

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 820

**COMPENSAÇÃO DISTRIBUÍDA**  
**SÉRIE NA MITIGAÇÃO**  
**HARMÔNICA EM INSTALAÇÕES COMERCIAIS**

*Rogério Azevedo Diniz*

DATA DA DEFESA: 12/08/2014

**Universidade Federal de Minas Gerais**

**Escola de Engenharia**

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**

**COMPENSAÇÃO DISTRIBUÍDA**

**SÉRIE NA MITIGAÇÃO**

**HARMÔNICA EM INSTALAÇÕES COMERCIAIS**

*Rogério Azevedo Diniz*

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Professor Braz de Jesus Cardoso Filho, PhD.

**Belo Horizonte**  
**Escola de Engenharia da UFMG**  
**Agosto, 2014**

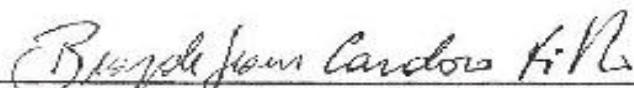
**"Compensação Distribuída Série na Mitigação Harmônica em Instalações Comerciais"**

**Rogério Azevedo Diniz**

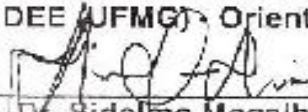
Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 12 de agosto de 2014.

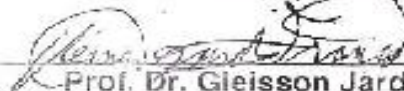
Por:



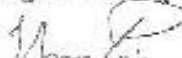
Prof. Dr. Bráze de Jesus Cardoso Filho  
DEE (UFMG) - Orientador



Prof. Dr. Sidelmo Magalhães Silva  
DEE (UFMG)



Prof. Dr. Gleisson Jardim França  
Engenharia (WEG Automação)



Prof. Dr. Igor Amariz Pires  
DELT (UFMG)

À minha família pelo apoio, a Aline, minha amada esposa pelo incentivo e compreensão, e especialmente ao meu filho Gabriel, que na sua inocência e ternura sempre nos lembra os reais valores de nossa caminhada.

## **AGRADECIMENTOS**

O que seria do homem sem sonho, sem idealismo, desprovido de relacionamentos, sem amor, sem DEUS?

Agradeço ao PAI Eterno por ser quem sou, por ter me mostrado mesmo quando não percebia o caminho reto da valorização da vida e das pessoas.

A minha família, berço de amor, perseverança, honestidade, de onde carrego no DNA a vontade de lutar por minhas convicções, mesmo nas mais difíceis adversidades.

Ao Banco do Brasil, em especial a Engenharia, ambiente de trabalho que me proporciona evolução profissional e pessoal; estimados companheiros como, Amilton Diniz, Cesar Rodrigues, Edward Reis, Geraldo Nobre, Marcelo Campos, Omar Ganem e Waldir Gadea, engenheiros que viabilizaram ou incentivaram o desenvolvimento deste trabalho.

Finalmente, a partir da feliz decisão de ingressar-me na UFMG, pude compartilhar de um dos melhores ambientes acadêmicos que conheço (pleonasma ?), mas vale ressaltar. Com gratidão e vontade de permanecer, agradeço a esse FORTE corpo docente, que orgulhosamente sustenta nossa Escola de Engenharia, em especial ao meu estimado orientador, Dr. Braz Cardoso.

*Há duas formas para VIVER a sua vida:  
Uma é acreditar que não existe milagre.  
A outra é acreditar que todas as coisas  
são um MILAGRE.*

Albert Einstein

## RESUMO

Alinhado com o fato e premissas recomendadas pelo IEEE 519-2, de que é suficiente reduzir o conteúdo harmônico dos sistemas elétricos apenas para os níveis de compatibilidade dos equipamentos nos quais estão inseridos, não sendo, portanto necessário eliminar completamente seu conteúdo harmônico, este trabalho irá fornecer recomendações para mitigar a distorção harmônica, melhorando a capacidade do sistema, disponibilidade e confiabilidade, enquanto avalia sua viabilidade econômica. Os estudos baseiam-se no desenvolvimento e aplicação de um dispositivo de mitigação harmônica controlado eletronicamente com base na inserção de impedâncias harmônicas série ativas na rede elétrica. Estas impedâncias harmônicas ativas são inseridas em frequência(s) específica(s). Vantagens importantes do sistema proposto são: a reduzida taxa de conversão de potência envolvida e a utilização de transformadores coaxiais. Nesta oportunidade, o dispositivo de impedância harmônica ativa se propõe a implementar a estratégia distribuída de mitigação harmônica, levando a uma solução flexível e de baixo custo para aplicações tanto em sistemas de energia industriais quanto comerciais. Os resultados globais desejados são investigados através da modelagem e simulação de uma unidade comercial real, estruturada na robusta ferramenta PTW - Power Tools for Windows / SKM. Dados de distorções e fontes harmônicas são medidos na instalação em questão, caracterizando a situação antes e depois da aplicação da compensação série para a mitigação harmônica. A solução proposta também pode agregar a função dos bancos de correção de fator de potência dinâmicos no acionamento dos arranjos dessintonizados, limitando as correntes harmônicas através dos capacitores sem a necessidade de aumentar os seus níveis de tensão e de controlar o fluxo harmônico com o objetivo de direcionar as correntes harmônicas a um caminho elétrico que não cause danos aos componentes do sistema. O assunto aqui discutido lida com considerações gerais padrão quando se trata de cargas que produzem harmônicas típicas em sistemas de energia comerciais e industriais.

## ABSTRACT

Aligned with the fact and the recommended assumptions IEEE 519-2, that it is sufficient to reduce the harmonic content of the electrical systems just to the compatibility levels of equipment are submitted and are therefore not necessary to completely eliminate its harmonic content, this paper will provide recommendations to mitigate harmonic distortion, improving system capacity, availability and reliability while evaluates its economic viability. The studies are based on the development and application of an electronically controlled harmonic mitigation device based on the insertion of active series harmonic impedances in the electric network. These active harmonic impedances are inserted at specific frequency (or frequencies). Important advantages of the proposed system are: the reduced power converter rating and the utilization of coaxial transformers. In this opportunity, the active harmonic impedance device is applied to implement distributed harmonic mitigation strategies, leading to a flexible and cost-effective solution for industrial and commercial power systems applications. The desired overall results are investigated through modeling and simulation an actual commercial facility, based on the PTW - Power Tools for Windows/SKM. Harmonic distortions and harmonic sources data are measured in the considered facility, characterizing the situation before and after the implementation of series-shunt compensation for harmonic mitigation. The proposed solution can also add the function of dynamic power factor correction banks on the triggering of the detuned arrangements, limiting the harmonic currents through the capacitors without the need to raise their voltage levels and to control the harmonic flow, with the objective of direct harmonics current to an electric way that don't cause damage to the system components. The subject here discussed deals with general standard considerations when dealing with typical harmonic producing loads in commercial and industrial power systems.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	11
LISTA DE TABELAS .....	14
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES .....	14
1. INTRODUÇÃO.....	22
1.1. Relevância.....	22
1.2. Motivação e objetivos .....	23
1.3. Contribuições .....	24
1.4. Proposta de trabalho - Metodologia.....	27
1.5. Organização do texto .....	28
2. HARMÔNICOS E A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES COMERCIAIS .....	29
2.1. Introdução .....	29
2.2. Recomendações normativas.....	30
2.2.1. O PRODIST .....	30
2.2.2. IEC .....	32
2.2.2.1. IEC 61000-2-2 / Edição 2.0 / 28-03-2002 Electromagnetic Compatibility (EMC).....	32
2.2.2.2. IEC 61000-2-4 / Edição 2.0 / 26-06-2002 Electromagnetic Compatibility (EMC).....	32
2.2.2.3. IEC 61000-3-2 Electromagnetic Compatibility (EMC).....	33
2.2.2.4. IEC 61000-3-4 / Edição 1.0 / 30-10-1998 - Electromagnetic Compatibility (EMC).....	34
2.2.2.5. IEC 61000-3-6 / Edição 2.0 / 13-10-2008 Avaliação dos limites de distorção para conexão de instalações em sistemas de energia de MT, AT, EAT. ....	35
2.2.2.6. IEC 61000-4-30 / Edição 2.0 / 13-10-2008 - Métodos de medidas em Qualidade de energia.....	35
2.2.3. IEEE .....	36
2.2.3.1. IEEE 519 (2014) - Revisão IEEE Std 1992 .....	36
2.2.4. Comentários IEEE 519 e IEC 61000-3-6.....	38
2.3. O cenário mercadológico mundial do filtro harmônico, segundo [39] .....	38
2.4. A viabilidade da compensação harmônica em edificações comerciais .....	40
2.4.1. A mitigação harmônica distribuída .....	40

2.4.2. Referência ao documento [1] .....	41
2.4.2.1 Comentários: .....	46
2.4.3. Referência ao documento [2] .....	46
2.4.3.1 Comentários: .....	50
2.4.4. Referência ao documento [3] .....	51
2.4.4.1. Comentários: .....	54
2.5. Inserção do estudo neste contexto .....	55
3. HARMÔNICAS - CONSIDERAÇÕES AFINS E TECNOLOGIAS MITIGADORAS	57
3.1. Introdução .....	57
3.2. Harmônicas - Considerações afins.....	57
3.3. Índices Harmônicos .....	60
3.3.2. DTD - Distorção Total de Demanda .....	61
3.3.3. Fator K - Transformadores .....	61
3.3.4. $F_{HL}$ - Fator de perdas harmônicas nos Transformadores .....	63
3.3.5. $fp$ - Fator de potência “harmônico” .....	64
3.4. Fontes harmônicas em edificações comerciais .....	65
3.4.1. Fontes chaveadas.....	66
3.4.2. Alternativas de soluções em mitigação harmônica .....	69
3.4.2.1. Capacitores de potência.....	69
3.4.2.2. Filtros Passivos Sintonizados .....	70
3.4.2.3. Filtros Passivos Dessintonizados ou Amortecidos.....	72
3.4.2.4. Filtros Ativos.....	72
3.4.2.5. Filtros Híbridos .....	74
3.4.2.6. Bobinas de reatâncias indutivas .....	76
3.4.2.7. Transformadores do tipo Zigue-zague .....	77
3.5. Compensador Série para Mitigação Harmônica Distribuída [4] .....	78
3.5.1. Descrição Geral .....	79
3.5.2. Implementação da Impedância Harmônica Ativa .....	81
3.5.3. Algoritmos dos PLL .....	83
3.5.4. Considerações sobre o Transformador de Acoplamento Coaxial .....	84
3.5.5. Resultados das simulações .....	85
3.6. Resultados experimentais .....	86
3.7. Conclusão.....	88

4. A COMPENSAÇÃO SÉRIE NA MITIGAÇÃO HARMÔNICA EM INSTALAÇÕES COMERCIAIS - UMA ABORDAGEM PRÁTICA.....	89
4.1. Introdução .....	89
4.2. Síntese técnico-metodológica .....	90
4.3. Aplicação em Edificação Predial Comercial .....	90
4.4. Caracterização da edificação.....	91
4.5. Metodologia .....	95
4.6. Prospecção de campo.....	96
4.7. Modelagem e Simulação das Instalações.....	102
4.8. Resultados Práticos .....	110
5. CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE .....	115
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	117
ANEXO A .....	120
INTERNACIONAL POWER ELECTRONICS CONFERENCE - ECCE ASIA.....	120
IPEC - HIROSHIMA 2014.....	120
ANEXO B .....	129
CARGAS ELETRÔNICAS SENSÍVEIS.....	129

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Ilustração do conceito da mitigação harmônica distribuída [4] .....	41
Figura 2.2 - Correntes harmônicas de uma edificação comercial típica (IEEE Standard 1100) [1] .....	42
Figura 2.3 - Proposta de fonte com conversor <i>boost</i> .....	44
Figura 2.4 - Perfis de tensão e corrente em uma edificação comercial .....	47
Figura 2.5 - Filtro monofásico PCRFB .....	47
Figura 2.6 - Filtro monofásico SCRF .....	47
Figura 2.7 - Diagrama de blocos da montagem usada nos ensaios laboratoriais [3] .....	52
Figura 2.8 - Espectro de frequências harmônicas de corrente para transformadores com impedâncias próprias diferentes [3] .....	52
Figura 2.9 - Formas de onda de corrente nas cargas relacionadas a fontes com $Z_{\%T}$ divergentes [3] .....	52
Figura 3.1.(a) - Formas de ondas de funções periódicas distorcidas .....	59
Figura 3.1.(b) - Formas de ondas de funções periódicas distorcidas .....	59
Figura 3.2 - Diagrama típico de uma fonte chaveada de energia [17] .....	67
Figura 3.3 - Forma de onda de corrente e espectro harmônico típicos de uma fonte chaveada.	68
Figura 3.4 - Registros reais de fontes chaveadas .....	68
Figura 3.5.(a) - Filtros RLC Série .....	71
Figura 3.5.(b) - Topologias de filtros amortecidos .....	71
Figura 3.6.(a) - Filtro ativo série .....	73
Figura 3.6.(b) - Filtro ativo paralelo .....	73
Figura 3.6.(c) - Filtros ativos série-paralelo .....	73
Figura 3.7.(a) - Filtro Híbrido Série .....	75

Figura 3.7.(b) - Filtro Híbrido Serie - Paralelo .....	75
Figura 3.7.(c) - Filtro Híbrido Paralelo .....	75
Figura 3.8. - Efeito da bobina de reatância nas correntes harmônicas de um ASD [17] .....	77
Figura 3.9.(a) - Ligação elétrica do transformador Zigue-Zague .....	78
Figura 3.9.(b) - Diagrama fasorial do transformador Zigue-Zague .....	78
Figura 3.10 - Diagrama geral aplicado à impedância harmônica ativa monofásica [4] .....	79
Figura 3.11 - Diagrama de blocos da célula de impedância harmônica ativa .....	80
Figura 3.12 - Referenciais utilizados para os cálculos das transformações de eixos .....	81
Figura 3.13 - Referências para análise do núcleo do transformador coaxial .....	84
Figura 3.14 - Amplitude ( $I_q$ ) e ângulo de fase ( $\theta_f$ ), resposta obtida a partir do PLL .....	85
Figura 3.15 - Amplitude ( $I_{q_{5h}}$ ) e ângulo de fase ( $\theta_{5h}$ ), resposta do PLL utilizado para estimar a componente de 5ª ordem .....	86
Figura 3.16 - Diagrama do protótipo experimental para avaliação da impedância harmônica ativa .....	87
Figura 3.17 - Formas de onda de corrente no capacitor C e no conversor e espectro harmônico no capacitor antes de depois da mitigação .....	87
Figura 4.1 - Plano de face frontal do QGBT .....	92
Figura 4.2 - Diagrama unifilar vertical dos alimentadores elétricos energia essencial e comum .....	93
Figura 4.3 - Diagrama unifilar elétrico. Alimentadores sistema de ar condicionado .....	94
Figura 4.4 - Vista geral da sala de painéis de baixa tensão do edifício .....	97
Figura 4.5 - Plano de face posterior do QGBT .....	98
Figura 4.6 - QGBT Geral .....	100
Figura 4.7 - QGBT Geral .....	100
Figura 4.8 - QEE Energia Essencial Total .....	100

Figura 4.9 - QEE Energia Essencial Total .....	100
Figura 4.10 - QEE Energia Essencial Parcial .....	100
Figura 4.11 - QEE Energia Essencial Parcial .....	100
Figura 4.12 - Amplitudes médias das correntes harmônicas antes da mitigação .....	101
Figura 4.13 - Diagrama de qualidade de energia da edificação antes da otimização, apontando em vermelho, ambos os pontos de mitigação essenciais .....	104
Figura 4.14 - Forma de onda de tensão na rede, gerada pela fonte chaveada.....	106
Figura 4.15 - Forma de onda de tensão a ser injetada pelo SAHI TC, parametrizada no PTW.	107
Figura 4.16 - Comportamento da impedância harmônica de 3ª ordem .....	108
Figura 4.17 - Comportamento da impedância harmônica de 5ª ordem .....	108
Figura 4.18 - Níveis de potência de trabalho do compensador .....	109
Figura 4.19 - Ilustrações do efeito mitigador do compensador no barramento QGBT/EE, expresso em forma de onda e espectro harmônico .....	110
Figura 4.20 - Ilustrações do efeito mitigador progressivo do compensador no barramento SE/QGBT, expresso em forma de onda e espectro harmônico .....	111
Figura 4.21 - Declínio das amplitudes harmônicas de 1ª, 3ª e 5ª ordens pós-mitigação, medido no alimentador BW-QGBT/EE .....	112
Figura 4.22 - Declínio das amplitudes harmônicas de 1ª, 3ª e 5ª ordens pós mitigação, medido no alimentador BW-SE/QGBT .....	112
Figura 4.23 - Diagrama de qualidade de energia otimizado em ambos os pontos essenciais ...	114

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Valores globais de referência das distorções harmônicas totais (em porcentagem da tensão fundamental) [11] .....	31
Tabela 2.2 - Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em porcentagem da tensão fundamental) [11] .....	31
Tabela 2.3 - Limites de emissão de correntes para equipamentos Classe A .....	33
Tabela 2.4 - Limites de emissão de correntes para equipamentos Classe C .....	34
Tabela 2.5 - Limites de emissão de correntes para equipamentos Classe .....	34
Tabela 2.6 - Níveis de tensão harmônica .....	35
Tabela 2.7 - Índices admissíveis para distorções harmônicas de tensão por faixas em BT, MT, AT e EAT .....	37
Tabela 2.8 - Índices admissíveis para distorções harmônicas de corrente .....	37
Tabela 2.9 - Resumo das perdas relacionadas com harmônicas e os custos por ano [1] .....	43
Tabela 2.10 - Performance do transformador: Perdas X Custos [1] .....	44
Tabela 2.11 - Potencial economia de energia em diferentes localizações [1] .....	45
Tabela 2.12 - Comparação de desempenho dos métodos de mitigação harmônica [2] .....	49
Tabela 2.13 - Economia de energia por trecho em W e % [2] .....	49
Tabela 2.14 - Valores presentes das diferentes opções de investimentos em filtros [2] .....	50
Tabela 2.15 - Mostra a relação indireta carga ( $Z_{\%eq}$ ) e DHTi [3] .....	53
Tabela 2.16 - Comparação das perdas entre modelos de transformadores e comprimentos de distribuição diferentes [3] .....	53
Tabela 2.17 - Comparação de resultados laboratoriais [3] .....	54
Tabela 3.1 - Classificação: transformador em função da carga .....	63

Tabela 3.2 - Consolidação do comparativo das duas tecnologias [45] .....	70
Tabela 4.1 - DHTi no barramento BW- QGBT/EE antes da compensação .....	98
Tabela 4.2 - DHTi no barramento BW-GMG/QGBT antes da compensação .....	99
Tabela 4.3 - DHTi no barramento BW-SE/QGBT antes da compensação .....	99
Tabela 4.4 - Consolidação de dados do PTW sem SAHI .....	105
Tabela 4.5 - Ábaco sinótico de impedâncias harmônicas .....	107
Tabela 4.6 - Síntese dos resultados da mitigação harmônica no PTW .....	111

## LISTA DE ABREVIACÕES E SÍMBOLOS

### ABREVIACÕES

SAHI – *Serial Active Harmonic Impedance*;

PTW – Power Tools for Windows;

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas;

ANEEL – Agência nacional de Energia Elétrica;

PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional;

QEE – Qualidade de energia elétrica;

ONS – Operador Nacional do Sistema;

DIT – Demais Instalações de Transmissão;

IEC – *International Electrotechnical Commission*;

IEEE – *Institute of Electrical and Electronics Engineers*;

EMC – *Electromagnetic Compatibility*;

BT – Baixa Tensão;

MT – Média Tensão;

AT – Alta Tensão;

EAT – Extra Alta Tensão;

AIEE – American Institute of Electrical Engineers;

IRE – Institute of Radio Engineers;

IL – Corrente máxima demandada;

TI – Tecnologia da Informação;

UPS – Uninterruptable Power Supply;

C.C. – Corrente contínua;

CA – Corrente alternada;

DHT<sub>i</sub> – Distorção harmônica total de corrente;

DHT<sub>v</sub> - Distorção harmônica total de tensão;

DTD – Distorção Total de Demanda;

PCRF – *Parallel-Connected Resonant Filter*;

SCRF – *Séries-Connected Resonant Filter*;

NCF – *Neutral Current Filter*;

ZZF – *Zigzag Filter*;

APF – *Active Power Filter*;

HSS – *Harmonic Suppression System*;

FFT – *Fast Fourier Transform*;

FP – Fator de potência;

MOSFET – Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor;

IGBTs – *Insulated Gate Bipolar Transistors*;

IGCTs – *Integrated Gate-Commutated Thyristor*;

PAC – Ponto de acoplamento comum;

PCC – *Point of Common Coupling*;

PLL – *Phase Locked Loop*;

PPM – Polipropileno metalizado;

PLC – *Programmable logic controller*;

PWM – *Pulse Width Modulation*;

THD – *Total Harmonic Distortion*;

UPS – *Uninterruptible Power Supply*;

VSD – *Variable Speed Driver*;

BW-QGBT/EE – Buz Way Quadro Geral de Baixa Tensão/Energia Essencial;

PFC CB – *Power Factor Correction Capacitor Bank*;

BUS TC Rooms and Elev – Bus Telecommunication Closed and Elevator;

QAC – Quadro de ar condicionado;

QEE-RC – Quadro de energia essencial rés do chão;

BW-GMG/QGBT – Bus-way Grupo Motor Gerador/Quadro Geral de Baixa Tensão;

BUS-EE – *Bus Essencial Energy*;

BUS - En+EE – BUS Energia Normal + Energia Essencial;

BW-SE/QGBT – Bus-way Subestação/Quadro Geral de Baixa Tensão;

## SÍMBOLOS

$I_L$  - Corrente de carga;

$I_S$  - Corrente na fonte;

$I_f$  – Componente fundamental da corrente de carga;

$I_{Lf}$  – Componente fundamental da corrente de carga;

$V_1$  – Componente fundamental da tensão;

$V_h$  – Componente harmônica de ordem  $h$  da tensão;

$Z_{\%T}$  – Impedância percentual própria dos transformadores;

$Z_{\%eq}$  – Impedância percentual equivalente do sistema;

$I_1$  – Componente fundamental da corrente;

$I_h$  – Componente harmônica de ordem  $h$  da corrente;

$Z_S$  – Impedância equivalente da fonte de alimentação;

$p_0$  – componente de sequência zero da potência instantânea;

$p_{\alpha\beta}$  – componentes em quadratura ( $\alpha\beta$ ) da potência instantânea;

$q_{\alpha\beta}$  – componentes em quadratura ( $\alpha\beta$ ) da potência reativa instantânea;

$v_0$  – componente de sequência zero da tensão instantânea na carga;

$v_\alpha$  – componente de eixo  $\alpha$  da tensão instantânea na carga;

$v_\beta$  – componente de eixo  $\beta$  da tensão instantânea na carga;

$i_0$  – componente de sequência zero da corrente instantânea na carga;

$i_\alpha$  – componente de eixo  $\alpha$  da corrente instantânea na carga;

$\omega$  – frequência angular da rede de alimentação;

$t$  – constante de tempo;

$\theta$  – ângulo de defasagem entre a tensão de alimentação e corrente da carga;

$h_{\text{máx}}$  – máxima ordem da componente harmônica de tensão ou corrente;

$r_1$  – resistência do enrolamento primário do transformador;

$r_2'$  – resistência do enrolamento secundário referida ao primário do transformador;

$X_1$  – reatância de dispersão do enrolamento primário;

$X_2$  – reatância de dispersão do enrolamento secundário;

$X_m$  – reatância de magnetização referida ao primário do transformador;

$r_m$  – resistência equivalente para modelagem das perdas no núcleo ferromagnético referida ao primário do transformador;

$r_p$  – resistência do enrolamento primário do transformador;

$r_s$  – resistência do enrolamento secundário do transformador;  
 $L_p$  – indutância de dispersão do enrolamento primário do transformador;  
 $L_s$  – indutância de dispersão do enrolamento secundário do transformador;  
 $i_1$  – corrente no primário do transformador;  
 $i_2$  – corrente no secundário referida ao primário do transformador;  
 $V_{fund}$  – componente de frequência fundamental da tensão de compensação;  
 $I_s$  – Corrente no sistema de potência;  
 $V_{cc}$  – Tensão no barramento C.C. do conversor de frequência;  
 $v_{cc}(t)$  – Tensão instantânea no barramento C.C. do conversor de frequência;  
 $I_f^\wedge$  – Estimativa da componente fundamental da corrente no banco de capacitores;  
 $I_h^\wedge$  – Estimativa da componente harmônica de ordem h da corrente no banco de capacitores;  
 $\theta_h$  – ângulo de fase da componente de ordem h da corrente no banco de capacitores;  
 $\theta_f$  – ângulo de fase da componente fundamental da corrente no banco de capacitores;  
 $\omega_h$  – frequência angular da componente de ordem h da corrente no banco de capacitores;  
 $I_{q_{h\_flt}}$  – Componente de eixo em quadratura da componente harmônica de ordem h filtrada;  
 $I_{q_{f\_flt}}$  – Componente de eixo em quadratura da componente fundamental filtrada;  
 $\wedge$  – símbolo usado para indicar grandezas estimadas;  
 $B_{(z)}$  – numerador da função de transferência do filtro passa-baixas (PB) discreto;  
 $A_{(z)}$  – denominador da função de transferência do filtro passa-baixas (PB) discreto;  
 $L^*$  – referência de indutância ativa a ser sintetizada pelo compensador;  
 $V_h(t)$  – tensão harmônica instantânea;  
 $d/dt$  – derivada em relação ao tempo;  
 $I_\alpha$  - componente  $\alpha$  no da referência de corrente para os algoritmos PLL – referencial estacionário;  
 $I_\beta$  - componente  $\beta$  no da referência de corrente para os algoritmos PLL – referencial estacionário;  
 $I_d$  – componente de eixo direto da corrente nos algoritmos PLL;  
 $I_q$  – componente de eixo direto da corrente nos algoritmos PLL;  
 $*$  – valores utilizados para grandezas de referência;  
 $\omega_{fbk}$  – frequência angular resultante da malha de realimentação dos algoritmos PLL;  
 $\omega_{ff}$  – componente *feed forward* de frequência utilizada nos algoritmos PLL;  
 $\tau$  – constante de tempo;  
 PI – controlador proporcional-integral

$K_p$  – ganho proporcional;  
 $K_i$  – ganho integral;  
 $I_{q5h}$  – componente de eixo em quadratura da corrente de 5ª ordem harmônica;  
 $I_{q7h^*}$  – componente de eixo em quadratura da corrente de 7ª ordem harmônica;  
 $L_{5h^*}$  – referência de indutância ativa para a 5ª ordem harmônica;  
 $L_{7h^*}$  – referência de indutância ativa para a 7ª ordem harmônica;  
 $v_f(t)$  – componente fundamental instantânea da tensão de compensação para controle do barramento C.C.;  
 $g(t)$  – condutância em função do tempo;  
 $v_1(t)$  – referência de tensão fundamental instantânea para controle do barramento C.C. do conversor;  
 $i_1(t)$  – corrente instantânea fundamental utilizada para controle do barramento C.C. do conversor;  
 $I_p$  – corrente de pico da componente fundamental da corrente;  
 $P$  – potência ativa;  
 $P_h$  – potência ativa com harmônicos;  
 $P(t)$  – potência ativa instantânea na saída do conversor;  
 $P_Q(t)$  – potência reativa instantânea;  
 $\Delta E(t)$  – Variação de energia armazenada no barramento C.C. do conversor;  
 $C$  – Capacitância do barramento C.C. do conversor;  
 $\Delta v_{cc}$  – *Ripple* de tensão no barramento C.C. do conversor;  
 $S_h$  – potência aparente associada à componente harmônica  $h$ ;  
 $I_{hrms'}$  – valor eficaz da corrente harmônica referida ao primário do transformador;  
 $V_{hrms'}$  – valor eficaz da tensão harmônica referida ao primário do transformador;  
 $H$  – campo magnético;  
 $dl$  – incremento diferencial em comprimento;  
 $dr$  – incremento diferencial na direção radial;  
 $dz$  – incremento diferencial na direção  $z$ ;  
 $\vec{B}$  – vetor densidade de fluxo magnético;  
 $\vec{dA}$  – vetor diferencial de área;  
 $B(r)$  – densidade de fluxo magnético em função do raio  $r$ ;  
 $\mu$  – permeabilidade magnética do meio;  
 $\mu_0$  – permeabilidade magnética do vácuo;

$\mu_r$  – permeabilidade magnética relativa do material utilizado para construção do transformador;  
 $\Phi$  – fluxo magnético;  
 $b$  – comprimento do núcleo do transformador coaxial;  
 $r_0$  – raio externo do núcleo do transformador coaxial;  
 $r_i$  – raio interno do núcleo do transformador coaxial;  
 $A_c$  – área da seção transversal do transformador coaxial;  
 $B(t)$  – densidade de fluxo instantânea no núcleo do transformador coaxial;  
 $B_f(t)$  – densidade de fluxo instantânea na frequência fundamental;  
 $B_h(t)$  – densidade de fluxo instantânea na frequência harmônica de ordem  $h$ ;  
 $B_{satmax}$  – máxima densidade de fluxo de saturação do material magnético utilizado no transformador coaxial;  
 $V_{h2\_rms}$  – tensão eficaz sintetizada na componente harmônica de ordem  $h$  referida ao secundário do transformador;  
 $V_{f2\_rms}$  – tensão eficaz sintetizada na frequência fundamental referida ao secundário do transformador;  
 $h$  – número inteiro (ordem harmônica);  
 $V_h$  – valor rms da componente de tensão harmônica  $h$ ;  
 $V_1$  – valor rms de tensão fundamental;  
 $I_h$  – valor rms da componente de corrente harmônica  $h$ ;  
 $I_1$  – valor rms de corrente fundamental;  
 $I_L$  – corrente de demanda máxima da carga na frequência fundamental;  
 $F_c$  – fator de crista;  
 $F_{HL}$  – fator de perdas harmônicas nos transformadores;  
 $fp$  – fator de potência;  
 $fp_{dist}$  – fator de potência de distorção;  
 $fp_{total}$  – fator de potência total;  
 $f_n$  – frequência de sintonia;  
 $Z_0$  – Impedância natural do circuito;  
 $\rho$  – resistividade do material condutor;  
 $L$  – Comprimento do condutor;  
 $A$  – Sessão do condutor.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1. Relevância

Os problemas de energia, manifestados nas grandezas elétricas de tensão, corrente ou frequência, que estejam em não conformidade com as normas vigentes ou que resultem em falha, ineficiência ou inoperância de sistemas ou equipamentos são objeto de análise da qualidade da energia elétrica. Neste contexto, o uso racional da energia introduz o importante conceito da eficiência energética.

A função dos sistemas de distribuição é fornecer energia com qualidade, ou seja, formas de onda de tensão e corrente o mais senoidais possível, pois somente as componentes fundamentais realizam trabalho útil. Contrariando este princípio, as componentes harmônicas surgem como subproduto das formas de onda, geradas por cargas não lineares (vide Anexo B), desnecessárias na realização de trabalho útil, causadoras de efeitos danosos aos sistemas elétricos e trabalho indesejável na forma de calor.

Considerando que em instalações de natureza predial comercial as fontes de harmônicas estão distribuídas no sistema, a tendência é monitorá-las e dimensioná-las, alocando filtros o mais próximo possível das mesmas e desta forma obter a minimização da parcela reativa na potência total circulante e relevantes percentuais em kW e kVAr de redução no consumo de energia. Entretanto este método muitas vezes se torna oneroso em função da quantidade de filtros a serem instalados e das dificuldades de se adequar a infraestrutura existente à solução. Este trabalho sugere a alocação do compensador série *SAHI* (*Serial Active Harmonic Impedance*) denominação atribuída à solução, no Capítulo 4, atuando como filtro série, próximo das maiores fontes de perdas elétricas causadas por harmônicas, reduzindo sobremaneira custos e tempo com instalação de equipamentos e intervenções em infraestruturas.

## 1.2. Motivação e objetivos

Para se adaptar à realidade atual do setor energético, onde problemas ambientais e de custos na geração de energia elétrica dificultam novos investimentos, há a necessidade de se obter o máximo de eficiência com a diminuição das perdas no sistema, isto é, deve-se melhorar a qualidade de energia do sistema. Uma forma de obter estes resultados é realizar o controle dos fluxos da potência ativa, reativa e harmônica.

Incentivado e inserido nos normativos e padrões nacionais e internacionais cada vez exigentes tanto nas áreas tecnológicas quanto ambientais, o segmento comercial se revela parcela de peso na balança da eficiência do sistema energético, contribuindo cada vez mais nos índices de distorções harmônicas das redes de distribuição. O perfil destas instalações apresenta alta densidade de cargas não lineares com desempenho harmônico relevante, causador de importantes perdas elétricas, em especial nas cablagens de maior extensão alimentadoras daquelas cargas e no secundário do transformador da subestação ou câmara transformadora, trançando, portanto um elevado potencial para melhoria da eficiência energética e boas perspectivas quanto à viabilidade econômica que precisam ser apreciadas caso a caso. Enfim, contribuir com a melhoria da qualidade de energia acrescentando alternativa tecnológica de eficiência energética que atenda ao segmento comercial no que tange às suas necessidades peculiares de infraestrutura e recursos econômicos menos disponíveis, com flexibilidade e custo competitivo, norteiam este estudo.

### 1.3. Contribuições

Destacam-se:

- ✓ Estudo dos conceitos e técnicas pertinentes à otimização da eficiência energética do ponto de vista da mitigação de harmônicos com vistas ao enquadramento aos níveis normativos vigentes nacionais e internacionais, redução de perdas elétricas e consequente economia de energia;
- ✓ Proposição de tecnologia inovadora simplificada para atuação como compensador série, inclusive em instalações comerciais existentes;
- ✓ Oferecimento de alternativa técnico-econômica viável ao mercado: nesse caso, às empresas de médio e grande porte atuantes no segmento comercial, cujos investimentos na gestão de ativos, em especial no parque elétrico interno de equipamentos e infraestrutura e de custos com energia, estes últimos representam parcela relevante nas despesas permanentes totais do empreendimento, ocupando entre a 3ª e 5ª posição. Destacam-se aquelas empresas que mantêm programa interno permanente em eficiência energética, cujo plano de ações contemple práticas convencionais ou não, tais como:
  - Planos de manutenções preventivas, preditivas e corretivas permanentes;
  - Programas de conscientização comportamental;
  - Modernização dos sistemas de iluminação e climatização;
  - Instalação e/ou modernização de bancos de capacitores;
  - Implementação de automação e supervisão no acionamento das principais cargas;
  - Reenquadramento tarifário nas Concessionárias;
  - Atuação no mercado livre de energia;
  - Projeto e instalação de subestações de energia próprias;
  - Melhoria dos projetos arquitetônicos.

Nessas situações de elevado comprometimento de gestão, embora as medidas acima estejam alinhadas com a constante evolução tecnológica e não estejam obrigatoriamente vinculadas à sequência descrita, seus resultados já não conseguem ser tão significativos, pois as metas anuais ou periódicas de economia de energia têm como referência o exercício anterior. O SAHI insere-se como solução no ajuste fino da eficiência energética.

- ✓ Oferecimento de alternativa técnico-econômica ao mercado de empresas de portes diversos do segmento comercial, inclusive pequenos, e que optem prioritariamente pela mitigação harmônica como prática inicial de eficiência energética. Nesses casos, a relação custo-benefício pode ser ainda mais favorável, em face da possibilidade da existência de índices de fluxos harmônicos mais elevados.
- ✓ Proposta da aplicação da filosofia de compensação harmônica distribuída. O estudo explora esse princípio, adotando metodologia que pressupõe a coordenação e seletividade dos níveis harmônicos da instalação, mediante estudo energético detalhado prévio. Dessa forma, busca os benefícios de se atenuarem os efeitos maléficos das DHT, o mais próximo possível das fontes ou centros de carga que geram maiores distorções, tirando o máximo proveito da redução das perdas por eles causadas, tanto nos meios alimentadores quanto nas próprias cargas a montante da instalação.
- ✓ Análise da viabilidade técnica e econômica do emprego da configuração alternativa proposta em [4].

### **Na visão das distribuidoras de energia**

Historicamente, as concessionárias de energia sempre estiveram alertas quanto à importância dos harmônicos na questão da qualidade da energia e da parcela negativa que esse parâmetro elétrico contribui para com a confiabilidade dos seus sistemas de transmissão e distribuição de energia. Motivados, principalmente, pelo comportamento das cargas industriais e comerciais de grande porte, os níveis de distorção harmônica vêm se incrementando com a participação de cargas anteriormente não relevantes como comerciais de médio e pequeno porte e residenciais, as quais tornam o desafio da confiabilidade do sistema maior, pois antecipam patamares de demanda potencializados por parcela reativa de potência inútil, ou seja, que não gera trabalho.

A demanda de energia ao sistema de distribuição tem apresentado características e necessidades diferenciadas na linha do tempo em face da crescente parcela de cargas não lineares presentes nas redes em suas três faixas de tensão: baixa, média e alta, evidenciando problemas de capacidade e estresse do sistema. Como as questões harmônicas continuam a se expandir, estratégias de mitigação são fundamentais para a promoção da eficiência do sis-

tema e qualidade de energia. Nesse sentido, visão evolutiva se faz necessária, aderente com tecnologias, normalizações (vide Capítulo 2, adiante), e aplicações inovadoras à rede de energia elétrica, ao tempo em que preserve os investimentos já realizados, aplicando ferramentas gerenciais nos moldes do “*smart grid*”<sup>1</sup> e gestão de ativos.

### **Na visão normativa e das recomendações**

O texto abaixo, reproduzido e extraído de [10], expressa a importância da matéria no contexto global das interações dos sistemas energéticos no que tange à qualidade da energia elétrica, alertando para a necessidade de atuação compartilhada de todos os intervenientes, na busca por melhores índices de eficiência nas diversas etapas do fluxo de energia.

“Os limites dessa recomendação representam uma responsabilidade compartilhada para o controle harmônico entre proprietários ou operadoras e os usuários. Os usuários produzem correntes harmônicas que fluem através dos sistemas dos proprietários ou operadoras, as quais introduzem harmônicos de tensão na tensão fornecida a outros usuários. O montante de distorção harmônica de tensão fornecida para outros usuários é função dos efeitos agregados da corrente harmônica produzida pelas cargas de todos os usuários e da impedância característica do sistema supridor.

Os limites de distorção harmônica de tensão são fornecidos para reduzir os potenciais efeitos negativos no usuário e no sistema de equipamentos. Para manter as tensões harmônicas nesses níveis, é necessário que:

- Todos os usuários limitem suas emissões de correntes harmônicas a valores razoáveis determinados de forma equitativa, com base na participação inerente que cada usuário tem no sistema de abastecimento e,
- Cada proprietário ou operadora do sistema providencie medidas para diminuir os níveis de distorção harmônica de tensão, modificando as características de impedância do sistema de abastecimento quando necessário.

A fim de permitir que o proprietário ou operadora controle a impedância característica do sistema para redução da distorção harmônica quando necessário, os usuários não poderiam adicionar equipamentos passivos que afetem a impedância característica de tal maneira que essa distorção seja aumentada [10]<sup>2</sup>”.

---

<sup>1</sup> *Smart grid*, ou rede inteligente, em termos gerais é a aplicação de tecnologia da informação para o sistema elétrico de potência (SEP), integrada aos sistemas de comunicação e infra estrutura de rede automatizada

<sup>2</sup> IEEE Std 519-2014, IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. Revisão da versão 1992, Aprovada em 27/03/2014.

#### **1.4. Proposta de trabalho - Metodologia**

- ✓ Contextualizar o assunto abordando a participação dos principais intervenientes na questão da qualidade da energia, entre eles os usuários, organismos normalizadores, operadores do sistema além das práticas e tecnologias.
- ✓ A pesquisa e resultados são alcançados através de modelagens e simulações matemáticas de sistemas de perdas e performance, com base em dados coletados em campo, ou seja, associados a estudo de caso atual.
- ✓ Utilizar o PTW (Power Tools for Windows) como ferramenta computacional para compilação e simulação dos dados colhidos em campo via analisador de qualidade de energia - Fluke 434.

## **1.5. Organização do texto**

Com o intuito de alcançar os objetivos pretendidos, incluído o presente capítulo introdutório, este trabalho estrutura-se da seguinte forma:

### **Capítulo 2 Harmônicos e a Eficiência Energética em Edificações Comerciais**

A proposta deste capítulo é contextualizar alguns dos temas nos quais o objeto destes estudos se embasa, fundamentando-se em pesquisas literárias, normativas, empíricas, acadêmica e de casos experimentais, todos correlacionados com a qualidade da energia em sistemas interdependentes e suas interferências na eficiência energética, no que tange à distorção harmônica.

### **Capítulo 3 Harmônicas - Considerações afins e Tecnologias Mitigadoras**

O objeto deste capítulo tem como foco as tecnologias de mitigações harmônicas mais usuais, passando por uma reflexão sobre suas causas em instalações comerciais, convergindo para uma descrição sucinta da tecnologia desenvolvida em [4].

### **Capítulo 4 A Compensação Série na Mitigação Harmônica em Instalações Comerciais. Uma abordagem prática**

Este capítulo busca comprovar a eficácia do sistema proposto no Capítulo 3, item 3.5- Compensador Série para Mitigação Harmônica Distribuída [4], associando conceitos e procedimentos teóricos e pragmáticos no trato efetivo da implantação do compensador série de impedância harmônica ativa em instalações prediais comerciais típicas.

### **Capítulo 5 Conclusões e propostas de continuidade**

O capítulo promove uma síntese das abordagens deste trabalho frisando seu objetivo, principais procedimentos adotados e resultados alcançados. Informa da continuidade das pesquisas em andamento e recomenda ações pertinentes diante das conclusões até então consolidadas. Também são apresentadas propostas de investigações futuras.

## CAPÍTULO 2

### HARMÔNICOS E A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES COMERCIAIS

#### 2.1. Introdução

A proposta deste capítulo é contextualizar o mais contemporânea e consistentemente possível alguns dos temas nos quais o objeto destes estudos se embasa, fundamentando-se em pesquisas literárias, normativas, empíricas, acadêmica e de casos experimentais, todos correlacionados com a qualidade da energia em sistemas interdependentes e suas interferências na eficiência energética, no que tange à distorção harmônica.

O estudo explora a eficiência de diversas alternativas tecnológicas na mitigação harmônica em edificações comerciais, ao identificar e reconhecer o incremento ao longo do tempo da evolução dos recursos tecnológicos e materiais empregados direta e indiretamente no desempenho das funções daquelas atividades majoritariamente comerciais e de prestação de serviços.

O aumento da produtividade advinda com tal modernização se deveu, em parte, à instalação de equipamentos geradores de distorções harmônicas no acervo dessas edificações, seja de aplicação direta como computadores ou indireta como iluminação, suprimento de energia ininterrupta para cargas essenciais, inversores de frequência e “*soft-starters*” no acionamento de sistemas de condicionamento de ar e elevadores.

O perfil energético não linear dessas edificações, na sua maioria de infraestrutura existente, tem se delineado ascendente e constante, traçando um cenário atual e futuro que tem exigido um grau de preocupação relevante nas áreas de gestão de ativos e engenharia de projetos, na medida em que entidades normativas e organismos desenvolvedores de padrões de alto nível e boas práticas se empenham na implementação de padrões e normas regulamentares mais rigorosos no que tange à eficiência energética e à consequente sustentabilidade operacional e conservação do meio ambiente.

## 2.2. Recomendações normativas

### 2.2.1. O PRODIST

(Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional) teve sua criação regulamentada no Brasil ao final de 2008, na ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica com a função de normalizar e estabelecer padrões para as atividades relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica. Contém nove módulos registrados na versão 5, correspondente à resolução normativa nº 302/2014, com vigência em 01/01/2015.

Dedica em seu Módulo 8, exclusividade para a questão da Qualidade da Energia, dividindo em duas abordagens seu objetivo:

➤ Qualidade do produto

“define a terminologia, caracteriza os fenômenos, parâmetros e valores de referência relativos à conformidade de tensão em regime permanente e às perturbações na forma de onda de tensão, estabelecendo mecanismos que possibilitem à ANEEL fixar padrões para os indicadores de QEE” [11]<sup>3</sup>.

➤ Qualidade dos serviços

“estabelece a metodologia para apuração dos indicadores de continuidade e dos tempos de atendimento a ocorrências emergenciais, definindo padrões e responsabilidades” [11].

Tem abrangência sobre todos os intervenientes do sistema elétrico brasileiro, ou seja:

- a) consumidores com instalações conectadas em qualquer classe de tensão de distribuição;
- b) produtores de energia;
- c) distribuidoras;
- d) agentes importadores ou exportadores de energia elétrica;
- e) transmissoras detentoras de Demais Instalações de Transmissão – DIT;
- f) Operador Nacional do Sistema – ONS.

---

<sup>3</sup> ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – Prodist. Módulo 8 – Qualidade da energia elétrica. Resolução Normativa N°. 612/2014. Disponível em: [http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Modulo8\\_Revisão\\_5.pdf](http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Modulo8_Revisão_5.pdf).

Estabelece na sessão Qualidade do Produto, em seu item 4 - “Harmônicos metodologias de medição”, instrumentação e valores de referência a serem atribuídos aos índices de distorção harmônica para tensão total e individual, reproduzidos **nas tabelas 2.1 e 2.2 abaixo**:

Tabela 2.1 - Valores globais de referência das distorções harmônicas totais (em porcentagem da tensão fundamental) [11].

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

Tabela 2.2 - Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em porcentagem da tensão fundamental) [11].

<b>Ordem Harmônica</b>	<b>Distorção Harmônica Individual de Tensão [%]</b>				
	$V_n \leq 1 kV$	$1 kV < V_n \leq 13,8 kV$	$13,8 kV < V_n \leq 69 kV$	$69 kV < V_n < 230 kV$	
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

O submódulo 2.8 do documento “Procedimentos de Rede” [32] <sup>4</sup> e esse PRODIST são complementares entre si, merecendo consulta para melhores esclarecimentos.

<sup>4</sup> ONS, "Gerenciamento dos Indicadores de Desempenho da Rede Básica e de seus Componentes, Procedimentos de Rede - sub-módulo 2.8", *revisão 1.0, resolução normativa n°. 372/09*, Operador Nacional do Sistema Elétrico, 05/08/2009, [www.ons.org.br](http://www.ons.org.br).

## **2.2.2. IEC**

A IEC (International Electrotechnical Commission) é uma organização não governamental de normatização internacional, sem fins lucrativos, que elabora e publica normas internacionais para tecnologias elétricas, eletrônicas e temas afins. Foi fundado em 1906, conta com mais de 130 países-membros e afiliados cujos países membros adotam suas normas como padrão nacional. Sediado em Genebra - Suíça desde 1948, suas normas têm maior aplicação na Europa e outros países, entre eles o Brasil. Tem como objeto promover a cooperação internacional em todas as questões que envolvam padronização nos campos elétricos e eletrônicos. Com essa finalidade e em adição a outras atividades, o IEC publica normas e padrões internacionais.

### **2.2.2.1. IEC 61000-2-2 / Edição 2.0 / 28-03-2002 Electromagnetic Compatibility (EMC)**

Essa norma preocupa-se com perturbações conduzidas na faixa de frequência de 0 kHz a 9 kHz, estendendo-se até 148,5 kHz, especificamente, para a sinalização de redes. Fornece os níveis de compatibilidade para sistemas de distribuição pública em baixa tensão de até 420V monofásico ou 690V trifásico a uma frequência nominal de 50 Hz ou 60 Hz. Os níveis de compatibilidade são especificados para perturbações eletromagnéticas dos tipos que podem ser esperados em sistemas públicos de fornecimento de energia em baixa tensão. Esse padrão define basicamente os critérios de projeto para os fabricantes de equipamentos de forma a garantir características mínimas de imunidade.

### **2.2.2.2. IEC 61000-2-4 / Edição 2.0 / 26-06-2002 Electromagnetic Compatibility (EMC)**

Essa norma trata das perturbações conduzidas na faixa de frequência de 0 kHz a 9 kHz . Fornece níveis de compatibilidade para os sistemas de distribuição de energia industrial e privado em tensão nominal acima de 35 kV e frequência nominal de 50Hz e 60 Hz, excluindo redes para embarcações, aeronaves, plataformas marítimas e ferrovias.

### 2.2.2.3. IEC 61000-3-2 Electromagnetic Compatibility (EMC)

Essa norma, egressa da IEC 1000-3-2 1995, define os limites de injeção de corrente harmônica em sistemas de energia elétrica, especificando seus limites máximos para cada ordem harmônica gerada por equipamentos que são testados sob condições específicas, e demandam até 16A por fase em baixa tensão. Enquadra os equipamentos eletroeletrônicos em quatro classes: A, B, C e D.

Classe A → abrange os equipamentos de alimentação trifásica equilibrada, de uso residencial (excluídos aqueles identificados como classe D), ferramentas (excluídas as portáteis), “*dimmers*” para lâmpadas incandescentes e equipamentos de áudio [35]. Incluem-se aqui todos os equipamentos não classificados em outras categorias. Os limites de DHTi homologados nessa classe são relacionados na tabela 2.3, extraídos de [35].

Tabela 2.3 - Limites de emissão de correntes para equipamentos Classe A

Ordem harmônica n	Máxima corrente harmônica permitida A
<b>Harmônicas ímpares</b>	
3	2,30
5	1,14
7	0,77
9	0,40
11	0,33
13	0,21
15 ≤ n ≤ 39	0,15 x 15/n
<b>Harmônicas pares</b>	
2	1,08
4	0,43
6	0,30
8 ≤ n ≤ 40	0,23 x 8/n

Classe B → abrange ferramentas portáteis e equipamentos de solda de uso não profissional, cujos limites máximos de DHTi são os mesmos da tabela classe A multiplicados por 1,5 [35].

Classe C → abrange os equipamentos aplicados à iluminação do tipo incandescentes, a descarga, *Leds*, *Dimmers* exceto aplicados a lâmpadas incandescentes [35]. A tabela 2.4, extraída de [35], expressa os limites em DHTi para equipamentos com potência ativa de entrada acima de 25 W.

Tabela 2.4 - Limites de emissão de correntes para equipamentos Classe C

Ordem harmônica n	Máxima corrente harmônica permitida expressa em percentagem da frequência fundamental %
2	2
3	$30 \times \lambda^*$
5	10
7	7
9	5
11 $\leq n \leq 39$ (somente harmônicas ímpares)	3

\*  $\lambda$  é o fator de potência do circuito

Classe D → abrange os equipamentos com potência menor ou igual a 600 W, detalhados no item 6.2.2 da IEC 61000-3-2. Incluem-se ali computadores pessoais, monitores e tvs. Os limites de DHTi homologados nessa classe são relacionados na tabela 2.5 extraída de [35].

Tabela 2.5 - Limites de emissão de correntes para equipamentos Classe D

Ordem harmônica n	Máxima corrente harmônica permitida por watt mA/W	Máxima corrente harmônica permitida A
3	3,4	2,30
5	1,9	1,14
7	1,0	0,77
9	0,5	0,40
11	0,35	0,33
13 $\leq n \leq 39$ (somente harmônicas ímpares)	$3,85/n$	Ver tabela para classe A

#### 2.2.2.4. IEC 61000-3-4 / Edição 1.0 / 30-10-1998 - Electromagnetic Compatibility (EMC)

As recomendações desse relatório técnico são aplicáveis a equipamentos elétricos e eletrônicos individuais. Determina os limites de emissão de corrente harmônica para corrente de entrada nominal superior a 16 A por fase e destinado a ser ligado a redes de distribuição pública de baixa tensão, limitadas a 240 V monofásico, dois ou três fios e tensão nominal até 600 V trifásico, três ou quatro fios, frequência nominal de 50 Hz ou 60 Hz. Esse documento não deve ser considerado como um padrão internacional [36].

**2.2.2.5. IEC 61000-3-6 / Edição 2.0 / 13-10-2008 Avaliação dos limites de distorção para conexão de instalações em sistemas de energia de MT, AT, EAT.**

Tabela 2.6 - Níveis de tensão harmônica

Harmônicas ímpares não múltiplas de 3			Harmônicas ímpares múltiplas de 3			Harmônicas pares		
Ordem harmônica h	Tensão harmônica %		Ordem harmônica h	Tensão harmônica %		Ordem harmônica h	Tensão harmônica %	
	MV	HV-EHV		MV	HV-EHV		MV	HV-EHV
5	5	2	3	4	2	2	1.8	1.4
7	4	2	9	1.2	1	4	1	0.8
11	3	1.5	15	0.3	0.3	6	0.5	0.4
13	2.5	1.5	21	0.2	0.2	8	0.5	0.4
$17 \leq h \leq 49$	$1.9 \cdot \frac{17}{h} - 0.2$	$1.2 \cdot \frac{17}{h}$	$21 < h \leq 45$	0.2	0.2	$10 \leq h \leq 50$	$0.25 \cdot \frac{10}{h} + 0.22$	$0.19 \cdot \frac{10}{h} + 0.16$

Essa norma fornece orientações para conexão de cargas ou instalações com características harmônicas distorcidas à rede de distribuição pública em MT, AT e EAT. O objetivo principal é fornecer orientação aos operadores do sistema ou proprietários em práticas de engenharia, facilitando a prestação de serviço de qualidade adequada a todos os clientes conectados. Ao abordar instalações, esse documento não se destina a substituir padrões de emissão de limites para equipamentos.

**2.2.2.6. IEC 61000-4-30 / Edição 2.0 / 13-10-2008 - Métodos de medidas em Qualidade de energia**

Conforme previsto em [4], essa norma foi editada pelo comitê CB-003 Eletricidade da ABNT, estando vigente no Brasil desde 03/03/2011, sob o código ABNT NBR IEC 61000-4-30 2011. Define os métodos de medição e interpretação dos resultados de qualidade de energia em 50/60 Hz. Os métodos de medição são descritos para cada parâmetro relevante em termos de resultados confiáveis, independentemente da implementação do método. Medição de parâmetros de qualidade de energia abrangida por essa norma está limitada a fenômenos de tensão, entre eles: frequência, magnitude, cintilação, afundamentos e elevações, interrupções, transientes, desequilíbrio, harmônicas e inter-harmônicas, rede de sinalização sobre a tensão de alimentação e mudanças rápidas de tensão. Oferece métodos de medição e requisitos de desempenho adequados, mas não estabelece limites.

### **2.2.3. IEEE**

O IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) é uma organização internacional sem fins lucrativos voltada para o aperfeiçoamento da tecnologia relativa à eletricidade, se autodefinindo como uma organização científica e educacional, direcionada para o avanço da teoria e prática das engenharias elétrica, eletrônica, de comunicações e de computação, assim como ciência da computação e outras engenharias e ciências relacionadas. Produto da fusão da AIEE (American Institute of Electrical Engineers) e a IRE (Institute of Radio Engineers), ambas seculares, em 1963. Possui mais de 360.000 membros em 175 países, tornando-se o maior divulgador de jornais científicos, além de importante desenvolvedor de normas técnicas afins.

#### **2.2.3.1. IEEE 519 (2014) - Revisão IEEE Std 1992**

IEEE Recomendações para Prática e Requisitos para Controle de Harmônicos em Sistemas Elétricos de Potência Aprovada em 27/03/2014

Essa recomendação estabelece limites para os parâmetros elétricos de tensão e corrente relacionados à qualidade da energia elétrica em regime permanente; entretanto, condições transitórias que excedam essas limitações podem ser encontradas.

A aplicabilidade desses limites no sistema ocorre exclusivamente em um determinado ponto de conexão comum (PCC), descrito como a interface entre fontes e cargas, ou seja, entre o proprietário do sistema ou operadora e o usuário. Com esse critério, tais limites são destinados a projetos de sistemas elétricos que incluem cargas lineares e não lineares, descrevendo as formas de onda de tensão e corrente admissíveis e seus limites de distorção para as condições de pior caso.

Pelo fato de atribuir a gestão harmônica do sistema de energia tanto ao usuário quanto à operadora, os limites de distorção harmônica são definidos e recomendados para ambas as grandezas elétricas: tensão e corrente.

A norma considera que, ao limitar os índices de injeções de correntes harmônicas pelos usuários, a distorção de tensão possa ser mantida abaixo dos níveis censuráveis, entretanto recomenda que para os casos em que tais medidas não alcancem bons resultados de distorção de tensão, operadoras e usuários devem adotar medidas para modificar as características do sistema.

Os limites ora recomendados, tabelas 2.7 e 2.8 extraídas de [10], aplicam-se apenas ao ponto de acoplamento comum e não devem ser aplicados a qualquer peça individual de equipamentos ou em locais dentro de instalações do usuário.

Tabela 2.7 - Índices admissíveis para distorções harmônicas de tensão por faixas em BT, MT, AT e EAT.

Tensão V no barramento no PAC	Harmônico individual (%)	Distorção harmônica total THD (%)
$V \leq 1.0 \text{ kV}$	5.0	8.0
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3.0	5.0
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$161 \text{ kV} < V$	1.0	1.5 <sup>a</sup>

Todos os valores da Tabela 2.7, são em percentual da frequência nominal da tensão no PAC. Aplicam-se a tensões harmônicas cujas frequências são múltiplos inteiros da frequência da fonte de alimentação.

Tabela 2.8 - Índices admissíveis para distorções harmônicas de corrente

Máxima distorção harmônica de corrente em percentual de IL						
Ordem harmônica individual ( harmônicas ímpares) <sup>a, b</sup>						
$I_{SC}/I_L$	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	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

Os índices constantes da tabela 2.8 aplicam-se a correntes harmônicas cujas frequências são múltiplos inteiros da frequência de alimentação. Todos os valores devem ser em percentagem da corrente máxima demandada, IL. Esse valor de corrente é estabelecido no PCC e deve ser tomado como a soma das correntes correspondentes à demanda máxima durante cada um dos doze meses anteriores, dividido por 12.

#### **2.2.4. Comentários IEEE 519 e IEC 61000-3-6**

Tanto a IEEE 519 quanto a IEC 61000-3-6 apresentam-se por versões recém-revisadas tecnicamente sendo oportuno avaliar sucintamente suas similaridades e divergências, incluindo os limites recomendados em cada um e os processos pelos quais a distribuição equitativa das emissões é alcançada. Esta análise tem como base o documento [37] <sup>5</sup>.

Nos dois padrões, o objetivo do controle harmônico é garantir a qualidade da tensão, entretanto a abordagem à questão da produção de corrente harmônica pelo usuário é diferente.

A premissa básica dos limites harmônicos do IEEE é compartilhar a responsabilidade entre a operadora e o cliente. A todos os clientes é concedida parte da capacidade de absorver harmônicos do sistema. Persistindo os problemas de distorção de tensão, atribui responsabilidades tanto ao usuário quanto à operadora em ações conjuntas de ajustes.

Para o IEC, a abordagem baseia-se na atribuição de limites de corrente em consequência das metas de qualidade da tensão as quais são concebidas para garantir (na medida do possível) que, se todos os usuários estão dentro de seus limites individuais, consequentemente o nível de problemas de qualidade de tensão no sistema não existirá. Os limites de tensão e correntes definidos pelos IEEE e tensão definidos pelo IEC constam das tabelas 2.7, 2.8 e 2.6 respectivamente.

Outras áreas de importância inerente como harmônicas pares, características não harmônicas, tempo de varredura harmônica, inter-harmônicas podem ser mais bem esclarecidos nas próprias recomendações.

#### **2.3. O cenário mercadológico mundial do filtro harmônico, segundo [39] <sup>6</sup>**

O relatório de pesquisa analisa a demanda por esta tecnologia no período de 2013-2020, segmentando o mercado nas grandes regiões geográficas, e suas tendências atuais, ou seja: América do Norte, Ásia-Pacífico, Europa e o resto do mundo, convergindo para a opinião

---

<sup>5</sup> S. M. Halpin, "Comparison of IEEE and IEC Harmonic Standards," Power Engineering Society General Meeting, 2005. IEEE

<sup>6</sup> World Harmonic Filter Market - Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends and Forecast, 2013 - 2019; By - Transparency Market Research

de que a crescente importância da qualidade de energia e necessidade de aumentar a eficiência energética tem provocado o crescimento do mercado de filtros de harmônicas.

O crescimento da demanda proveniente da Ásia-Pacífico, América Latina e resto do mundo estão impulsionando o mercado global de filtros de harmônicas, embora a hegemonia neste consumo ainda seja da América do Norte. Os setores mais representativos são: automotivo, industrial, óleo e gás, TI e Data Center, todos objetivando alcançar melhores níveis de qualidade de energia, em especial as áreas de processamento de dados, cujos principais participantes industriais no fornecimento de equipamentos tais como UPS estático e inversores de frequência, incluem ABB, Schneider Electric SE, Danfoss Group, Schaffner Holding AG, Emerson Network Power e A Eaton Corporation.

O documento ressalta que:

“as regulamentações governamentais e penalidades rigorosas impostas pelas concessionárias deverão ter impacto positivo sobre a demanda por filtros de harmônicas. No entanto, a falta de consciência sobre os benefícios de garantir níveis de qualidade de energia em diferentes setores tem inibido um pouco o crescimento da instalação de filtros harmônicos” [39].

O ano de 2013 foi dominado por filtros harmônicos passivos representando mais de 75% do mercado global de filtro harmônico e segundo [39] este domínio deve continuar durante todo o período de 2014-2020. Existe a expectativa de que a tecnologia ativa ultrapasse a passiva, cuja demanda pode ser atribuída:

- à relativa maior capacidade atenuante harmônica;
- excelentes propriedades de corrente de pico e;
- reação extremamente rápida às variações da cargas harmônicas.

Segmentados por faixa de tensão (em consonância com as premissas IEEE), o documento registra que em 2013, os filtros de baixa tensão foram os maiores contribuintes para o mercado de filtro harmônico, aplicados principalmente no segmento industrial. No entanto, para o período de análise, espera-se:

- crescimento relativamente elevado na participação no mercado dos filtros ativos de média tensão, atribuído a um custo mais baixo da tecnologia em média tensão e as suas vantagens em termos de eficiência;

- que o segmento industrial deverá manter-se dominante devido à crescente procura de eficiência energética em indústrias pesadas como processamento de metal, geração de energia, cimento e mineração. No entanto, o segmento de TI e Data Center devem ultrapassá-lo ao longo do período de previsão.

## **2.4. A viabilidade da compensação harmônica em edificações comerciais**

### **2.4.1. A mitigação harmônica distribuída**

A distorção harmônica é mais severa nos terminais das cargas não lineares, mas tende a ser diluída quando combinada com cargas lineares em pontos a montante dos sistemas elétricos [1]. Este fato é reconhecido pela literatura e pelas práticas de projeto e campo e se torna um dos pontos importantes que sustentam a filosofia da mitigação harmônica distribuída. Este conceito quando associado ao comportamento do fluxo harmônico e as perdas elétricas por ele causadas em instalações tipicamente comerciais, carregadas por cargas não lineares, se fortalece, pois cerca de 50% destas perdas se concentram nos condutores que suprem tais cargas e outros 50% nos transformadores abaixadores, certamente esta distribuição é dependente do fator de carga dos circuitos e da impedância de cada trecho e do próprio transformador, não podendo ser generalizada.

O conceito de compensação distribuída é similar ao apresentado em [6] em que a aplicação de filtros ativos *shunt* ou em derivação é proposta na mitigação distribuída de harmônicas, mas, a principal diferença dessa tecnologia ora ratificada [4] está no uso de ambas às situações: mitigações *shunt* e série.

Em [7], [8] e [9], o conceito de impedância distribuída é abordado, mas com foco no controle de fluxo de potência na componente fundamental da frequência. Neste estudo, o foco está na atuação junto às componentes harmônicas ímpares.

A figura 2.1 ilustra um modelo da aplicação distribuída série onde se observa a atuação de um compensador em série com um banco de capacitores situação (1) e com cargas não lineares na situação (2).

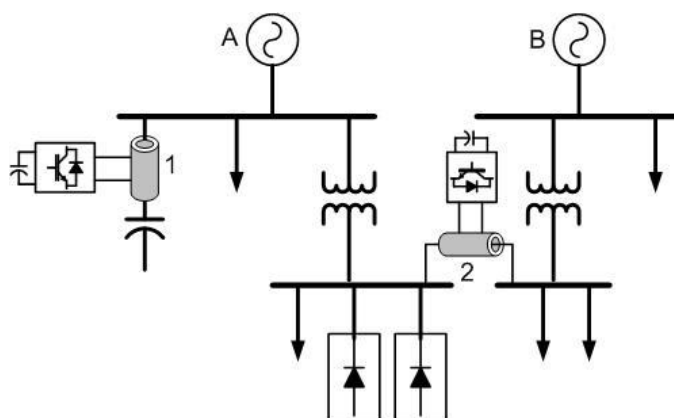


Figura 2.1 - Ilustração do conceito da mitigação harmônica distribuída [4].

Os importantes trabalhos a seguir descritos procuram contextualizar os vários caminhos disponíveis na mitigação harmônica em edificações comerciais prediais, do ponto de vista técnico-econômico, para os quais se recomenda observação detalhada como suporte às decisões em eventuais investimentos. Ressalta-se, aqui, que as medidas citadas são todas corretivas e não atuam nas causas dos problemas, mas nas suas consequências, ou seja, na possibilidade de as cargas em questão passarem a apresentar desempenho mais próximo da linearidade; a implementação de ações mitigadoras, principalmente voltadas para as ordens múltiplas de três, passarão a ter menor representatividade.

#### 2.4.2. Referência ao documento [1] <sup>7</sup>

A evolução do perfil das cargas que passaram a ocupar com maior densidade os edifícios comerciais nas últimas duas décadas passou a atender a uma demanda cada vez maior por produtividade, tendo como carros-chefes as inovadoras tecnologias em informática, telecomunicações, iluminação (reatores eletrônicos), outros equipamentos eletrônicos e acionamentos de máquinas elétricas com controle de velocidade, sendo os quatro primeiros supridos por fontes chaveadas de energia, e nas suas maiorias, monofásicas. Diante desse

<sup>7</sup> *Costs and Benefits of Harmonic Current Reduction for Switch-Mode Power Supplies in a Commercial Office Building.* Thomas S. Key, Senior Member, IEEE, and Jih-Sheng Lai, Senior Member, IEEE, September/October 1996.

cenário, os autores desenvolvem análise das perdas de energia produzidas nos sistemas de distribuição (cablagens e transformadores - enrolamentos elétricos), associadas ao fluxo harmônico gerado por aquelas cargas de concepção fortemente não linear; nesse contexto, os custos com energia são quantificados.

A análise mostra que a produção de perdas em cabos e enrolamentos relacionadas à alimentação de cargas eletrônicas não lineares pode ser mais que o dobro que as perdas geradas por cargas lineares equivalentes. Perdas de energia relacionadas à corrente, como  $I^2R$  nos condutores, e correntes parasitas de Foucault ( $I^2 h^2$ ), nos transformadores, são consideradas, e nessa abordagem também os efeitos pelicular e de proximidade nos cabos. O custo das perdas em kW é comparado com o os ganhos econômicos obtidos com a redução harmônica conseguida com a da melhoria do projeto executivo das fontes próprias das cargas. Vide tabela 2.11 e diagrama da figura 2.3.

Os resultados mostram que um circuito de eliminação harmônica do tipo ativo, embutido no equipamento eletrônico de fonte chaveada, oferece custo-benefício com base em considerações de perda de energia por si só [1].

A fim avaliar as perdas de energia e os impactos associados aos fluxos harmônicos e de corrente reativa, os autores desenvolvem um modelo de distribuição elétrica tipicamente comercial, ilustrado na figura 2.2, originado do IEEE *Emerald Book* [30].

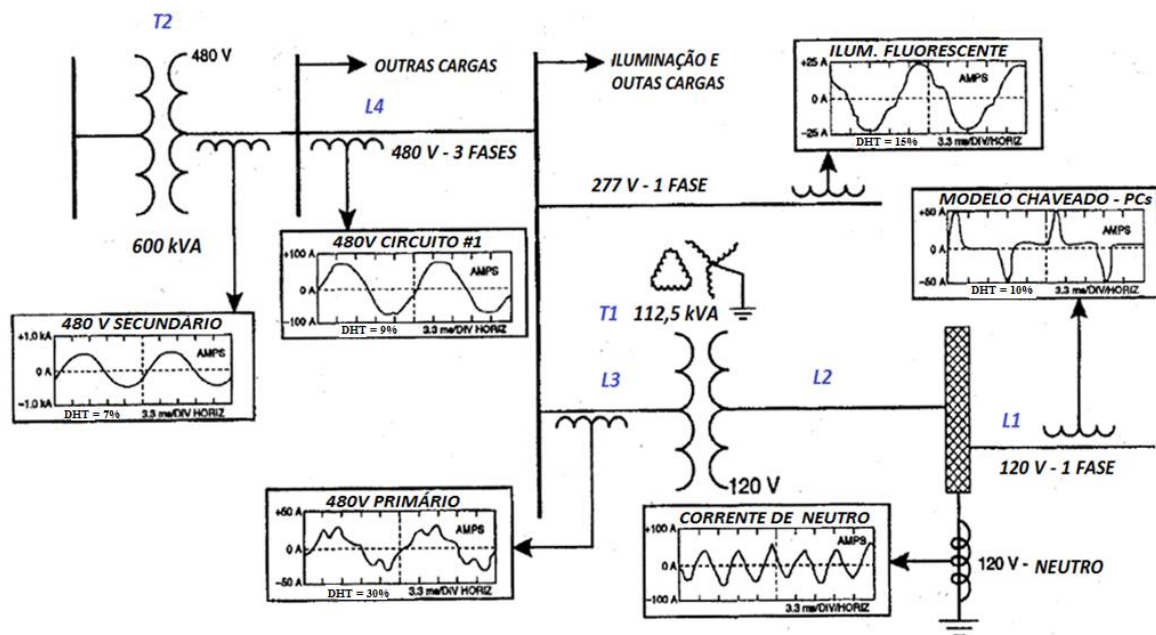


Figura 2.2 - Correntes harmônicas de uma edificação comercial típica (IEEE Standard 1100) [1].

“Observa-se que a instalação apresenta severos índices de distorção harmônica de corrente (104%) nos terminais das cargas não lineares os quais tendem a se diluir parcialmente ao se combinarem com formas de onda provenientes de cargas lineares localizadas a montante” [1].

O modelo adotado na figura 2.2, para a edificação comercial típica, é composto pelas seguintes cargas:

- ✓ Computadores pessoais: 90 kW, 240 máquinas em 120 circuitos, além de outros equipamentos eletrônicos de escritório;
- ✓ Iluminação: fluorescente convencional, reatores magnéticos 277V;
- ✓ Transformador: abaixador 480V/120/2018 V, 112,5 kVA;
- ✓ Regime de funcionamento: 12h/365 dias/ano.

Os autores ratificam empiricamente que a interferência harmônica impacta menos nos equipamentos eletrônicos que nos condutores neutros e transformadores, os quais, geralmente, são sobrecarregados, além de causar perdas adicionais e redução do fator de potência para o sistema elétrico como um todo, ficando esse panorama evidenciado com a tendência ainda maior para o carregamento do sistema em kVA por metro quadrado.

Concluídos os estudos de perdas por segmento de cabos de alimentação L<sub>1</sub>, L<sub>2</sub>, L<sub>3</sub>, L<sub>4</sub> (Figura 2.2) e no transformador T<sub>1</sub>, os resultados são consolidados na tabela 2.9, a seguir:

Tabela 2.9 - Resumo das perdas relacionadas com harmônicas e os custos por ano [1].

	THDi (%)	Comprimento do circuito (pés)	Perdas Harmônicas (W)	Custos Harmônicas/ano
Cabo L1	100%	200	1320	\$578
Cabo L2	100%	50	712	\$310
Transformador T1	THD: 30% primário 100% secundário	=====	2747	\$1.203
Cabo L3	30%	150	23	\$10
<b>Total</b>			<b>4802</b>	<b>\$2.101</b>

Abstrai-se da tabela 2.9 o desempenho do cabo L<sub>4</sub> e do transformador T<sub>2</sub>, pois se ratificam no artigo as experiências de campo, quando os autores registram o menor impacto do fluxo harmônico no cabo L<sub>4</sub>, cerca de 9% DHTi, citando como referência Mansoon [31], visto que condições tais como amortecimento devido à integração com cargas lineares e impe-

dância do sistema crescente no sentido da fonte auxiliam na sua atenuação, podendo ocorrer exceções nos casos de ressonância, ampliando a taxa de distorção harmônica [1].

Por outro lado, ressalta-se a sobrecarga revelada na análise do comportamento do transformador, causada pelo efeito da distorção harmônica, ou seja, dos seus 112 kVA nominais. A demanda total das cargas está em 55%, assumindo condições trifásicas balanceadas, entretanto as perdas harmônicas adicionais dobram o valor previsto devido apenas à componente fundamental. A 100% de DHTi, as perdas no cobre se duplicam, e as perdas devido á correntes parasitas se multiplicam em 17 vezes. Conseqüentemente, o transformador torna-se sobrecarregado por uma demanda de apenas 60 kW [1]. A tabela 2.10 resume os números.

Tabela 2.10 - Desempenho do transformador: Perdas X Custos [1].

<b>Carga = 60 kW 3 Fases / 112 kVA</b>	<b>Perdas (W)</b>	<b>Custo/Ano</b>
Perdas no cobre	2986	\$1.308
Perdas correntes parasitas (PEC)	1336	\$585
Perdas totais na carga (PLL)	4322	\$1.893
Perdas base na carga = $1,05 \times I^2R$	1575	\$690
Excesso = PLL - $1,05 \times I^2R$	2747	\$1203

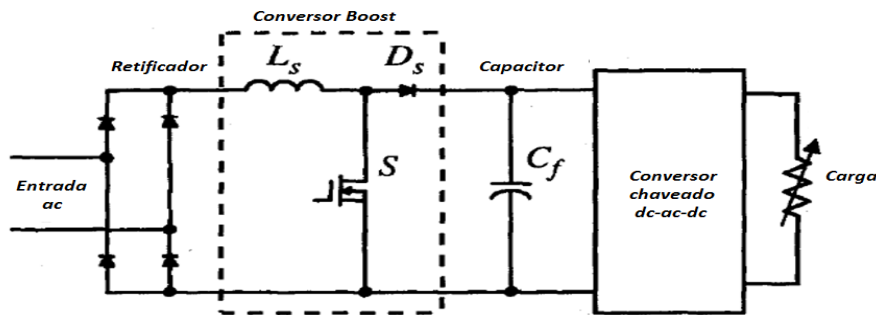


Figura 2.3 - Proposta de fonte com conversor *boost*.

No entendimento dos autores, a opção de mitigação harmônica mais efetiva ocorre na sua origem. A questão seria a viabilidade e custo. Nesse sentido e no intuito de alinhamento com as recomendações da IEC1000-3-2 à época, relacionam alternativas de limitação harmônica “*built-in*” nas fontes chaveadas, entre elas: filtro indutor série e o conversor “*boost*”, inserido entre o retificador e o conversor chaveado C.C.-C.A.- C.C., com correção

de fator de potência, ilustrado no diagrama da figura 2.3 acima; essa última seria a opção dos autores, evidenciando os aspectos vantajosos em relação aos filtros passivos: menor tamanho e desempenho superior. Entretanto reconhecem que “infelizmente, é difícil vender fontes de alimentação com correção de fator de potência ativa devido ao esperado aumento do custo e menor confiabilidade relacionada aos componentes adicionais” [1].

Cientes dos critérios preponderantes na obtenção do melhor custo-benefício que favoreça a mitigação harmônica em prédios comerciais, entre eles, a determinação da melhor localização para instalação do filtro ou compensador e o melhor modelo a ser aplicado, os autores resumizam, na tabela 2.11 abaixo, a potencial economia de energia em diferentes localizações do diagrama elétrico em questão, destacando-se como opção mais viável aquela mais próxima da fonte harmônica, alcançando 8,0 % de economia em kVA.

“Também mostra que as perdas adicionais resultantes do carregamento harmônico somam mais de 8 kW, ou seja, mais de 68 kW será exigido na entrada de serviço para atender a uma carga de 60 kW. As perdas harmônicas relacionadas com o aumento total de perdas esperadas na fiação do prédio totalizam 250%, de 3.346W para 8.148W [2]. Compensação de harmônicos, perto da entrada de serviço tem muito pouco valor, talvez \$10/ano, enquanto que a compensação perto da carga eletrônica tem um significativo efeito, economizando \$ 2101/ano. Esse é o principal benefício de uma fonte de energia livre de harmônicas” [1].

Tabela 2.11 - Potencial economia de energia em diferentes localizações [1].

<b>Opções de localização do equipamento de mitigação harmônica</b>	<b>Montante do primário do transformador</b>	<b>Secundário do transformador</b>	<b>Centro de carga ou painel parcial</b>	<b>Na carga ou dentro do equipamento</b>
Perdas totais sem compensação (w)	8148	8148	8148	8148
Perdas totais com compensação (w)	8125	5378	4666	3346
Perdas totais com compensação (%) / 60 kVA	13,54%	8,96%	7,78%	5,58%
Economia em L1 a 200 pés (W)	0	0	0	1320
Economia em L2 a 50 pés (W)	0	0	712	712
Economia em T1 112 kVA (W)	0	2747	2747	2747
Economia em L3 a 200 pés (W)	23	23	23	23
Economia total 60 kVA (W)	23	2770	3482	4802
% Economizado / 60 kVA	0,04%	4,62%	5,80%	8,00%
<b>\$ Economizados / ano</b>	<b>\$10</b>	<b>\$1213</b>	<b>\$1523</b>	<b>\$2101</b>

### 2.4.2.1 Comentários:

O estudo de caso comprova a potencialidade técnica da mitigação harmônica em instalações comerciais típicas, quantificando e qualificando cargas e fontes de energia em modelo estrutural. Atesta a viabilidade econômica com base em alternativa tecnológica única, embora uma série de opções de filtragem harmônica já estivessem disponíveis comercialmente e propõe a fonte chaveada de energia com recursos de mitigação harmônica interna. Dessa forma, justifica a filosofia da redução do fluxo harmônico de forma distribuída, atuando diretamente nas cargas geradoras das mesmas.

Os trabalhos desenvolvem-se focados na relação das perdas causadas por distorções harmônicas (excluída a contribuição das perdas devido a componente fundamental) e a economia em kW apurada, identificando que tais distorções se devem a cargas eletrônicas de escritório adensadas e distribuídas na fiação do prédio: cerca de 50% nos cabos e 50% no transformador abaixador 480/120-208V. O resultado da análise de custo-benefício aponta retorno do investimento no prazo de 3,1 anos.

### 2.4.3. Referência ao documento [2] <sup>8</sup>

Reconhecido em [3] como um dos documentos tidos como "autoridade no assunto", recém-publicado, ele explora em suas pesquisas de cunho experimental e quantitativo, a eficiência de equipamentos tecnologicamente diversos na mitigação harmônica, motivado pelo constante incremento das perdas elétricas nas instalações das modernas edificações comerciais e seus custos para os usuários finais.

Utilizando resultados de [1] e [25], pesquisas são avaliadas e resultados obtidos através da inserção de filtros harmônicos monofásicos e trifásicos, passivos e ativos, distribuídos em dois diferentes locais do sistema elétrico comercial típico, onde as grandezas elétricas de corrente e tensão são submetidos a cargas lineares e não lineares, perfazendo 50% de carregamento para cada transformador [2], conforme ilustrado na Figura 2.4, com auxílio de modelagem matemática computacional. A instalação objeto dos estudos representa parte

---

<sup>8</sup> *Effectiveness of Harmonic Mitigation Equipment for Commercial Office Buildings* Jih-Sheng Lai, Senior Member, IEEE, and Thomas S. Key, Senior Member, IEEE, July/August 1997.

do sistema e caracteriza-se por suprir cargas monofásicas de 120V/500W arranjadas em topologia estrela e distribuídas a jusante do centro de cargas que demanda cerca de 60 kW, assumindo-se um carregamento aproximado de 50%.

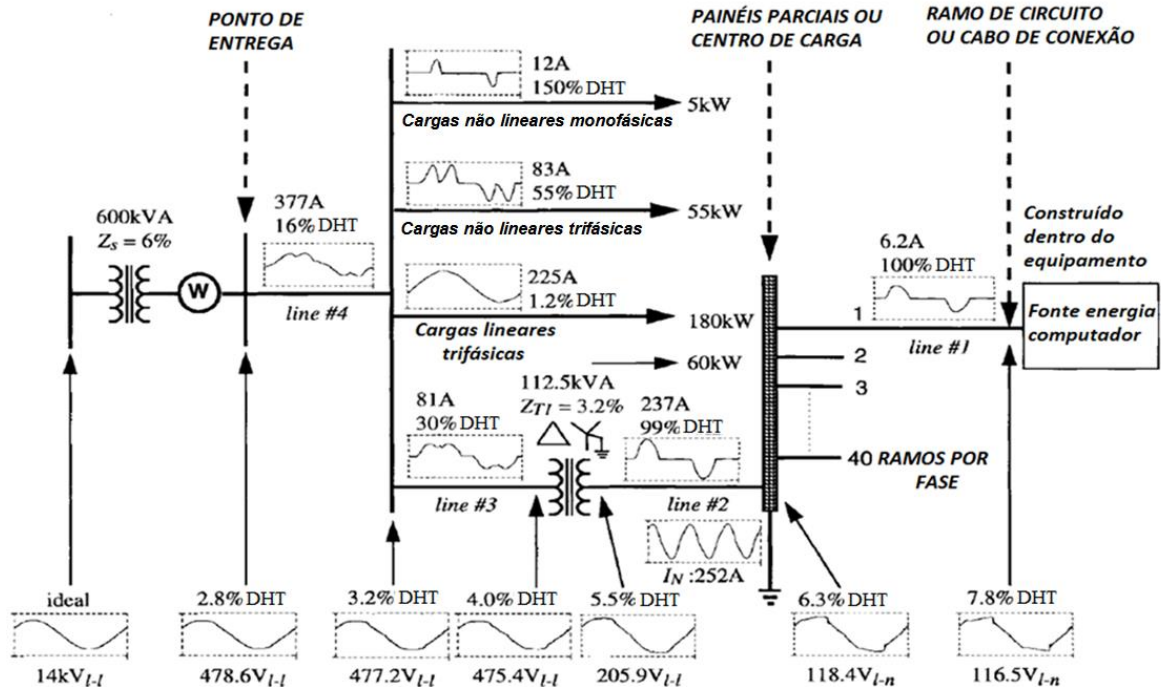


Figura 2.4 - Perfis de tensão e corrente em uma edificação comercial.

“A opção de mitigação harmônica distribuída aqui considerada se utiliza de dois tipos de filtros monofásicos localizados nos receptáculos dos equipamentos eletrônicos ou em circuitos de derivação e três tipos de filtros trifásicos localizados em subpainéis ou centros de carga”[2].

Filtros monofásicos: PCRF (*Parallel-Connected Resonant Filter*) e SCRf (*Séries-Connected Resonant Filter*), ambos suprimindo de uma a quatro máquinas, sintonizados, na maioria dos casos, nas harmônicas de 3ª ordem, típicas de cargas supridas por fontes chaveadas. As figuras 2.5 e 2.6 ilustram diagramas típicos desses filtros.

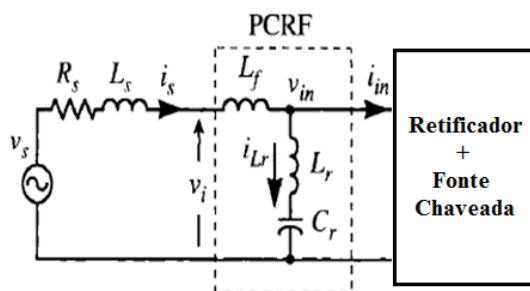


Figura 2.5 - Filtro monofásico PCRF.

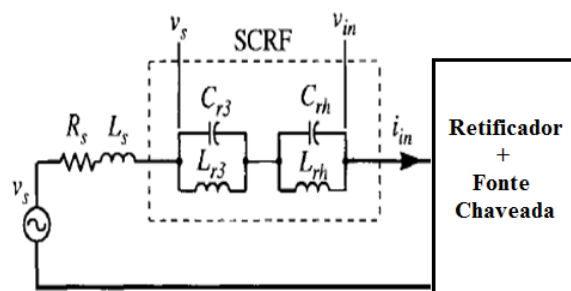


Figura 2.6 - Filtro monofásico SCRf.

Filtros trifásicos: NCF, ZZF e APF)

NCF (*Neutral Current Filter*): aplicam-se na mitigação das harmônicas de ordens múltiplas de três as quais tendem a fluir com maior intensidade nos sistemas desequilibrados pelo condutor neutro. Embora estejam enquadrados nesse documento na classificação trifásica, atuam com características monofásicas e têm sua instalação alocada em série com aquele condutor, entre o secundário da estrela aterrada do transformador e os painéis ou centros de carga.

ZZF (*Zig-Zag Filter*): empregam autotransformadores na configuração *zigue-zague*, atuando simultaneamente nas três fases do circuito de alimentação das cargas não lineares, fornecendo um caminho para interceptar e cancelar as componentes harmônicas múltiplas de três (correntes de sequência zero), reduzindo o fluxo que flui pelo neutro a montante. Autotransformadores adequados ao trato de condições mais severas de distorções harmônicas compostas por ordens ímpares de frequências maiores não são objeto desse artigo, pois não se aplicam, economicamente, ao caso de predominância de harmônicas de terceira ordem [1].

APF (*Active Power Filter*), em um sistema trifásico, a energia harmônica instantânea pode ser decomposta pelo método da transformada de Park e compensada em tempo real pelos reguladores de potência [26] [2]. Esse tipo de filtro trifásico ativo pode ser composto por um estágio de filtros série, para compensar tensões, e filtro “*shunt*”, para compensar correntes [2].

Os autores frisam restrições técnicas quanto à aplicação de ambas as alternativas de mitigação, série e paralela, em que destacam a baixa impedância imposta ao sistema elétrico pelo modelo shunt, causado pelo capacitor do retificador ou pela fonte de tensão da carga. Portanto este modelo com o chaveamento dos inversores acoplado diretamente com o sistema apresenta instabilidade, pois interage com a tensão capacitiva do lado da carga. Por outro lado, citam a alta impedância imposta ao sistema elétrico pelo modelo série, causado pela fonte de corrente do inversor, pois a corrente nos indutores série não pode ser regulada instantaneamente [2].

Informam ainda: “que o tipo mais usado tem sido o shunt, tendo sua maior eficácia na mitigação de fontes harmônicas de corrente. Por outro lado, o tipo série tem sua eficácia nas fontes harmônicas de tensão” [2].

Tabela 2.12 - Comparação de desempenho dos métodos de mitigação harmônica [2].

Localização	Ramo de circuito			Centro de carga			
Tipo de mitigação & Performance	Nenhuma <sup>1</sup>	PCRF	SCRF	Nenhuma <sup>1</sup>	NCF	ZZF	APF
I <sub>thd</sub> (%) na entrada do filtro	100	20	25	100	65	30	5
I <sub>rms</sub> (%) na entrada do filtro	100	125 <sup>2</sup>	95	100	98	105 <sup>2</sup>	102
I <sub>thd</sub> (%) na entrada da Fonte chaveada	100	80	25	100	65	100	100
V <sub>thd</sub> (%) na entrada da fonte chaveada	7,8	10	40	6,3	20	5	5
V <sub>dc</sub> (% nominal) na Fonte chaveada	100	102	75 <sup>2</sup>	100	88 <sup>2</sup>	99	100
Perda nos cabos (% de carga)	13,6	6	6,2	13,6	10	11,1	7,8

<sup>1</sup> Fontes chaveadas monofásicas são usadas como caso base

<sup>2</sup> Valores de desempenho altos ou baixos são efeitos colaterais dos filtros

As perdas totais nos cabos e enrolamentos registrados na tabela 2.12 incluem: linha#1, linha#2, transformador T1 e a linha #3 para uma carga total de 60kW.

Tabela 2.13 - Economia de energia por trecho em W e % [2].

Localização	Ramo de circuito		Centro de carga		
Método de mitigação e economias (W)	PCRF 120x0,5 kVA	SCRF 120x0,5 kVA	NCF 1x60 kVA	ZZF 1x60 kVA	APF 1x60 kVA
L1	1267	1241	764	0	0
L2	678	664	397	485	712
T1	2591	2506	986	1006	2747
L3	48	43	30	30	53
Economia total na carga de 60 kW	4584	4454	2177	1521	3512
% de economia/60kW	7,60%	7,40%	3,60%	2,50%	5,90%

Observa-se, na tabela 2.12, que as perdas nos condutores representam 13,6% sem qualquer tipo de compensação e, na tabela 2.13, após implementação dos diversos métodos mitigadores, os autores registram economias em percentual de kW que variam entre 2,5% a 7,6%. Destaca-se o transformador abaixador T1 como elemento de perdas mais elevadas, o qual produz ambas as formas: Joulicas ( $RI^2$ ) e parasitas de Foucault ( $I^2h^2$ ). Esses dois fatores sensibilizam o conteúdo harmônico de corrente [2]. Como comparação, um sistema equivalente ao proposto, composto por carga lineares, as perdas estimadas seriam de apenas 4% a 5%[2].

Tabela 2.14 - Valores presentes das diferentes opções de investimentos em filtros [2].

Localização	Ramo de circuito		Centro de carga		
Método de mitigação	PCRF	SCRF	NCF	ZZF	APF
Custo de aquisição	\$12.000,00	\$12.000,00	\$1.800,00	\$6.000,00	\$30.000,00
Custo do espaço	\$0,00	\$0,00	\$1.000,00	\$2.000,00	\$2.000,00
Custo de instalação	\$0,00	\$0,00	\$500,00	\$1.000,00	\$1.000,00
Custo Manutenção /ano	\$0,00	\$0,00	\$462,00	\$462,00	\$462,00
Custo de operação/ano	\$4.038,00	\$4.038,00	\$4.038,00	\$4.038,00	\$6.057,00
Custo ciclo de vida <sup>1</sup> /12 anos	\$16.038,00	\$16.038,00	\$7.200,00	\$13.500,00	\$39.519,00
Economia de energia /12 anos	\$15.345,00	\$14.941,00	\$7.248,00	\$5.048,00	\$11.811,00
Valor presente	\$693,00	\$1.097,00	\$531,00	\$8.452,00	\$27.708,00
Custo diário	\$0,16	\$0,25	\$12,00	\$1,93	\$6,32

<sup>1</sup> É a soma dos custos de aquisição, espaço, instalação, manutenção, operação e consumo de energia do filtro /ano

A tabela 2.14 demonstra que, para obtenção do valor presente de entrada do investimento, o valor presente de energia economizada é subtraído [2]. A análise de custo-benefício para um prazo de 12 anos está na diferença entre os custos de economia de energia e os custos de ciclo de vida do equipamento. Nota-se, portanto, que nenhuma das alternativas se mostrou viável.

#### 2.4.3.1 Comentários:

Os estudos ora descritos e analisados concluem que amostra quantitativa e qualitativa das opções de filtros disponíveis à época foi comparada, alternativas investigadas na mitigação harmônica, baseadas em tecnologias ativas e passivas aplicadas às condições de infraestrutura e cargas definidas na planta proposta e se mostraram inviáveis economicamente, embora ratifique em seu conteúdo os consideráveis benefícios proporcionados pelos procedimentos de mitigação harmônica distribuída, alcançando resultados em economia de energia de 2,5% a 7,6% kW.

Os autores traçam duas vertentes tecnológicas na busca por melhores resultados:

- 1) Interna aos equipamentos: o método do conversor "*boost*" incorporado ao projeto das fontes chaveadas de energia [2];

- 2) Externa: novas tecnologias e novas abordagens podem se tornar viáveis, baseadas em mecanismos de compensação harmônica, aspectos específicos de performance e preços por kVA mais atrativos [2].

Condicionam a viabilidade dos investimentos em instalações que apresentem altos níveis de carregamento harmônico, elevadas perdas nas linhas e reduzida capacidade dos circuitos, observados aspectos relevantes como localização dos compensadores e balanceamento de cargas, os quais interferem diretamente na eficiência e desempenho dos filtros. Acrescentam ainda outras condicionantes que podem agregar valor à solução, tais como: minimização das paradas não programadas da instalação e consequente elevação da produtividade através do controle harmônico.

#### **2.4.4. Referência ao documento [3] <sup>9</sup>**

Trata-se de estudo de caso, no qual os autores abordam os benefícios elétricos e econômicos proporcionados por métodos de redução harmônica em instalações comerciais com alta concentração de cargas monofásicas, enfatizando o uso de sistema de supressão harmônica série, denominado genericamente *HSS (Harmonic Suppression System)*.

O *HSS* escolhido tem como princípio de atuação a inserção de uma alta impedância passiva em série com o condutor neutro ou fase [3]. Naquele estudo, optou-se exclusivamente, como ponto único de mitigação, o secundário do transformador de distribuição intermediário da instalação, bloqueando-se o fluxo harmônico de corrente sintonizado em uma única ordem; naquele caso, a 3<sup>a</sup> (apropriada para mitigar distorções geradas por fontes chaveadas), predominante nas cargas monofásicas supridas pelo transformador. Nas aplicações de campo e em experimentos laboratoriais, uma chave by-pass proporciona uma única oportunidade para constatar a eficácia e monitorar o consumo em kW, com e sem o equipamento de correção *HSS*, vide figura 2.7. A mudança pôde ser feita literalmente "on-line" enquanto as cargas demandam sua energia normal [3].

---

<sup>9</sup> Economic and electrical benefits of harmonic reduction methods in commercial facilities, 07/2004.

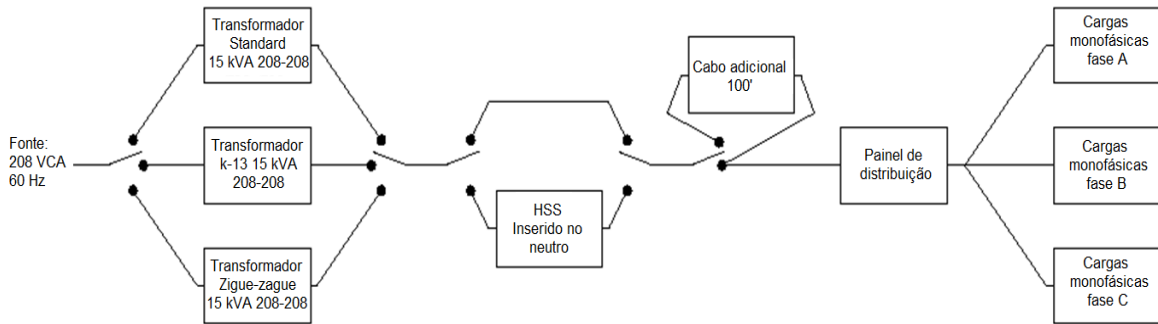


Figura 2.7 - Diagrama de blocos da montagem usada nos ensaios laboratoriais [3].

A carga em cada fase é composta de vinte fontes monofásicas de 300 watts cada, idênticas às utilizadas em computadores pessoais, estando cada uma delas carregada com resistências de cerca de 250 watts [3]. O conjunto é controlado por uma central onde cada uma das fontes de alimentação pode ser comutada individualmente, ligando ou desligando e simulando condições de cargas diferentes. Medições foram coletadas por analisadores de qualidade de energia e multimedidores.

No intuito de justificar sua posição divergente em relação à [1], no que tange à extrapolação da aplicabilidade de resultados de mitigação harmônica, a mais de uma instalação, os autores exploram exclusividade da relação "impedância X harmônicas" nas instalações:

- a) O efeito de impedância percentual própria dos transformadores ( $Z_{\%T}$ ) nas correntes harmônicas.

Observa-se que quanto menor o  $Z_{\%T}$ , maior a  $DHTi$ :  $\downarrow Z_{\%T} \leftrightarrow DHTi \uparrow$

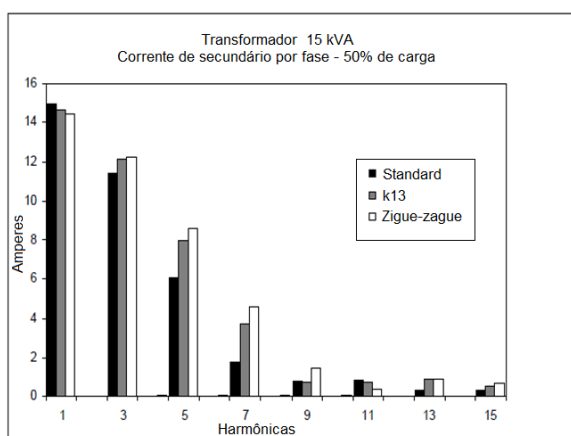


Figura 2.8 - Espectro de frequências harmônicas de corrente para transformadores com impedâncias próprias diferentes [3].

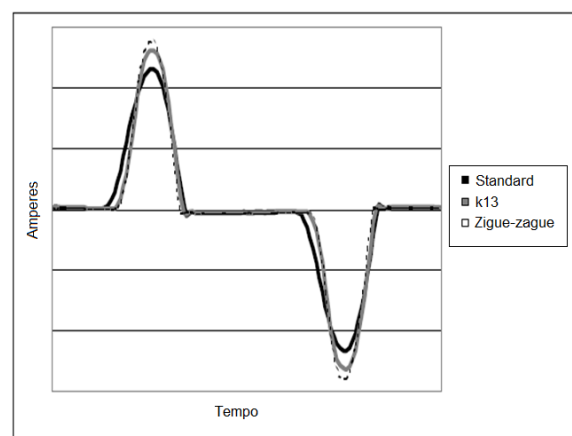


Figura 2.9 - Formas de onda de corrente nas cargas relacionadas a fontes com  $Z_{\%T}$  divergentes [3].

Para o transformador K-avaliado e o transformador *zigue-zague*, a impedância da fonte é reduzida, próxima de 3,6%, do ponto de vista da carga, o que resulta em maior fluxo de harmônicos. Em aplicações de acionamento, esse fenômeno produz retornos decrescentes e queda substancial de tensão, uma vez que a impedância é superior à cerca de 6% da carga [3].

b) O efeito do percentual de carga  $Z_{\%}$ , na incidência de distorção harmônica de corrente.

Observa-se, na Tabela 2.15, que quanto menor o percentual de carga demanda nos transformadores maior a DHTi:

$$\downarrow Z_{\%eq} \leftrightarrow DHTi \uparrow$$

Tabela 2.15 - Mostra a relação indireta carga ( $Z_{\%eq}$ ) e DHTi [3].

Carga no transformador	25%	50%	75%	100%
THDi(F)	101%	88%	76%	67%

c) O efeito da impedância nas perdas e no consumo em kW.

Perda de energia devido ao aquecimento causado pelo fluxo de correntes harmônicas é uma forma de consumo indesejável que não gera trabalho e que reduz a vida útil dos elementos inseridos no sistema elétrico. Nesse sentido, o artigo apresenta, na tabela 2.16, a relação de potência fornecida por cada transformador em análise, para atender ao mesmo percentual de carga demandada de 50%, variando-se a extensão da distribuição.

Tabela 2.16 - Comparação das perdas entre modelos de transformadores e comprimentos de distribuição diferentes [3].

Transformador	% Impedância	Diferenças em kW (13,7 m)	Diferenças em kW (44,19 m)
Standard	5,6%	Referência	Referência
K13	3,60%	1,51%	2,46%
Zigue-zague	3,6% 0,9%	2,27%	4,37%

Observa-se que a queda percentual da impedância própria nos transformadores incrementa a perda percentual em watts nos meios de distribuição da instalação, tendência mantida com o aumento de sua extensão.

## A implementação do HSS e seus resultados

Tabela 2.17 - Comparação de resultados laboratoriais [3].

RESULTADOS LABORATORIAIS						
	Modelo	Teste de bancada	Teste de bancada	Teste de bancada	Teste de bancada	Teste de bancada
Capacidade do transformador kVA	112,5	15	15	15	15	15
Tipo do transformador	Standard	Standard	Standard	Standard	Standard	Standard
Carregamento do transformador	50%	25%	50%	75%	100%	25%
Distância de distribuição do secundário	200'	44'	44'	44'	44'	44'
Distorção de corrente no secundário (SEM HSS)	100%	101%	88%	76%	67%	70%
Distorção de corrente no secundário (COM HSS)	65%	64%	53%	44%	36%	50%
Economia de energia mensurada %kW	3,60%	2,68%	2,35%	2,97%	3,66%	6,15%

O supressor de harmônicos é implementado no secundário do transformador de 15 kVA, conforme ilustrado no diagrama de blocos na Figura 2.7. É sintonizado para inserir sua impedância máxima na componente de 3ª ordem, obtendo-se os resultados registrados na tabela 2.17. Condições várias são avaliadas, tais como: carregamento do transformador, distância da carga, índices de DHTi alcançados com e sem o HSS, percentuais de energia economizada, cabendo, inclusive, a comparação com os resultados obtidos em [1], os quais se mostram próximos.

### 2.4.4.1. Comentários:

Naquela oportunidade, os autores expõem os resultados obtidos em experimentos laboratoriais controlados e de campo, sugerindo contraponto às premissas da filosofia de aplicação de mitigadores de harmônicos distribuída, implementada em [1] e [2], quando enfatizam a metodologia de implementação concentrada, além de apresentar números atualizados, à época, para economia de energia, alcançando resultados semelhantes aos apresentados em [1], tanto em % DHT quanto em % kW. Naqueles estudos, os autores identificam e adotam como ponto de maior convergência de distorção harmônica o secundário dos transformadores.

Em [3], constata-se a pertinência da análise do fluxo harmônico no viés da modularidade da impedância da instalação no seu todo, relacionada com as fontes de energia (transformadores) e suas características, respondendo diretamente pela eficiência energética no que tange a rendimento.

As equações 2.1 e 2.2 abaixo retratam a contribuição da corrente e da impedância nas perdas joulicas presentes nos meios metálicos condutores de bitolas menores, onde se pode concluir que as variações na corrente elevada ao quadrado predominam sobre as variações de impedância resistiva.

$$P = I^2 R \quad (2.1)$$

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2.2)$$

Enfim, o estudo ora descrito remete acertadamente à peculiaridade do comportamento elétrico de cada infraestrutura, cabendo, portanto, tratamento específico na mitigação harmônica para cada caso, em que dois aspectos merecem atenção: o fator de carregamento dos transformadores, recomendando-se o uso de um único transformador mais carregado em substituição a vários levemente carregados e a impedância própria desses equipamentos, recomendando-se a categoria “*standard*” de mais elevado nível de impedância quando for possível, além da concomitante aplicação de dispositivos de mitigação harmônica.

## 2.5. Inserção do estudo neste contexto

O trabalho ora consolidado e adiante descrito se adere, oportunamente, aos consistentes estudos e conceitos até então apresentados, quando compartilha filosofias científicas e pragmáticas comumente usadas, inserindo neste contexto, de forma ainda mais contemporânea, novos argumentos em alternativa tecnológica que reforçam a viabilidade da otimização da eficiência energética também em edificações prediais comerciais, atuando na redução dos índices das distorções harmônicas de tensão e corrente.

Os critérios técnicos e orçamentários continuam em evidência no complexo processo decisório de se optar por medidas mitigadoras do consumo de energia; em tempos atuais, incentivados pelos normativos e padrões que regulamentam a área e aliados à evolução da consciência humana em sustentabilidade ambiental.

Entre os fatores relevantes ponderados na equação do custo-benefício da mitigação harmônica, em edificações comerciais, destacam-se:

- A determinação da(s) melhor (es) localização(ões) para instalação do(s) filtro(s) ou compensador(es);
- O(s) modelo(s) do(s) equipamento(s) adequado(s);
- O potencial fluxo harmônico vigente na instalação;
- A relação demanda/potência instalada da edificação;
- O modelo tarifário de energia elétrica no qual se enquadra a construção.

No que tange à premissa da localização, a opção pela filosofia de mitigação harmônica distribuída encontrou respaldo nos estudos objeto deste trabalho, pois, além das edificações objeto daqueles estudos de caso já disporem como padrão a aplicação de filtros junto à maioria das cargas providas de fonte chaveada (computadores e impressoras), o *SAHI* nasceu com premissas de pequeno volume, inclusive para correntes elevadas e flexibilidades adequadas às necessidades físicas e elétricas das instalações, além da previsão de custo reduzido.

Nesse sentido, a tecnologia proposta em [4], sucintamente descrita a seguir no Capítulo 3 item 3.5 e seus conceitos posteriormente aplicados no Capítulo 4, oferece nova alternativa com características e vantagens peculiares.

## CAPÍTULO 3

### HARMÔNICAS - CONSIDERAÇÕES AFINS E TECNOLOGIAS MITIGADORAS

#### 3.1. Introdução

Este capítulo tem foco nas tecnologias de mitigações harmônicas mais usuais, passando por uma breve descrição de aspectos afins ao tema harmônicos, tais como, a série de Fourier, índices e fatores envolvidos, causas das distorções harmônicas com ênfase na fonte de tensão chaveada em face da sua relevante contribuição em instalações comerciais. Os conceitos a seguir oferecidos têm a intenção de aproximar o leitor da importância do tema deste trabalho no aspecto tecnológico, aliado à oportuna e eficiente aplicabilidade da compensação série ativa de harmônicos, e nesse sentido, convergindo para uma descrição sucinta da tecnologia desenvolvida em [4], na qual se encontra plena e detalhadamente contextualizada, cujas premissas são exploradas no Capítulo 4, confirmando-se sua eficácia.

#### 3.2. Harmônicas - Considerações afins

Em condições ideais, a energia que movimenta os sistemas elétricos na sua ponta seria composta por tensões puramente senoidais, com frequência e amplitude constantes. Entretanto, desvios nesse padrão se tornaram mais significativos e comuns, distorcendo a característica referencial do que deveriam ser as formas de onda, em especial nas instalações dos consumidores, sejam industriais ou comerciais. Esse advento, amplamente explorado na literatura e denominado HARMÔNICO (conteúdo de um sinal cuja frequência é um múltiplo inteiro da frequência real do sistema), deve-se aos efeitos da proliferação das chamadas cargas não lineares, as quais provocam uma desproporcionalidade entre os sinais de corrente e tensão. Nos transformadores, é consequência da relação não linear entre o fluxo de magnetização e a corrente de excitação correspondente. Atualmente as cargas não lineares são classificadas em três categorias de acordo com a natureza da deformação:

- a) Categoria 1 – Nessa categoria encontram-se os equipamentos com característica operativa de arcos voltaicos, tais como: fornos a arco, máquinas de solda, lâmpada de descarga e outros. A natureza da deformação da corrente é oriunda da não linearidade do arco voltaico.
- b) Categoria 2 – Pertencem a essa categoria os equipamentos de núcleo magnético saturado, tais como: reatores e transformadores de núcleo saturados. A natureza da deformação da corrente é oriunda da não linearidade do circuito magnético.
- c) Categoria 3 – Enquadram-se aqui os equipamentos eletrônicos, tais como: inversores, retificadores, *UPS*, televisores, micro-ondas, computadores e outros. A natureza da deformação da corrente é oriunda da não linearidade dos componentes eletrônicos.

No Apêndice A, parte integrante deste estudo e registrado ao final do documento, descreve-se de forma detalhada a questão da não linearidade.

#### A série de Fourier

A composição de uma forma de onda de tensão ou corrente alternada é comumente analisada e tratada matematicamente pela série de Fourier. Para uma forma de onda distorcida que descreve ciclos idênticos, ela pode ser decomposta por ondas senoidais puras com frequências múltiplas inteiras bem definidas da componente fundamental, denominadas componentes harmônicas da fundamental. Assim, o somatório senoidal da componente fundamental e suas respectivas componentes de ordens harmônicas são definidos pela série de Fourier, reproduzida na equação 3.1 e demais equações que a compõem [15]:

$$f(t) = \frac{1}{2} a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} \{a_h \cos(h \omega_0 t) + b_h \sin(h \omega_0 t)\} \quad (3.1)$$

$$f(t) = c_0 + \sum_{h=1}^{\infty} c_h \sin(h \omega_0 t + \phi_h) \quad (3.2)$$

onde:

$t$  = período da função  $f$ ;

$\omega_0$  = frequência fundamental;

$a_0$  = magnitude da componente contínua C.C. do sinal;

$c_h$  = magnitude da componente harmônica de ordem  $h$ ;

$a_h$  e  $b_h$  = coeficiente de cada elemento da série harmônica de simetria par e impar respectivamente;

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T}, \quad (3.3)$$

$$c_0 = \frac{a_0}{2}, \quad (3.4)$$

$$c_h = \sqrt{a_h^2 + b_h^2}, \quad (3.5)$$

$$\theta_h = \tan^{-1}\left(\frac{a_h}{b_h}\right); \quad (3.6)$$

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt; \quad (3.7)$$

$$a_h = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos(h \omega_0 t) dt; \quad (3.8)$$

$$b_h = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \sin(h \omega_0 t) dt; \quad (3.9)$$

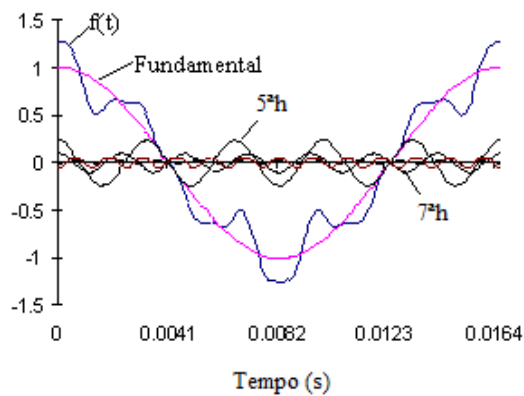


Figura 3.1.(a).

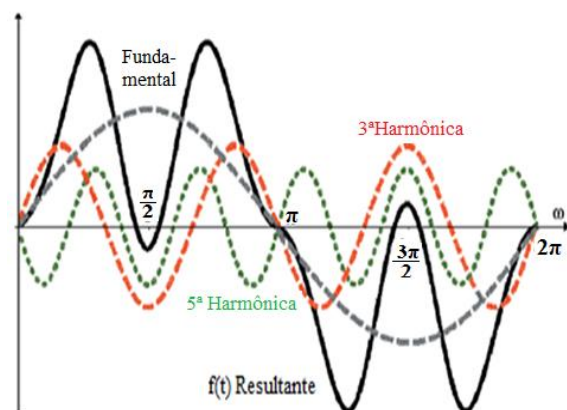


Figura 3.1.(b).

As figuras 3.1 (a) e (b) ilustram as formas de ondas das funções periódicas  $f(t)$  distorcidas devido às contribuições das respectivas componentes harmônicas de 5ª e 7ª ordens na primeira situação e 3ª e 5ª na segunda.

A importância de se registrar os princípios da expansão de funções periódicas não senoidais em suas componentes harmônicas fundamentadas pela análise de Fourier reside no fato de que, para os estudos de caso descritos no capítulo 4, tanto o equipamento utilizado nas medições de campo quanto o software de modelagem e simulação PTW<sup>10</sup> adotam esta

<sup>10</sup> Tutorial PTW "Reference Hi\_WAVE", descreve a metodologia

metodologia como padrão de cálculos em seus algoritmos além de outras ferramentas no complemento das análises. A transformada inversa desta filosofia matemática é aplicada para determinação da função harmônica no domínio do tempo, inclusive.

### 3.3. Índices Harmônicos

São indicadores que quantificam e analisam os efeitos harmônicos, necessários para dimensionamento de forma padronizada dos níveis de distorções toleráveis, inclusive nas regulamentações normativas.

#### 3.3.1. DHT - Distorção Harmônica Total

Índice mais utilizado para quantificar harmônicos, referenciado na literatura e padrões internacionais, entre eles [10] [17]. É aplicável tanto nos cálculos de distorções de tensão como de corrente, entretanto não se basta como informação completa, uma vez que apenas seu valor não é suficiente para quantificar detalhadamente os fluxos harmônicos circulantes, pois faz referência à componente fundamental, oferecendo totais absolutos em cada grandeza elétrica, os quais são compostos conforme informado em 3.1.2, por ordens harmônicas parciais que podem ser pares, ímpares e até inter-harmônicas [17], cada uma somando, de forma variável em função de sua amplitude, interferências ao sistema no qual se insere.

$$DHT_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hmax} V_h^2}}{V_1} \quad (3.10)$$

$$DHT_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hmax} I_h^2}}{I_1} \quad (3.11)$$

onde,

h – número inteiro (ordem harmônica);

$V_h$  – valor rms da componente de tensão harmônica h;

$V_1$  – valor rms de tensão fundamental;

$I_h$  – valor rms da componente de corrente harmônica h;

$I_1$  – valor rms de corrente fundamental.

Recomenda-se parcimônia na análise fria dos resultados percentuais apresentados por esses índices, os quais devem sempre ser associados às amplitudes correspondentes, cujos valores, sejam em tensão ou corrente, podem oferecer pouco comprometimento à instalação quando comparados aos valores nominais circulantes.

### 3.3.2. DTD - Distorção Total de Demanda

É o índice utilizado pela recomendação IEEE 519 [10] para quantificar a distorção harmônica de corrente em relação à demanda de corrente da carga. Sua formulação matemática é bastante similar ao DHT, tendo como diferença o fato de que a DTD é calculada em relação à corrente máxima da carga e a DHT utiliza a corrente fundamental no horário da medição. O valor da DTD é uma informação completa, uma vez que sempre é calculada em relação à corrente máxima. Assim, se o valor encontrado para a DTD for alto, pode-se afirmar que há elevada circulação de harmônicos naquele sistema.

$$DTD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \quad (3.12)$$

em que,

$I_L$  - Corrente de demanda máxima da carga na frequência fundamental, medida no ponto de acoplamento comum entre a carga e o sistema;

$I_h$  - Valor rms da componente de corrente harmônica  $h$ .

### 3.3.3. Fator K - Transformadores

É o índice utilizado por projetistas e fabricantes de transformadores [10] nos cálculos dos níveis de aquecimento devido à circulação de correntes harmônicas naqueles equipamentos, atribuindo fatores de desclassificação para reduzir a potência máxima de saída na presença de correntes harmônicas.

$$K = \sum_{h=1}^{hmax} \left(\frac{I_h}{I_r}\right)^2 \times h^2 \quad \text{ou} \quad (3.13)$$

$$K = \sum_{h=1}^{hmax} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 \times h^2 \quad \text{ou, ainda,} \quad (3.14)$$

$$K = \frac{I_{pico}}{I_{Rms} \sqrt{2}} = \frac{Fc}{\sqrt{2}} \quad (3.15)$$

onde:

$I_r$  – Corrente nominal rms total;

$I_h$  – Corrente harmônica h;

Fc – Fator de crista;

$I_1$  – Corrente harmônica fundamental;

A ANSI/IEEE C57. 110-1986 classifica os transformadores em função do fator K em sete níveis, como se segue:

- **K-1:** Avaliação de todo o transformador convencional projetado para suportar somente os efeitos de aquecimento das perdas normais e das perdas adicionadas por correntes parasitas resultantes de 60 Hertz, com o transformador suprindo corrente senoidal. Tal unidade pode ou não ser projetada para suportar o aquecimento adicional dos harmônicos em sua corrente de carga.
- **K-4:** Um transformador com esta avaliação foi projetado para fornecer kVA nominal, sem superaquecer, a uma carga constituída de 100% de frequência normal 60 Hertz, corrente senoidal na fundamental, e mais:
  - 16% da fundamental como a 3<sup>a</sup> corrente harmônica;
  - 10% da fundamental como 5<sup>a</sup>;
  - 7% da fundamental como 7<sup>a</sup>;
  - 5.5% da fundamental como 9<sup>a</sup> e
  - Porcentagens menores através da 25<sup>a</sup> harmônica.

O "4" indica sua habilidade de suportar quatro vezes as perdas de correntes parasitas de um transformador K-1.
- **K-9:** suporta 163% do carregamento harmônico de um transformador classificado como K-4.
- **K-13:** suporta 200% do carregamento harmônico de um transformador classificado como K-4.
- **K-20, K-30, K-40:** O número mais elevado de cada uma destas classificações do fator K indica a habilidade de trabalhar com quantidades sucessivamente maiores de índices harmônicos da carga sem superaquecer.

Tabela 3.1 - Classificação: transformador em função da carga.

Cargas predominantes	Fator K
Cargas convencionais diferentes das listadas abaixo	1
Tomadas de uso comum	1
Pequenos motores monofásicos, bifásicos e trifásicos	1
Cargas para aquecimento	1
Iluminação com lâmpadas de descarga	4
UPS com filtro de entrada	4
Iluminação fluorescente em geral	4
PLC, controladores, instrumentos em geral	4
UPS sem filtro de entrada	13
Equipamentos de telecomunicações	13
Equipamentos de laboratórios	13
Computadores em geral	20
Variadores de frequência	20
Televisores, monitores e equipamentos eletrônicos	20

A tabela 3.1, classifica os transformadores em categorias, podendo o fator K chegar a 30, 40 e 50.

### 3.3.4. $F_{HL}$ - Fator de perdas harmônicas nos Transformadores

Esse índice também é utilizado para se quantificar a desclassificação do carregamento de um transformador na presença de harmônicos, representa o aquecimento efetivo gerado no transformador como resultado de uma determinada corrente harmônica. Este fator pode ser calculado através da equação 3.16 [10]:

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{hmax} (I_h/I_1)^2 \times h^2}{\sum_{h=1}^{hmax} (I_h/I_1)^2} \quad (3.16)$$

A principal diferença entre o fator K e o  $F_{HL}$  está ligada ao fato de que o fator K depende tanto da magnitude quanto da distribuição dos harmônicos da corrente, enquanto o  $F_{HL}$  é apenas dependente da distribuição dos harmônicos [10]. Ou seja, caso haja medições em transformadores de potências nominais diferentes que apresentem uma distribuição harmônica similar, estes terão o mesmo  $F_{HL}$ , enquanto o fator K variará com a diferença entre as amplitudes das correntes em cada transformador. A equação 3.17 relaciona os dois índices.

$$K = \left[ \frac{\sum_{h=1}^{hmax} I_h^2}{I_r^2} \right] F_{HL} \quad (3.17)$$

### 3.3.5. $fp$ - Fator de potência “harmônico”

O fator de potência ( $fp$ ) é a relação entre a potência ativa e a potência aparente definido para um sinal periódico senoidal, expresso pela equação 3.18. O  $\text{Cos}\phi$  é relação entre a potência ativa e potência aparente definido para cada uma das componentes harmônicas senoidais, expresso pela equação 3.19.

$$fp = \frac{P(W)}{S(VA)} \quad (3.18)$$

$$\text{Cos}\phi_n = \frac{P_h}{S_h} (VA) \quad (3.19)$$

É usual medir-se o  $\text{Cos}\phi$ , também chamado de fator deslocamento, da componente fundamental e o  $fp$  do sinal deformado total. Observa-se que instalações que apresentam valores de  $fp$  e  $\text{Cos}\phi$  muito divergentes entre si possuem alta incidência de distorção harmônica nas duas grandezas de tensão e corrente; já nos casos de se obter valores próximos, é um indicativo de baixa influência harmônica.

O entendimento dessa questão pode ser mais bem ilustrado através de equações de similar simplicidade e que expressam a contribuição harmônica nos conceitos de fator de potência de distorção e sua relação com o fator de potência total:

$$fp_{dist} = \frac{1}{\sqrt{1+(DHT_I/100)^2}} \quad (3.13)$$

$$V_{rms} = V_1 \sqrt{1 + (DHT_V/100)^2} \quad (3.14)$$

$$I_{rms} = I_1 \sqrt{1 + (DHT_I/100)^2} \quad (3.15)$$

$$fp_{total} = \frac{P}{V_1 I_1 \sqrt{1+(DHT_V/100)^2} \sqrt{1+(DHT_I/100)^2}} \quad (3.16)$$

Logo, a potência ativa com harmônicos de tensão, por exemplo, seria:

$$P_h = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} v(t) i(t) dt = \sum_{h=1}^{\infty} I_h V_h \text{cos}\phi_{kh} \quad (3.17)$$

e a potência ativa sem harmônicos seria:

$$P = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} v(t) i(t) dt = I_1 V_1 \cos\phi_1 \quad (3.18)$$

$$fp_{total} = \frac{I_1 V_1 \cos\phi_1}{I_{rms} V_{rms}} = \frac{I_1 \cos\phi_1}{I_{rms}}, \Rightarrow fp_{total} \cong \frac{P_1}{V_1 I_1} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+(DHT_{I/100})^2}} \quad (3.19)$$

Da relação entre  $fp_{dist}$  e  $fp_{total}$ , apresentada, conclui-se que:

$$fp_{total} \leq fp_{dist}$$

Conclui-se que um fator de potência unitário sempre será possível com senoides puras e, nesse caso, o fator de distorção seria igual à unidade, restando apenas o fator de potência de deslocamento.

### 3.4. Fontes harmônicas em edificações comerciais

Dependendo da diversidade das cargas ali instaladas e de suas características não lineares, as componentes harmônicas produzidas podem se somar ou se diluir em função das combinações de ângulos de fases e amplitudes associadas, refletindo diretamente nos índices de DHT de corrente e tensão. O parâmetro impedância e sua relação direta (indutiva) ou inversa (capacitiva) com a frequência é crucial na intensidade do fluxo harmônico, refletindo, também, diretamente nos índices de DHT de corrente e tensão, recebendo contribuições relevantes das impedâncias próprias de transformadores, condutores elétricos e bancos de capacitores. Vide exemplo em 2.3.4.

Enquadram-se como fontes harmônicas nas edificações comerciais os seguintes equipamentos [17] [40], destacando-se aqueles em negrito por comporem o maior contingente de cargas dessa natureza:

- **Fontes chaveadas;**
- **Sistemas de suprimento de energia ininterrupta - “UPS” Estáticos;**

- **Acionamentos de velocidade variável - “VSD”;**
- **Reatores eletrônicos para lâmpadas de descarga;**
- Fornos de indução;
- **Inversores de frequência;**
- Soft-starters;
- Controles eletrônicos de temperatura e iluminação;
- Máquinas de solda.

### 3.4.1. Fontes chaveadas

As grandes evoluções tecnológicas na eletrônica, ocorridas nos últimos 20 anos, são correlatas ao surgimento de componentes semicondutores de potência capazes de comutar em alta frequência, acima de 20 kHz, com baixas perdas.

A crescente demanda por fontes de alimentação compactas, de alto rendimento (baixas perdas) e rápida resposta dinâmica a transitórios de carga, decorrente da ampliação de cargas eletroeletrônicas a serem alimentadas em tensão C.C., exigiu soluções que transcendiram as fontes convencionais baseadas em retificadores (controlados ou não).

“Com o advento do transistor MOSFET, e sua evolução para o IGBT, uma nova etapa de desenvolvimento tecnológico em fontes de chaveamento rápido se estabeleceu, virando a página do transistor bipolar. Essa solução trouxe maior rendimento no processo de comutação dos reguladores, pois reduziu as perdas envolvidas ao minimizar o intervalo no qual o componente atravessa sua região ativa, em face das altas taxas de chaveamento obtidas. Como consequência positiva, a necessidade de dissipação de calor gerada pelo semicondutor também diminuiu. Entretanto, ao operar como chave, esses circuitos exigem filtros passa-baixas que sejam capazes de recuperar uma tensão C.C. adequada aos circuitos de carga. Tais filtros utilizam indutores e capacitores. A minimização desses elementos requer que a frequência de comutação seja a mais elevada possível, de modo que valores aceitáveis de *ripple* sejam obtidos com baixas indutâncias e capacitâncias. A elevação da frequência, no entanto, fica restrita às perdas devidas às comutações dos componentes semicondutores [42]<sup>11</sup>”.

---

<sup>11</sup> Pomilio, J.A., “Fontes Chaveadas” .Publicação FEEC 13/95. Revisada em janeiro 2010.

Ressalta-se que os elevados valores de  $di/dt$  e  $dv/dt$  são importantes fontes de interferência eletromagnética (IEM), as quais devem ser devidamente minimizadas para evitar o mau funcionamento do circuito e interferências eletromagnéticas conduzidas ou induzidas.

Apesar da evolução tecnológica acima descrita, a maioria das fontes de pequeno porte até 500W, comercializadas e implementadas nos computadores, por exemplo, ainda não dispõe de todos aqueles recursos. Modelo simplificado ilustra na Figura 3.2 o diagrama do circuito mais comum, e tem seu princípio de funcionamento descrito em seguida:

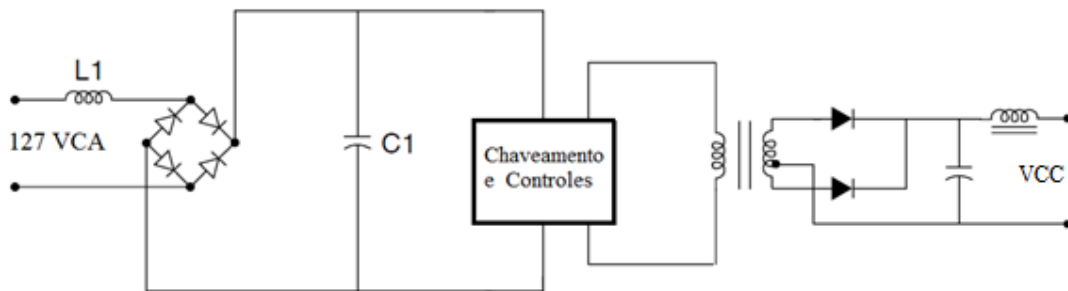


Figura 3.2 - Diagrama típico de uma fonte chaveada de energia [17].

Essas fontes de alimentação usam técnicas de conversão de corrente C.C.-C.C. para conseguir uma saída contínua suave, utilizando componentes leves e pequenos.

Um retificador simples converte corrente alternada em corrente contínua pulsante, e um capacitor de alisamento reduz o “ripple” na tensão C.C.. A ponte de diodos é conectada diretamente à entrada de corrente alternada, eliminando o transformador. Isso resulta numa tensão C.C. regulada “grosseiramente” pelo capacitor. Essa corrente contínua é, então, convertida novamente em corrente alternada a uma elevada frequência, da ordem de kHz, pelo chaveador e, em seguida, retificada. O capacitor C1 é carregado a partir do circuito retificador apenas quando o pico da tensão C.A. é mais elevado que a tensão em C1. Como o capacitor é um dispositivo de baixa impedância para frequências mais elevadas, a corrente de carga apresenta pico de elevado valor ao longo de um curto período. Isso reflete do lado C.A. como pulsos de corrente alternados e harmônicos associados.

Os computadores pessoais, impressoras, copadoras e outros equipamentos eletrônicos monofásicos quase que, universalmente, empregam fontes de alimentação de modo chaveado. As principais vantagens são o menor peso, tamanho compacto, operação eficiente e dispen-

sa do transformador de entrada de baixa frequência. Fontes de alimentação de modo chaveado, normalmente, podem tolerar grandes variações na tensão de entrada e, devido à inexistência de uma indutância adequada do lado C.A., a corrente de entrada da fonte de alimentação vem em pulsos muito curtos, pois o capacitor C1 recupera a sua carga a cada meio ciclo. Característica própria das fontes de alimentação atuais de modo chaveado é o conteúdo de terceiro harmônico muito alto o qual é somado aos múltiplos inteiros no neutro de um sistema trifásico, causando preocupação com a sobrecarga daqueles condutores, especialmente em edifícios mais antigos, em que um neutro subdimensionado pode ter sido instalado [1] [17].

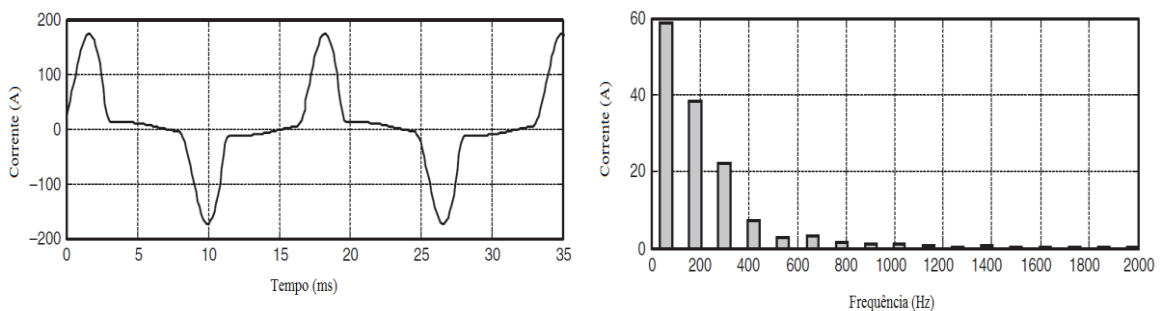


Figura 3.3 - Forma de onda de corrente e espectro harmônico típicos de uma fonte chaveada ilustrada na figura 3.1.

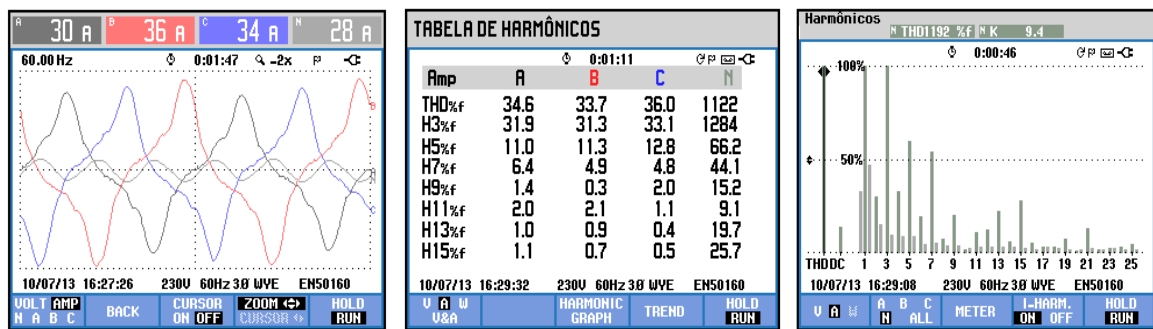


Figura 3.4 - Registros de campo de fontes chaveadas .

Semelhança nas formas de onda de corrente pode ser observada nas figuras 3.3 e 3.4, ambas provenientes de cargas supridas por fontes chaveadas. Podem-se observar ainda amplitudes de ordens harmônicas até mais elevadas. Tal figura (3.4) revela dados colhidos na instalação objeto de pesquisa deste trabalho, desenvolvido no Capítulo 4 adiante.

Maiores entendimentos acerca deste tema podem ser encontrados em [14], [15], [17], [18], [26], [29], [40], [41] e [42].

### **3.4.2. Alternativas de soluções em mitigação harmônica**

A confiabilidade do sistema elétrico e funcionamento normal dos equipamentos elétricos dependem fortemente de uma alimentação elétrica livre de distorção harmônica. Devido ao grande número e variedade de métodos disponíveis, a seleção da técnica mais adequada para uma determinada aplicação nem sempre é um processo fácil ou simples. No intuito de viabilizar esse processo, as várias alternativas foram classificadas em diferentes técnicas de mitigação:

- Filtros passivos: podem ser sintonizados ou dessintonizados. Tradicionalmente usados para absorver correntes harmônicas, apresentam baixo custo e estrutura simples e robusta, contudo trabalham com sinais fixos e podem criar ressonância no sistema elétrico;
- Filtros ativos: fornecem várias funções, tais como redução de harmônicos, isolamento, amortecimento, balanceamento de carga, correção de fator de potência, regulação de tensão e custo elevado;
- Filtros híbridos: são mais atraentes em filtragem de harmônicas que os filtros ativos, possuem maior viabilidade do ponto de vista econômico especialmente para aplicações de alta potência.

As bobinas de reatâncias indutivas e os transformadores do tipo Zigue-zague aparecem como alternativas mais simples não enquadradas nos perfis acima, mas que merecem atenção em face da sua elevada eficácia. Estas tecnologias também são abordadas mais adiante.

#### **3.4.2.1. Capacitores de potência**

Qualquer que seja a alternativa escolhida de filtros na mitigação harmônica e que faça uso de capacitores em seu projeto ou, ainda, nas situações para as quais se destina envolvam transientes elétricos e distorções harmônicas comumente existentes, deve-se atentar para a correta especificação desses equipamentos e, para tanto, a escolha nessas condições favorece os modelos NÃO-PPM (não polipropileno metalizado), cujas características construtivas lhes confere maior robustez dielétrica e suportabilidade térmica, conforme descrito a seguir:

A tecnologia NÃO-PPM proporciona aos capacitores com ela construídos materiais totalmente diversos daqueles aplicados no projeto PPM, pois suas especificações contemplam dielétrico duplo (duas camadas), composto por folhas não metalizadas de papel “kraft ter-lo” (uma folha) e filme de polipropileno corrugado (uma folha). Suas placas são formadas por folhas de alumínio (sem metalização), dotadas de maior espessura para condução de corrente nos pontos críticos e maior suportabilidade térmica. Os elementos formadores desses capacitores são enrolados com folga suficiente para garantir a boa impregnação do dielétrico e placas com óleo, proporcionando maior grau de dissipação térmica e rigidez dielétrica.

Tabela 3.2 - Consolidação do comparativo das duas tecnologias [45].

CARACTERÍSTICA	CAPACITOR PPM	CAPACITOR NÃO PPM	VANTAGEM NÃO PPM
Dielétrico (Tensão suportável)	01 camada de isolamento sem participação do óleo isolante na composição	02 camadas de folhas com participação do óleo isolante na composição	Dupla isolamento, maior tensão suportável, eliminação de descargas parciais pontuais
PLACAS (Capacidade de condução de corrente)	Placa (condutor) de espessura média igual a 0,02 $\mu\text{m}$	Placa (condutor) de espessura média igual a 5,0 $\mu\text{m}$	Capacidade de condução de corrente extremamente maior
ÓLEO (Dissipação de calor e eliminação de pontos de alto aquecimento)	Tem contato somente com as superfícies externas (não tem contato com placas e dielétrico)	Penetra totalmente nas placas e dielétrico	Melhor refrigeração do dielétrico e placas, eliminação de pontos quentes localizados

### 3.4.2.2. Filtros Passivos Sintonizados

Típicos circuitos ressonantes série que, na frequência de sintonia ou de ressonância, apresentam baixa impedância. Em frequências de sintonia, a impedância do filtro se reduz ao resistor do filtro, abaixo dela, comportam-se capacitivamente e, para faixas de frequência acima da sintonizada, comportam-se indutivamente. Logo, podem operar como compensadores de reativo na frequência fundamental. A equação 3.20 expressa estas possibilidades e a figura 3.5.(a) ilustra este modelo.

$$f_n = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.20)$$

onde:

$f_n$  – frequência de sintonia;

$L$  – indutância;

$C$  – capacitância;

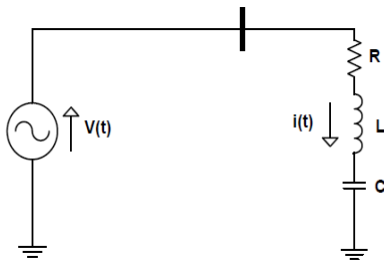


Figura 3.5.(a) - RLC Série

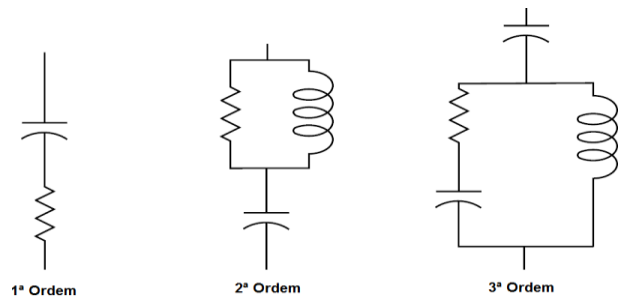


Figura 3.5.(b) - Topologias de filtros amortecidos

São equipamentos economicamente mais acessíveis quando comparados com outros modelos. No entanto, têm a desvantagem de interagir negativamente com o sistema de alimentação, sendo importante verificar todas as interferências possíveis com o sistema. São empregados ou para desviar as correntes harmônicas da rede ou para bloquear o seu fluxo entre as partes do sistema por meio do ajuste de seus elementos, podendo gerar ressonância a uma determinada frequência, [17].

### Fator de qualidade “Q”

Estabelece a relação entre a máxima energia armazenada nos componentes, reator e capacitor e a energia total dissipada no resistor, por período [45]. As equações 3.21 e 3.22 expressão a relação. Parâmetro adimensional auxilia no dimensionamento dos filtros passivos sendo especificado para circuitos e componentes. Para filtros passivos sintonizados, geralmente apresenta valores elevados, refletindo sua alta eficiência do ponto de vista de energia .

$$Q = \frac{Z_0}{R} = \frac{\sqrt{L/C}}{R} \quad (3.21)$$

$$Z_0 = \omega_0 \cdot L = \frac{1}{\omega_0 \cdot C} = \sqrt{L/C} \quad (3.22)$$

### **3.4.2.3. Filtros Passivos em derivação Dessintonizados ou Amortecidos**

As topologias deste filtro, ilustradas na figura 3.5(b), consistem de diversas combinações, obtendo-se um circuito ressonante com uma frequência para a qual o sistema oferece um caminho de baixa impedância, para uma larga faixa de frequência, sintonizado abaixo da primeira harmônica existente [46]. Em frequência fundamental, a exemplo dos filtros sintonizados, apresentam impedância predominante capacitiva; e em frequências maiores têm comportamento resistivo.

A filtragem dessintonizada com correção de fator de potência é o meio utilizado para evitar a ressonância entre o circuito LC formado pelo banco de capacitores e pelo transformador de potência mais próximo, causada por uma componente harmônica gerada pelas próprias cargas não lineares da instalação [45]. Sem o filtro de dessintonia pode haver a ocorrência de ressonância e a circulação de uma alta corrente sobre os ramos do circuito do banco de capacitores e o transformador, podendo causar sobrecarga em ambos. Em síntese, vantagens são atribuídas a essa topologia:

- ✓ Reduz o nível de distorção harmônica;
- ✓ Aumenta o tempo de vida útil do capacitor e componentes de manobra;
- ✓ Suporta sistema de controle automático;
- ✓ Evita ressonância com o sistema.

Quanto à aplicação, a topologia de 1ª ordem é a menos usada por requerer um grande capacitor e por dissipar elevados níveis de energia a frequência fundamental. Aos demais modelos, a aplicação é extensa cuja escolha se prende aos requisitos de desempenho de filtragem e perdas de energia.

### **3.4.2.4. Filtros Ativos**

Esta tecnologia, composta basicamente de elementos semicondutores, além de reduzir os índices de distorções harmônicas, melhora o desempenho do sistema, entretanto se baseiam em sofisticados componentes eletrônicos que incrementam seus custos. Seu princípio de funcionamento está na injeção de magnitudes de harmônicos de corrente ou tensão equivalentes a aquelas geradas pelas cargas não lineares defasadas em 180°, de forma a cancelá-las.

Apresentam a vantagem nata de não ressonância com os sistemas no qual estão inseridos, ou seja, trabalham de forma independente da impedância característica e de suas variações, em especial em circunstâncias adversas onde filtros passivos não podem operar com êxito devido a problemas de ressonância paralela [17]. Podem tratar mais de uma ordem harmônica simultaneamente e outros problemas de qualidade de energia, como a cintilação [17].

Classificam-se em três topologias, ativa série, ativa paralela e a combinação das duas anteriores ativa série-paralela, ilustradas nas figuras 3.6(a), 3.6(b) e 3.6(c) respectivamente.

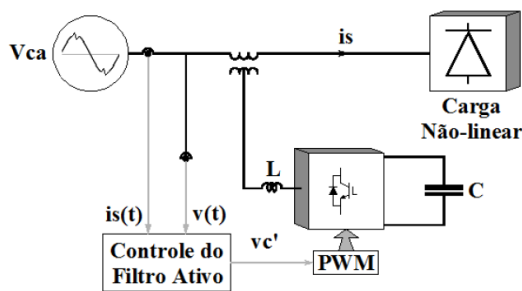


Figura 3.6.(a) - Filtro ativo série.

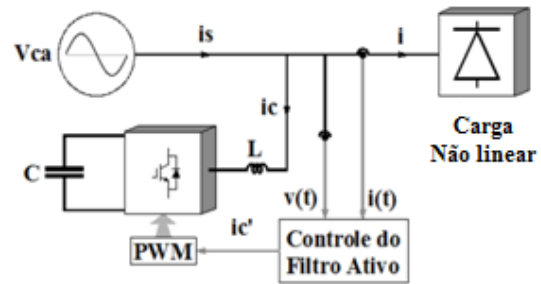


Figura 3.6.(b) - Filtro ativo paralelo.

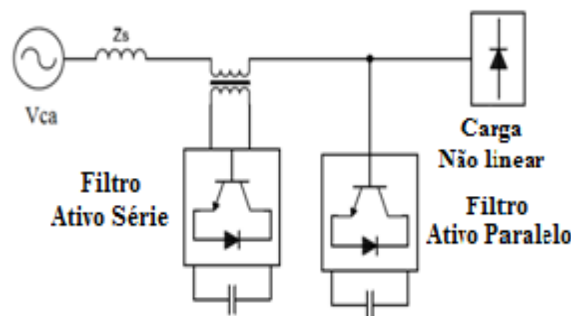


Figura 3.6.(c) - Filtros ativos série-paralelo - [17].

- **Filtro ativo Série:** tem a função de filtrar distorções de tensão. Apresenta princípio de funcionamento semilar ao filtro ativo paralelo, dando lugar ao transformador de acoplamento em lugar do indutor. O transformador de acoplamento promove a conexão série do filtro com o barramento ou linha de alimentação da carga. A função de fonte de tensão controlada é desempenhada por um conversor VSI. Seu princípio de funcionamento se baseia na obstrução do fluxo harmônico entre a fonte e a carga não linear, através da injeção de tensões harmônicas nas ordens desejadas via transformador de acoplamento, as quais são somadas ou subtraídas da tensão da fonte, fornecendo uma forma de onda de tensão o mais senoidal possível para a carga. O

controle via PWM, atua oferecendo impedância nula para a componente fundamental e elevada para ordens harmônicas de tensão.

- Filtro ativo Paralelo: um inversor de tensão (elemento semiconductor) e um PWM como controlador do filtro desempenham as principais funções dessa topologia, onde o inversor promove um caminho de baixa impedância (curto-circuito) para as componentes harmônicas de corrente, geradas pela carga, eliminando sua presença entre fonte e carga. Com este arranjo também é possível compensar a corrente reativa fundamental.
- Filtro ativo série-paralelo: trata-se da combinação dos dois arranjos anteriores com o objetivo de melhorar as fragilidades de suas atuações singelas.

“O filtro ativo paralelo não tem a capacidade de eliminar distorções de tensão, uma vez que o mesmo se encontra conectado em paralelo com a carga, do ponto de vista da rede. E o filtro ativo série não tem a capacidade de eliminar o fluxo de corrente distorcida, uma vez que o mesmo se encontra conectado em série com a carga, do ponto de vista da fonte. Assim, a qualidade da energia, do ponto de vista da carga, é melhorada com relação à tensão a ela fornecida e, do ponto de vista da fonte, é melhorada com relação à corrente que por ela flui [47]”.

#### **3.4.2.5. Filtros Híbridos**

A associação dos filtros passivos com os ativos, em arranjos série ou paralelo, produz o chamado filtro híbrido. Esta configuração tem o objetivo de compensar as limitações de ambos os filtros ativos, série e paralelo, quando implementados isoladamente. A associação promove a melhora das características de filtragem dos filtros passivos, reduzindo a possibilidade de ressonância oriunda das variações das impedâncias da fonte, da carga ou de ambas, além de diminuir os custos, pois requerem um conversor com menor potência [45].

Duas configurações possíveis são citadas em [47]: ativo série e passivo paralelo ou ativo paralelo e passivo paralelo, vide figuras 3.7.(b) e 3.7.(c) respectivamente. Na primeira configuração, o filtro ativo melhora a qualidade de tensão do ponto de vista da carga, enquanto o filtro passivo é dimensionado visando à eliminação das harmônicas de corrente. E na segunda configuração, o filtro ativo melhora a qualidade de corrente do ponto de vista da fonte, enquanto o filtro passivo é dimensionado visando à eliminação das harmônicas de tensão.

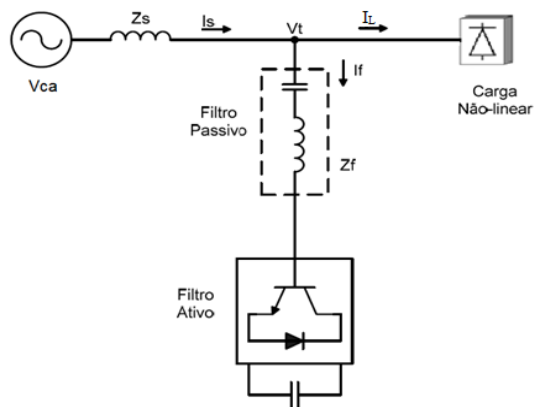


Figura 3.7.(a) - Filtro híbrido série.

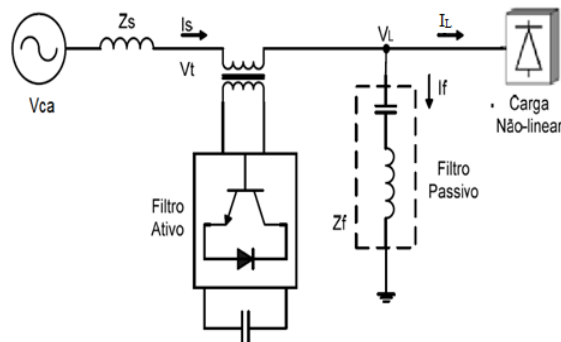


Figura 3.7.(b) - Filtro híbrido série - paralelo.

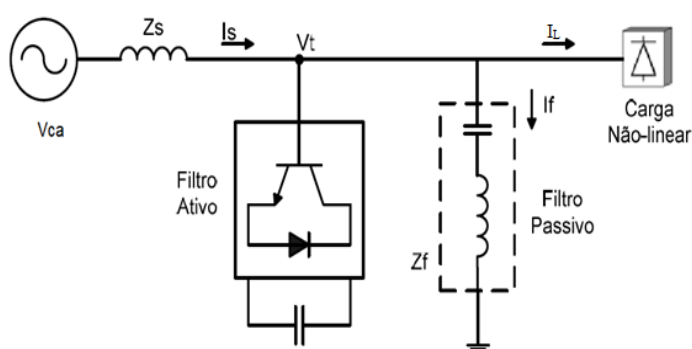


Figura 3.7.(c) - Filtro híbrido paralelo.

A figura 3.7.(a), ilustra a topologia do filtro ativo conectado em série com o filtro passivo paralelo e o conjunto em paralelo com o sistema e a carga não linear. Nesta configuração o filtro híbrido, passa a desempenhar uma filtragem próxima da ideal [16], [20], [21], [24], pois com a conexão do filtro ativo em série com o passivo torna-se possível melhorar consideravelmente as características de compensação harmônica do filtro passivo. Neste arranjo, o filtro passivo tem a função de absorver a componentes não lineares da carga, já o filtro ativo atua como isolador harmônico entre a rede elétrica e o filtro passivo, evitando a possibilidade de ressonância com o sistema.

Diferencial importante deste conjunto é a sua aplicabilidade em sistemas de potências mais elevadas, média e altas tensões, justificada pela distribuição de tensões, que se concentra em maior parte no filtro passivo, atuando o filtro ativo como curto circuito para a componente fundamental e desta forma consegue-se reduzir a potência nominal sobre o filtro ativo significativamente quando comparado ao modelo ativo puro. Portanto, sua viabilidade

econômica se torna mais atrativa. Como desvantagem, cita-se seu baixo desempenho na compensação harmônica quando sujeito a frequências mais elevadas.

Observa-se a ausência de transformadores no diagrama da figura 3.7.(a), normalmente instalados para fazer a função de acoplamento entre as duas tecnologias. Isto se dá devido à capacidade evolutiva das modernas chaves semicondutoras baseadas em IGBTs e IGCTs, que suportam elevados níveis de tensão.

Em geral, ao se combinar essas duas tecnologias ativa e passiva, é possível obter uma melhora na qualidade do desempenho do conjunto de filtros de harmônicos, aliada a uma redução de custos no projeto, podendo lhes ser atribuídas as seguintes funções: isolamento e compensação harmônica, regulação de tensão, compensação de desequilíbrios e controle de potência reativa fundamental.

#### **3.4.2.6. Bobinas de reatâncias indutivas**

“Um método simples, mas muitas vezes bem-sucedido no controle da distorção harmônica gerada principalmente por dispositivos de velocidade ajustável (*ASD - Adjustable Speed Drives*), envolve um pequeno indutor, inserido na entrada da linha de alimentação do dispositivo. Isso é particularmente eficaz para sistemas do tipo PWM [17]”.

O princípio de funcionamento se embasa na atuação da indutância, que diminui a taxa de carregamento do capacitor no barramento C.C., obrigando o dispositivo (“*ASD*” no caso) a fornecer corrente por um período de tempo maior. O efeito final é a liberação de uma corrente de magnitude reduzida e com menor conteúdo harmônico suprimindo a mesma potência [17]. Ademais, bloqueia alguns transientes de alta frequência e ajuda a evitar o desarme de elementos de manobra e proteção durante o período de energização dos capacitores.

Um típico exemplo está na inserção série na entrada de um conversor PWM, de uma bobina dimensionada em 3% da potência em kVA do dispositivo mitigado, podendo reduzir a distorção harmônica em cerca de 80 a 40 por cento. A Figura 3.8 compara o desempenho da tecnologia em duas situações: com e sem a inserção de uma bobina de reatância de 3% em série com um “*ASD*”, ilustrando suas formas de ondas para os dois casos. Observa-se que a forma de onda é maior sem a bobina, ao passo que uma melhora substancial é conse-

guida com o recurso inserido em linha com o “ASD”. A DHT de corrente cai do intervalo de 80 a 120 % para até cerca de 40 %. Redução melhor é obtida quando o tamanho do “ASD” é significativamente menor do que o transformador de serviço, como exemplo ilustrado na figura 3.8, quando o tamanho do “ASD” é 5% do transformador, a corrente de DHT decresce de 125% para 40%.

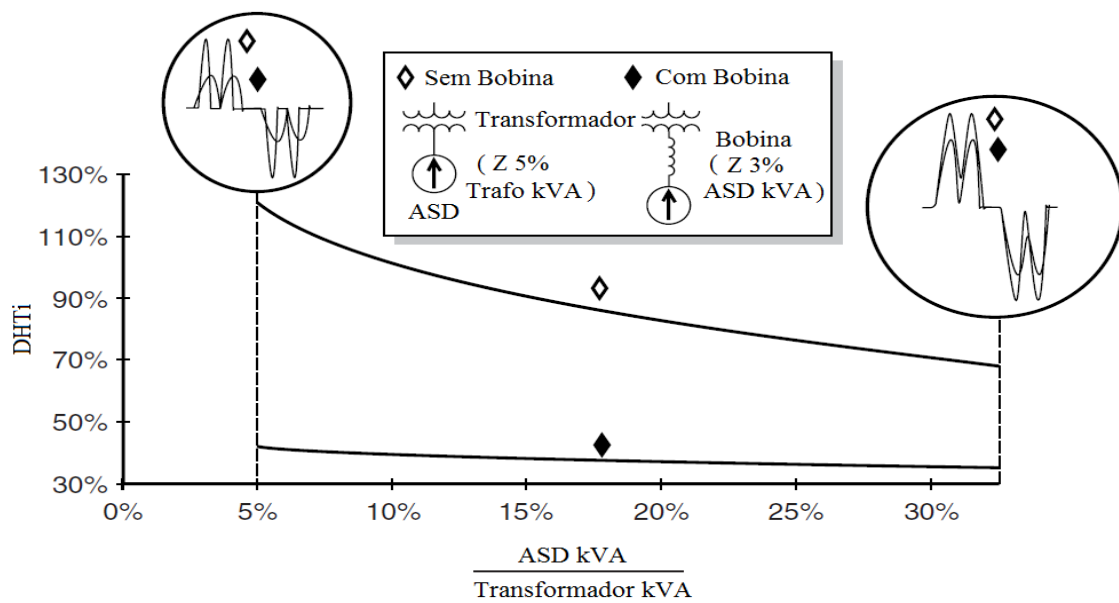


Figura 3.8. - Efeito da bobina de reatância nas correntes harmônicas de um “ASD” [17].

### 3.4.2.7. Transformadores do tipo Zigue-Zague

Dois problemas importantes em instalações comerciais são a sobrecarga dos condutores neutros e o aquecimento do transformador. Ambos os problemas podem ser resolvidos com a colocação adequada do transformador Zigue-Zague, recomendação esta ainda mais válida para edificações existentes. Este equipamento age como um filtro para a corrente de sequência zero, oferecendo um caminho mais curto e de baixa impedância para o neutro além de reduzir a quantidade de corrente que flui por ele de volta para a fonte [17]. Para ser eficaz, o Zigue-Zague deve estar localizado próximo à carga não linear.

Na ligação tipo Zigue-Zague trifásica ilustrada na figura 3.9, cada enrolamento principal ( $A_1$ ,  $B_1$  e  $C_1$ ) é composto por dois enrolamentos menores ( $a_1$  e  $a_2$ ,  $b_1$  e  $b_2$ ,  $c_1$  e  $c_2$ ), exigindo construtivamente demanda maior por cobre, cerca de 30% a mais. Entretanto, além de proporcionar, a disponibilidade do neutro para drenagem de distorções harmônicas de sequên-

cia zero, pode suprir cargas desbalanceadas sem submetê-lo a níveis de tensões elevados face aos menores valores de impedâncias próprias de cada enrolamento.

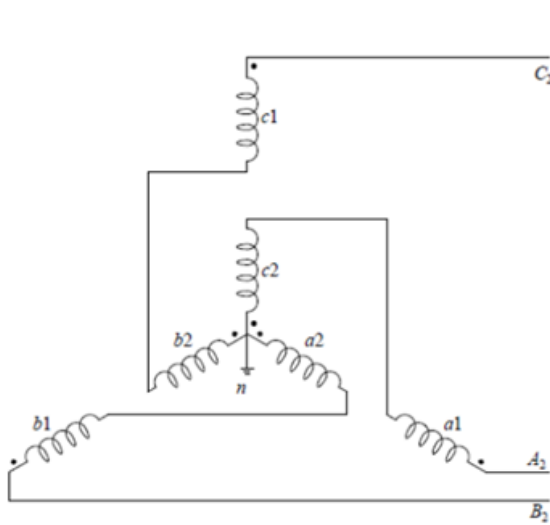


Figura 3.9.(a) - Ligação elétrica do transformador Zigue-Zague.

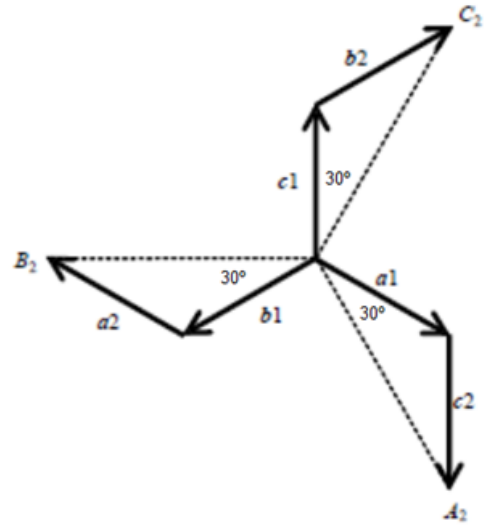


Figura 3.9.(b) - Diagrama fasorial do transformador Zigue-Zague.

O efeito mitigador harmônico implementado por esta alternativa se dá pelo cancelamento de componentes harmônicas específicas, decorrente do defasamento angular introduzido pelos enrolamentos representados na figura 3.9.

### 3.5. Compensador Série para Mitigação Harmônica Distribuída [4]<sup>12</sup>

Este item trata especificamente da descrição do desenvolvimento e implementação do sistema de síntese e inserção de impedâncias harmônicas ativas associadas ao conversor série proposto. O objetivo principal é descrever de forma sucinta as estruturas propostas e respectivas estratégias de controle do sistema a partir do desenvolvimento das equações e diagramas descritivos. O interesse de análise detalhada pode ser atendido em [4].

<sup>12</sup> G. J. França, B.J. Cardoso Filho, “Series-shunt Distributed Compensation for Harmonic Mitigation and Dynamic Power Factor Correction,” Tese de Doutorado. PPGEE-UFGM, 02/2010.

### 3.5.1. Descrição Geral

A impedância harmônica série ativa aqui proposta, é essencialmente uma fonte de tensão controlada, baseada em um conversor estático monofásico C.C.-C.A. A tensão harmônica induzida nos cabos de alimentação é determinada a partir da relação desejada entre corrente e tensão harmônicas. Essa relação é definida, independentemente da frequência fundamental, por uma ou mais frequências harmônicas no sistema elétrico.

Característica importante da impedância harmônica ativa, proposta neste trabalho, é a flexibilidade introduzida pela utilização de transformadores coaxiais de acoplamento, como pode ser visto na Figura 3.10. Essa solução permite a utilização de cabos de energia existentes, como enrolamento secundário. Em [7], um sistema de acoplamento semelhante foi discutido para aplicação de controle de fluxo de energia distribuído na frequência fundamental, proposto a fim de se obter flexibilidade e melhorar o mercado de energia renovável.

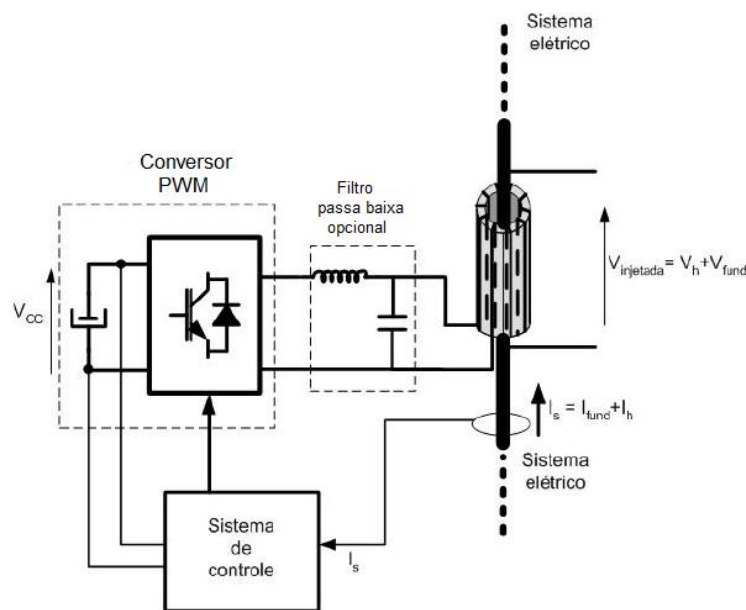


Figura 3.10 - Diagrama geral aplicado à impedância harmônica ativa monofásica [4].

Dispositivos de impedância harmônica ativos são unidades monofásicas independentes de baixa potência. Eles podem ser conectados em cascata para se conseguir a impedância harmônica total desejada em um único ponto ou distribuída a fim de se obter o controle do fluxo harmônico. A flexibilidade inerente ao sistema permite a sua utilização na dessintonia (ou sintonia) de bancos de capacitores, compostos por vários estágios, como uma alternativa para a utilização de um indutor por fase ou a instalação de bancos de filtros paralelos.

los. Desde que as cargas elétricas variem ao longo do dia, os bancos de capacitores automáticos típicos, utilizados para compensação reativa e filtragem, usam até 12 estágios de capacitores, a fim de se obter uma compensação eficaz a qualquer demanda de carga. Cada estágio capacitivo usa um indutor dedicado em sistemas dessintonizados e sintonizados que leva a sistemas de compensação reativos caros e pesados. A abordagem monofásica permite a vantagem de se tratar condições harmônicas desequilibradas, já que cada fase é tratada e compensada de forma independente das outras.

A Figura 3.11 mostra um diagrama de blocos da célula de impedância harmônica ativa. O secundário do transformador de corrente, caracterizado pelo cabo de energia do sistema elétrico, é medido, obtendo-se a corrente  $I_s$ . O primeiro estágio do  $PLL_{1\phi}$  é usado para se obter amplitude e fase daquela componente na frequência fundamental. A corrente fundamental estimada  $I_f$  é subtraída da corrente medida e o resultado  $I_h$  (componente harmônica) é direcionado para a entrada do próximo estágio de  $PLL_h$ , sintonizado para estimar a amplitude, frequência e a fase da ordem harmônica desejada.

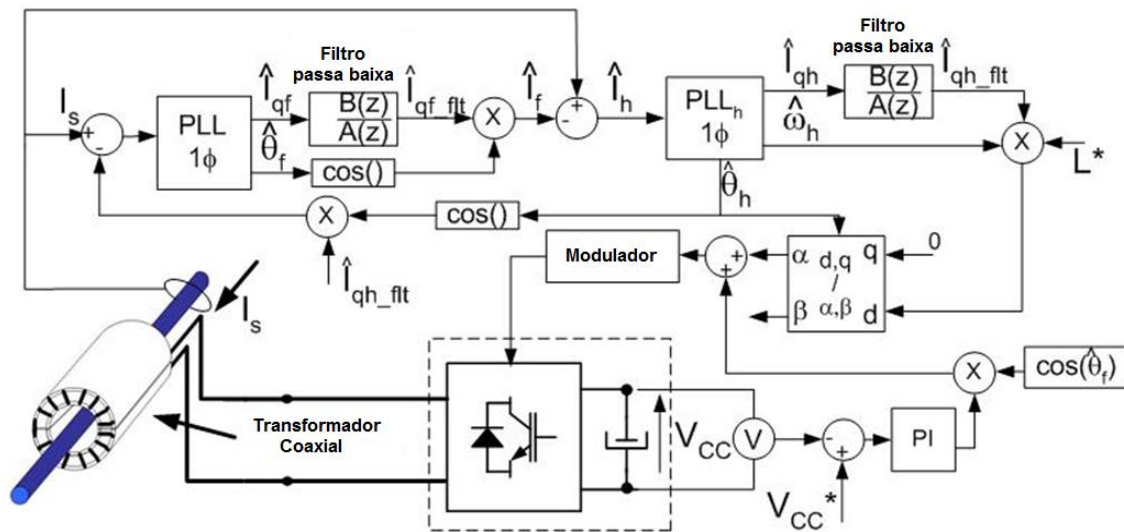


Figura 3.11 - Diagrama de blocos da célula de impedância harmônica ativa.

A fim de se aplicar o sistema proposto na compensação de componentes harmônicas diversas, é necessário introduzir algoritmos  $PLL$  adicionais e a transformada de Park inversa para cada ordem harmônica acrescida. Na prática, a compensação da 3ª, 5ª, 7ª e 11ª ordens harmônicas é suficiente para se obter resultados satisfatórios na maioria dos sistemas industriais e comerciais e, eventualmente, 13ª na presença de inversores de frequência. Neste

trabalho, a impedância harmônica sintetizada é uma reatância indutiva pura, representada pela indutância  $L^*$  na figura 3.5 e obedecendo à equação 3.17.

$$V_h = L^* \frac{dI_h}{dt} ; \quad (3.23)$$

na qual,  $I_h$  é a componente harmônica de ordem  $h$  da corrente a ser compensada.

Em [4], a implementação da equação 3.23 é realizada no referencial síncrono, utilizando-se a transformada de Park. Considera-se que a corrente  $I_s$ , que circula no secundário do transformador coaxial, corresponde à componente de eixo  $\alpha$ , referente à transformada de Clark, no PLL monofásico.

### 3.5.2. Implementação da Impedância Harmônica Ativa

Assim como nos algoritmos PLL utilizados, a equação 3.23 é implementada considerando-se a emulação de um sistema trifásico equilibrado. O cálculo da tensão a ser sintetizada, a partir daquela equação, é realizado no referencial síncrono, observando-se os referenciais de eixos da figura 3.12.

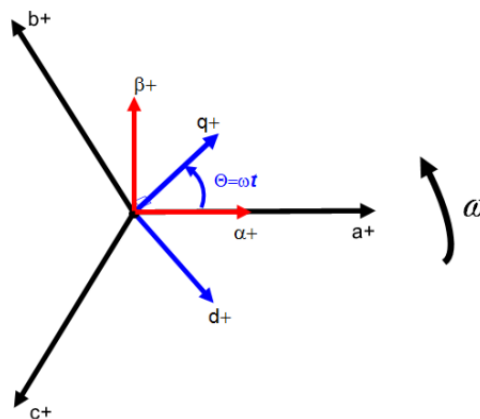


Figura 3.12 - Referenciais utilizados para os cálculos das transformações de eixos.

A transformação de Park aplicada às componentes  $\alpha$  e  $\beta$  é dada por:

$$I_q = I_\alpha \cos\theta_h + I_\beta \sin\theta_h \quad (3.24)$$

$$I_d = I_\alpha \sin\theta_h - I_\beta \cos\theta_h \quad (3.25)$$

onde:

$$\theta_h = \omega_h t + \phi_h \quad (3.26)$$

Derivando-se as equações 3.24 e 3.25 com relação ao tempo, temos:

$$\frac{dI_q}{dt} = \left( \frac{dI_\alpha}{dt} \cos\theta_h + \frac{dI_\beta}{dt} \sin\theta_h \right) - \omega_h (I_\alpha \sin\theta_h - I_\beta \cos\theta_h) \quad (3.27)$$

$$\frac{dI_d}{dt} = \left( \frac{dI_\alpha}{dt} \sin\theta_h - \frac{dI_\beta}{dt} \cos\theta_h \right) + \omega_h (I_\alpha \cos\theta_h + I_\beta \sin\theta_h) \quad (3.28)$$

Assumindo, como aproximação, uma condição de regime permanente:

$$\frac{dI_q}{dt} = \frac{dI_d}{dt} = 0 \quad (3.29)$$

$$\left( \frac{dI_\alpha}{dt} \cos\theta_h + \frac{dI_\beta}{dt} \sin\theta_h \right) = \omega_h I_d \quad (3.30)$$

$$\left( \frac{dI_\alpha}{dt} \sin\theta_h - \frac{dI_\beta}{dt} \cos\theta_h \right) = -\omega_h I_q \quad (3.31)$$

Com base no desenvolvimento representado pelas equações 3.24 a 3.31 e reconhecendo que nas equações 3.27 e 3.28 os termos do primeiro parêntese após o sinal de igualdade representam a transformação de Park das derivadas das componentes  $\alpha$  e  $\beta$  das correntes de interesse, as componentes da tensão a serem sintetizadas são calculadas, no referencial síncrono, da seguinte forma [20]:

$$V_{qh} = \omega_h L^* I_{dh} \quad (3.32)$$

$$V_{dh} = -\omega_h L^* I_{qh} \quad (3.33)$$

Aplicando-se a transformada inversa de Park ao resultado das equações 3.27 e 3.28 e tomando-se a componente de eixo  $\alpha$ , obtém-se a equação 3.34 que representa a referência de tensão em malha aberta a ser sintetizada pelo modulador PWM, vista pelo secundário do

transformador de acoplamento e responsável pela injeção da tensão associada à impedância (indutância) harmônica ativa de referência  $L^*$  desejada:

$$V_h = V_\alpha = -\omega L^* I_{qh} \text{sen}\theta_h \quad (3.34)$$

### 3.5.3. Algoritmos dos *PLL*

Os algoritmos dos *PLL* baseiam-se nas transformadas de Park para o tratamento das variáveis desejadas sobre uma estrutura de referência síncrona. O sistema de rastreamento com base no *PLL*, resumiu-se em um PI com objetivo de cancelar a componente do eixo “d”, resultante da transformada de Park [43]. O sistema proposto exige pelo menos dois algoritmos de *PLL* distintos: um para a obtenção da amplitude, frequência e fase da corrente de componente fundamental e outro módulo de *PLL* para obtenção os parâmetros de cada componente harmônica de interesse.

“Basicamente o PLL simula um sistema trifásico equilibrado utilizando como entrada as componentes dos eixos  $\alpha$  e  $\beta$  (transformação de Clark) do referencial estacionário para a aplicação da transformação para obtenção das grandezas no referencial síncrono. A componente  $\beta$  é obtida a partir da componente de eixo q, obtida da transformação de Park aplicada a um bloco de atraso no qual a constante de tempo é  $\tau$  [43], [44]. A saída do algoritmo é a amplitude do vetor representante da corrente de interesse – componente de eixo q, juntamente com a frequência e fase do vetor. O alinhamento é garantido a partir do controlador PI que objetiva manter nula a componente de eixo d calculada pela transformação de Park [4].”

Encontram-se na literatura várias alternativas para a aplicação de algoritmos de *PLL*, mas o método de transformação de coordenadas para o uso de referência síncrono tem sido amplamente aceito e adequado para a tecnologia proposta em [4]. Análise detalhada dos algoritmos *PLL* pode ser consultada em [43].

### 3.5.4. Considerações sobre o Transformador de Acoplamento Coaxial

O projeto do transformador coaxial deve levar em consideração a tensão máxima a ser injetada na frequência de interesse e, ainda, garantir a utilização do núcleo magnético em um nível de densidade de fluxo inferior ao nível de saturação magnética do material utilizado em sua construção como descrito na equação 3.34. Outro fator de importância é número de espiras do primário, o qual deve ser definido levando-se em consideração a tensão e corrente de trabalho dos semicondutores com melhor custo-benefício encontrado no mercado.

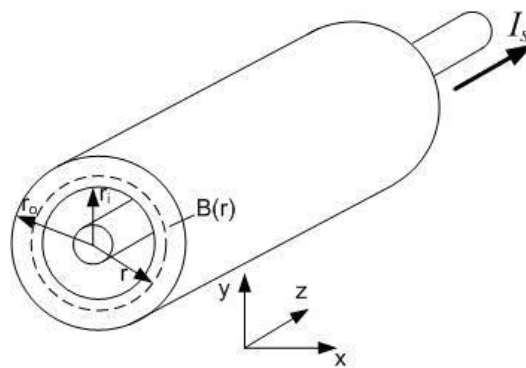


Figura 3.13 - Referências para análise do núcleo do transformador coaxial.

$$B(t) = B_f(t) + \sum_h B_h(t) < B_{satmax} \quad (3.35)$$

$$V_{h2rms} = \frac{B_h \omega h A_c}{\sqrt{2}} \quad (3.36)$$

A tensão harmônica eficaz, induzida no secundário do transformador, é dada pela equação 3.36. Considerando a tensão harmônica induzida como de entrada, 3.36, pode ser utilizada para o cálculo da seção mínima do núcleo magnético necessário para induzir a tensão harmônica desejada. O núcleo magnético deve ser escolhido satisfazendo, simultaneamente, as equações 3.35 e 3.36. O equacionamento e as especificações completas do transformador podem ser consultados em [4].

### 3.5.5. Resultados das simulações

#### Algoritmos dos *PLL*

As Figuras 3.14 e 3.15 mostram os resultados da simulação obtidos a partir da aplicação dos algoritmos de *PLL* para um sinal constituído por 1 p.u de componente fundamental acrescido de componentes harmônicas de 5ª e 7ª ordens, com amplitudes de 1 p.u e 0,1 p.u, respectivamente.

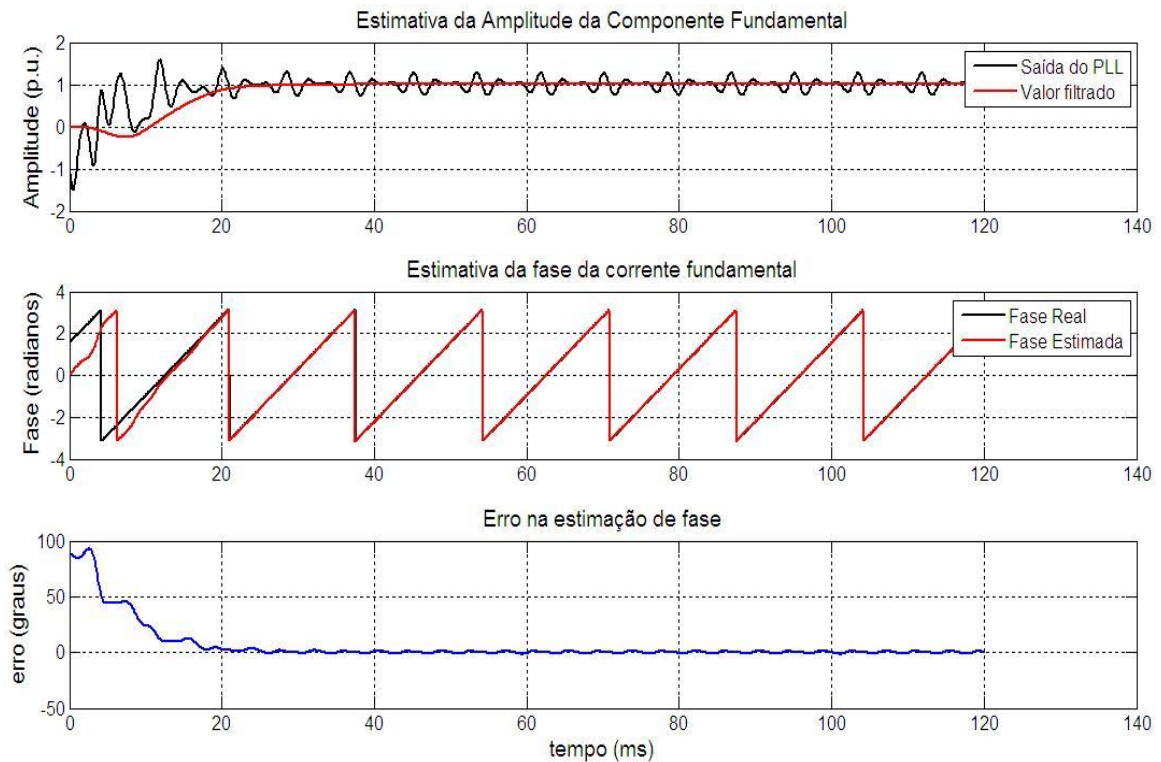


Figura 3.14 - Amplitude ( $I_q$ ) e ângulo de fase ( $\theta_f$ ), resposta obtida a partir do *PLL*.

Os resultados da simulação do *PLL* mostram a eficácia da implementação do algoritmo e como a componente fundamental e de 5ª harmônica foram corretamente rastreadas mesmo na presença de uma componente harmônica adicional.

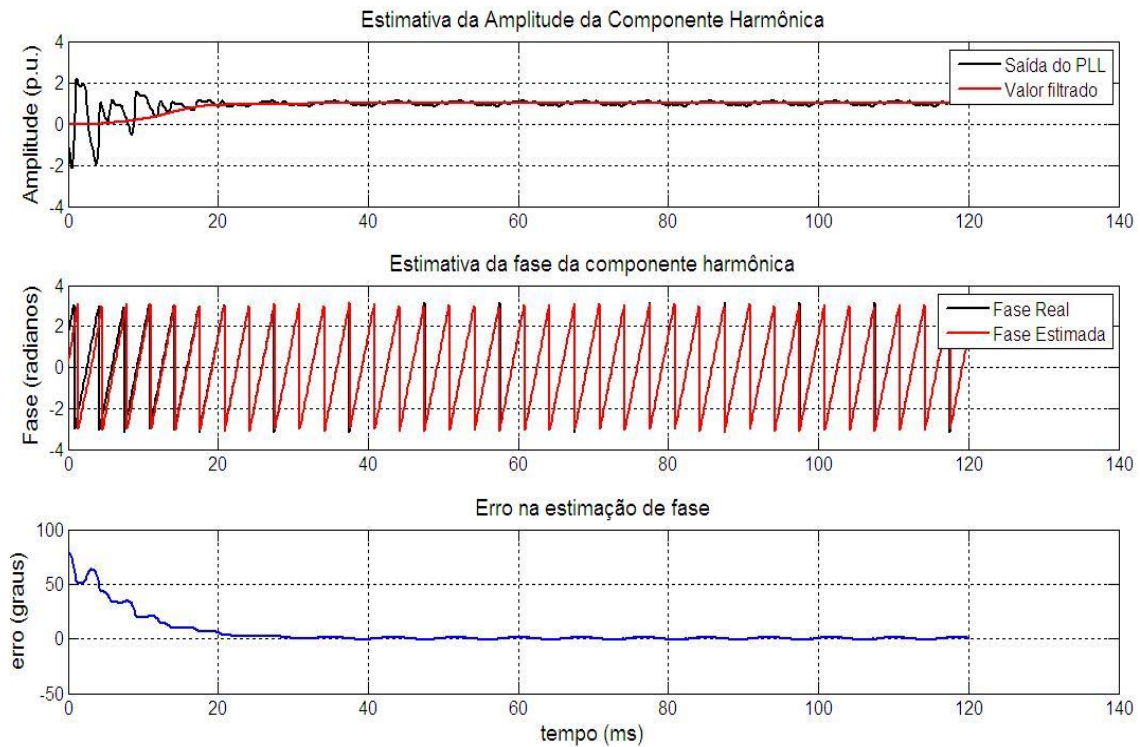


Figura 3.15 - Amplitude ( $I_{q5h}$ ) e ângulo de fase ( $\theta_{5h}$ ), resposta do *PLL* utilizado para estimar a componente de 5ª ordem.

### 3.6. Resultados experimentais

As experiências foram realizadas utilizando-se de um protótipo básico consolidado na Figura 3.16, com a tarefa de avaliar a viabilidade de induzir tensões harmônicas e da utilização de algoritmos de *PLL* para a obtenção da amplitude e dos ângulos de fase das componentes fundamentais e harmônicas de interesse, em tempo real. O protótipo teve em sua composição os seguintes principais elementos:

- ✓ Capacitor para correção de fator de potência com capacidade de 104  $\mu\text{F}$ ;
- ✓ Um autotransformador ajustável alimenta o capacitor;
- ✓ O sistema de controle foi implementado utilizando-se o hardware UPCC2812, baseado no processador TMS320F2812, a fim de desempenhar as funções de gerar a tensão de referência e a síntese harmônica de sinais PWM para controle dos IGBTs do inversor de frequência;
- ✓ O algoritmo do *PLL* foi desenvolvido para rastreamento de amplitude e fase das componentes fundamental e harmônica de 5ª ordem no capacitor;

- ✓ O transformador de acoplamento coaxial, responsável pela indução de corrente harmônica desejada no secundário.

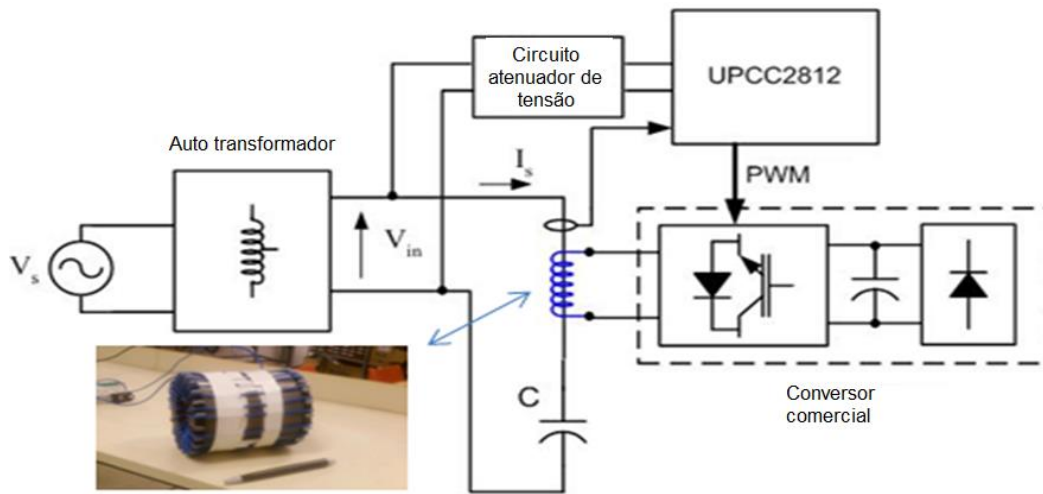


Figura 3.16 - Diagrama do protótipo experimental para avaliação da impedância harmônica ativa.

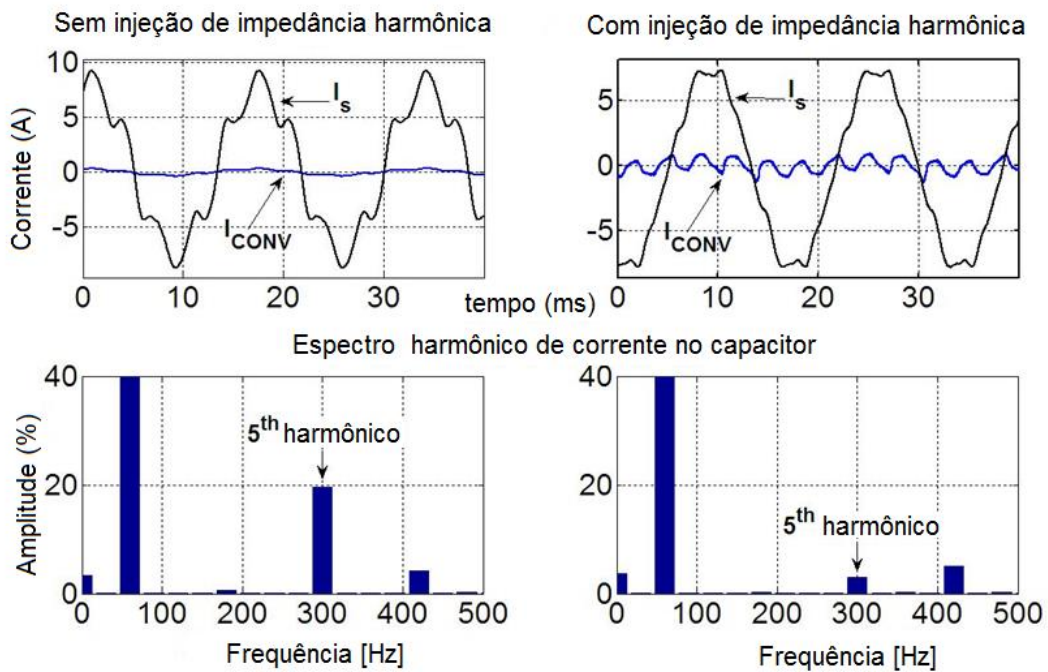


Figura 3.17 - Formas de onda de corrente no capacitor C e no conversor e espectro harmônico no capacitor antes e depois da mitigação.

Observa-se na figura 3.17 o desempenho do compensador através das suas formas de onda de corrente no capacitor e no conversor, nas duas situações de interesse: sem injeção de impedância harmônica e com injeção. A parte inferior ilustra o espectro harmônico sem e com compensação de impedância ativa. Observa-se a redução de 20% para 3% na amplitude de 5ª ordem, confirmando a capacidade do sistema proposto na mitigação harmônica.

### 3.7. Conclusão

O presente capítulo, de caráter informativo, foi desenvolvido no sentido de proporcionar uma visão geral a respeito dos temas afins mais comuns que envolvem a questão da distorção harmônica, suas causas e soluções para a mitigação, com ênfase na solução de injeção de impedância harmônica série ativa.

Nessa abordagem, pôde-se observar a disponibilidade de várias alternativas de controle da distorção harmônica, que podem ser tão simples como um banco de capacitores ou um reator de linha (bobinas de reatância), ou tão complexo como um filtro ativo. Uma ação de mitigação simples como adicionar, redimensionar ou se mudar de um banco de capacitores em derivação pode, efetivamente, modificar uma resposta em frequência desfavorável do sistema e, assim, trazer os índices de distorção harmônica a níveis aceitáveis. A eficácia de tais soluções simples no controle da distorção harmônica deve ser explorada antes de se considerar um dispositivo mais complexo [17]. Destaca-se entre as alternativas tecnológicas apresentadas o *Compensador Série para Mitigação Harmônica Distribuída* [4], o qual propõe implementação inovadora de conceitos no controle de distorções harmônicas, a qual será investigada de forma pragmática no próximo capítulo.

## CAPÍTULO 4

### A COMPENSAÇÃO SÉRIE NA MITIGAÇÃO HARMÔNICA EM INSTALAÇÕES COMERCIAIS - UMA ABORDAGEM PRÁTICA

#### 4.1. Introdução

O avanço da eletrônica de potência tem sido estimulado pela evolução contínua em tecnologias de dispositivos semicondutores e pelo incremento da produtividade em instalações comerciais e industriais que, por sua vez, exige economia de energia em seu processo produtivo. Máquinas e processos que utilizam conversores estáticos, fornos, fontes chaveadas, compensadores reativos são empregados em número crescente, aumentando a presença de cargas não lineares em parques industriais, e em menor escala, mas não menos relevante, em instalações de edifícios comerciais. Tais cargas implicam em novos desafios no sistema de energia elétrica, exigindo a atenção para a distorção harmônica de tensão e corrente.

Nesse sentido, este capítulo busca comprovar a eficácia do sistema proposto no Capítulo 3, item 3.5 - *Compensador Série para Mitigação Harmônica Distribuída* [4], associando conceitos e procedimentos teóricos e pragmáticos no trato efetivo da implantação do compensador série de impedância harmônica ativa em instalações prediais comerciais típicas. Para tanto, a estratégia adotada definiu em seu plano de ações etapas sequenciais a serem cumpridas, culminando com o dimensionamento, parametrização e inserção de impedâncias harmônicas, em planta comercial real, escolhida como estudo de caso e modelada na poderosa ferramenta computacional *PTW (Power Tools for Windows)*. A consolidação dos dados apurados nas prospecções literárias e de mercado, medições de campo, modelagens e simulações proporcionou um estudo consistente, que atrelado à relação conceitual da inovadora tecnologia objeto deste trabalho gerou os resultados ora apresentados, nos contextos das viabilidades técnicas e econômicas.

## 4.2. Síntese técnico-metodológica

A compensação harmônica por inserção de impedância ativa pode ser aplicada nas topologias em conexão série, paralela ou híbrida com o objetivo de controlar o fluxo de corrente harmônica, direcionando-o para caminhos que não causam danos aos componentes do sistema ao qual fazem parte. Este trabalho propõe uma análise de projeto de aplicação fazendo uso dos conceitos da inserção de impedância harmônica *série* ativa onde, impedâncias são acopladas apenas nas frequências harmônicas específicas desejadas. Importante característica do sistema proposto é a utilização de um transformador coaxial de acoplamento para inserção dessa impedância harmônica.

A opção pela filosofia de mitigação harmônica distribuída foi ratificada como premissa destes estudos ao término da fase de análises da qualidade de energia em campo, quando foi possível identificar os principais focos de distorções harmônicas presentes na planta. O edifício comercial selecionado apresenta uma alta densidade de cargas não lineares com relevante fluxo de correntes harmônicas. Esse considerável conteúdo harmônico pode provocar perdas elétricas significativas, especialmente no secundário da subestação transformadora e meios condutores de energia, tais como, cablagens e barramentos blindados. Os resultados globais desejados são investigados através da modelagem e simulação suportada pela ferramenta computacional *PTW - Power Tools for Windows / SKM*. Dados de distorções e fontes harmônicas são obtidos a partir de medições de campo na unidade considerada, caracterizando a situação antes e depois da aplicação da compensação série para mitigação harmônica.

## 4.3. Aplicação em Edificação Predial Comercial

Em instalações comerciais típicas as fontes harmônicas encontram-se distribuídas por toda planta, contribuindo de forma heterogênea para o sistema, tanto do ponto de vista de intensidade quanto em localização. O perfil de edificações desta natureza favorece o princípio da compensação distribuída adotado neste trabalho em consonância com a prática adotada em [1] e [2], ou seja, a recomendação da implantação de filtros ou equipamentos compen-

sadores o mais próximo possível das fontes harmônicas mais relevantes. Ao fazer isso, o sistema instalado será capaz de alcançar redução global em perdas elétricas e o consequente consumo eficiente de energia tanto em kW quanto em kVAr, além de atender aos índices padronizados de distorção harmônica. No entanto, esse método muitas vezes se torna dispendioso, devido à quantidade de mitigadores a serem instalados e as dificuldades em se adaptar a infraestrutura existente a solução. Portanto, análise prévia detalhada da qualidade de energia da edificação se mostra imprescindível, pois pode apontar os locais de maior concentração e relevância destas fontes harmônicas, as quais então poderão ser objeto da alocação de alternativas mitigadoras caso os estudos de viabilidade técnica e econômica se mostrem viáveis. Neste aspecto a flexibilidade intrínseca do *SAHI* se mostrará relevante.

#### **4.4. Caracterização da edificação**

A escolha das instalações objeto destes estudos obedeceu ao atendimento dos seguintes critérios:

- a) Condições de infraestrutura recente, moderna e em ótimo estado de conservação;
- b) Contratos de manutenção vigentes de longo prazo, a fim de evitar inoperância prolongada das cargas, garantindo a sequência dos trabalhos de campo;
- c) Tarifa energética definida e sem previsão de revisão contratual junto à concessionária em longo prazo com o objetivo de se determinar a viabilidade econômica;
- d) Regularidade em seu consumo energético;
- e) Disponibilidade de plantas de projetos e lista de equipamentos atualizados;
- f) Carga instalada e demanda similares à maioria dos prédios existentes na rede bancária, ou seja, como projeto piloto, sua representatividade deve ser a mais realista possível, o que sugere uma densidade populacional de 0,17 pessoas/m<sup>2</sup>;
- g) Relação de cargas, invariavelmente inerentes a instalações elétricas prediais comerciais, as quais espelham a proporção de que, 55 % do consumo de energia são devidos ao sistema de condicionamento de ar e 30 % são provenientes de cargas não lineares incluindo-se nesse contingente os elevadores.

Com base nessas premissas, as instalações escolhidas para análise e testes se concentram em edifício comercial predial bancário com as seguintes características:

- Tipo: construção comercial;
- Pavimentos: 11;
- Área construída: 9.000 m<sup>2</sup>;
- População: 1.200 pessoas;
- Potência instalada: 1.500 kVA;
- Potência demandada: 655 kW;
- Tarifa horo sazonal Azul AS;
- Entrada de energia: câmara transformadora  $\Delta/Y$  aterrada 13,8kV/220V
- Perfil das cargas: condicionamento de ar 54%, cargas não lineares 36%, outras 10%;
- Cargas não lineares típicas: monofásicas 127V;
- Disponibilidade de projetos, listas das cargas, equipamentos, sistemas e suas especificações.



Figura 4.1 - Plano de face frontal do QGBT.

A figura acima, além de situar o posicionamento dos disjuntores gerais no QGBT, oferece noção da boa qualidade das instalações e dos generosos espaços físicos disponíveis para trabalho.





## 4.5. Metodologia

A metodologia adotada neste estudo de caso teve o cronograma a seguir descrito:

a) Prospecção de campo: teve-se como referência o registro em banco de dados das medições das grandezas elétricas, colhidas em todos os quadros e painéis elétricos, e que viessem a propiciar avaliações do desempenho energético e da qualidade da energia de toda a planta; para tanto, fez-se uso do analisador de qualidade de energia (Fluke 434).

Tendo como base o regime de funcionamento permanente, não se contempla nas análises de comportamento das grandezas elétricas, transientes de qualquer natureza em instalações comerciais (comutação de bancos de capacitores, partida de motores, magnetização de transformadores, acionamentos de elevadores, etc), portanto os valores apurados são instantâneos, sendo consideradas as médias simples das medições para as situações intermitentes como elevadores, citados adiante.

A fim de garantir maior precisão e convergência dos dados apurados, recomenda-se promover o maior número de amostragens das medições de campo no menor intervalo de tempo possível, em conformidade com a IEC 61000-4-30, registrando os momentos de maior demanda de energia. Para cargas intermitentes como elevadores, cujas cargas acionadas oscilam com a variação da taxa de ocupação das cabines, obter o máximo de medições por intervalo de tempo, em face da variação de corrente em função do torque.

b) Modelagem: de toda a instalação na ferramenta *PTW*, onde todos os componentes (equipamentos, elementos, barramentos, cablagens, painéis e cargas) são devidamente inseridos, configurados e especificados fidedignamente com dados reais dos fabricantes, placas de identificação, especificações afins e projetos atualizados.

c) Investigação, identificação e ratificação no *PTW* da existência e dos melhores pontos para instalação dos dispositivos de impedância harmônica ativos. Dois pontos são identificados como sendo de maior incidência de distorção harmônica (vide Tabela 4.4 adiante), dos quais o BW-QGBT/EE apresentava inclusive desconformidade com os padrões normalizadores do IEEE Std 519-2014 [10], tomados como referência nestes estudos e vigentes no simulador :

- a entrada do ramal de alimentação do banco de capacitores automatizado para correção do fator de potência denominado **PFC CB** ( ponto de baixa impedância, convergente de fluxos de correntes harmônicas). Este ponto é parte integrante do barramento denominado BUS - En+EE o qual, além de estar sujeito à atuação do banco de capacitores, sustenta o alimentador principal das cargas essenciais e não lineares da instalação e cargas comuns exceto ar condicionado;
- o ponto de conexão comum denominado **BUS - TC Rooms and Elev**, o qual supre a maioria das cargas não lineares que compõem o parque de equipamentos informatizado da edificação, inclusive no-breaks e elevadores de emergência, perfazendo parte da barra de energia essencial - BUS EE - garantida pelo Grupo Motor Gerador de emergência e contribuindo com 69% das cargas críticas não lineares e alto nível de distorção harmônica de corrente.

d) Dimensionamento e modelagem do dispositivo de impedância harmônica ativa, no PTW. Vide Figura 4.11, adiante.

Neste momento, duas das premissas propostas neste estudo se concretizam:

- ✓ a identificação e seleção adequada dos pontos de aplicação do dispositivo de impedância harmônica ativa serie - *SAHI* e;
- ✓ o dimensionamento de tais unidades na instalação;
- ✓ simulações nas situações com e sem o compensador harmônico.

e) Análise das viabilidades técnicas e econômicas da solução: tal modelo deve apresentar desempenho equivalente aquele alcançado nos ensaios desenvolvidos em [4], comprovando sua eficácia nos estudos de simulação como tecnologia de compensação harmônica inovadora.

#### **4.6. Prospecção de campo**

Já nesta oportunidade, foi possível, através das medições com o analisador de qualidade de energia, identificar e registrar, inclusive, os pontos de maior incidência de distorção harmônica. Assim, perante o cenário identificado nesta fase, pôde-se ter a perspectiva da via-

bilidade técnica na aplicação do dispositivo de impedância harmônica ativa ou *SAHI* como alternativa mitigadora, considerando:

- ✓ as condições físicas favoráveis no que tange ao espaço mínimo disponível tanto dentro dos painéis para inserção dos transformadores coaxiais, quanto nas salas, para alocação dos quadros de processamento, e;
- ✓ os índices de DHTi apurados e consolidados nas tabelas 4.1, 4.2 e 4.3 apresentadas adiante, e que registram índices elevados nas componentes de 3ª e 5ª ordens.

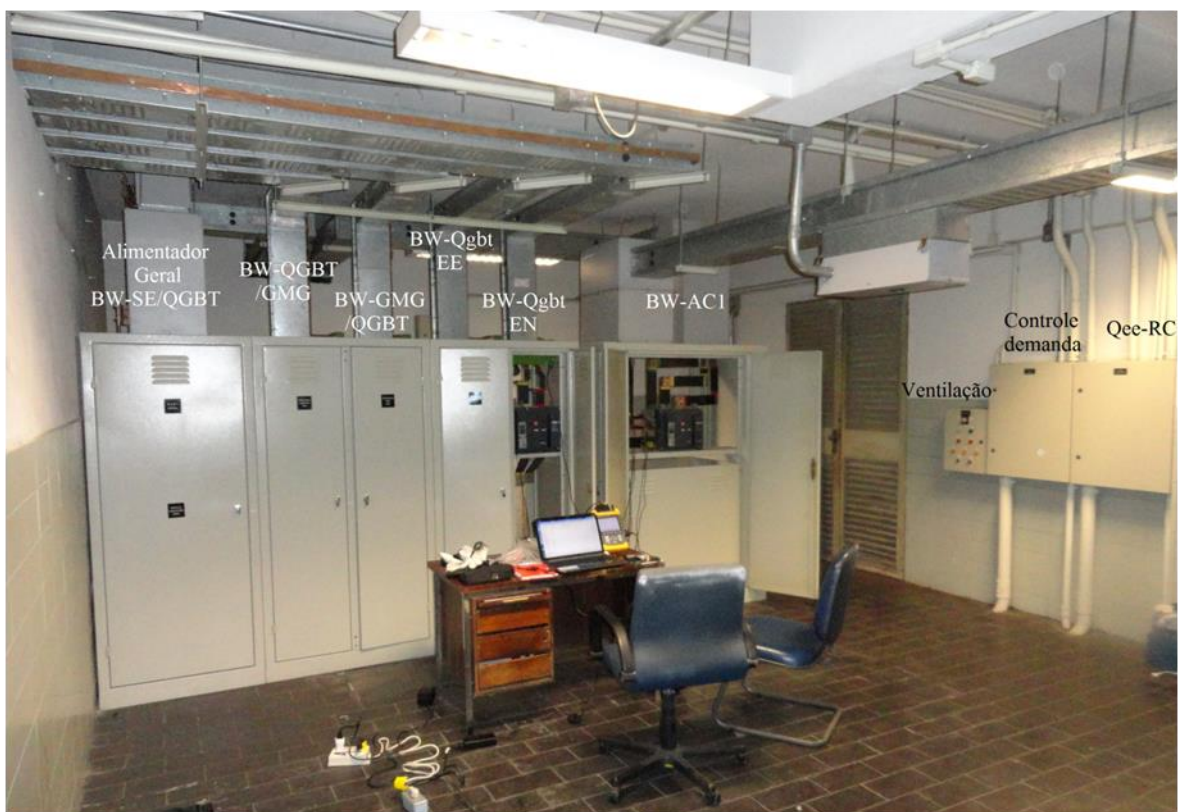


Figura 4.4 - Vista geral da sala de painéis de baixa tensão do edifício.

A figura 4.4 destaca da esquerda para a direita: QGBT, QAC (quadro de ar condicionado), Controle de demanda e QEE-RC (quadro de energia essencial do rés do chão). É possível verificar também a identificação dos barramentos blindados que entram e saem dos painéis, cuja identificação esta alinhada com os diagramas de projeto constantes nas figuras 4.2 e 4.3 e modelados no *PTW* adiante.

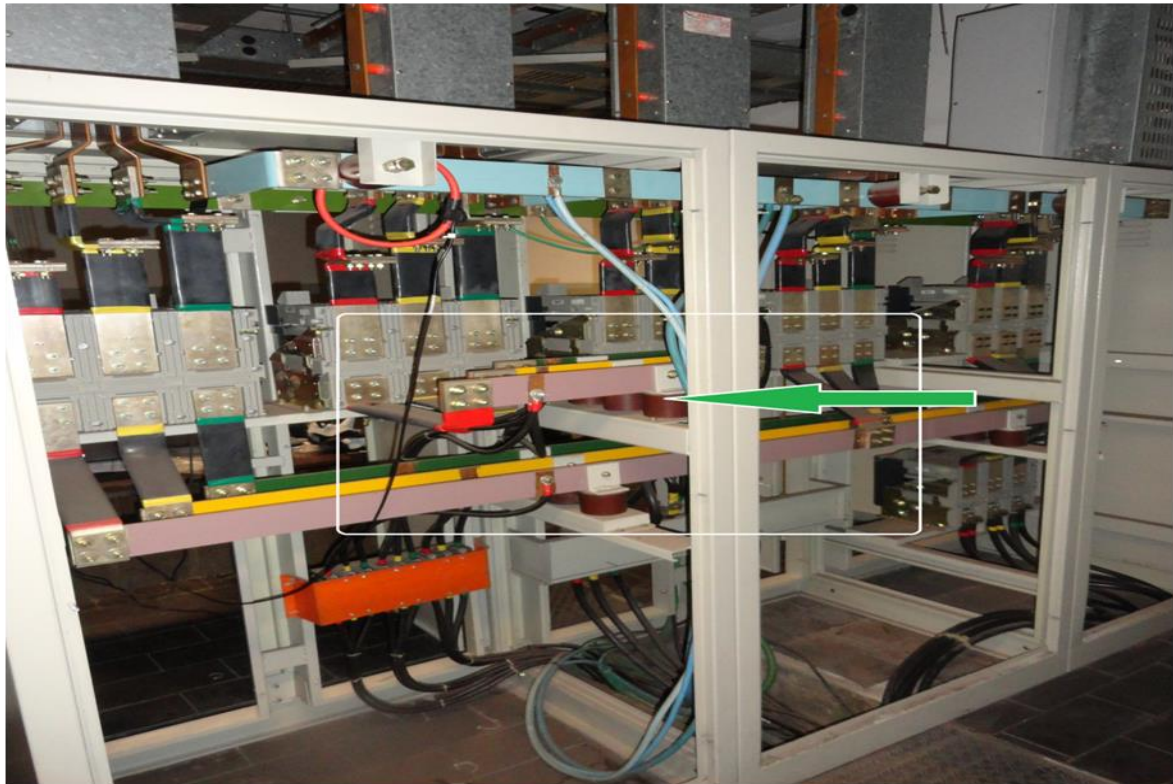


Figura 4.5 - Plano de face posterior do QGBT.

Identifica-se na figura 4.5 a localização do barramento BW-QGBT/EE, recomendado a receber o SAHI.

Tabela 4.1 - DHTi no barramento BW- QGBT/EE antes da compensação.

Amp	A	B	C	N
THD% f	26,4	26	26,6	1064
H3% f	22	22,9	23,1	1088
H5% f	11,8	10,8	12,1	70,4
H7% f	6,8	4	3,7	66,3
H9% f	3,1	1,6	1,3	71,3
H11% f	1,2	1,8	2,3	11,1
H13% f	3,5	2,9	2,1	29
H15% f	1,6	1,1	0,7	41,8

A tabela 4.1 registra os índices de DHTi, obtidos no barramento BW-QGBT/EE, demandado pelas cargas do alimentador BUS-TC Rooms and Elev. Medições coletadas com o analisador de qualidade de energia antes da otimização.

Tabela 4.2 - DHTi no barramento BW-GMG/QGBT antes da compensação.

Amp	A	B	C	N
THD% f	20.6	20.8	19.1	1026
H3% f	17.8	19.1	17.8	1033
H5% f	7.6	6.9	5.7	80.6
H7% f	5.7	3.4	2.6	55.2
H9% f	2,5	1,4	1,6	85,2
H11% f	1	1,1	1,3	11,9
H13% f	2,4	1,8	0,9	26,1
H15% f	1,1	0,5	0,6	36,1

A tabela 4.2 registra os índices de DHTi, obtidos no barramento BW-GMG/QGBT, demandado pelas cargas do alimentador BUS-EE. Medições coletadas com o analisador de qualidade de energia antes da otimização.

Tabela 4.3 - DHTi no barramento BW-SE/QGBT antes da compensação.

Amp	A	B	C	N
THD% f	13	11,2	9,9	307,6
H3% f	7,9	8,7	7,4	305,8
H5% f	6,8	4,7	4,1	27
H7% f	6,3	4,4	4,1	22,6
H9% f	1,7	0,5	0,7	42,4
H11% f	1,2	1,4	1,6	7,3
H13% f	3,1	2,3	2	15,3
H15% f	0,7	0,5	0,3	15,5

A tabela 4.3 mostra as medições de DHTi coletadas com o analisador de qualidade de energia antes da otimização, obtidas no barramento BW-SE/QGBT, demandado pelo alimentador BUS-En+EE e tendo a contribuição das cargas reativas de baixa impedância do Banco de Correção de Fator de Potência, principalmente nas harmônicas de ordens 5<sup>a</sup> e 7<sup>a</sup>, além das cargas não lineares penduradas no barramento BW-QGBT/EE.

As Tabelas 4.1 e 4.2 revelam a presença de valores harmônicos de elevada intensidade, gerados por cargas não lineares localizadas a jusante das instalações denominadas: *TC Rooms and Elev.*

A presença da componente harmônica de 3ª ordem distribuída por toda a rede que atende os barramentos de cargas não lineares se deve em parte às características das fontes monofásicas típicas das cargas de edificação comercial. Identifica-se também nesta etapa, que as tensões se encontram equilibradas, conforme mostram as figuras 4.6, 4.8 e 4.10, entretanto, observa-se coerentemente com os índices de 3ª ordem e de neutros apurados, um desequilíbrio de corrente entre fases, tanto em amplitude quanto angular, superando a tolerância máxima recomendada de 2,5 % entre fases.

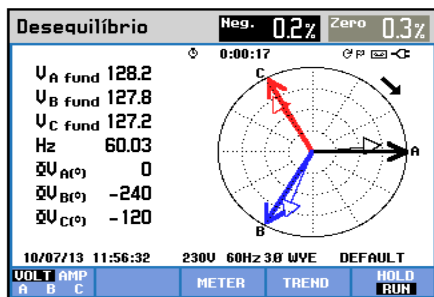


Figura 4.6 - QGBT Geral

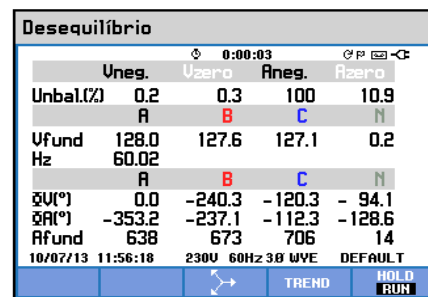


Figura 4.7 - QGBT Geral

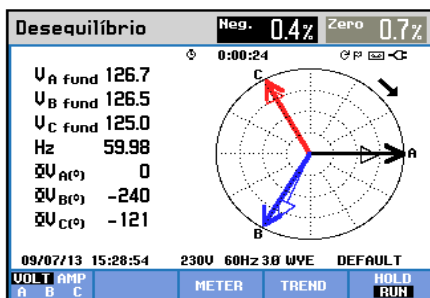


Figura 4.8 - QEE Energia  
Essencial Total

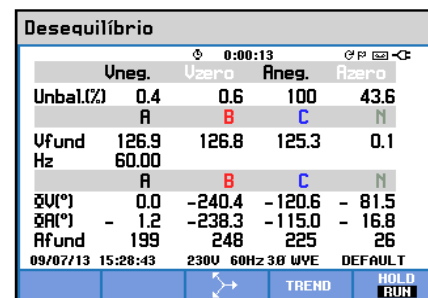


Figura 4.9 - QEE Energia  
Essencial Total

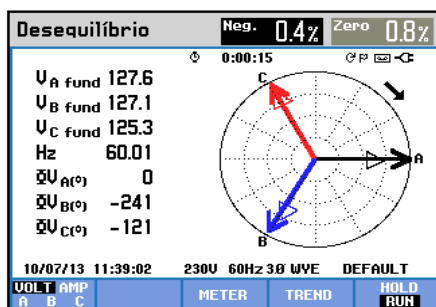


Figura 4.10 - QEE Energia  
Essencial Parcial

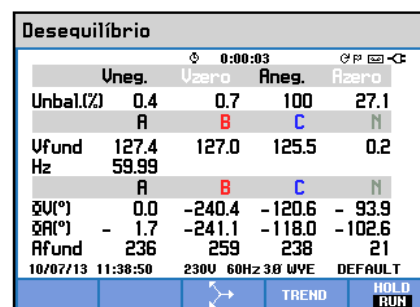


Figura 4.11 - QEE Energia  
Essencial Parcial

As figuras 4.3 a 4.8 - Apresentam equilíbrio trifásico de tensões < 2,5 % - IEEE Orange Book – 446/1995 (3) e < 2,0 % ONS e ANEEL , e desequilíbrio trifásico entre correntes nos três pontos estratégicos da planta, os barramentos QGBT GERAL sem ar condicionado, QEE Total e QEE Parcial (5,06 % , 10,7% e 6% respectivamente) podendo caracterizar um desbalanceamento de cargas.

Como consequência, os elevados níveis de DHTi de neutro registrados nas tabelas 4.1, 4.2 e 4.3, são possivelmente, resultado das convergências das distorções harmônicas de 3ª ordem e suas múltiplas que se somam e tendem a fluir através daqueles condutores[3] [17], reforçando assim a necessidade de mitigação das mesmas.

As amplitudes rms de corrente apuradas no barramento BW-QGBT/EE, demandado pelas cargas do barramento *BUS-TC Rooms and Elev* nesta etapa, e consolidados na figura 4.12, se mostram relativamente elevados para a carga instantânea demandada, apontando fator de potência que poderia ser melhor. Este fato se deve à parcela de contribuição do fator de distorção harmônica que predomina no resultado final do fator de potência, apesar do fator de potência de deslocamento das fontes chaveadas, se aproximarem da unidade.

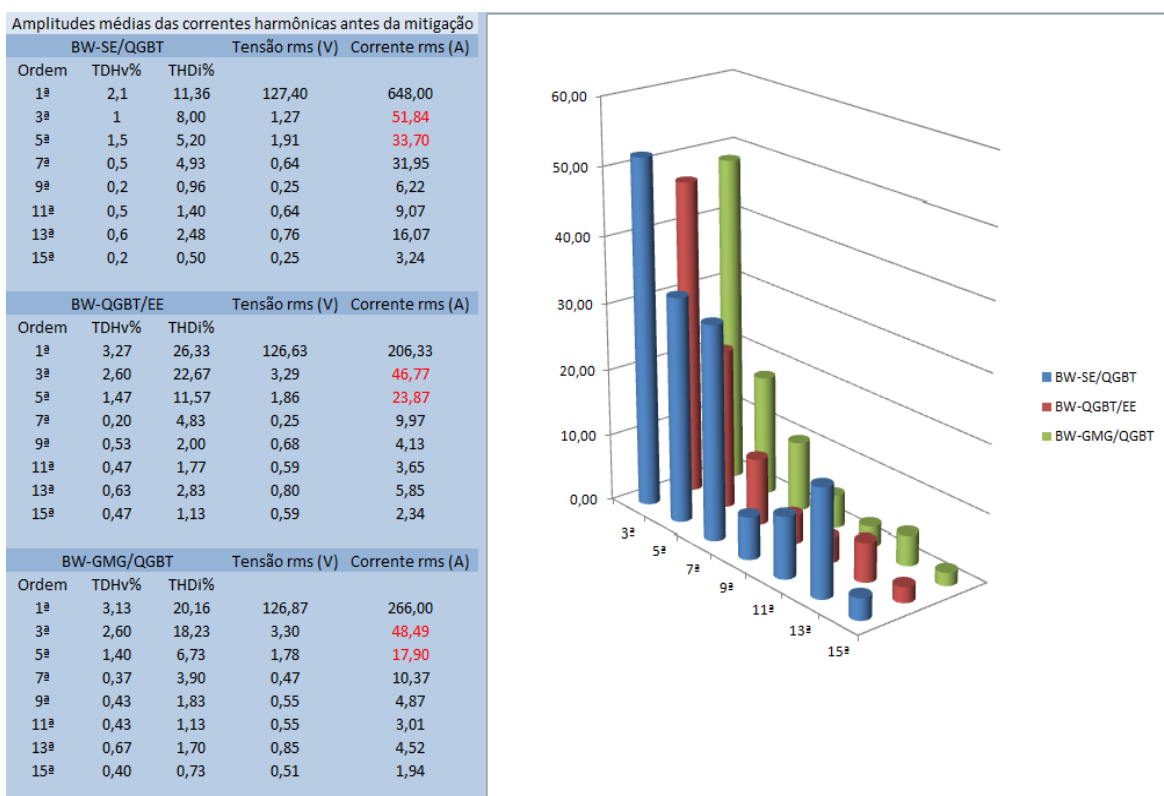


Figura 4.12 - Amplitudes médias das correntes harmônicas antes da mitigação.

## 4.7. Modelagem e Simulação das Instalações

### Especificidade na modelagem de ambientes em operação

A modelagem de sistemas reais em funcionamento pressupõe considerações e critérios previamente bem definidos os quais permearam a investigação de sua performance, repercutindo diretamente nos resultados finais, dentre eles:

- ✓ Para estes estudos o regime permanente de funcionamento dos sistemas elétricos foi adotado, excluindo-se do objeto de análise eventuais situações de performances transitórias e dinâmicas das instalações objeto de análise, tais como, correção dinâmica do fator de potência e possibilidades ressonantes em ordens harmônicas diversas. Para tanto, os valores considerados nas medições e simulações são eficazes e instantâneos;
- ✓ O conhecimento pleno da edificação nos aspectos da infraestrutura, funcionamento e condições de manutenção;

A peculiaridade de cada instalação no que tange: ao dimensionamento de projeto executivo, arranjo de distribuição desde o modelo de fornecimento de energia pelas concessionárias, elementos que compõem a infraestrutura (parque de cargas, elementos de manobra e proteção, elementos de condução), condições climáticas e de demanda, impedâncias próprias de equipamentos e infraestrutura, impõem às instalações características individuais, relacionadas a fator de carga, e temperatura, os quais atribuirão índices também exclusivos em DHT, e perdas em kW e kVAr, antes e após a implementação de soluções mitigadoras de harmônicos, repercutindo diretamente na viabilidade econômica do processo.

A adoção destas premissas, além de ajudar a contornar situações adversas das transitoriedades do comportamento dos sistemas elétricos, não prejudicam a confiabilidade e validade dos resultados.

Enfim, não é recomendável que os resultados apurados em determinado estudo sejam linearmente extrapolados para outras instalações mesmo quando similares.

## Procedimentos

Inicialmente, toda a instalação caracterizada no item 4.4, foi modelada no *PTW*, onde todos os componentes foram devidamente configurados e especificados com dados reais dos fabricantes, resultando na Figura 4.13 adiante.

A investigação de desempenho via simulação do sistema elétrico ratificou os resultados mencionados na primeira etapa obtidos com o analisador de qualidade, identificando dois pontos de distorção harmônica de correntes com amplitudes mais elevadas, ou seja:

- BUS-TC Rooms and Elev, e;
- BUS-En + EE;

cujos números são registrados na Tabela 4.1 e Figura 4.18, e Tabela 4.3 e Figura 4.19 respectivamente.



Observa-se neste momento que a implementação do SAHI em série com o barramento BW-QGBT/EE responde por importantes potenciais vantagens:

- ✓ Contribui para reduzir os níveis de DHTi e DHTv atuais envolvidos em todo o sistema, pois concentra-se mais a jusante na planta, garantindo mitigação harmônica das cargas e meios condutores a montante, incluindo todo o barramento de energia essencial - BUS EE;
- ✓ Envolve menores níveis de corrente, conseqüentemente, favorece dimensões e custos do SAHI;
- ✓ Dispõe de facilidades físicas de instalação do equipamento tais como: acesso e espaço em painel seguro;
- ✓ Segmentação de barramento não comprometendo outras cargas, permite a intervenção concorrente.

As condições de elevados níveis de DHTi de 3ª e 5ª ordens estão registrados na Tabela 4.4 e situados na Figura 4.13 - Diagrama de Qualidade de energia antes da otimização.

Tabela 4.4 - Consolidação de dados do PTW sem SAHI.

RELATÓRIO DO ESPECTRO HARMÔNICO DE CORRENTE SEM SAHI				
BW-QGBT/EE	Perdas kW	Perdas kVAr	Ordem Harmônica/ DHTi%	IEEE-519 Limites
<b>SEM SAHI</b>	0,28	0,753	1/22,14	12
			3/19,07	10
			5/10,23	10
BW-GMG/QGBT	Perdas kW	Perdas kVAr	Ordem Harmônica/ DHTi%	IEEE-519 Limites
<b>SEM SAHI</b>	0,27	0,705	1/18,47	15
			03/15,90	12
			5/8,88	12
BW-SE/QGBT	Perdas kW	Perdas kVAr	Ordem Harmônica/ DHTi%	IEEE-519 Limites
<b>SEM SAHI</b>	0,18	0,251	1/13,26	15
			3/8,276	12
			5/8,607	12

A tabela 4.4 consolida o cenário objeto destes estudos à luz do *PTW* antes da implementação do *SAHI*, e apresenta os números de perdas em potência causadas pelas respectivas distorções harmônicas. Mais uma vez elevados índices de *DHTi* são apurados e comparados com os limites estabelecidos pelo *IEEE-519*.

#### Modelagem das cargas harmônicas no *PTW*

As instalações comerciais objeto destes estudos, ratificam através das medições de campo registradas na figura 3.4 e tabelas 4.1 à 4.3, seu perfil típico e predominante distorção nas harmônicas de corrente de 3<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup> e 7<sup>a</sup> ordens, causado pela presença maciça de cargas monofásicas supridas por fontes chaveadas e elevadores acionados por dispositivos de velocidade variável.

A forma com que aquelas cargas contribuem nas distorções harmônicas de tensão e corrente introduz critérios na modelagem das mesmas no que tange a sua natureza como fonte de tensão ou corrente harmônica. Os *ASDs* se definem como fontes de corrente, cabendo ressalvas quanto às fontes de tensão chaveadas:

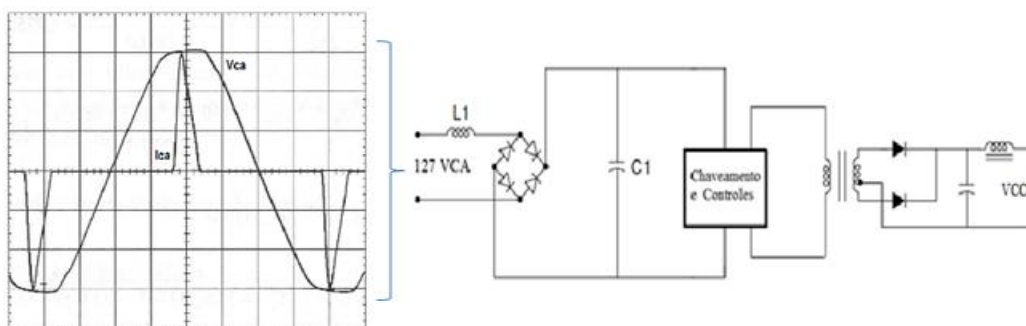


Figura 4.14 - Forma de onda de tensão na rede, gerada pela fonte chaveada.

Verifica-se na figura 4.14, comportamento natural da fonte de tensão com retificador a diodo/capacitor, distorcendo a onda de tensão da rede e tendo seu valor de pico atenuado. Este fato torna recomendável que a modelagem destas cargas se configure como fontes harmônicas de tensão, entretanto a ferramenta de simulação não permite modelá-las como fontes de tensão e inseri-las em paralelo com os alimentadores, mas sim como fontes de corrente. Portanto este procedimento foi adotado nas simulações, o qual não comprometeu a consistência dos resultados, pois gerou com boa aproximação as distorções de corrente e tensão identificadas na etapa de prospecção de campo.

## Implementação do SAHI no PTW

A Figura 4.15 abaixo mostra a forma de onda de tensão parametrizada no PTW e os parâmetros que a definiram (amplitudes e ângulos). *Representa o sinal equivalente sintetizado pelo modulador PWM na modelagem de [4], visto no lado do secundário do transformador de acoplamento, e responsável pela injeção da impedância harmônica ativa na ordem harmônica desejada.* Como mostrado na Tabela 4.4, a relevância das harmônicas de 3ª e 5ª ordens é evidente, merecendo atenuação por parte do compensador.

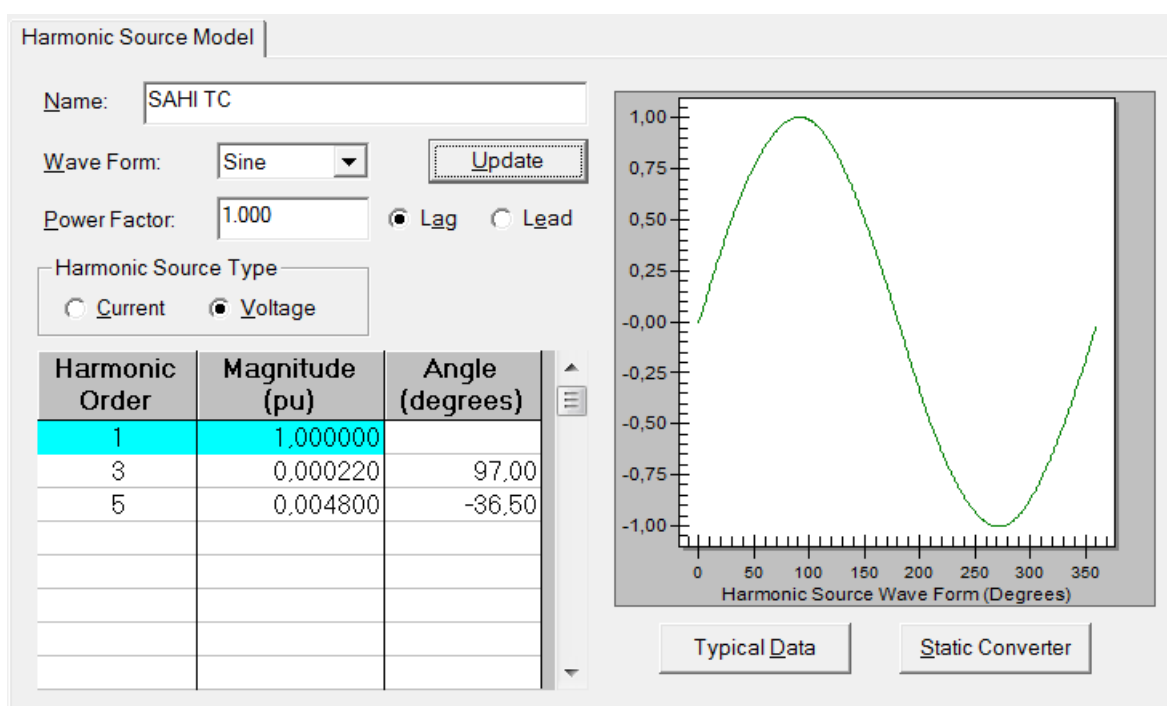


Figura 4.15. Forma de onda de tensão a ser injetada pelo SAHI TC, parametrizada no PTW.

A obtenção dos valores de magnitude e ângulo para 3ª e 5ª ordens, ilustrados na Figura 4.15, têm como pontos de partida números calculados pelo software na situação sem otimização, que submetidos ao processo de dimensionamento descrito adiante e consolidado na tabela 4.5, resultaram na amplitude das componentes harmônicas e seus respectivos ângulos de fase *defasados em quadratura* com as respectivas referências de corrente naquela situação.

O processo de dimensionamento da impedância harmônica é baseado na variação constante dos valores de impedância harmônica reativa, vinculada à relação V/I, que está sempre ajustada ao ângulo de atraso da corrente medida anteriormente, atingindo o ponto de miti-

gação ideal. A tabela 4.5 consolida os números aplicados e obtidos no procedimento cuja metodologia apresenta desempenho equivalente à tecnologia de compensação harmônica descrita em [4], comprovando sua eficácia nos estudos de simulação. A validação do procedimento lógico adotado no PTW, para obter as impedâncias a serem injetadas nas ordens harmônicas desejadas é consumado nas figuras 4.16 e 4.17.

Tabela 4.5 - Ábaco sinótico de impedâncias harmônicas.

V(pu) 3h injetada	Ângulo de fase ( $\theta$ ) de Tensão injetado	Valores obtidos no PTW		Ângulo de fase de Corrente em quadratura ( $\theta + 270^\circ$ )	Z ( $\Omega$ )/fase $10^{-3}$	S3h (VA)
		I(A)	Ângulo de fase ( $\theta$ ) de Corrente			
0,0001	0	11,953	-143,13	126,87	0,001064	0,152003
0,000100	104	7,45	-166,81	103,19	0,001707	0,094740
0,000120	103	6,705	-167,92	102,08	0,002276	0,102319
0,000140	102	5,957	-169,07	100,93	0,002989	0,106055
0,000160	101	5,206	-170,27	99,73	0,003908	0,105926
0,000180	100	4,452	-171,53	98,47	0,005142	0,101907
0,000200	98	3,959	-170,95	99,05	0,006424	0,100691
0,000220	97	2,894	-171,78	98,22	0,009667	0,080965

V(pu) 5h injetada	Ângulo de fase ( $\theta$ ) de Tensão injetado	I(A) obtida	Ângulo de fase ( $\theta$ ) de Corrente obtido	Ângulo de fase de Corrente em quadratura ( $\theta - 90^\circ$ )	Z ( $\Omega$ )/fase $10^{-3}$	S5h (VA)
0,00010	-32,00	41,61	58,76	-31,24	0,000306	0,529106
0,00020	-32,00	40,81	58,66	-31,34	0,000623	1,037815
0,00040	-32,00	39,20	58,44	-31,56	0,001298	1,994090
0,00060	-32,00	37,60	58,20	-31,80	0,002029	2,868902
0,00080	-32,00	36,00	57,90	-32,10	0,002826	3,662224
0,00100	-32,00	34,40	57,65	-32,35	0,003697	4,373931
0,00140	-32,00	31,20	56,99	-33,01	0,005706	5,554504
0,00180	-32,00	28,01	56,19	-33,81	0,008174	6,410393
0,00200	-32,00	26,41	55,71	-34,29	0,009630	6,717249
0,00240	-33,00	23,18	55,39	-34,61	0,013167	7,074284
0,00300	-35,00	18,29	56,10	-33,90	0,020854	6,979214
0,00350	-35,00	14,29	54,58	-35,42	0,031149	6,359844
0,00400	-35,00	10,30	52,07	-37,93	0,049395	5,238289
0,00450	-36,00	6,23	52,05	-37,95	0,091884	3,564000
0,00480	-36,50	3,79	52,04	-37,96	0,161014	2,314044

A determinação dos ângulos de fase e amplitudes de cada componente harmônica é crucial nesta etapa, pois é através desta definição que se torna possível estabelecer em um determinado ponto do circuito o incremento ou redução da DHT. Outra contribuição do conhecimento destes parâmetros é a possibilidade de se identificar o perfil da carga causadora da distorção em um barramento alimentador de várias cargas de tipos distintos e as metodologias aplicáveis na mitigação.

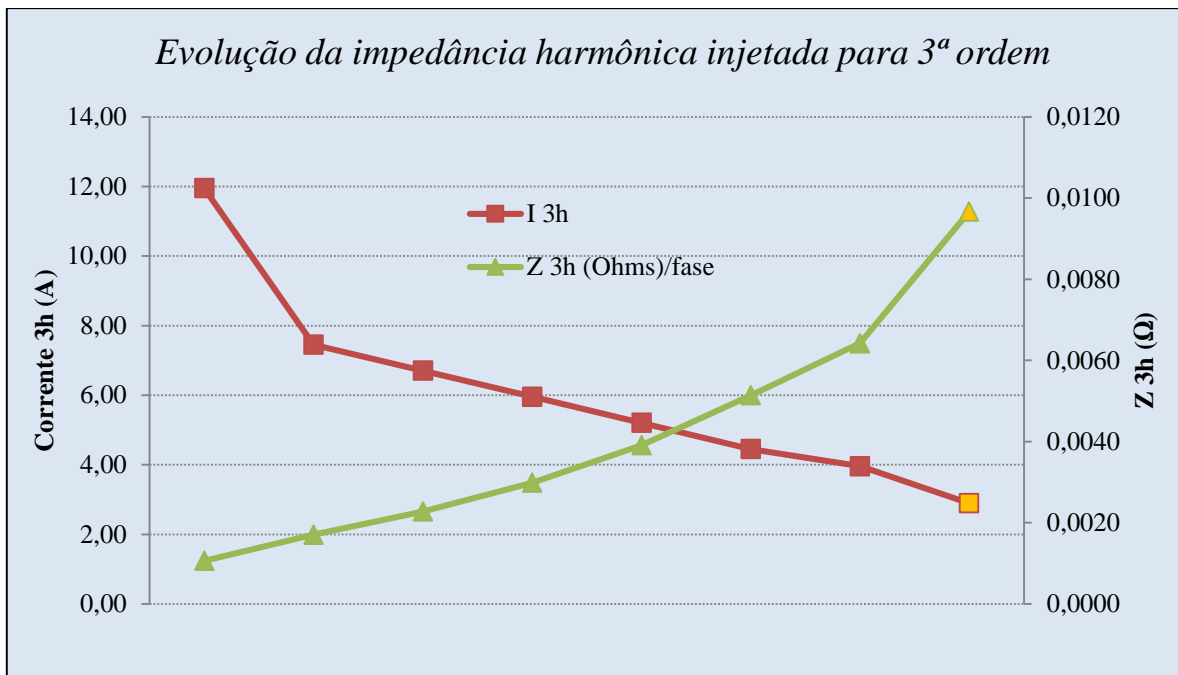


Figura 4.16 - Comportamento da impedância harmônica de 3ª ordem.

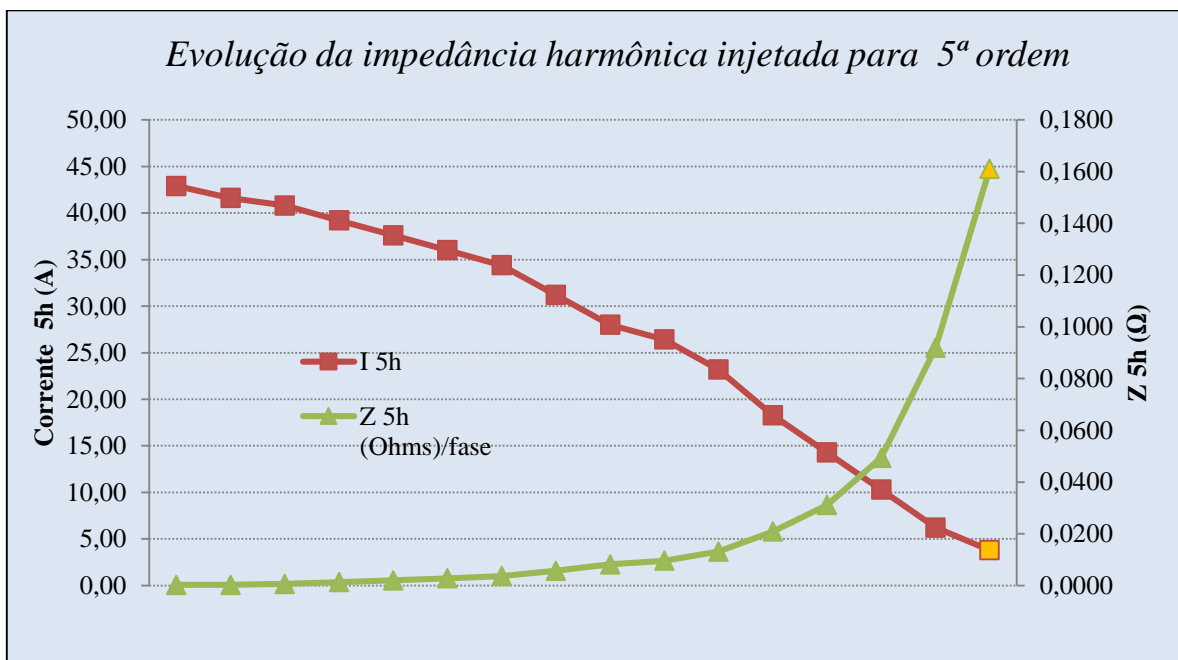


Figura 4.17 - Comportamento da impedância harmônica de 5ª ordem.

Os gráficos das figuras 4.16 a 4.18 ilustram os dados do ábaco sinótico da tabela 4.5. Em 4.18, mostra o caminho traçado pelos níveis de potência para cada ordem harmônica mitigada, revelando noções de projeto para o transformador coaxial aplicável. Observa-se que a suportabilidade do equipamento deve atender ao pico de potência apurado embora sua atuação prevaleça em níveis menores evidenciados nos pontos de mitigação máxima.

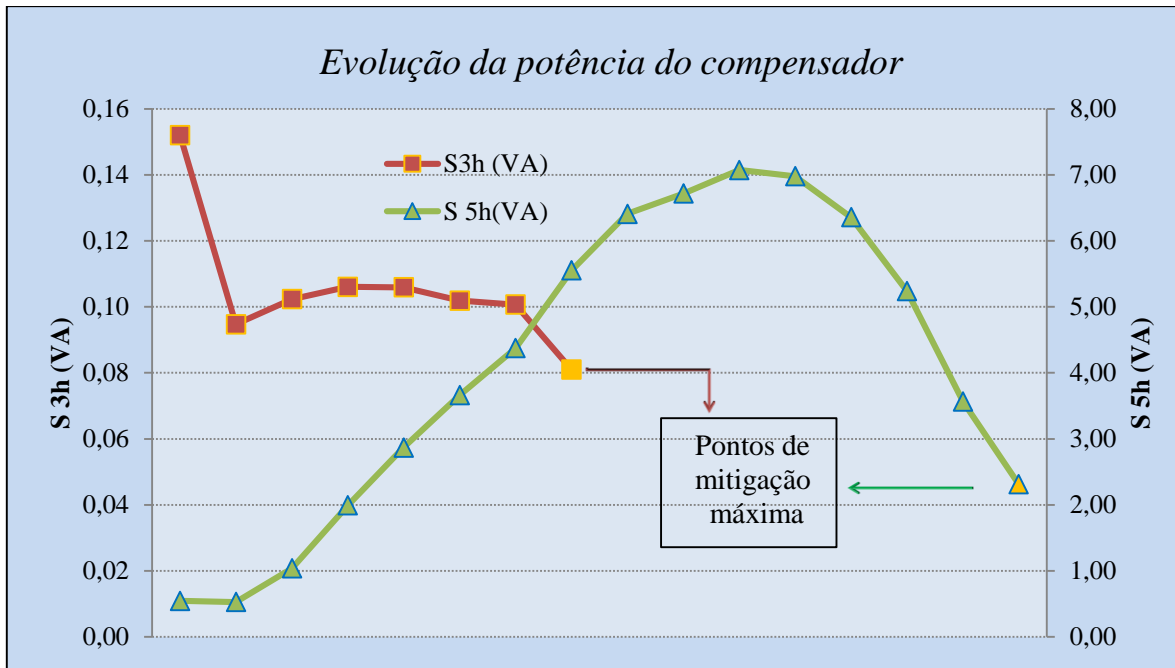


Figura 4.18 - Níveis de potência de trabalho do compensador

Os baixos níveis desta potência sugerem perspectivas de dimensionamento do compensador, que ratificam sua eficiência e flexibilidade mesmo atuando em níveis de corrente da ordem de centenas de amperes.

#### 4.8. Resultados das simulações

Nos dois gráficos apresentados a seguir, figuras 4.19 e 4.20, denominados “Distorções de formas de onda” e “Espectro de distorção”, observa-se o comportamento da onda de corrente induzida pelo sinal de tensão injetado no primário do transformador coaxial, cujas variáveis, deslocamento angular e amplitude, foram previamente parametrizados nas ordens harmônicas desejadas e confirmam sua efetiva atuação na compensação dos sinais precursores indesejados extraídos da espira de secundário do mesmo transformador. Como consequência, o resultado positivo é materializado no significativo declínio de ambas as taxas de DHTi de 3ª e 5ª ordens, nas duas situações avaliadas e apresentadas.

Vale ressaltar que os resultados alcançados até esta etapa, se devem exclusiva e suficientemente a implementação do SAHI, justamente no ponto de maior concentração de cargas não lineares, representando a maior contribuição harmônica da instalação, localizado mais a jusante da mesma e identificado como *BUS-TC Rooms and Elev.*

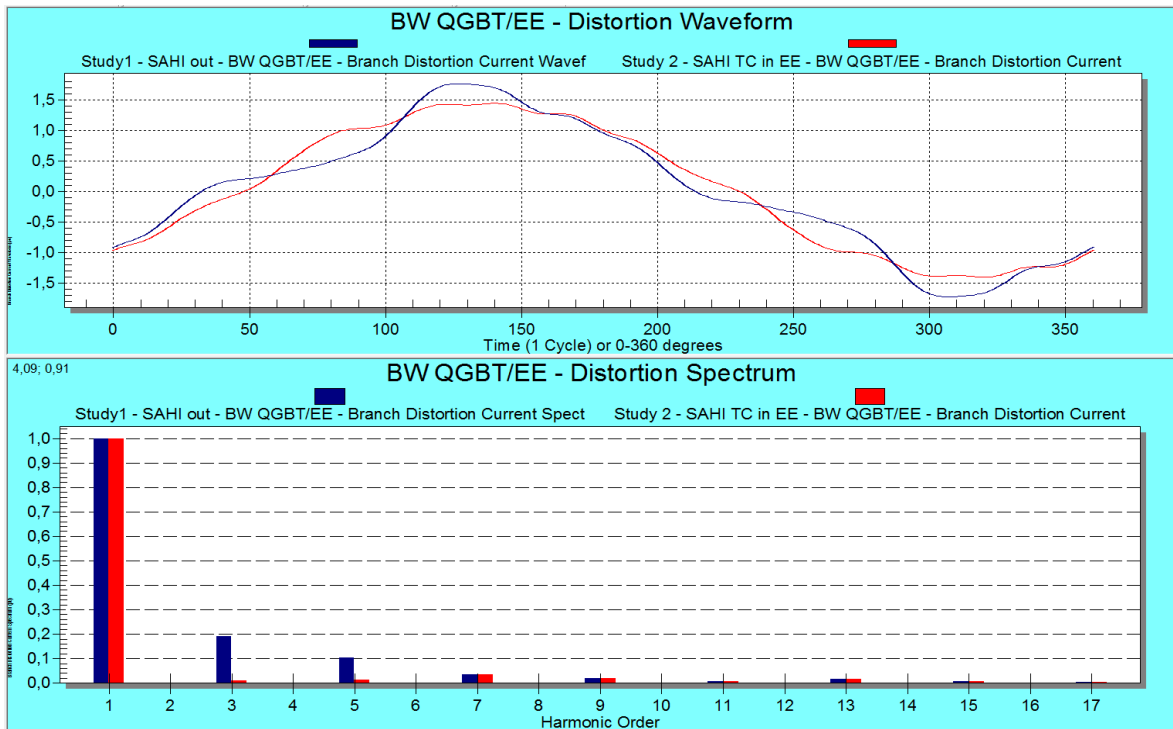


Figura 4.19 - Ilustrações do efeito mitigador do compensador no barramento QGBT/EE, expresso em forma de onda e espectro harmônico.

Visualiza-se na parte superior da figura 4.19 as formas de onda de corrente circulantes no alimentador BW-QGBT/EE (obtidas do simulador *PTW*), antes e depois da implementação do *SAHI TC*, nas cores azul e vermelho respectivamente. É possível identificar com clareza o efeito compensador produzido pela corrente induzida pelo *SAHI* no alimentador, atenuando a amplitude da onda inicial e incrementado seu comportamento linear por todo o ciclo.

A figura 4.20, apresenta resultados similares aqueles da figura 4.19, que refletem a influência positiva mitigadora do *SAHI* em ponto mais a montante das instalações. Observa-se ali, no espectro de frequências, a presença pouco relevante das harmônicas de 11<sup>a</sup> e 13<sup>a</sup> ordens, provenientes das cargas acionadas por inversores de frequência de 6 pulsos, neste caso elevadores supridos pelo barramento de energia normal, BW-QGBT/EN.

Ressalta-se que os resultados ora apurados ainda não acumulam os benefícios da implementação do *SAHI* nos ramais de alimentação do banco de capacitores, implementação que poderá ampliar a eficiência da instalação, assim que efetivado este recurso.

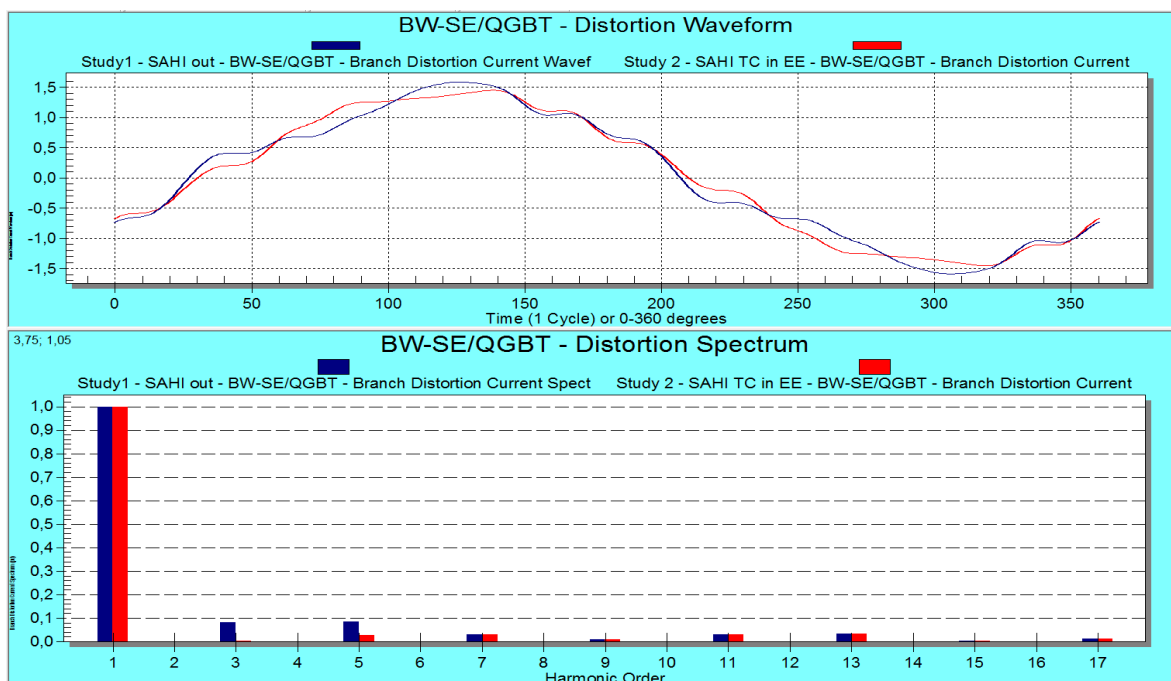


Figura 4.20 - Ilustrações do efeito mitigador progressivo do compensador no barramento SE/QGBT, expresso em forma de onda e espectro harmônico.

Tabela 4.6 - Síntese dos resultados da mitigação harmônica no *PTW*.

RELATÓRIO DO ESPECTRO HARMÔNICO DE CORRENTE COM SAHI				
BW- QGBT/EE	Perdas kW	Perdas kVAr	Ordem Harmônica/ DHTi%	IEEE-519 Limites
<b>COMSAHI</b>	0,266	0,651	1/4,99	10
			3/1,304	10
			5/1,351	10
BW- GMG/QGBT	Perdas kW	Perdas kVAr	Ordem Harmônica/ DHTi%	IEEE-519 Limites
<b>COMSAHI</b>	0,264	0,673	1/11,85	12
			3/0,763	12
			5/11,425	12
BW- SE/QGBT	Perdas kW	Perdas kVAr	Ordem Harmônica/ DHTi%	IEEE-519 Limites
<b>COMSAHI</b>	0,177	0,238	1/6,36	12
			3/0,192	12
			5/2,68	12

A tabela 4.6 acima, mostra em síntese, a significativa mitigação dos índices harmônicos de DHTi na instalação, na simulação no *PTW*, atingindo valores abaixo dos limites estabelecidos pela norma IEEE-519. Consolida também, a redução relativa das perdas em potência nos ramos amostrados, economizando 6% em kW e 9,6% em kVAr.

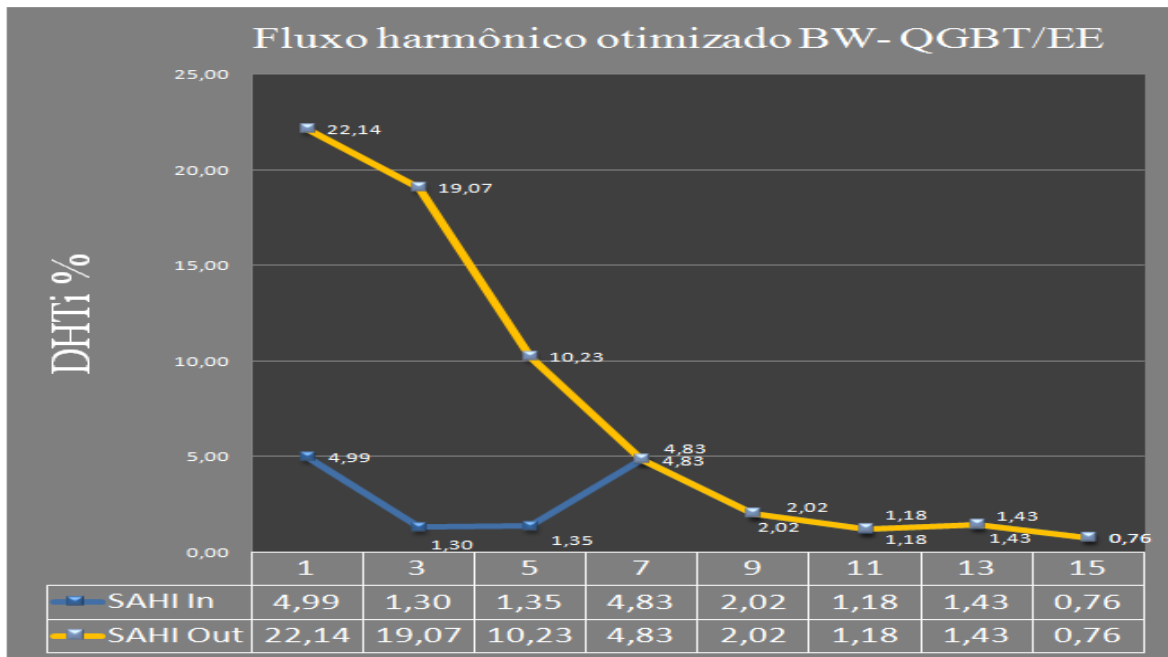


Figura 4.21 - Declínio das amplitudes harmônicas de 1ª, 3ª e 5ª ordens pós-mitigação.

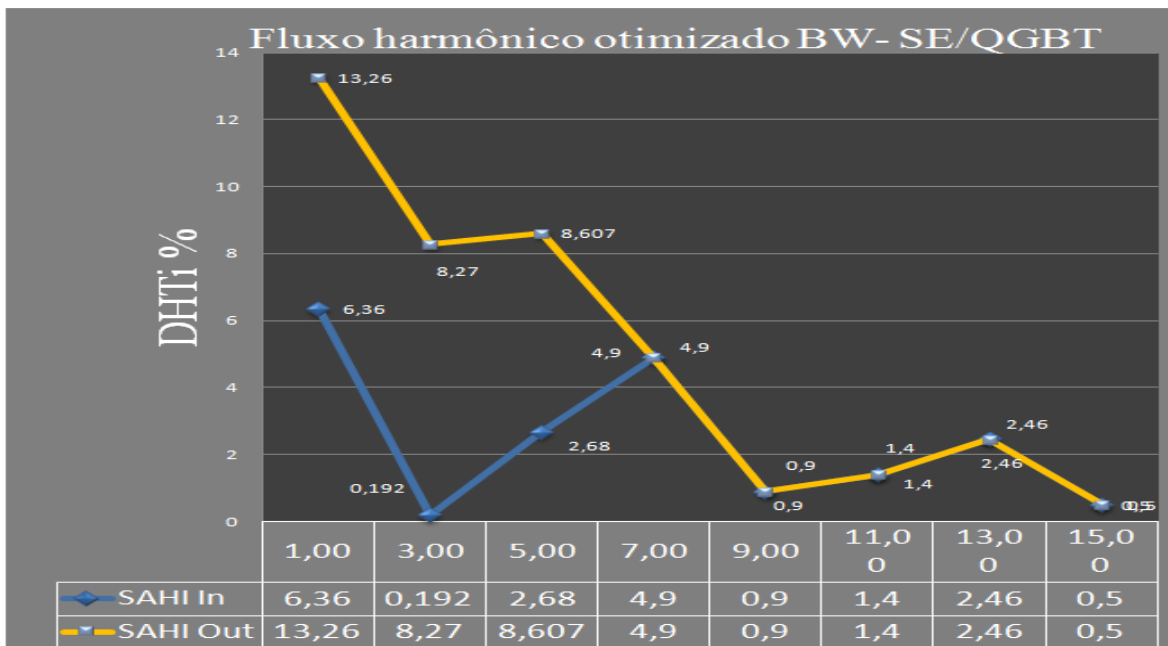


Figura 4.22 - Declínio das amplitudes harmônicas de 1ª, 3ª e 5ª ordens pós-mitigação.

As ilustrações proporcionadas pelas figuras 4.21 e 4.22, revelam os importantes resultados alcançados com a implantação do SAHI no barramento blindado BW-QGBT/EE, ponto de maior concentração de cargas deformantes, descrevendo decréscimo em pu nas três primeiras ordens harmônicas ímpares, inclusive no barramento BW-SE/QGBT, mais a montante da instalação, próximo à câmara transformadora.

# Instalações

Modelado e simulado no software PTW, versão 6.0.2.1.

Com SAHI TC

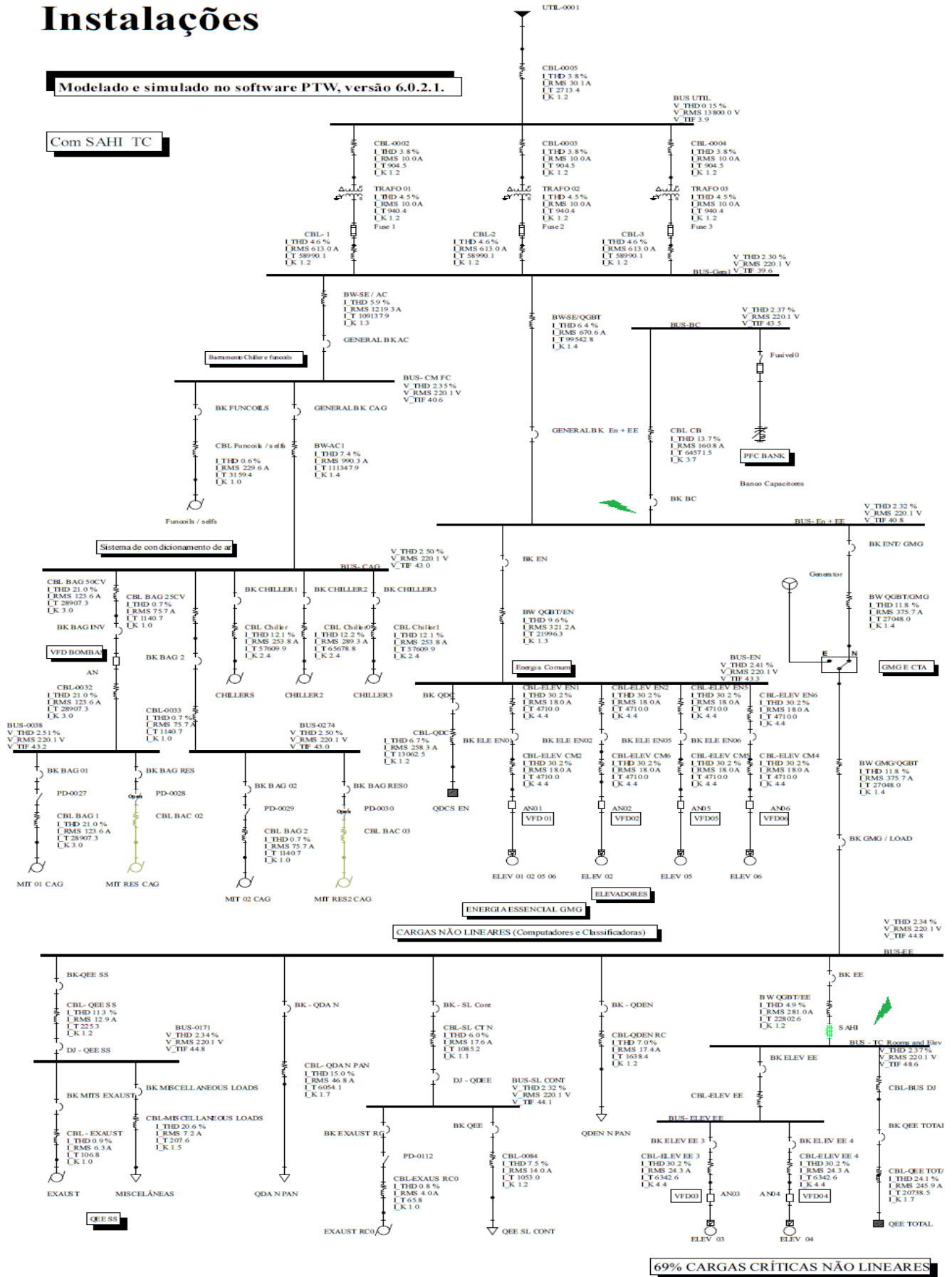


Fig. 4.23. Diagrama de qualidade de energia otimizado em ambos os pontos essenciais

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

Alinhado com o fato de que é necessário apenas reduzir o conteúdo harmônico dos sistemas elétricos para os níveis de compatibilidade do equipamento que o compartilha, e não eliminá-lo completamente, este estudo fornece recomendações para reduzir a distorção harmônica, melhorando a capacidade, disponibilidade e confiabilidade do sistema ao avaliar sua viabilidade técnica e introduzir uma avaliação econômica.

Descreve-se a aplicação da flexível solução de compensação harmônica, nestes estudos denominada *SAHI* (*Serie Active Harmonic Impedance*), que pode ser usada na configuração série, paralela ou híbrida, proposta em [4]. Nesse trabalho a solução série foi avaliada. Ressalta a utilização do transformador de acoplamento coaxial explorando seus princípios de funcionamento bidirecional na indução de impedâncias harmônicas, princípios estes adaptados à ferramenta computacional *PTW* na busca e constatação de resultados similares aos conseguidos em [4].

O desempenho e aplicação do dispositivo de impedância harmônica ativa são investigados com base em estudo de caso. Um edifício comercial foi selecionado e o fluxo harmônico em sua rede de energia foi caracterizado com base em plantas de projetos executivos atualizados, listas de especificações de equipamentos, prospecções e medições de campo. Com base nessas informações as instalações prediais foram modeladas no *PTW* para estudos envolvendo a aplicação dos dispositivos de impedância harmônica ativa, visando à seleção dos pontos de instalação, dimensionamento, parametrização das grandezas elétricas necessárias, culminado com a implementação e análise de resultados de simulação.

Viabilidade econômica: embora as investigações com foco nos custos Capex e Opex da solução ainda estejam em andamento, não dispondo de resultados conclusivos, os baixos valores em magnitude de tensão, e potência registados nas Figuras 4.15 e 4.18 respectivamente, confirmam uma das mais relevantes vantagens do compensador harmônico *SAHI*, seu volume competitivo. Os resultados em [1] apontam um “*pay-back*” de 3,1 anos para a proposta avaliada naquela referência; em [2] os resultados demonstram

em uma metodologia mais rigorosa um “*pay-back*” acima de 12 anos e consideradas pelos autores inviáveis economicamente para as alternativas analisadas. Em possível analogia com os resultados técnicos e econômicos de [1] e [2], a solução *SAHI*, conta com fatores que podem favorecer um custo benefício Brasil mais viável, considerando os valores em kW/h mais altos aliado às características próprias da solução já citadas como: flexibilidade, baixa interferência nas instalações existentes, pequeno volume proporcionado pelos baixos níveis das grandezas elétricas envolvidas e expectativa de custo de produção competitivo. Destaca-se que os resultados apurados na tabela 4.6, e traduzidos em percentuais relativos de kW e kVAr, perfazendo economias em 6% e 9,6% respectivamente, foram obtidos em edificação já beneficiada pelas boas práticas de eficiência energética e sustentabilidade operacional citadas em 1.3 parágrafo 3º, ou seja, resultados mais contundentes podem ser obtidos em condições de infraestrutura e cargas diversas menos assistidos.

Por outro lado, e sem comprometer os resultados já apurados, a condição de desequilíbrio de correntes identificado em 4.6, figuras 4.3 à 4.8, recomenda novos estudos mais complexos no próprio *PTW* em condições de instalação desbalanceada. Condições operacionais específicas do *SAHI* quando sujeito as situações de curto-circuito e partida de motores, poderão ser objeto de análises oportunas no próprio *PTW*, não sendo foco deste estudo.

Este é um projeto em andamento. A viabilidade econômica poderá ser mais bem avaliada com a conclusão de estudos detalhados os quais se fundamentam nas perdas elétricas causadas pela distorção harmônica e quando também poderá adicionar a análise da função de limitador de correntes harmônicas através dos bancos de capacitores, sem a necessidade de aumentar os seus níveis de tensão, controlando o fluxo harmônico, com o objetivo de distribuir essas correntes através de caminhos que não comprometam os componentes do sistema.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] KEY, Thomas S., LAI, Jih-Sheng, “*Cost and Benefits of Harmonic Current Reduction for Switch-mode Power Supplies in a Commercial Building*,” Conf. Rec. IEEE-IAS Annual Meeting, Orlando, FL, Oct. 1996, pp.#1101-1108.
- [2] KEY, Thomas S., LAI, Jih-Sheng, “*Effectiveness of Harmonic Mitigation Equipment for Commercial Office Buildings*”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 33, No. 4, July/August 1997.
- [3] PIEL, Jonathan K. and CARNOVALE, Daniel J., “*Economic and electrical harmonic reduction methods in commercial facilities*”, PU00904002E, July 2004.
- [4] FRANÇA, G. J., CARDOSO FILHO, B. J., “*Series-shunt Distributed Compensation for Harmonic Mitigation and Dynamic Power Factor Correction*,” Tese de Doutorado, PPGEE-UFMG, 02/2010.
- [5] CARNOVALE, D. J., DIONISE, T. J., BLOOMING T. M., “*Price and Performance Considerations for Harmonic Solutions*”. Power System World 2003, Power Quality Conference, Long Beach, California.
- [6] LEE, T., CHENG, C., CHENG, P., “*Distributed Active Filters for Harmonic Resonance Suppression in Industrial Facilities*”, Power Conversion Conference – Nagoya, 2007, PCC’07, 2-5 April, 2007, pages 391-397.
- [7] JOHAL, H., D. Divan, “*Design Considerations for Series Connected Distributed FACTS Converters*”, IEEE Transactions on Industry Applications, vol, 43, nº6, pgs. 1609-1618, November/December 2007.
- [8] JOHAL, H., DIVAN, D., “*From Power Line to PipeLine – Creating an Efficient and Sustainable Market Structure*”, IEEE Energy 2030, Atlanta, Georgia, 17-18 November 2008.
- [9] DIVAN, D.M, HARLEY, R.G., “*Power Flow Control in Networks Using Controllable Network Transformers*”, IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 25, Issue: 7, pgs.1753-1760, July 2010.
- [10] IEEE Std 519-2014, “*IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*”, Revisão da versão 1992, Aprovada em 27/03/2014.
- [11] ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – Prodist. Módulo 8 – Qualidade da energia elétrica. Resolução Normativa N° 612/2014. Disponível em: [//www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Modulo8\\_Revisão\\_5.pdf](http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Modulo8_Revisão_5.pdf).

- [12] ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, *Tarifas de Fornecimento de Energia Elétrica*, Brasília-DF, 2005. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/>.
- [13] *Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment IEEE Std 1100™-2005* (Revision of IEEE Std 1100-1999)
- [14] MOHAN, N., UNDERLAND, T. M., and ROBBINS, W. P., *Power Electronics: Converters, Applications and Design*", 3rd edition: John Wiley & Sons. Inc, 2003.
- [15] NILSSON, J. W., RIEDEL, S.A, *Circuitos Elétricos*", 6nd edition: LTC, 2003.
- [16] AKAGI, H., *Modern Active Filters and Traditional Passive Filters*", Bulletin of the Polish Academy of Sciences, 2006, vol. 54, nº 3. 2006.
- [17] DUGAN, R. C., M. F. McGRANAGHAN, SANTOSO S., BEATY, H. W., *Electrical Power Systems Quality*", 2nd edition: McGraw-Hill, 2004.
- [18] ARRILAGA, J. and WATSON, N. R., *Power System Harmonics*", 2nd ed.: John Wiley & Sons Ltd., England, 2003.
- [19] ISONI, M., *Correção de Fator de Potência de Cargas Industriais com Dinâmica Rápida*", Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Belo Horizonte, novembro de 2009.
- [20] BHATTACHARYA, S., C. Po-Tai, and DIVAN D. M., "Hybrid solutions for improving passive filter performance in high power applications", *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 33, nº 3, p. 732-747, May/June 1997.
- [21] ABDUSALAM, M., POURE, P., and SAADATE, S. "A New Control Method of Hybrid Active Filter Using a Feedforward Loop Tuned at 5th and 7th Harmonic Frequency", *Electronics, Circuits and Systems, 2007, ICECS 2007, 14th IEEE International Conference on*, pp. 1191-1194, Dec. 2007.
- [22] TAKEDA, M., IKEDA, K., and TOMINAGA, Y., *Harmonic Current Compensation with Active Filter*", IEEE IAS Annual Meeting, p. 808-815, 1987.
- [23] SAITOU, M., MATSUI, N., and SHIMIZU, T.. "A control strategy of single-phase active filter using a novel d-q transformation", *Industry Applications Conference, 2003. 38th IAS Annual Meeting. Conference Record of the*, vol. 2, p. 1222-1227, Oct. 2003.
- [24] TZUNG-LIN, L., YEN-CHING,W., and JIAN-CHENG, L.. "Design of a hybrid active filter for harmonics suppression in industrial facilities", *Power Electronics and Drive Systems, PEDS 2009, International Conference on.*, pp. 21-126, 2-5 Nov, 2009.

- [25] KEY, T. and LAI, J. S., “*Analysis of harmonic mitigation methods for building wiring systems*”, presented at the 7th Int. Conf. Harmonics and Quality Power, Las Vegas, NV, Oct. 16–18, 1996.
- [26] AKAGI, H., KANAZAWA, Y., and NABAE, A., “*Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components*”, IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. IA-20, pp. 625–631, May 1984.
- [27] PENG, F. Z. and LAI, J. S., “*Application considerations and compensation characteristics of shunt active and series active filters in power systems*”, presented at the 7th Int. Conf. Harmonics and Quality Power, Las Vegas, NV, Oct. 16–18, 1996.
- [28] RICE, D. E., “*Adjustable speed drive and power rectifier harmonic-Their effect on power systems components*”, IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. IA-22, pp. 161-177, Jan./Feb. 1986.
- [29] BOLLEN, Math. J. H., “*Understanding Power Quality Problems - Voltage Sags and Interruptions*”, IEEE Press Series on Power Engineering, 2000.
- [30] IEEE, “*Recommended Practice for Powering and Grounding Sensitive Electronic Equipment*”, IEEE Standard 1100, 1992.
- [31] MANSOOR, A. *et al.*, “*Predicting the net harmonic currents produced by large numbers of distributed single-phase computer loads*”, in Conf Rec. IEEE PES Winter Power Con\$, Jan. 1995, #95 WM 260-0 PWRD.
- [32] ONS, “*Gerenciamento dos Indicadores de Desempenho da Rede Básica e de seus Componentes, Procedimentos de Rede - sub-módulo 2.8*”, revisão 1.0, resolução normativa n. 372/09, Operador Nacional do Sistema Elétrico, 05/08/2009, [www.ons.org.br](http://www.ons.org.br).
- [33] IEC, “*International Standard IEC 61000-2-2, Eletromagnetic Compatibility (EMC) - Part 3-4*”, Edition 1.0, 1998-10.
- [34] IEC, “*International Standard IEC 61000-2-4, Eletromagnetic Compatibility (EMC)- Part 3-4*”, Edition 2.0, 2002-06
- [35] IEC, “*International Standard IEC 61000-3-2, Eletromagnetic Compatibility (EMC)- Part 3-2*”, Edition 4.0, 2014-05.
- [36] IEC, “*International Standard IEC 61000-3-4, Eletromagnetic Compatibility (EMC) - Part 3-4*”, Edition 1.0, 1998-10.
- [37] HALPIN, S. M., “*Comparison of IEEE and IEC Harmonic Standards*”, Power Engineering Society General Meeting, 2005. IEEE.

- [38] *World Harmonic Filter Market - Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends And Forecast, 2013 - 2019*; By - Transparency Market Research.
- [39] DESMET, J., “*Harmônicas: Seleção e Dimensionamento de Transformadores*”, ProCobre, Novembro 2005.
- [40] GARCIA, F. R., NAVES, A. C., “*Harmônicos em Sistemas Elétricos de Potência*”. Maio 2008.
- [41] BARBI, Ivo, “*Eletrônica de Potência: Projetos e fontes Chaveadas*”. 2ª Edição 2007.
- [42] POMILIO, J. A., “*Fontes Chaveadas*”. Publicação FEEC 13/95. Revisada em Janeiro 2010.
- [43] AMUDA, L. N., CARDOSO FILHO, B. J., SILVA, S. M., DINIZ, A. S. A. C., “*Wide bandwidth single and three-phase PLL structures for grid-tied PV systems*”, *Photovoltaic Specialists Conference, Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE*, pp. 1660-1663, 2000.
- [44] SANTOS FILHO, R. M., P. F. SEIXAS, P. C. Cortizo, L. A. B. Torres, A. F. Souza, “*Comparison of Three Single-Phase PLL Algorithms for UPS Applications*”, *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 55, n° 8, p. 2923-2932, august 2008.
- [45] LEMES, M. I., “*Comparação Técnica-Econômica entre Equipamentos Mitigadores de Harmônicos e Compensadores de Energia Reativa*”, Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, Dezembro de 2010.
- [46] PERETA, H. A., LANDIM, J.P., NOGUEIRA, L. R., “*Filtro de Dessintonia para Banco de Capacitores*”, XI Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e VII Encontro Latino Americano de Pós-Graduação - Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, 2007.
- [47] *Medidas de mitigação de harmônicos*. O Setor Elétrico, São Paulo, dez. 2010, p. 38-47.
- [48] IEC, 61000-4-30 / Edição 2.0 / 13-10-2008 - *Métodos de medidas em Qualidade de energia*.

## ANEXO A

### **INTERNACIONAL POWER ELECTRONICS CONFERENCE - ECCE ASIA IPEC - HIROSHIMA 2014<sup>13</sup>**

---

<sup>13</sup> Artigo submetido e aceito naquela conferência

# Distributed Series/Hybrid-Shunt Compensation for Harmonic Mitigation in Commercial Facilities

Rogério Azevedo Diniz

Diretoria de Apoio aos Negócios e Operações

Banco do Brasil

Brasília, Brasil

[rogeriodiniz@bb.com.br](mailto:rogeriodiniz@bb.com.br)

Igor A. Pires\*, Gleisson J. França, Braz J. Cardoso\*\*

Electronic Engineering Department\*,

Electrical Engineering Department\*\*

Universidade Federal de Minas Gerais

Belo Horizonte, Brasil

[iap@ufmg.br](mailto:iap@ufmg.br), [gleissonjf@ig.com.br](mailto:gleissonjf@ig.com.br), [cardosob@ufmg.br](mailto:cardosob@ufmg.br)

**Abstract**— This work presents the development and application of an electronically controlled harmonic mitigation device based on the insertion of active series harmonic impedances in the electric network. These active harmonic impedances are inserted at specific frequency (or frequencies). Important advantages of the proposed system are the reduced converter rating and the utilization of coaxial transformers with single turn secondary. In this paper, the active harmonic impedance device is applied to implement distributed harmonic mitigation strategy, leading to a flexible and cost-effective solution for industrial and commercial power systems applications. The desired overall results are investigated through modeling and simulation of an actual commercial facility, based on the PTW - Power Tools for Windows/SKM. Harmonic distortions and harmonic sources data are measured in the considered facility, characterizing the situation before and after the implementation of series-shunt compensation for harmonic mitigation.

**Keywords** - Active Harmonic Impedance, Harmonics, Power Factor Correction, Distributed Compensation.

## I. INTRODUCTION

The advance of power electronic applications has been stimulated by continuing advances on semiconductor device technologies and demands for energy savings and productivity increase in commercial and industrial facilities. Machinery and processes using static converters, arc furnaces, switching power supplies, reactive compensators (SVC's) are employed in growing numbers, increasing the presence of nonlinear loads in industrial parks, and on a smaller scale, but no less relevant, in commercial building facilities. Such loads imply new challenges in the electrical power system, demanding attention to the harmonic distortion of voltage and current, which can cause problems such as:

- ✓ Overloading power equipment and systems;
- ✓ Transformers: temperature rise due to the increase of losses in iron (voltage harmonics) and copper (current harmonics) into harmonic frequencies; audible noise emission;
- ✓ Cables: temperature rise due to increased losses; skin effect losses; voltage stress and corona from dielectric failure;

- ✓ Capacitors: possibility of resonance due to high levels of voltage and current, increased heating, dielectric stress, reduction of life;
- ✓ Reduced power factor.

The alternatives normally used for harmonic mitigation are grouped as passive, active and hybrid solutions. Passive solutions use only inductors, capacitors and resistors on its construction. The major difficulties of the passive solutions are the reduced flexibility and performance strongly dependent on system impedance and load configuration. Active solutions are based on series and/or parallel active filters. Finally, hybrid solutions are a composition of active and passive solutions. The main difficulties of active and hybrid solutions application are the implementation cost, mainly in high current and/or voltage systems, and reliability [1].

Recognizing the fact that it is only necessary to reduce the harmonic content of the electric system to levels compatible with the existing equipment, this work proposes a series active harmonic impedance insertion system where impedances are coupled only at specific desired harmonic frequencies. An important feature of the proposed system is the use of a coaxial transformer for harmonic impedance coupling. The harmonic impedances can be used as series or hybrid shunt compensation with the objective to control the harmonic current flow, directing it to paths that do not cause damage to the system components.

In this paper, Series Active Harmonic Impedance – SAHI – devices are considered for distributed harmonic mitigation in a commercial building facility. The selected commercial building presents a high density of non-linear loads with relevant harmonic currents flow. Such high harmonic content causes significant electrical losses, especially in the secondary of the transformer substation, and cabling. The desired overall results are investigated through modeling and simulation based on the PTW - Power Tools for Windows/SKM. Harmonic distortions and harmonic sources data are all obtained from field measurement in the considered facility, characterizing the situation before and after the implementation of series-shunt compensation for harmonic mitigation.



Differentiation of the equations (2) and (3) with respect to time results in:

$$\frac{dI_q}{dt} = \left( \frac{dI_\alpha}{dt} \cos\theta_h + \frac{dI_\beta}{dt} \sin\theta_h \right) - \omega_h (I_\alpha \sin\theta_h - I_\beta \cos\theta_h) \quad (5)$$

$$\frac{dI_d}{dt} = \left( \frac{dI_\alpha}{dt} \sin\theta_h - \frac{dI_\beta}{dt} \cos\theta_h \right) + \omega_h (I_\alpha \cos\theta_h + I_\beta \sin\theta_h) \quad (6)$$

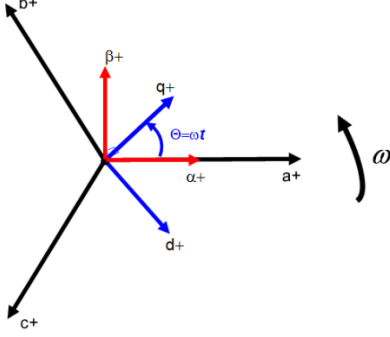


Fig. 3. Axis references for axis transformations.

Considering a steady state condition:

$$\frac{dI_q}{dt} = \frac{dI_d}{dt} = 0 \quad (7)$$

$$\left( \frac{dI_\alpha}{dt} \cos\theta_h + \frac{dI_\beta}{dt} \sin\theta_h \right) = \omega_h I_d \quad (8)$$

$$\left( \frac{dI_\alpha}{dt} \sin\theta_h - \frac{dI_\beta}{dt} \cos\theta_h \right) = -\omega_h I_q \quad (9)$$

Based on the development represented by (2) to (9), and recognizing that in (5) and (6), the terms of the first parentheses after the equal sign represent the Park transformation of the derivatives of the components  $\alpha$  and  $\beta$  of the desired currents [7], the components of the voltage to be synthesized are calculated on the synchronous reference frame as follows:

$$V_{qh} = \omega_h L^* I_{dh} \quad (10)$$

$$V_{dh} = -\omega_h L^* I_{qh} \quad (11)$$

Applying the inverse Park transform on the results from (10) and (11) and taking the  $\alpha$ -axis component, (12) is obtained representing the open loop voltage to be synthesized by the PWM modulator, seen at the secondary side of the coupling transformer, responsible for injecting the desired active harmonic impedance.

$$V_h = V_\alpha = -\omega L^* I_{qh} \sin\theta_h \quad (12)$$

In Section III, simulation results from application of equation (12) to the implementation of the proposed active harmonic impedance are presented. Experimental results are shown in section VI.

### C. PLL Algorithms

The PLL algorithms are based on the Park transformations for treatment of desired variables on a synchronous reference frame. The PLL tracking system is based on a PI that objectives to cancel the d axis component resulting from the Park transformation [3].

The proposed system requires at least two separate PLL algorithms: one for obtaining the amplitude, frequency and phase of the fundamental current component and one PLL in order to obtain the parameters for each harmonic component of interest. It can be found on the literature several alternatives for implementation of the PLL algorithms, but the method of coordinate transformations for the use of synchronous reference has been widely applied. Detailed analysis of PLL algorithms is given in [3].

### D. Coupling Coaxial Transformer Considerations

The design of the coaxial transformer, shown in Figure 4, should take into consideration the maximum voltage to be injected on the desired frequency and also to ensure the use of the magnetic core at a flux density level lower than the saturation level of the magnetic material used on its construction, as stated by eq. (13). Also, maximum flux density choosing is critical, as it is directly related to the iron losses on the transformer core. Another important factor is the primary coil number of turns, which should be defined taking into account the voltage and current ratings of commercially available power semi-conductors to achieve a good cost-benefit relationship.

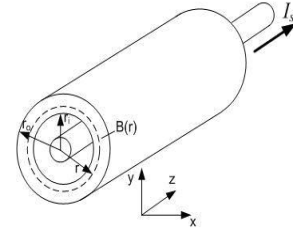


Fig. 4. Coaxial transformer used for active impedance coupling.

$$B(t) = B_f(t) + \sum_h B_h(t) < B_{sat\ max} \quad (13)$$

The effective harmonic voltage induced in the single turn secondary of the transformer is given by equation (14). Considering the harmonic induced voltage as a design input, (14) can be used for calculation of the minimum sectional area of the magnetic core necessary to induce the desired harmonic voltage. The magnetic core should be chosen satisfying simultaneously the equations (13) and (14).

$$V_{h2\_rms} = \frac{B_h \omega h A_e}{\sqrt{2}} \quad (14)$$

### III. SIMULATION RESULTS

#### A. PLL Algorithms

Figures 5 and 6 shows the simulation results obtained from the application of the PLL algorithms to a signal composed by a fundamental component plus fifth and seventh harmonic components, with amplitudes of 1 pu, 1 pu and 0.1 pu respectively.

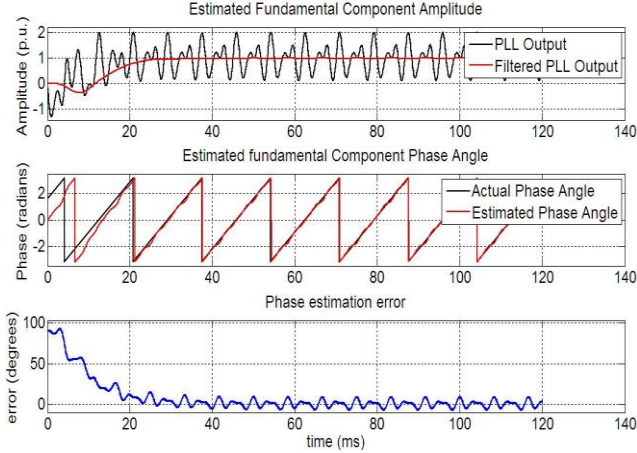


Fig.5. Amplitude ( $I_q$ ) and phase angle ( $\theta_f$ ) response obtained from PLL - fundamental component estimation applied to a signal composed by: 1 p.u. (fundamental component) + 1 p.u. (5th harmonic) + 0.1 p.u. (7th harmonic).

The PLL simulation results shows the effectiveness of the implemented algorithms, as the fundamental and the fifth harmonic components were correctly tracked even in the presence of an additional harmonic component.

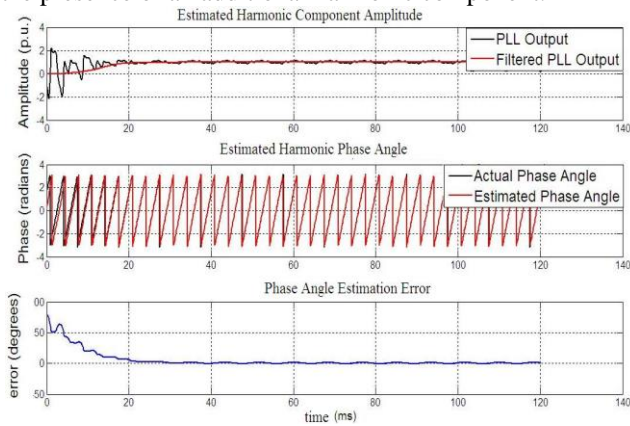


Fig.6. Amplitude ( $I_{q_{5h}}$ ) and phase angle ( $\theta_{5h}$ ) response of the PLL used to estimate the fifth harmonic component.

### IV. EXPERIMENTAL RESULTS

The experiments were performed using a basic prototype consisting in Figure 7, with the task of evaluating the feasibility of inducing voltage harmonics and the use of PLL algorithms for obtaining real-time amplitude and phase of the fundamental and harmonic components of interest. The prototype had the following main modules in its implementation: capacitor for power factor correction with capacitance of 104  $\mu\text{F}$ , simulating the load that

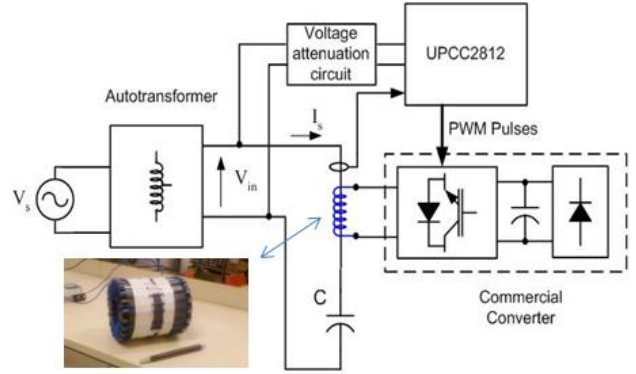


Fig. 7. Experimental setup for active harmonic evaluation

is supplied from the output of an adjustable autotransformer. The control system was implemented using the UPCC2812 hardware, based on TMS320F2812 processor to generate the reference voltage and harmonic synthesis of PWM signals for controlling the IGBT inverter frequency. The firmware implemented PLL algorithm developed for tracking amplitude and phase of the fundamental components and 5th harmonic current in the capacitor. The coaxial coupling transformer, responsible by the induction of the desired harmonic current on the secondary.

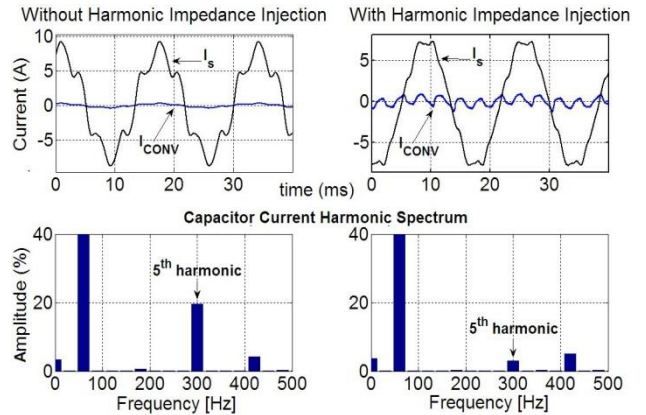


Fig.8. Shows the converter and capacitor currents waveform and spectrum without and with active impedance compensation. The fifth harmonic current distortion reduced from 20% to 3% and illustrates the capability of the proposed system for harmonic mitigation.

### V. CASE STUDY: COMMERCIAL BUILDING

In typical commercial facilities the harmonic sources are distributed in the system. The allocation of filters would be as close as possible to all relevant harmonic sources. By doing so, the installed system would be able to achieve the overall reduction in energy consumption in kW and standardized levels of harmonic distortion. However, this method often becomes costly due to the number of filters to be installed and the difficulties of adapting the existing infrastructure to the solution. Proper selection of the installation points of the active harmonic impedance device and sizing of such units defines the aim of this studies.

### A. Building characterization

- Type: commercial building;
- Floors: 11;
- Constructed area: 9.000 m<sup>2</sup>;
- Population: 1.200 people;
- Installed power: 1.500 kW;
- Demanded power: 667 kW;
- Profile loads: air conditioning 54%, non-linear loads 36%, others 10%;
- Typical single phase non linear loads -127(V);
- Availability of all power plants and loads list.

### B. Methodology

The methodology adopted for this case study, in progress, is based on the steps below:

- i. The power quality survey of the entire plant via quality analyzer (Fluke 434), registering the higher incidence points of harmonic distortion. So, already at this stage, one can observe the technical feasibility of the application of active harmonic impedance devices, object of this paper.
- ii. Modeling of the entire installation, on the software PTW. All components are properly configured and specified with real data from manufacturers.
- iii. Modeling the active harmonic impedance device in PTW. Such model must present performance equivalent to harmonic compensation technology, proving its effectiveness in simulation studies.
- iv. Investigation of the best installation points and sizing of the active harmonic impedance devices as required in this case study. Those two points identified: the input PFC, and the BUS-TC Rooms and Elev, concentrates high level of harmonic distortion, mainly the last one, which represents 69% of facilities non-linear critical loads. This condition has been consolidated and is shown on Table I and Figure 15 - *Quality energy diagram*. The implementation of SAHI TC at this point presents some advantages: contributed to reduce involved current levels, consequently the SAHI dimensions and costs; it represents the best facility place to install the equipment, ensuring harmonic mitigation to upstream loads, including the essential energy bus - BUS EE and near the utility.
- v. Practical implementation of the active harmonic impedance device and installation at the point identified in the previous steps; perform new measurements of the entire installation.

## VI. MODELING AND SIMULATION OF THE FACILITY

First of all, the entire installation has been modeled, on the software PTW, shown in Appendix and described on item A – *Building characterization*. All components

are properly configured and specified with real data from manufacturers. The simulation performance of the electrical system ratified the aforementioned results on the primary stage, identifying two high current harmonic distortion points by field measurements, Fluke analyzer and PTW simulations: BUS-TC Rooms and Elev data are registered at Table I and Figure 13 below, and BUS-En+EE at Table III and Figure 14 ahead:

TABLE I

Table of DHTi obtained at BW-QGBT/EE demanded by BUS-TC Rooms and Elev, with quality analyzer equipment, before optimization.

Amp	A	B	C	N
THD%f	26,4	26	26,6	1064
H3%f	22	22,9	23,1	1088
H5%f	11,8	10,8	12,1	70,4
H7%f	6,8	4	3,7	66,3
H9%f	3,1	1,6	1,3	71,3
H11%f	1,2	1,8	2,3	11,1
H13%f	3,5	2,9	2,1	29
H15%f	1,6	1,1	0,7	41,8

TABLE II

Table of DHTi, obtained at BW-GMG/QGBT, demanded by BUS-EE loads, obtained with quality analyzer equipment, before optimization.

Amp	A	B	C	N
THD%f	20,6	20,8	19,1	1026
H3%f	17,8	19,1	17,8	1033
H5%f	7,6	6,9	5,7	80,6
H7%f	5,7	3,4	2,6	55,2
H9%f	2,5	1,4	1,6	85,2
H11%f	1	1,1	1,3	11,9
H13%f	2,4	1,8	0,9	26,1
H15%f	1,1	0,5	0,6	36,1

TABLE III

Table of DHTi, obtained at BW-SE/QGBT, demanded by BUS-En+EE and the contribution of Capacitor Bank loads mainly at 5th harmonic and 7th harmonic, obtained with quality analyzer equipment, before optimization.

Amp	A	B	C	N
THD%f	13	11,2	9,9	307,6
H3%f	7,9	8,7	7,4	305,8
H5%f	6,8	4,7	4,1	27
H7%f	6,3	4,4	4,1	22,6
H9%f	1,7	0,5	0,7	42,4
H11%f	1,2	1,4	1,6	7,3
H13%f	3,1	2,3	2	15,3
H15%f	0,7	0,5	0,3	15,5

Tables I and II, reveals the propagation and impact of harmonics high level generated by nonlinear loads located downstream facility and named: TC Rooms and Elev.

TABLE IV

This table consolidates the facilities scenario object of these studies in the light of PTW before implementation of SAHI, showing numbers of power losses caused by respective harmonics distortion. Once more, high DHTi indices are measured, and compared with established limits by IEEE-519.

HARMONIC CURRENT SPECTRUM REPORT SAHI OUT				
BW-QGBT/EE	kWLoss	kVARLoss	Harmonic Order/THDi%	IEEE-519 Limit
SAHI out	0,28	0,753	1/22,14	12
			3/19,07	10
			5/10,23	10
BW-GMG/QGBT	kWLoss	kVARLoss	Harmonic Order/THDi%	IEEE-519 Limit
SAHI out	0,27	0,705	1/18,47	15
			03/15,90	12
			5/8,88	12
BW-SE/QGBT	kWLoss	kVARLoss	Harmonic Order/THDi%	IEEE-519 Limit
SAHI out	0,18	0,251	1/13,26	15
			3/8,276	12
			5/8,607	12

Above, Figure 9 shows the parameterized voltage waveform on PTW and equivalent injected voltage synthesized by the PWM modulator, seen at the secondary side of the coupling transformer, and responsible for injecting the desired active harmonic impedance. As shown in TABLE IV, the relevance of harmonic order 3rd and 5th is evident, so deserving attenuation by the compensator.

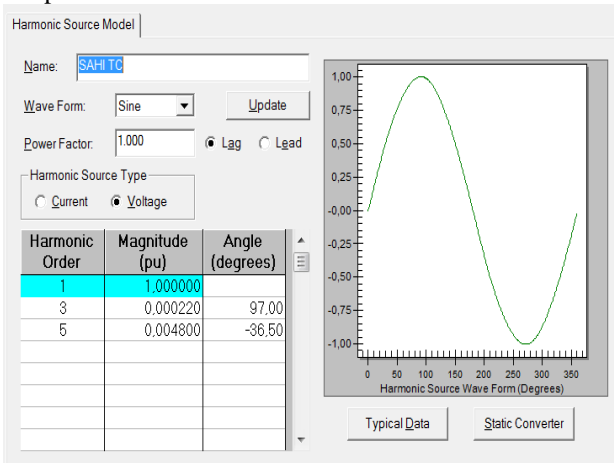


Fig. 9. PTW's SAHI TC parameterized wave form

The values sizing of magnitude and angle defined in PTW and illustrated in Figure 9, were based on the values calculated by the software in the situation without optimization, ie, the amplitude of the harmonics and their respective angles of square phase shifted with respect the current. The process of sizing of the active harmonic impedance as required, is based on the constant increase of the values of harmonic reactive impedance, tied to the  $V/I$  relation, which is always adjusted to the angle of lag of the current measured previously, reaching the point of optimal mitigation. This method presents performance equivalent to harmonic compensation technology described on [4], proving its effectiveness in simulation

studies. The validation of logical procedure adopted in PTW, to obtain the impedances to be injected into the desired harmonic orders is consolidated in figures 10 and 11.

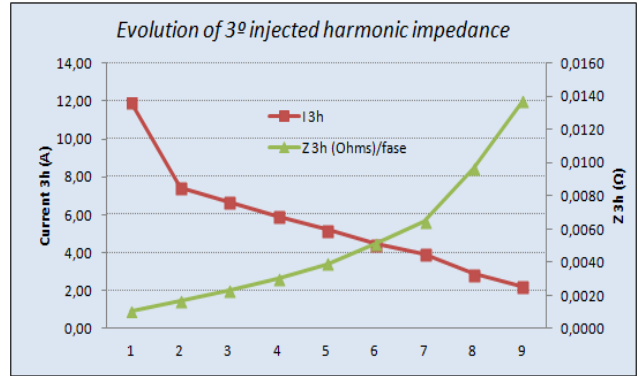


Fig. 10. 3rd harmonic order impedance performance

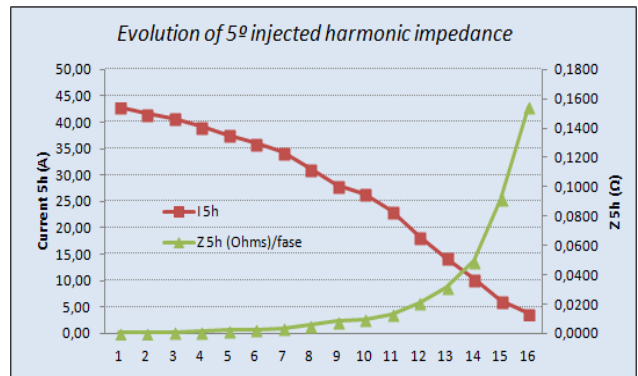


Fig. 11. 5rd harmonic order impedance performance.

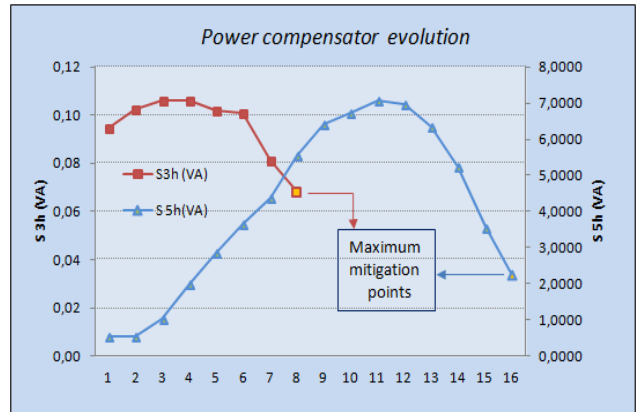


Fig. 12. The low power levels registered in this graphic, reveals project parameters of the compensator that increase its efficiency and flexibility even in acting current levels on the order of hundreds of amperes.

## VII. PRACTICAL RESULTS

On the following two graphs presented, called "Distortion Waveform" and part of Figures 13 and 14, we observe the behavior of the injected voltage signal wave induced current, where the angular displacement and previously parameterized amplitude in the desired harmonic, shows the effective compensation of their precursors unwanted signal. As a consequence, the positive result is materialized in a significant rates decline of both DHTi as 3rd in 5th order in evaluated situations.

It is noteworthy that these results were achieved exclusively and sufficiently with the implementation of SAHI-TC, ie, mitigation of harmonic distortion in the center of applied loads identified as being of higher harmonic contributions to the installation, further downstream. Its effectiveness can be observed at BW-SE/QGBT. Table V quantified harmonics levels at this point, result of the exclusively SAHI-TC actuation.

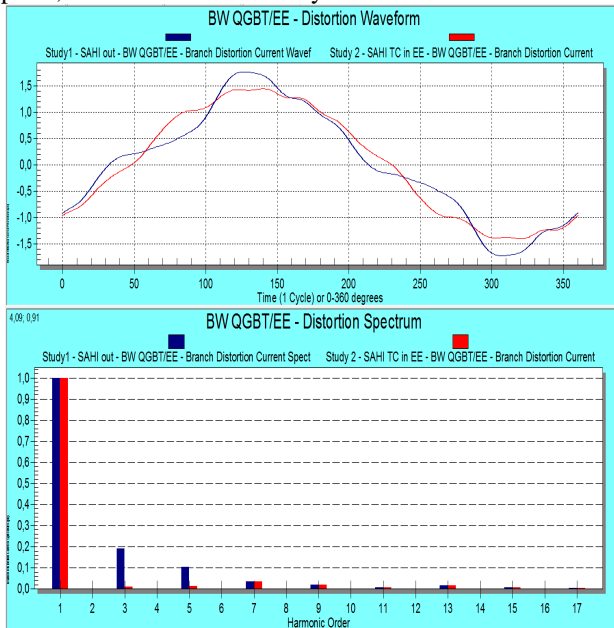


Fig.13. Current Harmonic distortion spectrum, obtained from PTW simulation, at BW-QGBT/EE, demanded by BUS-TC Rooms and Elev loads, before and after SAHI TC implementation.

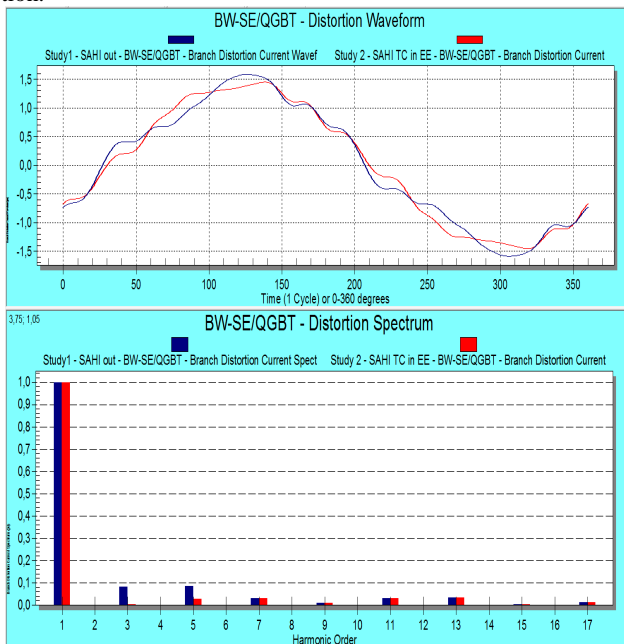


Fig. 14. Current Harmonic distortion spectrum, obtained from PTW simulation, at BW-SE/QGBT, demanded by BUS-En+EE, before and after SAHI TC implementation.

At this moment there is no contribution of active compensator implemented on BUS-CB yet. It is possible to observe on figure 14, the important influence of Capacitor Bank increasing harmonics 7th, 11th and 13th orders,

due to its low impedance characteristic. However specific studies should be further add to this paper.

TABLE V

This table represents the significant mitigation of DHTi harmonics levels on the facility, reaching values below the limits established by the IEEE-519 standard. Moreover, the power losses relative reduction saves 6 % kW and 9,6 % kVAR in this branches.

HARMONIC CURRENT SPECTRUM REPORT SAHI IN				
BW-QGBT/EE	kWLoss	kVARLoss	Harmonic Order/THDi%	IEEE-519 Limit
SAHI in	0,266	0,651	1/4,99	10
			3/1,304	10
			5/1,351	10
BW-GMG/QGBT	kWLoss	kVARLoss	Harmonic Order/THDi%	IEEE-519 Limit
SAHI in	0,264	0,673	1/11,85	12
			3/0,763	12
			5/11,425	12
BW-SE/QGBT	kWLoss	kVARLoss	Harmonic Order/THDi%	IEEE-519 Limit
SAHI in	0,177	0,238	1/6,36	12
			3/0,192	12
			5/2,68	12

Economical feasibility: The low values of "Voltage Magnitude" registered on Figure 9, above, confirm one of the most powerful SAHI's advantage, its competitive cost and volume. Further studies considering Capex and Opex costs have been developed mainly based in energy economy and should be one of the focuses of next paper.

## VIII. CONCLUSION

This paper described a flexible harmonic compensation system that can be used to implement series, shunt or hybrid harmonic mitigation solutions. The use of a coaxial coupling transformer gives flexibility to the system allowing a fast field solution evaluation that is especially useful for detecting the better configuration in existing power systems.

The active harmonic impedance device performance and practical application is investigated based on a case study. A commercial building was selected and the harmonic flow in its power network was characterized based on field measurements. The building was modeled in PTW for further studies involving the application of the active harmonic impedance devices, aiming at the selection of the installation points and sizing of the harmonic mitigation devices required.

Aligned with the fact that it is only necessary to reduce the harmonic content of the electric systems to the compatibility levels of the equipment that shares it, and not completely eliminates the harmonic content, this work provide recommendations for reducing harmonic distortion, improving system capacity, availability, reliability and introduces an evaluating economic feasibility.

This is an ongoing project. The economic feasibility can be increased with the conclusion of details studies based on the electrical losses caused by harmonics dis-



## ANEXO B

### CARGAS ELETRÔNICAS SENSÍVEIS

O grau de sensibilidade das cargas eletrônicas pode ser avaliado do ponto de vista da sua disponibilidade para o sistema no qual está inserida e sua importância para o mesmo.

#### Cargas lineares e não lineares

Cargas eletrônicas são geralmente não lineares, as quais resultam na geração de correntes harmônicas. Estas correntes harmônicas circulam dentro do sistema de distribuição AC, as quais suprem de energia às próprias cargas eletrônicas. Estas correntes harmônicas contribuem com na proporção de  $R * I^2$  em perdas por aquecimento no sistema de distribuição e podem causar considerável distorção na forma de onda.

Equipamentos eletrônicos típicos, contem transformadores e retificadores, os quais muito frequentemente, apresentam comportamento de fontes de tensão, cujas saídas são reguladas eletronicamente para alimentar barramentos de tensão contínua de circuitos eletrônicos.

Resistores, indutores e capacitores, além de motores, lâmpadas incandescentes, e elementos de aquecimento resistivos são todos cargas lineares, cujos componentes de impedância das cargas (passivas) apresentam respostas distintas com a frequência.

A resistência ideal não varia com a frequência, sendo a relação  $R(\Omega) \propto F(\omega)$ , representada por uma reta horizontal conforme ilustrado na figura 1.1.

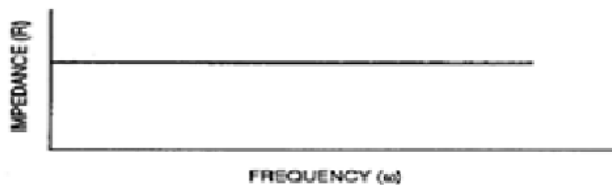


Figura 1.1 — Carga passiva Resistência X Frequência

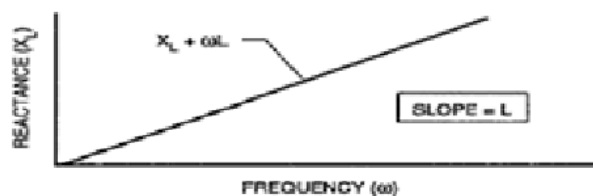


Figura 1.2 — Carga passiva Reatância Indutiva X Frequência

A reatância indutiva  $X_L$  ( $X_L = \omega L$ ), cresce linearmente com a frequência, representada pela função  $y = ax + b$ , conforme ilustrado na figura 1.2.

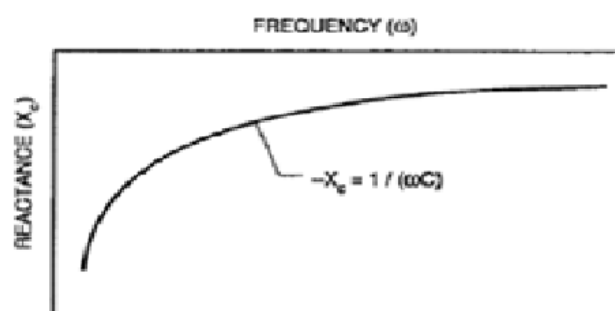


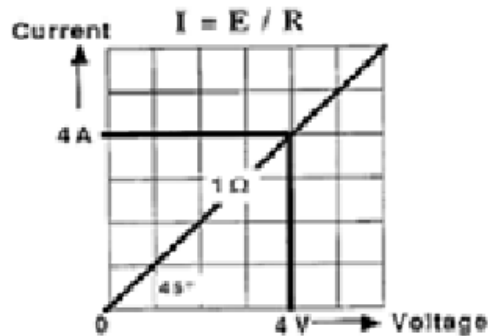
Figura 2 — Carga passiva Reatância capacitiva X Frequência

A reatância capacitiva,  $X_C$ , evolui com a frequência conforme uma função hiperbólica  $yx = k$ , onde a frequência é a variável independente e a razão  $-1/C$ , é a constante, ou seja,  $X_C = -1/\omega C$ , conforme ilustrado na figura 2 [13].

Observa-se que, a reatância indutiva se torna fator dominante com o crescimento da frequência.

## Caracterização

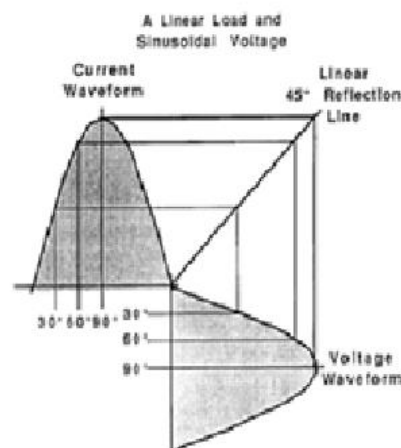
Uma carga pode ser classificada como linear quando a corrente que flui através da mesma está em proporção direta com a tensão aplicada. Observa-se o resultado constante e proporcional na evolução da razão ( $I = E/R$ ), na figura 3 [13], abaixo.



**Figura 3— Gráfico Tensão X Corrente p/ carga constante**

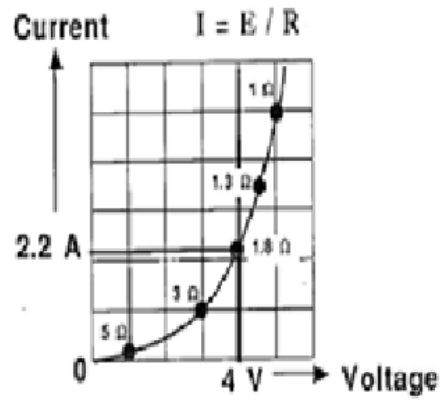
Resistores, capacitores e indutores são cargas lineares. Nos capacitores e indutores existe um deslocamento de fase entre tensão e corrente, mas isto não muda o fato de que estas grandezas elétricas se mantêm proporcionais, ou seja, um incremento de 10% na tensão implica na mesma alteração na corrente e vice-versa.

Esta relação de proporcionalidade pode ser ratificada ao se transpor a forma de onda da tensão de uma carga linear através de uma linha de reflexão de 45°, obtendo-se como resultante a mesma forma de onda senoidal para corrente. Observa-se, ainda a inexistência de distorções harmônicas.



**Figura 4— Amostra de forma de onda de corrente senoidal obtida de uma carga linear**

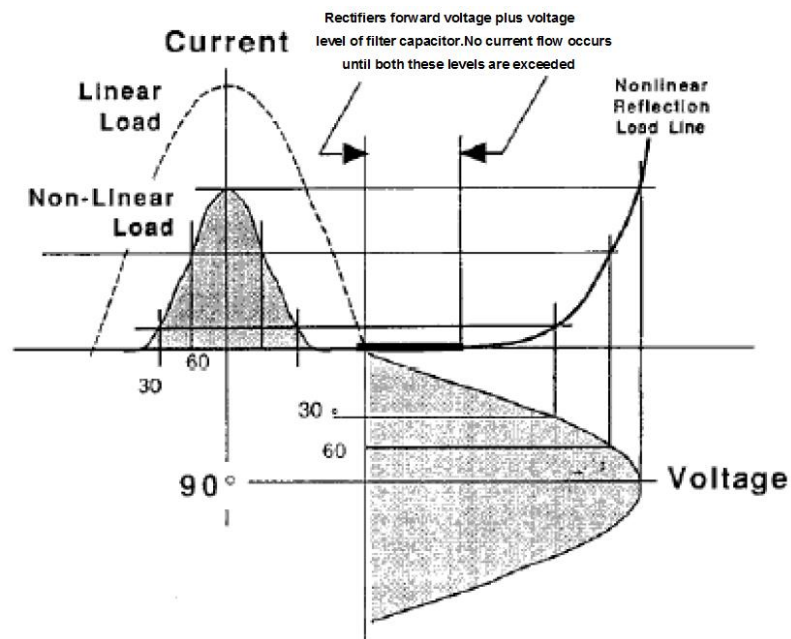
Entretanto, quando esta proporcionalidade entre formas de onda de tensão senoidal e corrente não se manifesta na carga, esta é classificada como não linear. Retificadores e conversores de frequência são exemplos típicos e cargas não lineares.



**Figura 5— Tensão X Corrente para impedância de carga variável**

Neste caso, observa-se na figura 5 [13], que a impedância da carga não evolui de forma constante com os níveis de tensão aplicada, inexistindo, portanto, a proporcionalidade da razão entre tensão e corrente.

A figura 6 apresenta o comportamento da carga não linear, que mesmo suprida por uma fonte de tensão senoidal pode apresentar uma forma de onda de corrente distorcida harmonicamente.



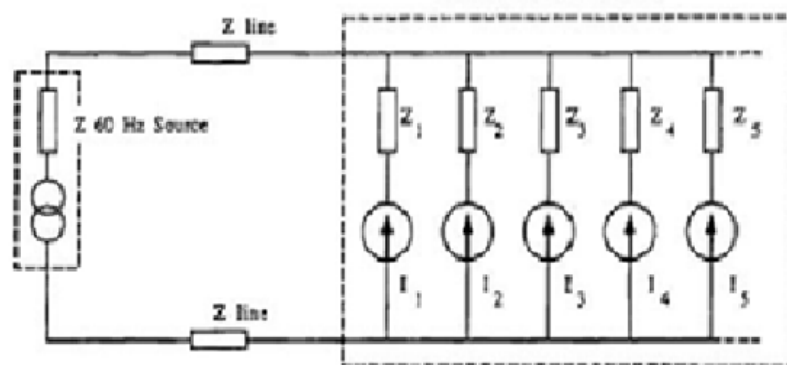
**Figura 6— Amostra de forma de onda de corrente distorcida resultado de aplicação de carga não linear**

Nessa modelagem, observa-se a resultante de uma forma de onda de corrente de carga harmonicamente distorcida, como resultado da transposição da forma de onda da tensão de uma carga não linear através de uma linha da reflexão de 45°.

Se uma onda de tensão harmonicamente distorcida é aplicada a uma carga linear, isto resultará em uma forma de onda de corrente de carga correspondente, também distorcida. Está é a função da forma de onda de tensão aplicada através de uma carga de impedância constante.

Mas, se uma forma de onda de tensão já distorcida, é aplicada a uma carga não linear, a forma de onda de corrente resultante na carga, pode apresentar níveis de distorções harmônicas acrescidas aos já relacionados com a não linearidade intrínseca da mesma, compondo uma nova forma de onda de corrente com mais ou menos distorção.

O efeito de carregamento não linear pode ser modelado acrescentando-se uma ou mais fontes de correntes dependentes ao sistema elétrico as quais geram o fluxo de corrente harmônico característico circulante na linha de cabos entre cargas e fonte. Veja ilustração na figura 7 [13].



Cada fonte de corrente é definida como tendo uma magnitude (A) e ângulo de fase ( $\theta$ ) logo,  $I_n = A \angle \theta$

**Figura 7 - Modelagem de cargas não lineares representadas por fontes de corrente, conectadas em paralelo com a fonte de energia de frequência fundamental.**

Quando componentes harmônicas de corrente provenientes de cargas não lineares fluem através da impedância interna da fonte AC, quedas de tensão são produzidas ( $E = I * Z$ ) na impedância interna da fonte de tensão por cada componente de corrente harmônica, em adição a queda produzida pela componente fundamental.

A dimensão da queda de tensão interna na fonte depende de dois aspectos relevantes, os quais devem ser considerados para cada frequência harmônica:

- A impedância apresentada pela reatância interna dos enrolamentos da fonte, e;
- A contribuição de corrente;

Pode-se ter noção da amplitude da contribuição das componentes harmônicas na queda de tensão com a seguinte proporção: 1 ampere de 3ª harmônica produz aproximadamente uma queda de tensão três vezes maior que a produzida por 1 ampere da componente fundamental. Ou seja, a reatância apresentada nos enrolamentos das fontes de tensão varia em função da frequência de cada componente harmônica de corrente, logo, as quedas de tensão geradas ( $E_n = I_n * Z_n$ , onde  $n$  é a ordem da componente harmônica) são normalmente defasadas das formas de onda das componentes fundamentais de tensão e corrente, resultado do deslocamento de fase único de cada componente harmônica (veja figura 8). Em outras palavras, cada componente harmônica de diferente ordem terá seu próprio fator de potência de deslocamento.

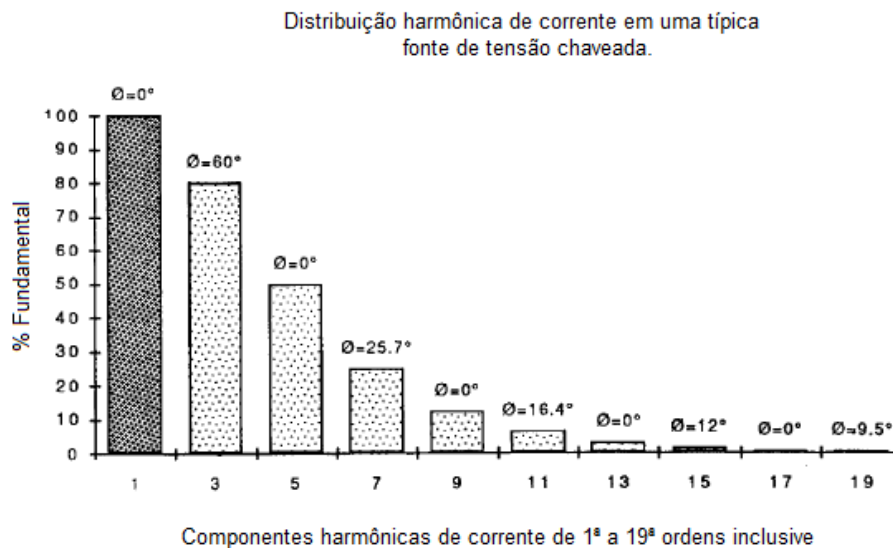


Figura 8 – DHTi e respectivos ângulos de fase

A queda de tensão resultante que ocorre dentro da fonte de energia AC proveniente da contribuição do fluxo de correntes harmônicas é algebricamente acrescida à tensão fundamental produzida no mesmo enrolamento. Desta forma, a fonte de energia passa a gerar uma

forma de onda de tensão distorcida a qual é aplicada a todas as cargas conectadas, lineares ou não.

Diante do desempenho acima, a necessidade da utilização de fontes de energia de baixa impedância suprindo cargas não lineares se torna evidente, minimizando desta forma a propagação de formas de onda distorcidas a jusante da fonte.

O mesmo efeito ocorre na impedância dos cabos que interligam as fontes de energia às cargas não lineares conectadas as mesmas. Vendo tais cargas como fontes de correntes harmônicas, a distorção harmônica de tensão no sistema tende a ser incrementada pela contribuição das parcelas geradas na rede de cabos e se mostra ainda mais relevante nos casos em que as fontes estão próximas das cargas.

A maioria das cargas eletrônicas apresenta características não lineares. Fontes de energia AC-DC, retificadores de onda completa a diodo e grandes filtros DC a capacitores são exemplos comuns desse tipo de carga.

### Evolução tecnológica

Exemplos típicos de cargas não lineares são as fontes de energia chaveadas, as quais apresentam picos de corrente importantes, e os dispositivos de velocidade controlada ou conversores estáticos de frequência aplicados em várias topologias, tais como: de seis e doze pulsos e os PWM (Pulse width modulated), onde as formas de onda de corrente moduladas por cada tipo varia significativamente. Reatores eletrônicos supridores de energia para lâmpadas fluorescentes são outros exemplos de cargas não lineares [13].

O interesse das indústrias ajudou a promover a evolução tecnológica das fontes de energia AC/DC, como a melhora do fator de potência de entrada das mesmas e relevantes reduções das correntes harmônicas demandadas, respaldada por limites sugeridos pelas normas IEC 60555-1:1982 [B24], IEC 60555-2:1982 [B25], e IEC 60555-3:1982 [B26].

Novas tecnologias implicam em custos mais altos os quais ainda dificultam e retardam a introdução destes novos modelos no mercado, fazendo com que os compradores optem por custos iniciais de instalação menores. Neste panorama, ainda conviveremos com a predominância de modelos obsoletos por algum tempo.