filtro drene o 3º harmônico de corrente.

$$X_{reator} = \frac{X_c}{h^2} \quad (2.47)$$

$$X_{reator} = \frac{V_b^2}{Q_c} * \frac{1}{h^2}$$

$$X_{reator} = \frac{127^2}{13300} * \frac{1}{3^2}$$

$$X_{reator} \cong 0,1347 \Omega$$

$$L_{reator} \cong 21,44 \text{ mH}$$

- *Potência reativa e corrente no filtro:*

$$Q_{\text{filtro}} = \frac{V_b^2}{X_c - X_{\text{reator}}} \quad (2.48)$$

$$Q_{\text{filtro}} = \frac{127^2}{1,2127 - 0,1347}$$

$$Q_{\text{filtro}} \cong 14,96 \text{ kvar}$$

$$I_{\text{filtro}} = \frac{Q_{\text{filtro}}}{V_b} \quad (2.49)$$

$$I_{\text{filtro}} = \frac{14960}{127}$$

$$I_{\text{filtro}} \cong 117,8 \text{ A}$$

- *Corrente nominal do banco de capacitores:*

$$I_c = \frac{Q_c}{V_b} \quad (2.50)$$

$$I_c = \frac{13300}{127}$$

$$I_c \cong 104,7 \text{ A}$$

- *Corrente rms que o filtro deve suportar incluindo a corrente do 3° harmônico (este foi retirado da tabela 15):*

$$I_{\text{filtro\_rms}} = \sqrt{I_c^2 + I_{3,\text{máx}}^2} \quad (2.51)$$

$$I_{\text{filtro\_rms}} = \sqrt{104,7^2 + 59,25^2}$$

$$I_{\text{filtro\_rms}} \cong 120,3 \text{ A}$$

- *Tensão no banco de capacitores para a frequência fundamental e para o 3° harmônico:*

$$V_c = I_{\text{filtro}} X_c \quad (2.52)$$

$$V_c = 117,8 * 1,2127$$

$$V_c \cong 142,85 \text{ V}$$

$$V_{c_3} = I_{3\_m\acute{a}x} \frac{X_c}{h} \quad (2.53)$$

$$V_{c_3} = 59,25 * \frac{1,2127}{3}$$

$$V_{c_3} \cong 23,95 V$$

- *Tensão rms no banco de capacitores:*

$$V_{c\_rms} = \sqrt{V_c^2 + V_{3\_m\acute{a}x}^2} \quad (2.54)$$

$$V_{c\_rms} = \sqrt{142,85^2 + 23,95^2}$$

$$V_{c\_rms} \cong 144,84 V$$

- *Tensão de pico no banco de capacitores:*

$$V_{c\_pico} = \sqrt{2}V_c + \sqrt{2}V_{c_3} \quad (2.55)$$

$$V_{c\_pico} = \sqrt{2} * 142,85 + \sqrt{2} * 23,95$$

$$V_{c\_pico} \cong 235,89 V$$

- *Potência reativa entregue pelo banco de capacitores como parte do filtro:*

$$Q_{c\_filtro} = V_{c\_rms} I_{filtro\_rms} \quad (2.56)$$

$$Q_{c\_filtro} = 144,84 * 120,3$$

$$Q_{c\_filtro} \cong 17,42 \text{ kvar}$$

- *Comparação com os limites estabelecidos pelo IEEE Std 18-2012: os valores obtidos na coluna “Calculado” são referidos aos valores nominais do capacitor.*

**Tabela 18 - Comparação com a recomendação do IEEE 18-2012**

	Calculado (%)	IEEE Std 18-2012 (%)
<b>Potência reativa</b>	131	135
<b>Tensão rms</b>	65,84*	110
<b>Corrente rms</b>	114,9	180
<b>Tensão de pico</b>	75,82*	120

\* O valor da tensão nominal do banco de capacitores monofásicos é 220 V.

**Fonte: Autoria própria (2016)**

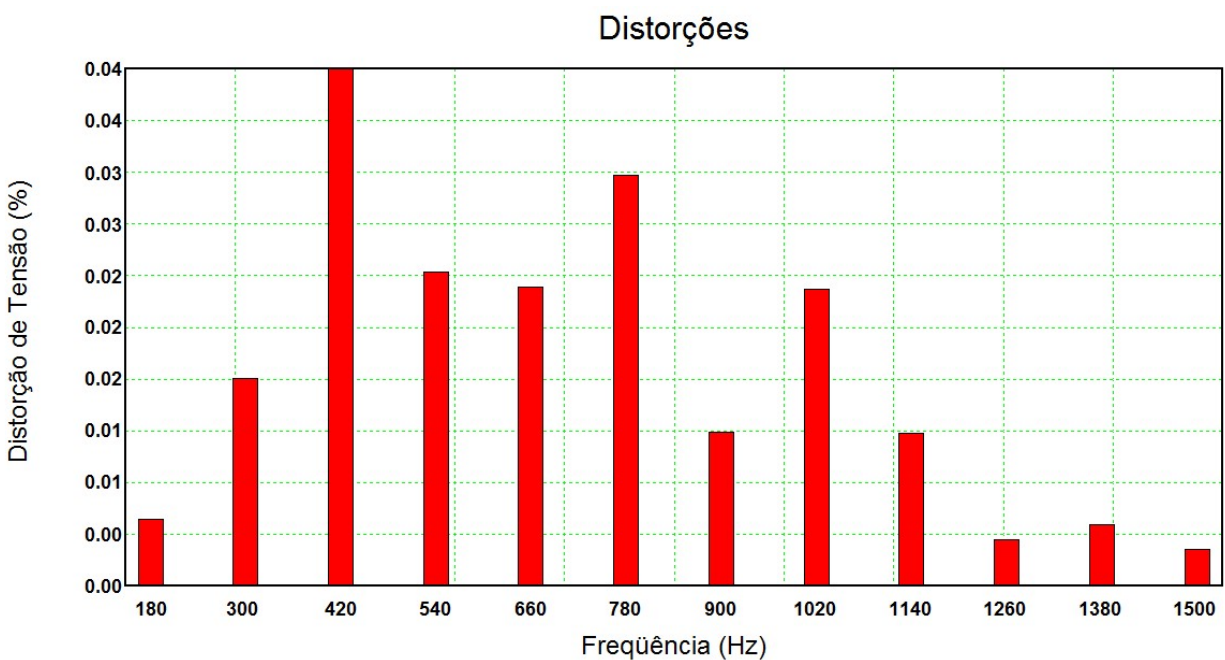
A partir dos cálculos realizados para o dimensionamento do filtro, simulou-se com o *HarmZs* a resposta em frequência, a  $DHT_V$  no primário do transformador 1, a corrente drenada pelo filtro, os harmônicos de corrente que circulariam pelo secundário do transformador 1. Estes serão apresentados nas figuras a seguir:

- *Figura 48* – apresenta a resposta em frequência e observa-se que em 180 Hz a impedância tende a zero, ou seja, um dreno para a corrente do 3º harmônico.



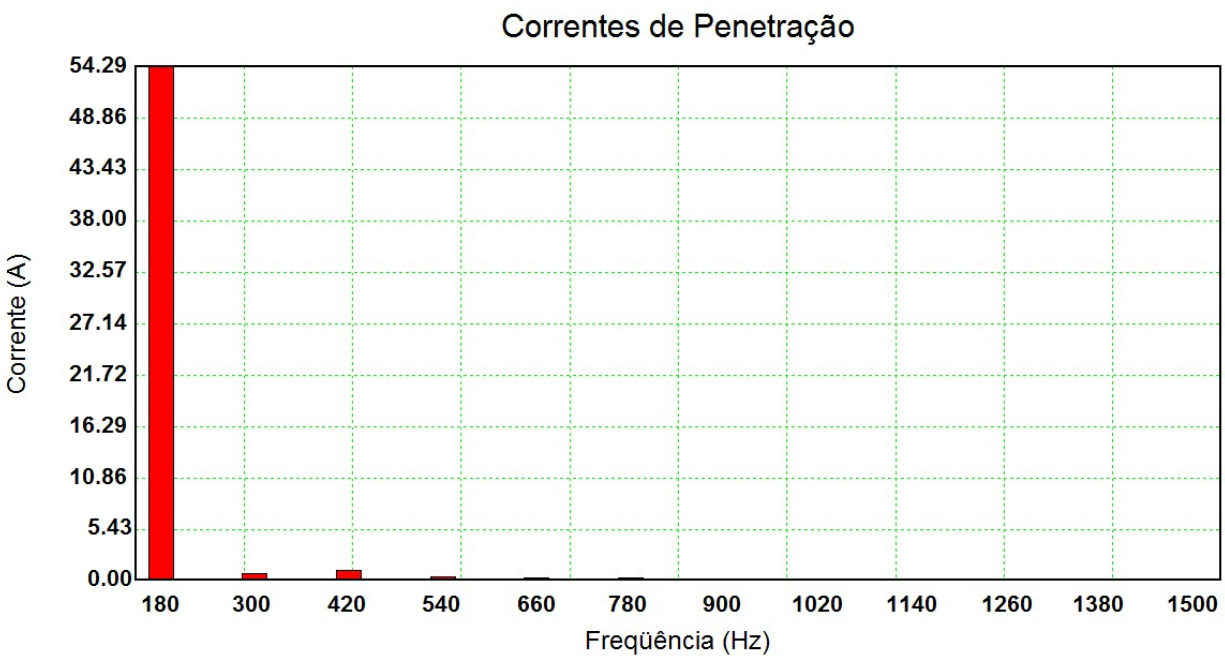
**Figura 48 - Resposta em frequência com filtro sintonizado em 180 Hz**  
**Fonte: Autoria própria (2016)**

- *Figura 49* – apresenta a  $DHT_V$  no primário do transformador 1 e que os valores obtidos estão em conformidade com as recomendações do *IEC 61000-3-6* e do módulo 8 do PRODIST que determinam que essa distorção seja inferior a 6,5%, entre 1 kV e 35 kV, e 8%, entre 1 kV e 13,8 kV, respectivamente.



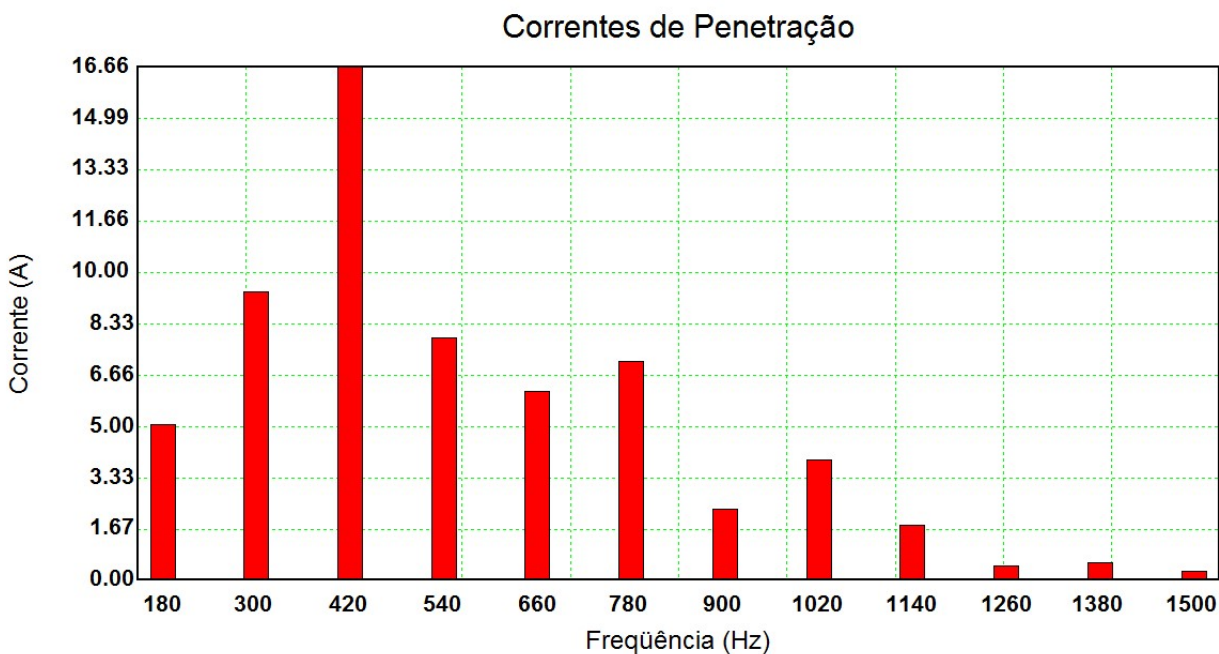
**Figura 49 – DHT<sub>V</sub> no primário do transformador 1**  
**Fonte: Autoria própria (2016)**

- *Figura 50* – apresenta a corrente drenada pelo filtro, 54,29 A no 3º harmônico. Essa corrente ficará confinada entre o filtro e carga monofásica.



**Figura 50 - Correntes drenadas pelo filtro em função da frequência**  
**Fonte: Autoria própria (2016)**

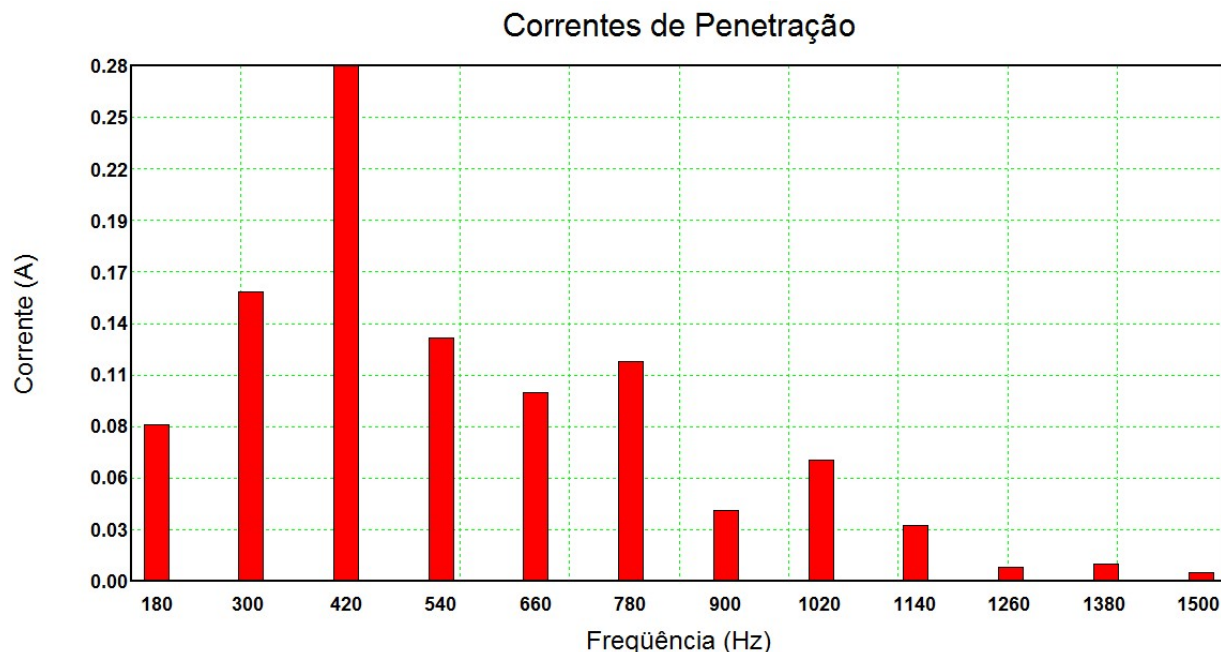
- *Figura 51* – apresenta o espectro harmônico da corrente no secundário transformador. O 3º harmônico possui 5,1 A para a fase analisada, quando anteriormente esse valor era de 59,25 A.



**Figura 51 - Harmônicos de corrente que circulam no secundário do transformador 1**  
**Fonte: Autoria própria (2016)**

A partir das simulações realizadas produziu-se a tabela 19 para comparar os valores das DTD,  $DHI_1$  e correntes harmônicas antes e depois do uso do filtro. Verificou-se que a DTD e as correntes harmônicas tiveram seus valores diminuídos, com exceção dos 11º, 13º, 17º, 21º e 25º que aumentaram levemente seus valores de corrente, insignificantes a ponto de exigirem uma maior atenção. Com relação à conformidade aos níveis recomendados pelo *IEEE*, pode-se afirmar que os limites de injeção harmônica estariam adequados, uma vez que o 3º harmônico foi filtrado e teve seu valor reduzido em 91,6%, isto é, apenas 5,1 A circulariam pelo secundário e seriam refletidos para o primário do transformador 1, conforme pode ser visto na figura 52.





**Figura 52 – Fluxo de harmônicos de corrente no primário do transformador 1**  
**Fonte: Autoria própria (2016)**

**Tabela 19 - Comparação do sistema elétrico do transformador 1 sem o filtro e com o filtro**

	Sem filtro (% da $I_L$ )	Com filtro (% da $I_L$ )	$I_{rms}$ [A]	
			Sem filtro	Com filtro
<b>DTD</b>	14,54%	5,37%		
<b>0</b>	1,98%	1,98%	8,76	8,76
<b>1°</b>	100%	100%	442,97	442,97
<b>3°</b>	13,38%	1,15%	59,25	5,10
<b>5°</b>	2,39%	2,12%	10,61	9,38
<b>7°</b>	4,20%	3,76%	18,61	16,66
<b>9°</b>	1,98%	1,78%	8,78	7,90
<b>11°</b>	1,36%	1,38%	6,00	6,14
<b>13°</b>	1,47%	1,61%	6,50	7,14
<b>15°</b>	0,59%	0,53%	2,62	2,34
<b>17°</b>	0,87%	0,89%	3,84	3,95
<b>19°</b>	0,43%	0,41%	1,89	1,83
<b>21°</b>	0,11%	0,12%	0,49	0,51
<b>23°</b>	0,14%	0,13%	0,63	0,61
<b>25°</b>	0,07%	0,08%	0,33	0,34

**Fonte: Autoria própria (2016)**

De posse dos novos valores dos harmônicos de corrente que circulam pelo secundário do transformador 1, é possível se determinar novamente o  $F_{HL}$ . A partir da equação 2.42 obtém-se a tabela abaixo:

**Tabela 20 - Distribuição dos harmônicos de corrente para a determinação do  $F_{HL}$  com o uso do filtro passivo do tipo shunt**

h	$I_h$ [A]	$I_h / I_{rms}$ (pu)	$(I_h / I_{rms})^2$ (pu)	$h^2$	$(I_h / I_{rms})^2 h^2$
1	442,97	0,56264	0,3165688	1	0,316569
3	5,1	0,00648	0,0000420	9	0,000378
5	9,38	0,01191	0,0001419	25	0,003549
7	16,66	0,02116	0,0004478	49	0,021941
9	7,9	0,01003	0,0001007	81	0,008156
11	6,14	0,00780	0,0000608	121	0,007359
13	7,14	0,00907	0,0000822	169	0,0139
15	2,34	0,00297	0,0000088	225	0,001988
17	3,95	0,00502	0,0000252	289	0,007275
19	1,83	0,00232	0,0000054	361	0,00195
21	0,51	0,00065	0,0000004	441	0,000185
23	0,61	0,00077	0,0000006	529	0,000318
25	0,34	0,00043	0,0000002	625	0,000117
$\Sigma$	-	-	0,3174849	-	0,383683

Fonte: Autoria própria (2016)

Logo, o valor de  $F_{HL}$  determinado é de

$$F_{HL} = \frac{0,383683}{0,3174849}$$

$$F_{HL} = 1,20850834$$

Esse valor significa que o transformador 1 é capaz de suprir 82,75% de potência ativa sem sofrer sobreaquecimentos em seus enrolamentos devido aos harmônicos de corrente. Portanto, com o uso do filtro passivo do tipo shunt o transformador 1 aumentaria sua capacidade de suprir potência ativa à carga em 9,31%, ou seja, 27,93 kW.

O transformador 1 poderia aumentar ainda mais essa capacidade caso fossem instalados mais filtros sintonizados em outras frequências, como por exemplo para o 5° e 7° harmônico. No entanto, necessitar-se-ia um estudo mais elaborado devido a ressonância que iria ser produzida.

## 6. CONCLUSÃO

A literatura descreve que cargas monofásicas não lineares, estas predominantes na UTFPR, apresentam elevado conteúdo de 3° harmônico de corrente. Tal premissa foi utilizada para justificar a proposta deste trabalho, sendo confirmada através da oscilografia no condutor neutro do transformador 1 da UTFPR (figura 1), que evidenciou um elevado índice de 3° harmônico de corrente, com valor aproximadamente três vezes maior que a corrente na frequência fundamental.

Com o uso do analisador de energia Fluke 435 II, medições foram realizadas durante cinco dias para coletar dados das distorções harmônicas de corrente e tensão no secundário do transformador 1. Esses dados após tratamento com o programa Fluke Power Log reforçaram o que a literatura diz a respeito de cargas monofásicas não-lineares, a elevada injeção de 3° harmônico de corrente.

Inicialmente, foram apresentados na tabela 15 os valores de corrente *rms* dos harmônicos bem como suas respectivas  $DHI_I$ ,  $DHT_V$  e DTD. Constatou-se que o 3° harmônico de corrente é maior contribuinte para as distorções harmônicas de corrente e tensão existentes nessa instalação. Ele, também, é o maior responsável pela queda na capacidade do transformador 1 suprir potência ativa à carga.

Apresentou-se o cálculo da resposta em frequência e com o uso do programa *HarmZs* plotou-se a mesma na figura 43. Verificou-se que ela ocorre aproximadamente no 18° harmônico (1080 Hz), como não foi detectado tal harmônico de corrente, as possibilidades de ocorrerem sobrecorrente e sobretensão no banco de capacitores de 20 kvar são remotas.

A partir dos valores das  $DHI_I$  e DTD encontrados e da corrente de curto-circuito simétrico no PAC, compararam-se tais valores com as recomendações do *IEEE Std 519-2014* e observou-se que a  $DHI_I$  do 3° harmônico está acima do recomendado, considerando-se o lado de BT do transformador. A  $DHT_V$  atende as recomendações previstas no módulo 8 do PRODIST e do *IEC 61000-3-6*.

Também, foi determinada a capacidade do transformador 1 suprir potência ativa à carga considerando os harmônicos de corrente que circulam por ele, conforme recomendações do *IEEE Std C57.110-1998*, e observou-se que essa capacidade é de 73,44%.

Como o 3° harmônico era o principal responsável pelas distorções harmônicas de corrente e tensão, dimensionou-se um filtro passivo do tipo shunt para confiná-lo e impedir que ele circule

pelo secundário do transformador 1 e, também, corrigir o fator de deslocamento. As seguintes etapas foram seguidas:

- Dimensionamento do banco de capacitores – utilizaram-se 6 capacitores de 6,67 kvar ligados em paralelo para elevar o fator de deslocamento para 0,953.
- Cálculo do filtro – sintonizou-se o filtro em 180 Hz e reatância indutiva do filtro necessária é de 0,1347 m $\Omega$ .
- Potência reativa e corrente no filtro – a potência reativa do filtro é de 14,96 kvar e a corrente produzida pelo mesmo é de 117,8 A.
- Corrente *rms* que o filtro deve suportar – a corrente *rms* incluindo o 3º harmônico que o filtro suporta é de 120,3 A.
- Tensão *rms* no banco de capacitores – a tensão *rms* incluindo o 3º harmônico no banco de capacitores é de 144,84 V.
- Comparação com os limites do *IEEE std 18-2012* – todos os valores obtidos no dimensionamento do filtro shunt estão em conformidade com as recomendações, conforme demonstra a tabela 18.

Após o dimensionamento do filtro, foi simulado com o *HarmZs* a resposta em frequência (figura 48) que apresenta uma ressonância série em 180 Hz, isto é, um dreno para o 3º harmônico de corrente, o que possibilita o confinamento desse harmônico entre o filtro e a carga; a distorção harmônica de tensão no primário do transformador foi apresentada na figura 49 com 0,04% como o maior valor de distorção bem abaixo das recomendações do módulo 8 PRODIST e do *IEC 61000-3-6*; na figura 50 apresentou-se a corrente do 3º harmônico drenada pelo filtro que é de 54,29 A, sendo que este foi dimensionado para absorver 59,25 A em 180 Hz.

Ainda, verificou-se que a corrente do 3º harmônico que circularia pelo secundário do transformador 1 após a adoção do filtro seria de 5 A – anteriormente esse valor era de 59,25 A – a conforme apresentado na figura 51 e na tabela 19, que compara os valores de  $DHI_1$ , DTD e dos harmônicos de corrente antes e depois da aplicação do filtro shunt. Com a redução da circulação de corrente do 3º harmônico no secundário do transformador, a capacidade deste suprir potência foi elevada para 82,75%.

Portanto, verifica-se que o uso de um filtro passivo do tipo shunt para essa instalação elétrica além de corrigir o fator de deslocamento, aumenta a capacidade do transformador suprir

potência ativa à carga. Outro método que poderia ser utilizado para atenuar a circulação do 3º harmônico de corrente no secundário do transformador seria a ligação das cargas entre fases, ou seja, sem a presença do condutor neutro, haja visto que a maioria das cargas monofásicas com fontes chaveadas possuem tensões de entrada que variam entre 100 e 240 V, método que fica de sugestão para trabalhos futuros.

## 7. REFERÊNCIAS

ACHA, E.; MADRIGAL, M. **Power Systems Harmonics: Computer Modelling and Analysis**, 1. ed. John Wiley & Sons Ltd, 2012.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, ANEEL - **PRODIST – Módulo 8: Qualidade de Energia Elétrica**, Revisão 02, 2011.

ARRILLAGA, J.; WATSON, N.R. **Power Systems Harmonics**, 2. ed. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 5410 – Instalações Elétricas de Baixa Tensão**, Rio de Janeiro, 2008.

BAGGINI, Angelo, **Handbook of Power Quality**, 1. ed. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd, 2008.

DUGAN, Roger C.; McGRANAGHAN, Mark F.; SANTOSO, Surya; BEATY, H,Wayne, **Electrical Power Systems Quality**, 2. ed. McGraw-Hill Companies, 2004.

FITZGERAL, A. E.; JR., Charles K.; UMANS, Stephen D., **Máquinas Elétricas: Com introdução à eletrônica de potência**, 6. ed. McGraw-Hill Companies, 2008.

International Electrotechnical Commission. **IEC 61000-1-4, Historical rationale for the limitation of power-frequency conducted harmonic current emissions from equipment in the frequency range up to 9 kHz**. Technical Report.

---

. **IEC 61000-2-1, Electromagnetic compatibility (EMC) Part 2-1: Environment – Description of the environment: Electromagnetic environment for low-frequency conducted disturbances and signalling in public power supply systems**. 1990.

\_\_\_\_\_. **IEC 61000-2-2, Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 2-2: Environment – Compatibility levels for low frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems.**

\_\_\_\_\_. **IEC 61000-3-2, Limits for harmonic current emissions (equipment input current  $\leq 16$  A per phase).**

IEEE Power and Energy Society. **IEEE Std 519-2014, IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems**, New York, 27 mar. 2014.

\_\_\_\_\_. **IEEE P519A/D5, Guide for Applying Harmonic Limits on Power Systems**, New York, 4 mai. 1996.

\_\_\_\_\_. **IEEE Std C57.110-1998, Establishing Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents**, New York, 30 mar. 1999.

\_\_\_\_\_. **IEEE Std 18-2012, IEEE Standard for Shunt Power Capacitors**, New York, 15 fev. 2013.

KEY, Thomas; LAI, Jih-Sheng. **Analysis for Harmonic Mitigation Methods for Building Wiring System**, IEEE Transactions on Power Systems, v. 13, n. 3, ago. 1998.

\_\_\_\_\_. **Effectiveness of Harmonic Mitigation Equipment for Commercial Office Buildings**, IEEE Transactions on Power Systems, v. 33, n. 4, jul/ago 1997.

SANKARAN, C, **Power Quality**, 1. ed. CRC Press LLC, 2002.

SCHAFFNER SHAPING ELECTRICAL POWER, **AC Line Reactors**, Disponível em: <http://www.schaffner.com/products/configurator/>>. Acesso em 03 mar. 2016.

TITAN ENGINEERING, **General Cable Information**, Disponível em: <http://www.titanengineering.net/titanengineering/engineering/cables/71ca12.htm>. Acesso em 26 fev. 2016.

WEG, **Capacitores para correção de fator de potência**, Disponível em: <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-capacitores-para-correcao-do-fator-de-potencia-50009818-catalogo-portugues-br.pdf>. Acesso em 04 set. 2016.