UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Avaliação da Autoperturbação por Harmônicos em Instalações Elétricas Hospitalares

NILTON JOSÉ SAGGIORO

Bauru - SP

2020

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Avaliação da Autoperturbação por Harmônicos em Instalações Elétricas Hospitalares

NILTON JOSÉ SAGGIORO

Tese apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia de Bauru (FEB) – UNESP, para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Paulo José Amaral Serni

Coorientador: Prof. Dr. André Luiz Andreoli

Bauru - SP

2020

S129a

Saggioro, Nilton José
Avaliação da autoperturbação por harmônicos em instalações elétricas hospitalares / Nilton José Saggioro. -- Bauru, 2020
231 f. : il., tabs., fotos

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia, Bauru
Orientador: Prof. Dr. Paulo José Amaral Serni
Coorientador: Prof. Dr. André Luiz Andreoli

1. Engenharia elétrica. 2. Autoperturbação por harmônicos. 3. Instalações elétricas hospitalares. 4. Harmônicos. 5. Equipamentos eletromédicos. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Engenharia, Bauru. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Bauru

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE NILTON JOSÉ SAGGIORO, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 06 dias do mês de março do ano de 2020, às 08:00 horas, no(a) Sala de Aula nº 06, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. PAULO JOSÉ AMARAL SERNI - Orientador(a) do(a) Departamento de Engenharia de Controle e Automação / Instituto de Ciência e Tecnologia - UNESP - Câmpus de Sorocaba, Prof. Dr. ALESSANDRO GOEDTEL do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Cornélio Procópio, Prof. Dr. WESLEY ANGELINO DE SOUZA do(a) Departamento de Computação / Universidade Federal de São Carlos - Campus de Sorocaba / SP, Prof. Dr. CLAUDIONOR FRANCISCO DO NASCIMENTO do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Universidade Federal de São Carlos, Prof. Dr. FABRICIO GUIMARÃES BAPTISTA do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da TESE DE DOUTORADO de NILTON JOSÉ SAGGIORO, intitulada **AVALIAÇÃO DA AUTOPERTURBAÇÃO POR HARMÔNICOS EM INSTALAÇÕES ELÉTRICAS HOSPITALARES**. Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO.

Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. PAULO JOSÉ AMARAL SERNI

Prof. Dr. ALESSANDRO GOEDTEL

Prof. Dr. WESLEY ANGELINO DE SOUZA

Prof. Dr. CLAUDIONOR FRANCISCO DO NASCIMENTO

Prof. Dr. FABRICIO GUIMARÃES BAPTISTA

AGRADECIMENTOS

A nosso único Deus, Senhor, salvador e sustentador de nossas vidas.

Ao Prof. Dr. Paulo José Amaral Serni, meu orientador, por ter confiado, para o desafio deste trabalho, em alguém que estava fora da academia há muitos anos. Por seu apoio, dedicação, disponibilidade, parceria, envolvimento, ensinamentos, conselhos, ... faltaram palavras. Muito Obrigado!!!

Ao Prof. Dr. André Luiz Andreoli, meu coorientador, pela amizade e por se dispor a contribuir com este trabalho, amenizando o impacto do retorno ao meio acadêmico, e sendo o impulsionador em momentos decisivos.

À minha esposa Maria José, minhas filhas Vitória e Sofia, meu genro João Vitor, minha mãe Ivanilda e minha irmã Silvia, por me incentivarem, pelos momentos de privação familiar, e por terem me ouvido pacientemente quando eu tratava de assuntos tão estranhos à suas atividades cotidianas. E também a meu pai Osvaldo (*in memorian*) por seu empenho e apoio durante meus primeiros passos na engenharia.

Aos meus companheiros do Laboratório de Pesquisa de Qualidade de Energia Elétrica da Faculdade de Engenharia Elétrica de Bauru da UNESP, especialmente ao Dr. Bruno Albuquerque de Castro, ao Me. Wallace Gabriel de Souza, ao Me. Marco Aurélio Rocha e a Engª Christielly Fernandes da Costa, pela parceria e apoio nos momentos difíceis.

Aos superintendentes do Hospital de Reabilitação de Anomalias Craniofaciais da Universidade de São Paulo, Profª Drª Maria Aparecida de Andrade Moreira Machado e Prof. Dr. Carlos Ferreira dos Santos, por me possibilitarem o afastamento temporário de minhas atividades profissionais para o desenvolvimento deste trabalho.

“Porque dEle, e por meio dEle, e para Ele são todas as coisas. A Ele, pois, a glória eternamente. Amém”

Romanos 11:33

RESUMO

Esta tese apresenta uma contribuição da área de engenharia elétrica para o gerenciamento da operação de equipamentos eletromédicos, por meio da avaliação de distorções na forma de onda da tensão em instalações elétricas hospitalares, provocadas por equipamentos utilizados pelos próprios hospitais. Após revisão bibliográfica sobre as origens, publicações normativas, e consequências dos harmônicos nas instalações elétricas, e em especial em instalações hospitalares, é apresentado o princípio das distorções na forma de onda da tensão provocado por equipamentos existentes na própria unidade consumidora, e proposto que esse fenômeno seja chamado de "autoperturbação" por harmônicos. Para comprovar a existência da autoperturbação e quantificá-la, foram realizadas medições do conteúdo harmônico da corrente em três equipamentos hospitalares de diagnóstico por imagem, e desenvolvidos um modelo analítico e um modelo computacional para a avaliação da autoperturbação. Após a apresentação detalhada dos modelos desenvolvidos, o conteúdo harmônico da corrente obtido durante as medições foi introduzido nos modelos para três cenários de cargas e para transformadores com três potências nominais diferentes. A distorção harmônica da tensão no interior da instalação foi quantificada para cada cenário e para cada transformador, confirmando a ocorrência da autoperturbação por harmônicos. Em seguida, para possibilitar uma avaliação quantitativa, preliminar à instalação dos equipamentos, é apresentado um indicador proposto para a avaliação da autoperturbação por harmônicos e sugeridos valores limites para este indicador, em conformidade com as publicações normativas a serem atendidas.

Palavras-chave: autoperturbação por harmônicos, instalações elétricas hospitalares, harmônicos, equipamentos eletromédicos.

ABSTRACT

This thesis presents a contribution from the electrical engineering area for the management of the operation of electromedical equipment, through the evaluation of distortions in the voltage waveform inside hospital electrical installations, caused by equipment used by the hospitals themselves. After a bibliographic review on the origins, technical standards, and problems caused by harmonics in electrical installations, and especially at hospital installations, the principle of distortions in the voltage waveform caused by current drained by electromedical equipment is presented, and it is proposed that this phenomenon be called “self-disturbance” by harmonics. In order to prove the existence of self-disturbance and to quantify it, measurements were made on the harmonic spectrum of the current drained by three hospital equipment for imaging diagnostic, and an analytical model and a computational model were developed for the evaluation of self-disturbance. After the detailed presentation of the developed models, the harmonic spectrum of the currents obtained during the measurements were introduced in the models for three load scenarios and for transformers with three different rated powers. The harmonic distortion of the voltage inside the installation was quantified for each scenario and for each rated power transformer, confirming the occurrence of self-disturbance by harmonics. Then, to enable a quantitative assessment, preliminary to the installation of the equipment, a proposed indicator is presented for the assessment of self-disturbance by harmonics and suggested limit values for this indicator, in accordance with the standards to be met.

Keywords: harmonic self-disturbance, hospital electrical installations, harmonics, electromedical equipment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Imagem de Charles Proteus Steinmetz 5
Figura 2 – Distorção de corrente causada por resistor não linear 9
Figura 3 – Imagem de Jean Baptiste Joseph du Fourier 10
Figura 4 – Imagem de James Clerk Maxwell 12
Figura 5 – Representação em série de Fourier de uma forma de onda distorcida 13
Figura 6 – Representação de uma onda quadrada, periódica, com período 2π 13
Figura 7 – Representação de uma onda senoidal através de fasores 14
Figura 8 – Sequência de fase em um sistema trifásico equilibrado 16
Figura 9 – Representação fasorial da componente fundamental (a), do terceiro (b), do quinto (c), e do sétimo harmônico (d) 17
Figura 10 –Formas de ondas da componente fundamental e da quinta harmônica (a) sem deslocamento, e (b) com deslocamento 20
Figura 11 – Filtro ativo paralelo para compensação de harmônicos 42
Figura 12 – Filtro ativo série para compensação de harmônicos. 43
Figura 13 – Diagrama de filtro híbrido dotado de filtro ativo paralelo (*AHF*) e filtro passivo (*PHF*) 44
Figura 14 – Diagrama de filtro híbrido dotado de filtro ativo série (*AHF*) e filtro passivo (*PHF*) 44
Figura 15 – Forma de onda com componentes harmônicos e interharmônicos 47
Figura 16 – Formas de onda de correntes com supraharmônicos oriundos de quatro equipamentos domésticos 51
Figura 17 – Espectros de corrente com supraharmônicos oriundos de quatro equipamentos domésticos 51
Figura 18 – Efeito pelicular (ou *skin effect*) em um condutor elétrico 75
Figura 19 – Correntes harmônicas que fluem através da impedância do sistema elétrico que resultam em tensões harmônicas na carga 84
Figura 20 – Tensões harmônicas e o princípio da autoperturbação 86
Figura 21 – Processo de geração dos raios X 90
Figura 22 – Imagem radiográfica de uma mão com alto contraste entre os tecidos “duros” e baixo contraste entre tecidos “moles” 91
Figura 23 – Diagrama de blocos para sistemas de raio X 91

Figura 24 – Processo rotativo para obtenção de múltiplas radiografias planas, empregado na tomografia computadorizada 93
Figura 25 – Comparação de uma imagem radiográfica (a), com uma imagem do mesmo paciente obtida por tomografia computadorizada (b)..... 93
Figura 26 – Diagrama de blocos para sistema de tomografia computadorizada..... 94
Figura 27 – Movimentos das partículas no interior do átomo..... 96
Figura 28 – Uma partícula carregada e em movimento rotacional cria um campo magnético ao seu redor..... 96
Figura 29 – Alinhamento dos *spins* na presença de campo magnético externo..... 97
Figura 30 – Imagem da coluna de um paciente obtida por ressonância magnética 98
Figura 31 – Diagrama de blocos para sistemas de ressonância magnética 98
Figura 32 – Foto do medidor ION7650 utilizado para as medições de harmônicos..... 102
Figura 33 – Foto do equipamento de raios X analisado..... 102
Figura 34 – Forma de onda da corrente de uma das fases do equipamento de raio X 103
Figura 35 – Foto do equipamento de tomografia computadorizada analisado 105
Figura 36 – Forma de onda da corrente de uma das fases do equipamento de tomografia computadorizada..... 105
Figura 37 – Foto do equipamento de ressonância magnética analisado 107
Figura 38 – Forma de onda da corrente de uma das fases do equipamento de ressonância magnética..... 107
Figura 39 – Circuito equivalente monofásico de um transformador, referido ao seu secundário..... 111
Figura 40 – Modelo de circuito equivalente para o estudo analítico da autoperturbação por harmônicos..... 116
Figura 41 – Comportamento da THD_V por transformador, para os três cenários de cargas do estudo analítico da autoperturbação 122
Figura 42 – Diagrama unifilar do sistema elétrico utilizado na simulação computacional..... 125
Figura 43 – Modelo computacional completo em ATPDraw, elaborado para simular o sistema elétrico analisado..... 128
Figura 44 – (a) Símbolo gráfico do bloco “ACSOURCE” utilizado no ATPDraw como fonte de tensão senoidal e, (b) sua tela de parâmetros 129
Figura 45 – (a) Símbolo gráfico do bloco “LINESY_3” utilizado no ATPDraw como a impedância do sistema elétrico até o *PAC* e, (b) sua tela de parâmetros 130

Figura 46 – (a) Símbolo gráfico do bloco “SATTRAFO” utilizado no ATPDraw como modelamento do transformador e, (b) sua tela de parâmetros 131
Figura 47 – Curva de saturação parametrizada no Bloco SATTRAFO utilizado no modelo computacional do *ATPDraw* 131
Figura 48 – (a) Símbolo gráfico do bloco “LINERL_3” utilizado no ATPDraw como modelamento dos alimentadores e, (b) sua tela de parâmetros 132
Figura 49 – Medidores utilizados no *ATPDraw* para coleta dos dados necessários 133
Figura 50 – (a) Símbolo gráfico do bloco “ACSOURCE” utilizado no ATPDraw como fonte de corrente harmônica e, (b) sua tela de parâmetros 134
Figura 51 – Tela de configuração de critérios de simulação utilizados no *ATPDraw* 135
Figura 52 – Formas de onda da tensão e da corrente obtidas na simulação, para o transformador de 225 kVA alimentando apenas a ressonância magnética 136
Figura 53 – Formas de onda da tensão e da corrente obtidas na simulação, para o transformador de 225 kVA alimentando a ressonância magnética e a tomografia computadorizada, simultaneamente 137
Figura 54 – Formas de onda da tensão e da corrente obtidas na Simulação, para o transformador de 225 kVA alimentando a aessonância magnética, a tomografia computadorizada, e o raio X, simultaneamente 137
Figura 55 – Forma de onda da tensão e seu conteúdo harmônico, obtidos na simulação, para o transformador de 225 kVA alimentando a ressonância magnética, a tomografia computadorizada, e o raio X, simultaneamente 138
Figura 56 – Comportamento da THD_V por transformador, para os três cenários de cargas, oriundo da simulação computacional sobre a autoperturbação..... 140
Figura 57 – Foto do medidor ION7650 utilizado nas medições 163
Figura 58 – Foto dos transformadores de corrente utilizados nas medições..... 164
Figura 59 – Foto de um dos quadros de distribuição onde foram feitas medições 164
Figura 60 – Foto do equipamento de raio X analisado 165
Figura 61 – Formas de onda de tensões e correntes do equipamento de raio X 165
Figura 62 – Imagem da planilha com os valores obtidos durante as medições no equipamento de raio X..... 166
Figura 63 – Foto do equipamento de tomografia computadorizada analisado 167
Figura 64 – Formas de onda de tensões e correntes do equipamento de tomografia computadorizada..... 168

Figura 65 – Imagem da planilha com os valores obtidos durante as medições no equipamento de tomografia computadorizada..... 169
Figura 66 – Foto do equipamento de ressonância magnética analisado 170
Figura 67 – Formas de onda de tensões e correntes do equipamento ressonância magnética..... 170
Figura 68 – Imagem da planilha com os valores obtidos durante as medições no equipamento ressonância magnética 171
Figura 69 – Imagem da planilha com os valores do conteúdo harmônico médio para 80% da potencia nominal do equipamento de raio X..... 173
Figura 70 – Imagem da planilha com os valores do conteúdo harmônico médio para 80% da potencia nominal do equipamento de tomografia computadorizada..... 174
Figura 71 – Imagem da planilha com os valores do conteúdo harmônico médio para 80% da potencia nominal do equipamento de ressonância magnética..... 175
Figura 72 – Imagem da planilha de cálculo dos parâmetros Req e $Xeq_{(60Hz)}$ do modelo simplificado do transformador para o estudo analítico 179
Figura 73 – Imagem da planilha contendo o conteúdo harmônico das correntes dos equipamentos e sua composição para a simultaneidade das cargas, utilizada no estudo analítico..... 180
Figura 74 – Imagem da planilha de cálculo de parâmetros de distorção harmônica para um transformador de 225 kVA, utilizada no estudo analítico..... 181
Figura 75 – Imagem da planilha de cálculo de parâmetros de distorção harmônica para um transformador de 300 kVA, utilizada no estudo analítico..... 182
Figura 76 – Imagem da planilha de cálculo de parâmetros de distorção harmônica para um transformador de 500 kVA, utilizada no estudo analítico..... 183
Figura 77 – Imagem da planilha de cálculo dos parâmetros do transformador de 225 kVA a serem implementados no bloco SATTRAFO 185
Figura 78 – Imagem da planilha de cálculo dos parâmetros do transformador de 300 kVA a serem implementados no bloco SATTRAFO 186
Figura 79 – Imagem da planilha de cálculo dos parâmetros do transformador de 500 kVA a serem implementados no bloco SATTRAFO 187

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Definições Matemáticas de Harmônicos, Interharmônicos e Subharmônicos 9
Tabela 2 – Ordem dos Harmônicos e suas Respectivas Sequências de Fase 19
Tabela 3 – Variação da *THDi* de um retificador de 6 pulsos com a impedância efetiva. 37
Tabela 4 – Comparação entre o Desempenho de Diversas Técnicas para Mitigação de Harmônicos..... 45
Tabela 5 – Comparação entre os Custos de Diversas Técnicas para Mitigação de Harmônicos..... 45
Tabela 6 – Valores Numéricos dos Componentes da Onda da Figura 15 48
Tabela 7 – Limites de Compatibilidade: Harmônicos de Tensão (U_h% e THD_V) em Instalações Industriais até 35 kV (IEC 61000-2-4) 57
Tabela 8 – Limites de Componentes Harmônicos de Corrente (I_h/I_1 %) para Equipamentos com Corrente Superior a 16 A, de Baixa Tensão – Scc > 33xSeq (IEC 61000-3-4) 60
Tabela 9 – Limites para Distorção de Tensão de Acordo com a IEEE 519:2014 61
Tabela 10 – Limites de Distorção de Corrente para Níveis de Tensão no *PAC* entre 120 V e 69 kV, de Acordo com as Recomendações IEEE 519:2014..... 62
Tabela 11 – Teminologia Utilizada no PRODIST – Módulo 8 da *ANEEL*..... 64
Tabela 12 – Limites das Distorções Harmônicas Totais (em % da tensão fundamental), conforme a ANEEL – PRODIST Módulo 8..... 66
Tabela 13 – Comparação entre Abordagens da *IEC* e do *IEEE* sobre Limites para Harmônicos..... 68
Tabela 14 – Limites de Compatibilidade para a *THD* de Tensão no *PAC* Estabelecidos por Diferentes Instrumentos Normativos 68
Tabela 15 – Conteúdo Harmônico da Corrente do Equipamento de Raio X 104
Tabela 16 – Conteúdo Harmônico da Corrente do Equipamento de Tomografia Computadorizada..... 106
Tabela 17 – Conteúdo Harmônico da Corrente do Equipamento de Ressonância Magnética 108
Tabela 18 – Valores dos Conteúdos Harmônicos das Correntes Utilizados no Estudo Analítico e nas Simulações Computacionais..... 109
Tabela 19 – Valores dos Parâmetros Necessários para a Determinação do Circuito Equivalente, por Potência do Transformador (60 Hz)..... 112

Tabela 20 – Valores Intermediários e de Req para o Circuito Equivalente Monofásico, por Potência do Transformador (60 Hz) 114
Tabela 21 – Valores Intermediários e de Xeq para o Circuito Equivalente Monofásico, por Potência do Transformador (60 Hz) 115
Tabela 22 – Resultados do Estudo Analítico para a Tensão no Ponto Comum entre as Cargas, para Três Cenários Diferentes 118
Tabela 23 – Valores do Fator K (K_{EN}) para as Cargas, em Três Cenários Diferentes 119
Tabela 24 – Indicadores de Distorção Harmônica nas Cargas para o Estudo de Caso Analisado, e Transformador de 225 kVA 120
Tabela 25 – Indicadores de Distorção Harmônica nas Cargas para o Estudo de Caso Analisado, e Transformador de 300 kVA 120
Tabela 26 – Indicadores de Distorção Harmônica nas Cargas para o Estudo de Caso Analisado, e Transformador de 500 kVA 121
Tabela 27 – Valores das Impedâncias do Sistema Elétrico Analisado até o *PAC* 126
Tabela 28 – Dimensionamento dos Alimentadores de Baixa Tensão e suas Resistências, Conforme Figura 42 127
Tabela 29 – Valores dos Conteúdos Harmônicos das Correntes e Seus Correspondentes Ângulos de Fase Utilizados nas Simulações Computacionais 135
Tabela 30 – Resultados da Simulação Computacional para a Tensão no QGBT, para Três Cenários Diferentes de Cargas 139
Tabela 31 – Resultados da Simulação Computacional para a *THD* da Tensão no *PAC*, para Três Cenários Diferentes de Cargas 140
Tabela 32 – Resultados Obtidos para o *IAH* para Três Cenários Diferentes de Cargas 144
Tabela 33 – Resultados Obtidos para o *IAH* para Três Cenários Diferentes de Cargas e as Correspondentes THD_V Determinadas pelo Estudo Analítico e por Simulação Computacional 145
Tabela 34 – Parâmetros Obtidos Junto aos Equipamentos de Diagnóstico por Imagem 148

LISTA DE SIGLAS E DEFINIÇÕES

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AHF	*Active Harmonic Filter* (Filtro Ativo de Harmônico)
ATP	*Alternative Transiente Program*
C	Capacitor
CPFL	Companhia Paulista de Força e Luz
DIN	*Distortion Index* (Índice de Distorção)
DIN_V	Índice de Distorção de Tensão
DIT	Distorção Individual de Tensão
DTT	Distorção Total de Tensão
F_{HL}	*Harmonic Loss Factor* (Fator de Perda Harmônica)
HHF	*Hybrid Harmonic Filter* (Filtro Híbrido de Harmônico)
IAH	Índice de Autopertubação por Harmônicos
IEC	*International Electrotechnical Commission*
IEEE	*Institute of Electrical and Electronics Engineeres*
K_{EN}	*Factor K (European Standard)*
K_{UL}	*K-factor (Underwriters Laboratories)*
L	Indutor
LED	*Light-Emitting Diode* (Diodo Emissor de Luz)
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
PHF	*Passive Harmonic Filter* (Filtro Passivo de Harmônico)
PRODIST	Procedimentos de Distribuição
QGBT	Quadro Geral de Baixa Tensão
RF	Radio Frequência
RMS	*Root Mean Square* (Raiz Quadrática Média)
R_{Th}	Regulação de Tensão
TDD	*Total Demand Distortion* (Distorção Total na Demanda)
THD	*Total Harmonic Distortion* (Distorção Harmônica Total)
THD_i	Distorção Harmônica Total da Corrente
THD_V	Distorção Harmônica Total da Tensão

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	**Descrição**	**Unidade**
ΔV_Z	Queda de Tensão na Impedância Z	V
$P_{E(pu)}$	Perda Total de Correntes Parasitas	*pu*
$P_{H(pu)}$	Perda Total de Histerese	*pu*
$P_{I(pu)}$	Perda Total no Ferro	*pu*
I_{2N}	Valor Eficaz da Corrente Nominal no Secundário do Transformador	A
$I_{h(pu)}$	Valor da Corrente em sua Componente Harmônica *h*	*pu*
I_h	Corrente Eficaz da Harmônica de Ordem *h*	A
I_R	Corrente Eficaz Nominal do Transformador	A
I_{RMS-1}	Valor Eficaz da Corrente em sua Componente Fundamental	A
I_{RMS-h}	Valor Eficaz da Corrente em sua Componente *h*	A
I_{dist}	Corrente Total Distorcida	A
$P_{1\emptyset cobre}$	Perdas no Cobre no Transformador, por Fase	W
$P_{1\emptyset total}$	Perda Total no Transformador, por Fase	W
$P_{1\emptyset vazio}$	Perdas em Vazio no Transformador, por Fase	W
$P_{R(pu)}$	Potência Ativa Dissipada em um Resistor Puro	*pu*
$Q_{C(pu)}$	Potência Reativa em um Capacitor Puro	*pu*
$Q_{L(pu)}$	Potência Reativa Absorvida por um Indutor Puro	*pu*
R_{eq}	Resistência Equivalente o Transformador Referida ao Secundário	Ω
$S_{1\emptyset}$	Potência Nominal Monofásica	VA
S_{dist}	Potência Total Distorcida do Transformador	VA
S_{eq}	Potência Equivalente do Transformador	VA
$V_{1\emptyset}$	Tensão de Fase do Secundário do Transformador	V
V_F	Tensão na Fonte	V
V_{NS}	Tensão Nominal do Sistema Elétrico	V
V_{PAC}	Tensão no *PAC*	V
X_{eq}	Reatância Equivalente o Transformador Referida ao Secundário	Ω
Z^0	Impedância de Sequência Zero	Ω
Z^1	Impedância de Sequência Positiva	Ω

Símbolo	Descrição	Unidade
Z^2	Impedância de Sequência Negativa	Ω
Z_{EA}	Impedância Efetiva Percentual do Alimentador	%
Z_L	Impedância Natural do Reator Puro	Ω
Z_s	Impedância do Sistema Elétrico	Ω
f_h	Frequência do Harmônico de ordem *h*	Hz
ω_0	Frequência Fundamental	rad/s
dt	Valor Infinitesimal (derivada) de Tempo	-
f	Frequência	Hz
$f1$	Frequência Fundamental	Hz
h	Ordem da Componente Harmônica	-
i_{a1}	Valor Instantâneo da Componente Fundamental da Corrente na Fase "*a*"	A
I_{a1}	Valor Máximo da Componente Fundamental da Corrente na Fase "*a*"	A
$Ø$	Ângulo de Deslocamento Temporal	graus
sen	Função Seno	-
T	Período de um Sinal Periódico	s
t	Tempo	s
$v(t)$	Valor Instantâneo de um Sinal Periódico de Tensão	V
V_{ave}	Valor Médio (*average*) da Tensão	V
V_{RMS}	Valor Eficaz (ou *RMS*) da Tensão	V

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO **1**

1.1 Objetivos Gerais 2

1.2 Objetivos Específicos 2

1.3 Organização do Trabalho 3

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA **4**

2.1 Distorções Harmônicas: Panorama Geral e Tendências 4

2.1.1 Breve Histórico 5

2.1.2 Definições 8

2.1.2.1 Distorções Harmônicas 8

2.1.2.2 Análise de Fourier 10

2.1.2.3 Harmônicos em Sistemas Trifásicos 14

2.1.2.4 Indicadores de Harmônicos 21

2.1.2.4.1 Distorção Harmônica Total 22

2.1.2.4.2 Distorção Total na Demanda 24

2.1.2.4.3 Índice de Distorção 25

2.1.3 Efeitos das Distorções Harmônicas 25

2.1.3.1 Efeitos Gerais sobre Sistemas Elétricos 26

2.1.3.2 Efeitos sobre Instalações Elétricas Hospitalares 30

2.1.4 Métodos de Mitigação dos Efeitos 34

2.1.4.1 Fundamentos da Mitigação de Harmônicos 35

2.1.4.2 Técnicas Passivas para a Mitigação de Harmônicos 35

2.1.4.2.1 Reatores de Linha 36

2.1.4.2.2 Transformadores de Deslocamento de Fase 38

2.1.4.2.3 Conexões do Transformador 38

2.1.4.2.4 Filtros Sintonizados 39

2.1.4.3 Técnicas Ativas para a Mitigação de Harmônicos 40

2.1.4.3.1 Filtro Ativo Paralelo 41

2.1.4.3.2 Filtro Ativo Série 42

2.1.4.4 Filtros Híbridos 43

2.1.4.5 Considerações sobre Desempenho e Custo 45

2.1.5 Tendências 46

2.1.5.1 Interharmônicos 46
2.1.5.2 Supraharmônicos 50
2.2 Distorções Harmônicas: Referências Normativas e Limites Propostos 52
2.2.1 Normas da *IEC* 53
2.2.1.1 IEC61000-2-4 55
2.2.1.2 IEC61000-3-4 58
2.2.2 Recomendações do *IEEE* 60
2.2.2.1 IEEE 519 60
2.2.3 Resoluções da *ANEEL* 63
2.2.3.1 ANEEL – PRODIST – Módulo 8 63
2.2.4 Considerações sobre as Referências Normativas 67
2.3 Instalações Elétricas Hospitalares e Transformadores 69
2.3.1 Instalações Elétricas Hospitalares 70
2.3.2 Transformadores 75
2.3.2.1 Dimensionamento para Cargas Lineares 76
2.3.2.2 Dimensionamento para Cargas Não Lineares 77
2.3.2.2.1 Fator de Perda Harmônica 78
2.3.2.2.2 K-factor 79
2.3.2.2.3 Fator K 81
2.3.2.3 Considerações sobre Transformadores 83
2.4 O Princípio da Autoperturbação 84
2.5 Aspectos Operacionais de Equipamentos Hospitalares 89
2.5.1 Raio X 89
2.5.2 Tomografia Computadorizada 92
2.5.3 Ressonância Magnética 95
2.5.4 Considerações sobre Aspectos Operacionais de Equipamentos Hospitalares 95
CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA 100
3.1 Medições Elétricas em Equipamentos Hospitalares 101
3.1.1 O Medidor de Harmônicos Utilizado 101
3.1.2 As Medições no Equipamento de Raio X 102
3.1.3 As Medições no Equipamento de Tomografia Computadorizada 104
3.1.4 As Medições no Equipamento de Ressonância Magnética 106

3.1.5 Dados Utilizados no Estudo Analítico e Simulações Computacionais 109

3.2 Estudo Analítico da Autoperturbação 110

3.2.1 O Circuito Equivalente Simplificado de Transformadores 111

3.2.2 Resultados do Estudo Analítico sobre a Autoperturbação por Harmônicos 116

3.2.3 Considerações e Conclusões Parciais do Estudo Analítico 121

3.3 Simulação Computacional e Análise da Autoperturbação 124

3.3.1 O Software Utilizado 124

3.3.2 O Sistema Elétrico Estudado 125

3.3.3 O Modelamento do Sistema Elétrico Estudado 127

3.3.4 Resultados da Simulação Computacional 136

3.3.5 Considerações e Conclusões Parciais da Simulação Computacional 141

3.4 Indicador de Autopertubação por Harmônicos 142

3.4.1 Proposta de Indicador de Autopertubação por Harmônicos 143

3.4.2 Resultados do Indicador de Autoperturbação por Harmônicos Proposto, para os Casos Analisados 144

3.4.3 Análise Comparativa entre o Indicador de Autoperturbação por Harmônicos Proposto e a Distorção Harmônica Total 145

3.4.4 Considerações e Conclusões Sobre o Indicador de Autoperturbação por Harmônicos Proposto 146

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES 147

4.1 Aspecto 1: Tempo de Operação dos Equipamentos 147

4.2 Aspecto 2: Dimensionamento e Características do Transformador 149

4.3 Aspecto 3: Indicadores de Distorção Harmônica 150

4.4 Aspecto 4: Indicador de Autoperturbação por Harmônicos 151

4.5 Aspecto 5: Influência das Características do Sistema Elétrico à Montante do *PAC* na Autoperturbação por Harmônicos 152

CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS 153

PUBLICAÇÕES 155

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 156

APÊNDICE A

Medições do Conteúdo Harmônico das Cargas 163

A1 – Medições no Equipamento de Raio X 165

A2 – Medições no Equipamento de Tomografia Computadorizada 167

A3 – Medições no Equipamento de Ressonância Magnética 170

A4 – Dados Utilizados nas Simulações 172

APÊNDICE B

Planilhas Desenvolvidas para o Estudo Analítico da Autoperturbação 178

APÊNDICE C

Planilhas Desenvolvidas para o Cálculos dos Parâmetros dos Modelos dos Transformadores em *ATPDraw* 184

ANEXO I

Folhas de Dados de Transformadores 188

ANEXO II

Dados do Sistema Elétrico Utilizado na Simulação Computacional 195

II.1 – Imagem do Relatório de Curto Circuito no *PAC* (CPFL) 196

II.2 – Imagem Parcial de Catálogo de Cabos Tipo Afumex da Marca Prysmian 197

ANEXO III

Dados do *ATPDraw* sobre os Blocos Utilizados na Simulação 198

III.1 – Imagem do *ATPDraw* para o Bloco ACSOURCE 199

III.2 – Imagem do *ATPDraw* para o Bloco LINESY_3 200

III.3 – Imagem do *ATPDraw* para o Bloco SATTRAFO 201

III.4 –Exemplo de Modelagem de Transformadores Trifásicos no *ATPDraw* 202

III.5 – Imagem do *ATPDraw* para o Bloco LINERL_3 211

III.6 – Imagem do *ATPDraw* para a Tela ATP Settings 212

CAPÍTULO 1
INTRODUÇÃO

O tema saúde merece a atenção de todos os profissionais que, de forma direta ou indireta estejam relacionados a ela, incluindo governos, médicos, enfermeiros e engenheiros que estejam envolvidos com equipamentos e instalações de estabelecimentos assistenciais de saúde (SANTANA, 1996). Nessa área é preciso, sempre, garantir a segurança e a qualidade do atendimento ao paciente.

Para trazer maior segurança ao atendimento do paciente torna-se necessário o desenvolvimento de estratégias e ações direcionadas aos gestores e profissionais envolvidos com a saúde que possibilitem a promoção da mitigação da ocorrência de evento adverso na atenção à saúde (BRASIL-MS PORTARIA 529, 2013).

O conceito de segurança do paciente está intrinsicamente ligado ao conceito de risco dos procedimentos aos quais ele é submetido, estando associados ao risco dois componentes: i) a probabilidade da ocorrência de dano, e ii) as consequências desse dano, ou seja, quão severo ele venha a ser (NBR ISO 14971, 2009).

Nesse contexto de probabilidades e consequência do dano ao paciente, cabe refletir qual seria a taxa de falha aceitável quando se trata de vidas humanas, se é que ela exista (SANTANA, 1996; RAMOS, 2009).

Considerando a importância da vida humana, a identificação de riscos associados à segurança do paciente tem ganhado um interesse crescente por todas as áreas envolvidas com o cuidado do paciente (SIMSEKLER, JAYARAMAN, 2018).

Analisando ainda esse tema, mas sobre outro enfoque, através do progresso da medicina e com o avanço tecnológico, têm sido desenvolvidas novas técnicas e equipamentos que propiciam melhor qualidade no atendimento, como por exemplo, os exames por ressonância magnética e as cirurgias feitas com o auxílio de robôs cirúrgicos. Este fato tem trazido grandes benefícios à saúde humana e proporcionado maior segurança ao paciente (RAMOS, 2009).

Esses novos equipamentos médicos apresentam-se para as instalações elétricas como cargas que podem ser classificadas como sensíveis a problemas na qualidade da energia a eles fornecida, ou então como potenciais causadores desse tipo de problema no interior das instalações hospitalares. Alguns desses problemas na qualidade da energia referem-se à presença de harmônicos (OKUMOTO, et al., 2005; RAO, SINGH, THAKUR, 2010; BUZDUGAN, BALAN, MURESAN, 2010; ADAMU, MUHAMMAD, SHUAIBU, 2014).

Considerando-se também que novos equipamentos são incorporados ao edifício hospitalar ao longo de sua vida útil, faz-se necessário que o cuidado dos gestores de suas instalações elétricas seja permanente, e não apenas quando de sua construção, objetivando assegurar a qualidade da energia elétrica (QEE) fornecida aos equipamentos nele instalados (RAO, SINGH, THAKUR, 2010; SARIKPRUECK, et al., 2017).

A falta de qualidade da energia elétrica em instalações hospitalares pode provocar graves consequências, tais como a interrupção de procedimentos médicos, a necessidade da repetição de testes e/ou exames, maior tempo de internação, aumento nos custos hospitalares, perda de credibilidade da instituição hospitalar e, principalmente, aumento do risco de morte dos pacientes (SILVEIRA, CORREIA, 2003).

Associado a esse cenário, observa-se que existe uma lacuna nas normas relacionadas à qualidade da energia e, principalmente, aos efeitos da presença de alto conteúdo harmônico em instalações hospitalares (SILVEIRA, CORREIA, 2003; RAMOS, 2009; RAO, SINGH, THAKUR, 2010).

Evidencia-se, assim, que assegurar o fornecimento de energia elétrica com qualidade aos equipamentos médicos é uma importante contribuição da área de engenharia elétrica para a segurança do paciente e para o gerenciamento da operação desses equipamentos.

1.1 Objetivos Gerais

Diante do desafio apresentado de assegurar a qualidade da energia fornecida aos equipamentos médicos, esta tese demonstra a existência de problemas relacionados a harmônicos oriundos de equipamentos instalados na própria unidade hospitalar. Para tanto, são apresentados dois métodos de avaliação, um analítico e outro computacional; propõe o termo “autoperturbação” para tais problemas; e apresenta um indicador para a “autoperturbação” por harmônicos.

1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desta tese são:

- Descrever o problema da distorção harmônica na tensão no interior das instalações elétricas de uma unidade consumidora, provocado por cargas pertencentes a essa mesma unidade consumidora;

- Apresentar o termo “autoperturbação” para os problemas produzidos no interior das instalações por cargas pertencentes à própria unidade consumidora;
- Caracterizar o conteúdo harmônico da corrente de alguns equipamentos de diagnóstico por imagens existentes em hospitais, a saber: Raio X, Tomografia Computadorizada e Ressonância Magnética, através da medição direta nesses equipamentos;
- Desenvolver duas metodologias para a avaliação da “autoperturbação” por harmônicos, sendo uma analítica e outra computacional;
- Analisar os resultados obtidos através de cada uma das metodologias desenvolvidas;
- Desenvolver um índice para a avaliação da “autoperturbação” por harmônicos.

1.3 Organização do Trabalho

A organização desta tese foi dividida em quatro tópicos.

No Capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica sobre o conteúdo deste trabalho, na qual se discute as distorções harmônicas em um panorama geral, suas tendências, referências normativas e limites propostos. Também são apresentadas algumas características de instalações elétricas hospitalares e de transformadores. Ainda neste capítulo é apontado o princípio da “autoperturbação” e descrito alguns aspectos operacionais dos equipamentos hospitalares a serem analisados.

No Capítulo 3 é desenvolvida a metodologia de avaliação da “autoperturbação” por harmônicos, iniciando pelas medições efetuadas nos equipamentos hospitalares; demonstrado o estudo analítico proposto e uma simulação computacional através do software *ATPDraw*, e apresentado um indicador para a “autoperturbação” por harmônicos;

No Capítulo 4 são discutidos os resultados obtidos para a avaliação da “autoperturbação” por harmônicos no estudo analítico, na simulação computacional e através do índice proposto.

Por fim, conclui-se o trabalho discutindo as vantagens e desvantagens das metodologias utilizadas e do indicador proposto, além de abordar possíveis trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta revisão bibliográfica apresenta uma abordagem histórica e evolutiva, possibilitando o desenvolvimento natural do tema desta tese.

2.1 Distorções Harmônicas: Panorama Geral e Tendências

O assunto distorções harmônicas, também chamadas simplesmente por harmônicas (ou harmônicos), vem ganhando importância pela consolidação de duas perspectivas: a busca por eficiência energética e confiabilidade operacional através do uso de equipamentos eletrônicos; e a busca pelos consumidores (especialmente empresas) em melhorar o fator de potência para evitar penalidades (SINGH, 2009; KAZEM, 2013).

Notadamente no setor de saúde, e mais especificamente na área de diagnóstico por imagem, o avanço tecnológico tem possibilitado significativos avanços através de equipamentos como ressonância magnética, tomografia computadorizada e equipamentos de raios X (analógicos e digitais), os quais drenam corrente elétrica com elevado conteúdo harmônico (RAMOS, 2009; SARIKPRUECK, et al., 2017).

Os harmônicos foram definidos inicialmente como componentes espectrais indesejáveis de uma forma de onda periódica distorcida, cujas frequências são múltiplos inteiros da frequência fundamental (SANKARAN, 2002). Nos sistemas elétricos de corrente alternada as formas de onda desejáveis são senoidais e as frequências fundamentais atualmente utilizadas são de 50 Hz ou de 60 Hz. No decorrer da história dos sistemas elétricos, com a observação de componentes com múltiplos não inteiros da frequência fundamental, foram definidos os ‘interharmônicos’ (não inteiros maiores que um) e os ‘subharmônicos’ (entre zero e um).

A presença de harmônicos nas instalações elétricas provoca inúmeros problemas, tais como superaquecimento de condutores, sobreaquecimento de transformadores, vibrações em motores, falhas em componentes elétricos e eletrônicos, danos em bancos de capacitores, perdas de energia nos sistemas de geração e transmissão, operação errática de sistemas de proteção, entre outros (DUGAN, et al., 2003).

Neste tópico são apresentados: i) um breve histórico dos harmônicos nos sistema elétricos de corrente alternada; ii) algumas definições pertinentes aos harmônicos; iii) principais efeitos nas instalações; iv) principais métodos de mitigação (atenuação) de seus efeitos; e v) as novas tendências relacionadas a harmônicos, como os “interharmônicos” e “supraharmôni-

cos", definindo-os, apresentando suas fontes, impactos e considerações sobre as novas tendências.

2.1.1 Breve Histórico

O aparecimento de harmônicos nas instalações elétricas de corrente alternada remonta ao final do século XIX, quando do início da utilização da energia elétrica. Esse fato fora observado e discutido entre os pesquisadores da época com *Steinmetz* (STEINMETZ, 1899).

Existem na literatura técnica histórica vários relatos de problemas inicialmente desconhecidos e posteriormente relacionados com harmônicos. Um desses primeiros problemas foi o ocorrido em 1893 com um motor na cidade de Hartford, estado de Connecticut, nos Estados Unidos (OWEN, 1998). O problema observado foi o sobreaquecimento do motor sem causa aparente. Posteriormente, após muitos estudos, conclui-se que estava ocorrendo ressonância na linha de transmissão, provocando o sobreaquecimento do motor operando em um ponto remoto dessa linha de transmissão.

Interessante observar que esse tipo de problema de ressonância na linha de transmissão era comum nos Estados Unidos, sendo que o mesmo não era observado nas linhas de transmissão similares da Europa. Ocorre que, naquela época, nos Estados Unidos as frequências utilizadas nos sistemas de corrente alternada eram de 125, 133 ou 140 Hz, sendo que na Europa eram utilizadas frequências bem menores.

Um dos pioneiros que estudou os problemas de ressonância em linhas de transmissão foi *Charles Proteus Steinmetz* (cuja imagem é apresentada na Figura 1). Ele propôs duas soluções possíveis para o problema de sobreaquecimento do motor em Hartford, quais foram: i) reduzir pela metade a frequência de operação do sistema (no caso, passando de 125 Hz para 62,5 Hz), e; ii) alterar a configuração das lâminas de ferro do motor, para que o mesmo suportasse uma maior tensão de trabalho. Em outras palavras, ele propôs: i) eliminar a ressonância, ou; ii) fazer com que o motor suportasse suas consequências, e em especial, a sobretensão.

Figura 1 – Imagem de Charles Proteus Steinmetz

Fonte: Internet (https://www.ecured.cu/Charles_Proteus_Steinmetz) (pesquisado em Nov/2019)

Outro relato curioso sobre ressonância em linhas de transmissão ocorreu com a linha de Willamette Falls, situada no Rio Willamette, próximo à cidade de Portland, estado de Oregon, nos Estados Unidos. Os estudos iniciais sugeriram a construção de uma linha de transmissão com cerca de 20 km para interligar a usina geradora ao centro da cidade, na tensão nominal de 4 kV, com o objetivo principal de fornecer energia para o sistema de iluminação da cidade. Essa tensão nominal exigia que o gerador fosse construído com uma tensão de isolação de 4,8 kV, porém a máxima tensão de isolação até então era de 3,6 kV. A empresa Whestinghouse, contratada para construir o gerador, incialmente relutou, porém acabou aceitando o desafio, mas sem fornecer garantias. Quando do início de operação dessa linha de transmissão, aproximadamente em seu ponto médio (a cerca de 10 km do gerador e da cidade) e apenas nesse ponto, foram observados arcos elétricos (*flashover*) junto aos isoladores. Para "resolver" o problema foi colocado um funcionário que, com uma pá, lançava um material isolante para extinguir o arco elétrico. E isso foi considerado um sucesso! (OWEN, 1998).

Naqueles dias, por volta dos anos 1890, o desenvolvimento dos sistemas elétricos davam seus primeiros passos, e os conceitos sobre a energia elétrica ainda não estavam consolidados. Para se entender um pouco o que ocorria naquela época, os engenheiros americanos chamavam o parâmetro elétrico cuja unidade de medida já era o *volt*, de "potencial". Os britânicos chamavam o mesmo parâmetro de "pressão" e os franceses de "tensão".

Quanto aos geradores, considerando as possibilidades tecnológicas da época, os mesmos geravam tensão (potencial ou pressão) com quantidade significativa de harmônicos. Esse fato associado às frequências mais altas (125 à 140 Hz), quando comparadas aos dias atuais, acentuavam os problemas de ressonância nas linhas de transmissão.

Em 1895, a General Electric (GE) e a Westinghouse apresentaram projetos de geradores que utilizavam enrolamentos de armadura distribuídos e como resultado foi obtida uma forma de onda mais senoidal da tensão gerada.

Outro problema relatado na literatura técnica daqueles dias, relacionado com harmônicos, foi a verificação de sobrecorrente no neutro em um sistema de paralelismo de geradores com neutro solidamente aterrado. Esse assunto foi discutido em um artigo em 1910 (RHODES, 1910), onde a presença da terceira harmônica foi apontada como a causadora da sobrecorrente. A solução então apresentada foi um controle cuidadoso do fator de passo do enrolamento de armadura do gerador, para quase eliminar as tensões de terceira harmônica quando o neutro é solidamente aterrado.

Por volta de 1910, a telefonia se desenvolvia e as linhas telefônicas eram construídas em conjunto com as linhas elétricas. Esse fato proporcionou o surgimento de mais um tipo de problema relacionado com harmônicos, o da interferência telefônica (OWEN, 1998). Esse problema foi agravado quando retificadores a arco de mercúrio começaram a ser utilizados em escalas maiores. Após a identificação de que a interferência resultava de problemas na forma de onda (harmônicos) das linhas elétricas, teve início um longo processo de tentativas e erros na busca por padrões adequados de formas de onda. E nessa busca por padrões de forma de onda, foram definidos alguns fatores conhecidos até hoje, tais como o Fator de Distorção e o Fator de Desvio.

Depois de um período de relativa calmaria sobre os problemas relacionados com harmônicos, por volta de 1960 o problema ganhou força novamente, devido o uso crescente de bancos de capacitores para a correção do fator de potência. Os bancos de capacitores, por possuírem reatâncias capacitivas diferentes para diferentes frequências, podem entrar em ressonância na presença de componentes harmônicos (3º, 5º, 7º, etc.). Na época se discutia qual o melhor ponto de localização do banco na rede elétrica. Alguns defendiam que o melhor seria a instalação de um banco grande, central, com chaveamento de estágios sintonizados para cada componente harmônico; enquanto outros defendiam a instalação de bancos menores, localizados junto às cargas (SINGH, 2009).

Seguindo na história, nas décadas de 1970 e 1980 foram desenvolvidos e disseminados através do avanço da eletrônica de potência, equipamentos de velocidade ajustável e fontes de alimentação em modo chaveado, os quais provocam o aparecimento de correntes com formas de onda distorcidas, com elevado número de componentes harmônicos (SINGH, 2009).

Em nossos dias, além dos equipamentos já mencionados, existem inúmeras outras cargas classificadas como “cargas não lineares”, como por exemplo, lâmpadas fluorescentes compactas, lâmpadas LED, computadores, equipamentos médicos, entre outros; os quais também provocam o surgimento de correntes com formas de onda não senoidais, contribuindo assim para o crescimento da presença de harmônicos nas instalações elétricas.

Como apresentado até aqui, fica demonstrado que o tema “harmônicos” não é um problema novo. No início da era da eletricidade com corrente alternada os mesmos eram produzidos, principalmente, por deficiências dos geradores (que não produziam tensão perfeitamente senoidal), e por características dos transformadores (que provocavam - e ainda provocam - distorções por saturação do núcleo). A presença de harmônicos ocasionava problemas

de ressonâncias (elevando a tensão), quer nas linhas de transmissão, quer nos capacitores. Mais recentemente, especialmente em decorrência do acentuado crescimento da eletrônica de potência, a presença de harmônicos nas redes elétricas voltou a crescer, produzindo componentes harmônicos de maior ordem, ampliando a faixa de frequência a ser observada quando do estudo de ressonância.

Desta forma o tema "harmônicos" tem-se apresentado com frequência ao longo da história da eletricidade, e pode-se dizer que nunca existiu um período no qual o sistema elétrico fosse uma espécie de "paraíso" onde tudo era perfeitamente senoidal (OWEN, 1998), mas sim que a atual "onda de harmônicos" trata-se apenas do ressurgimento de um velho problema.

2.1.2 Definições

É apresentado na sequência o conceito de distorções harmônicas, uma ferramenta matemática desenvolvida no século XIX para o tratamento dessas anomalias, algumas características dos harmônicos em sistemas trifásicos, e também três indicadores utilizados para mensurá-las.

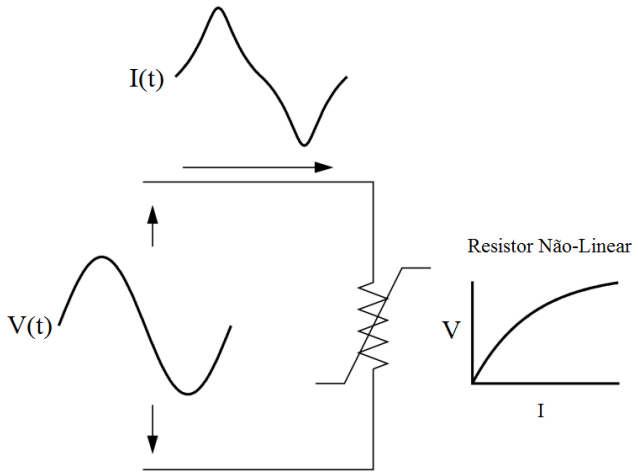
2.1.2.1 Distorções Harmônicas

A distorção harmônica surge na corrente de um sistema de energia quando uma carga não linear é alimentada por uma fonte de corrente alternada, mesmo que a tensão da fonte seja perfeitamente senoidal. Entende-se por carga não linear aquela onde a corrente não é proporcional à tensão senoidal aplicada (DUGAN, et al., 2003).

Esse conceito é apresentado na Figura 2, onde um resistor não linear é alimentado por uma tensão senoidal. Nela poderá ser observado que a forma de onda da corrente sofre uma distorção, não sendo perfeitamente senoidal.

Na maioria dos casos, as cargas não lineares drenam correntes elétricas com distorções periódicas, ou seja, a forma de onda distorcida se repete um ciclo após o outro e, às vezes, muda muito lentamente. Esse fato deu origem ao uso generalizado do termo harmônico para descrever esse tipo de distorção na forma de onda (DUGAN, et al., 2003).

Figura 2 – Distorção de corrente causada por resistor não linear



Fonte: Adaptado pelo Autor de DUGAN, et al., 2003

Em alguns poucos casos, a corrente drenada por uma carga poderá apresentar comportamento aleatório e aperiódico. Como exemplo, tem-se um forno a arco elétrico em corrente alternada (SANKARAN, 2002). Utilizado em siderúrgicas para fundição de sucata de metais, o arco elétrico apresenta comportamento não linear, assimétrico e instável, pois dependerá do tipo e formato da sucata de metal que se encontra em processo de fundição. Tal fato provoca reflexos na corrente, sendo que a mesma poderá variar significativamente em amplitude e forma de onda (HARIYANTO, NURDIN, TANTHIO, 2014).

Outra maneira de descrever os harmônicos é considerá-los "como um componente senoidal de uma onda periódica com uma frequência que é um múltiplo inteiro da frequência fundamental" (SINGH, 2009). Assim, uma onda periódica distorcida de qualquer forma concebível poderá ser composta usando diferentes frequências harmônicas com diferentes amplitudes. E de maneira inversa, qualquer onda periódica distorcida poderá ser decomposta em uma onda fundamental e um conjunto de ondas harmônicas. Apresenta-se na Tabela 1 essa definição de forma matemática.

Tabela 1 – Definições Matemáticas de Harmônicos, Interharmônicos e Subharmônicos

Termo	**Definição**	**Observação**
Harmônicos	$f = n * f1$ (Hz)	n é um inteiro > 0
Corrente Contínua (CC)	$f = 0$ (Hz)	$f = n * f1$, onde $n = 0$
Interharmônicos	$f \neq n * f1$	n é um inteiro > 0
Subharmônicos	$0 < f < f1$	–

onde f é a frequência em análise, f1 é a frequência fundamental e n é um número natural

Fonte: SINGH, 2009

Como pode ser observado na Tabela 1, quando as frequências harmônicas não são múltiplas inteiras da frequência fundamental, têm-se os interharmônicos e os subharmônicos. A diferença entre eles está no valor de sua frequência. Os interharmônicos apresentam frequências maiores que a frequência fundamental, porém múltiplos não inteiros dela; enquanto que os subharmônicos apresentam valores submúltiplos da frequência fundamental. Por exemplo, para uma frequência fundamental de 60 Hz tem-se:

- Frequências harmônicas − 120 Hz (2ª), 180 Hz (3ª), 240 Hz (4ª), ...
- Frequências interharmônicas − 80 Hz, 110 Hz, 150 Hz, ...
- Frequências subharmônicas – 0 < (10 Hz, 25 Hz, 40 Hz, ...) < 60 Hz

A corrente contínua possui frequência nula.

2.1.2.2 Análise de Fourier

No início do século XIX, o matemático francês *Jean Baptiste Joseph du Fourier* (cuja imagem é apresentada na Figura 3), como parte de suas pesquisas sobre a produção de calor, desenvolveu um artifício matemático para avaliar funções complexas (OWEN, 1998). Seu método conhecido como "Análise de Fourier" expande uma função complexa periódica em uma série de funções seno e cosseno, conforme apresentado na Equação (1) (OPPENHEIM, WILLSKY, 2010).

Figura 3 – Imagem de Jean Baptiste Joseph du Fourier

Fonte: Internet (http://scihi.org/joseph-fourier-greenhouse-effect/) (pesquisado em Nov/2019)

$$x(t) = a_0 + 2\sum_{h=1}^{\infty}[B_h.\cos(h.\omega_0.t) + C_h.sen(h.\omega_0 t)] \quad (1)$$

sendo:

x(t) é o sinal periódico no tempo;
a_0 corresponde ao valor médio de *x(t)* e é dado pela Equação (2);
h é a ordem da componente harmônica (*h* = 1, 2, 3, ...);
B_h é dado pela Equação (3);
ω_0 é a frequência fundamental;
t é o tempo;
C_h é dado pela Equação (4).

$$a_0 = \frac{1}{T_0}\int_{t_1}^{t_1+T_0} x(t)dt \tag{2}$$

sendo T_0 o período do sinal periódico no tempo.

$$B_h = \frac{1}{T_0}\int_{t_1}^{t_1+T_0} x(t)\cos(h.\omega_0.t)\,dt \tag{3}$$

$$C_h = \frac{1}{T_0}\int_{t_1}^{t_1+T_0} x(t)\,\mathrm{sen}(h.\omega_0.t)\,dt \tag{4}$$

A partir da identidade trigonométrica apresentada na Equação (5), a Equação (1) apresenta sua forma compacta, como mostrado pela Equação (6).

$$B_h.\cos(h.\omega_0.t) + C_h.sen(h.\omega_0.t) = A_h.\cos(h.\omega_0.t + \theta_h) \tag{5}$$

$$x(t) = a_0 + 2\sum_{h=1}^{\infty}[A_h.\cos(h.\omega_0.t + \theta_h)] \tag{6}$$

sendo:

x(t) é o sinal periódico no tempo;
a_0 corresponde ao valor médio de *x(t)* e é dado pela Equação (2);
h é a ordem da componente harmônica (*h* = 1, 2, 3, ...);
A_h é dado pela Equação (7);
ω_0 é a frequência fundamental;
t é o tempo;
Θ_h corresponde ao ângulo de fase e é dado pela equação (8).

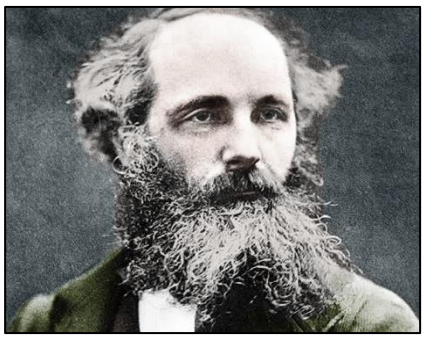
$$A_h = \sqrt{B_h^2 + C_h^2} \tag{7}$$

$$\theta_h = arctg\left(\frac{-C_h}{B_h}\right) \tag{8}$$

O físico e matemático britânico *James Clerk Maxwell* (cuja imagem é apresentada na Figura 4), no século XIX, aplicou esse método a problemas físicos onde o estado complexo real é considerado como a superposição de vários estados mais simples que podem coexistir sem interagir uns com os outros.

Posteriormente esse artifício recebeu o nome de "Análise Harmônica" e, provavelmente foi utilizado pela primeira vez para o estudo de harmônicos em sistemas elétricos de corrente alternada por *Steinmetz* (OWEN, 1998), por volta da virada do século XIX para o século XX.

Figura 4 – Imagem de James Clerk Maxwell

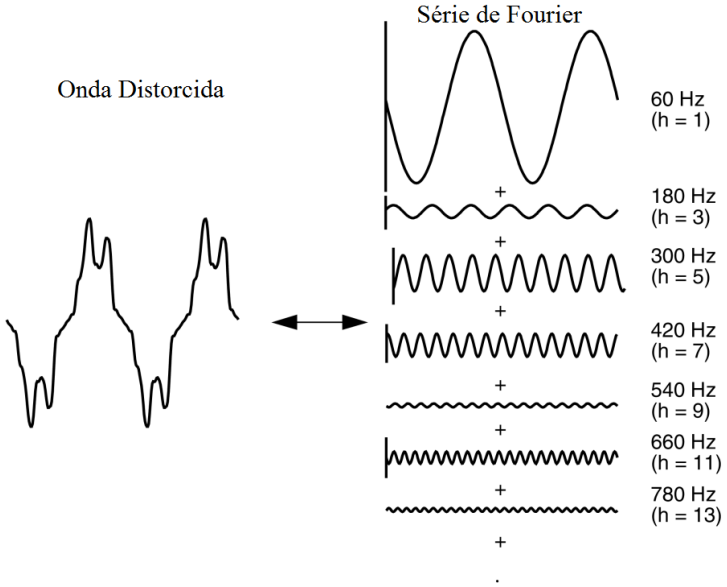


Fonte: Internet (https://www.spectator.co.uk/2019/02/the-powerful-magnetism-of-james-clerk-maxwell/) (pesquisado em Nov/2019)

Ilustra-se graficamente na Figura 5 a Análise de Fourier (ou Série de Fourier), na qual uma forma de onda periódica e distorcida é expressa como uma soma de senóides com frequências múltiplas da frequência fundamental. Cada uma das frequências múltiplas da fundamental é denominada componente harmônica da onda original distorcida.

A utilização da Análise de Fourier permite que o sistema em estudo possa ser analisado separadamente em cada harmônico, e posteriormente seus resultados são recombinados para formar uma nova Série de Fourier, a partir da qual a forma de onda resultante poderá ser obtida, caso essa nova representação seja necessária. Em muitos casos práticos, apenas o conhecimento dos componentes harmônicos é suficiente para analisar o problema estudado.

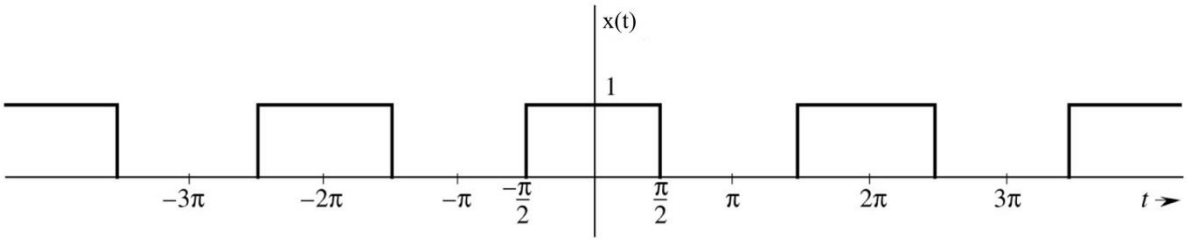
Figura 5 – Representação em série de Fourier de uma forma de onda distorcida



Fonte: Adaptado pelo Autor de DUGAN, et al., 2003

Como exemplo de aplicação da Análise de Fourier, tome-se a onda quadrada periódica com período 2π apresentada na Figura 6.

Figura 6 – Representação de uma onda quadrada, periódica, com período 2π



Fonte: Adaptado pelo Autor de OPPENHEIM, WILLSKY, 2010

A expressão dessa onda quadrada através da Série de Fourier é dada pela Equação (9).

$$x(t) = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi}\Big[\cos(\omega_0 t) + \frac{1}{3}cos(3\omega_0 t - \pi) + \frac{1}{5}cos(5\omega_0 t) + \frac{1}{7}cos(7\omega_0 t - \pi) + \frac{1}{9}cos(9\omega_0 t) + \frac{1}{11}\cos(11\omega_0 t - \pi) + \cdots\Big] \quad (9)$$

A Análise de Fourier é utilizada com frequência no estudo de harmônicos em instalações elétricas, e será aqui empregada especialmente na definição de seus indicadores.

2.1.2.3 Harmônicos em Sistemas Trifásicos

Até o momento, as componentes harmônicas foram apresentadas como entidades independentes, constituindo-se em uma ferramenta para descrever sinais com distorções periódicas no tempo.

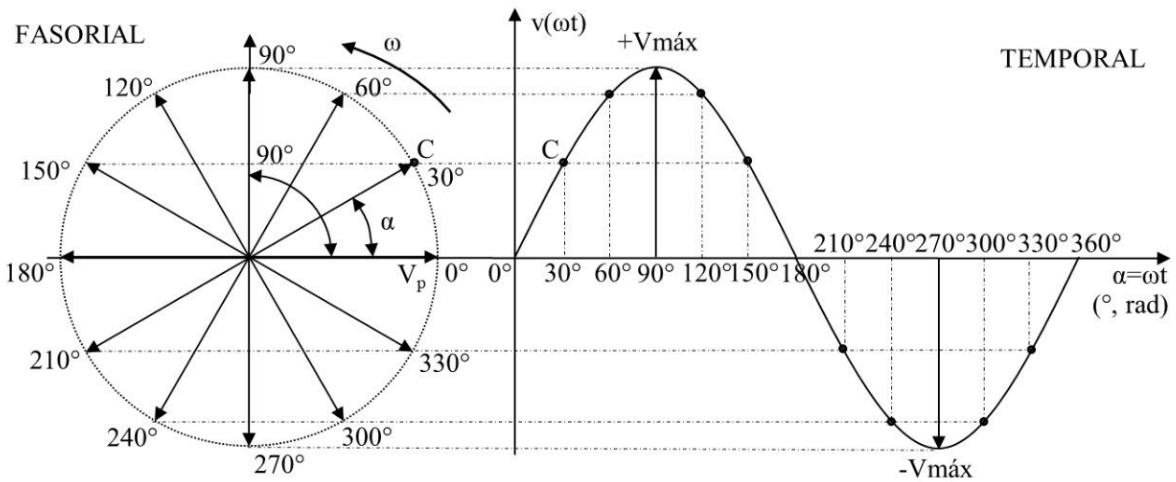
Como já mencionado neste trabalho, essa ferramenta foi utilizada por *Steinmetz* para estudar fenômemos relacionados a distorções harmônicas em sistemas elétricos na presença de alterações na forma de onda da tensão e da corrente alternada.

Essa abordagem direta é válida para a análise de sistemas monofásicos. No entanto, em sistemas trifásicos, as componentes harmônicas de uma fase tem uma relação de rotação e ângulo de fase com os harmônicos das outras fases. Em estudos de sistemas de potência trifásicos envolvendo harmônicos, essa relação é importante, pois, por exemplo, os harmônicos múltiplos de 3 (três) se somarão no neutro em um sistema a quatro fios (SANKARAN, 2002).

Considerando que os sistemas elétricos em corrente alternada apresentam comportamento senoidal para tensões e correntes, uma forma de representa-los é através da notação fasorial, conforme proposto por *Steinmetz* (STEINMETZ, 1899).

A notação fasorial utiliza-se de vetores que giram em uma velocidade angular num círculo trigonométrico, dando origem a funções senoidais, conforme pode ser visto na Figura 7, que correlaciona a representação fasorial com a representação temporal da Equação (10).

Figura 7 – Representação de uma onda senoidal através de fasores



Fonte: Adaptado pelo Autor da internet - http://oengeletricista.blogspot.com/2012/08/fasores_1.html (pesquisado em Nov/2019)

Como apresentado na Figura 7, o valor máximo positivo (+*Vmáx*) ocorre com o fasor na posição 90° e o valor máximo negativo (-*Vmáx*) ocorre estando o fasor na posição 270°.

$$v(t) = V_{máx}.sen(\omega.t) \tag{10}$$

sendo:

v(t) é o sinal periódico no tempo (onda senoidal);
$V_{máx}$ corresponde ao valor máximo do sinal (vide Figura 7);
ω é a frequência do sinal periódico;
t é o tempo.

Cabe ainda destacar dois conceitos importantes para o estudo de sistemas elétricos em corrente alternada, que são os conceitos de Valor Médio e de Valor Eficaz.

O Valor Médio (do inglês *Average* - *Ave*) de uma onda periódica está relacionado com a componente contínua dessa onda. Matematicamente, para a onda expressa pela Equação (10), seu Valor Médio é dado pela Equação (11).

$$V_{Ave} = \frac{1}{T}\int_0^T v(t).dt \tag{11}$$

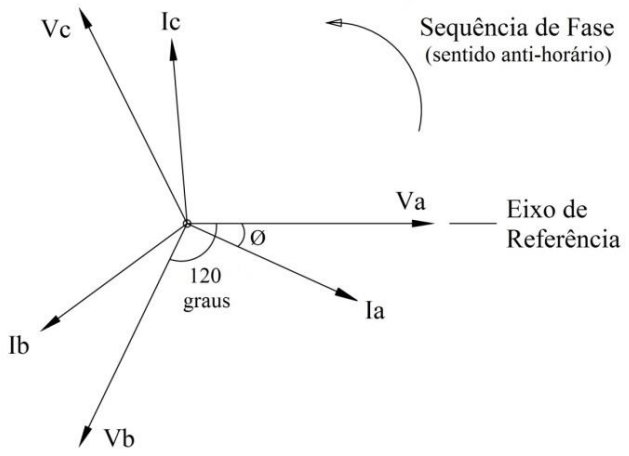
sendo *T* o período da onda senoidal.

O Valor Eficaz (ou *RMS*, do inglês *Root Mean Square*) de uma onda periódica de corrente ou tensão está relacionado com o calor dissipado em uma resistência ideal. Ele representa o valor da tensão (ou da corrente) contínua que produz a mesma dissipação de potência que uma tensão (ou corrente) alternada. Matematicamente, para a onda senoidal da Equação (10), seu Valor Eficaz é dado pela Equação (12).

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T v^2(t).dt} \tag{12}$$

Aplicando o conceito de fasores a um sistema elétrico trifásico equilibrado, as tensões e correntes apresentam uma relação fasorial posicional (ou sequência de fase), como mostrado na Figura 8.

Figura 8 – Sequência de fase em um sistema trifásico equilibrado



Fonte: Adaptado pelo Autor de SANKARAN, 2002

As três tensões (*Va*, *Vb* e *Vc*) estão separadas por 120°, o mesmo ocorrendo com as três correntes (*Ia*, *Ib* e *Ic*). A rotação ou sequência normal da fase é *a – b – c*, que gira no sentido anti-horário e será designada como a sequência de fase positiva neste trabalho. Para análises harmônicas essas relações ainda são aplicáveis, tendo a componente fundamental da tensão e da corrente adotadas como referência. Todas as componentes harmônicas são referenciadas à frequência fundamental, e esta adota a sequência de fase positiva como referência. O ângulo entre a componente fundamental da tensão e da componente fundamental da corrente, indicado por Ø na Figura 8 é o ângulo do deslocamento temporal entre a tensão e a corrente de uma mesma fase, também chamado de ângulo do fator de potência de deslocamento (SANKARAN, 2002).

As Equações (13), (14) e (15) apresentam os valores das correntes instantâneas das fases de um sistema trifásico equilibrado, na frequência fundamental, e, portanto, separadas por um ângulo de 120°.

$$i_{a1} = I_{a1} sen(\omega_0 t) \tag{13}$$

$$i_{b1} = I_{b1} sen(\omega_0 t - 120^o) \tag{14}$$

$$i_{c1} = I_{c1} sen(\omega_0 t - 240^o) \tag{15}$$

sendo:

i_{a1}, i_{b1} e i_{c1} são os valores instantâneos das correntes das fases *a*, *b* e *c*, em sua componente fundamental (indicado pelo índice *1*);

I_{a1}, I_{b1} e I_{c1} são os valores máximos das correntes senoidais das fases (vide representação de onda senoidal na Figura 7);

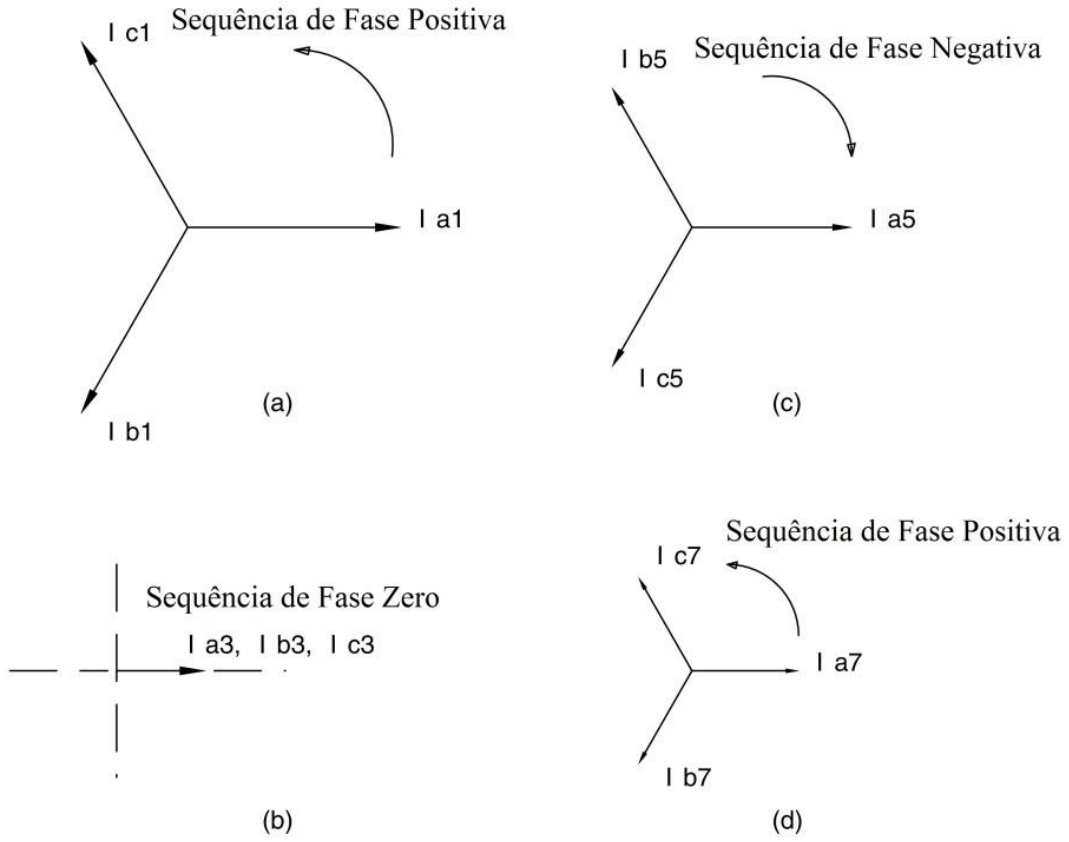
ω_0 é a velocidade angular do fasor na frequência fundamental;

t é o tempo.

Os ângulos de deslocamentos temporais negativos apresentados nas Equações (14) e (15) indicam que as correntes i_{b1} e i_{c1} atingirão seus valores máximos depois da corrente i_{a1}, respectivamente a 120º e 240º, pois o ângulo da corrente i_{a1} foi tomado como referência.

Mostra-se na Figura 9a a representação gráfica dos fasores das componentes fundamentais das correntes das fases, expressos matematicamente nas equações (13), (14) e (15).

Figura 9 – Representação fasorial da componente fundamental (a), do terceiro (b), do quinto (c), e do sétimo harmônico (d)



Fonte: Adaptado pelo Autor de SANKARAN, 2002

Para melhor compreender como as componentes harmônicas se encaixam na imagem espaço-temporal da Figura 8, tome-se, de forma simplificada, apenas os três primeiros harmônicos ímpares das correntes: o terceiro, o quinto e o sétimo. Estes valores foram escolhidos também porque são os que apresentam maior prevalência em sistemas trifásicos balanceados, em condições normais de operação (SANKARAN, 2002).

As expressões para as correntes do terceiro harmônico são dadas pelas Equações (16), (17) e (18).

$$i_{a3} = I_{a3} sen(3.\omega_0 t) \tag{16}$$

$$i_{b3} = I_{b3} sen[3.(\omega_0 t - 120^o)] = I_{b3} sen(3.\omega_0 t - 360^o) = I_{b3} sen(3.\omega_0 t) \tag{17}$$

$$i_{c3} = I_{c3} sen[3.(\omega_0 t - 240^o)] = I_{c3} sen(3.\omega_0 t - 720^o) = I_{c3} sen(3.\omega_0 t) \tag{18}$$

As expressões para os terceiros harmônicos mostram que estão em fase e que o ângulo de deslocamento entre eles é nulo. Mostra-se na Figura 9b a representação gráfica dos fasores do terceiro harmônico, que são conhecidas como harmônicos de sequência de fase zero devido ao ângulo de deslocamento entre os três fasores ser nulo.

As expressões para as correntes do quinto harmônico são dadas pelas Equações (19), (20) e (21).

$$i_{a5} = I_{a5} sen(5.\omega_0 t) \tag{19}$$

$$i_{b5} = I_{b5} sen[5.(\omega_0 t - 120^o)] = I_{b5} sen(5.\omega_0 t - 600^o) = I_{b5} sen(5.\omega_0 t - 240^o) \tag{20}$$

$$i_{c5} = I_{c5} sen[5.(\omega_0 t - 240^o)] = I_{c5} sen(5.\omega_0 t - 1200^o) = I_{c5} sen(5.\omega_0 t - 120^o) \tag{21}$$

Mostra-se na Figura 9c a representação gráfica dos fasores do quinto harmônico. Observe que a sequência de fase para o quinto harmônico é no sentido horário, sentido oposto à sequência de fase da componente fundamental adotada neste trabalho como positiva. Portanto, os harmônicos de ordem cinco possuem sequência de fase negativa.

De modo similar, as expressões para as correntes do sétimo harmônico são dadas pelas Equações (22), (23) e (24).

$$i_{a7} = I_{a7} sen(7.\omega_0 t) \tag{22}$$

$$i_{b7} = I_{b7} sen[7.(\omega_0 t - 120^o)] = I_{b7} sen(7.\omega_0 t - 840^o) = I_{b7} sen(7.\omega_0 t - 120^o) \tag{23}$$

$$i_{c7} = I_{c7} sen[7.(\omega_0 t - 240^o)] = I_{c7} sen(7.\omega_0 t - 1680^o) = I_{c7} sen(7.\omega_0 t - 240^o) \tag{24}$$

Mostra-se na Figura 9d a representação gráfica dos fasores do sétimo harmônico das correntes. Pode-se observar nessa figura que o sétimo harmônico têm a mesma sequência de fase da componente fundamental (Figura 9a) e, portanto, são harmônicos de sequência de fase positiva.

A Tabela 2 categoriza os harmônicos em termos de suas respectivas sequências de fase, inclusive para harmônicos pares e outras ordens de harmônicos não apresentados na Figura 9.

Tabela 2 – Ordem dos Harmônicos e suas Respectivas Sequências de Fase

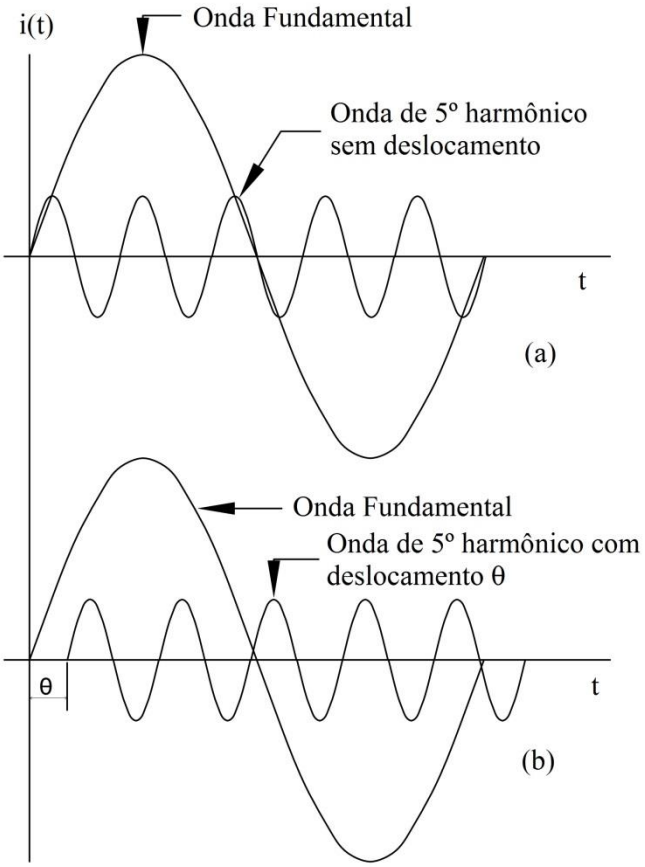
Ordem dos Harmônicos	**Sequência de Fase**
1, 4, 7, 10, 13, 16, 19 ...	Positiva
2, 5, 8, 11, 14, 17, 20 ...	Negativa
3, 6, 9, 12, 15, 18, 21 ...	Zero

Fonte: SANKARAN, 2002

As expressões para componentes harmônicos mostradas até agora através das Equações (16) a (24), não apresentam deslocamento temporal em relação à sua correspondente componente fundamental (da mesma fase do sistema trifásico). Esse fato é apresentado na Figura 10a. Porém, não é incomum (SANKARAN, 2002) que os harmônicos apresentem esse deslocamento, conforme indicado por Θ na Figura 10b.

Apresenta-se na Figura 10 a forma de onda de uma corrente de quinta harmônica sem e com deslocamento temporal Θ em relação à sua componente fundamental da mesma fase do sistema trifásico.

Figura 10 – Formas de ondas da componente fundamental e da quinta harmônica (a) sem deslocamento, e (b) com deslocamento



Fonte: Adaptado pelo Autor de SANKARAN, 2002

Matematicamente o deslocamento temporal indicado por Θ na Figura 10 para as correntes de quinto harmônico é expresso para cada uma das fases pelas Equações (25), (26) e (27).

$$i_{a5} = I_{a5} sen[5(\omega_0 t - \theta)] \tag{25}$$

$$i_{b5} = I_{b5} sen[5.(\omega_0 t - 120^o - \theta)] \tag{26}$$

$$i_{c5} = I_{c5} sen[5.(\omega_0 t - 240^o - \theta)] \tag{27}$$

O ângulo de deslocamento temporal Θ altera a correlação entre a onda fundamental e a onda harmônica (no caso atrasando a harmônica), porém seus períodos e sequências de fase são mantidos (SANKARAN, 2002).

2.1.2.4 Indicadores de Harmônicos

Os dois indicadores mais utilizados para medir o conteúdo harmônico de uma forma de onda são a distorção harmônica total e a distorção total na demanda. Ambos são medidos com base no valor eficaz [ou *RMS* – vide Equação (12)] de uma forma de onda distorcida e podem ser aplicados tanto à tensão como à corrente (DUGAN, et al., 2003). Neste trabalho é apresentado também, brevemente, o índice de distorção.

Em condições senoidais, as formas de onda de tensão e de corrente contêm apenas a componente de frequência fundamental, conforme apresentado matematicamente pela Equação (10). Seus respectivos valores eficazes (*RMS*) são obtidos por meio da aplicação de suas expressões matemáticas na Equação (12), e resultam nos valores apresentados nas Equações (28) e (29), respectivamente para a tensão eficaz e para a corrente eficaz (*RMS*).

$$V_{RMS} = \frac{1}{\sqrt{2}} V_1 \tag{28}$$

$$I_{RMS} = \frac{1}{\sqrt{2}} I_1 \tag{29}$$

sendo:

V_{RMS} e I_{RMS} são os valores eficazes da tensão e da corrente, respectivamente;

V_1 e I_1 são os valores máximos das formas de onda da tensão e da corrente. O subíndice 1 indica valor na frequência fundamental.

Em condições não senoidais, a forma de uma onda harmonicamente distorcida pode ser decomposta em senoides de frequências harmônicas com diferentes amplitudes como mostrado na Figura 5. Então, o valor eficaz da onda distorcida pode ser determinado através da Equação (30) para uma onda de tensão e da Equação (31) para uma onda de corrente.

$$V_{RMS} = \sqrt{\sum_{h=1}^{h} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} V_h\right)^2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + \cdots + V_h^2} \tag{30}$$

$$I_{RMS} = \sqrt{\sum_{h=1}^{h} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} I_h\right)^2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \cdots + I_h^2} \tag{31}$$

sendo:

V_{RMS} e I_{RMS} são os valores eficazes da tensão e da corrente, respectivamente;

h indica a ordem do componente harmônico. Por exemplo, $h = 2$ significa o segundo harmônico, com frequência duas vezes a fundamental;

V_h e I_h são os valores máximos das formas de onda da tensão e da corrente do componente harmônico de ordem h.

Aplicando as Equações (30) e (31) para condições senoidais, todos os componentes harmônicos (h > 1) de V_h e I_h serão nulos e apenas V_1 e I_1 permanecerão, reduzindo essas equações às Equações (28) e (29), respectivamente (DUGAN, et al., 2003). Para condições não senoidais estarão presentes componentes harmônicos (h > 1), ou seja, existirão parcelas de V_h e I_h não nulas.

2.1.2.4.1 Distorção Harmônica Total

A distorção harmônica total, também conhecida pela sigla *THD* (do inglês *Total Harmonic Distortion*), é uma medida relativa do valor eficaz dos componentes harmônicos de uma forma de onda distorcida, com o valor eficaz de sua componente fundamental. Em termos físicos representa o "potencial de aquecimento" (ou capacidade adicional de gerar calor) dos harmônicos em relação ao valor da componente fundamental. Este indicador poderá ser calculado para a tensão ou para a corrente pelas Equações (32) e (33), respectivamente.

$$THD_v = \frac{1}{V_{RMS-1}} \sqrt{\sum_{h>1}^{h} V_{RMS-h}^2} \tag{32}$$

$$THD_i = \frac{1}{I_{RMS-1}} \sqrt{\sum_{h>1}^{h} I_{RMS-h}^2} \tag{33}$$

sendo:

THD_v *e* THD_i são os valores da distorção harmônica total da tensão e da corrente, respectivamente;

V_{RMS-1} e I_{RMS-1} são os valores eficazes da tensão e da corrente de sua componente fundamental;

h indica a ordem do componente harmônico;

V_{RMS-h} e I_{RMS-h} são os valores eficazes da tensão e da corrente do componente harmônico de ordem h.

Observa-se nas Equações (32) e (33) que a *THD* resulta de uma divisão entre grandezas de mesma natureza (tensões ou correntes), constituindo-se em um número para o qual não se atribui nenhuma unidade de medida. Observando de outra maneira as mesmas equações, percebe-se também que a *THD* é o quociente da divisão de todo o conteúdo harmônico de uma tensão ou de uma corrente, pelo valor de sua componente fundamental. Esse último fato possibilita que a *THD* também seja entendida como uma porcentagem da fundamental, bastando para isso multiplicar o valor encontrado nas Equações (32) e (33) por 100 (cem) e acrescentando o símbolo % (por cento).

Outra forma de apresentar a relação da *THD* com o valor eficaz é através das Equações (34) e (35), que possibilitam determinar o valor eficaz da onda distorcida a partir da *THD* e de sua componente fundamental (DUGAN, et al., 2003).

$$V_{RMS} = V_{RMS-1}\sqrt{1 + THD_v^2} \tag{34}$$

$$I_{RMS} = I_{RMS-1}\sqrt{1 + THD_i^2} \tag{35}$$

onde:

V_{RMS} e I_{RMS} são os valores eficazes da tensão e da corrente, respectivamente;

V_{RMS-1} e I_{RMS-1} são os valores eficazes da tensão e da corrente de sua componente fundamental;

THD_v e THD_i são os valores da distorção harmônica total da tensão e da corrente.

A distorção harmônica total (*THD*) é um indicador útil para muitas aplicações, porém possui algumas limitações. Ela pode fornecer uma boa ideia sobre a quantidade da energia adicional que será transferido a uma resistência de carga (normalmente em forma de calor) quando esta for submetida a uma tensão distorcida. Da mesma forma, poderá dar uma indicação das perdas adicionais causadas pela corrente que flui através de um condutor. No entanto, não será um bom indicador da fadiga (do material isolante) provocada em um capacitor por uma tensão distorcida, porque essa fadiga estará relacionada com o valor máximo da onda da tensão distorcida e não com o valor relacionado à transferência de calor, que se refere ao valor eficaz (DUGAN, et al., 2003).

O indicador *THD* é usado com mais frequência para descrever a distorção harmônica da tensão do que para a da corrente. Isto porque a *THD* de corrente de uma determinada carga

diz respeito apenas a essa carga, enquanto uma tensão com elevada *THD* é aplicada também a outras cargas (DUGAN, MCGRANAGHAN, et al., 2003).

Entretanto a *THD* de corrente pode também, por meio da rede elétrica, produzir impactos em outras cargas. Este fato é apresentado com mais detalhes ao longo deste trabalho.

2.1.2.4.2 Distorção Total na Demanda

Os níveis de distorção harmônica de corrente podem ser caracterizados pelo valor de sua *THD*, como apresentado na Equação (33). Entretanto, uma carga poderá drenar uma corrente com um alto valor de *THD* e não ser uma ameaça significativa para o sistema elétrico no qual está inserida. Por exemplo, muitos equipamentos de velocidade variável, tais como motores elétricos acionados por inversores de frequência, exibirão altos valores de *THD* para a corrente de entrada quando estiverem acionando cargas mecânicas muito leves. Isto não será necessariamente um problema significativo para o sistema elétrico porque a magnitude da corrente harmônica é baixa, embora sua distorção de corrente (*THD*) seja relativamente alta.

De acordo com DUGAN, et al. (2003), na tentativa de evitar essa dificuldade foi efetuada uma modificação no cálculo da *THD* conforme apresentado na Equação (33). A modificação introduzida foi alterar o denominador dessa equação, passando-o para o valor eficaz da maior corrente possível de ser drenada pela carga, em sua componente fundamental. O valor assim obtido foi então chamado de distorção total na demanda, também conhecido pela siga *TDD* (do inglês *Total Demand Distortion*), e é definido matematicamente pela Equação (36).

$$TDD = \frac{1}{I_{RMS-1_CARGAmáx}} \sqrt{\sum_{h>1}^{h} I_{RMS-h}^2} \tag{36}$$

sendo:

TDD é o valor da distorção total na demanda;

$I_{RMS-1_CARGAmáx}$ é o valor eficaz da maior corrente drenada pela carga (seja para o caso de carga variável ou não), em sua componente fundamental;

h indica a ordem do componente harmônico;

I_{RMS-h} é o valor eficaz da corrente do componente harmônico de ordem *h*.

2.1.2.4.3 Índice de Distorção

Alternativamente à distorção harmônica total (*THD*), a contribuição do conteúdo harmônico de uma onda distorcida poderá ser avaliada através do índice de distorção *DIN* (do inglês *Distortion Index*). O conceito do índice de distorção (*DIN*) é muito próximo ao da distorção harmônica total (*THD*), sendo este definido como o "conteúdo harmônico" dividido pelo "conteúdo total" da onda distorcida, conforme a Equação (37) para uma tensão distorcida (SHIN, et al., 2006).

$$DIN_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h=\infty} V_{RMS-h}^2}}{\sqrt{\sum_{h=1}^{h=\infty} V_{RMS-h}^2}} \tag{37}$$

sendo:

DIN_v é o valor índice de distorção da tensão;
h indica a ordem do componente harmônico;
V_{RMS-h} é o valor eficaz da tensão do componente harmônico de ordem h.

Comparando-se esta equação do DIN_v com a Equação (32) que apresenta a THD_v, observa-se que, matematicamente, as duas diferem apenas no denominador. Assim, em (32) consta, o valor eficaz apenas da componente fundamental no denominador, e nesta (37) o valor eficaz total (fundamental mais todo o conteúdo harmônico) em seu denominador.

O aspecto vantajoso do índice de distorção (*DIN*) sobre a distorção harmônica total (*THD*) se dá quando há ausência de informação sobre a componente fundamental (SHIN, et al., 2006).

2.1.3 Efeitos das Distorções Harmônicas

Uma vez definidos os harmônicos, é possível analisar seus efeitos sobre sistemas elétricos, os quais são também chamados de sistemas de energia. Esta análise pode ser aplicada sobre equipamentos ligados a estes sistemas e também seus efeitos sobre equipamentos externos a eles.

Neste trabalho são apresentados os efeitos da presença de harmônicos de forma geral sobre sistemas elétricos e também uma breve revisão bibliográfica sobre seus efeitos em um sistema elétrico específico: as instalações elétricas hospitalares.

2.1.3.1 Efeitos Gerais sobre Sistemas Elétricos

De modo geral, cada trecho do sistema elétrico deve ser examinado quanto à sua sensibilidade aos harmônicos a partir das recomendações sobre os níveis permitidos (ANEEL – PRODIST – Módulo 8, 2018). Os principais efeitos dos harmônicos de tensão e corrente sobre sistemas elétricos e sobre equipamentos ligados a esses sistemas, conforme (ARRILLAGA, WATSON, 2003), são:

- A possibilidade de amplificação dos níveis de harmônicos resultantes de ressonâncias série e paralelo;
- A redução na eficiência da geração, transmissão e utilização de energia elétrica;
- Fadiga do isolamento de componentes de instalações elétricas e consequente redução de sua vida útil;
- Mau funcionamento do sistema de energia ou de seus componentes.

Entre os possíveis efeitos dos harmônicos sobre equipamentos externos aos sistemas de energia estão a degradação de desempenho nas comunicações, ruído audível excessivo e tensão induzida por harmônicos de correntes.

No intuito de quantificar os efeitos dos harmônicos sobre os componentes passivos, tais como resistores, indutores e capacitores dos sistemas elétricos, são apresentadas a seguir as expressões das potências nesses componentes na presença de harmônicos.

A expressão da potência ativa dissipada em um resistor puro na presença de harmônicos é dada pela Equação (38) para valores referencias de tensão e pela Equação (39) para valores referenciais de corrente (SINGH, 2009).

$$P_{R(pu)} = 1 + THD_v^2 = \sum_{h=1}^{h} V_{h(pu)}^2 \tag{38}$$

$$P_{R(pu)} = 1 + THD_i^2 = \sum_{h=1}^{h} I_{h(pu)}^2 \tag{39}$$

sendo:

$P_{R(pu)}$ é potência ativa dissipada em um resistor puro, expressa em valores por unidade (*pu*);

THD_v *e* THD_i são os valores da distorção harmônica total da tensão e da corrente, respectivamente;

h indica a ordem do componente harmônico;

$V_{h(pu)}$ e $I_{h(pu)}$ são os valores por unidade (*pu*) da tensão e da corrente do componente harmônico de ordem *h*, respectivamente.

O conceito de "valores por unidade (*pu*)" é apresentado com detalhes no Capítulo 2 de OLIVEIRA, et al. (1996).

A potência reativa absorvida por um indutor puro é dada pela Equação (40), e por um capacitor puro pela Equação (41), ambos na presença de harmônicos.

$$Q_{L(pu)} = \sum_{h=1}^{h} h.I_{h(pu)}^{2} = \sum_{h=1}^{h} \frac{V_{h(pu)}^{2}}{h} \tag{40}$$

$$Q_{C(pu)} = \sum_{h=1}^{h} \frac{I_{h(pu)}^{2}}{h} = \sum_{h=1}^{h} h.V_{h(pu)}^{2} \tag{41}$$

sendo:

$Q_{L(pu)}$ é potência reativa total absorvida por um indutor puro, expressa em valores por unidade (*pu*);

h indica a ordem do componente harmônico;

$I_{h(pu)}$ e $V_{h(pu)}$ são os valores por unidade (*pu*) da corrente e da tensão do componente harmônico de ordem *h*, respectivamente;

$Q_{C(pu)}$ é potência reativa total em um capacitor puro, expressa em valores por unidade (*pu*).

A presença de harmônicos em sistemas de energia produz impactos nas máquinas elétricas nele contidas, tais como transformadores e motores. Dentre esses impactos as perdas no ferro (núcleo) dessas máquinas (SINGH, 2009) são apresentadas pelas Equações (42), (43) e (44).

$$P_{H(pu)} = \sum_{h=1}^{h} h.I_{h(pu)}^{1,6} \tag{42}$$

$$P_{E(pu)} = \sum_{h=1}^{h} h^2 . I_{h(pu)}^2 \tag{43}$$

$$P_{I(pu)} = P_{H(pu)} + P_{E(pu)} \tag{44}$$

sendo:

$P_{H(pu)}$ é perda total de histerese, expressa em valores por unidade (*pu*);
h indica a ordem do componente harmônico;
$I_{h(pu)}$ é o valores por unidade (*pu*) da corrente do componente harmônico de ordem *h*;
$P_{E(pu)}$ é perda total de correntes parasitas (ou *eddy* em inglês), expressa em valores por unidade (*pu*);
$P_{I(pu)}$ é perda total no ferro (ou *iron* em inglês), expressa em valores por unidade (*pu*).

Exemplificando um pouco mais, apresenta-se a seguir alguns dos problemas relacionados com harmônicos (SINGH, 2009) e (NASCIMENTO, 2007):

a) Capacitores são sobrecarregados por correntes harmônicas, pois o fato de sua reatância diminuir com a frequência faz com que eles atuem como sumidouros para harmônicos. Além disso, as tensões harmônicas produzem grandes correntes que podem causar a explosão dos capacitores;
b) Capacitores combinam com a indutância da fonte para formar um circuito ressonante paralelo. Na presença de ressonância, os harmônicos são amplificados. As tensões resultantes excedem excessivamente a tensão nominal que leva ao dano do capacitor ou a queima de seus fusíveis;
c) Aumento das perdas de carga, que compreende perdas de cobre e perdas dispersas (perdas por corrente de Foucault) no transformador. Esse é o fator mais significativo na determinação das perdas adicionais por aquecimento do núcleo do transformador devido a cargas não lineares;
d) Aumento das perdas por histerese no transformador. No entanto, o aumento da temperatura no núcleo devido ao aumento das perdas no ferro é menos crítico do que no enrolamento;
e) Aumento da “fadiga” da isolação do transformador devido ao aumento dos picos de tensão;
f) Aumento das perdas no cobre e no ferro em máquinas rotativas, resultando em aquecimento e perda de potência da máquina;

g) A presença de harmônicos no sistema de fornecimento de energia elétrica resulta em pulsações de torque nas máquinas elétricas;

h) Os harmônicos afetam a capacidade de interrupção dos disjuntores. Isto ocorre porque uma onda distorcida poderá apresentar valor máximo superior ao de uma onda senoidal, conforme indicado por seu fator de crista;

i) Mau funcionamento dos dispositivos de medição e instrumentação. Os harmônicos também prejudicam a operação de equipamentos eletrônicos e circuitos de controle através do deslocamento do "ponto de passagem por zero" da onda;

j) Os harmônicos resultam em interferência com circuitos telefônicos através de acoplamento indutivo;

k) Os harmônicos interferem nas cargas dos consumidores, provocando funcionamento errático. Isto é de especial preocupação em sistemas de informática;

l) Os relés, cuja operação é regida pelo pico de tensão / corrente ou tensão zero, são afetados por harmônicos. As características de atraso de tempo dos relés eletromecânicos são alteradas na presença de harmônicos. Os relés de terra não podem distinguir entre a sequência zero e as correntes de terceiro harmônico, resultando em desligamentos errôneos.

De forma sistemática, os problemas provocados por harmônicos podem ser resumidos (ARRILLAGA, WATSON, 2003) da seguinte maneira:

a) <u>Produção de Ressonâncias</u>

- ressonância paralela;
- ressonância série;
- efeitos da ressonância no comportamento dos sistemas:
  - em capacitores para correção do fator de potência;
  - amplificação de harmônicas de baixa ordem;
  - instabilidade operacional.

b) <u>Efeitos dos Harmônicos em Máquinas Rotativas</u>

- perdas harmônicas (no cobre e no ferro);
- torques harmônicos (vibrações);
- perturbações na característica torque-velocidade.

c) Efeitos dos Harmônicos nos Sistemas Elétricos

- pertubações e perdas no sistema de transmissão;
- perdas e redução da vida útil em transformadores;
- perdas e danos em bancos de capacitores.

d) Efeitos dos Harmônicos no Gerenciamento da Energia

- erros nos instrumentos de medição;
- alterações no fator de potência;
- alterações nas potências como definidas tradicionalmente (para sistemas senoidais).

e) Efeitos dos Harmônicos nos Sistemas de Proteção

- operação intempestiva dos relés de proteção.

f) Efeitos dos Harmônicos em Equipamentos dos Consumidores

- alterações no tamanho da imagem em televisores com tubos de raios catódicos;
- produção de aquecimento, ruídos e falhas na operação de lâmpadas fluorescentes e que utilizam reatores (vapor de mercúrio, vapor de sódio, etc);
- perda de dados e problemas no processamento de computadores;
- perda de sincronismo em equipamentos de eletrônica de potência.

g) Interferências nos Sistemas de Comunicação

- pela produção de ruídos degrando a qualidade;
  - por indução eletromagnética.

2.1.3.2 Efeitos sobre Instalações Elétricas Hospitalares

Em instalações elétricas hospitalares, muitas cargas não lineares podem ser consideradas como fontes geradoras de harmônicas (OKUMOTO, 2006). Como exemplos, podem ser citados os seguintes equipamentos, por setor, no interior de um hospital (RAMOS, 2009):

a) No Centro de Diagnóstico por Imagem

- Raio X – utilizado para produzir uma imagem estática, bidimensional, do interior do corpo humano, utilizando os efeitos dos raios X.
- Tomografia Computadorizada – também utilizado para produzir imagem do interior do corpo humano utilizando os efeitos dos raios X, porém este utiliza diversas imagens obtidas de posições diferentes que, após tratamento computacional, apresentam uma imagem com aspecto tridimensional e com maior nível de detalhamento quando comparada com as obtidas através de um equipamento de Raio X.
- Ressonância Magnética – outra forma para obtenção de imagens com aspecto tridimensional do interior do corpo humano e nível de detalhamento comparável às obtidas na Tomografia, porém sem a utilização da radiação X, que é ionizante e pode produzir efeitos cumulativos danosos ao paciente. A Ressonância Magnética utiliza elevado campo magnético (de 0,5 a 3,0 tesla) para a produção de imagens.

b) No Centro Cirúrgico

- Foco Cirúrgico – utilizado para iluminar a região do corpo humano onde é feita a cirurgia. Essa região é também chamada de "campo cirúrgico".
- Monitor Multiparâmetros – utilizado para monitorar os sinais vitais do paciente, tais como pressão sanguínea, frequência cardíaca, nível de saturação de oxigênio no sangue, entre outros.
- Bisturi Elétrico – utilizado para a realização de "eletrodissecação" (separação tecidual ou cortes), "eletrocoagulação" (oclusão de vasos) e "eletrofulguração" (coagulação superficial).
- Ventilador Pulmonar – utilizado para manter a circulação de oxigênio nos pulmões do paciente durante os procedimentos cirúrgicos, quando o paciente encontra-se anestesiado. Também chamado de "ventilador mecânico" ou "respirador".

- Intensificador por Fluoroscopia de Raio X – utilizado para produzir uma maior resolução nas imagens de raios X. Consiste de uma fonte de raios X e uma tela fluorescente, entre as quais o paciente é posicionado. Necessita de um número maior de imagens de raios X, porém com doses mais baixas de radiação.

c) Na Área Administrativa

- Luminárias Eletrônicas – fluorescentes ou LED (do inglês *light-emitting diode*)
- Microcomputadores
- Impressoras

Os equipamentos listados acima, dentre outros existentes em um hospital, são resultado do avanço tecnológico e do desenvolvimento da medicina e trazem grandes benefícios à saúde humana (RAMOS, 2009). Na grande maioria das vezes, tais equipamentos são incorporados a hospitais que já se encontram em funcionamento e suas instalações elétricas são adaptadas para receber esses novos equipamentos (RAO, SINGH, THAKUR, 2010). Esse fato resulta que, durante a vida útil de um edifício hospitalar, sua instalação elétrica opere em situações muito diferentes daquelas para as quais foram projetadas, resultando em situações como, por exemplo, as relatadas a seguir:

- "Durante algumas cirurgias, quando o intensificador de imagem por fluoroscopia funcionava, algumas lâmpadas do foco cirúrgico queimavam-se frequentemente" (OKUMOTO, et al., 2005);
- "Quando os bisturis elétricos funcionavam, existiam interferências eletromagnéticas nos monitores multiparâmetros dos pacientes, interrompendo algumas atividades nas salas cirúrgicas" (OKUMOTO, et al., 2005);
- "...clara ocorrência de elevadas flutuações de tensão durante a operação do Raio X..." (RAO, SINGH, THAKUR, 2010).

Alguns pesquisadores a estudaram especificamente instalações elétricas hospitalares e o comportamento de cargas neles existentes, estando registrado na literatura técnica alguns relatos da ocorrência de interferências entre equipamentos médicos, tais como os apresentados a seguir:

- “Durante a auditoria foi observado que essas luminárias (de áreas cirúrgicas) apresentavam frequentes queima de lâmpadas” (RAO, SINGH, THAKUR, 2010).
- “A conclusão do estudo é que o registro da atividade cardíaca feito por monitores multiparâmetros pode ser afetado por eventos na qualidade de energia” (BUZDUGAN, BALAN, MURESAN, 2010).
- “A partir dos resultados experimentais fica evidenciado que os equipamentos médicos de diagnóstico por imagem são altamente geradores de harmônicos... Devido à natureza não linear das cargas, a *THD* apresenta valores significativamente altos...” (ADAMU, MUHAMMAD, SHUAIBU, 2014).

Outros pesquisadores analisaram esse tema de modo mais amplo, envolvendo aspectos externos às instalações hospitalares, normas e recomendações técnicas, aspectos de gestão e de projeto de sistemas elétricos hospitalares.

De acordo com SILVEIRA (2003) as distorções na forma de onda da tensão podem ser originadas por problemas existentes no interior da instalação hospitalar ou fora dela. Afirma ainda que suas consequências podem ser profundas, pois podem provocar interrupção de procedimentos médicos, a necessidade de repetição de testes e/ou exames, maior tempo de internação, aumento nos custos hospitalares, perda de credibilidade da instituição hospitalar e, principalmente, aumento do risco de morte dos pacientes.

Segundo RAO, SINGH, THAKUR (2010), existe uma lacuna nas normas relacionadas aos efeitos da presença de alto conteúdo harmônico e afundamentos de tensão presentes em instalações hospitalares, e que a qualidade dessas instalações elétricas precisa ser melhorada para reduzir riscos aos pacientes.

Conforme BUZDUGAN, BALAN, MURESAN (2010), também é importante realizar um levantamento detalhado das fontes de potenciais problemas de qualidade da energia, pois tais problemas poderão afetar equipamentos de diagnóstico, de tratamento, e até de equipamentos de suporte à vida dos pacientes.

SARIKPRUECK, et al. (2017) afirmam que “...os operadores do sistema elétrico de hospitais precisam preocupar-se com a alterações anormais na qualidade da energia, com vistas à sua segurança operacional, confiabilidade e eficiência energética”.

SCARPINO, GRASSO (2017) apresentam um método de abordagem para o projeto de sistemas elétricos hospitalares a partir da classificação de cargas elétricas, da definição topológica da rede e dos cálculos de fluxo de carga.

Finalizando, pode-se afirmar que a presença de distorção na forma de onda é normalmente detectada por seus efeitos nos sistemas elétricos, em alguns equipamentos ligados a ele, e/ou em equipamentos externos aos sistemas de energia. Alguns efeitos, como interferências telefônicas são imediatamente óbvias para nossos sentidos e, portanto, podem ser atenuadas em uma fase inicial do problema sem grandes perturbações. Outros efeitos como uma condição de ressonância, podem ocorrer em locais inesperados e muitas vezes causarão elevados prejuizos aos componentes da instalação, como bancos de capacitores e equipamentos de filtros inadequados.

De igual maneira, as instalações elétricas hospitalares também são afetadas pela distorção na forma de onda da tensão e/ou da corrente, e a presença dessas distorções afetará o correto funcionamento dos equipamentos médicos (RAMOS, 2009).

2.1.4 Métodos de Mitigação dos Efeitos

Nas últimas décadas, a quantidade de cargas não lineares conectadas aos sistemas elétricos têm aumentado significativamente, juntamente com o conteúdo harmônico produzido por estas cargas, elevando os níveis de tensão e correntes harmônicas neles presentes. Porém, as soluções disponíveis para mitigar (atenuar) seus efeitos negativos também têm aumentado através do desenvolvimento de novas técnicas e da reformulação e/ou melhoria das técnicas clássicas.

Para iniciar as investigações sobre mitigação de harmônicos, é preciso considerar que a amplitude dos mesmos dependerá de alguns fatores e, dentre eles, um dos principais será a capacidade da rede em fornecer energia, ou seja, se em um determinado ponto do sistema elétrico o nível de curto-circuito for elevado, esse ponto admitirá maiores níveis de conteúdo harmônico na corrente e apresentará níveis baixos de distorção na forma de onda da tensão (SCHWANZ, BOLLEN, LARSSON, 2016). Outros fatores são a sensibilidade dos equipamentos e as perdas nos transformadores presentes no sistema em análise, conforme abordado mais a frente neste trabalho.

2.1.4.1 Fundamentos da Mitigação de Harmônicos

De forma simplificada, os problemas com harmônicos podem ser mitigados de três maneiras: i) diminuindo a geração de harmônicos pelos equipamentos; ii) aumentando o nível de imunidade dos sistemas elétricos quanto aos harmônicos, isto é, aumentando sua capacidade de fornecimento de energia no ponto sob análise, e; iii) utilizando técnicas específicas para a mitigação de harmônicos (SCHWANZ, BOLLEN, LARSSON, 2016).

A decisão sobre qual (ou quais) das três maneiras será empregada dependerá do estágio em que se encontra o sistema elétrico (se em projeto ou se já está implantado), da possibilidade das cargas não lineares serem substituídas por outras com menor geração de harmônicos, da potência dessas cargas em relação à capacidade do sistema no ponto de instalação, e dos custos envolvidos para cada uma das soluções possíveis (SCHWANZ, BOLLEN, LARSSON, 2016).

As duas primeiras maneiras para mitigação dizem respeito a mudanças nos equipamentos geradores ou no sistema elétrico, enquanto a terceira maneira refere-se às técnicas específicas para a mitigação de harmônicos.

Quanto às técnicas específicas, essas podem ser classificadas em dois grupos: i) aquelas que reduzem a distorção harmônica da tensão, e; ii) aquelas que reduzem a distorção harmônica da corrente (ARRILLAGA, WATSON, 2003). A aplicação de cada uma está relacionada com a finalidade maior do processo de mitigação de harmônicos, que é evitar que os mesmos produzam seus efeitos indesejáveis.

Nesse sentido, existem normas e recomendações técnicas que apresentam limites globais para a distorção de tensão, e outras que apresentam limites para o conteúdo harmônico na corrente de equipamentos ou para consumidores cujas cargas são consideradas como potenciais perturbadores do sistema elétrico (ANEEL PRODIST Módulo 8, 2018), tais como forno a arco voltaico, forno de indução, retificador de corrente alternada para corrente contínua, entre outras (CPFL GED 10099, 2012).

2.1.4.2 Técnicas Passivas para a Mitigação de Harmônicos

As técnicas passivas típicas e eficientes para atenuação de harmônicos (SCHWANZ, BOLLEN, LARSSON, 2016) apresentadas neste trabalho são:

- Reatores de linha;
- Transformadores de deslocamento de fase;

• Conexões do transformador;

• Filtros sintonizados.

2.1.4.2.1 Reatores de Linha

Também chamados de Indutores, são os meios mais simples e de menor custo para atenuar os harmônicos. Consistem em um reator trifásico instalado próximo da carga geradora de harmônicos (por exemplo, um retificador trifásico), em série com o alimentador da carga. O baixo custo e a redução significativa da distorção de corrente são algumas das vantagens de usar reatores de linha. No entanto, eles não são práticos para cargas de elevada potência, pois provocam queda de tensão no alimentador, aumentam as perdas do sistema e os valores de suas impedância naturais restringem sua eficácia para níveis de distorção de corrente abaixo de 35% na *THDi* (SCHWANZ, BOLLEN, LARSSON, 2016).

Os reatores de linha provocam queda de tensão no alimentador da carga, pois devido sua indutância natural aumentam a impedância-série do alimentador e, portanto, aumentam sua queda de tensão, principalmente para as altas frequências próprias dos harmônicos de ordens mais elevadas. A Equação (45) apresenta matematicamente como varia a impedância natural de um reator puro (desprezando sua resistência) com a frequência.

$$Z_L = 2\pi f_h . L \tag{45}$$

sendo:

Z_L é impedância natural do reator puro em *ohms*;
f_h é a frequência do harmônico de ordem *h* em *hertz*;
L é a indutância do reator em *henries*.

A magnitude da *THDi* e também a amplitude das componentes do espectro harmônico dependerão da "impedância efetiva" do alimentador da carga, impedância essa que foi alterada pela inserção do reator de linha, e que também é dependente da condição de operação da carga, isto é, se a carga está drenando a máxima corrente ou não. A chamada "impedância efetiva" (SCHWANZ, BOLLEN, LARSSON, 2016) constitui-se na queda de tensão provocada pela impedância-série do alimentador quando percorrido pela corrente de carga, comparada com a tensão do sistema. Matematicamente a "impedância efetiva" é apresentada na Equação (46).

$$Z_{EA} = \frac{(Z_L + Z_{alim}).I_{carga}}{V_{NS}}.100\% \quad (46)$$

sendo:

Z_{EA} é "impedância efetiva" do alimentador, em *porcentagem*.
Z_L é impedância do reator inserido no alimentador, em *ohms*.
Z_{alim} é impedância natural do alimentador, em *ohms*.
I_{carga} corrente da carga, em *ampéres*.
V_{NS} é a tensão nominal do sistema elétrico, em *volts*.

Analisando a Equação (46) pode-se concluir que a impedância efetiva do alimentador (Z_{EA}) é diretamente proporcional à corrente de carga e, portanto, diminui com a redução da corrente de carga. Com a diminuição da impedância efetiva, é reduzido o efeito dos reatores de linha na mitigação de harmônicos.

Como exemplo, tome-se um retificador trifásico de 6 pulsos em cujo alimentador foram instalados reatores de linha dimensionados para produzirem uma impedância efetiva no alimentador (Z_{EA}) de 5%, quando a corrente da carga estiver em metade de seu valor nominal. Nesse caso a impedância natural do reator (Z_L) será de aproximadamente 2,5%. Valores típicos da impedância natural de reatores de linha estão entre 2 e 5 % (SCHWANZ, BOLLEN, LARSSON, 2016). Apresenta-se na Tabela 3 o comportamento da distorção harmônica total de corrente (*THDi*) em função da impedância efetiva do alimentador, para essa situação.

Tabela 3 – Variação da *THDi* de um retificador de 6 pulsos com a impedância efetiva

Distorção Harmônica (%)	**Impedância Efetiva (%)**						
	0,5	**1,0**	**1,5**	**2,0**	**3,0**	**4,0**	**5,0**
IHDi-5ª	78	60	51	46	39	35	32
THDi	100	72	60	55	44	39	35

onde *IHDi-5ª* é a contribuição individual da 5ª harmônica da corrente.

Fonte: SCHWANZ, BOLLEN, LARSSON, 2016.

Observa-se na Tabela 3 que, ao aumentar-se a impedância efetiva do alimentador diminui-se a distorção harmônica total (*THDi*) da corrente drenada pelo retificador. Fato semelhante ocorre para a quinta harmônica desta corrente (*IHDi-5ª*), que é harmônica de maior valor em um retificador de 6 pulsos, conforme destacado na mesma tabela.

2.1.4.2.2 Transformadores de Deslocamento de Fase

O deslocamento de fase envolve a separação de uma única fonte de alimentação elétrica em duas ou mais, através da utilização de um transformador apropriado com várias saídas que, alimentado pela fonte, terá em cada uma das saídas sua fase deslocada no tempo em relação à outra saída, e com um ângulo apropriado para o cancelamento de componentes harmônicos pré-determinados. O conceito aplicado é o de produzir um deslocamento de fase de 180º em um de dois componentes harmônicos próximos, de modo que eles se cancelem (BOUDRIAS, 2004).

Desse modo, os componentes harmônicos de sequência positiva das correntes cancelarão (agirão contra) os de sequência negativa, enquanto os componentes de sequência zero de uma fase cancelarão o de outra fase em um sistema trifásico. Como apresentado na Tabela 2, os harmônicos de ordem 1, 4, 7, 10, 13, 16, 19, ... apresentam sequência de fase positiva; enquanto que o harmônicos de ordem 2, 5, 8, 11, 14, 17, 20, ... apresentam sequência negativa; e os harmônicos 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, ... (múltiplos de três) apresentam sequência zero e se somam em sistemas trifásicos. Como exemplo do uso dessa técnica para atenuar harmônicos próximos, são necessários os seguintes deslocamentos de fase em um sistema trifásico (BOUDRIAS, 2004):

- 5º e 7º harmônicos: deslocamento de 30° entre duas fases;
- 11º e 13º harmônicos: deslocamento de 15° entre duas fases;
- harmônicos múltiplos de 3: deslocamento de 60° entre duas fases.

2.1.4.2.3 Conexões do Transformador

As conexões do transformador afetam o fluxo das componentes harmônicas múltiplas de 3 (três) das correntes. Dentre as várias conexões existentes, serão tratadas aqui três conexões comumente utilizadas, a saber: delta-estrela, estrela-estrela aterrada e delta-zigue-zague.

Na conexão delta-estrela do transformador, uma vez que as correntes harmônicas múltiplas de três estão em fase entre si, elas se somam no neutro. O enrolamento delta fornece um equilíbrio nos “ampere-espiras” que permite às componentes harmônicas múltiplas de três fluírem apenas no interior do enrolamento delta, não sendo transferidas para as correntes de linha do lado delta. Esta conexão é a mais utilizada em subestações de distribuição de energia, com o enrolamento delta conectado ao nível de tensão mais alto (DUGAN, et al., 2003).

Na conexão estrela-estrela aterrado, o aterramento permite que os harmônicos múltiplos de três fluam a partir do sistema de baixa tensão para o sistema de alta tensão sem restrições. Os harmônicos múltiplos de três estarão presentes em ambos os lados. Tais harmônicos não fluem em transformadores estrela-estrela não aterrados. A relação não linear entre corrente de excitação e fluxo magnético no transformador provoca o aparecimento de uma corrente de terceiro harmônico e uma força eletromotriz correspondente em cada fase. Se o neutro do sistema estiver aterrado, as tensões harmônicas múltiplas de três irão desaparecer, porque as correntes harmônicas múltiplas de três serão fornecidas através da conexão de neutro aterrado. Elas fluirão nos condutores de linha e retornarão ao neutro aterrado do sistema (SCHWANZ, BOLLEN, LARSSON, 2016).

Na conexão delta-zigue-zague do transformador, o efeito eletromagnético da conexão em zigue-zague cancela as correntes harmônicas múltiplas de três. Quando dois transformadores na conexão delta-zigue-zague são usados para deslocamento de fase, as correntes harmônicas múltiplas de três são canceladas devido ao enrolamento secundário na conexão zigue-zague, e as 5ª e 7ª componentes harmônicas da corrente são canceladas devido ao deslocamento de fase de 30° que ocorre neste tipo de conexão. Além disso, usando um único transformador delta-zigue-zague em um sistema composto por transformadores delta-estrela, a 5ª e a 7ª harmônicas originadas no transformador delta-zigue-zague irá cancelar aquelas componentes harmônicas de correntes de igual ordem que já estiverem presentes no sistema (BOUDRIAS, 2004).

2.1.4.2.4 Filtros Sintonizados

Um filtro para mitigar harmônicos do tipo sintonizado é um dispositivo constituído por indutores (L) e capacitores (C) conectados em série para formar um circuito LC (indutor-capacitor) ressonante sintonizado na frequência do componente harmônico que deverá ser filtrado.

O dispositivo LC série, assim constituído, deverá então ser conectado em paralelo com o sistema de energia, podendo ser localizado próximo ao ponto de conexão das cargas geradoras de harmônicos ou junto de seus transformadores de distribuição. Entretanto, eliminar os harmônicos próximo de sua fonte tem demonstrado ser o método mais eficaz para reduzir as perdas deles provenientes. Isto porque, se um filtro sintonizado for conectado mais à montante na rede de energia, os custos totais das perdas harmônicas serão maiores, pois elas

se acumularão nos condutores e em outros pontos da rede elétrica (SCHWANZ, BOLLEN, LARSSON, 2016).

A impedância de um filtro sintonizado é propositalmente muito baixa na frequência do componente harmônico que se deseja eliminar (ou filtrar) do sistema elétrico, recebendo por isso o nome de "sintonizado" nessa frequência harmônica. A impedância do filtro sintonizado para frequências abaixo da frequência de sintonia assemelha-se ao comportamento de uma impedância capacitiva, enquanto que a impedância do mesmo para frequências acima tem um comportamento semelhante a uma impedância indutiva. Já para a frequência sintonizada, o comportamento da impedância do filtro assemelha-se à de um resistor (SCHWANZ, BOLLEN, LARSSON, 2016).

Um filtro sintonizado poderá ser projetado como fixo, quando o fator de potência for baixo e constante, e o componente harmônico a ser atenuado apresentar magnitude constante; ou poderá ser projetado como automático, quando o fator de potência e o harmônico sintonizado variarem ao longo do tempo; ou ainda ser projetado como híbrido, quando o fator de potência for baixo e flutuar ao longo do tempo, ou se o harmônico a ser mitigado também mudar ao longo do tempo.

2.1.4.3 Técnicas Ativas para a Mitigação de Harmônicos

As técnicas ativas podem ser usadas sozinhas como um filtro para harmônicos ou incorporadas ao estágio retificador de equipamentos eletrônicos de potência. Essas técnicas, também chamadas de "filtros ativos" monitoram as correntes e tensões de carga, extraem a componente fundamental das correntes e das tensões, analisam o conteúdo harmônico e suas amplitudes das grandezas remanescentes e, em seguida, injetam correntes e tensões inversas (defasadas de 180º) e apropriadas para cancelar harmônicos individuais detectados.

Os filtros ativos normalmente cancelam até o 50° harmônico e podem reduzir os níveis de distorção harmônica na *THDi* para valores inferiores a 5% (SEKAR, RABI, 2012).

No entanto, alguns filtros ativos podem apresentar menor desempenho quando o sistema de energia possuir altos níveis de distorção de tensão. Eles utilizam circuitos de eletrônica de potência e, portanto, apresentam maiores requisitos de manutenção, e também tendem a apresentarem maiores perdas que as soluções passivas (SEKAR, RABI, 2012).

Eles podem trabalhar de modo global, quando o filtro compensa (ou cancela) todos os harmônicos; ou em modo seletivo, quando apenas os harmônicos selecionados são compensados. Duas estratégias de controle são usadas para seu funcionamento: na primeira, a

Transformada Rápida de Fourier calcula a amplitude e ângulo de fase de cada ordem harmônica; na segunda, é removido o componente na frequência fundamental e injetada uma forma de onda inversa nas componentes remanescentes (SCHWANZ, BOLLEN, LARSSON, 2016).

Como vantagens, essa tecnologia apresenta boa eficiência na supressão de harmônicos, a capacidade de sustentar a energia, e a não susceptibilidade a desequilíbrios da rede. Como desvantagens, tem-se a introdução de ondulações (*ripple*) na rede oriundas do chaveamento do filtro ativo; maiores ondulações quando do chaveamento no lado da carga, e elevadas perdas. Além disso, podem ser introduzidos harmônicos em frequências mais altas quando filtros ativos estão conectados a redes ressonantes ou quando vários filtros ativos estão conectados próximos um do outro. Isso pode até levar à instabilidade harmônica (PERSSON, 2014).

Os filtros ativos podem ser do tipo paralelo (derivação), para reduzir a tensão harmônica; ou do tipo série, para impedir a transferência de corrente harmônica. No entanto, para ambos, se faz necessário determinar a corrente de compensação com precisão e em tempo real (SCHWANZ, BOLLEN, LARSSON, 2016).

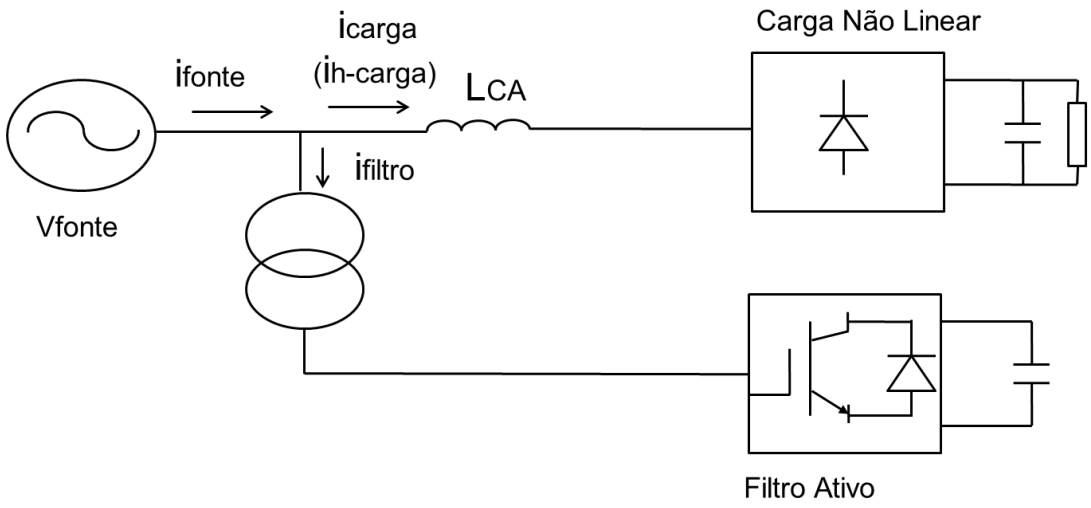
2.1.4.3.1 Filtro Ativo Paralelo

Os filtros ativos paralelos trabalham medindo a corrente de carga, analisando os harmônicos e, em seguida, injetando harmônicos com fase invertida (deslocamento de 180º) para cancelar os harmônicos indesejados (ARRILLAGA, WATSON, 2003).

Através dos filtros ativos paralelos circulam somente os componentes harmônicos da corrente e não a corrente total do circuito de carga. O controlador de um filtro ativo paralelo (derivação) detecta a corrente instantânea de carga, extrai dela seu conteúdo harmônico e modela a corrente de compensação (SCHWANZ, BOLLEN, LARSSON, 2016).

Isso pode ser visto na Figura 11, onde é apresentado o diagrama de um filtro ativo paralelo, trifásico, para compensação harmônica. Nesta figura a corrente instantânea da carga está indicada como i_{carga}, a componente harmônica de ordem h da corrente de carga está indicada como $i_{h\text{-}carga}$, a corrente instantânea do filtro está indicada por i_{filtro} (onde $i_{filtro} = -i_{h\text{-}carga}$) e constitui-se na corrente de compensação, a corrente da fonte é indica por i_{fonte}, a tensão de alimentação (fonte) é indicada por V_{fonte}, e o indutor instalado na entrada da carga (lado CA para uma carga do tipo ponte retificadora) é indicado por L_{CA}.

Figura 11– Filtro ativo paralelo para compensação de harmônicos



Fonte: Adaptado pelo Autor de SCHWANZ, BOLLEN, LARSSON, 2016

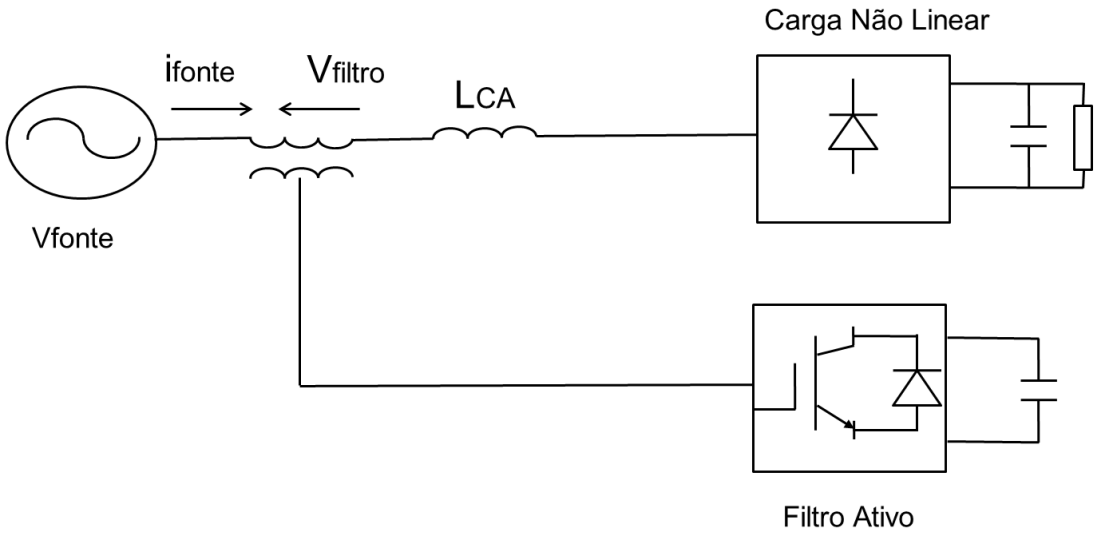
Esta configuração apresenta compensação eficiente, é compacta, permite compensar grupos de cargas diferentes, é insensível ao desequilíbrio da rede elétrica, e apresenta menores dimensões quando comparado com filtros ativos série. No entanto, como é um filtro ativo, ele introduz ondulações (*ripple*) oriundas do seu chaveamento próprio (SCHWANZ, BOLLEN, LARSSON, 2016).

2.1.4.3.2 Filtro Ativo Série

Os filtros ativos série eliminam distorções harmônicas de tensão e melhoram a qualidade da tensão aplicada à carga. Isto é alcançado através da conexão de um transformador com um de seus enrolamentos em série com a rede de alimentação, do lado da fonte. Um controlador (semelhante ao do filtro ativo paralelo) atua no outro enrolamento do transformador compensando as distorções harmônicas e mantendo uma onda senoidal na tensão do lado da carga. Esta configuração é percorrida pela corrente total da carga, exigindo grande capacidade de condução de corrente, especialmente no lado secundário do transformador de acoplamento (lado do filtro).

De modo semelhante ao filtro ativo paralelo, o controlador nesta configuração detecta a corrente instantânea da fonte e o filtro separa suas componentes harmônicas. No entanto, o filtro aplica uma tensão de compensação através do primário de um transformador conectado em série com a carga. Mostra-se na Figura 12 este sistema conectado a uma carga não linear (também uma ponte retificadora com um indutor L_{CA} instalado na entrada desta carga, em seu lado de corrente alternada) (SCHWANZ, BOLLEN, LARSSON, 2016).

Figura 12 – Filtro ativo série para compensação de harmônicos



Fonte: Adaptado pelo Autor de SCHWANZ, BOLLEN, LARSSON, 2016

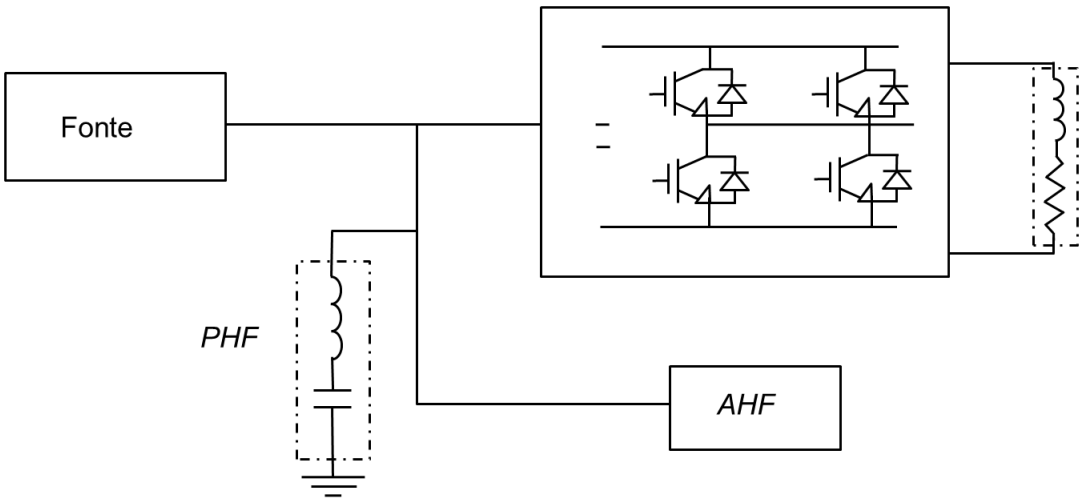
2.1.4.4 Filtros Híbridos

Na maioria dos casos, a solução mais econômica e efetiva para mitigação de harmônicos é alcançada através de filtros híbridos de harmônicos (ou *HHF* - do inglês *Hybrid Harmonic Filters*), que se constitui na combinação de filtros passivos (ou *PHF* – do inglês *Passive Harmonic Filters*) e de filtros ativos (ou *AHF* – do inglês *Active Harmonic Filters*).

As soluções por meio de filtros híbridos têm sido desenvolvidas para resolver problemas de potência reativa e corrente harmônica, pois foi observado que uma combinação de filtros ativos com filtros passivos produz uma redução significativa no custo, quando comparada com a utilização apenas de filtros ativos. Esta solução também ajuda a evitar a ressonância harmônica e a circulação de corrente harmônica na linha de alimentação, porém sua principal limitação está no fato dela ser restrita a um conjunto fixo de frequências harmônicas para as quais foi projetado (SCHWANZ, BOLLEN, LARSSON, 2016).

Apresenta-se na Figura 13 um exemplo de filtro híbrido através da combinação de filtro ativo paralelo (*AHF*) e filtro passivo (*PHF*), no qual não ocorre ressonância harmônica e correntes harmônicas para a fonte são mitigadas.

Figura 13 – Diagrama de filtro híbrido dotado de filtro ativo paralelo (*AHF*) e filtro passivo (*PHF*)

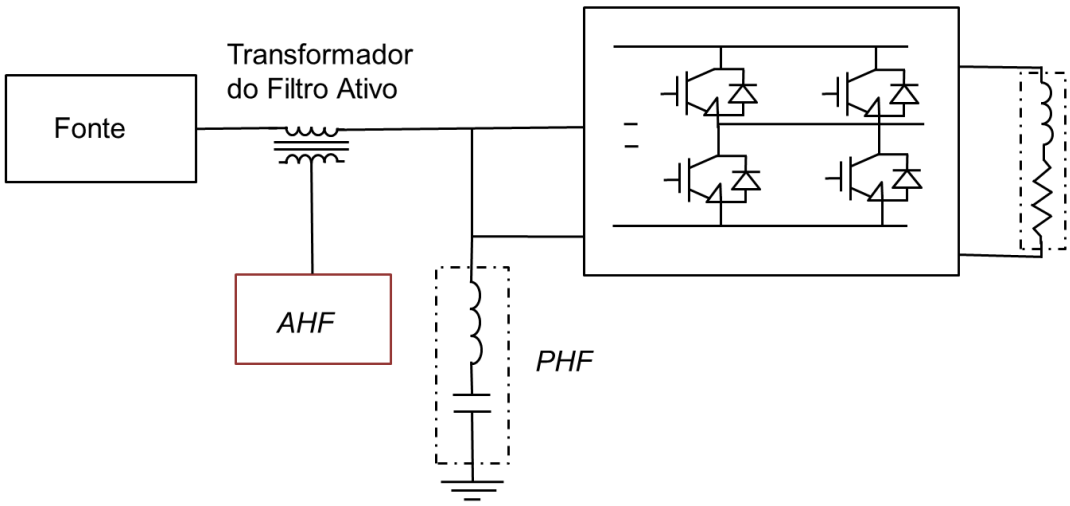


Fonte: Adaptado pelo Autor de KAZEM, 2013

A combinação de um filtro ativo série (*AHF*) e um passivo (*PHF*) é apresentada na Figura 14. Nela pode ser observado que o filtro passivo (*PHF*) é colocado em paralelo com o alimentador, entre o filtro ativo série e a carga.

Nesta configuração (Figura 14) a compensação de tensão promovida pelo filtro ativo série (*AHF*) poderá interferir com cargas a jusante, não sendo uma boa alternativa para a compensação de interharmônicos de baixa frequência (SCHWANZ, BOLLEN, LARSSON, 2016).

Figura 14 – Diagrama de filtro híbrido dotado de filtro ativo série (*AHF*) e filtro passivo (*PHF*)



Fonte: Adaptado pelo Autor de KAZEM, 2013.

2.1.4.5 Considerações sobre Desempenho e Custo

Para se comparar adequadamente o desempenho e o custo estimado de cada solução de mitigação, se faz necessária uma análise de todo o sistema, incluindo transformadores e cabos de alimentação, e não apenas uma comparação dos desempenhos e dos custos entre os equipamentos que constituem cada método. Portanto, uma análise comparativa rigorosa de desempenho deverá envolver o tipo de solução e também o planejamento associado a ela, para se determinar os tipos e características dos componentes necessários (SCHWANZ, BOLLEN, LARSSON, 2016).

Entretanto, apenas para efeitos exemplificativos, na Tabela 4 são apresentados valores típicos da *THD* de corrente na linha após a instalação da técnica de mitigação indicada, e também a correspondente eficiência resultante do sistema elétrico.

Tabela 4 – Comparação entre o Desempenho de Diversas Técnicas para Mitigação de Harmônicos

Técnica	***THDi* residual (%)**	**Eficiência (%)**
Reator de Linha	29 – 49	96,5
Filtro Sintonizado	19 - 29	96,0
Técnica Ativa	2 - 8	94,5
Filtro Hibrido	2 - 8	96,5

Fonte: PERSSON, 2014

Cabe ainda destacar que os valores apresentados na Tabela 4 não considera qualquer tipo de distorção na tensão da fonte, tais como desequilíbrio e, como já mencionado, nesta situação os resultados poderão ser piores que o apresentado nesta tabela.

Também apenas como exemplo, na Tabela 5 são apresentados valores obtidos da *THD* de corrente na linha após a instalação da técnica de mitigação indicada e seus custos estimados em uma escala de 0 a 5 (onde, 0 é o menor custo e 5 é o maior).

Tabela 5 – Comparação entre os Custos de Diversas Técnicas para Mitigação de Harmônicos

Técnica	***Custo Estimado***	***THDi* residual (%)**
Reator de Linha	0,3	35
Filtro Sintonizado	0,6	15 - 20
Técnica Ativa	5	5
Filtro Hibrido	2	6,02

Fonte: SCHWANZ, BOLLEN, LARSSON, 2016

Analisando os valores apresentados nas Tabelas 4 e 5, elaboradas por diferentes autores, e considerando-se a ressalva de inexistência de distorção na tensão da fonte, observa-se que a técnica que utiliza filtros híbridos apresenta a melhor relação “custo x benefício”, pois a *THDi* resultante será da ordem de 6 %, a eficiência resultante do sistema elétrico está entre as mais altas, e seu custo é inferior à metade das técnicas ativas.

2.1.5 Tendências

Conforme apresentado na Tabela 1, os harmônicos referem-se às frequências presentes nos sistemas elétricos; e que sejam diferentes da frequência fundamental. Neste tópico serão abordados dois subgrupos dos harmônicos denominados: Interharmônicos e Supraharmônicos.

O crescente uso de sofisticados equipamentos eletrônicos de potência e de comunicação tem provocado um incremento na distorção harmônica, e especialmente de interharmônicos (MARZ, 2016).

No passado, a faixa de frequências acima de 2 kHz era considerada como "alta frequência" para a comunidade de qualidade de energia e as freqüências abaixo de 150 kHz eram consideradas como "baixa frequência" para aqueles que trabalham com problemas de compatibilidade eletromagnética. Mas, nos últimos anos, essa faixa de frequências (entre 2 e 150 kHz) ganhou o interesse de ambos os grupos. O termo "supraharmônico" foi então proposto para qualquer distorção nessa faixa de frequência e vem sendo cada vez mais utilizado (RONNBERG, 2017).

2.1.5.1 Interharmônicos

De acordo com MARZ (2016), os Interharmônicos são definidos pelo *IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineer*, como:

> “Um componente de frequência de uma quantidade periódica que não é um múltiplo inteiro da frequência na qual o sistema de fornecimento está operando (por exemplo, 50 Hz ou 60 Hz)”.

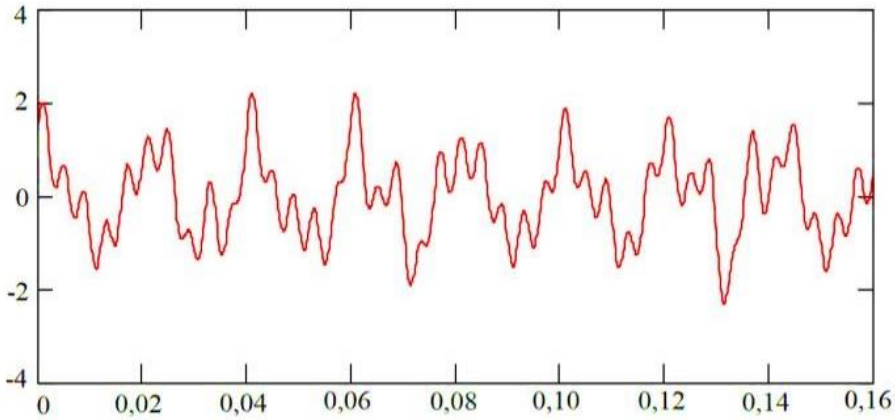
E segundo o mesmo autor, a *IEC - International Electrotechnical Commission* define Interharmônicos como:

> "Entre os harmônicos de tensão e de corrente relacionados com a freqüência na qual opera o sistema de potência, podem ser observadas frequências que não são um número inteiro da componente fundamental. Elas podem aparecer como frequências discretas ou como um espectro de banda larga".

Como já apresentada para harmônicos, uma característica dos sinais periódicos é que eles podem ser representados por suas componentes através de uma série de Fourier de várias amplitudes, frequências e ângulos. Entretanto, de acordo com as definições apresentadas, os interharmônicos não são periódicos na frequência fundamental (não são múltiplos inteiros dela), e podem ser interpretados como uma medida da não periodicidade de uma forma de onda do sistema de energia. De modo similiar, pode-se afirmar que uma forma de onda não periódica na frequência fundamental será portadora de interharmônicos (MARZ, 2016).

Como exemplo, apresenta-se na Figura 15 a forma de onda de uma corrente com a presença de harmônicos e interharmônicos, cuja frequência fundamental do sistema é de 50 Hz.

Figura 15 – Forma de onda com componentes harmônicos e interharmônicos



Fonte: Adaptado pelo Autor de IEEE Interharmonics, 1997

Os valores numéricos dos componentes harmônicos e interharmônicos da forma de onda apresentada na Figura 15 estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Valores Numéricos dos Componentes da Onda da Figura 15

Frequência	***Magnitude***
50	1,0
104	0,3
117	0,4
134	0,2
147	0,2
250	0,5

Fonte: IEEE Interharmonics, 1997

Os interharmônicos nos sistemas de energia são originados frequentemente por dois tipos de distúrbios comumente presentes nesses sistemas.

O primeiro distúrbio originador de interharmônicos são as rápidas mudanças de corrente e tensão, não periódic (analisadas matematicamente através da Transformada de Fourier - não objeto deste trabalho) causadas por cargas que operam em um estado transitório, de forma continua ou temporária, ou, em outros casos, quando a modulação de amplitude da tensão ou da corrente é proposital, para algum tipo de controle. Essas alterações podem ser aleatórias ou muito consistentes, dependendo do processo e dos controles envolvidos. Alterações na magnitude (amplitude) da corrente ou no ângulo de fase também podem criar interharmônicos laterais e próximos da frequência fundamental.

O segundo distúrbio originador relaciona-se com a comutação assíncrona, ou seja, não sincronizada com a frequência da rede, de dispositivos semicondutores em conversores estáticos. Os interharmônicos gerados por esses dispositivos podem estar localizados em qualquer lugar do espectro harmônico da tensão de alimentação. Em muitos equipamentos, ambos os mecanismos ocorrem ao mesmo tempo.

Oscilações entre capacitores em série ou paralelo, ou quando transformadores ou motores de indução saturam, também podem ser fontes de interharmônicos.

Algumas fontes específicas de interharmônicos (MARZ, 2016) são:

• fornos a arco;

• máquinas de solda;

• conversores eletrônicos de frequência (LI, 2003);

• controladores de cargas variáveis;

• conversores de fonte de tensão;

• comunicações através de linhas de transmissão de energia.

Os interharmônicos, assim como os harmônicos, se adicionam aos sinais de tensão e de corrente dos sistemas de energia. Esses sinais adicionais podem causar vários efeitos, principalmente se forem ampliados por ressonância. Quanto maior a variedade de freqüências presentes, maior o risco de ressonância.

Muitos dos efeitos dos interharmônicos são semelhantes aos dos harmônicos, mas alguns são exclusivos dos interharmônicos por resultar de sua natureza não periódica. Dois dos efeitos mais comuns e impactantes dos interharmônicos que não se relacionam com harmônicos são cintilações de luz (*flicker*) e interferências na comunicação através de linhas de transmissão de energia, pois esses dois problemas são oriundos de sinais não periódicos.

Dentre os efeitos específicos de interharmônicos (IEEE Interharmonics, 2001) tem-se:

- cintilações de luz (*flicker*);
- interferências na comunicação através de linhas de transmissão (*carrier*);
- oscilação torcional em eixos de turbogeradores;
- falhas e/ou redução de vida útil em filtros sintonizados.

A mitigação dos efeitos nocivos da presença de interharmônicos poderá ser realizada também de três maneiras, e semelhantes àquelas propostas para a mitigação de harmônicos. Estas três maneiras para a mitigação de interharmônicos são: i) redução dos níveis de emissão de interharmônicos; ii) redução da sensibilidade das cargas (por exemplo, através da instalação de filtros dedicados), e; iii) redução do acoplamento entre equipamentos geradores de interharmônicos e cargas sensíveis à eles.

Entretanto, sua natureza de banda larga de frequência e a variabilidade nos interharmônicos emitidos por certos tipos de cargas podem tornar mais difícil a utilização desses três métodos de mitigação para interharmônicos do que para harmônicos.

Felizmente, o nível de distorção interharmônica nos sistemas é geralmente baixo, porque atualmente não existem muitas fontes geradoras de interharmônicos de grande capacidade nos sistemas de energia. Portanto, problemas relacionados com interharmônicos são relativamente raros e a necessidade mitigá-los é incomum. Porém, caso seja necessário, tais problemas deverão ser resolvidos caso a caso (MARZ, 2016).

2.1.5.2 Supraharmônicos

Existe grande interesse da comunidade normativa internacional no conhecimento sobre distorções de tensão e corrente com componentes de frequências entre 2 kHz e 150 kHz, chamadas de “supraharmônicos”, pois existem apenas limites normativos para emissão de harmônicos fora dessa faixa, ou seja, até 2 kHz e acima de 150 kHz, e o conhecimento sobre supraharmônicos ainda é limitado (BOLLEN, 2014).

Os supraharmônicos são, portanto, componentes harmônicos de alta frequência para os sistemas de energia, constituindo-se, por exemplo, em componentes entre o 40º e o 3000º componente harmônico para um sistema cuja frequência fundamental seja de 50 Hz. Nesse sentido, o sufixo “supra” indica “mais acima” ou “sobre” a faixa adotada para harmônicos em sistemas de energia. Entretanto, cumpre observar que os sistemas de energia consideram, normalmente, até o 50º componente harmônico (IEEE Std 519, 2014). Dessa forma, a faixa entre o 40º e o 50º componente harmônico dos sistemas de energia em 50 Hz apresentam frequências classificadas como “supraharmônicos”. Para sistemas em 60 Hz, essa faixa fica entre o 33º e o 50º componente harmônico.

O aparecimento de supraharmônicos em sistemas de energia nos últimos anos tem sido causado pela crescente integração de geradores distribuídos e de cargas com técnicas de comutação em alta frequência, como por exemplo, inversores de corrente contínua para corrente alternada de sistemas fotovoltaicos, e carregadores de veículos elétricos, respectivamente (WANIEK, et al., 2017).

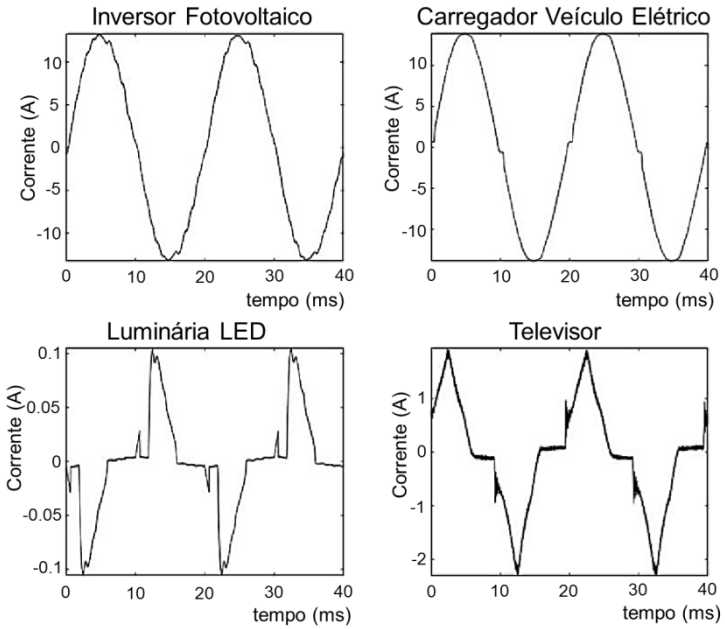
De acordo com (RONNBERG, BOLLEN, 2017), alguns exemplos de dispositivos encontrados como fontes de supraharmônicos e suas respecitvas faixas de frequência são:

- Conversores industriais (9 kHz a 150 kHz);
- Luminárias LED de iluminação pública (até 20 kHz);
- Carregadores de veículos elétricos (15 kHz a 100 kHz);
- Inversores fotovoltaicos (4 kHz a 20 kHz);
- Aparelhos eletrodomésticos (2 kHz a 150 kHz);
- Comunicação por linha de transmissão de energia (9 kHz a 95 kHz).

Apresentam-se na Figura 16 as formas de onda da corrente de alguns dispositivos domésticos e apresentam-se na Figura 17 os espectros harmônicos dessas correntes.

No entanto, deve-se enfatizar que estes são apenas exemplos, pois existem luminárias LED com padrões de emissão completamente diferentes, e o mesmo vale para os outros tipos de dispositivos mostrados nas Figuras 16 e 17.

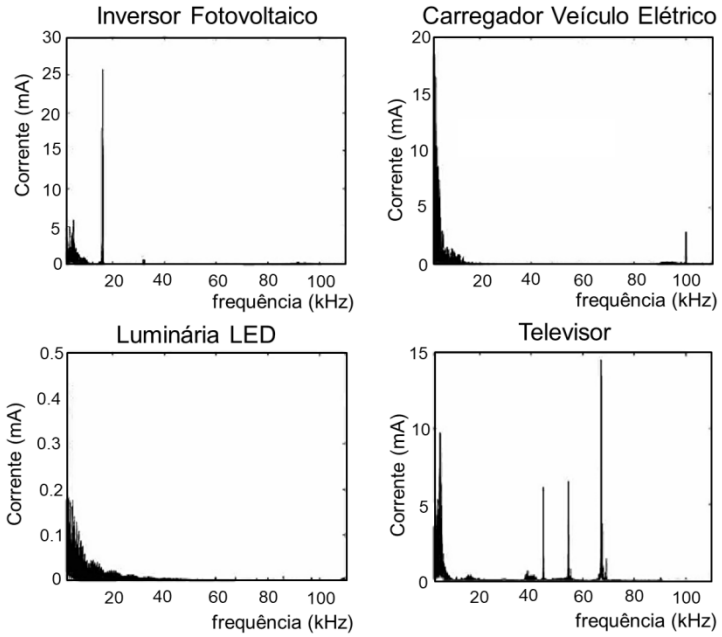
Figura 16 – Formas de onda de correntes com supraharmônicos oriundos de quatro equipamentos domésticos



Fonte: Adaptado pelo Autor de RONNBERG, BOLLEN, 2017

Um ponto a ser destacado são as unidades dos eixos horizontal e vertical das Figuras 16 e 17, pois fornecem uma noção quantitativa dos supraharmônicos.

Figura 17 – Espectros de corrente com supraharmônicos oriundos de quatro equipamentos domésticos



Fonte: Adaptado pelo Autor de RONNBERG, BOLLEN, 2017

Embora também sejam distorções harmônicas, existem propriedades dos suprahar-mônicos que diferem daquelas observados para harmônicos, potencializando os seguintes efeitos:

- A presença de oscilações recorrentes;
- A disseminação das emissões através de uma instalação.

A redução dos níveis de supraharmônicos nas instalações elétricas poderá ser atingida através de projetos específicos de mitigação para cada caso (tais como filtros), e através do emprego de algoritmos de controle adequados, especialmente através conversores de vários níveis (RONNBERG, et al., 2011).

2.2 Distorções Harmônicas: Referências Normativas e Limites Propostos

Existem várias organizações no mundo que trabalham em conjunto com engenheiros, fabricantes de equipamentos e instituições de pesquisa na elaboração de normas e recomendações técnicas relativas a harmônicos, as quais apresentam diretrizes gerais, recomendações práticas e limites para o conteúdo harmônico presente nas correntes e tensões dos sistemas elétricos. O principal objetivo dessas normas e recomendações é fornecer um referencial comum a todas as partes envolvidas, para que possam trabalhar em conjunto e assegurar a compatibilidade entre os equipamentos de uso final e os sistemas de energia nos quais são aplicados (DUGAN, et al., 2003).

Dentre essas organizações tem-se a *IEC*, o *IEEE*, a *ANEEL*, entre outras; sendo estas três, as que serão brevemente apresentadas neste trabalho. As duas primeiras tem abrangência internacional, e a última define regulamentações e procedimentos com aplicação apenas para o sistema elétrico brasileiro.

A *IEC - International Electrotechnical Commission* é uma organização não governamental sem fins lucrativos, fundada em 1906, atualmente com sede em Genebra na Suíça, que desenvolve normas internacionais e opera sistemas de avaliação de conformidade nos campos da eletrotecnologia. É composta por diversos comitês nacionais dos países membros, que se filiam voluntariamente, contribuem com taxas de adesão, e participam plenamente de seus trabalhos (IEC, 2019).

O *IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers*, fundado em 1884, é uma associação dedicada ao avanço da inovação e excelência tecnológica para o benefício da hu-

manidade. É a maior sociedade profissional do mundo técnico. Ele foi criado para servir os profissionais envolvidos nas áreas de elétrica, eletrônica, de computação, e correlatas de ciência e tecnologia, que estão subjacentes à civilização moderna (IEEE, 2019).

A *ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica*, autarquia em regime especial vinculada ao Ministério de Minas e Energia do Brasil, foi criada em 1997 para regular o setor elétrico brasileiro, cujas principais atribuições, por delegação do governo federal, são: regular, fiscalizar, estabelecer políticas e diretrizes, estabelecer tarifas, dirimir divergências, promover outorgas e concessões (ANEEL, 2019).

Existe também no Brasil a *ABNT – Associação Brasileira de Normas técnicas*, que é o Foro Nacional de Normalização por reconhecimento da sociedade brasileira desde a sua fundação em 1940, e confirmado pelo governo federal por meio de instrumentos legais (ABNT, 2019). Cabe à *ABNT* elaborar as normas que balizarão a produção dos equipamentos a serem utilizados no sistema elétrico, enquanto à *ANEEL* cumpre definir os critérios de operação do sistema elétrico nacional.

Assim como no Brasil é estabelecido pela *ANEEL*, a maioria dos países tem suas próprias recomendações regulatórias para controlar os níveis de distorção harmônica em sistemas de distribuição de energia, as quais variam de acordo com as peculiaridades locais.

Nesta era da globalização, a necessidade de equipamentos fabricados em um país atenderem as normas de outro país, tem levado a esforços na formulação de normas internacionais para harmônicos e interharmônicos. Mais recentemente, vários países começaram a aplicar metodologias similares para o controle de harmônicos e estabelecer limites permitidos através da adoção de normas elaboradas por organizações internacionais, tais como as da *IEC* e do *IEEE* (SINGH, 2009).

No intuito de controlar os níveis de distorção harmônica da tensão nos sistemas de distribuição de energia, a maioria das normas propõem limites ao conteúdo harmônico das correntes drenadas pelas unidades consumidoras. Entende-se que, se as unidades consumidoras limitarem o conteúdo harmônico de suas respectivas correntes, o efeito líquido total do conteúdo harmônico das correntes drenadas por todas as unidades consumidoras resultará em um nível aceitável de distorção harmônica de tensão do sistema de distribuição.

2.2.1 Normas da *IEC*

A *IEC* definiu uma série de normas, denominadas “padrões de compatibilidade eletromagnética”, relacionadas a problemas de qualidade de energia. O termo compatibilidade

eletromagnética inclui preocupações com equipamentos de uso final, e com interferências conduzidas e irradiadas, sendo estas últimas àquelas que se propagam pelo espaço, mesmo vazio, por meio de ondas eletromagnéticas.

A série de normas IEC61000 inclui harmônicos e interharmônicos como um dos fenômenos eletromagnéticos de baixa frequência conduzidos, isto é, que percorrem fisicamente os condutores e dispositivos que constituem os sistemas elétricos.

Antes de 1997 as normas da *IEC* sobre harmônicos eram designadas por um esquema numérico de série 1000. Por exemplo, a atual série IEC61000 era conhecida como IEC1000.

As normas da série IEC61000 são divididas em seis partes (DUGAN, et al., 2003), que são:

- Parte 1: Geral. As normas pertencentes a esta parte apresentam considerações gerais, como introdução, princípios fundamentais, bases lógicas, definições e terminologias. Elas também descrevem a aplicação e a interpretação de definições e termos fundamentais. Seus números de designação são IEC61000-**1**-x.

- Parte 2: Ambiente. As normas desta parte focam no sistema elétrico, que é chamado de "ambiente" nas normas. Definem as características do sistema ao qual um equipamento gerador de harmônicos será conectado, a classificação desse sistema e seus níveis de compatibilidade. Seus números de designação são IEC61000-**2**-x.

- Parte 3: Limites. Nesta parte as normas focam nos equipamentos geradores de harmônicos. Definem os níveis permitidos de emissões dos equipamentos, estabelecem limites de emissão e limites de imunidade. Seus números de designação são IEC61000-**3**-x.

- Parte 4: Técnicas de teste e medição. As normas desta parte apresentam orientações detalhadas para os equipamentos de medição e procedimentos de testes para assegurar conformidade com normas das outras partes nas quais se dividem as normas da *IEC*. Seus números de designação são IEC61000-**4**-x.

- Parte 5: Diretrizes para instalação e mitigação. Nesta parte estão as normas que fornecem diretrizes para aplicação de equipamentos para mitigação, como por exemplo, aterramento e cabeamento de sistemas elétricos e eletrônicos, objetivando assegurar a compatibilidade eletromagnética mútua entre aparelhos ou sistemas elétricos e eletrônicos. Seus números de designação são IEC61000-**5**-x.

- Parte 6: Diversos. E por último, as normas desta parte apresentam padrões genéricos que definem a imunidade e os níveis de emissão admissíveis para equipamentos em categorias extensas e outras normas que os apresentam para situações específicas. Por exemplo, na categoria mais extensa existe norma que trata de "emissão para ambientes industriais"; e na categoria de situações específica existe norma que trata de "imunidade para equipamentos utilizados em usinas e ambientes de subestações". Seus números de designação são IEC61000-**6**-x.

Neste trabalho são apresentadas algumas normas pertecentes à Parte 2: Ambiente e à Parte 3: Limites.

2.2.1.1 IEC61000-2-4

A norma "IEC 61000-2-4:2002 - Compatibilidade Eletromagnética – Parte 2-4: Ambiente - Níveis de Compatibilidade em Instalações Industriais para Distúrbios Conduzidos por Baixa Frequência" trata de distúrbios conduzidos na faixa de frequências de 0 kHz a 9 kHz. Ela apresenta valores numéricos para níveis de compatibilidade de distorção harmônica em sistemas industriais (não públicos) de distribuição de energia em tensões nominais de até 35 kV, com frequências de 50 ou 60 Hz. O termo "distúrbios" utilizado nesta norma inclui também distorções harmônicas.

Os valores apresentados nesta norma aplicam-se ao *PAC - Ponto de Acoplamento Comum* entre as instalações das unidades consumidoras e da distribuidora de energia elétrica, ou seja, refere-se ao ponto do sistema elétrico a partir do qual a responsabilidade das instalações (construção, manutenção e operação) deixa de ser da concessionária e passa a ser da unidade consumidora. Destaca-se que esses valores são válidos para as unidades consumidoras de energia (indústrias), pois os valores no mesmo *PAC* válidos para as distribuidoreas de energia (concessionárias) são apresentados por outras normas.

Os níveis de compatibilidade no *PAC* a serem observados pelas redes públicas de distribuição sob-responsabilidade das concessionárias são especificados pela norma IEC 61000-2-2 para redes de baixa tensão e pela IEC 61000-2-12 para redes de média tensão. Já as normas técnicas IEC 61000-3-6 e IEC 61000-3-7 apresentam os limites permitidos para distorção harmônica na tensão no *PAC* provocados por grandes unidades consumidoras. Entretanto, essas normas não são analisadas neste trabalho.

Voltando à norma IEC 61000-2-4, os valores propostos por esta norma, na maioria das vezes, podem ser considerados os mesmos para pontos internos das instalações elétricas das unidades consumidoras, junto aos terminais de entrada dos equipamentos nela conectados. Porém, em algumas situações, isso poderá não ser verdadeiro, especialmente quando existirem longos alimentadores até determinadas cargas ou quando os distúrbios forem gerados (ou amplificados por ressonância) no interior das instalações consumidoras (IEC 61000-2-4, 2002).

Os níveis de compatibilidade especificados nesta norma consideram diversos tipos de distúrbios possíveis no interior das instalações, inclusive harmônicos, porém não apenas eles. São considerados também os seguintes distúrbios:

- desvios de tensão;
- quedas de tensão e interrupções curtas;
- desequilíbrio de tensão;
- variações na frequência fundamental;
- harmônicos até 50ª ordem;
- interharmônicos até o 50º harmônico;
- componentes de tensão em frequências mais altas (acima do 50º harmônico);
- componente em corrente contínua;
- sobretensões transitórias.

Dentre os disturbios abrangidos pela norma IEC 61000-2-4 listados acima, constam aqueles relativos a harmônicos (até 50ª ordem), interharmônicos (até o 50º harmônico), e também os supraharmônicos, cujas frequências são acima do 50º harmônico, ou seja, acima de 3 kHz para sistemas elétricos cuja frequência fundamental seja de 60 Hz. Quanto aos supraharmônicos, esta norma os considera até a frequência de 9 kHz, ou seja, até os componentes de tensão do 150º harmônico (sistemas em 60 Hz).

Tais distúrbios são apresentados para três classes de “ambientes”, quais sejam:

- Classe 1: Ambiente destinado ao fornecimento de energia a cargas eletrônicas sensíveis a harmônicos;

- Classe 2: Ambiente normal. São os limites normalmente adotados também para as redes públicas;

- Classe 3: Ambiente com grande presença de harmônicos (por possuírem alto grau de cargas não lineares). Os limites apresentados nesta classe não são adequados para sistemas de fornecimento de energia a cargas sensíveis a harmônicos.

Como exemplo de valores numéricos, a Tabela 7 apresenta os limites de distorção harmônica na tensão a serem observados em instalações industriais até 35 kV, conforme a norma IEC 61000-2-4.

Tabela 7 – Limites de Compatibilidade: Harmônicos de Tensão (U_h% e THD_V) em Instalações Industriais até 35 kV (IEC 61000-2-4)

Ordem Harmônica	**Classe 1 U_h (%)**	**Classe 2 U_h (%)**	**Classe 3 U_h (%)**
2	2,0	2,0	3,0
3	3,0	5,0	6,0
4	1,0	1,0	1,5
5	3,0	6,0	8,0
6	0,5	0,5	1,0
7	3,0	5,0	7,0
8	0,5	0,5	1,0
9	1,5	1,5	2,5
>10 (mult. de 2)	0,2	0,2	1,0
11	3,0	3,5	5,0
13	3,0	3,0	4,5
15	0,3	0,3	2,0
17	2,0	2,0	4,0
19	1,5	1,5	4,0
21	0,2	0,2	1,75
>21 (mult. de 3)	0,2	0,2	1,0
23	1,5	1,5	3,5
25	1,5	1,5	3,5
>25 (não mult. de 2 ou 3)	0,2+12,5/h	0,2+12,5/h	$5x\sqrt{11/h}$
THD_V	**5,0 %**	**8,0 %**	**10,0 %**

Fonte: CIRCUTOR, 2019

Analisando-se a Tabela 7, observa-se que a distorção total de tensão (THD_V) admitida para equipamentos da Classe 1 é de apenas 5,0 % (cinco por cento). Nesta classe econtram-se os equipamentos eletrônicos mais sensíveis a harmônicos, sendo que muitos dos equipamentos hospitalares encontram-se na Classe 1 (SILVEIRA, 2003), (RAMOS, 2009).

E em uma de suas notas, esta norma destaca que é de responsabilidade do gestor do sistema elétrico considerar suas particularidades relacionadas à compatibilidade eletromagnética (incluindo harmônicos), observando critérios econômicos e características de seus equipamentos, com vistas ao atendimento dos limites nela apresentados (IEC 61000-2-4, 2002).

2.2.1.2 IEC61000-3-4

A norma "IEC 61000-3-4:1998 - Compatibilidade Eletromagnética – Parte 3-4: Limites – Limites para o Conteúdo Harmônico na Corrente de Equipamentos Alimentados em Baixa Tensão, com Correntes Nominais Superiores a 16 A", trata apenas de harmônicos, foca nos equipamentos com corrente maiores que 16 A por fase (e menores que 75A), e alimentados a partir de uma rede pública de baixa tensão, com as seguintes características:

- tensão nominal de até 240 V, monofásica, dois ou três fios;
- tensão nominal de até 600 V, trifásica, três ou quatro fios;
- frequência nominal de 50 Hz ou 60 Hz.

Portanto, diferentemente da norma IEC 61000-2-4 apresentada anteriormente e que propõe limites à distorção de tensão do sistema elétrico, esta norma IEC 61000-3-4 apresenta limites para o equipamento, sendo assim seus valores relacionados com a corrente drenada pelo equipamento.

Como consequência desse fato, o responsável por adequar o equipamento a esta norma será o fabricante do mesmo. E isto deverá ser demonstrado atráves de um "Ensaio de Tipo Completo", no qual o equipamento como um todo é avaliado, e não apenas um de seus componentes. Por exemplo, para um Ventilador de Velocidade Variável dotado de um conversor eletrônico para controlar sua velocidade, o equipamento completo deverá ser avaliado quanto ao conteúdo harmônico de sua corrente, e não apenas o conversor eletrônico (IEC 61000-3-4, 1998).

A conexão ao sistema de distribuição de equipamento que apresenta elevado conteúdo harmônico em sua corrente, geralmente requer (dos gestores do sistema) cuidados especiais para evitar a propagação da distorção harmônica provocada por um equipamento (ou por

uma unidade consumidora) para todo o sistema elétrico. Esses cuidados dependerão de vários fatores, incluindo os níveis esperados da perturbação causada pelo equipamento a ser instalado e as condições existentes no *PAC*, tais como nível de curto-circuito, impedância do sistema elétrico a montante, etc. (CPFL GED 10099, 2012).

Nesse sentido, a norma IEC 6100-3-4 apresenta informações necessárias e importantes sobre os equipamentos e que possibilitam aos gestores do sistema elétrico avaliar se tais equipamentos poderão ser ligados de forma direta ou se exigirão alguma medida complementar de mitigação de efeitos harmônicos. Visto de outra forma, mesmo que um equipamento atenda ao preconizado por esta norma, não haverá garantia que o mesmo possa ser conectado em qualquer rede elétrica, pois isso dependerá das condições existentes na rede na qual o equipamento será conectado.

Existe também a norma IEC 61000-3-2 que trata do mesmo assunto para equipamentos cuja corrente nominal seja abaixo de 16 A, porém esta não é tratada neste trabalho.

Assim, de modo geral, a norma IEC 61000-3-4 é apresentada a partir de dois pontos importantes:

- apresenta condições específicas sobre a relação entre a potência (ou nível) de curto-circuito no ponto de instalação (S_{cc}) e a potência do equipamento (S_{eq}), sob a qual o equipamento deverá ser testado pelo fabricante;
- apresenta métodos para o ensaio de tipo completo.

Como exemplo de valores numéricos, a Tabela 8 apresenta os limites do conteúdo harmônico de corrente a serem observados por equipamentos conectados em rede pública de baixa tensão, conforme a norma IEC 61000-3-4.

Observa-se que, para os valores da Tabela 8, o nível de curto circuito deverá ser 33 (trinta e três) vezes maior que a potência do equipamento. Tal relação tem por objetivo minimizar os efeitos da rede de alimentação sobre o equipamento a ser analisado (IEC 61000-3-4, 1998).

Resumindo, a norma IEC 61000-3-4 considera equipamentos cujas correntes sejam maiores que 16 A por fase e menores que 75 A (DUGAN, et al., 2003), alimentados com tensões menores que 1 kV (baixa tensão), sendo sua observação imperativa aos fabricantes de equipamentos, que deverão comprovar que seus produtos atendem a essa norma através de "ensaios de tipo completo". A Tabela 8 é apresentada como ilustração de limites de harmônicos de corrente preconizados pela *IEC*.

Tabela 8 – Limites de Componentes Harmônicos de Corrente (I_h/I_1 %) para Equipamentos com Corrente Superior a 16 A, de Baixa Tensão – Scc > 33xSeq (IEC 61000-3-4)

Ordem Harmônica	**Valor Máximo I_h/I_1 (%)**
3	21,6
5	10,7
7	7,2
9	3,8
11	3,1
13	2,0
15	0,7
17	1,2
19	1,1
21	0,6
23	0,9
25	0,8
27	0,6
29	0,7
31	0,7
≥33	0,6
pares	≤8/h ou 0,6

Fonte: CIRCUTOR, 2019

Neste trabalho são analisados com especial atenção os limites de compatibilidade propostos pela norma IEC 61000-2-4 apresentados na Tabela 7.

2.2.2 Recomendações do *IEEE*

Enquanto a *IEC* optou pela edição de diversas normas relativas aos harmônicos presentes em um sistema elétrico, o *IEEE* optou por condensar suas publicações basicamente em apenas uma recomendação técnica. Essa publicação é a IEEE 519 (DUGAN, et al., 2003), que teve sua versão atual publicada em 2014.

2.2.2.1 IEEE 519

A recomendação "IEEE Std 519:2014 - Prática recomendada pelo IEEE e Requisitos para o Controle de Harmônicos em Sistemas de Energia Elétrica" tem por objetivo estabelecer limites relativos a distorções harmônicas para o projeto de sistemas elétricos que incluem cargas lineares e não lineares.

A IEEE 519 apresenta valores limites para os harmônicos nos sistemas elétricos em regime permamente, e são válidas para o *PAC* entre a unidade consumidora e o sistema de distribuição de energia.

O nível de tensão no *PAC*, conforme esta recomendação do *IEEE*, poderá ser em:

• Baixa Tensão: ≤ 1 kV;

• Média Tensão: > 1 kV e ≤ 69 kV;

• Alta Tensão: > 69 kV e ≤ 161 kV;

• Extra-Alta Tensão: > 161 kV.

E nela são apresentados valores limites para a distorção harmônica na tensão e na corrente no *PAC* para cada um desses níveis de tensão (IEEE 519, 2014).

Para a distorção harmônica na tensão, deverão ser considerados os limites apresentados na Tabela 9 para tensões entre fase e neutro, e tais limites deverão ser aplicados considerando períodos de avaliação, da seguinte maneira:

• Durante um dia: em 99% do tempo, os valores referentes a período muito curtos (até 3 segundos), devem ser inferiores a 1,5 vezes os valores para a tensão apresentados na Tabela 9;

• Durante uma semana: em 95% do tempo, os valores referentes a um período curto (entre 3 segundos e 10 minutos), devem ser menores que os valores para a tensão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Limites para Distorção de Tensão de Acordo com a IEEE 519:2014

Tensão no *PAC* (V)	**Harmônicos Individuais (%)**	**Distorção Harmônica Total – THD_V (%)**
V ≤ 1 kV	5,0	8,0
1 kV < V ≤ 69 kV	3,0	5,0
69 kV < V ≤ 161 kV	1,5	2,5
161 kV < V	1,0	1,5

Fonte: IEEE Std 519, 2014

Os valores da Tabela 9 estão em porcentagem da tensão na frequência fundamental no *PAC*. Os valores nela contidos referem-se aos harmônicos de tensão cuja frequência indi-

vidual seja um múltiplo inteiro da frequência fundamental. Nesta publicação do *IEEE* também são apresentados limites para interharmônicos, porém esses não são analisados neste trabalho.

Para a distorção harmônica de corrente no *PAC*, para os níveis de tensão entre 120 V e 69 kV, os limites estão apresentados na Tabela 10, e deverão ser aplicados considerando períodos de avaliação, da seguinte maneira:

- Durante um dia: em 99% do tempo, os valores referentes a período muito curtos (até 3 segundos), devem ser inferiores a 2,0 vezes os valores para as correntes apresentados na Tabela 10;
- Durante uma semana: em 99% do tempo, os valores referentes a um período curto (entre 3 segundos e 10 minutos), devem ser menores que 1,5 vezes os valores apresentados na Tabela 10. E também em 95% do tempo, os valores referentes a esse mesmo período curto devem ser menores que os apresentados na mesma tabela.

Tabela 10 – Limites de Distorção de Corrente para Níveis de Tensão no *PAC* entre 120 V e 69 kV, de Acordo com as Recomendações IEEE 519:2014

Máxima Distorção Harmônica na Corrente (em porcentual da corrente na demanda máxima - I_L)						
	Ordem dos Harmônicos Individuais (harmônicos ímpares)*					
I_{CC}/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 harmônicos pares são limitados a 25% dos limites acima para harmônicos ímpares.

Fonte: IEEE Std 519, 2014

sendo:

I_{CC} = corrente de curto-circuito no *PAC*;

I_L = corrente de carga na frequência fundamental sob condições normais de operação e de máxima demanda da carga.

Observa-se na Tabela 10 que os limites são dependentes da relação entre o valor da corrente de curto-circuito do sistema e o valor da máxima corrente demandada pela carga, permitindo maiores distorções de corrente para sistemas mais robustos, assim considerados

aqueles que apresentam maior relação I_{CC}/I_L. E também que esses valores são apresentados em porcentagem de I_L no *PAC*, para componentes cujas frequências são múltiplos inteiros da frequência fundamental.

Neste trabalho são analisados com especial atenção os limites para distorção de tensão propostos pela IEEE 519 apresentados na Tabela 9.

2.2.3 Resoluções da *ANEEL*

Para padronizar e normatizar as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica no Brasil, a *ANEEL* elaborou e regulamentou, através de resoluções normativas, os "Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST", os quais foram publicados em 11 (onze) módulos (ANEEL, 2019). Este trabalho tratará apenas do Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica.

2.2.3.1 ANEEL – PRODIST – Módulo 8

Através da Resolução Normativa nº 794/2017 a ANEEL publicou a Revisão nº 10 do Módulo 8 do PRODIST, cuja vigência teve início em 01 de Janeiro de 2018 (ANEEL - Módulo 8, 2018).

Esse documento estabele os procedimentos a serem observados pelas empresas distribuidoras relativas à qualidade da energia elétrica, abordando a qualidade do produto, a qualidade do serviço prestado e a qualidade do tratamento de reclamações dos consumidores. Neste trabalho serão apresentados apenas alguns critérios relacionados com a qualidade do "produto" energia elétrica.

Para qualidade do produto, o Módulo 8 do PRODIST define a terminologia e os indicadores empregados, estabelece limites ou valores de referência, apresenta a metodologia de medição, e os estudos específicos de qualidade da energia elétrica para fins de acesso aos sistemas de distribuição. Este módulo considera diversos fenômenos, tais como fator de potência, desequilíbrio de tensão, harmônicos, flutuação de tensão, entre outros.

Entretanto, neste trabalho será tratado apenas das distorções harmônicas, mencionando os principais tópicos abordados pelo Módulo 8 sobre esse tema.

E para distorções harmônicas é utilizada a terminologia apresentada na Tabela 11.

Tabela 11 – Teminologia Utilizada no PRODIST – Módulo 8 da *ANEEL*

Identificação da Grandeza	**Símbolo**
Distorção harmônica individual de tensão de ordem *h*	$DIT_h\%$
Distorção harmônica total de tensão	$DTT\%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3	$DTT_p\%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3	$DTT_i\%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3	$DTT_3\%$
Tensão harmônica de ordem *h*	V_h
Ordem harmônica	h
Ordem harmônica máxima	$h_{máx}$
Ordem harmônica mínima	h_{min}
Tensão fundamental medida	V_1
Valor do indicador *DTT*% que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas	$DTT95\%$
Valor do indicador DTT_p% que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas	$DTT_p95\%$
Valor do indicador DTT_i% que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas	$DTT_i95\%$
Valor do indicador DTT_3% que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas	$DTT_395\%$

Fonte: ANEEL - Módulo 8, 2018

As “1008 leituras válidas” mencionadas na Tabela 11 devem ser entendidas como o conjunto de 1008 (um mil e oito) leituras obtidas em intervalos consecutivos de 10 minutos cada. Assim, para um período normal de leitura, tem-se 6 leituras por hora, 144 leituras por dia, e 1008 leituras por semana. Portanto, as “1008 leituras válidas” correspondem a uma semana de registros.

Conforme apresentado no Módulo 8 do PRODIST, as expressões matemáticas para a distorção harmônica individual de tensão de ordem *h* ($DIT_h\%$) e para a distorção harmônica total de tensão ($DTT\%$) são dadas respectivamente pelas Equações (47) e (48).

$$DIT_h\% = \frac{V_h}{V_1}.100\% \tag{47}$$

sendo:

$DIT_h\%$ é a distorção harmônica individual de tensão de ordem *h*;

V_h é o valor eficaz do harmônico de ordem *h* da tensão;

V_1 é o valor eficaz da componente fundamental da tensão.

$$DTT\% = \frac{100}{V_1}\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{máx}} V_h^2} \tag{48}$$

sendo:

DTT% é a distorção harmônica total de tensão;

h indica a ordem da componente harmônica;

$h_{máx}$ indica a ordem da maior componente harmônica considerada.

De acordo com o Módulo 8 do PRODIST, o valor de $h_{máx}$ dependerá das características do instrumento de medição de harmônicos, ou seja, até qual ordem de componente harmônicos esse instrumento conseguirá medir. Neste trabalho serão considerados componentes harmônicos até os da 50ª ordem.

Comparando-se a Equação (48) com a Equação (32) que apresenta a Distorção Harmônica Total de tensão - THD_v, observa-se que elas são praticamente iguais, apenas com uma sutil diferença. A *DTT%* considera os componentes harmônicos a partir de seu 2º harmônico ($h=2$), enquanto que a THD_v considera os harmônicos a partir dos harmônicos maiores que 1 ($h>1$). Desta diferença pode-se inferir que a *DTT%* não considera os efeitos dos interharmônicos, enquanto que a THD_v os considera.

Outro ponto a ser destacado na terminologia utilizada no PRODIST é que os valores limites apresentados para a *DTT%* são também individualizados para suas componentes pares e ímpares não múltiplas de 3 (três) e para suas componentes múltiplas de 3 (três).

As Equações (49), (50) e (51), que são derivadas da Equação (48) apresentam esses valores individualizados para a *DTT%*.

$$DTT_p\% = \frac{100}{V_1}\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{pmáx}} V_h^2} \tag{49}$$

sendo:

$DTT_p\%$ é a distorção harmônica total de tensão para as componentes pares, não múltiplas de 3;

$h_{pmáx}$ indica a ordem da maior componente harmônica par, não múltipla de 3.

$$DTT_i\% = \frac{100}{V_1}\sqrt{\sum_{h=5}^{h_{imáx}} V_h^2} \tag{50}$$

sendo:

$DTT_i\%$ é a distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares, não múltiplas de 3;

$h_{imáx}$ indica a ordem da maior componente harmônica ímpar, não múltipla de 3.

$$DTT_3\% = \frac{100}{V_1}\sqrt{\sum_{h=3}^{h_{3máx}} V_h^2} \tag{51}$$

sendo:

$DTT_3\%$ é a distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3;

$h_{3máx}$ indica a ordem da maior componente harmônica múltipla de 3.

Definidos os indicadores, a Tabela 12 apresenta os valores dos limites máximos para as distorções harmônicas de tensão a serem observados em sistemas de distribuição.

Tabela 12 – Limites das Distorções Harmônicas Totais (em % da tensão fundamental), conforme a ANEEL – PRODIST Módulo 8

Indicador	**Tensão Nominal (V_n)**		
	$V_n \leq 1{,}0$ kV	**1,0 kV < V_n < 69 kV**	**69 kV ≤ V_n < 230 kV**
DTT95%	10,0 %	8,0 %	5,0 %
DTT_p95%	2,5 %	2,0 %	1,0 %
DTT_i95%	7,5 %	6,0 %	4,0 %
$DTT_3$95%	6,5 %	5,0 %	3,0 %

Fonte: ANEEL - Módulo 8, 2018

Como pode ser observado nesta tabela, são apresentados limites para três níveis de tensão do sistema elétrico, e também que são propostos valores distintos para a distorção total, para harmônicos pares e ímpares não múltiplos de 3, e para os múltiplos de 3.

Neste trabalho são analisados com especial atenção os limites para distorções harmônicas totais propostos pela ANEEL − PRODIST Módulo 8 apresentados na Tabela 12.

2.2.4 Considerações sobre as Referências Normativas

A abordagem das normas da série IEC 61000 difere ligeiramente dos procedimentos da IEEE 519 (e também dos preconizados pela *ANEEL*) na medida em que a *IEC* considera também a contribuição harmônica de futuros consumidores do sistema. Isto é feito pela *IEC* através da apresentação de dois critérios para o estabelecimento de limites para as distorções harmônicas, que são "compatibilidade" e "planejamento" (DUGAN, et al., 2003). O IEEE e ANEEL consideram apenas os níveis para compatibilidade em suas publicações.

Os limites estabelecidos pelo critério da compatibilidade são aplicados aos consumidores existentes, conectados ao sistema elétrico em baixa tensão (até 1 kV) ou em média tensão (entre 1 kV e 35 kV), e referem-se ao nível de compatibilidade entre o equipamento (ou unidade consumidora) e o sistema elétrico que lhe fornece energia. A Tabela 7 apresenta um exemplo de limites de compatibilidade preconizados pela *IEC*. O nível de compatibilidade é geralmente estabelecido empiricamente, e objetiva assegurar que um equipamento (ou unidade consumidora) seja compatível (não irá causar problemas) com o sistema elétrico supridor na maior parte do tempo, geralmente com base no nível de probabilidade de 95%, ou seja, em 95% do tempo a compatibilidade deverá ser alcançada.

O critério de planejamento refere-se a critérios de projeto do sistema elétrico, normalmente adotados pelas distribuidoras de energia e não pelas unidades consumidoras. Portanto, são aplicados a trechos do sistema elétrico com níveis de tensão mais elevados, a partir da média tensão (entre 1 kV e 35 kV). Os níveis estabelecidos pelo critério de Planejamento são mais rigorosos que os níveis de Compatibilidade do ponto de vista do sistema elétrico e das empresas distribuidoras. Em outras palavras, por serem aplicáveis a projetos de sistemas elétricos, eles impõem que tais sistemas possam suportar maiores distorções harmônicas se comparados àquelas permitidas de serem produzidas pelas futuras unidades consumidoras.

A Tabela 13 apresenta de forma sintética as diferenças de abordagem entre as normas da serie IEC 61000 e a IEEE 519, reiterando que as publicações da *ANEEL* seguem a abordagem do *IEEE* (ANEEL - Módulo 8, 2018).

Observa-se na Tabela 13 que a *IEC* apresenta uma abordagem mais voltada para os equipamentos, enquanto o *IEEE* apresenta uma abordagem mais voltada para o sistema elétrico. Entretanto, conforme (DUGAN, et al., 2003), a norma IEC 61000-3-6 apresenta informações e considerações técnicas importantes também para o sistema elétrico. Uma delas é a discussão sobre as impedâncias naturais presentes no sistema de elétrico na verificação da compatibilidade desse sistema com a carga a ser conectada nele.

Tabela 13 – Comparação entre Abordagens da *IEC* e do *IEEE* sobre Limites para Harmônicos

Série IEC 61000	**IEEE 519**
1. As normas da *IEC* estabelecem limites para a distorção de corrente individual dos equipamentos	Os limites recomendados pelo *IEEE* referem-se à distorção de corrente das unidades consumidoras
2. A responsabilidade cabe aos fabricantes de equipamentos que produzem harmônicos	A responsabilidade cabe ao consumidor em decidir por instalar filtros ou adquirir melhores equipamentos
3. As normas da *IEC* destinam-se principalmente a pequenos consumidores que não tem os meios para escolher entre as opções para mitigação do problema	Esta publicação do *IEEE* tem por objetivo regular a conexão de grandes unidades consumidoras

Fonte: SINGH, 2009

Para possibilitar uma análise comparativa entre os valores preconizados como limites de distorção harmônica da tensão no *PAC* pelos instrumentos normativos da *IEC*, do *IEEE* e da *ANEEL*, apresentam-se tais valores na Tabela 14 e seus respectivos níveis de tensão.

Observa-se inicialmente que as faixas de níveis de tensão consideradas são diferentes entre si. Para a *IEC* a primeira faixa (menor) do nível de tensão no *PAC* vai até 35 kV e a segunda faixa é para tensão maior ou igual a 35 kV. Já para o *IEEE* e para a *ANEEL*, a primeira faixa vai até 1 kV, e a segunda de 1 kV até 69 kV. Para a *ANEEL*, a terceira faixa (e última) é maior ou igual a 69 kV, sendo que para o *IEEE* essa faixa vai de 69 kV até 161 kV. E para o *IEEE* existe uma quarta faixa de tensão no *PAC*, que é maior ou igual a 161 kV.

Tabela 14 – Limites de Compatibilidade para a *THD* de Tensão no *PAC* Estabelecidos por Diferentes Instrumentos Normativos

Instrumento Normativo		***THD_V por Nível de Tensão no PAC***			
		1kV	35kV	69kV	161kV
IEC 61000	classe 1*	5,0 %	6,5 %**		
	classe 2*	8,0 %			
	classe 3*	10,0 %			
IEEE 519		8,0 %	5,0 %	2,5 %	1,5 %
ANEEL – PRODIST Módulo 8		10,0 %	8,0 %	5,0 %	

* Conforme norma IEC 61000-2-4. Adotado para instalações industriais e hospitalares.
** Refere-se ao limite de planejamento, pois a IEC não apresenta limite de compatibilidade para este nível de tensão.

Fonte: O Próprio Autor

Outro ponto a ser destacado na Tabela 14 é que a *IEC* subdivide os valores admitidos para a THD_V no *PAC* em três classes, conforme a norma IEC 61000-2-4. Essas classes refe-

rem-se ao tipo de cargas presentes nos sistemas elétricos, conforme já apresentado neste trabalho, e que resumidamente são:

- classe 1: fornecimento de energia a cargas eletrônicas sensíveis a harmônicos.
- classe 2: cargas normais, cujos limites são adotados também para as redes públicas.
- classe 3: cargas com grande presença de harmônicos.

O *IEEE* e a *ANEEL* não fazem essa distinção em classes, sendo seus valores considerados, neste trabalho, como valores equivalentes à classe 2 da *IEC*.

Destaca-se ainda que para a faixa de tensão acima de 35 kV a *IEC* apresenta valor relativo ao critério de Planejamento, sendo todos os demais valores apresentados na Tabela 14 (para a *IEC*, *IEEE* e *ANEEL*) relativos e equivalentes ao critério de Compatibilidade.

De forma geral, pode-se observar na Tabela 14 que os limites impostos pela *ANEEL* são menos restritivos que os da *IEC* e do *IEEE*. E que, para a menor faixa de tensão, o valor proposto pelo *IEEE* equivale ao da classe 2 da *IEC*. E ainda que, para a faixa de tensão no *PAC* acima de 35 kV não é possível uma análise comparativa porque os critérios são diferentes, sendo de Planejamento para a *IEC* e de Compatibilidade para o *IEEE* e para a *ANEEL*.

Considerando que os equipamentos hospitalares analisados neste trabalho são ligados em tensões abaixo de 1 kV, e que as instalações hospitalares possuem equipamentos eletrônicos sensíveis a harmônicos (BUZDUGAN, BALAN, MURESAN, 2010), foi adotado como limite admissível para a THD_V o valor de 5 %. Além de atender aos três instrumentos normativos apresentados na Tabela 14, este valor trará segurança operacional a uma instalação elétrica hospitalar, pois equivale ao padrão mais restritivo preconizado pelas normas e padrões analisados.

2.3 Instalações Elétricas Hospitalares e Transformadores

De forma geral, e como abordagem inicial, as instalações elétricas de um hospital poderão ser tratadas como instalações comerciais e/ou industriais, sujeitas aos mesmos procedimentos de engenharia para as etapas de projeto e de operação.

A normatização dos procedimentos de engenharia para instalações internas às unidades consumidoras é feita no Brasil pela *ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas*.

2.3.1 Instalações Elétricas Hospitalares

As normas gerais para instalações elétricas de baixa e média tensão publicadas pela *ABNT* são:

- NBR 5410:2004 – Instalações Elétricas de Baixa Tensão;
- NBR 14039:2005 – Instalações Elétricas de Média Tensão de 1,0 kV a 36,2 kV.

A NBR 5410 tem por objetivo estabelecer as condições que devem satisfazer as instalações elétricas de baixa tensão (inferiores a 1 kV) a fim de garantir a segurança de pessoas e animais, o funcionamento adequado da instalação e a conservação dos bens. Sua aplicação se dá às instalações elétricas de edificações, qualquer que seja seu uso (residencial, comercial, industrial, de serviços, etc.) (NBR 5410, 2004).

Portanto, essa norma deverá ser observada no Brasil por toda e qualquer instalação cuja tensão seja inferior a 1 kV, independente do fornecimento ser em baixa tensão ou não.

Quanto aos harmônicos, essa norma apresenta alguns critérios para o dimensionamento de componentes das instalações elétricas nas quais os mesmos estejam presentes. Como exemplos, menciona-se:

- Em seu item 4.1.12 existe uma observação para que, na seleção de componentes das instalações, deverá ser considerada a prevenção de efeitos danosos ou indesejados dos harmônicos;
- Na tabela 10, essa norma menciona como referência de valores limites de distorção harmônica os mesmos apresentados por normas da série IEC 61000;
- Em seu item 4.2.7.1 menciona que devem ser tomadas medidas apropriadas quando quaisquer características dos componentes da instalação forem suscetíveis de produzir efeitos prejudiciais em outros componentes, em outros serviços, ou ao bom funcionamento da fonte de alimentação, citando, dentre essas características produtoras de efeitos prejudiciais, as correntes harmônicas;
- Em seu item 6.2.5.6 menciona que em circuitos trifásicos na presença de componentes harmônicas múltiplas de 3 (três) nas correntes, com *THDi* maiores que 15% (quinze porcento), o condutor neutro deverá ser considerado como um condutor carregado, ou seja, deverá ter sua seção igual à dos condutores fase;
- Em seu item 6.2.6.2.5 menciona que em circuitos trifásicos na presença de componentes harmônicos múltiplos de 3 (três) nas correntes, com *THDi* supe-

riores a 33% (trinta e três por cento), a seção do condutor neutro poderá ser superior à seção dos condutores fase. O anexo F da norma apresenta detalhes sobre o dimensionamento do condutor neutro nessas condições.

Assim, conforme definido nos objetivos da norma, seu enfoque está na segurança da instalação e no correto dimensionamento de seus componentes, citando brevemente que cuidados deverão ser tomados para assegurar "o bom funcionamento da fonte de alimentação", porém sem mencionar informações sobre quais seriam esses cuidados.

Além da norma NBR 5410, a *ABNT* publicou a NBR 14039 que trata de instalações de média tensão.

A NBR 14039 tem por objetivo estabelecer critérios para projeto e execução de instalações com tensão nominal entre 1,0 kV e 36,2 kV, de modo a garantir segurança e continuidade de serviço, constituindo-se em exigências mínimas para não prejudicar (ou perturbar) as instalações vizinhas ou causar danos a pessoas e animais, à conservação dos bens e do meio ambiente (NBR 14039, 2005).

Considerando que as instalações elétricas hospitalares normalmente são conectadas à rede pública de distribuição de energia elétrica com seu nível de tensão no *PAC* nesta faixa (entre 1,0 kV e 36,2 kV), serão tratados neste trabalho alguns quesitos contidos nesta norma que, mesmo de forma indireta, relacionam-se com instalações hospitalares e/ou harmônicos.

Esta norma, em seu item 4.2.1 que se refere à potência de alimentação, preconiza:

- Em seu item 4.2.1.1, que na determinação da potência de alimentação de uma instalação (ou de parte dela), devem ser consideradas as potências nominais de todos os equipamentos a serem alimentados, e também a possibilidade de não simultaneidade de funcionamento desses equipamentos;
- Em seu item 4.2.1.2, que a carga a ser considerada para um equipamento será sua potência nominal absorvida, dada pelo fabricante ou calculada a partir da tensão nominal, da corrente nominal e do fator de potência.

A NBR 14039 não se refere diretamente a harmônicos, porém os menciona de forma indireta, mais especificamente em seu item 4.3.1.9 que trata de influências eletromagnéticas nas instalações, e dentre elas as "correntes parasitas" (ou ainda "correntes com altas frequências"), preconizando que as mesmas devem ser consideradas na concepção e na execução das

instalações elétricas. Entretanto, não é mencionada nenhuma indicação de como isso deverá ser feito.

Além dessas duas normas gerais para instalações elétricas publicadas pela *ABNT* e que são aplicáveis a instalações elétricas hospitalares, existem outras duas que também deverão ser observadas, sendo uma de aplicação também indireta e outra de aplicação direta, quais sejam:

- NBR 13570:1996 – Instalações Elétricas em Locais de Afluência de Público – Requisitos Específicos;
- NBR 13534:2008 – Instalações Elétricas de Baixa Tensão – Requisitos Específicos para Instalações em Estabelecimentos Assistências de Saúde.

A NBR 13570 tem por objetivo fixar os requisitos exigíveis nas instalações elétricas em locais de afluência de público, a fim de garantir o seu funcionamento adequado, a segurança de pessoas e animais domésticos e a conservação dos bens, locais esses com capacidade de no mínimo 50 (cinquenta) pessoas (NBR 13570, 1996).

Esta norma não apresenta qualquer indicação sobre harmônicos ou sobre a qualidade da energia, e trata basicamente dos dispositivos que constituem as instalações elétricas por ela abrangidas, com especial destaque para o condutores elétricos os quais "...devem ser livres de halogênios e com baixa emissão de fumaça e gases tóxicos e corrosivos" (NBR 13570, 1996).

Já a NBR 13534 é bem específica para as instalações hospitalares e tem por objetivo garantir a segurança dos pacientes e dos profissionais de saúde, tendo como base o disposto na norma NBR 5410, porém com o acréscimo de pontos necessários para os hospitais (NBR 13534, 2008).

Esta norma também não traz indicação direta sobre harmônicos, mencionando-os indiretamente em seu item 6.17 onde recomenda "cuidados preventivos contra as interferências eletromagnéticas", mencionando a norma da NBR IEC 60601-1-2 como referência.

Essa norma mencionada, a NBR IEC 60601-1-2, em sua edição mais recente de 2017, especifica requisitos gerais e ensaios para segurança básica de equipamentos médicos quanto a perturbações eletromagnéticas, incluindo harmônicos, e deverá ser observada pelos fabricantes dos equipamentos (NBR IEC 60601-1-2, 2017), não sendo assim objeto de análise deste trabalho, cujo foco é nas instalações elétricas hospitalares e não na fabricação de equipamentos eletromédicos.

Voltando à NBR 13534, que concentra seus objetivos nas instalações elétricas hospitalares, serão apresentadas brevemente suas características principais.

Inicialmente, classifica os ambientes no interior dos hospitais em três grupos:

- Grupo 0: Local médico destinado a utilização de equipamento eletromédico que, em uso normal, não entre necessariamente em contato físico com o paciente. Exemplos: posto de enfermagem, sala de prescrição médica, sala de apoio, entre outros;
- Grupo 1: Local médico destinado a utilização de equipamento eletromédico que entre em contato físico com o paciente, sendo este uso circunscrito a partes externas do corpo, ou partes internas que não aquelas tratadas no grupo 2. Tais como: sala de reidratação (oral e intravenosa), sala de recuperação pós-anestésica, sala de coleta de sangue, etc.;
- Grupo 2: Local médico destinado a utilização de equipamento eletromédico que entre em contato físico com o paciente, em procedimentos intracardíados, cirúrgicos, de sustentação de vida de pacientes e outras aplicações em que a descontinuidade da alimentação elétrica pode resultar em morte. Como exemplos citam-se: sala de cirurgia, quartos de unidades de tratamento intensivo, sala de procedimento de hemodinâmica, entre outros.

Para cada um desses grupos são apresentados diversos requisitos de segurança, e dentre eles os requisitos de proteção contra choques elétricos e de continuidade de fornecimento de energia.

Por exemplo, no quesito proteção contra choques elétricos, a NBR 13534 traz textualmente:

- Os circuitos de tomadas que sirvam locais do Grupo 1 devem ser protegidos por dispositivos diferenciais residuais (dispositivos DR) com corrente diferencial-residual nominal de atuação de no máximo 30 mA;
- Em locais do Grupo 2 a proteção por seccionamento automático da alimentação usando dispositivos DR com corrente diferencial-residual de no máximo 30 mA deve se restringir aos circuitos de alimentação de mesas cirúrgicas e para equipamentos de raio X.

Para o requisito continuidade de fornecimento de energia elétrica (chamada na norma por "alimentação de segurança"), a NBR 13534:2008 classifica os equipamentos hospitalares em 3 (três) classes, textualmente da seguinte forma:

- Alimentação de segurança com tempo de comutação menor ou igual a 0,5 segundo

  Ocorrendo, no quadro de distribuição, falta de tensão em um ou mais condutores, uma fonte de segurança deve restabelecer, em 0,5 segundo no máximo, a alimentação dos focos cirúrgicos e outras fontes de luz essenciais, como, por exemplo, as de endoscopia, e deve ser capaz de manter essa alimentação por 3 horas no mínimo;

- Alimentação de segurança com tempo de comutação menor ou igual a 15 segundos

  Ocorrendo, em um ou mais condutores do quadro de distribuição principal dos serviços de segurança, uma queda de tensão superior a 10 % da tensão nominal, por um tempo superior a 3 segundos, os circuitos de iluminação de segurança e outros serviços (tais como exaustores de fumaça, alarme de incêndio, etc.) devem ter sua alimentação restabelecida por uma fonte de segurança em até 15 segundos no máximo, sendo que esta fonte deve ser capaz de manter a alimentação por 24 h no mínimo;

- Alimentação de segurança com tempo de comutação maior que 15 segundos

  Outros equipamentos, que não aqueles citados na classe ≤ 15 segundos e necessários a continuidade dos serviços do estabelecimento assistencial de saúde, podem ser conectados manual ou automaticamente a uma fonte de segurança capaz de manter sua alimentação elétrica por um período mínimo de 24 h. Podem ser mencionados como exemplos: equipamentos de esterilização, equipamentos de refrigeração, etc.

Diante das normas brasileiras para instalações elétricas no interior das instalações hospitalares, depreende-se que as mesmas enfatizam sua segurança e operacionalidade no sentido de integridade física de seus componentes, continuidade no fornecimento de energia e segurança das pessoas que interagem com tais instalações. Quanto ao quesito qualidade da

energia elétrica fornecida, e mais especificamente quanto às distorções harmônicas, as mesmas se limitam a mencionar a necessidade dos gestores das instalações tomarem cuidado, porém não especificam quais seriam esses cuidados. Assim, esse trabalho tem por objetivo avaliar com mais detalhes as distorções harmônicas produzidas no interior das instalações hospitalares, analisando seus impactos nessas instalações e possíveis soluções mitigadoras, contribuindo para o esclarecimento dos cuidados necessários para essas instalações.

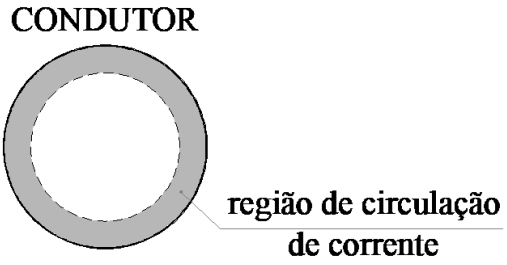
2.3.2 Transformadores

Considerando que as instalações hospitalares são normalmente conectadas no *PAC* com nível de tensão superiores as 1 kV (no Brasil, normalmente na classe de tensão 15 kV), e que os equipamentos médicos são energizados em tensões abaixo de 1 kV, no interior das unidades consumidoras (hospitais) são instalados transformadores, cujo dimensionamento, instalação e manutenção são de responsabilidade dos gestores dessas instalações.

Transformadores são equipamentos projetados para operar preferencialmente com cargas lineares. A principal consequência para os transformadores ao alimentarem cargas não lineares será o aumento de suas perdas, pois os harmônicos produzem deformação nos campos magnéticos no interior dos transformadores e aumentam as perdas em seus enrolamentos por efeito pelicular (TAHER, KAMEL, ALI, 2016).

O "efeito pelicular" (ou *skin effect* em inglês) caracteriza-se pela tendência das correntes, no interior dos condutores elétricos, circularem pela superfície dos mesmos à medida que sua frequência aumenta (vide Figura 18). E como resultado do efeito pelicular, ocorre o aumento da resistência do condutor, pois tem reduzida sua área para a efetiva circulação de corrente. O aumento dessa resistência provoca um aumento nas perdas nos enrolamentos dos transformadores.

Figura 18 – Efeito pelicular (ou *skin effect*) em um condutor elétrico



Fonte: O Próprio Autor, 2019

Perdas mais elevadas significam que mais calor é gerado no interior do transformador, de forma que sua temperatura de operação aumenta, resultando em deterioração de sua isolação e consequente redução de sua vida útil.

Para se evitar danos nos transformadores oriundos da presença de harmônicos, são apresentadas duas alternativas: i) reduzir a carga máxima do transformador, utilizando-se de fatores de redução dependentes do espectro harmônico das correntes de carga; ou ii) adotar cuidados adicionais no projeto de transformadores que sabidamente irão trabalhar em condições de não linearidade das cargas (DESMET, DELAERE, 2005).

O ponto em comum nessas duas alternativas é o dimensionamento do transformador, sendo apresentados a seguir os critérios clássicos para o dimensionamento de transformadores alimentando cargas lineares e cargas não lineares.

Destaca-se ainda um quesito característico dos transformadores denominado Regulação de Tensão (R_T), que se refere à variação de tensão no secundário do transformador entre as condições a vazio (V_{2N}) e em plena carga (V_2). A Regulação de Tensão é expressa matematicamente pela Equação (52), e considera que o mesmo opera apenas com a frequência fundamental do sistema elétrico (OLIVEIRA, COGO, ABREU, 1984; KOSOW, 1985).

$$R_T = \frac{V_{2N} - V_2}{V_{2N}} . 100\% \tag{52}$$

2.3.2.1 Dimensionamento para Cargas Lineares

O principal critério de dimensionamento de transformadores alimentando cargas lineares constitui-se em que a potência nominal do transformador seja maior que a potência nominal das cargas cuja operação seja simultânea (NBR 14039, 2005).

Esse critério também consta na norma NBR 5356-1 publicada pela *ABNT*, mais especificamente em seu item 5.1 que trata de sua potência nominal, onde consta que:

> "O transformador deve ser capaz de fornecer, em regime contínuo, a potência nominal nas condições normais de funcionamento e sem ultrapassar os limites de elevação de temperatura a ele especificados".

Essa mesma norma especifica como "condições normais de funcionamento" aquelas nas quais a forma de onda da tensão de alimentação for praticamente senoidal ($THD_V \leq 5$ %) e a corrente de carga for também praticamente senoidal ($THDi \leq 5$ %) (NBR 5356-1, 2007).

Já a norma NBR 5356-8, também da *ABNT*, que se constitui em um guia de aplicação para transformadores de potência, ao tratar de potência nominal, em seu item 10.4.5, traz os seguintes pontos:

- Deve ser notado que a corrente nominal e a potência nominal são definidas para regime contínuo;
- A potência nominal para regime contínuo é usualmente utilizada como referência para a impedância, perdas, e à elevação de temperatura;
- A carga real, por outro lado, é usualmente variável ao longo do dia e do ano;
- É possível ocorrer um carregamento temporário acima da potência nominal, o que pode afetar a faixa de regulação de tensão exigida para o transformador.

E traz também que a forma de como converter uma carga variável no tempo para uma carga equivalente em regime contínuo é tratada por outra norma (NBR 5356-8, 2017).

Essa outra norma é a NBR 5356-**7**, também publicada pela *ABNT*. Nela são apresentados diversos fatores a serem considerados quando se deseja impor um carregamento emergência (acima da potência nominal) aos transformadores, sejam estes de curta ou de longa duração, e quais suas consequências sobre a vida útil dos transformadores (NBR 5356-7, 2017).

Como pode ser observado nessas normas e também pela análise clássica de engenharia, o dimensionamento dos transformadores é feito para regime contínuo, considerando que sua potência nominal seja superior à potência das cargas por ele alimentadas, admitindo-se uma sobrecarga aos transformadores por períodos curtos, apesar dessas situações serem indesejáveis.

Cabe ainda destacar que a potência dos transformadores é expressa em sua "potência aparente", cuja unidade de medida é o *kVA* (quilovolt-ampere) (NBR 5440, 2014).

Como exemplo de valores comerciais para transformadores trifásicos utilizados nas redes de distribuição de energia elétrica no Brasil, tem-se: 30 kVA, 45 kVA, 75 kVA, 112,5 kVA, 150 kVA, 225 kVA, 300 kVA, 500 kVA, 750 kVA, 1000 kVA, entre outros com capacidades maiores (WEG, 2019).

2.3.2.2 Dimensionamento para Cargas Não Lineares

Transformadores produzem fluxos magnéticos de dispersão, os quais produzem correntes parasitas em enrolamentos, núcleo e partes estruturais, resultando em aquecimentos

adicionais e indesejáveis nos transformadores, podendo comprometer sua vida útil. Esse fato é acentuado quando alimentam cargas não lineares (SANTOS, 2012).

Assim, para evitar danos precoces nesses equipamentos, são apresentados neste trabalho três fatores relacionados a transformadores operando com elevado conteúdo harmônico, assim considerado quando a *THD* na corrente das cargas seja superior a 5 % (cinco por cento).

O primeiro fator, apresentado no documento IEEE Std C57.110 (IEEE C57.110, 2008), é denominado Fator de Perda Harmônica – F_{HL} (do inglês *Harmonic Loss Factor*). O segundo deles, apresentado nas publicações UL 1561 e UL 1562 do *Underwrites Laboratories*, é denominado de *K-factor* (será mantido em inglês neste trabalho para se evitar confusão com o Fator K) (SANTOS, 2012). Neste trabalho o *K-factor* também será indicado por K_{UL}.

O *Underwrites Laboratories* (*UL*) é uma organização fundada em 1894 nos Estados Unidos da América que faz a certificação de produtos e de sua segurança, e em especial na área de eletrotécnica (UL, 2019).

E o terceiro fator, mais utilizado na Europa, e apresentado pela norma EN 50464-3 é o Fator K (DESMET, DELAERE, 2005; EN 50464-3, 2007). Neste trabalho o Fator K será indicado também por K_{EN}.

Esses três fatores são apresentados com um pouco mais de detalhes nas seções que se seguem.

2.3.2.2.1 Fator de Perda Harmônica

O Fator de Perda Harmônica – F_{HL} é um fator de proporcionalidade usado para avaliar as perdas provocadas por correntes parasitas nos enrolamentos dos transformadores (e que produzem aquecimento) oriundas das correntes harmônicas das cargas alimentadas por esses transformadores.

Matematicamente o Fator de Perda Harmônica – F_{HL} é dado pela Equação (53) (IEEE C57.110, 2008).

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{máx}} \left[\frac{I_h}{I_1}\right]^2 . h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{máx}} \left[\frac{I_h}{I_1}\right]^2} \tag{53}$$

sendo:

F_{HL} é o Fator de Perda Harmônica nos enrolamentos por correntes parasitas;

h indica a ordem da componente harmônica;

$h_{máx}$ é a ordem da maior componente harmônica significativa presente na corrente;
I_h é o valor eficaz da corrente harmônica de ordem h (em *amperes*);
I_1 é o valor eficaz da corrente fundamental (em *amperes*).

Para situações nas quais apenas a componente fundamental esteja presente (h = 1), a Equação (53) resulta em F_{HL} = 1,0.

Além das perdas provocadas por correntes parasitas nos enrolamentos, existem outros tipos de perdas nos transformadores e a publicação IEEE C57.110 os indica como Fator de Perdas Harmônicas para Outras Perdas Dispersas – $F_{HL\text{-}STR}$ (do inglês *Harmonic Loss Factor for Others Stray Losses*), também chamadas de perdas fora dos enrolamentos. Porém esse fator não será objeto de análise neste trabalho. Para mais detalhes vide (IEEE C57.110, 2008).

Portanto, para o F_{HL}, este trabalho focará apenas nas perdas provocadas por harmônicos nos enrolamentos dos transformadores, desconsiderando as demais perdas, e assumindo um posicionamento mais conservador, ou seja, as perdas totais provocadas por harmônicos nos transformadores tenderão a ser maiores que as apresentadas neste trabalho, especialmente quando da análise de transformadores dotados de óleo isolante.

2.3.2.2.2 K-factor

O *K-factor* (K_{UL}) é uma classificação aplicada a transformadores que alimentam cargas não lineares, e é definido matematicamente pela Equação (54) (UL 1561, 2005; IEEE C57.110, 2008).

$$K_{UL} = \sum_{h=1}^{\infty} I_{h(pu)}^2 \,.\, h^2 \tag{54}$$

sendo:

$I_{h(pu)}$ é a corrente harmônica de ordem h expressa em *pu*;
h indica a ordem da componente harmônica.

Considerando que o valor em *pu* (por unidade) expressa seu valor relativo (porcentual) à corrente nominal do transformador (OLIVEIRA, et al., 1996), a definição do *K-factor* pode ser expressa matematicamente pela Equação (55).

$$K_{UL} = \sum_{h=1}^{h_{máx}} \left[\frac{I_h}{I_R}\right]^2 \,.\, h^2 \tag{55}$$

sendo:

I_h é a corrente harmônica de ordem h em valor eficaz, expressa em *amperes*;
I_R é a corrente nominal do transformador, em valor eficaz, expressa em *amperes*;
h indica a ordem da componente harmônica;
$h_{máx}$ é a ordem da maior componente harmônica significativa presente na corrente.

Para situações nas quais apenas a componente fundamental esteja presente (h = 1), e que o valor dessa corrente seja numericamente igual ao valor da corrente nominal do transformador, a Equação (55) resulta em *K-factor* = 1,0. Portanto, o *K-factor* considera não apenas o conteúdo harmônico presente na corrente de carga, mas também o valor relativo entre a corrente de carga e a corrente nominal do transformador. Em outras palavras, para uma mesma corrente de carga, o valor do *K-factor* será diferente para transformadores de diferentes potências nominais.

Os fabricantes de transformadores para serem utilizados com cargas não lineares utilizam alguns valores comuns para o *K-factor*, sendo comumente utilizadas as seguintes classificações (SCHWANZ, BOLLEN, LARSSON, 2016):

- *K-factor* = 4: projetado para fornecer a potência nominal do transformador (em kVA), sem superaquecimento, para uma carga com corrente fundamental próxima à nominal do transformador, mais 16% da fundamental como 3º harmônico, 10% com 5º harmônico, 7% como 7º harmônico e 5,5% com 9º harmônico;
- *K-factor* = 9: projetado para suportar 163% do conteúdo harmônico do carregamento de um transformador K_{UL} = 4;
- *K-factor* = 13: projetado para suportar 200% do conteúdo harmônico do carregamento de um transformador K_{UL} = 4;
- *K-factor* = 20, *K-factor* = 30 e *K-factor* = 40 projetados para suportar quantidades maiores de conteúdo harmônico na carga, sem superaquecimento.

Portanto, o *K-factor* é determinado pelo fabricante do transformador, adotando cuidados especiais desde o projeto, tais como melhorando a blindagem eletrostática entre o primário e o secundário; melhorando a qualidade das chapas de aço silício do núcleo; sobredimensionando o neutro quando de ligação em estrela; entre outras (TRAFOMIL, 2019).

Como consequência da própria definição do *K-factor*, sua determinação deverá ser feita quando do projeto e implantação das instalações elétricas, não sendo possível alterá-lo em situações de aumento da carga em transformadores existentes.

2.3.2.2.3 Fator K

O Fator K é apresentado pela norma europeia EN 50464-3. Inicialmente ela apresenta o conceito de "potência equivalente", e em seguida sua relação com o Fator K (K_{EN}).

A "potência equivalente" é aquela demandada do transformador por uma corrente senoidal pura que produz as mesmas perdas que as provocadas por correntes distorcidas (com harmônicos). Resulta da potência demandada pela corrente eficaz de uma onda distorcida (aqui chamada de "potência distorcida") multiplicada pelo Fator K (EN 50464-3, 2007).

As Equações (56) e (57) exemplificam matematicamente a "potência equivalente" e a "potência distorcida" para um transformador trifásico com secundário em estrela.

$$S_{eq} = \sqrt{3}.V.I_{sen} \tag{56}$$

$$S_{dist} = \sqrt{3}.V.I_{dist} \tag{57}$$

sendo:

S_{eq} é a "potência equivalente", expressa em VA (*volt-ampere*);
S_{dist} é a "potência distorcida", expressa em VA (*volt-ampere*);
V é a tensão entre fases, em *volts*;
I_{sen} é o valor eficaz da corrente equivalente, expressa em *amperes*;
I_{dist} é o valor eficaz da corrente distorcida (fundamental mais todos os harmônicos), expressa em *amperes*.

E o Fator K (K_{EN}) relaciona-se com as potências "equivalente" e "distorcida" conforme apresentado nas Equações (58) e (59).

$$S_{eq} = S_{dist}.K_{EN} \tag{58}$$

$$K_{EN} = \frac{S_{eq}}{S_{dist}} \tag{59}$$

Após definir “potência equivalente” e de apresentar sua relação com o Fator K, a norma recomenda que a potência nominal do transformador a ser utilizado deve ser igual ou superior à “potência equivalente”.

E como corolário dessa recomendação, para o caso de um transformador que já esteja em serviço e que deverá receber novas cargas com correntes harmônicas, deverá ser observado um fator de redução de $1/K_{EN}$ sobre sua potência nominal (EN 50464-3, 2007).

Por exemplo, seja um transformador de 300 kVA que já esteja em operação, ao qual serão adicionadas novas cargas com correntes harmônicas cujo Fator K final (resultante da cargas já existentes e das novas cargas) seja K_{EN} = 1,2. Para este caso, a máxima potência de cargas que esse transformador deverá alimentar será de 250 kVA (300 kVA x 1/1,2).

Voltando à norma europeia EN 50464-3, ela então apresentada a fórmula de cálculo do Fator K, conforme mostrado na Equação (60), com o destaque de que as correntes referem-se aos valores eficazes da corrente de carga do transformador.

$$K_{EN} = \left[1 + \frac{e}{1+e}.\left(\frac{I_1}{I}\right)^2.\sum_{h=2}^{h=h_{máx}}\left(h^q.\left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2\right)\right]^{\frac{1}{2}} \tag{60}$$

sendo:

e indica a relação entre perdas por correntes parasitas na frequência fundamental e as perdas ôhmicas, ambas na temperatura de referência;(1)

h indica a ordem da componente harmônica;

$h_{máx}$ é a ordem da maior componente harmônica significativa presente na corrente;

I_1 é o valor eficaz da corrente em sua componente fundamental;

I é o valor eficaz da corrente total (fundamental mais harmônicas);

q é uma constante;(2)

I_h é o valor eficaz da corrente em sua componente de ordem h.

Notas:

(1) O valor de e deverá ser fornecido pelo fabricante e, caso não esteja disponível, é provável que esteja entre 0,05 e 0,1 (DESMET, DELAERE, 2005).

(2) O expoente q depende do tipo de enrolamentos e da frequência. No entanto, como uma aproximação e como orientação, os seguintes valores constantes podem ser usados:

- 1,7 para transformadores com condutores de seção circular ou retangular nos enrolamentos de baixa e alta tensão;
- 1,5 para transformadores com enrolamentos de baixa tensão laminados.

Outros valores, baseados em medições e possivelmente dependentes da frequência, podem ser aplicados, de acordo com informações do fabricante do transformador (EN 50464-3, 2007).

2.3.2.3 Considerações sobre Transformadores

Os transformadores são normalmente dimensionados para trabalharem com cargas lineares e, quando da presença de carga não lineares se faz necessário uma análise criteriosa sobre seu dimensionamento. Nesse sentido foram apresentados alguns fatores que consideram a distorção harmônica presente nas correntes de cargas não lineares.

Serão destacados a seguir alguns pontos já apresentados e que são importantes para este trabalho:

a) O critério de dimensionamento clássico para transformadores é que sua potência nominal (expressa em quilovolt-ampere – kVA) deve ser igual ou superior à soma das potências nominais das cargas (também em kVA) que operam simultaneamente;
b) Pela análise das Equações (53) e (55), observa-se que a diferença entre o Fator de Perda Harmônica (F_{HL}) e o *K-factor* (K_{UL}) está na corrente adotada como valor de base. No F_{HL} a corrente de base é a corrente fundamental da carga, enquanto no K_{UL} é a corrente nominal do transformador, ambas em valor eficaz;
c) Através de ferramentas matemáticas demonstra-se (IEEE C57.110, 2008) que a relação entre o Fator de Perda Harmônica e o *K-factor* é dada pela Equação (61);

$$K - factor = \left[\frac{\sum_{h=1}^{h=h_{máx}} I_h^2}{I_R^2}\right] . F_{HL} \tag{61}$$

sendo:

h indica a ordem da componente harmônica;
$h_{máx}$ é a ordem da maior componente harmônica significativa presente na corrente;
I_h é o valor eficaz da corrente em sua componente de ordem h;
I_R é o valor eficaz da corrente nominal do transformador.

d) O Fator de Perda Harmônica será unitário para correntes puramente senoidais;
e) O *K-factor* unitário de um transformador indica que o mesmo deverá trabalhar em sua potência nominal apenas quando todas as correntes forem senoidais, sob pena de aquecimento excessivo e redução de sua vida útil;
f) O *K-factor* pode ser utilizado para a especificação e projeto apenas de transformadores novos, pois se refere às características construtivas dos mesmos;
g) O Fator K (K_{EN}), com seu conceito de "potência equivalente", possibilita especificar transformadores destinados originalmente para cargas lineares (K_{UL} = 1,0) a

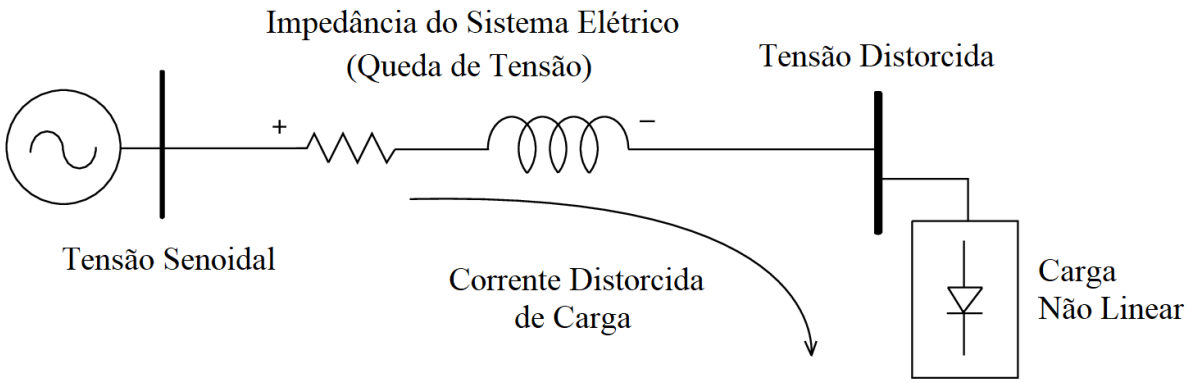
trabalharem com cargas não lineares, sendo assim um fator de redução de sua carga. E isto poderá ser feito a qualquer tempo, ou seja, quando do projeto de uma instalação nova ou quando do aumento de carga em um transformador que já esteja em serviço.

Como consideração final sobre transformadores, observa-se que os três fatores apresentados possuem seu foco voltado ao correto dimensionamento do transformador, com o objetivo de evitar seu sobreaquecimento e a redução de sua vida útil, nada mencionando sobre a qualidade de energia entregue à carga, especialmente sobre o nível de distorção harmônica da tensão, que é o foco principal deste trabalho.

2.4 O Princípio da Autoperturbação

Para se entender o princípio do que será chamado neste trabalho de "autoperturbação", será analisado inicialmente o comportamento da tensão em diversos pontos de um sistema elétrico quando o mesmo alimenta cargas não lineares e, portanto, possui correntes harmônicas em circulação. Tome-se como ilustração o diagrama apresentado na Figura 19.

Figura 19 – Correntes harmônicas que fluem através da impedância do sistema elétrico que resultam em tensões harmônicas na carga



Fonte: Adaptado pelo Autor de DUGAN, et al., 2003

Como pode ser observado na Figura 19, a fonte de alimentação do sistema elétrico possui tensão senoidal, entretanto, devido à circulação de corrente distorcida oriunda de uma carga não linear, ocorrerá queda de tensão na impedância própria do sistema elétrico, fazendo com que a tensão nas proximidades da carga seja distorcida. Cada componente harmônico da

corrente produz na impedância do sistema uma queda de tensão, o que resulta no aparecimento de um componente harmônico correspondente na tensão da carga. Portanto, o nível de distorção de tensão junto à carga dependerá da impedância do sistema elétrico e também da intensidade da corrente da carga (DUGAN, et al., 2003; NASCIMENTO, 2007).

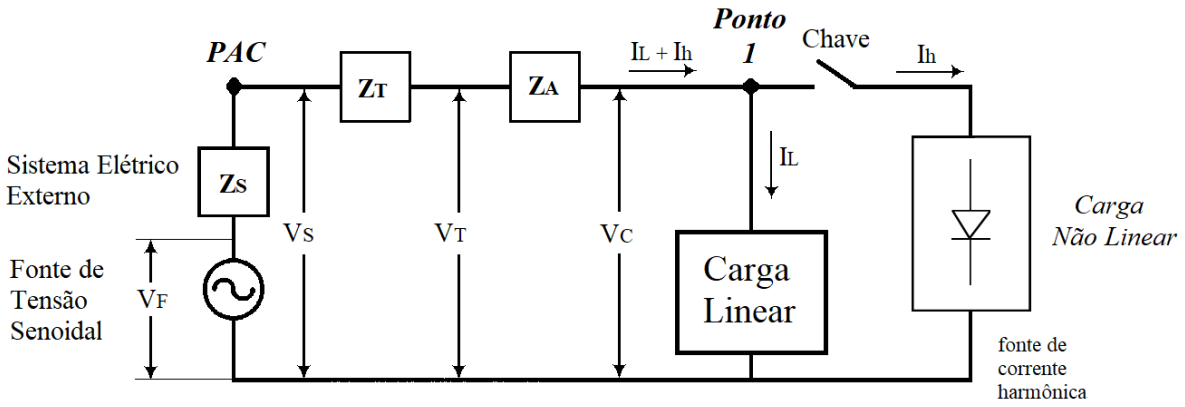
Observa-se também que a carga não tem controle direto sobre a distorção de tensão por ela provocada, pois essa distorção de tensão dependerá da impedância do sistema elétrico que a alimenta. Assim, a mesma carga colocada em dois pontos diferentes do sistema elétrico produzirá níveis diferentes de distorção de tensão no ponto em que estiver conectada. O reconhecimento desse fato é a base da divisão de responsabilidades contidas nas normas e recomendações técnicas, entre as unidades consumidoras e as empresas de distribuição de energia elétrica.

Como já apresentado neste trabalho, normalmente o controle sobre o conteúdo harmônico da corrente das cargas é de responsabilidade das unidades consumidoras, enquanto o controle do conteúdo harmônico da tensão no *PAC* é de responsabilidade das empresas de distribuição de energia. Para intermediar essas responsabilidades, as normas e recomendações apresentam valores limites para esses dois agentes do sistema elétrico, tomando como fronteira o *PAC*.

Entretanto, no sentido à jusante da fonte de energia, o sistema elétrico não termina no *PAC*, mas ele adentra as unidades consumidoras até atingir o equipamento que efetivamente irá utilizar a energia elétrica. O trecho do sistema elétrico no interior das unidades consumidoras é de responsabilidade do proprietário (ou gestor) da mesma, sendo também dele a responsabilidade implícita de manter as distorções harmônicas de tensão em níveis admissíveis, sob pena dos efeitos danosos produzidos por harmônicos em seus equipamentos.

Para detalhar um pouco mais essa análise, tome-se o diagrama apresentado na Figura 20, no qual são representados uma fonte de tensão senoidal, o trecho do sistema elétrico externo à unidade consumidora (indicado pela impedância Z_S), o *PAC*, um transformador da unidade consumidora (indicado pela impedância Z_T), trecho do alimentador das cargas (indicado pela impedância Z_A), e duas cargas, sendo uma linear e outra não linear. Também está indicada a corrente I_h cuja origem é na carga não linear, e a corrente I_L, cuja origem é na carga linear (SOUZA, 2016; SIEMENS – White Paper, 2013). O Ponto 1 é onde as duas correntes se encontram e no qual será avaliado o comportamento da tensão de “autoperturbação”.

Figura 20 – Tensões harmônicas e o princípio da autoperturbação



Fonte: Adaptado pelo Autor de SIEMENS – White Paper, 2013

Na Figura 20 também estão indicadas as tensões em diversos pontos do sistema elétrico ali representado, quais sejam: V_F a tensão senoidal fornecida pela fonte, V_S a tensão no *PAC*, V_T a tensão na saída do transformador e V_C a tensão no Ponto 1, que é comum às duas cargas (linear e não linear).

Considerando que a chave indicada na Figura 20 esteja fechada, serão analisadas cada uma dessas tensões a partir da "Lei de Ohm", que relaciona a queda de tensão sobre uma impedância com a corrente que a percorre e a própria impedância, conforme apresentado na Equação (62).

$$\Delta V_Z = I \; x \; Z \tag{62}$$

A Equação (63) apresenta a tensão no *PAC*.

$$V_{PAC} \; = \; \mathrm{V_F} - \; [(I_L + I_h) \; x \; Z_S] \; = \; \mathrm{V_F} - \; [(I_L x Z_S) + (I_h x Z_S)] \tag{63}$$

Observa-se pela Equação (63) que a tensão no *PAC* depende das correntes I_L e I_h, e que a parcela de queda de tensão (I_h x Z_S) é originada pela corrente I_h da carga não linear. E ainda que, como já apresentado a partir da Figura 19, essa parcela (I_h x Z_S) será a responsável pela distorção da tensão no *PAC*.

De modo similar a Equação (64) apresenta a tensão na saída do transformador.

$$V_T = V_F - [(I_L + I_h)\ x\ (Z_S + Z_T)] \quad (64)$$

E a Equação (65) apresenta a tensão V_C que alimenta as duas cargas (com a chave fechada).

$$V_C = V_F - [(I_L + I_h)\ x\ (Z_S + Z_T + Z_A)] \quad (65)$$

Analisando-se as Equações (63), (64) e (65) e observando a Figura 20, nota-se que o valor da tensão V_C é menor que a tensão V_T que, por sua vez, é menor que a tensão V_S, sendo esta menor que a tensão V_F. Em outras palavras, o valor da tensão é reduzido à medida que mais impedância é introduzida entre a carga e a fonte.

Considerando-se que a parcela distorcida da tensão é produzida pela interação entre a corrente I_h e as impedâncias presentes no sistema (Z_S, Z_T e Z_A), pode-se afirmar que o mesmo ocorre com a *THD* de cada uma dessas tensões, fazendo com que a THD_V no Ponto 1 seja maior que a THD_V no *PAC*, por exemplo.

A responsabilidade por assegurar um nível adequado da THD_V no *PAC* é compartilhada entre as empresas distribuídas de energia e os gestores das unidades consumidoras, sendo a instalação elétrica à jusante do *PAC* de responsabilidade exclusiva das unidades consumidoras.

No intuito de apresentar o conceito de "autoperturbação" por harmônicos, considere-se novamente a Figura 20, agora com a chave aberta, e analise-se o que ocorre com as tensões apresentadas pelas Equações (62), (63) e (64). Observa-se que, com a abertura da chave, o valor de I_h é nulo ($I_h = 0$).

Como resultado da abertura da chave as tensões V_C, V_T e V_S serão ligeiramente maiores, pois a parcela (I_h x Z) será nula, reduzindo a queda de tensão nas impedâncias do sistema provocadas pelas correntes harmônicas e, consequentemente, anulando o valor da distorção harmônica presente em cada uma dessas tensões.

Um novo fechamento da chave e o retorno da carga não linear ao sistema elétrico fará com que as tensões analisadas retornem ao estado interior. Esse é o princípio da "autoperturbação". Observa-se que a tensão no Ponto 1 foi alterada (ou "perturbada") pela carga não linear e que este ponto alimenta também a carga linear, que passará a ser alimentada por uma tensão distorcida. Dependendo da sensibilidade dessa carga linear à presença de harmônicos

de tensão, ela poderá apresentar efeitos indesejáveis em sua operação, além dos outros problemas decorrentes de harmônicos já apresentados neste trabalho.

Este trabalho propõe o termo "autoperturbação" para esse efeito, por tratar-se de um fenômeno produzido no interior de uma unidade consumidora que poderá gerar efeitos prejudiciais para ela mesma, reiterando que o nível de distorção da tensão no *PAC* será menor que o do Ponto 1 (Figura 20). Portanto, mesmo que a THD_V no *PAC* atenda aos limites preconizados pelas normas e procedimentos técnicos, a THD_V no Ponto 1 poderá ser superior a esses limites.

O termo "autoperturbação" que está sendo proposto traz consigo a informação de que os gestores das unidades consumidoras que possuem cargas não lineares deverão se preocupar também com a qualidade de energia no interior de suas instalações elétricas, e não apenas com a qualidade da energia no *PAC*, como apresentado nas normas e procedimentos técnicos. Dito de outra forma, o critério qualidade da energia, especialmente no quesito distorções harmônicas aqui apresentado, deverá ser um dos critérios de projeto de novas instalações e também de análise quando do acréscimo de novas cargas em instalações existentes.

Este trabalho foca em instalações elétricas hospitalares, dentre outros motivos, porque essas instalações apresentam diversos aspectos potencialmente perigosos quanto á autoperturbação, quais sejam:

a) Possuem cargas geradoras de harmônicos com altas potências e elevados valores de *THD* na corrente, especialmente os equipamentos de diagnóstico por imagem, que serão abordados com mais detalhes nos capítulos seguintes;
b) Possuem também cargas sensíveis à qualidade da energia, como já mencionado neste trabalho;
c) Apresentam alterações constantes em seus equipamentos eletromédicos, pois buscam acompanhar a evolução tecnológica para o diagnóstico e tratamento de enfermidades;
d) A falha ou operação incorreta de um equipamento eletromédico pode trazer graves consequências ao paciente e/ou exigir retrabalhos que produzirão aumento nos custos hospitalares.

A conjunção desses fatores coloca as instalações hospitalares como merecedoras de especial cuidado de seus gestores, cuidados esses não preconizados explicitamente por normas e procedimentos técnicos relacionados às distorções harmônicas.

2.5 Aspectos Operacionais de Equipamentos Hospitalares

Conforme já apresentado neste trabalho, alguns dos equipamentos eletromédicos instalados nos hospitais são “geradores” de correntes harmônicas e outros são sensíveis a eles, tais como os eletroencefalógrafos e os eletrocardiógrafos (SANTANA, 1996).

Dentre os equipamentos hospitalares que drenam correntes distorcidas de elevadas magnitudes, os mais significativos são aqueles destinados aos exames para diagnóstico por imagens, tais como, equipamento de raio X, tomografia computadorizada, ressonância magnética, mamografia, hemodinâmica, entre outros (RAMOS, 2009; RAO, SING, THAKUR, 2010; ADAMU, MUHAMMAD, SHUAIBU, 2014).

Este trabalho tem por objetivo apresentar o fenômeno da autoperturbação por harmônicos e, para tanto, foram analisados três equipamentos geradores de harmônicos existentes nos hospitais, destinados ao diagnóstico por imagens, a saber: i) Raio X; ii) Tomografia Computadorizada, e; iii) Ressonância Magnética; que foram escolhidos por estarem disponíveis para a medição do conteúdo harmônico de suas correntes elétricas.

Porém, antes de se apresentar as medições do conteúdo harmônico realizadas nesses equipamentos, será descrito, sucintamente, cada um deles em seus aspectos operacionais, com algumas informações sobre a potência e a *THD* de suas correntes, encontradas na literatura.

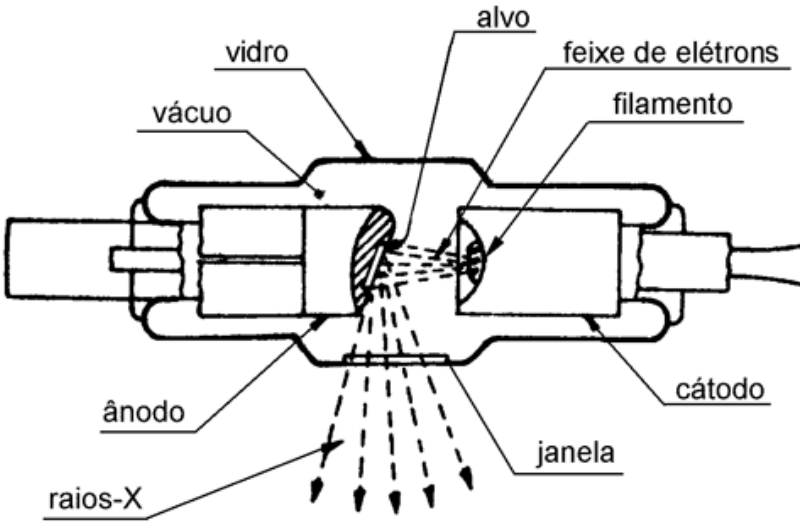
2.5.1 Raio X

Os exames utilizando-se de raios X constituíram-se na primeira técnica de diagnóstico por imagem e continua sendo, ainda hoje, uma das técnicas mais utilizadas (COSTA, ALBUQUERQUE, LEITE JR, 2012). Suas principais aplicações são em traumatologia e ortopedia (obtenção de imagens do crânio e do sistema esquelético), e também no estudo de órgãos respiratórios, tais como o pulmão. Os raios X também são utilizados em cardiologia, urologia, densitometria óssea (medida da densidade óssea), mielografia (imagens da medula óssea) e neurorradiologia (sistema nervoso central).

Durante a realização do exame, o paciente é posicionado entre uma fonte de raios X e uma placa de filme sensível ou detector apropriado. As imagens (também chamadas de radiografias) resultam da detecção de fótons de raios X que não foram absorvidos durante a exposição do paciente à radiação. Desta forma, uma radiografia consiste em uma imagem de transmissão, ou seja, é uma projeção plana do perfil espacial de absorção dos tecidos (COSTA, ALBUQUERQUE, LEITE JR, 2012).

No interior do equipamento, numa ampola de vidro chamada de “tubo de raios X”, a produção de raios X é obtida por meio de uma fonte (elétrica) fornecedora de elétrons (catodo), os quais são acelerados em trajetória livre (por uma grande diferença de potencial – entre 25 e 150 kV) e concentrado (colimado) em um pequeno ponto focal até chocarem-se com os átomos de um anteparo metálico (anodo). A rápida desaceleração destes elétrons ao colidir com o alvo metálico produz uma grande quantidade de calor e uma pequena parte da energia (cerca de 1%) é convertida em um espectro contínuo de raios X chamada radiação *Bremsstrahlung*. A Figura 21 ilustra o processo de geração dos raios X.

Figura 21 – Processo de geração dos raios X



Fonte: Internet (https://www.researchgate.net/figure/Figura-64-Esquema-ilustrativo-de-um-tubo-de-raios-X-Eletrons-sao-emitidos-termicamente_fig18_322940573) (pesquisado em Dez/2019)

Uma vez que os raios X entram em contato com o paciente, os diferentes tecidos absorvem diferentes quantidades de radiação em diferentes energias. Quanto maior a diferença de absorção entre os tecidos, maior o contraste da imagem.

Observa-se que a radiografia convencional oferece alto contraste entre ar, ossos e músculo. Consequentemente, a radiografia é eficiente na representação de estruturas ósseas ou em imagens do pulmão, por exemplo. No entanto, oferece pouco contraste na distinção de tecidos “moles”, tais como sangue e músculos. De fato, para tornar vasos sanguíneos visíveis aos raios X são utilizados agentes de contrastes (materiais com alta absorção, que são injetados na corrente sanguínea) (BRONZINO, 2000). Na Figura 22, tem-se, como exemplo, a radiografia de uma mão, onde se observa alto contraste em tecidos “duros” (tecidos ósseos) e baixo contraste em tecidos “moles” (músculos).

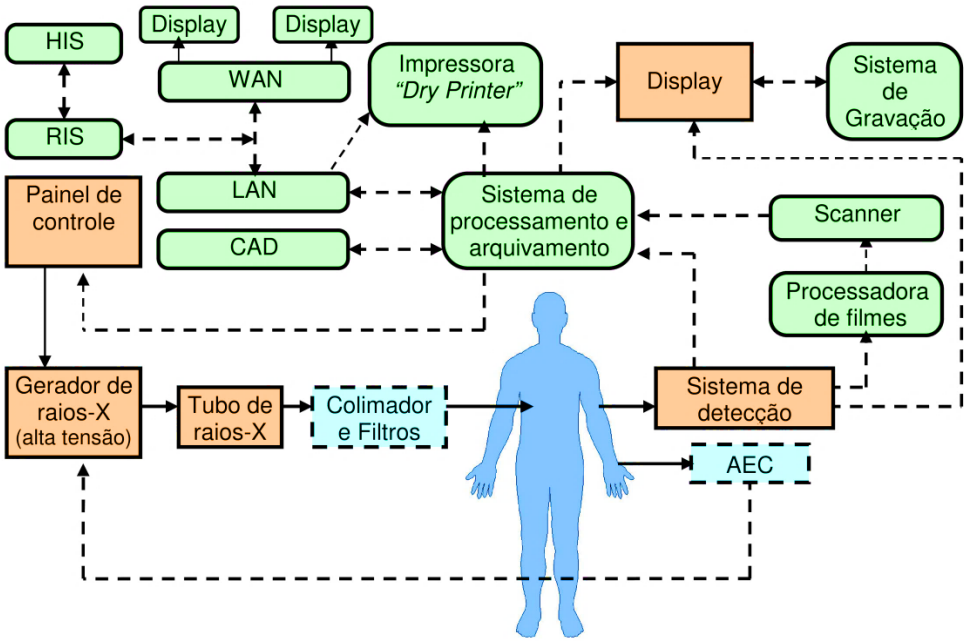
Figura 22 – Imagem radiográfica de uma mão com alto contraste entre os tecidos "duros" e baixo constraste entre tecidos "moles"

Fonte: COSTA, ALBUQUERQUE, LEITE JR, 2012

Os raios X são uma radiação ionizante. Isto significa que a sua exposição, acima de determinada dose, é considerada um forte fator cancerígeno. Portanto, deve ser aplicado apenas na área de interesse, evitando exposição desnecessária ao paciente e ao operador (COSTA, ALBUQUERQUE, LEITE JR, 2012).

A Figura 23 apresenta um diagrama de blocos das partes componentes de um sistema de raios X, com seus elementos principais: Gerador, Tubo de Raios X, Sistema de Detecção Display e Painel de Controle.

Figura 23 – Diagrama de blocos para sistemas de raio X



Fonte: COSTA, ALBUQUERQUE, LEITE JR, 2012

Os equipamentos de raio X utilizados nos hospitais apresentam potência elétrica nominal que poderá chegar a 150 kVA e, normalmente, são alimentados por circuitos trifásicos. (SANTANA, 1996).

Conforme apresentado em sua descrição de funcionamento, o tempo de duração efetiva de um exame é muito pequeno, podendo chegar a, no máximo, 4 segundos. Assim, apresentam dois tipos de operação, que são: i) em regime permanente, no qual o equipamento está ligado, porém sem a produção de raios X para o exame, e; ii) durante o exame.

Conforme observado na literatura, um equipamento de raio X analisado apresentou potência de 0,7 kVA em regime permanente, e de 110 kVA durante o exame, cuja duração máxima foi de 4 segundos. Para essa condição de exame a *THDi* registrada foi de 72 % (setenta e dois por cento) (RAMOS, 2009).

Esses dados preliminares de variação de potência e de alto valor de *THDi* confirmam que os equipamentos de raio X são potenciais causadores de problemas de qualidade de energia em instalações hospitalares.

2.5.2 Tomografia Computadorizada

A tomografia computadorizada combina o uso de um computador digital juntamente a um dispositivo de radiografia giratório (*gantry* no inglês e assim chamado também no Brasil) para criar imagens seccionais transversais detalhadas ou "fatias" (chamadas de *slices*) de diferentes órgãos e partes do corpo como os pulmões, fígado, rins, pâncreas, pélvis, extremidades, cérebro, coluna vertebral e vasos sanguíneos.

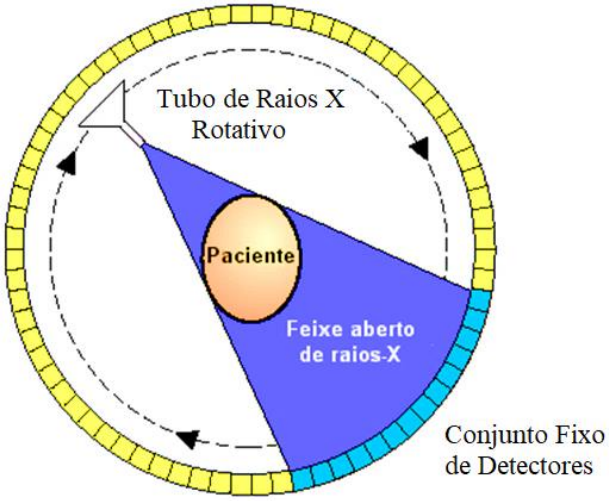
As principais vantagens dos sistemas de tomografia sobre a radiologia (imagens de raios X convencionais) são a capacidade de fornecer contraste em tecidos moles e de gerar visões nas várias direções de propagação do feixe de raios X (CALIL, GOMIDE, 2002).

Para uma visualização de tecidos moles é necessário projetar seções sem interferência de sombras de outras estruturas, destacando pequenas variações de absorção dos raios X.

O princípio básico da tomografia axial computadorizada é a reconstrução de uma fatia axial (*slice*), sem sobreposição de informação (sombras), através de múltiplas radiografias planas tomadas ao redor da periferia do paciente. A Figura 24 ilustra esse processo de obtenção de múltiplas radiografias planas.

Através desta técnica é possível observar múltiplos planos na direção de propagação do feixe de radiação (BRONZINO, 2000).

Figura 24 – Processo rotativo para obtenção de múltiplas radiografias planas, empregado na tomografia computadorizada

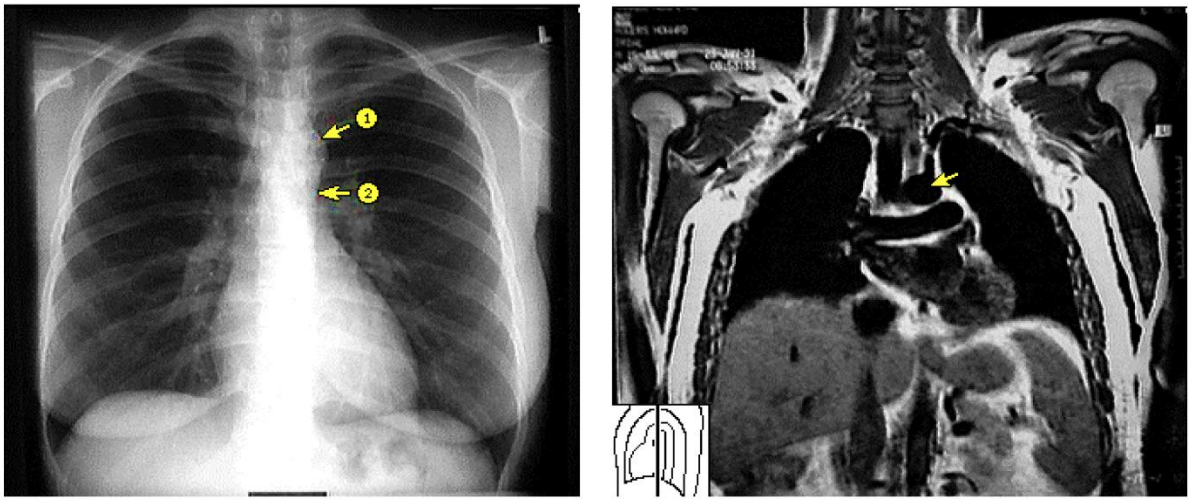


Fonte: COSTA, ALBUQUERQUE, 2012

O processo pelo qual se recupera a informação de uma fatia axial através de várias radiografias utiliza um algoritmo denominado "retroprojeção filtrada" e outras ferramentas computacionais (COSTA, ALBUQUERQUE, 2012).

A Figura 25 apresenta, como exemplo, as imagens de um mesmo paciente, obtidas por radiografia convencional (equipamento de raio X) e por tomografia computadorizada.

Figura 25 – Comparação de uma imagem radiográfica (a), com uma imagem do mesmo paciente obtida por tomografia computadorizada (b)



(a) Imagem Radiográfica (b) Imagem Tomográfica

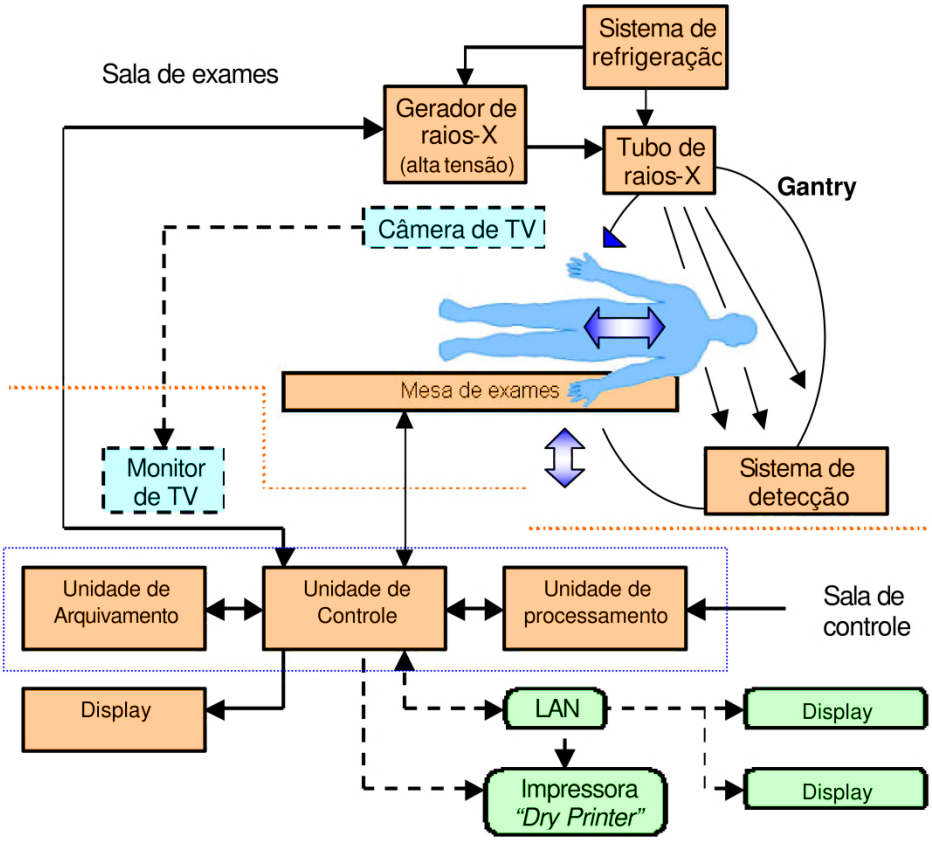
Fonte: COSTA, ALBUQUERQUE, 2012

Os pontos 1 e 2 indicados na imagem radiográfica (Figura 25a) não permitem caracterizar com clareza se nesses pontos o material é mole ou duro, enquanto na imagem obtida por tomografia computadorizada (tomográfica – Figura 25b) a seta indica que se trata de material mole (mais escuro).

Também pode ser observado na Figura 25 que a imagem tomográfica apresenta uma melhor resolução que a imagem radiográfica.

A Figura 26 apresenta em diagrama de blocos as partes componentes de um sistema de tomografia computadorizada, com seus elementos principais: Gerador de Raios X, Tubo de Raios X, Sistema de Refrigeração, Sistema de Detecção, Unidades de Processamento, Controle e Arquivamento, Display e Mesa de Exames.

Figura 26 – Diagrama de blocos para sistema de tomografia computadorizada



Fonte: COSTA, ALBUQUERQUE, 2012

A mesa de exames é controlada por computador e pode ser movida verticalmente e horizontalmente. Durante o exame, a mesa move o paciente para dentro do *gantry*, e o feixe de raios X gira em torno do paciente (CALIL, GOMIDE, 2002).

A técnica de tomografia computadorizada também utiliza raios X (radiação ionizante), porém em doses menores que as técnicas radiográficas convencionais. Entretanto, para permitir a captação de múltiplas imagens, necessita de um tempo maior de exposição do paciente aos raios X.

Os equipamentos de tomografia computadorizada apresentam faixa de potência elétrica nominal entre 50 kVA e 150 kVA, a depender de suas características, e são alimentados por circuitos trifásicos. (SANTANA, 1996; COSTA, ALBUQUERQUE, 2012).

De modo semelhante aos equipamentos de raio X, apresentam dois tipos de operação, que são: i) em regime permanente, no qual o equipamento está ligado, porém sem a produção de raios X para o exame, e; ii) durante o exame.

Conforme observado na literatura, um equipamento de tomografia computadorizada analisado apresentou potência de 5,1 kVA em regime permanente, e de 63 kVA durante o exame, cuja duração do registro foi de 24 segundos. Para essa condição de exame a *THDi* registrada foi de 18,9 % (RAMOS, 2009).

Esses dados preliminares de variação de potência e de valor de *THDi* confirmam que também os equipamentos de tomografia computadorizada são potenciais causadores de problemas de qualidade de energia.

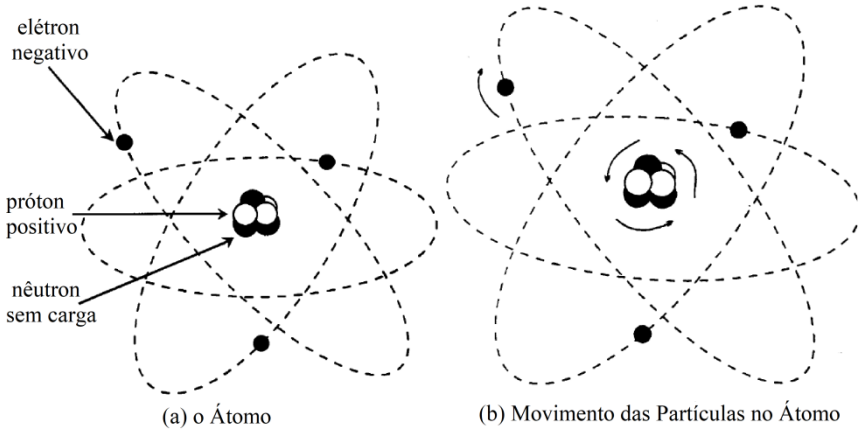
2.5.3 Ressonância Magnética

A ressonância magnética não utiliza os raios X, mas sim propriedades magnéticas do núcleo dos átomos que constituem todas as substâncias, incluindo, obviamente, aquelas que compõem o corpo humano (RAMOS, 2009).

O princípio da ressonância nuclear magnética foi descoberto por Felix Bloch e Edward Purcell em 1946 e revolucionou a química analítica e depois as imagens médicas. De fato, a imagem por ressonância magnética possibilitou imagens do interior do corpo humano para diagnósticos, com resoluções superiores às oriundas dos raios X nos quesitos contraste e capacidade multiplanar, além de produzir imagens de processos fisiológicos, tais como fluxo de sangue, perfusão, difusão, ativação do córtex, concentrações metabólicas, e também possibilitando aos médicos uma nova visão do sistema nervoso.

Sabe-se que no interior do átomo ocorrem três tipos de movimentos, que são os elétrons girando sobre seu próprio eixo; os elétrons em órbita em torno do núcleo; e o próprio núcleo girando em torno do seu eixo, como pode ser observado na Figura 27 (OSHIYAMA, 2007).

Figura 27 – Movimentos das particulas no interior do átomo

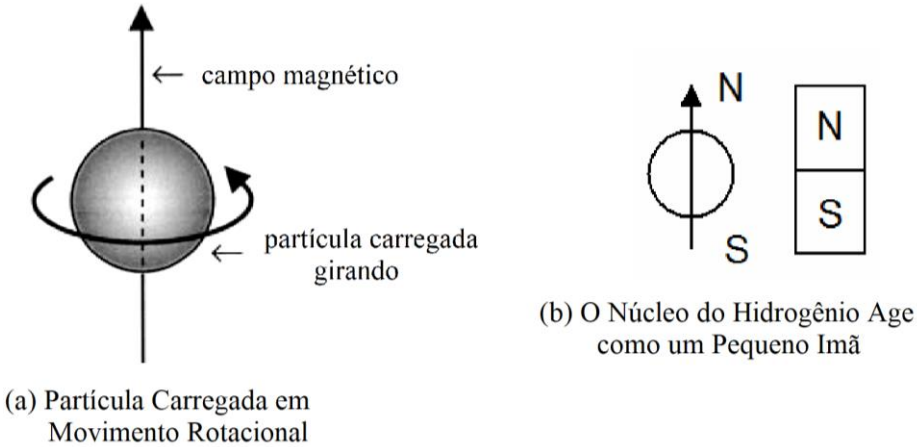


Fonte: OSHIYAMA, 2007

Felix Bloch teorizou que qualquer partícula carregada e em movimento rotacional, cria um campo magnético ao seu redor, como apresentado na Figura 28a. Essa propriedade é chamada de *spin* ("giro" em inglês) da partícula, e esse termo é usado também no Brasil.

O núcleo do átomo de hidrogênio, que é abundante no corpo humano, possui apenas um próton com carga ativa que efetua movimento de rotação. Assim, ele apresenta um campo magnético induzido em sua volta, comportando-se então como um pequeno magneto (imã), como pode ser observado na Figura 28b. Outro átomo que possui carga ativa em seu núcleo e que é abundante no corpo humano é o átomo de fósforo, que possui quinze prótons (HENDEE, RITENOUR, 2002).

Figura 28 – Uma partícula carregada e em movimento rotacional cria um campo magnético ao seu redor

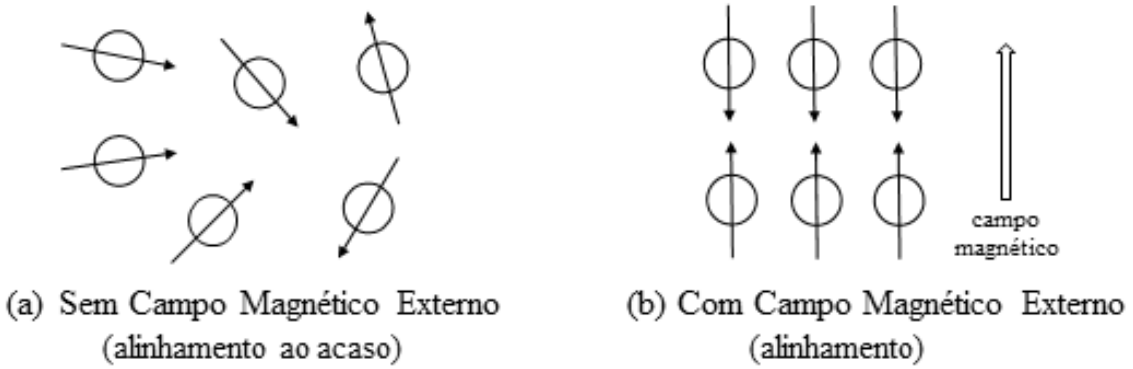


Fonte: OSHIYAMA, 2007

A energia térmica natural do corpo humano faz com que as direções de alinhamento desses pequenos magnetos (*spins*) em uma amostra de tecido do corpo sejam totalmente aleatórias e, como resultado não há um vetor de magnetização resultante. Entretanto, se prótons

em rotação são colocados na presença de um intenso campo magnético externo, eles se alinharão ao campo, como pode ser observado na Figura 29.

Figura 29 – Alinhamento dos *spins* na presença de campo magnético externo



Fonte: OSHIYAMA, 2007

Como pode ser observado na Figura 29b, na presença de campo magnético externo alguns dos *spins* se alinham na direção do campo (paralela) e outros na direção contrária (antiparalela). Os que se alinham em direção contrária ao campo têm energia maior, ocupando estados de energia mais altos nos átomos (NICÁCIO, COSTA, 2012).

Essa é, portanto, a função do campo magnético externo: alinhar os *spins* dos prótons dos átomos de hidrogênio (ou fósforo) presentes no corpo humano. Para tanto, tais campos magnéticos devem ser intensos, variando de 0,5 T a 3,0 T (tesla).

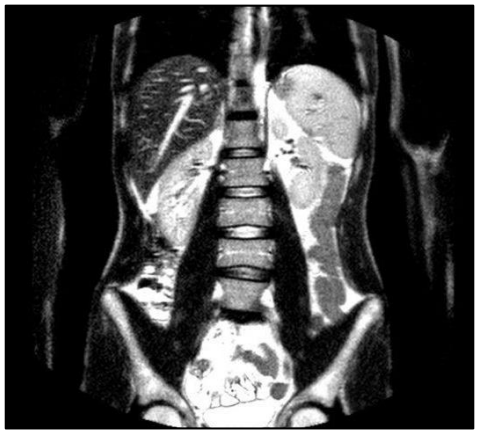
Porém, para a obtenção da imagem de órgãos internos isso não basta. Para obtê-la se faz necessário acrescentar energia de outra fonte aos prótons já alinhados com o campo magnético externo, o que é feito através de uma onda eletromagnética de radiofrequência (*RF*) produzida também pelo equipamento de ressonância magnética.

Essa onda de *RF* é direcional, deverá ser aplicada em pulsos, e possuir uma frequência específica para provocar uma ressonância com o giro dos prótons, fazendo com que os *spins* dos prótons atingidos se desalinhem do campo magnético externo durante a aplicação desse pulso. Após o pulso de *RF* ter sido enviado, o retorno dos *spins* à posição alinhada gera um sinal, que é o sinal de "ressonância magnética" medido. Em seguida esse sinal é processado computacionalmente, sendo então produzida a imagem (HENDEE, RITENOUR, 2002).

A frequência do pulso de *RF* variará com o tipo de átomo a ser atingido (hidrogênio, fósforo, etc.) e com o campo magnético externo a que estiver sendo submetido o paciente. Por exemplo, para se atingir a ressonância de prótons de hidrogênio sob um campo magnético externo de 1 T (um tesla), a frequência do pulso de *RF* deverá ser de 42 GHz.

A imagem produzida por um equipamento de ressonância magnética permite a visualização tanto de ossos quanto de tecidos moles, como órgãos, vasos sanguíneos, músculos e gordura. A Figura 30 apresenta um exemplo de imagem obtida por ressonância magnética, na qual podem ser observados ossos, tecidos moles e o contorno do corpo do paciente.

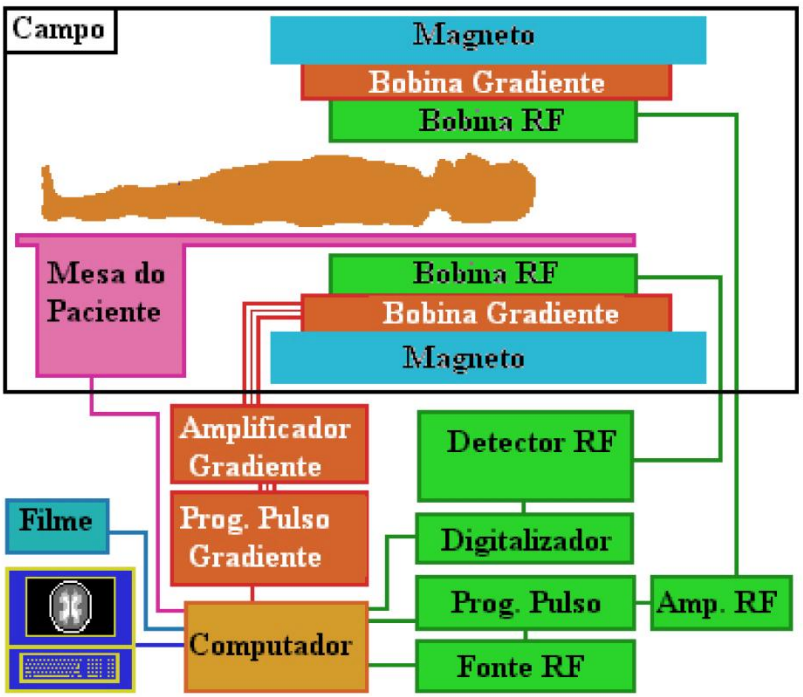
Figura 30 – Imagem da coluna de um paciente obtida por ressonância magnética



Fonte: Internet
(https://www.google.com/search?q=imagem+de+resson%C3%A2ncia+magn%C3%A9tica&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwiBrOv0pO3mAhX_IbkGHXwWB0oQ_AUoAXoECA8QAw&biw=1536&bih=706#imgrc=DliGIn_n0-8lcM:) (pesquisado em Dez/2019)

A Figura 31 apresenta o diagrama de blocos de um equipamento de ressonância magnética.

Figura 31 – Diagrama de blocos para sistemas de ressonância magnética



Fonte: NICÁCIO, COSTA, 2012

Os equipamentos de ressonância magnética, assim como os de tomografia, apresentam faixa de potência elétrica nominal entre 50 kVA e 150 kVA, e são alimentados por circuitos trifásicos. (SANTANA, 1996).

De forma similar aos outros dois equipamentos aqui apresentados, raio X e tomografia, os equipamentos de ressonância magnética apresentam dois tipos de operação, que são: i) em regime permanente, no qual o equipamento está ligado, porém sem a emissão de ondas de *RF* para o exame, e; ii) durante o exame.

Conforme observado na literatura, um equipamento de ressonância magnética analisado apresentou potência de 14,9 kVA em regime permanente, e de 62 kVA durante o exame, com duração do registro de 90 segundos. Para essa condição de exame a *THDi* registrada foi de 18,4 % (dezoito por cento e quatro décimos) (RAMOS, 2009).

Esses dados preliminares de variação de potência e de valor de *THDi* são muito parecidos com os da tomografia, e confirmam que também os equipamentos de ressonância magnética são potenciais causadores de problemas de qualidade de energia oriundos no interior das instalações elétricas hospitalares.

2.5.4 Considerações sobre Aspectos Operacionais de Equipamentos Hospitalares

Os equipamentos para diagnóstico por imagens analisados neste trabalho apresentam ampla faixa de variação na intensidade da potência demandada da rede elétrica, bem como variação no período de tempo que essa potência é requerida. Essa variação decorre do tipo de exame a ser realizado. Por exemplo, a potência demandada e a duração requerida para a radiografia de uma “mão humana” são diferentes daquelas para a radiografia de um “tórax humano”.

Outro ponto importante a ser observado é a ocorrência da simultaneidade entre as máximas potências demandadas por esses equipamentos. Em outras palavras, como demonstrado neste trabalho, o fenômeno da autoperturbação por harmônicos é intensificado quando ocorre a simultaneidade entre as máximas potências demandadas por tais equipamentos.

Na seção seguinte são apresentados os valores registrados das potências demandadas por cada um dos equipamentos analisados, a duração temporal dos exames e o conteúdo harmônico presente na corrente drenada por equipamento de raios X, tomografia computadorizada e ressonância magnética.

CAPÍTULO 3
METODOLOGIA

A metodologia para avaliação da autoperturbação por harmônicos foi desenvolvida juntamente com um estudo, que contempla a especificação de um transformador para a área de diagnóstico por imagem, no prédio do futuro Hospital das Clínicas de Bauru, criado através do Decreto nº 63.589, de 06 de Julho de 2018, do Governo do Estado de São Paulo (BRASIL-SP, 2018), e localizado no interior do campus de Bauru da Universidade de São Paulo – USP.

O estudo de caso relaciona-se com a necessidade de instalação de três equipamentos na área de diagnóstico por imagem do hospital, a saber, um equipamento de raio X, um equipamento de tomografia computadorizada e um equipamento de ressonância magnética, sem que tais equipamentos provocassem problemas de qualidade da energia elétrica no interior das instalações hospitalares, e mais especificamente devido à presença de harmônicos oriundos desses equipamentos.

Para avaliar essa situação, este trabalho adotou a seguinte metodologia:

a) <u>Realização de Medições do Conteúdo Harmônico da Corrente de Equipamentos Similares em Funcionamento</u>

   Considerando que, após consulta aos fabricantes, não foi possível a obtenção de informações sobre o conteúdo harmônico na corrente desses equipamentos, os mesmos foram obtidos através da medição em equipamentos que se encontram em funcionamento.

b) <u>Realização de Estudo Analítico sobre a Autoperturbação por Harmônicos em Transformadores</u>

   Partindo de informações sobre transformadores disponibilizadas por seus fabricantes, foram desenvolvidos circuitos elétricos equivalentes simplificados, sobre os quais foram aplicadas as correntes medidas nos equipamentos em funcionamento, e avaliada a distorção harmônica na tensão na saída dos transformadores.

c) <u>Realização de Simulação Computacional sobre a Autoperturbação por Harmônicos em Instalação Elétrica Hospitalar</u>

   Os transformadores analisados no estudo analítico foram também avaliados através de simulação computacional, incluindo agora outros elementos, tais como impedância da rede elétrica até o *PAC*, efeitos de saturação dos transformadores e impedâncias dos

cabos de alimentação dos equipamentos. Os dados relativos ao *PAC* foram os apresentados pela concessionária de energia que atende ao prédio do futuro Hospital das Clínicas de Bauru.

d) Análise de Possíveis Indicadores de Autoperturbação

Após revisão bibliográfica sobre o tema com a identificação de possíveis indicadores de autoperturbação por harmônicos, tais indicadores foram determinados numericamente para os dados então obtidos, e avaliado cada um deles para diversas possibilidades de simultaneidade de operação dos equipamentos e também para transformadores de diversas potências.

e) Avaliação Geral e Conclusões

Foram analisados os resultados obtidos, elaboradas conclusões e apresentados critérios para avaliação da autoperturbação por harmônicos.

3.1 Medições Elétricas em Equipamentos Hospitalares

As medições sobre o conteúdo harmônico nas correntes foram efetuadas em equipamentos que se encontram em pleno funcionamento no Hospital Estadual de Bauru, também localizado no município de Bauru – SP, que foram disponibilizados para este trabalho. Tais medições foram previamente autorizadas pelo Comitê de Ética desse hospital.

A seguir são apresentadas de forma resumida as medições efetuadas e os resultados obtidos, estando no Apêndice A o detalhamento dessas medições.

3.1.1 O Medidor de Harmônicos Utilizado

As medições do conteúdo harmônico das correntes dos equipamentos analisados foram feitas através de um medidor da marca Schneider Electric, modelo ION 7650, apresentado na Figura 32.

Esse equipamento recebeu a tensão da rede elétrica em 380 V diretamente através de garras de tensão e os sinais de corrente através de transformadores de corrente com núcleo partido, da marca Sibratec, com relação de 400/5 A. Os valores capturados para a corrente foram validados, por comparação, com os obtidos através de um alicate amperímetro devidamente calibrado.

O Medidor ION 7650 possui capacidade para capturar harmônicas até a 511ª ordem (SCHNEIDER ION7650, 2010), porém neste trabalho elas foram registradas até a 50ª ordem,

conforme preconizado para sistemas de energia (IEEE 519, 2014). Esse equipamento captura formas de onda em 1024 amostras por ciclo e se comunica com o computador através do padrão RS-485 (*Recommended Standard – 485*).

Figura 32 – Foto do medidor ION7650 utilizado para as medições de harmônicos

Fonte: O Próprio Autor, 2019

O ponto de medição foi no quadro de distribuição geral de baixa tensão, na saída dos alimentadores de cada um dos equipamentos analisados. Mais detalhes sobre as medições são apresentados no Apêndice A.

3.1.2 As Medições no Equipamento de Raio X

A Figura 33 apresenta o equipamento de raio X que teve capturado o conteúdo harmônico de sua corrente elétrica.

Figura 33 – Foto do equipamento de raio X analisado

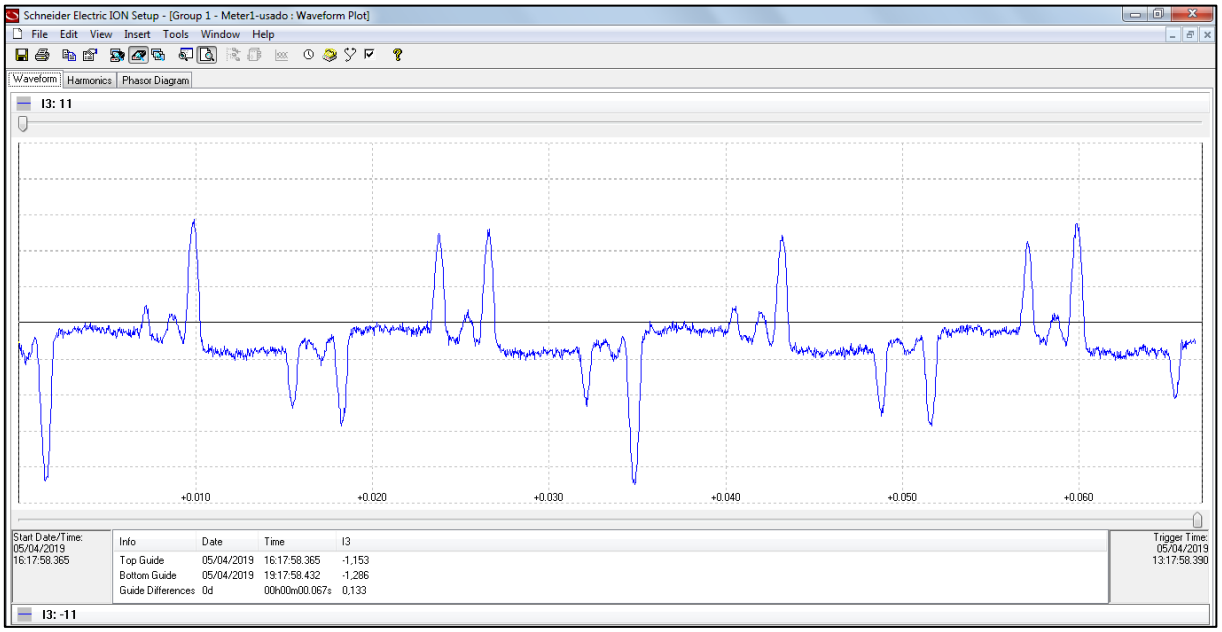
Fonte: O Próprio Autor, 2019

Durante os trabalhos foram levantadas algumas características do equipamento de raio X analisado, que foram:

- Marca / Modelo: Philips / Bucky Diagnost (série RX0747);
- Potência Nominal de Entrada: 40 kVA;
- Tensão de Trabalho: 380/220 V (linha/fase);
- Tipo de Conexão: Trifásica a três condutores, em estrela.

Para ilustrar o conteúdo harmônico presente na corrente do equipamento de raio X analisado, a Figura 34 apresenta a forma de onda da corrente em uma das fases.

Figura 34 – Forma de onda da corrente de uma das fases do equipamento de raio X



Fonte: O Próprio Autor, 2019

Observou-se durante as medições que a potência demandada da rede elétrica apresentou-se bastante variável e que a duração do exame em condição de máxima demanda foi de 1,5 (um e meio por cento) segundos.

Assim, para possibilitar as análises a serem feitas neste trabalho, adotou-se o conteúdo harmônico para as situações típicas de funcionamento que ocorrem a 80% da potência nominal do equipamento, resultando nos seguintes valores:

- Potência Demandada Máxima: 32 kVA;
- Tensão de Trabalho Medida: 225,5 V (fase);
- Corrente Eficaz Total: 47,0 A;
- Fator de Potência Medido: 0,774 (deslocamento);

• Distorção Harmônica Total na Tensão Medida: 1,2 %;

• Distorção Harmônica Total na Corrente Medida: 64,3 %.

Apresenta-se na Tabela 15 o conteúdo harmônico da corrente medida no equipamento de raios X, que foi utilizado no estudo analítico e nas simulações. Mais detalhes sobre a obtenção desses valores são apresentados no Apêndice A.

Tabela 15 – Conteúdo Harmônico da Corrente do Equipamento de Raio X

Ordem dos Harmônicos da Corrente	**Valor Eficaz dos Harmônicos (A)**
1	39,51
3	7,80
5	10,81
7	13,82
9	5,24
11	6,72
13	3,61
15	5,43
17	6,20
19	4,70
21	3,20

Fonte: O Próprio Autor, 2019

3.1.3 As Medições no Equipamento de Tomografia Computadorizada

Apresenta-se na Figura 35 o equipamento de tomografia computadorizada que teve capturado o conteúdo harmônico de sua corrente elétrica.

Durante os trabalhos foram levantadas algumas características do equipamento de tomografia computadorizada analisado, que foram:

• Marca / Modelo: Hitachi / Scenaria 128 (série S3079);

• Potência Nominal de Entrada: 100 kVA;

• Tensão de Trabalho: 380/220 V (linha/fase);

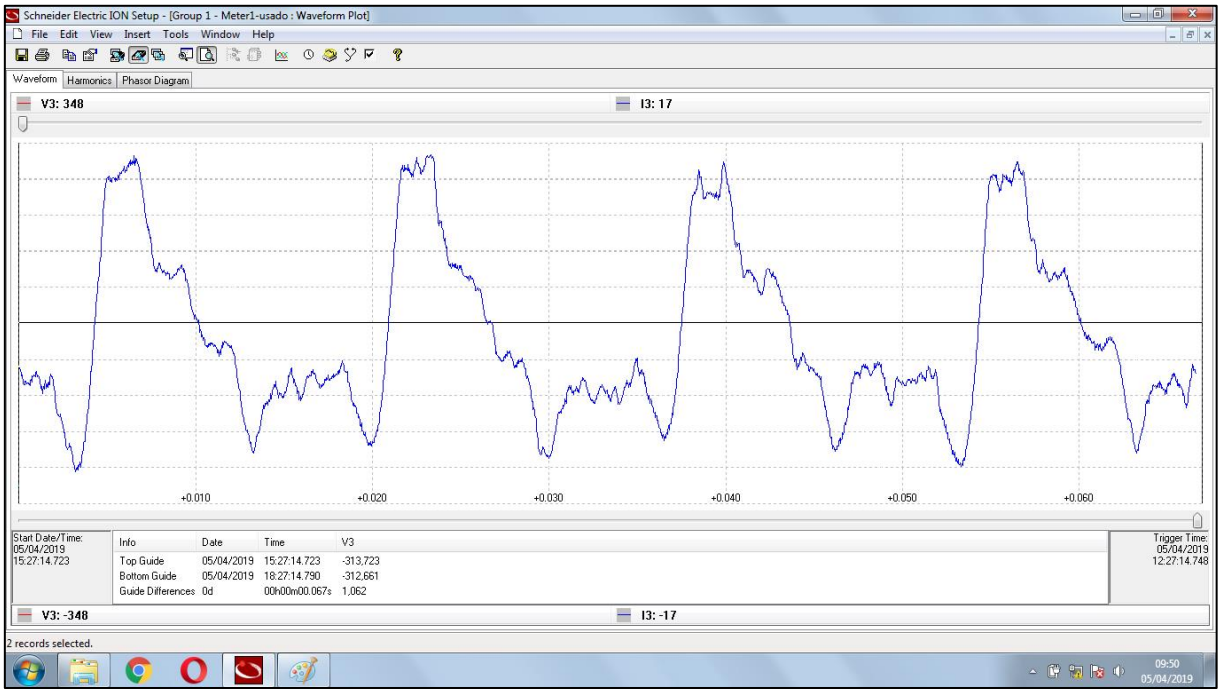
• Tipo de Conexão: Trifásica a três condutores, em estrela.

Figura 35 – Foto do equipamento de tomografia computadorizada analisado

Fonte: O Próprio Autor, 2019

Para ilustrar o conteúdo harmônico presente na corrente do equipamento de tomografia computadorizada analisado, a Figura 36 apresenta a forma de onda da corrente em uma das fases.

Figura 36 – Forma de onda da corrente de uma das fases do equipamento de tomografia computadorizada



Fonte: O Próprio Autor, 2019

Observou-se durante as medições que a potência demandada da rede elétrica também se apresentou bastante variável e que a duração do exame em condição de máxima demanda foi de 30 (trinta) segundos.

Assim, para possibilitar as análises a serem feitas neste trabalho, adotou-se o conteúdo harmônico para 80% da potência nominal do equipamento, que resultou nos seguintes valores:

- Potência Demandada Máxima: 80 kVA;
- Tensão de Trabalho Medida: 221,6 V (fase);
- Corrente Eficaz Total: 119,4 A;
- Fator de Potência Medido: 0,984 (deslocamento);
- Distorção Harmônica Total na Tensão Medida: 1,7 %;
- Distorção Harmônica Total na Corrente Medida: 38,4 %.

Apresenta-se na Tabela 16 o conteúdo harmônico da corrente obtido para o equipamento de tomografia computadorizada, que será utilizado no estudo analítico e nas simulações. Mais detalhes sobre a obtenção desses valores são apresentados no Apêndice A.

Tabela 16 – Conteúdo Harmônico da Corrente do Equipamento de Tomografia Computadorizada

Ordem dos Harmônicos da Corrente	**Valor Eficaz dos Harmônicos (A)**
1	111,44
3	20,87
5	14,99
7	17,95
9	17,02
11	15,94
13	15,39
15	1,72
17	2,41
19	1,73
21	1,36

Fonte: O Próprio Autor, 2019

3.1.4 As Medições no Equipamento de Ressonância Magnética

Apresenta-se na Figura 37 o equipamento de ressonância magnética que teve capturado o conteúdo harmônico de sua corrente elétrica.

Durante os trabalhos foram levantadas algumas características do equipamento de ressonância magnética analisado, que foram:

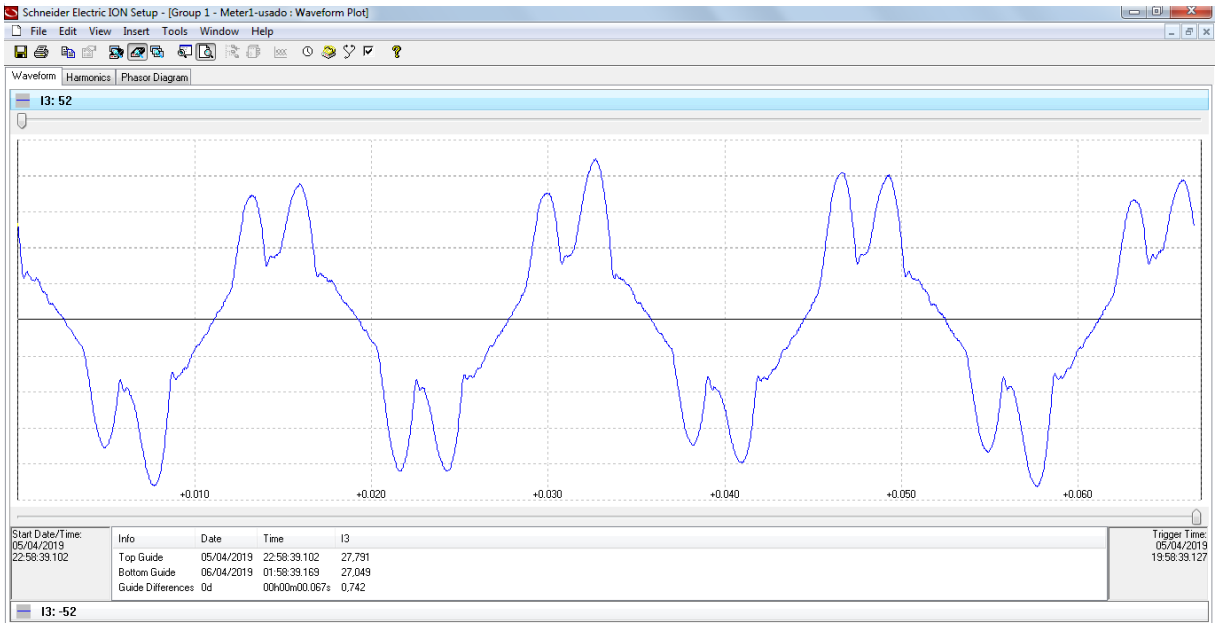
- Marca / Modelo: Philips / Intera 1,5 T (série MR3028);
- Potência Nominal de Entrada: 50 kVA;
- Tensão de Trabalho: 380/220 V (linha/fase);
- Tipo de Conexão: Trifásica a três condutores, em estrela.

Figura 37 – Foto do equipamento de ressonância magnética analisado

Fonte: O Próprio Autor, 2019

Para ilustrar o conteúdo harmônico presente na corrente do equipamento de ressonância magnética analisado, está apresentada na Figura 38 a forma de onda da corrente em uma das fases.

Figura 38 – Forma de onda da corrente de uma das fases do equipamento de ressonância magnética



Fonte: O Próprio Autor, 2019

Observou-se durante as medições que a potência demandada da rede elétrica mostrou-se também bastante variável e que a duração do exame em condição de máxima demanda foi de 2 (dois) minutos.

Assim, para possibilitar as análises a serem feitas neste trabalho, adotou-se o conteúdo harmônico para 80% da potência nominal do equipamento, que resultou nos seguintes valores:

- Potência Demandada Máxima: 40 kVA;
- Tensão de Trabalho Medida: 221,5 V (fase);
- Corrente Eficaz Total: 60,2 A;
- Fator de Potência Medido: 0,919 (deslocamento);
- Distorção Harmônica Total na Tensão Medida: 1,9 %;
- Distorção Harmônica Total na Corrente Medida: 31,3 %.

Apresenta-se na Tabela 17 o conteúdo harmônico da corrente obtido para o equipamento de ressonância magnética, que será utilizado no estudo analítico e nas simulações. Mais detalhes sobre a obtenção desses valores são apresentados no Apêndice A.

Tabela 17 – Conteúdo Harmônico da Corrente do Equipamento de Ressonância Magnética

Ordem dos Harmônicos da Corrente	**Valor Eficaz dos Harmônicos (A)**
1	57,42
3	2,35
5	13,21
7	7,81
9	1,19
11	1,45
13	1,60
15	0,64
17	1,59
19	1,41
21	0,56

Fonte: O Próprio Autor, 2019

3.1.5 Dados Utilizados no Estudo Analítico e Simulações Computacionais

Os valores obtidos nas medições do conteúdo harmônico (em valor eficaz) foram aplicados aos modelos analítico e computacional apresentados neste trabalho, considerando que, em princípio, eles são independentes da distorção harmônica total da tensão sob as quais foram obtidos.

Também foi considerado que a sequência de fase (e também a fase) de cada harmônico terá comportamento conforme apresentado na Figura 9 e na Tabela 2.

Outra consideração importante é que o efeito conjunto de dois ou mais equipamentos foi obtido, neste trabalho, pela superposição dos efeitos individuais, ou seja, o componente harmônico resultante foi a soma dos harmônicos de cada equipamento, correspondentes à mesma ordem (SILVA, 2014).

Assim, apresentam-se na Tabela 18 os valores do conteúdo harmônico da corrente a serem utilizados no estudo analítico e nas simulações para cada equipamento, e também para os três equipamentos operando simultaneamente (indicado por "Total" na tabela).

Tabela 18 – Valores dos Conteúdos Harmônicos das Correntes Utilizados no Estudo Analítico e nas Simulações Computacionais

Ordem dos Harmônicos da Corrente	Raios X (A)	Tomografia Computado-rizada (A)	Ressonância Magnética (A)	Total (A)
1	39,51	111,44	57,42	208,37
3	7,80	20,87	2,35	31,02
5	10,81	14,99	13,21	39,01
7	13,82	17,95	7,81	39,58
9	5,24	17,02	1,19	23,45
11	6,72	15,94	1,45	24,11
13	3,61	15,39	1,60	20,60
15	5,43	1,72	0,64	7,79
17	6,20	2,41	1,59	10,20
19	4,70	1,73	1,41	7,84
21	3,20	1,36	0,56	5,12

Fonte: O Próprio Autor, 2019

3.2 Estudo Analítico da Autoperturbação

O estudo analítico da autoperturbação tem por objetivo principal verificar sua ocorrência em transformadores dimensionados através do critério tradicional, o qual considera que a potência nominal (expressa em kVA) do transformador seja maior que a soma das potências nominais das cargas (também expressas em kVA) em operação simultânea.

Para o estudo analítico foi determinado o circuito elétrico equivalente simplificado desse transformador a partir de informações fornecidas pelos fabricantes, e pela "aplicação reversa" dos ensaios a vazio e em curto-circuito de transformadores (MARTIGNONI, 1983; OLIVEIRA, COGO, ABREU, 1984).

Na indústria de transformadores, são aplicados ensaios a vazio e em curto-circuito aos transformadores, através dos quais são determinados os valores das Perdas a Vazio (em watts), Perda Total (em watts), Corrente de Excitação (%) e Impedância Porcentual – Z(%) dos transformadores. Tais valores são disponibilizados pelos fabricantes nas folhas de dados de seus produtos (WEG, 2019). A "aplicação reversa" desses ensaios possibilitou a determinação dos parâmetros do circuito elétrico equivalente a partir dos dados disponibilizados pelos fabricantes de transformadores.

Conforme apresentado na descrição dos equipamentos de diagnóstico por imagem em análise, suas potências nominais (dados de placa dos equipamentos) são:

- Raio X.....40 kVA;
- Tomografia Computadorizada.....100 kVA;
- Ressonância Magnética.....50 kVA.

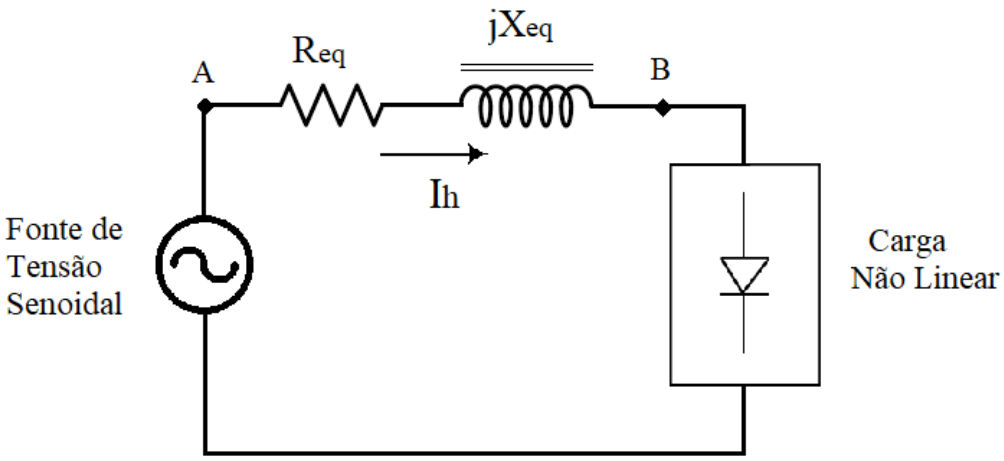
Considerando que tais equipamentos poderão ser utilizados simultaneamente, o transformador que os alimentará (apenas essas cargas) foi determinado pela soma algébrica das potências desses equipamentos, que resulta em 190 kVA. Para essa potência total das cargas a serem alimentadas, utilizando-se do critério tradicional, o transformador comercial com potência nominal imediatamente superior será o de 225 kVA (WEG, 2019).

Considerando também que o objetivo deste trabalho é analisar a autoperturbação e não uma possível redução da vida útil do transformador, foram considerados transformadores com *K-factor* (K_{UL}) igual a 1, que são os transformadores inicialmente especificados pelos engenheiros projetistas.

3.2.1 O Circuito Equivalente Simplificado de Transformadores

O circuito equivalente simplificado aqui utilizado foi o referido ao secundário do transformador, em sua forma monofásica, conforme apresentado por (OLIVEIRA, COGO, ABREU, 1984). Este circuito está apresentado na Figura 39, indicando que o transformador alimenta uma carga não linear.

Figura 39 – Circuito equivalente monofásico de um transformador, referido ao seu secundário



Fonte: Adaptado pelo Autor de OLIVEIRA, COGO, ABREU, 1984

O circuito apresentado na Figura 39 foi utilizado para a determinação da autoperturbação na distorção harmônica da tensão, considerando-se que a tensão aplicada no ponto A (vide Figura 39) seja perfeitamente senoidal e determinando-se o conteúdo harmônico presente na tensão no ponto B.

Conforme já apresentado neste trabalho como "o princípio da autoperturbação", a corrente distorcida (I_h) drenada pela carga não linear irá provocar uma queda de tensão no circuito R_{eq}-X_{eq} série correspondente a cada componente harmônico nela presente, distorcendo assim a tensão no ponto B, que será aquela indicada matematicamente pela Equação (66).

$$V_B = V_A - \left(R_{eq} + jX_{eq}\right) x\ I_h \tag{66}$$

Os significados das variáveis indicadas na Equação (66) são os apresentados na Figura 39, e a letra "j" antes do X_{eq} indica que essa parcela está em quadratura com R_{eq}, não permitindo, por exemplo, a soma algébrica entre as quedas de tensão provocadas em R_{eq} e em X_{eq} pela corrente I_h. A determinação da queda de tensão na impedância ($Z_{eq} = R_{eq} + jX_{eq}$) devido a corrente I_h foi feita através da Equação (67) (OLIVEIRA, COGO, ABREU, 1984).

$$\Delta V_{Zeq} = \sqrt{\left(R_{eq}.I_h\right)^2 + \left(X_{eq}.I_h\right)^2} \tag{67}$$

Para a continuidade do estudo analítico da autoperturbação, faz-se necessário determinar os valores dessas variáveis, sendo que R_{eq} e X_{eq} são relativos ao transformador, V_A refere-se à tensão nominal de conexão da carga (e também à tensão secundária do transformador), e I_h refere-se à corrente drenada pela carga não linear, com todo seu conteúdo harmônico. A partir desses valores poderá, então, ser determinado o valor de V_B resultante, que será a tensão fornecida à carga, para a qual será determinada sua distorção harmônica total (THD_V).

Cabe destacar nesse momento que o valor máximo admissível para a THD_V na carga é de 5 % (cinco por cento), conforme já discutido neste trabalho quando foi tratado de normas e recomendações técnicas.

O ponto de partida para a determinação de R_{eq} e X_{eq} são os valores fornecidos pelos fabricantes de transformadores em sua "folha de dados", conforme apresentado no Anexo I para transformadores nas potências de 225 kVA, 300 kVA e 500 kVA, de um tradicional fabricante brasileiro (WEG, 2019). Essas potências foram escolhidas por serem os valores imediatamente superiores à soma das potências nominais dos equipamentos com operação simultânea, que resultou em 190 kVA. A conexão secundária do transformador é em estrela, com tensões em 380/220 V (tensão de linha / tensão de fase).

Apresentam-se na Tabela 19 os valores dos parâmetros necessários para a determinação do circuito equivalente do transformador, conforme as "folhas de dados" apresentadas no Anexo I, para as potências dos transformadores a serem aqui analisados. Destaca-se nesse ponto, que esses valores referem-se ao transformador trabalhando com cargas lineares, ou seja, existirá no transformador apenas a frequência fundamental, que neste caso é de 60 Hz.

Tabela 19 – Valores dos Parâmetros Necessários para a Determinação do Circuito Equivalente, por Potência do Transformador (60 Hz)

Parâmetros dos Transformadores	**Potência Nominal do Transformador**		
	225 kVA	**300 kVA**	**500 kVA**
Perdas a Vazio	650 W	700 W	1100 W
Perda Total	3260 W	3670 W	9800 W
Corrente de Excitação	2,1 %	1,9 %	1,8 %
Impedância Percentual	4,5 %	4,5 %	4,5 %

Fonte: WEG, 2019

O valor de R_{eq} poderá ser determinado a partir de valores da Tabela 19, através da Equação (68) e, conforme (OLIVEIRA, COGO, ABREU, 1984), com as seguintes considerações:

- As perdas em um transformador dividem-se em perdas no núcleo e perdas no cobre e, durante o ensaio de curto-circuito as perdas no núcleo podem ser desprezadas, pois praticamente toda a potência fornecida ao transformador estará sendo dissipada por efeito Joule nos seus enrolamentos;
- As perdas no cobre (isto é, nos enrolamentos dos transformadores) foram determinadas pela diferença entre a perda total, e as perdas a vazio. Vide Equação (69).

$$R_{eq} = \frac{P_{1\emptyset cobre}}{I_{2N}^2} \tag{68}$$

sendo:

R_{eq} é resistência equivalente monofásica referida ao secundário (em *ohms*);
$P_{1\emptyset cobre}$ são as Perdas no Cobre, por fase (em *watts*). É um terço da trifásica;
I_{2N} é o valor eficaz da corrente nominal no secundário no transformador (em *amperes*). A corrente de fase é igual à de linha, pois o secundário está na conexão estrela.

$$P_{1\emptyset cobre} = P_{1\emptyset total} - P_{1\emptyset vazio} \tag{69}$$

sendo:

$P_{1\emptyset cobre}$ são as Perdas no Cobre, por fase (em *watts*);
$P_{1\emptyset total}$ é a Perda Total, por fase (em *watts*);
$P_{1\emptyset vazio}$ são as Perdas a Vazio, por fase (em *watts*).

A corrente nominal no secundário (neste caso do lado de baixa tensão) do transformador, para o circuito equivalente monofásico aqui considerado, será dado pela Equação (70).

$$I_{2N} = \frac{S_{1\emptyset}}{V_{1\emptyset}} \tag{70}$$

sendo:

I_{2N} é o valor eficaz da corrente nominal no secundário no transformador (em *amperes*);
$S_{1\emptyset}$ é a potência nominal monofásica do transformador (em *volt-ampere*), ou seja, um terço da potência trifásica;
$V_{1\emptyset}$ é tensão de fase do secundário (em *volts*), ou seja, é a tensão de linha dividida por raiz de 3, pois a ligação secundária é estrela. Neste trabalho é de 220 V.

Assim, aplicando-se os valores apresentados na Tabela 19 às Equações (68), (69) e (70), foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 20, com destaque para os valores de R_{eq} dos transformadores considerados.

Tabela 20 – Valores Intermediários e de R_{eq} para o Circuito Equivalente Monofásico, por Potência do Transformador (60 Hz)

Parâmetros dos Transformadores	**Potência Nominal do Transformador**		
	225 kVA	**300 kVA**	**500 kVA**
$P_{1Øcobre}$	870 W	990 W	2900 W
I_{2N}	340,9 A	454,5 A	757,6 A
Req (60 Hz)	**0,00749 Ω**	**0,00479 Ω**	**0,00505 Ω**

Fonte: O Próprio Autor, 2019

O valor de X_{eq}, (MARTIGNONI, 1983; OLIVEIRA, COGO, ABREU, 1984), poderá ser determinado a partir da Equação (71).

$$X_{eq} = \sqrt{Z_{eq}^2 - R_{eq}^2} \tag{71}$$

sendo:

X_{eq} é a reatância equivalente por fase referida ao secundário do transformador (em *ohms*), para 60 Hz;

Z_{eq} é a impedância equivalente por fase referida ao secundário do transformador (em *ohms*), para 60 Hz;

R_{eq} é a resistência equivalente por fase referida ao secundário do transformador (em *ohms*), para 60 Hz, já determinada e apresentada na Tabela 20.

Resta então determinar previamente o valor de Z_{eq} para cada transformador, a partir da Equação (72), com o auxílio da Equação (73), conforme (OLIVEIRA, COGO, ABREU, 1984; OLIVEIRA, et al., 1996).

$$Z_{eq} = \frac{Z_{(\%)} \cdot Z_{2N}}{100} \tag{72}$$

sendo:

Z_{eq} é a impedância equivalente por fase referida ao secundário do transformador (em *ohms*), para 60 Hz;

$Z_{(\%)}$ é a impedância percentual (%) do transformador apresentada pelo fabricante (vide Tabela 19);

Z_{2N} é o valor da impedância equivalente referida ao secundário do transformador (em *ohms*), e determinada pela Equação (73), para 60 Hz.

$$Z_{2N} = \frac{V_{1\emptyset}^2}{S_{1\emptyset}} \tag{73}$$

sendo:

Z_{2N} é o valor da impedância equivalente referida ao secundário do transformador (em *ohms*);

$V_{1\emptyset}$ é tensão de fase do secundário (em *volts*), ou seja, é a tensão de linha dividida por raiz de 3, pois a ligação secundária é estrela. Neste trabalho é de 220 V;

$S_{1\emptyset}$ é a potência nominal monofásica do transformador (em *volt-ampere*), ou seja, um terço da potência trifásica.

Assim, aplicando-se os valores já conhecidos às Equações (71), (72) e (73), foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 21, com destaque para os valores de X_{eq} para dos transformadores considerados.

Tabela 21 – Valores Intermediários e de X_{eq} para o Circuito Equivalente Monofásico, por Potência do Transformador (60Hz)

Parâmetros dos Transformadores	**Potência Nominal do Transformador**		
	225 kVA	**300 kVA**	**500 kVA**
$Z_{(\%)}$	4,5 %	4,5 %	4,5 %
Z_{2N}	0,6453 Ω	0,4840 Ω	0,2904 Ω
Z_{eq}	0,02904 Ω	0,02178 Ω	0,01307 Ω
Xeq (60 Hz)	**0,02806 Ω**	**0,02125 Ω**	**0,01205 Ω**

Fonte: O Próprio Autor, 2019

Uma vez determinados os valores de $Req_{(60Hz)}$ e $Xeq_{(60Hz)}$, seus equivalentes deverão ser determinados para as diversas frequências contidas no espectro harmônico da corrente de carga. Entretanto, para simplificar o estudo analítico, o valor de $Req_{(60Hz)}$ foi considerado constante para todas as frequências, pois sua variação será muito pequena para a faixa de frequências aqui analisadas, sendo praticamente independente para essa faixa de frequências (DESMET, DELAERE, 2005), sendo então indicado apenas como Req.

Já o valor de Xeq irá variar conforme a frequência de cada componente harmônico presente na corrente da carga de ordem *h*, e será dado pela Equação (74).

$$Xeq_h = h\,.\,Xeq_{(60Hz)} \tag{74}$$

sendo:

Xeq_h é o valor da reatância equivalente referida ao secundário do transformador (em *ohms*), na frequência harmônica de ordem *h*;

h é a ordem da frequência harmônica, sendo *h* = 1 a frequência fundamental;

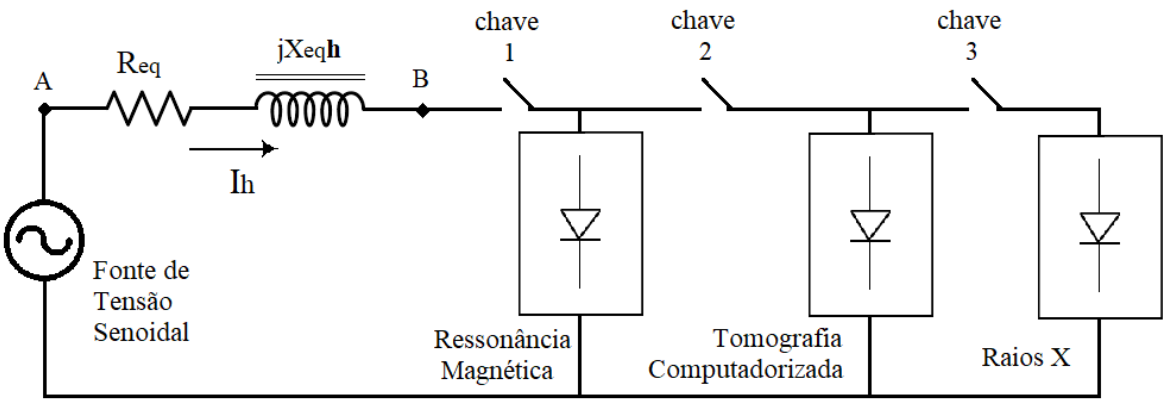
$Xeq_{(60Hz)}$ é o valor da reatância equivalente referida ao secundário do transformador (em *ohms*), na frequência fundamental. Está expressa na Tabela 21 para os transformadores em análise.

O Apêndice B apresenta as planilhas utilizadas para a realização dos cálculos de Req e $Xeq_{(60Hz)}$, utilizando-se das Equações (68) à (73), cujos resultados estão apresentados nas Tabelas 20 e 21.

3.2.2 Resultados do Estudo Analítico sobre a Autoperturbação por Harmônicos

O estudo analítico da autoperturbação aqui proposto consiste inicialmente na determinação da tensão no ponto comum de alimentação de cargas no interior dos hospitais. Ilustra-se na Figura 40 o circuito equivalente do transformador e as cargas a ele conectadas neste estudo. Em seguida, são determinados os parâmetros relativos à distorção harmônica da tensão no ponto B e outros parâmetros também relacionados às distorções nas correntes das cargas.

Figura 40 – Modelo de circuito equivalente para o estudo analítico da autoperturbação por harmônicos



Fonte: O Próprio Autor, 2019

Observa-se na Figura 40 que as três cargas são inseridas através do fechamento das chaves 1, 2 e 3. Este estudo considera o fechamento sequencial das chaves para a criação de três cenários de cargas, que são:

- Chave 1 fechada: Apenas a Ressonância Magnética estará ligada;

- Chaves 1 e 2 fechadas: A Ressonância Magnética e a Tomografia Computadorizada estarão ligadas;
- Chaves 1, 2 e 3 fechadas: A Ressonância Magnética, a Tomografia Computadorizada e o equipamento de Raio X estarão ligados.

Para cada um desses três cenários foi determinada a tensão no ponto B, de forma algébrica, através da Equação (66). Para a aplicação desta equação foram utilizados os valores de Req e $Xeq_{(60Hz)}$, conforme apresentado nas Tabelas 20 e 21 para transformadores com potências nominais de 225 kVA, 300 kVA e 500 kVA.

Os valores assumidos pela corrente de carga (I_h) para os três cenários de carga foram aqueles apresentados na Tabela 18 nas colunas Ressonância Magnética (apenas chave 1 fechada) e Total (chaves 1, 2 e 3 fechadas). Para o cenário com as chaves 1 e 2 fechadas, os valores de I_h serão aqueles resultantes da soma de cada um dos componentes harmônicos apresentados nas colunas Ressonância Magnética e Tomografia Computadorizada.

Para o valor de V_A da Equação (66) foi considerado o valor da tensão de fase puramente senoidal (neste caso será de 220 V), sendo este valor, portanto, correspondente ao valor de sua componente fundamental (V_{A1}), sendo nulas suas demais componentes (V_{A3}, V_{A5}, V_{A7}, ...).

Apresentam-se na Tabela 22 os valores de V_B obtidos para cada componente harmônico da tensão no ponto B mostrado na Figura 40 e também o valor da distorção harmônica total desta tensão para cada um dos cenários considerados.

Cumpre destacar que durante as medições do conteúdo harmônico da corrente, foram registrados valores até o 50º harmônico de cada uma das fases (vide Apêndice A). Entretanto, foram utilizados nesta análise os valores médios (entre os valores registrados para cada fase) dos harmônicos mais significativos presentes nas correntes, quais sejam os harmônicos ímpares até a 21ª ordem. Interharmônicos e supraharmônicos não foram registrados nas medições e, portanto, não foram considerados. Entende-se que uma vez comprovada a ocorrência da autoperturbação por harmônicos para os mais significativos, a ampliação do conteúdo harmônico apenas acentuará o fenômeno da autoperturbação então comprovado.

Analisando os resultados da Tabela 22 e considerando 5 % como o limite admissível da distorção harmônica de tensão no ponto B, observa-se que para o transformador de 225 kVA inicialmente projetado, a THD_V está de acordo com o limite admissível apenas quando a chave 1 estiver fechada, ou seja, apenas quando a ressonância magnética estiver em operação.

Mesmo estando sua potência nominal de 225 kVA acima da potência nominal das três cargas juntas (três cargas = 190 kVA nominais), o transformador de 225 kVA apresenta THD_V = 5,55 % quando a segunda carga (tomografia computadorizada) for conectada, e atinge THD_V = 8,17 % quando as três cargas estiverem operando. Os detalhes dos cálculos e os demais valores encontrados estão apresentados no Apêndice B.

Tabela 22 – Resultados do Estudo Analítico para a Tensão no Ponto Comum entre as Cargas, para Três Cenários Diferentes

Ordem dos Harmônicos na Tensão	**Potência Nominal do Transformador, Chaves Fechadas e Tensão V_B (V)**								
	225 kVA			**300 kVA**			**500 kVA**		
	1	**1+2**	**1+2+3**	**1**	**1+2**	**1+2+3**	**1**	**1+2**	**1+2+3**
1	218,33	215,10	213,95	218,7	216,32	215,46	219,25	217,79	217,28
3	0,20	1,96	2,62	0,15	1,48	1,98	0,09	0,85	1,13
5	1,86	3,96	5,48	1,40	3,00	4,15	0,80	1,71	2,36
7	1,54	5,06	7,78	1,16	3,83	5,89	0,66	2,18	3,34
9	0,30	4,60	5,92	0,23	3,48	4,49	0,13	1,98	2,55
11	0,45	5,37	7,44	0,34	4,07	5,64	0,19	2,31	3,20
13	0,58	6,20	7,52	0,44	4,69	5,69	0,25	2,66	3,23
15	0,27	0,99	3,28	0,20	0,75	2,48	0,12	0,43	1,41
17	0,76	1,91	4,87	0,57	1,45	3,69	0,33	0,82	2,09
19	0,75	1,67	4,18	0,57	1,27	3,17	0,32	0,72	1,80
21	0,33	1,13	3,02	0,25	0,86	2,28	0,14	0,49	1,30
THD_V (%)	**1,28**	**5,55**	**8,17**	**0,97**	**4,18**	**6,14**	**0,55**	**2,35**	**3,46**

Fonte: O Próprio Autor, 2019

Portanto, fica comprovada a existência da autoperturbação por harmônicos nessa condição de cargas e de potência do transformador.

Em princípio o transformador não deverá apresentar sobreaquecimento, pois a condição ora estudada considerou apenas 80% da potência demandada (para as situações típicas de funcionamento) pelos equipamentos em relação à potência nominal, fazendo com que a potência efetivamente demandada fosse de 152 kVA, para um transformador com potência nominal de 225 kVA.

O conceito de "potência equivalente", intrínseco ao conceito do Fator K (K_{EN}) já apresentado neste trabalho, foi útil para analisar os efeitos de sobreaquecimento desse transformador nesta condição de trabalho.

Para permitir essa análise, estão apresentados na Tabela 23 os valores obtidos para o K_{EN} nos três cenários de cargas ora analisados. O cálculo do K_{EN} é feito conforme a Equação (60), e está apresentado no Apêndice B esse cálculo detalhado, em forma de planilha.

Destaca-se aqui, o K_{EN} depende do conteúdo harmônico das cargas e de algumas características do transformador, tais como os fatores "e" e "q" (vide Equação (60)), que estão relacionados com o tipo de enrolamento dos transformadores (seção circular, retangular ou laminado), com a frequência, e outras características construtivas. Neste trabalho foram adotados os valores médios das faixas de valores sugeridas na literatura (EN 50464-3, 2007), resultando nos seguintes valores: $\boldsymbol{e}$ = 0,075 e $\boldsymbol{q}$ = 1,7.

Tabela 23 – Valores do Fator K (K_{EN}) para as Cargas, em Três Cenários Diferentes

Fator K	**Cenários de Cargas e Fator K Resultante**		
	RM	RM + TC	RM + TC + RX
$\boldsymbol{K_{EN}}$	***1,05***	***1,10***	***1,13***

Fonte: O Próprio Autor, 2019

Observa-se na Tabela 23 que para a condição de máxima carga, ou seja, quando estiverem operando simultaneamente a ressonância magnética (RM), a tomografia computadorizada (TC) e o equipamento de raio X (RX), o K_{EN} foi igual a 1,13.

O significado do K_{EN} refere-se à "potência equivalente" para um transformador operando com cargas não lineares. Aplicando este conceito para o caso em análise no qual a potência efetivamente demandada é de 152 kVA, a "potência equivalente" foi de 171,76 kVA (152 kVA x 1,13 – K_{EN}), que é inferior ao trafo de 225 kVA adotado. Visto de outra forma, o transformador de 225 kVA (com *K-factor* = 1) pode alimentar cargas de até 199,11 kVA (225 kVA / 1,13 – K_{EN}) sem que o mesmo apresente problemas de sobreaquecimento excessivo relacionado ao conteúdo harmônico da corrente de carga.

Portanto, o transformador de 225 kVA não apresentará sobreaquecimento excessivo nessa condição de uso, mesmo para os três equipamentos em operação simultânea. Porém, a *THD* da tensão em seu secundário ultrapassará o limite admissível de 5 % quando as duas primeiras cargas estiverem conectadas, ultrapassagem essa que será ainda maior quando da conexão da terceira carga, conforme mostrado na Tabela 22. Reitera-se assim, a existência da autoperturbação por harmônicos na saída do transformador.

No intuito de auxiliar na avaliação da autoperturbação por harmônicos quando da adoção de um transformador de 225 kVA para a situação em análise, apresenta-se na Tabela

24 os resultados dos indicadores da presença de distorção harmônica nas cargas, indicadores esses já apresentados neste trabalho, e aplicados à saída do transformador (ponto B), que é o ponto comum entre as cargas (vide Figura 40).

Estão destacados na Tabela 24 os valores da THD_V para os três cenários de carga analisados, pois este foi o parâmetro adotado inicialmente neste trabalho como referencial na análise da autoperturbação por harmônicos.

Tabela 24 – Indicadores de Distorção Harmônica nas Cargas para o Estudo de Caso Analisado, em Transformador de 225 kVA

Indicadores de Distorção Harmônica	**Cenários das Cargas**			**Método de Cálculo**
	RM	**RM + TC**	**RM + TC + RX**	
V_{RMS}	218,35 V	215,43 V	214,66 V	Equações (28) e (30)
$\boldsymbol{THD_V}$	**1,28 %**	**5,55 %**	**8,17 %**	Equação (32)
TDD	27,66 %	32,20 %	36,73 %	Equação (36)
DIN_V	1,28 %	5,54 %	8,14 %	Equação (37)
F_{HL}	1,93	2,58	2,96	Equação (53)
K_{UL}	0,11	1,80	3,71	Equação (55)
K_{EN}	1,05	1,10	1,13	Equação (60)
R_{Th}	0,75 %	2,08 %	2,43 %	Equação (52)

Fonte: O Próprio Autor, 2019

Apresentam-se na Tabela 25 os mesmos indicadores de distorções harmônicas para a mesma situação de carga, porém agora para um transformador de 300 kVA. Nesta tabela também está destacada a THD_V, por este ter sido o indicador adotado como referência. Nela também pode ser observado o comportamento dos indicados à medida que as cargas são inseridas, além de permitir uma análise comparativa entre os indicadores.

Tabela 25 – Indicadores de Distorção Harmônica nas Cargas para o Estudo de Caso Analisado, em Transformador de 300 kVA

Indicadores de Distorção Harmônica	**Cenários das Cargas**			**Método de Cálculo**
	RM	**RM + TC**	**RM + TC + RX**	
V_{RMS}	218,76 V	216,51 V	215,87 V	Equações (28) e (30)
$\boldsymbol{THD_V}$	**0,97 %**	**4,18 %**	**6,14 %**	Equação (32)
TDD	27,66 %	32,20 %	36,73 %	Equação (36)
DIN_V	0,97 %	4,17 %	6,13 %	Equação (37)
F_{HL}	1,93	2,58	2,96	Equação (53)
K_{UL}	0,06	1,01	2,09	Equação (55)
K_{EN}	1,05	1,10	1,13	Equação (60)
R_{Th}	0,56 %	1,59 %	1,88 %	Equação (52)

Fonte: O Próprio Autor, 2019

De modo semelhante, apresentam-se na Tabela 26 os mesmos indicadores, porém agora para um transformador de 500 kVA.

Tabela 26 – Indicadores de Distorção Harmônica nas Cargas para o Estudo de Caso Analisado, em Transformador de 500 kVA

Indicadores de Distorção Harmônica	**Cenários das Cargas**			**Método de Cálculo**
	RM	**RM + TC**	**RM + TC + RX**	
V_{RMS}	219,25 V	217,85 V	217,41 V	Equações (28) e (30)
$\boldsymbol{THD_V}$	**0,55 %**	**2,35 %**	**3,46 %**	Equação (32)
TDD	27,66 %	32,20 %	36,73 %	Equação (36)
DIN_V	0,55 %	2,35 %	3,45 %	Equação (37)
F_{HL}	1,93	2,58	2,96	Equação (53)
K_{UL}	0,02	0,36	0,75	Equação (55)
K_{EN}	1,05	1,10	1,13	Equação (60)
R_{Th}	0,34 %	0,98 %	1,18 %	Equação (52)

Fonte: O Próprio Autor, 2019

3.2.3 Considerações e Conclusões Parciais do Estudo Analítico

O estudo analítico da autoperturbação teve por principal objetivo verificar a ocorrência da autoperturbação por harmônicos através do comportamento da THD_V em diversos cenários de carga, para transformadores dimensionados através de critérios tradicionais.

A ocorrência da autoperturbação por harmônicos foi comprovada pelo fato da THD_V para o transformador de 225 kVA (dimensionado por critérios tradicionais) ter ultrapassado o limite admitido de 5 %, conforme apresentado na Tabela 24. Observa-se nessa tabela que a THD_V atingiu o valor de 8,17 % para o cenário no qual todas as cargas estão conectadas.

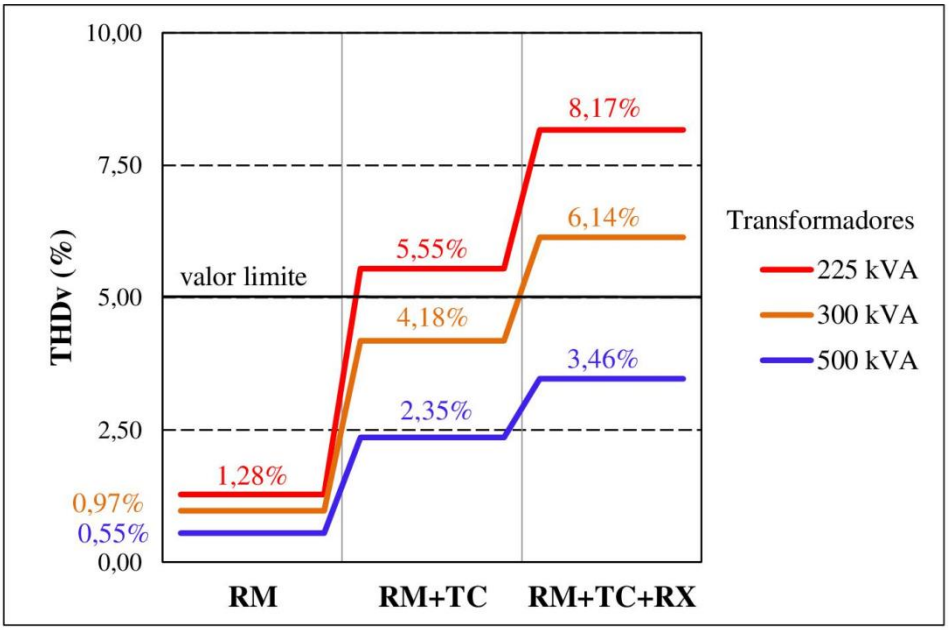
Na tentativa de reduzir a THD_V foram propostos dois outros transformadores, com potências comerciais imediatamente superiores, de 300 kVA e de 500 kVA, cujos indicadores de distorção harmônica obtidos estão apresentados nas Tabelas 25 e 26.

Observa-se na Tabela 25 que o transformador de 300 kVA apresenta uma THD_V = 6,14 % no cenário das três cargas conectadas, sendo este valor também superior ao limite admitido de 5 %.

Já para o transformador de 500 kVA (vide Tabela 26) o valor da THD_V foi de 3,46 % para o cenário onde as três cargas operam simultaneamente, ficando assim inferior ao limite admissível.

Apresenta-se na Figura 41 o comportamento da THD_V para os três cenários de cargas, e para cada transformador, de forma gráfica, permitindo uma análise comparativa.

Figura 41 – Comportamento da THD_V por transformador, para os três cenários de cargas do estudo analítico da autoperturbação



Fonte: O Próprio Autor, 2019

A partir desses dados, pode-se concluir que um dos métodos possíveis para se evitar a autoperturbação por harmônicos será o sobredimensionamento do transformador alimentador de cargas não lineares.

Através dos resultados apresentados nas Tabelas 24, 25 e 26, observa-se também que:

a) O valor da tensão eficaz (V_{RMS}) na saída do transformador diminui à medida que novas cargas são adicionadas, e que a faixa de diminuição é reduzida com o aumento da potência nominal dos transformadores. Esse fato já era esperado e é descrito pelo conceito de Regulação de Tensão, conforme apresentado na Equação (52);
b) O comportamento da THD_V demonstrou a existência da autoperturbação por harmônicos;
c) O valor da *TDD* variou com o acréscimo de cargas nos três cenários, porém manteve-se independente da potência dos transformadores. Este fato também já era espe-

rado, pois a *TDD* (vide Equação (36)) depende apenas do conteúdo harmônico da corrente de carga;

d) O valor DIN_V apresentou comportamento semelhante ao da THD_V, pois ambos são indicadores percentuais e a única diferença entre eles está na base de referência, sendo esta o valor eficaz total (com os harmônicos) para o DIN_V e o valor eficaz apenas da componente fundamental para o THD_V;

e) O comportamento do F_{HL} apresentou variação apenas com o aumento da carga, mostrando-se imune à potência dos transformadores. Através de análise da Equação (53) que o define poderá comprovar o fato verificado de que o F_{HL} depende apenas do conteúdo harmônico da carga. Portanto, esse fato já era esperado;

f) As variações apresentadas pelo *K-Factor* (K_{UL}) demonstram que ele é diretamente proporcional ao aumento da carga não linear e inversamente proporcional ao aumento da potência nominal do transformador. Se for considerado como sendo o limite do *K-Factor* o valor unitário (K_{UL} = 1,00), observa-se que para o transformador de 225 kVA (Tabela 24), o mesmo apresentou valor acima da unidade (K_{UL} = 1,80) também quando da inserção da segunda carga, e valor ainda maior (K_{UL} = 3,71) quando da inserção simultânea das três cargas. Admitido o valor unitário como limite e as três cargas em operação, o K_{UL} apresentou valor admissível apenas para o transformador de 500 kVA. Apesar dessa aparente correlação com a Autoperturbação, o $K_{UL} > 1,0$ indica apenas a relação existente entre o conteúdo harmônico da corrente de carga com a corrente nominal do transformador – vide Equação (55), com o objetivo de evitar sobreaquecimento do mesmo. Portanto, o K_{UL} não se relaciona diretamente com o nível de distorção harmônica na tensão fornecida pelo transformador;

g) O indicador K_{EN} apresentou-se sensível ao aumento de carga e insensível ao aumento da potência dos transformadores. Isso ocorreu porque foram admitidas que as características construtivas dos transformadores (enrolamentos com seção circular, retangular, laminada, etc.) foram mantidas constantes para todas as potências de transformadores. Além disso, pela análise da Equação (60) poderá ser identificado que ele depende fortemente do conteúdo harmônico da corrente de carga. Entretanto, o K_{EN} é muito útil para a análise do sobredimensionamento de transformadores (com K_{UL} = 1,0) alimentando cargas não lineares;

h) A Regulação de Tensão (R_{Th}) é definida classicamente para transformadores operando com componentes senoidais. Entretanto, este conceito (vide Equação (52)) foi

utilizado fazendo com que a tensão na saída do transformador fosse o seu valor eficaz total (com seus componentes harmônicos). Seu comportamento apresentou variação crescente com o aumento de carga e decrescente com o aumento da potência dos transformadores. Entretanto, até o momento, não foi possível correlacionar um limite de R_{Th} para a autoperturbação por harmônicos.

Portanto, o estudo analítico da autoperturbação possibilitou a demonstração de sua ocorrência, tendo como referência o valor admissível para a distorção harmônica de tensão.

3.3 Simulação Computacional e Análise da Autoperturbação

Embora o estudo analítico da autoperturbação tenha sido efetuado a partir de dados de transformadores comerciais, nele foi utilizado apenas o circuito equivalente monofásico do transformador, não tendo sido incluídos outros elementos presentes em sistemas trifásicos reais, tais como impedâncias próprias das redes elétricas e o efeito de saturação dos transformadores. Nesta seção, apresenta-se um estudo que considera também esses elementos.

Para introduzir os efeitos desses elementos, neste trabalho foi realizada a simulação computacional através da modelagem dos elementos presentes no sistema elétrico alimentador dos mesmos equipamentos de diagnóstico por imagem já analisados.

No desenvolvimento de modelos para o estudo de harmônicos foram considerados inicialmente dois pontos fundamentais: i) a extensão do sistema elétrico a ser analisado, e; ii) se o modelo será um equivalente monofásico ou trifásico (DUGAN, et al., 2003).

Neste trabalho foi adotado um modelo trifásico, com extensão desde a geração perfeitamente senoidal até às cargas não lineares, ou seja, inclui as impedâncias do sistema elétrico à montante do *PAC*, o transformador, e as impedâncias dos alimentadores das cargas não lineares, conforme apresentado mais adiante.

3.3.1 O Software Utilizado

O software escolhido para simulação foi o programa *Alternative Transient Program* (*ATP*), frequentemente utilizado para a simulação digital de fenômenos eletromagnéticos. Mais especificamente, foi utilizada sua interface gráfica denominada *ATPDraw*, que funciona como um pré-processador do *ATP* (MARINHO, et al., 2012).

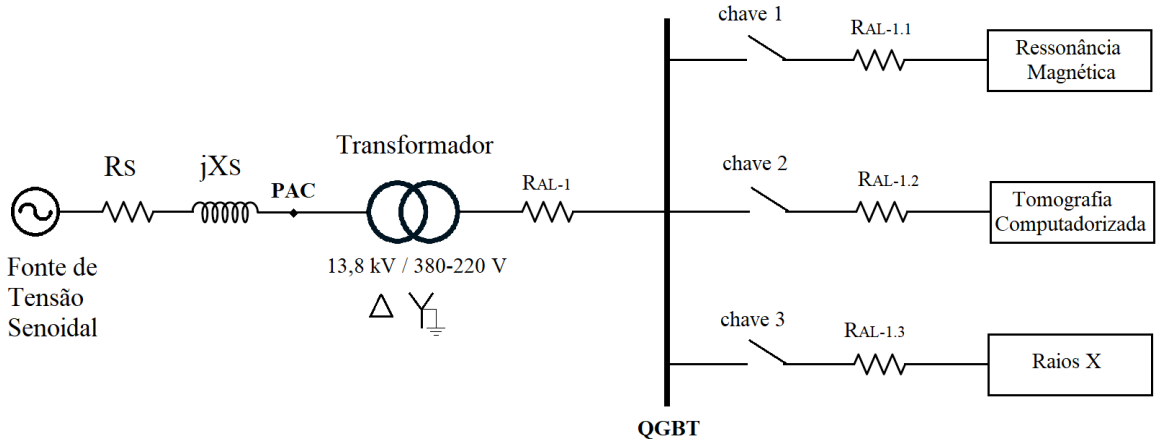
O *ATPDraw* é um software livre, bastante intuitivo, que possibilita a inserção direta de componentes trifásicos pré-definidos, com o fornecimento dos parâmetros para a configuração do modelo de cada componente (NUNES, 2007; SILVA, 2014). Neste trabalho foi utilizada a versão 5.9 do *ATPDraw*.

3.3.2 O Sistema Elétrico Estudado

Conforme já mencionado, o sistema elétrico estudado considera o trecho do sistema elétrico compreendido desde uma fonte de tensão senoidal até as cargas sob análise, considerando as impedâncias no trecho à montante do *PAC*, do transformador, e dos alimentadores das cargas não lineares utilizadas neste estudo.

Apresenta-se na Figura 42 o diagrama unifilar do sistema elétrico trifásico utilizado na simulação computacional.

Figura 42 – Diagrama unifilar do sistema elétrico utilizado na simulação computacional



Fonte: O Próprio Autor, 2019

Como pode ser observado na Figura 42, à jusante do transformador delta-estrela aterrado, o sistema é composto por um alimentador até o Quadro Geral de Baixa Tensão (QGBT), a partir do qual tem origem os alimentadores individuais para cada um dos equipamentos analisados.

Os valores de R_S e X_S a montante do *PAC* utilizados neste estudo referem-se aos dados do prédio do Hospital das Clínicas de Bauru (já mencionado neste trabalho), que foram fornecidos pela CPFL – Companhia Paulista de Força e Luz (concessionária local de energia elétrica), estão apresentados da Tabela 27, e constam do documento "Relatório de Curto Circuito" da CPFL apresentado no Anexo II.

Tabela 27 – Valores das Impedâncias do Sistema Elétrico Analisado até o *PAC*

Impedâncias (sequências)	**Impedância (R_S + j X_S)**
$Z^1 = Z^2$	0,4924 + j 2,2085 Ω
Z^0	1,8342 + j 5,3383 Ω

Fonte: CPFL, 2014 (Anexo II)

Os valores das impedâncias estão indicados através de suas "componentes simétricas" (vide ROBBA, 1977), sendo que os valores Z^1 e Z^2 correspondem às sequências positiva e negativa respectivamente, e o valor Z^0 corresponde à sequência zero. Esses valores serão inseridos diretamente no modelo computacional desenvolvido.

Para o transformador serão analisados três valores de potência nominal, de forma similar ao efetuado no estudo analítico, cujas potências foram 225 kVA, 300 kVA e 500 kVA. Os parâmetros iniciais para cada um desses transformadores foram obtidos nas folhas de dados dos fabricantes apresentadas no Anexo I.

Já para os alimentadores indicados na Figura 42 através de suas resistências R_{AL-1}, $R_{AL-1.1}$, $R_{AL-1.2}$ e $R_{AL-1.3}$, os mesmos foram obtidos através do catálogo de um tradicional fabricante de cabos elétricos, que está reproduzido no Anexo III. Como características dos cabos que constituem esses alimentadores, foram adotados cabos não halogenados (que apresentam baixa emissão de fumaça em caso de incêndio) e com isolação para 1 kV, conforme preconizam a norma de instalações elétricas em locais com afluência de público (NBR 13570, 1996).

As seções transversais (também chamadas de "bitolas") dos alimentadores e suas respectivas resistências estão apresentadas na Tabela 28.

Cumpre destacar que o comprimento do alimentador entre o transformador e o QGBT (R_{AL-1}) é de 10 (dez) metros, e o comprimento dos alimentadores das cargas ($R_{AL-1.1}$, $R_{AL-1.2}$ e $R_{AL-1.3}$) é de 50 (cinquenta) metros cada um, entre as cargas e o QGBT.

Outro ponto a destacar é que o alimentador do QGBT (R_{AL-1}) foi dimensionado para a capacidade total do transformador e, portanto, teve sua "bitola" aumentada com o aumento da potência do transformador, enquanto que as "bitolas" dos alimentadores das cargas foram mantidas as mesmas, pois estas não foram alteradas.

Tabela 28 – Dimensionamento dos Alimentadores de Baixa Tensão e suas Resistências, Conforme Figura 42

Alimentador	**Transformadores, Seção e Resistência dos Condutores**		
	225 kVA	**300 kVA**	**500 kVA**
R_{AL-1}	2 x 150 mm²/fase 0,000845 Ω	2 x 240 mm²/fase 0,000549 Ω	2 x 500 mm²/fase 0,000317 Ω
$R_{AL-1.1}$	35 mm² 0,035350 Ω	35 mm² 0,03535 Ω	35 mm² 0,03535 Ω
$R_{AL-1.2}$	95 mm² 0,013300 Ω	95 mm² 0,01330 Ω	95 mm² 0,01330 Ω
$R_{AL-1.3}$	25 mm² 0,049750 Ω	25 mm² 0,04975 Ω	25 mm² 0,04975 Ω

Fonte: O Próprio Autor, 2019

Outro detalhe importante na determinação dos dados do R_{AL-1} apresentado na Tabela 28, é que o mesmo foi constituído por 2 (dois) cabos por fase, ou seja, dois circuitos trifásicos em paralelo, fato que resulta numa resistência equivalente cujo valor é metade da resistência de um circuito simples.

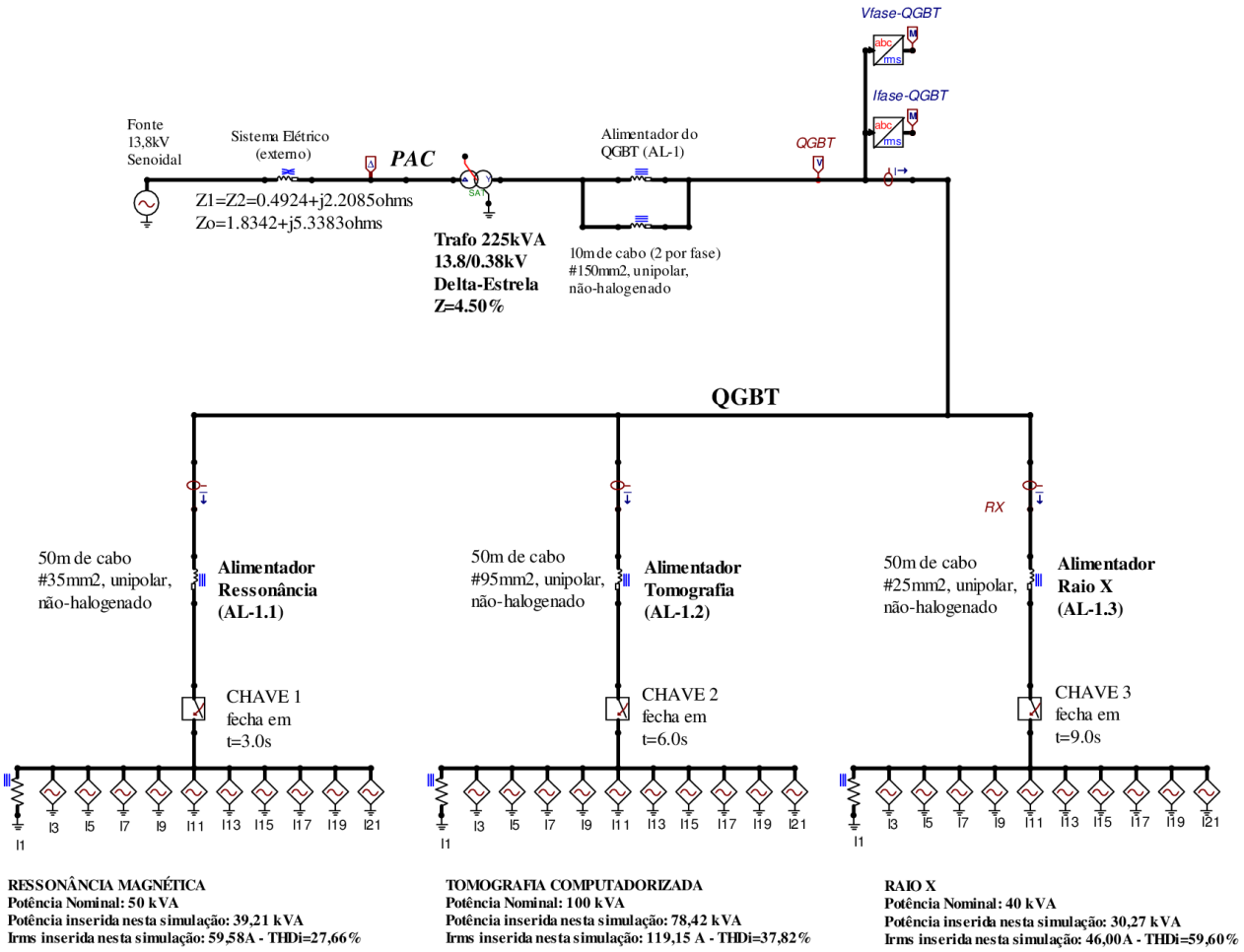
As chaves 1, 2 e 3, de forma similar ao apresentado no estudo analítico da autoperturbação, promovem a conexão sequencial das cargas, criando aqueles mesmos três cenários de cargas que serão aqui novamente analisados, quais sejam:

- Chave 1 fechada: Apenas a Ressonância Magnética estará ligada;
- Chaves 1 e 2 fechadas: A Ressonância Magnética e a Tomografia Computadorizada estarão ligadas;
- Chaves 1, 2 e 3 fechadas: A Ressonância Magnética, a Tomografia Computadorizada e o equipamento de Raios X estarão ligados.

3.3.3 O Modelamento do Sistema Elétrico Estudado

Apresenta-se na Figura 43 o modelo computacional completo, trifásico, elaborado através do software *ATPDraw*, para simular o sistema elétrico apresentado na Figura 42.

Figura 43 – Modelo computacional completo em *ATPDraw*, elaborado para simular o sistema elétrico analisado



Fonte: O Próprio Autor, 2019

É apresentado na Figura 43 o modelo utilizado para o transformador de 225 kVA, tendo sido o mesmo modelo utilizado para os transformadores de 300 kVA e 500 kVA, com os devidos ajustes nos parâmetros dos transformadores e no alimentador do QGBT (AL-1). Os outros parâmetros para essas situações estão apresentados no Apêndice C.

Os modelos (e seus parâmetros) para cada componente do sistema elétrico, conforme a Figura 43 estão apresentados da Figura 44 até a Figura 51.

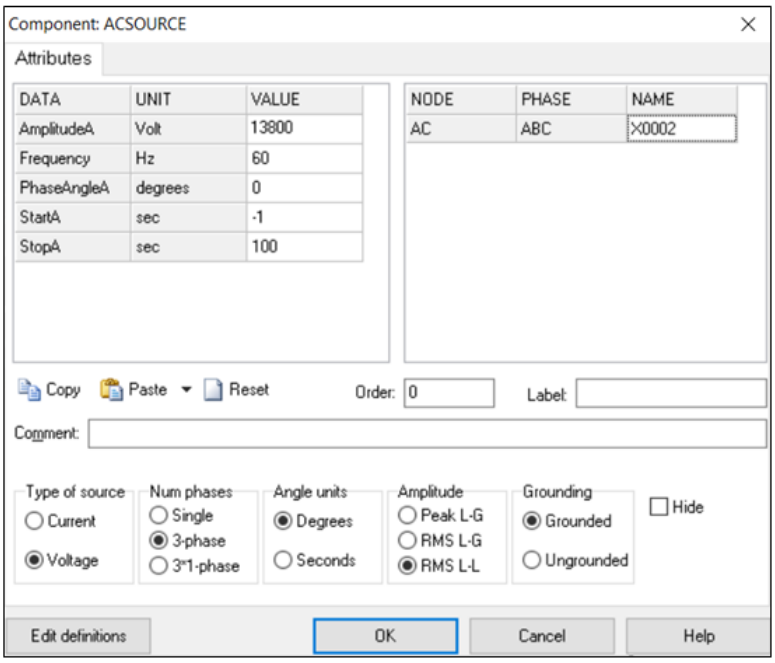
Iniciando-se pela fonte de tensão senoidal, trifásica, o software *ATPDraw* disponibiliza o bloco denominado “ACSOURCE” selecionado como “fonte de tensão”, cuja representação é mostrada na Figura 44.

Trata-se de uma fonte de tensão senoidal trifásica, em 60 Hz, com tensão eficaz entre fases de 13800 V, pois esta é a tensão de fornecimento no *PAC*.

Apresenta-se na Figura 44a o símbolo gráfico do bloco “ACSOURCE” selecionado como “fonte de tensão” e na Figura 44b sua tela de configuração.

Figura 44 – (a) Símbolo gráfico do bloco “ACSOURCE” utilizado no *ATPDraw* como fonte de tensão senoidal e, (b) sua tela de parâmetros

(a) Símbolo do Bloco ACSOURCE (fonte de tensão)



(b) Tela com Parâmetros do Bloco ACSOURCE

Fonte: O Próprio Autor através do *ATPDraw*

O *ATPDraw* disponibiliza para cada tela de configuração uma opção de “ajuda” (*Help* em inglês) com instruções sobre como preencher cada parâmetro apresentado pelo bloco. Esta opção pode ser vista na Figura 44b, no canto inferior direito. O conteúdo da “ajuda” para o bloco “ACSOURCE” está reproduzido no Anexo III.

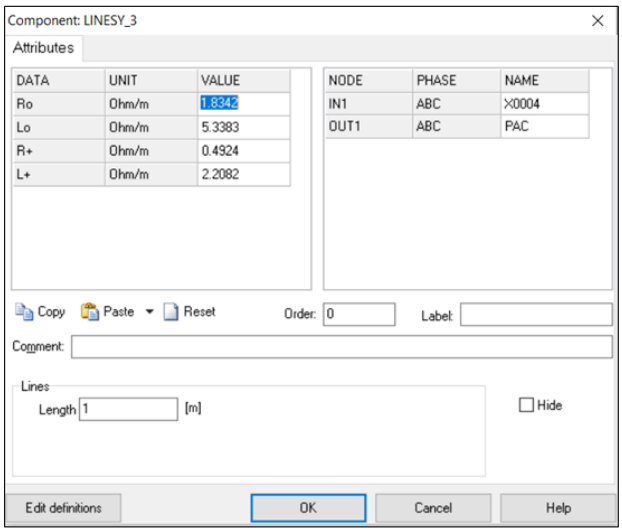
O bloco seguinte é aquele que representa as impedâncias do sistema elétrico entre a fonte de tensão senoidal e o *PAC*, conforme apresentado na Figura 43.

Como apresentado na Tabela 27, as impedâncias do sistema elétrico foram fornecidas pela concessionária de energia (CPFL) e estão expressas em componentes simétricas, com seus valores para as sequências positiva, negativa e zero. Para possibilitar a representação dessas características, o *ATPDraw* disponibiliza o bloco “LINESY_3”, conforme apresentado na Figura 45.

Apresenta-se na Figura 45a o símbolo gráfico do bloco “LINESY_3” e na Figura 45b sua tela de configuração.

Figura 45 – (a) Símbolo gráfico do bloco “LINESY_3” utilizado no *ATPDraw* como a impedância do sistema elétrico até o *PAC* e, (b) sua tela de parâmetros

(a) Símbolo do Bloco LINESY_3



(b) Tela com Parâmetros do Bloco LINESY_3

Fonte: O Próprio Autor através do *ATPDraw*

O conteúdo da “ajuda” para o bloco “LINEY_3” está reproduzido no Anexo III.

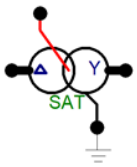
Observa-se na Figura 45b, que os dados de R_o (e R_+) e L_o (e L_+) deverão ser inseridos em “ohms/m”, e ainda que na parte inferior esquerda da tela está presente o item “Lenght” (comprimento) da linha em análise. Considerando que os dados fornecidos pela CPFL são os valores totais, esses dados foram lançados diretamente nesta tela e o comprimento da linha foi considerado como sendo unitário, fazendo assim com que o software considere o valor apresentado como valor total de R_o (e R_+) e L_o (e L_+). Obviamente o subíndice “o” refere-se aos valores de sequência nula e o subíndice “+” refere-se aos valores de sequência positiva, conforme apresentado na Tabela 27, com o destaque que as sequências positiva e negativa apresentam os mesmos valores.

Observando a Figura 43 novamente e percorrendo o modelo no sentido da fonte para as cargas, o próximo bloco, imediatamente à jusante do *PAC*, é o bloco do transformador, que na figura consta como sendo de 225 kVA.

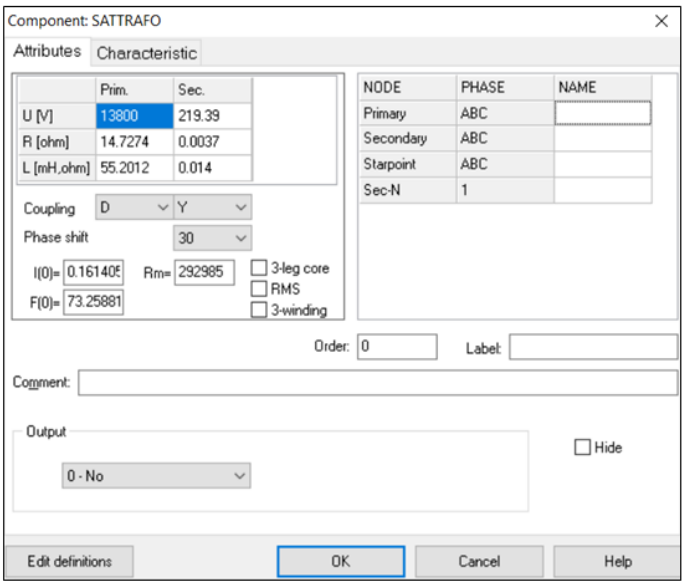
Para tornar o modelo o mais próximo possível de um transformador real, é desejável que o modelo adotado permita avaliar também a propriedade de saturação dos transformadores. Para representar também essa característica dos transformadores, o *ATPDraw* disponibiliza o bloco “SATTRAFO”, conforme apresentado na Figura 46.

Apresenta-se na Figura 46a o símbolo gráfico do bloco “SATTRAFO” e na Figura 46b sua tela de configuração.

Figura 46 – (a) Símbolo gráfico do bloco “SATTRAFO” utilizado no *ATPDraw* como modelamento do transformador e, (b) sua tela de parâmetros



(a) Símbolo do Bloco SATTRAFO



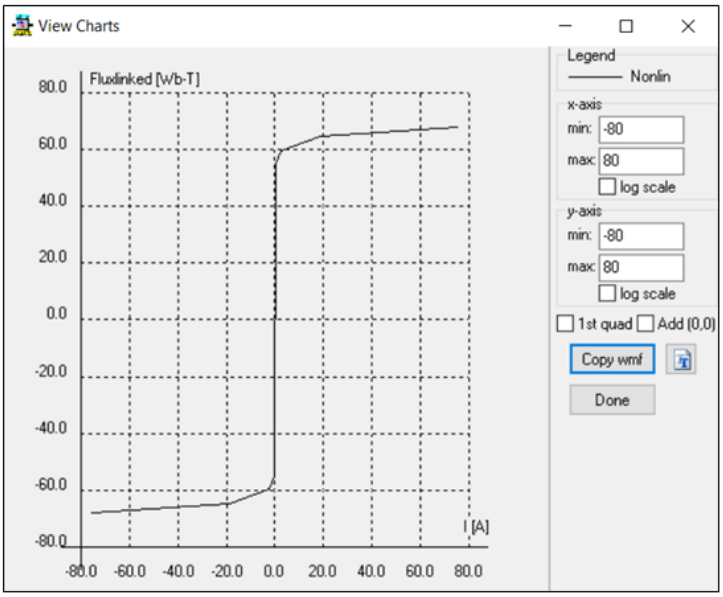
(b) Tela com Parâmetros do Bloco SATTRAFO

Fonte: O Próprio Autor através do *ATPDraw*

O conteúdo da “ajuda” para o bloco “SATTRAFO” está reproduzido no Anexo III.

Este bloco considera a saturação do transformador, a qual foi parametrizada conforme detalhado no Apêndice C, cuja curva de saturação está apresentada na Figura 47, curva esta disponibilizada pelo *ATPDraw*.

Figura 47 – Curva de saturação parametrizada no bloco SATTRAFO utilizado no modelo computacional do *ATPDraw*



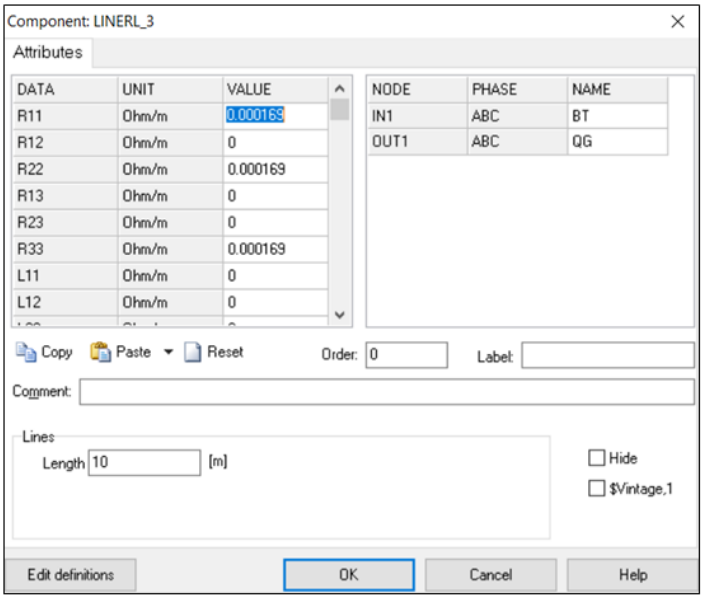
Fonte: O Próprio Autor através do *ATPDraw*

Os detalhes dos cálculos dos parâmetros dos transformadores utilizados neste estudo estão apresentados no Apêndice C, e foram determinados através de metodologia apresentada por (SANTILIO, et al., 2012) que está parcialmente reproduzida no Anexo III.

O modelo computacional implementado no *ATPDraw* corresponde a um circuito trifásico e o bloco adotado para simular os alimentadores é o bloco LINERL_3, que está apresentado na Figura 48.

Figura 48 – (a) Símbolo gráfico do bloco "LINERL_3" utilizado no *ATPDraw* como modelamento dos alimentadores e, (b) sua tela de parâmetros

(a) Símbolo do Bloco LINERL_3



(b) Tela com Parâmetros do Bloco LINERL_3

Fonte: O Próprio Autor através do *ATPDraw*

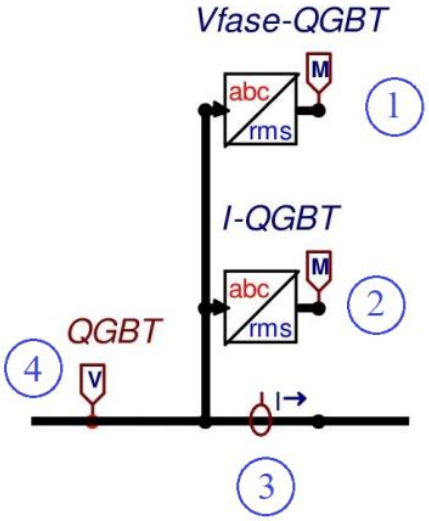
A tela de parâmetros apresentada na Figura 48b refere-se a um dos cabos de bitola 150 mm² que interliga do transformador ao QGBT (AL-1). Observa-se nesta figura que foram considerados apenas a resistência própria de cada condutor (indicado por R11, R22 e R33), seu valor unitário em "ohm/m", e como "Length" (comprimento), seu valor correspondente, que neste caso é de 10 (dez) metros. O valor apresentado na Tabela 28 para este alimentador (transformador de 225 kVA) é o resultado da associação em paralelo de dois desses cabos, pois foram utilizados dois cabos por fase.

O conteúdo da "ajuda" para o bloco "LINERL_3" está reproduzido no Anexo III.

Para possibilitar a leitura dos parâmetros a serem analisados, foram introduzidos 4 (quatro) medidores no QGBT, conforme apresentado na Figura 49.

Os medidores 1 e 2 apresentam, respectivamente, os valores da tensão de fase e da corrente na entrada do QGBT, expressos em valores eficazes. O medidor 3 é um sensor de corrente e apresenta a forma de onda da corrente no ponto em que foi inserido.

Figura 49 – Medidores utilizados no *ATPDraw* para coleta dos dados necessários



Fonte: O Próprio Autor através do *ATPDraw*

O medidor 4 apresenta a forma de onda da tensão de fase na entrada do QGBT.

Destaca-se que os medidores utilizados têm capacidade para apresentar simultaneamente seus valores para as três fases, porém, neste trabalho serão apresentados os valores das respectivas grandezas apresentadas pelos medidores, obtidos para a fase “A” do sistema trifásico.

Para finalizar a apresentação do modelo computacional da Figura 43 resta descrever o modelamento das cargas não lineares.

Conforme proposto por (DUGAN, et al., 2003; SILVA, 2014; SILVA, LEBORGNE, BARROZO, 2017) o modelamento das cargas não lineares foi realizado utilizando-se de fontes de corrente devidamente parametrizadas para cada componente harmônico.

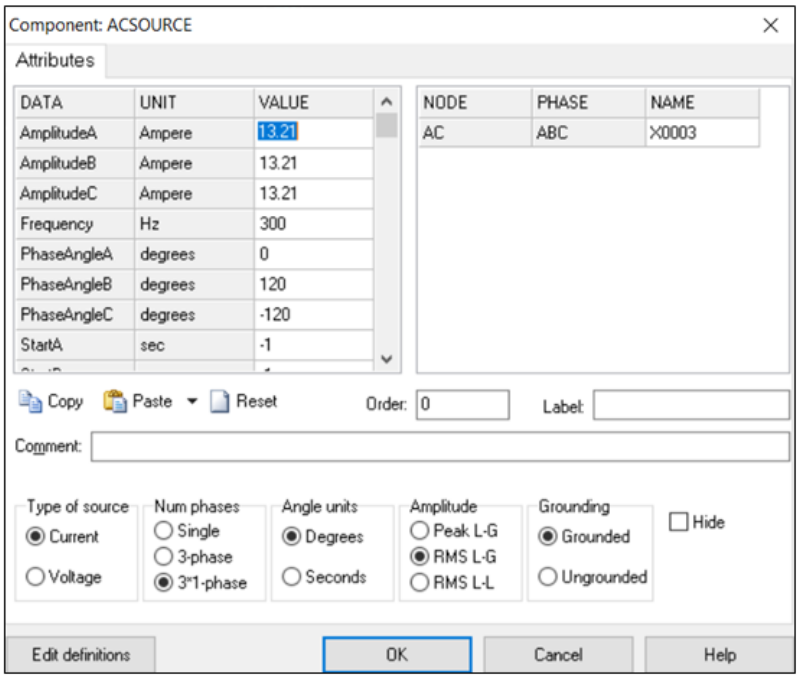
Para representar a potência ativa drenada pelas cargas (frequência fundamental), foi introduzido um resistor em paralelo às fontes de correntes harmônicas, resistor este calculado para drenar a corrente fundamental obtida na medição de cada um dos equipamentos. Essa configuração está representada na Figura 43 para as três cargas analisadas.

Para possibilitar a representação de uma fonte de corrente trifásica na frequência de cada componente harmônicos, o *ATPDraw* disponibiliza o bloco denominado “ACSOURCE” selecionado como “fonte de corrente”, cuja representação está apresentada na Figura 50.

Apresenta-se na Figura 50a o símbolo gráfico do bloco “ACSOURCE” selecionado como “fonte de corrente” e na Figura 50b sua tela de configuração.

Figura 50 – (a) Símbolo gráfico do bloco “ACSOURCE” utilizado no *ATPDraw* como fonte de corrente harmônica e, (b) sua tela de parâmetros

(a) Símbolo do Bloco ACSOURCE (fonte de corrente)



(b) Tela com Parâmetros do Bloco ACSOURCE

Fonte: O Próprio Autor através do *ATPDraw*

O conteúdo da “ajuda” para o bloco “ACSOURCE” também está reproduzido no Anexo III.

Como pode ser observado na Figura 50b, cada bloco ACSOURCE permite a inserção de uma frequência diferente da fundamental; permite a inserção de correntes com amplitudes diferentes entre as fases (neste caso serão iguais); e também permite a inserção do ângulo de sequência de fase. Neste trabalho a ordem dos harmônicos e suas respectivas sequências de fase serão conforme apresentado na Tabela 2, sendo o ângulo de fase de 120° (cento e vinte graus). Está indicado na Figura 50b que o bloco está parametrizado com 13,21 A como corrente nas fases, a frequência é de 300 Hz (5º harmônico), e a sequência de fase é Negativa (vide Figura 9), pois os ângulos estão na sequência: 0º → +120° → -120°.

Apresenta-se na Tabela 29 conjuntamente os valores (eficazes) das correntes harmônicas de cada equipamento analisado e também seus correspondentes ângulos de fase, que foram utilizados nas simulações computacionais desenvolvidas neste trabalho.

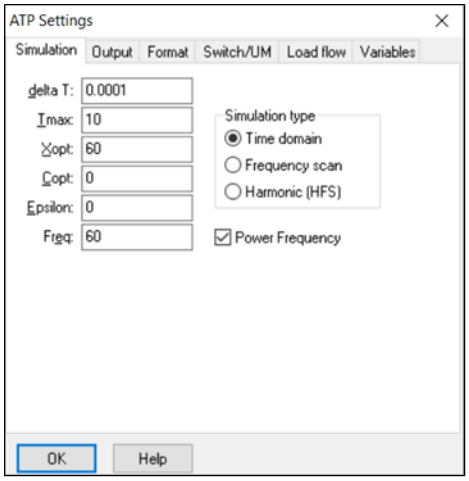
Tabela 29 – Valores dos Conteúdos Harmônicos das Correntes e Seus Correspondentes Ângulos de Fase Utilizados nas Simulações Computacionais

Ordem dos Harmônicos da Corrente	Raios X (A)	Tomografia Computadorizada (A)	Ressonância Magnética (A)	Ângulo na Fase A	Ângulo na Fase B	Ângulo na Fase C
1	39,51	111,44	57,42	0º	-120°	120º
3	7,80	20,87	2,35	0º	0º	0º
5	10,81	14,99	13,21	0º	120º	-120°
7	13,82	17,95	7,81	0º	-120°	120º
9	5,24	17,02	1,19	0º	0º	0º
11	6,72	15,94	1,45	0º	120º	-120°
13	3,61	15,39	1,60	0º	-120°	120º
15	5,43	1,72	0,64	0º	0º	0º
17	6,20	2,41	1,59	0º	120º	-120°
19	4,70	1,73	1,41	0º	-120°	120º
21	3,20	1,36	0,56	0°	0°	0°

Fonte: O Próprio Autor, 2019

Concluída a parametrização dos componentes do modelo computacional apresentado na Figura 43, foram também configurados alguns critérios de simulação, conforme apresentado na Figura 51.

Figura 51 – Tela de configuração de critérios de simulação utilizados no *ATPDraw*



Fonte: O Próprio Autor através do *ATPDraw*

O conteúdo da "ajuda" para a tela "ATP Settings" mostrado na Figura 51 está reproduzido no Anexo III.

Finalizando a apresentação do modelo utilizado, cumpre destacar que o período de simulação considerado foi de 10 (dez) segundos, sendo a primeira carga inserida no instante t = 3 segundos com o fechamento da chave 1 (Figura 43) e acionamento da ressonância magnética, que permaneceu conectada ao sistema até o final da simulação. De modo semelhante foram conectadas ao modelo a tomografia computadorizada no instante t = 6 segundos, permanecendo conectada, e no instante t = 9 segundos foi conectado o raio X, que também permaneceu conectado até o final da simulação.

3.3.4 Resultados da Simulação Computacional

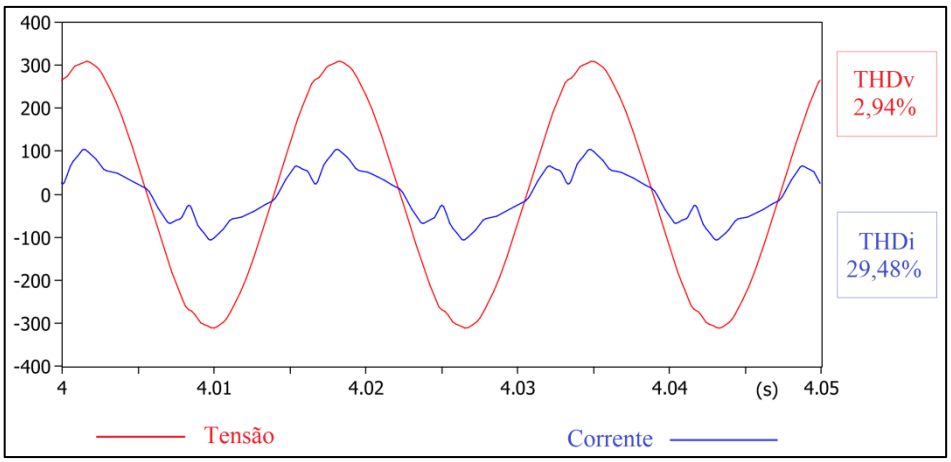
A simulação computacional realizada neste trabalho tem como principal objetivo verificar a ocorrência da autoperturbação por harmônicos no sistema elétrico estudado. Para atingir esse objetivo, após a simulação, foi analisado o comportamento da tensão no quadro geral de distribuição em baixa tensão (QGBT) para cada um dos cenários de cargas simulados e também para cada um dos transformadores analisados.

Mais especificamente, foi analisada a distorção harmônica total (*THD*) da tensão no QGBT, pois, conforme já mencionado neste trabalho, este foi o critério de análise da autoperturbação por harmônicos.

Entretanto, a simulação computacional efetuada possibilitou outras visualizações, tais como as formas de onda das tensões e das correntes presentes no modelo simulado.

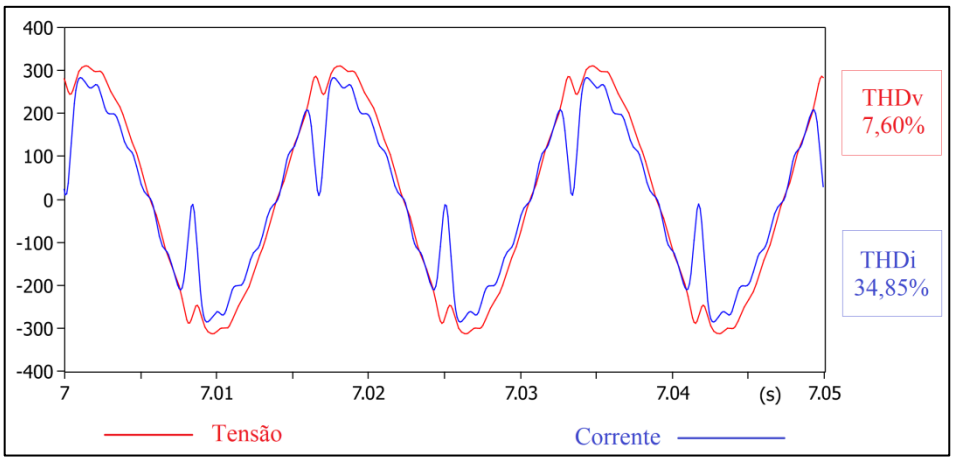
Como exemplo das formas de onda obtidas através das simulações, apresentam-se nas Figuras 52, 53 e 54 as foram de onda da tensão e da corrente para cada um dos cenários de carga, quando alimentados através do transformador de 225 kVA.

Figura 52 –Formas de onda da tensão e da corrente obtidas na simulação, para o transformador de 225 kVA alimentando apenas a ressonância magnética



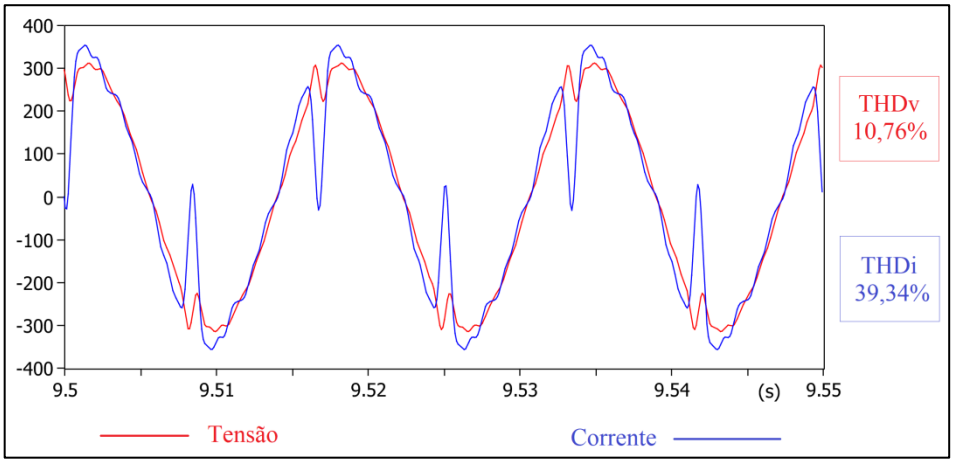
Fonte: O Próprio Autor através do *ATPDraw* 5.9, 2014

Figura 53 –Formas de onda da tensão e da corrente obtidas na simulação, para o transformador de 225 kVA alimentando a ressonância magnética e a tomografia computadorizada, simultaneamente



Fonte: O Próprio Autor através do *ATPDraw* 5.9, 2014

Figura 54 –Formas de onda da tensão e da corrente obtidas na simulação, para o transformador de 225 kVA alimentando a ressonância magnética, a tomografia computadorizada, e o raio X, simultaneamente

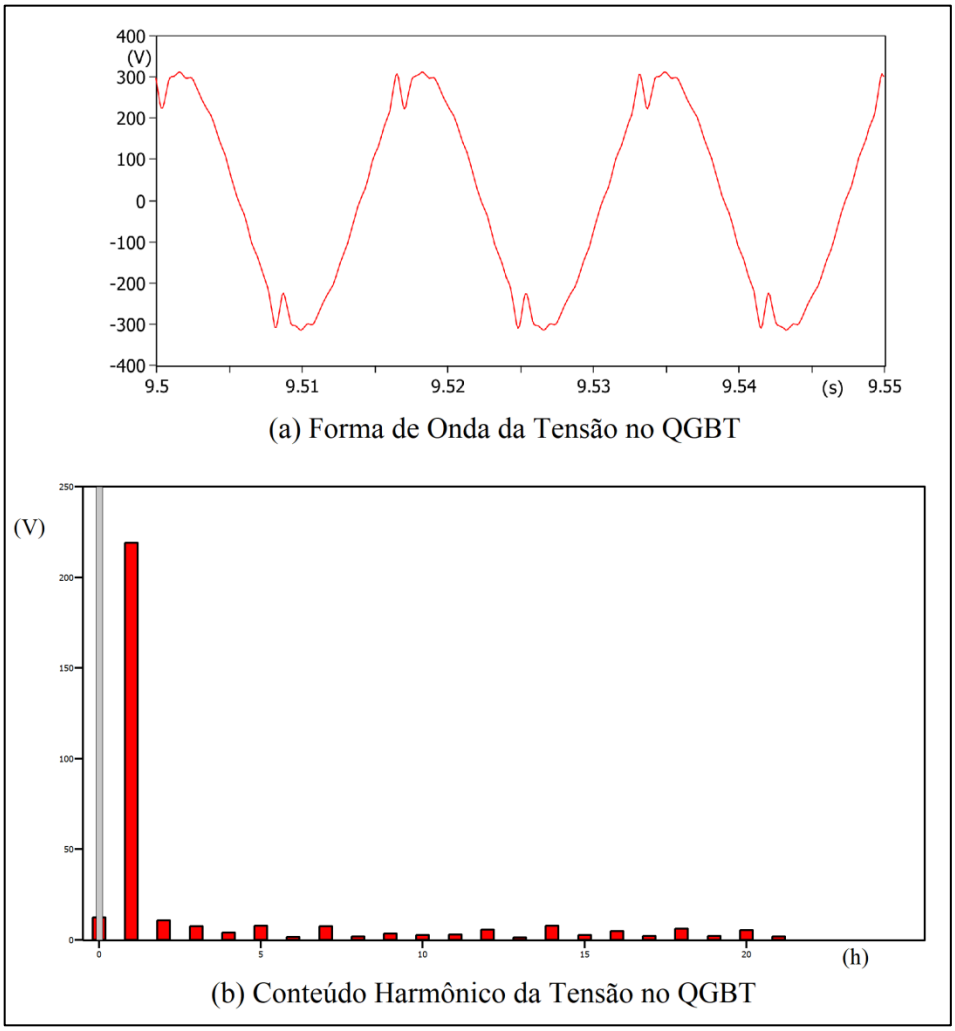


Fonte: O Próprio Autor através do *ATPDraw* 5.9, 2014

Observando as formas de onda dessas três figuras, nota-se certa correlação temporal entre as formas de onda da tensão e corrente, especialmente na Figura 54 onde “picos” e “vales” na forma de onda da corrente apresentam-se praticamente sobrepostos aos “picos” e “vales” da forma de onda da tensão. E também se observa que os valores para a THD_V nela apresentados são superiores aos valores encontrados no estudo analítico, que está apresentado na Tabela 22, na coluna do transformador de 225 kVA.

Considerando-se agora apenas o cenário no qual os três equipamentos estão em operação simultânea, é apresentada na Figura 55 a forma de onda da tensão e o seu conteúdo harmônico, destacando-se que nesse cenário foi observado o maior valor na *THD* da tensão no QGBT.

Figura 55 –Forma de onda da tensão e seu conteúdo harmônico, obtidos na simulação, para o transformador de 225 kVA alimentando a ressonância magnética, a tomografia computadorizada, e o raio X, simultaneamente



Fonte: O Próprio Autor através do *ATPDraw* 5.9, 2014

Observa-se na Figura 55b que existem componentes harmônicos pares na tensão, valores esses não introduzidos nos modelos das cargas (foram introduzidos apenas harmônicos ímpares – vide Tabela 18), e também que o modelo computacional apresenta uma componente harmônica zero (h = 0), correspondente a um valor de corrente contínua, o qual não foi considerado neste trabalho.

São apresentados na Tabela 30, na coluna (1+2+3) para o transformador de 225 kVA, os valores numéricos dos harmônicos representados na Figura 55b em forma de gráfico.

Todos os resultados obtidos através de simulação computacional para a distorção de tensão no QGBT estão apresentados na Tabela 30, para os três transformadores, e para os três cenários de carga analisados e descritos anteriormente. Nela pode ser observado o comportamento de cada harmônico presente na tensão e também o valor da THD_V para cada situação simulada computacionalmente.

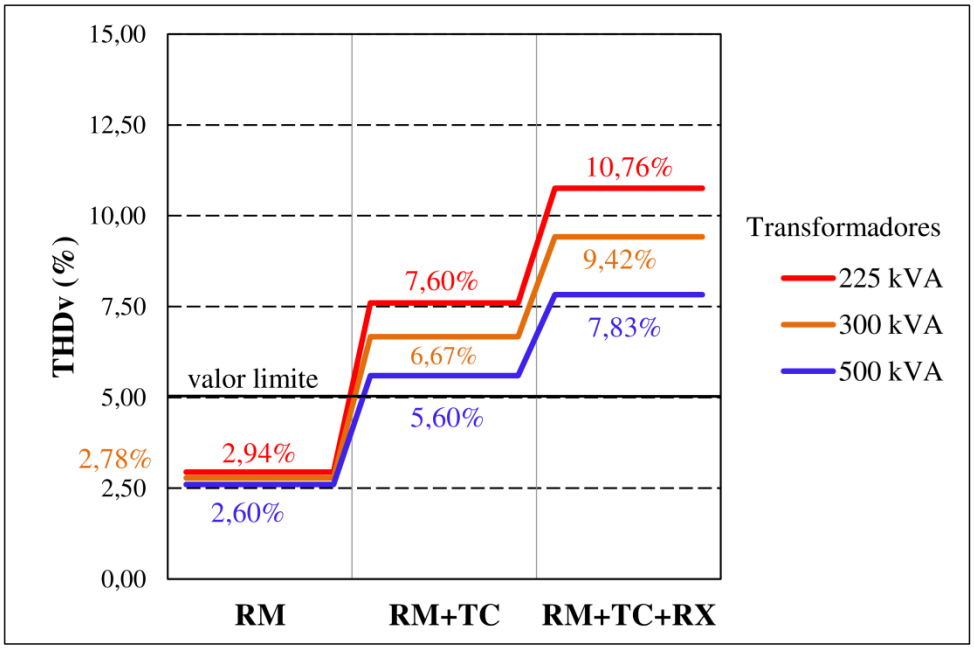
Tabela 30 – Resultados da Simulação Computacional para a Tensão no QGBT, para Três Cenários Diferentes de Cargas

Ordem dos Harmônicos na Tensão	**Potência Nominal Transformador, Chaves Fechadas e Tensão QGBT (V)**								
	225 kVA			**300 kVA**			**500 kVA**		
	1	**1+2**	**1+2+3**	**1**	**1+2**	**1+2+3**	**1**	**1+2**	**1+2+3**
1	219,55	219,28	218,77	219,7	219,60	219,17	219,69	219,35	218,84
2	4,13	7,91	10,74	4,15	8,01	10,87	4,16	8,12	11,03
3	2,22	5,72	7,50	2,19	5,27	6,96	2,14	4,68	6,24
4	1,53	3,10	3,96	1,51	2,98	3,87	1,47	2,87	3,80
5	2,92	6,16	7,74	2,47	5,12	6,44	1,86	3,72	4,68
6	0,82	1,73	1,59	0,83	1,66	1,69	0,85	1,62	1,92
7	2,10	5,97	7,31	1,76	4,81	5,86	1,31	3,21	3,85
8	0,42	0,24	1,85	0,50	0,44	1,45	0,54	0,79	1,32
9	0,66	4,20	3,39	0,63	3,30	2,62	0,59	2,07	1,63
10	0,41	0,53	2,63	0,43	0,35	2,01	0,46	0,53	1,39
11	0,74	3,85	2,87	0,66	3,03	2,16	0,56	1,88	1,19
12	0,30	2,21	5,60	0,33	1,71	4,47	0,37	1,14	2,95
13	0,73	2,63	1,14	0,63	2,02	0,66	0,50	1,17	0,10
14	0,21	4,80	7,78	0,25	3,81	3,28	0,29	2,44	4,14
15	0,39	1,55	2,45	0,36	1,25	2,02	0,33	0,90	1,49
16	0,21	1,91	4,81	0,23	1,53	3,91	0,27	1,06	2,63
17	0,72	0,72	2,00	0,58	0,54	1,65	0,42	0,41	1,22
18	0,27	2,46	6,15	0,26	2,01	5,09	0,25	1,40	3,47
19	0,49	0,94	2,14	0,40	0,77	1,82	0,30	0,59	1,37
20	0,50	2,42	5,26	0,42	2,01	4,42	0,32	1,42	3,06
21	0,13	1,09	1,76	0,16	0,92	1,52	0,20	0,72	1,19
***THD_V* (%)**	**2,94**	**7,60**	**10,76**	**2,78**	**6,67**	**9,42**	**2,60**	**5,60**	**7,83**

Fonte: O Próprio Autor, 2019

Apresenta-se na Figura 56 o comportamento da THD_V para os três cenários de cargas, e para cada transformador, de forma gráfica, para os valores contidos na Tabela 30.

Figura 56 – Comportamento da THD_V por transformador, para os três cenários de cargas, oriundo da simulação computacional sobre a autoperturbação



Fonte: O Próprio Autor, 2019

A simulação computacional realizada através do *ATPDraw* possibilita a medição da *THD* na tensão de qualquer parte do modelo construído. Assim, para permitir também outra análise comparativa, são apresentados na Tabela 31 os valores da THD_V no *PAC*.

Tabela 31 – Resultados da Simulação Computacional para a *THD* da Tensão no *PAC*, para Três Cenários Diferentes de Cargas

Distorção Harmônica Total no *PAC*	**Potência Nominal Transformador, Chaves Fechadas e THD_V no *PAC***								
	225 kVA			**300 kVA**			**500 kVA**		
	1	**1+2**	**1+2+3**	**1**	**1+2**	**1+2+3**	**1**	**1+2**	**1+2+3**
THD_V (%)	2,86	3,76	4,80	2,86	3,76	4,80	2,86	3,76	4,80

Fonte: O Próprio Autor, 2019

Analisando-se a Tabela 31 observa-se que os valores da *THD* da tensão no *PAC* não variam com a alteração da potência dos transformadores, mas apenas com o aumento da carga não linear inserida nos secundários dos transformadores. Isto demonstra que a distorção da tensão no *PAC* está relacionada com impedância do sistema elétrico à montante e também com o conteúdo harmônico da corrente drenada pelas cargas.

3.3.5 Considerações e Conclusões Parciais da Simulação Computacional

O parâmetro principal a ser avaliado na análise da autoperturbação por harmônico é a distorção harmônica total da tensão no QGBT, que é comum às três cargas nele conectadas, conforme apresentado na Figura 42.

Analisando-se o comportamento da THD_V para os três cenários e para os transformadores com potências nominais diferentes, conforme apresentado na Tabela 30 e na Figura 56, observa-se que este parâmetro aumenta à medida que novas cargas são inseridas em um mesmo transformador, e que seus valores diminuem à medida que a potência nominal do transformador se eleva. Por exemplo, para o cenário onde as três cargas estão conectadas, os valores de THD_V encontrados por transformador foram:

- THD_V = 10,76 %.....transformador de 225 kVA;
- THD_V = 9,42 %.....transformador de 300 kVA;
- THD_V = 7,83 %.....transformador de 500 kVA.

Esse comportamento inversamente proporcional da distorção total na tensão com o aumento da potência do transformador é similar ao verificado no estudo analítico. Entretanto, os valores da THD_V encontrados na simulação computacional são todos superiores aos verificados no estudo analítico.

Observou-se que a introdução de novos elementos no circuito utilizado na simulação computacional, tais como as impedâncias presentes no sistema elétrico e o efeito da saturação nos transformadores, resultou em maior distorção na forma de onda da tensão no QGBT. Esse resultado corrobora o princípio da autoperturbação já discutido neste trabalho.

Destaca-se que foram observados valores para a THD_V (no cenário com as três cargas inseridas) superiores ao valor inicialmente adotado como limite máximo (5 %) para os três transformadores. Dito de outra forma, o sobredimensionamento do transformador não foi eficaz em reduzir a distorção de tensão ao nível desejado, sinalizando a existência de outros fatores relevantes no processo de distorção dessa tensão.

Diante deste fato, cabe refletir novamente sobre o limite admissível para a THD_V em pontos no interior da instalação. Até o momento, foi admitido o valor mais restritivo apresentado por normas e recomendações técnicas, conforme apresentado na Tabela 14.

Nesta tabela observa-se que o valor mais restritivo foi de 5 % (apresentado pela *IEC*), e que o valor mais permissivo foi de 10 % (apresentado pela *ANEEL – PRODIST*), e que esses valores são referidos ao *PAC* para tensões de fornecimento de até 1 kV.

O valor mais restritivo foi o incialmente adotado neste trabalho para pontos no interior da instalação. Entretanto, de acordo com a ANEEL – PRODIST, o limite de 10 % (dez por cento) na THD_V será admissível.

Outro ponto a ser destacado é o comportamento da THD_V no *PAC* (não mais no QGBT), conforme apresentado na Tabela 31. Também no *PAC* a distorção total da tensão apresentou-se diretamente proporcional ao aumento das cargas não lineares. Entretanto, seus valores apresentaram-se invariantes com o aumento da potência nominal dos transformadores, indicando assim sua dependência direta das correntes das cargas, não tendo sido observada sua correlação com a potência nominal dos transformadores.

Portanto, conclui-se que a simulação computacional confirmou a ocorrência da autoperturbação por harmônicos e demonstrou que a impedância do sistema elétrico e as características de saturação dos transformadores acentuam sua ocorrência, produzindo distorções ainda maiores na forma de onda da tensão no QGBT.

3.4 Indicador de Autopertubação por Harmônicos

Uma vez comprovada a ocorrência da autoperturbação por harmônicos no interior de uma instalação elétrica hospitalar e conhecendo-se, conforme já discutido neste trabalho, os potenciais efeitos negativos da presença de harmônicos nessa instalação, é proposto neste trabalho um indicador que permite ao gestor das instalações hospitalares operacionalizar o controle da autoperturbação, mantendo-a em níveis admissíveis.

Como visto até aqui, o parâmetro de verificação da autoperturbação por harmônicos utilizado foi a distorção harmônica total da tensão (THD_V). Porém, esse parâmetro impõe algumas dificuldades práticas para o gestor (ou projetista) das instalações elétricas, dentre elas destacam-se:

a) A THD_V resulta da interação da corrente das cargas não lineares com o sistema elétrico no qual estão inseridas;
b) A quantificação da THD_V em cada situação somente poderá feita através de estudo analítico, simulação computacional, ou através de medição direta após a instalação das cargas não lineares;
c) Para a medição direta da THD_V será necessário equipamento apropriado, nem sempre disponível.

Mesmo com a disponibilidade de um medidor apropriado da THD_V, sua medição apenas poderá ser feita com os equipamentos médicos já instalados e em operação, fazendo com que este indicador seja útil para o controle da autoperturbação de uma instalação existente, porém não o será para ações preventivas, exigidas quando de novos projetos ou ainda quando da conexão de um novo equipamento em instalações elétricas existentes.

3.4.1 Proposta de Indicador de Autopertubação por Harmônicos

No intuito de auxiliar o gestor (e o projetista) de instalações hospitalares na avaliação da autoperturbação por harmônicos, propõe-se neste trabalho um indicador aqui denominado de Índice de Autoperturbação por Harmônicos (*IAH*), que está apresentado na Equação (75).

$$IAH = \frac{1}{I_{nom_trafo(60Hz)}} \sqrt{\sum_{h>1}^{hmáx} I_{RMS-h}^2} \tag{75}$$

sendo:

IAH é o índice de autoperturbação por harmônicos;
$I_{nom_trafo(60Hz)}$ é o valor da corrente nominal do transformador em 60 Hz;
h indica a ordem do componente harmônico;
I_{RMS-h} é o valor eficaz da corrente do componente harmônico de ordem *h*;
$h_{máx}$ indica a ordem do maior componente harmônico considerado.

Observa-se na Equação (75) que o *IAH* considera o conteúdo harmônico contido na corrente das cargas, e também um componente do sistema elétrico, que está representado na Equação (75) pela corrente nominal do transformador. A introdução dessa corrente faz com que o índice seja adimensional. O *IAH* também poderá ser expresso em porcentagem, multiplicando-se por 100 (cem) o resultado apresentado pela Equação (75).

Nota-se que o *IAH* proposto é muito semelhante à distorção total na demanda, apresentado pela Equação (36), diferenciando-se dela pela corrente de referência (utilizada no denominador das duas equações). Enquanto na *TDD* o denominador refere-se à corrente máxima drenada pela carga, no *IAH* o denominador refere-se à corrente nominal do transformador operando em 60 Hz.

Assim, as parcelas que compõem o *IAH* poderão ser conhecidas do gestor (e do projetista) antes dos equipamentos serem instalados, permitindo assim sua determinação, e avaliação prévia da autoperturbação por harmônicos.

3.4.2 Resultados do Indicador de Autoperturbação por Harmônicos Proposto, para os Casos Analisados

Apresentam-se na Tabela 32 os valores do *IAH* obtidos a partir do conteúdo harmônico dos equipamentos de ressonância magnética, de tomografia computadorizada e de raios X (vide Tabela 18), para três cenários de carga, e para cada potência nominal de transformador analisado.

Tabela 32 – Resultados Obtidos para o *IAH* para Três Cenários Diferentes de Cargas

Indicador de Autoperturbação por Harmônicos	**Potência Nominal Transformador, Cenário de Cargas e o *IAH***								
	225 kVA			**300 kVA**			**500 kVA**		
	1	**1+2**	**1+2+3**	**1**	**1+2**	**1+2+3**	**1**	**1+2**	**1+2+3**
IAH (%)	4,66	15,95	22,45	3,50	11,96	16,84	2,10	7,18	10,10

Fonte: O Próprio Autor, 2019

Observa-se na Tabela 32 que os valores dos *IAH* apresentam comportamento semelhante ao obtido para a *THD* da tensão no QGBT apresentado na Figura 41 (do estudo analítico) e na Figura 56 (da simulação computacional).

A semelhança no comportamento está no fato de que os valores do *IAH* aumentam para um mesmo transformador à medida que novas cargas são inseridas, e diminuem para um mesmo cenário de cargas com o aumento da potência nominal do transformador.

Esse comportamento é importante, pois torna o *IAH* um indicador similar ao THD_V, porém com a possibilidade de ser determinado sem a necessidade de estudo analítico ou simulação computacional, mas apenas conhecendo-se o conteúdo harmônico das cargas e da corrente nominal do transformador operando em sua frequência nominal, que no caso deste trabalho é de 60 Hz.

Porém, mesmo apresentando comportamento semelhante ao da distorção total de tensão no ponto sob análise (QGBT), resta estabelecer qual seria o valor limite admissível para o *IAH*, a partir do qual se poderá atingir uma distorção harmônica na tensão indesejada no ponto sob análise.

3.4.3 Análise Comparativa entre o Indicador de Autoperturbação por Harmônicos Proposto e a Distorção Harmônica Total

Com o objetivo de determinar os valores admissíveis para o Índice de Autoperturbação por Harmônicos (*IAH*), será apresentada uma análise comparativa entre seus valores e os encontrados para a THD_V no estudo analítico e também na simulação computacional.

Apresentam-se na Tabela 33 os valores de *IAH* e os correspondentes valores da distorção harmônica total para os três cenários de cargas, e por potência por transformador.

Tabela 33 – Resultados Obtidos para o *IAH* para Três Cenários Diferentes de Cargas e as Correspondentes THD_V Determinadas pelo Estudo Analítico e por Simulação Computacional

Indicador de Autoperturbação por Harmônicos	**Potência Nominal Transformador, Cenário de Cargas e o *IAH***								
	225 kVA			**300 kVA**			**500 kVA**		
	1	**1+2**	**1+2+3**	**1**	**1+2**	**1+2+3**	**1**	**1+2**	**1+2+3**
THD_V (%) (analítico)	1,28	5,55	8,17	0,97	4,18	6,14	0,55	2,35	3,46
THD_V (%) (computacional)	2,94	7,60	10,76	2,78	6,67	9,42	2,60	5,60	7,83
***IAH* (%)**	**4,66**	**15,95**	22,45	**3,50**	**11,96**	**16,84**	**2,10**	**7,18**	**10,10**

Obs.: Valores em **azul** atendem à IEC 61000-2-4, à IEEE 519 e à ANEEL – Módulo 8, enquanto os valores em **verde** atendem apenas à ANEEL. Em **preto** a nenhuma delas.

Fonte: O Próprio Autor, 2019

A primeira análise feita neste trabalho foi através do estudo analítico, sendo admitido inicialmente um valor de THD_V de 5 %. Os valores indicados na cor azul (Tabela 33) são os valores admitidos para a THD_V até esse limite e seus correspondentes valores de *IAH*. No estudo analítico o maior valor de *IAH* encontrado que produz menos de 5 % na distorção total de tensão foi o valor 11,96 %. Portanto, para as condições analisadas no estudo analítico, um valor máximo admissível para o *IAH* seria em torno de 12 %.

A segunda análise feita neste trabalho foi através da simulação computacional, sendo admitido no final do estudo, conforme preconizado pela *ANEEL – PRODIST*, um valor de THD_V admissível de até 10 %. Os valores indicados na cor verde (Tabela 33) são os valores admitidos para a THD_V obtidos na simulação computacional. Por esses critérios, o maior valor de *IAH* encontrado foi 16,84 %. Portanto, para as condições analisadas na simulação computacional, um valor máximo admissível para o *IAH* seria em torno de 17 %.

Considerando-se o valor de 5 % como o limite a ser atendido também na análise computacional, observa-se na Tabela 33 que o *IAH* máximo deverá ser ligeiramente inferior a

7,18 %, pois para este valor (transformador de 500 kVA e cargas 1+2) a THD_V obtida foi de 5,60 %, ou seja, um pouco superior ao limite admitido de 5 %. Assim, pode-se admitir que um *IAH* máximo da ordem de 7 % atenderá ao preconizado por todas as normas quanto à THD_V.

3.4.4 Considerações e Conclusões Sobre o Indicador de Autoperturbação por Harmônicos Proposto

Inicialmente deve ser definido sob qual instrumento normativo se estará sujeito e, portanto, qual será o valor máximo admissível para a THD_V, pois esse valor varia de 5 % (preconizado pela *IEC*), passa por 8 % (preconizado pelo IEEE), e chega até 10 % (preconizado pela *ANEEL – PRODIST*).

Observa-se na Tabela 33 (e nas considerações sobre ela) que, um valor de $IAH \leq 7$ % equivale a valores da THD_V resultante que atendem aos limites admissíveis tanto pela *IEC*, pelo *IEEE*, como pela *ANEEL-PRODIST*; e valores de *IAH* entre 7 % e 17 % ($7\ \% < IAH \leq 17\ \%$) equivale a valores THD_V resultante que atendem ao preconizado pela *ANEEL – PRODIST*. Valores de $IAH > 17$ % equivalem a valores da THD_V resultante acima dos limites preconizados pelas normas e recomendação técnicas.

Sugere-se a partir dessa análise que um valor máximo do *IAH* de 7 % seja o mais indicado para situações que envolva o projeto de novas instalações ou nas quais existam cargas sensíveis a harmônicos conectadas no mesmo transformador. Por outro lado, para situações onde serão aproveitados transformadores já instalados e nas quais as demais cargas ligadas ao mesmo transformador sejam menos sensíveis ao conteúdo harmônico na tensão, o valor de *IAH* poderá atingir o valor de até 17 %.

CAPÍTULO 4
RESULTADOS E DISCUSSÕES

A investigação realizada neste trabalho baseia-se em estudo de caso no qual foi analisado o impacto de três equipamentos de diagnóstico por imagem na distorção da forma de onda da tensão no interior de uma instalação hospitalar.

Os três equipamentos considerados foram um equipamento de raio X, um equipamento de tomografia computadorizada, e um equipamento de ressonância magnética, os quais foram escolhidos porque, conforme apresentado na revisão bibliográfica realizada, são equipamentos que apresentam elevado conteúdo harmônico na corrente drenada por cada um deles.

Conforme metodologia utilizada, após o levantamento e medições realizadas na corrente elétrica dessas cargas, foram efetuados estudos analítico e computacional, e proposto um indicador para a Autoperturbação por harmônicos, cujos resultados parciais já foram apresentados.

Neste capítulo são analisados tais resultados de forma mais ampla e sob os seguintes aspectos:

- Aspecto 1: Tempo de Operação dos Equipamentos;
- Aspecto 2: Característica do Transformador Alimentador;
- Aspecto 3: Indicadores de Distorção Harmônica;
- Aspecto 4: Indicador de Autoperturbação por Harmônicos;
- Aspecto 5: Influência das Características do Sistema Elétrico à montante do *PAC* na Autoperturbação por Harmônicos.

4.1 Aspecto 1: Tempo de Operação dos Equipamentos

Durante o levantamento de campo efetuado, foram obtidos os parâmetros apresentados na Tabela 34. Os valores apresentados nessa tabela para a distorção harmônica total na corrente (THD_i) confirmaram que as correntes drenadas por esses equipamentos apresentam alto conteúdo harmônico (acima de 30%) e que a duração dos exames (período no qual elas exigem maior potência da rede) foi da ordem de alguns segundos ou de poucos minutos.

Na análise dos impactos dessas cargas no sistema elétrico que as alimenta, devem ser consideradas também as recomendações contidas nas publicações técnicas sobre os limites admitidos. Por exemplo, os valores limites estabelecidos para a distorção harmônica total da

tensão (THD_V) apresentados na Tabela 9 (pelo *IEEE*) e na Tabela 12 (pela *ANEEL*), deverão ser atendidos durante a maior parte do tempo, como em 99% do tempo de um dia ou 95% do tempo de uma semana. Portanto, os limites apresentados por essas tabelas admitem que os mesmos sejam ultrapassados durante curtos períodos, como em 1% de um dia (ou 864 segundos ≈ 14,4 minutos) ou em 5% de uma semana (30240 segundos ≈ 8,4 horas).

Tabela 34 – Parâmetros Obtidos Junto aos Equipamentos de Diagnóstico por Imagem

Equipamento	**Potência Nominal**	**Fator de Potência (deslocamento)**	THD_i	**Duração do Exame (segundos)**
Raio X	40 kVA	0,774	64,3 %	1,5
Tomografia Computadorizada	100 kVA	0,974	38,4 %	30
Ressonância Magnética	50 kVA	0,919	31,3 %	120

Fonte: O Próprio Autor, 2019

Tomando como exemplo o período admitido de 864 segundos admitido para a ultrapassagem dos valores preconizados para a THD_V em um dia, e o período de 120 segundos de exame do equipamento ressonância magnética, a partir do oitavo exame (846 s / 120 s por exame = 7,2 exames) o limite preconizado seria ultrapassado. Ou seja, o atendimento ao preconizado pelas publicações técnicas para a THD_V imporia uma restrição ao uso do equipamento médico.

Outra observação importante é que mesmo que as ultrapassagens dos limites preconizados pelas publicações técnicas, provocados pela Autoperturbação por harmônicos, ocorressem dentro do curto período admissível, do ponto de vista do gerenciamento da operação de equipamentos eletromédicos isso não seria aceitável, pois se estaria admitindo a possibilidade de falha em equipamentos médicos durantes esses curtos períodos.

Portanto, observar os limites preconizados para 100 % do tempo contribuirá para a mitigação dos efeitos indesejáveis da presença de harmônicos nas instalações hospitalares.

4.2 Aspecto 2: Dimensionamento e Características do Transformador

Com relação ao transformador, foi apresentado para o estudo de caso analisado no qual a soma das potências nominais dos equipamentos médicos totalizam 190 kVA, que um transformador de potência nominal de 225 kVA e *K-factor* (K_{UL}) igual a 1,00 atende aos critérios clássicos de dimensionamento de transformadores, mesmo alimentando cargas não lineares, pois sua "potência equivalente" atenderá ao preconizado pelas publicações técnicas. O detalhamento dessa análise está apresentado na Tabela 23 e nos comentários que a sucedem.

Entretanto, ficou demonstrado através do resultado obtido no estudo analítico (vide Tabela 22) e na simulação computacional (vide Tabela 30) que este transformador não atenderá ao limite preconizado para a THD_V, mesmo considerando o limite proposto pela organização normativa mais permissiva (que é de 10% para a *ANEEL*), pois seu valor ultrapassou esse limite na simulação computacional.

Portanto, fica comprovado que os critérios clássicos para dimensionamento do transformador não asseguram o atingimento dos níveis preconizados para a THD_V, embora esta seja apresente redução à medida do aumento da potência nominal do transformador, conforme demonstrado nas Tabelas 22 e 30.

Considerando ainda os resultados apresentados na Tabela 22 para o estudo analítico e na Tabela 30 para a simulação computacional, observou-se que o sobredimensionamento do transformador apresentou resultado satisfatório para o estudo analítico, porém o mesmo não ocorreu para a simulação computacional, pois nesta última foram introduzidos os efeitos da saturação nos transformadores e também de outros elementos do sistema elétrico alimentador das cargas. Esse fato indica que, embora o dimensionamento do transformador seja um elemento importante no controle da autoperturbação, outros elementos constituintes do sistema elétrico apresentaram-se predominantes quando da imposição de níveis de THD_V aceitáveis de até 5 % (cinco por cento). Para esse limite de 5 %, nem o transformador com potência nominal de 500 kVA (cerca de 2,2 maior que o dimensionado pelos critérios clássicos) atendeu a esse valor, indicando a necessidade de outros métodos para a mitigação de harmônicos (vide revisão bibliográfica sobre "métodos de mitigação dos efeitos dos harmônicos" – seção 2.1.4 deste trabalho), caso esse seja o valor máximo admissível para a THD_V.

4.3 Aspecto 3: Indicadores de Distorção Harmônica

São apresentados nas Tabelas 24, 25 e 26 os valores obtidos para diversos indicadores para as distorções harmônicas apresentados na revisão bibliográfica.

Por análise comparativa entre essas tabelas e também pela equação matemática que define cada um dos indicadores apresentados, observou-se que os indicadores *TDD*, F_{HL} e K_{EN}, relacionam-se apenas com as correntes das cargas não lineares, não sofrendo qualquer variação com a potência nominal dos transformadores e/ou com as características do sistema elétrico que as alimenta. Portanto, esses indicadores não se mostram adequados para a análise da Autoperturbação por harmônicos.

Também por análise comparativa com as Tabelas 24 a 26, observou-se que o indicador V_{RMS} apresentou comportamento inversamente proporcional ao aumento da carga e diretamente proporcional ao aumento da potência nominal do transformador. Já os indicadores THD_V, DIN_V, K_{UL} e R_{Th}, apresentaram-se diretamente proporcional ao aumento da carga e inversamente proporcional ao aumento da potência nominal dos transformadores.

Entretanto, alguns deles, por sua própria definição, foram elaborados para outras finalidades e também não se mostram adequados para a indicação da Autoperturbação. Por exemplo, os fatores "K" relacionados ao transformador, apresentados neste trabalho por *K-factor* (K_{UL}) e Fator K (K_{EN}), foram elaborados para preservar a integridade dos transformadores, evitando que o mesmo seja danificado por sobreaquecimento advindo da presença de harmônicos. Mesmo o correto dimensionamento do transformador utilizando-se também dos fatores "K" não assegurou o fornecimento de tensão com a THD_V desejada, conforme demonstrado no estudo analítico para um transformador de 225 kVA.

O único fator que guardou relação com a Autoperturbação foi a THD_V, mesmo porque foi este o indicador utilizado em sua definição. Porém, a determinação do valor deste indicador somente será possível por medição direta ou por determinação através de estudo analítico ou simulação computacional, conforme realizado neste trabalho.

A determinação da THD_V por medição direta, através de instrumentos apropriados, exigirá que as instalações estejam em funcionamento (com os equipamentos médicos instalados) e que a medição ocorra no momento exato de simultaneidade de operação entre as cargas analisadas. A medição da THD_V poderá ser um critério utilizado na busca pelas causas de determinados problemas com equipamentos, especialmente se o instrumento de medição possuir a capacidade de armazenamento de dados. Entretanto, a medição direta não permite uma ação preventiva, para se evitar a autoperturbação.

O estudo analítico e, principalmente, a simulação computacional são métodos confiáveis para a verificação da Autoperturbação através do indicador THD_V, porém exigirão conhecimentos aprofundados do gestor das instalações elétricas hospitalares, sejam eles relativos aos transformadores ou computacionais para o desenvolvimento das simulações.

Considerando que tais conhecimentos estejam presentes no meio acadêmico, porém raramente são de domínio do gestor das instalações hospitalares, torna-se necessário o desenvolvimento de um indicador que seja possível de ser utilizado pelo gestor das instalações e também que lhe permita a adoção de ações preventivas para se evitar problemas relacionados com a autoperturbação por harmônicos.

4.4 Aspecto 4: Indicador de Autoperturbação por Harmônicos

O Índice de Autoperturbação por Harmônicos (*IAH*) é o indicador proposto, e está apresentado na Equação (75).

Os resultados de sua aplicação para os três cenários de cargas e para os três transformadores do estudo de caso analisado estão apresentados na Tabela 32. Observa-se nessa tabela que o *IAH* proposto apresenta comportamento diretamente proporcional ao aumento da corrente de carga e inversamente proporcional à potência nominal dos transformadores, assemelhando-se, assim, ao comportamento da THD_V (vide Tabelas 26 e 30), que foi o indicador primário utilizado neste trabalho.

Porém, observando-se a Equação (75), conclui-se que a determinação do *IAH* dependerá apenas do conhecimento de características da corrente de carga e da corrente nominal em 60 Hz do transformador. Portanto, para a determinação do *IAH* não será necessário o desenvolvimento de estudo analítico e nem de simulação computacional.

São apresentados na Tabela 33 os valores obtidos para o *IAH* para os três cenários de cargas e para os três transformadores com potências nominais diferentes analisados neste trabalho, juntamente com os valores da THD_V obtidos através do estudo analítico e da simulação computacional.

Analisando os valores apresentados da Tabela 14 para os limites admitidos para a THD_V entre pelas diferentes organizações normativas consideradas neste trabalho, para um fornecimento de energia com tensão inferiores a 1 kV, observa-se que a *IEC* permite valores entre 5 % (para instalações mais sensíveis a harmônicos – classe 1) e 10 % (para as menos sensíveis – classe 3). O *IEEE* apresenta o valor de 8 %, enquanto que a *ANEEL* admite até 10 %, independente da instalação consumidora possuir cargas sensíveis ou não a harmônicos.

Correlacionando-se os limites apresentados na Tabela 14 e os valores para o *IAH* apresentados na Tabela 33, conclui-se que, para as análises aqui efetuadas, um valor de $IAH \leq$ 7 % equivale a valores da THD_V resultante que atendem aos limites admitidos pela *IEC*, pelo *IEEE*, e pela *ANEEL-PRODIST*; e valores de *IAH* entre 7 % e 17 % (7 % < $IAH \leq$ 17 %) equivale a valores THD_V resultante que atendem apenas ao preconizado pela *ANEEL – PRODIST*. Valores de *IAH* > 17 % equivalem a valores da THD_V resultante acima dos limites preconizados pelas normas e recomendação técnicas.

Portanto, a partir dessa análise, reitera-se a sugestão de que o valor máximo do *IAH* de 7 % seja o mais indicado para situações que envolva o projeto de novas instalações ou nas quais existam cargas sensíveis a harmônicos conectadas no mesmo transformador. Por outro lado, para situações onde serão aproveitados transformadores já instalados e nas quais as demais cargas ligadas ao mesmo transformador apresentem baixa sensibilidade ao conteúdo harmônico na tensão, o valor de *IAH* poderá atingir o valor de até 17 %.

4.5 Aspecto 5: Influência das Características do Sistema Elétrico à Montante do *PAC* na Autoperturbação por Harmônicos

Apresenta-se na Tabela 31 o comportamento da THD_V no *PAC* para os três cenários de cargas analisados.

Observa-se nessa tabela que seu comportamento independe do transformador à jusante do *PAC*, mas apenas da corrente das cargas, indicando assim que as características do sistema elétrico à montante do *PAC* são importantes para a análise da Autoperturbação por harmônicos também no interior das instalações hospitalares.

Como consequência importante para este trabalho, esse comportamento da THD_V no *PAC* indica que, para o refinamento dos valores admissíveis para o *IAH*, será importante uma "calibragem inicial" de seu valor, notadamente quando do projeto do edifício hospitalar ou quando de melhorias no sistema elétrico à montante do *PAC*, normalmente realizado pelas concessionárias de energia elétrica.

CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho apresentou um estudo sobre o problema das distorções harmônicas de tensão no interior das instalações hospitalares provocadas por equipamentos do próprio hospital, e propôs o termo "autoperturbação" por harmônicos para esse fenômeno.

Inicialmente realizou-se uma revisão bibliográfica introduzindo os conceitos relativos aos harmônicos, com seus indicadores e referências normativas, além de referências normativas associadas às instalações elétricas hospitalares e a transformadores.

Foram apresentadas as diferentes abordagens adotadas entre diferentes organizações normativas, onde a *IEC* enfatiza a responsabilidade do fabricante do equipamento gerador no controle do conteúdo harmônico, enquanto que o *IEEE* e a *ANEEL* transferem maior responsabilidade à unidade consumidora para esse controle. Quanto aos limites admissíveis para a distorção total de tensão no *PAC*, foi demonstrado que esse valor varia de 5 % a 10 %, a depender do instrumento normativo.

Também foi demonstrado que alguns fatores utilizados para o correto dimensionamento de transformadores operando na presença de distorções harmônicas foram desenvolvidos para se evitar danos por sobreaquecimento no transformador, e que tais fatores não asseguram o nível adequado de distorções harmônicas na tensão entregue à carga.

Para comprovar a ocorrência da autoperturbação por harmônicos foram realizadas medições na corrente drenada por equipamento de raio X, de tomografia computadorizada e de ressonância magnética, e foram apresentados os valores encontrados até a componente de quinquagésima ordem.

O fenômeno da autoperturbação por harmônicos foi demonstrado através de estudo analítico considerando-se apenas o transformador, e de simulação computacional através do software *ATPDraw*, utilizando-se de informações reais obtidas de um estudo de caso.

O estudo analítico demonstrou que, dentre os indicadores para distorções harmônicas apresentados pela literatura técnica, a distorção harmônica total de tensão apresentou correlação direta com a autoperturbação, tendo sido este indicador o utilizado para sua demonstração. Desta maneira, em uma primeira abordagem, o sobredimensionamento do transformador contribuirá para a redução do fenômeno da autoperturbação.

A simulação computacional comprovou que o fenômeno da autoperturbação relaciona-se também com a impedância do sistema elétrico à montante do *PAC*, confirmando sua ocorrência e conduzindo-a a valores superiores aos determinados no estudo analítico.

Neste cenário, foi proposto um indicador específico para a autoperturbação por harmônicos que correlaciona o conteúdo harmônico presente na corrente das cargas e a corrente característica do transformador do sistema elétrico, discutidos valores e sugerido limites para atender a diversos instrumentos normativos.

Portanto, deste trabalho pode-se concluir que:

a) O fenômeno da autoperturbação por harmônicos ocorre em instalações hospitalares, colocando em risco a utilização de equipamentos médicos sensíveis a eles;
b) As publicações técnicas que apresentam limites para o conteúdo harmônico nas instalações elétricas referem-se ao *PAC* e não tratam explicitamente de limites para a autoperturbação;
c) Os gestores das instalações hospitalares deverão introduzir o conceito da autoperturbação para o gerenciamento da operação de equipamentos eletromédicos;
d) O estudo analítico e o modelo computacional apresentado constituem-se em metodologias a serem utilizadas na avaliação da autoperturbação por harmônicos;
e) O Índice de Autoperturbação por Harmônicos (*IAH*) proposto constitui-se em um instrumento de fácil utilização pelo gestor das instalações, porém deverá ser previamente calibrado para cada instalação em particular.

Dentre as atividades futuras associadas a este trabalho, propõe-se:

i) O refinamento da simulação computacional através da introdução do ângulo de fase a ser medido para cada componente harmônico;
ii) A inclusão de harmônicos pares na simulação computacional;
iii) A expansão do conceito da "autoperturbação" para outros fenômenos, tais como variações bruscas de tensão e cintilação de tensão (*flicker*);
iv) A análise da sensibilidade de equipamentos médicos aos harmônicos, tais como equipamentos de eletroencefalograma e eletrocardiograma que trabalham com sinais vitais da ordem de microvolts.

PUBLICAÇÕES

Trabalhos Completos Publicados em Anais de Congresso

SAGGIORO, N. J.; SERNI, P. J. A.; ANDREOLI, A. L.; CASTRO, B. A.; SOUZA, W. G.; ROCHA, M. A.; COSTA, C. F. Estudo da Influência do Nível de Potência de Transformadores de Distribuição em Instalações Elétricas Hospitalares. **13th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications (INDUSCON)**, São Paulo/SP, Novembro 2018.

SAGGIORO, N. J.; SERNI, P. J. A.; ANDREOLI, A. L.; CASTRO, B. A.; SOUZA, W. G.; ROCHA, M. A.; COSTA, C. F. Avaliação de Características Operacionais de Inversores de Frequência para Qualificação de Impacto em uma Planta de Tratamento de Esgoto. **13th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications (INDUSCON)**, São Paulo/SP, Novembro 2018*.

*Este artigo correlaciona-se com o assunto deste trabalho por também analisar o fenômeno da autoperturbação por harmônicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT: Institucional. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, 2019. Pesquisado em Dezembro de 2019 e disponível em: http://www.abnt.org.br/abnt/conheca-a-abnt.

ADAMU, S. S.; MUHAMMAD, H. S.; SHUAIBU, D. S. Harmonic Assessment and Mitigation in Medical Diagnosis Equipment. **2014 IEEE 6th International Conference on Awareness Science and Technology (iCAST)**. Paris, France. 29-31October 2014, pp. 70-75.

ANEEL – PRODIST – Módulo 8_revisão 10: **Qualidade da Energia Elétrica**. Agência Nacional de Energia Elétrica, Brasília/DF, 2018.

ANEEL: Bem-vindo à ANEEL. **Agência Nacional de Energia Elétrica**, 2019. Pesquisado em Novembro de 2019 e disponível em: https://www.aneel.gov.br/a-aneel.

ARRILLAGA, J.; WATSON, N. R. **Power System Harmonics**. 2nd ed. Chichester, West Sussex, England: John Wiley & Sons Ltd., 2003. ISBN: 0-470-85129-5.

BOLLEN, M.; OLOFSSON, M.; LARSSON, A.; RONNBERG, S.; LUNDMARK, M. Standards for Supraharmonics (2 to 150 kHz). in **IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine.** Vol. 3, nº 1, pp. 114-119, 1st Quarter 2014. doi: 10.1109/MEMC.2014.6798813.

BOUDRIAS, J. G. Power Factor Correction and Energy Saving with Proper Transformer, Phase Shifting Techniques and Harmonics Mitigation. **2004 Large Engineering Systems Cnoference on Power Engineering**. Halifax, NS, Canada. 28-30 July 2004, pp. 98-101. Print ISSN 0-7803-8386-9.

BRASIL-MS. Portaria nº 529, de 01 de abril de 2013. Institui o Programa Nacional de Segurança do Paciente - PNSP. Pesquisado em Dezembro de 2019 e disponível em: http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2013/prt0529_01_04_2013.html.

BRASIL-SP. Decreto nº 63589, de 06 de julho de 2018. Cria o Hospital das Clínicas de Bauru. **Diário Oficial do Estado de São Paulo**: seção I, São Paulo, SP, Volume 128, Número 125, p. 1, 07 jul. 2018.

BRONZINO, J. D. **The Biomedical Engineering Handbook**. 2nd ed. EUA: CRC Press with IEEE Press, 2000. ISBN: 0-8493-0461-X.

BUZDUGAN, M. I.; BALAN, H.; MURESAN, D. T. An Electrical Power Quality Problem in an Emergency Unit from a Hospital. **SPEEDAM 2010 – International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion** . 2010, pp. 251-256.

CALIL, S.J.; GOMIDE, E. T. **Equipamentos Médico-Hospitalares e o Gerenciamento da Manutenção**. Brasília, Brasil: Ministério da Saúde, 2002. ISBN: 85-334-0556-1.

CIRCUTOR: Technical article: AFQevo Multifunction Active Filter – Harmonics: Today's problems and its solution. **Circutor – Technology for Energy Efficiency**, 2019. Pesquisado em Novembro de 2019 e disponível em: http://docs.circutor.com/docs/CIR_Article_AFQevo_EN.pdf.

COSTA, E. T.; ALBUQUERQUE, J. A. G. **Tomografia Computadorizada**. Apostila do Curso de Especialização em Engenharia Clínica, 2012. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

COSTA, E. T.; ALBUQUERQUE, J. A. G; LEITE JR, S. C. **Equipamentos de Raio X**. Apostila do Curso de Especialização em Engenharia Clínica, 2012. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

CPFL. **Requisitos para Conexão de Cargas Potencialmente Perturbadoras ao Sistema Elétrico da CPFL – GED 10099**. Companhia Paulista de Força e Luz. 2012.

DESMET, J.; DELAERE, G. Harmônicas: Seleção e Dimensionamento de Transformadores. **European Copper Institute**. Bruxelas, 2005. Pesquisado em Dezembro de 2019 e disponível em: https://www.procobre.org/pt/wp-content/uploads/sites/4/2018/03/qe15-guia-3-5-2-seleo-dimensionamento-transformadores-harmnicas.pdf.

DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN, M. F.; SANTOSO, S.; BEATY, H. W. **Electrical Power Systems Quality**. 2nd ed. EUA - New York: McGraw Hill, 2003. ISBN: 0-07-138622-X.

EN 50464-3_2007: Three-phase Oil-immersed Distribution Transformers 50 Hz, from 50 kVA to 2500 kVA with Highest Voltage for Equipment Not Exceedign 36 kV – Part 3: Determination of the Power Rating of a Transformer Loaded with Non-sinusoidal Currents . **European Standard**, 2007.

HARIYANTO, N.; NURDIN, M.; TANTHIO P, G. A. Characteristic Study of Three-phase AC Electric Arc Furnace Model. **The 2nd IEEE Conference on Power Engineering and Reviewable Energy**, Bali, Indonésia, 9-11 December 2014.

HENDEE, W. R.; RITENOUR, E. R. **Medical Imaging Physics**. 4nd ed. EUA: Wiley-Liss, Inc, 2002. ISBN: 0-471-38226-4.

IEC 61000-2-4:2002. **Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2-4: Environment - Compatibility levels in industrial plants for low-frequency conducted disturbances - PREVIEW**. International Electrotechnical Commission. Pesquisado em Dezembro de 2019 e disponível em: https://webstore.iec.ch/preview/info_iec61000-2-4%7Bed2.0%7Db.pdf.

IEC 61000-3-4:1998. **Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-4: Limits - Limitation of emission of harmonic currents in low-voltage power supply systems for equipment with rated current greater than 16 A - PREVIEW**. International Electrotechnical Commission. Pesquisado em Dezembro de 2019 e disponível em: https://webstore.iec.ch/preview/info_iec61000-3-4%7Bed1.0%7Db.pdf.

IEC: Welcome to the IEC. **International Electrotechnical Commission**, 2019. Pesquisado em Novembro de 2019 e disponível em: https://www.iec.ch/about/?ref=menu.

IEEE Std. 519-2014: Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. **Institute of Electrical and Electronics Engineers**, 2014.

IEEE Std. C57.110-2008: IEEE Recommended Practice for Establishing Liquid-Filled and Dry-Type Power and Distribution Transformer Capability when Supplying Nonsinusoidal Load Currents. **Institute of Electrical and Electronics Engineers**, 2008.

IEEE. **Interharmonics in Power Systems**. Institute of Electrical and Electronics Engineers. Interharmonics Task Force, Cigré 36.05/CIRED 2 CC02 Voltage Quality Working Group. 1997. Pesquisado em Novembro de 2019 e disponível em: http://grouper.ieee.org/groups/harmonic/iharm/ihfinal.pdf.

IEEE. **Interharmonics**. Institute of Electrical and Electronics Engineers. Interharmonics Task Force Working Document IH0101. 2001.

IEEE: About IEEE. **Institute of Electrical and Electronics Engineers**, 2019. Pesquisado em Novembro de 2019 e disponível em: https://www.ieee.org/about/index.html.

KAZEM, A. H. Harmonic Mitigation Techniques Applied to Power Distribution Networks. **Advances in Power Electronics**. [**Online**]. Article ID 591680, 10 pages, 2013. Pesquisado em Novembro de 2019 e disponível em: http://dx.doi.org/10.1155/2013/591680.

KOSOW, I. L. **Máquinas Elétricas e Transformadores**. 5ª ed. Rio de Janeiro: Editora Globo S.A., 1985.

LI, C.; XU, W.; TAYJASANANT, T.. Interharmonics: Basic Concepts and Techniques for Their Detection and Measurement. **Electric Power Systems Research, nº 66.** Elsevierr, 2003.pp. 39-48.

MARINHO, G. S. P.; FREITAS, S. C. L.; ZAMPELLIN, L.; ALMEIDA, P. R.; SILVA, J. C.; SILVA, A. K. V.; PRADO, A. J. Simulação de Circuitos Introdutórios ao Programa ATP-Draw / EMTP. **IV SBSE – Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos**. Goiania, Brasil. 15-18 Maio 2012. ISSN 2177-6164.

MARTIGNONI, A. **Transformadores**. 5ª ed. Rio de Janeiro: Editora Globo S.A., 1983.

MARZ, M. Interharmonics: What They Are, What They Come From and What They Do. **CEP-Conferences**. [**Online**]. University of Minnesota, USA, 8 pages, 2016. Pesquisado em Novembro de 2019 e disponível em: https://ccaps.umn.edu/documents/CPE-Conferences/MIPSYCON-Papers/2016/Interharmonics.pdf.

NASCIMENTO, C. F. **Determinação do Conteúdo Harmônico de Corrente Baseada em Redes Neurais Artificiais para Cargas Não Lineares Monofásicas**. Tese (Doutorado) - EESC – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2007.

NBR 13534-2008: Instalações Elétricas de Baixa Tensão – Requisitos Específicos para Instalação em Estabelecimentos Assistenciais de Saúde. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, 2008.

NBR 13570-1996: Instalações Elétricas em Locais de Afluência de Público – Requisitos Específicos. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, 1996.

NBR 14039-2005: Instalações Elétricas de Média Tensão de 1,0 kV a 36,2 kV. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, 2004.

NBR 5356-1_2007: Transformadores de Potência - Parte 1: Generalidades. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, 2007.

NBR 5356-7_2017: Transformadores de Potência - Parte 7: Guia de Carregamento para Transformadores Imersos em Líquidos Isolantes. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, 2017.

NBR 5356-8_2017: Transformadores de Potência - Parte 8: Guia de Aplicação. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, 2017.

NBR 5410-2004: Instalações Elétricas de Baixa Tensão. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, 2004.

NBR 5440_2014: Transformadores para Redes Aéreas de Distribuição - Requisitos. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, 2014.

NBR IEC 60601-1-2_2017: Equipamento Eletromédico. Parte 1-2: Requisitos Gerais para Segurança Básica e Desempenho Essencial – Norma Colateral: Perturbações Eletromagnéticas – Requisitos e Ensaios. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, 2017.

NBR ISO 14971_2009: Produtos para a Saúde – Aplicação de Gerenciamento de Risco a Produtos para a Saúde. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, 2009.

NICÁCIO, H.; COSTA, E. T. **Imagens por Ressonância Nuclear Magnética**. Apostila do Curso de Especialização em Engenharia Clínica, 2012. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

NUNES, R. V. **Análise da Penetração Harmônica em Redes de Distribuição Desequilibradas Devido às Cargas Residenciais e Comerciais com a Utilização do ATP**. Dissertação (Mestrado) - UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 150 p. 2007.

OKUMOTO, J. C. **Avaliação das Instalações Elétricas de Centro Cirúrgico. Estudo de Caso: Hospital Universitário da UFMS**. Dissertação (Mestrado) - UFMS – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Campo Grande, 114 p. 2006.

OKUMOTO, J. C.; KOLTERMANN, P. I.; PEREIRA, V. M.; LARA, G. S.; SILVA JR., A. R. Avaliação de Distúrbios Relacionados à Qualidade de Energia Elétrica do Hospital Universitário de Mato Grosso do Sul – Estudo de Caso. **VI SBQEE Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica**, Pará, Brasil, 21-24 Agosto 2005.

OLIVEIRA, C. C. B.; SCHIMIDT, H. P.; KAGAN, N.; ROBBA, E. J. **Introdução a Sistemas Elétricos de Potência – Componentes Simétricas**. 2 ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda., 1996.

OLIVEIRA, J. C.; COGO, J. R.; ABREU, J. P. G. **Transformadores – Teoria e Ensaios**. 1 ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda., 1984.

OPPENHEIM, A. V.; WILLSKY, A. S. **Sinais e Sistemas**. 2 ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010. ISBN: 978-85-7605-504-4.

OSHIYAMA, N. F. **Imagens por Ressonância Magnética**. Apostila do Curso de Especialização em Engenharia Clínica, 2007. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

OWEN, E. L. A History of Harmonics in Power Systems. **IEEE Industry Applications Magazine**. January/February - 1998, pp. 6-12.

PERSSON, J. Comparing Harmonics Mitigation Techniques. [**Online**]. Comsys AB, Lund, Sweden. March 2014. Pesquisado em Novembro de 2019 e disponível em: https://www.academia.edu/7438873/Comparing_Harmonics_Mitigation_Techniques_2col_REV2.

RAMOS, M. C. G. **Uma Contribuição para a Área de Saúde por Meio da Verificação do Impacto da Qualidade de Energia e das Instalações Elétricas nos Equipamentos Eletromédicos**. Tese (Doutorado) - EPUSP – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 253 p. 2009.

RAO, U.; SINGH, S.N.; THAKUR, C.K. Power Quality Issues with Medical Electronics Equipments in Hospitals. **2010 International Conference on Industrial Electronics, Control and Robotics**. 2010, pp. 34-38.

RHODES, G. I. Parallel Operation of Three-Phase Generators with Their Neutral Interconnected. **AIEE Transactions**, vol. 19, p. 765-768, 1910.

ROBBA, E. J. **Introdução a Sistemas Elétricos de Potência – Componentes Simétricas**. 1 ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda., 1977.

RONNBERG, S.; BOLLEN, M.. Propagation of Supraharmonics in The Low Voltage Grid. [**Online**]. Energiforsk, Sweden, 56 pages, December 2017. Pesquisado em Novembro de 2019 e disponível em: https://energiforskmedia.blob.core.windows.net/media/23665/propagation-of-supraharmonics-in-the-low-voltage-grid-energiforskrapport-2017-461.pdf. ISBN 978-91-7673-461-2.

RONNBERG, S.; LARSSON, A.; BOLLEN, M.; SCHANEN, J. L. A Simple Model for Interaction Between Equipment at a Frequency of Some Tens of kHz. **21st International Conference on Electricity Distribution (CIRED)**. Frankfurt, Germany. 6-9 June 2011. Paper nº 0206.

SANKARAN, C. **Power Quality**. EUA - Florida: CRC Press LLC, 2002. ISBN: 0-8493-1040-7.

SANTANA, C. J. R. **Instalações Elétricas Hospitalares**. Porto Alegre, Brasil - EDIPUCRS: Editora da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 1996. CDD: 621.31042.

SANTILIO, F. P.; REIS, A.; ROSENTINO JR, A. J. P.; CAIXETA, D.; CUNHA, G. H. B.; GONDIN, I. N.; BARBOSA JR., J. A. F.; REZENDE, P. H. O.; SILVA, T. V. **Curso de ATPDraw**. Apostila do Curso de ATPDraw, 2012. Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.

SANTOS, C. R. **Efeitos de Cargas Não Lineares no Dimensionamento de Transformadores Trifásicos de Distribuição**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2012.

SARIKPRUECK, P.; LUMYONG, P.; ATTAPHONG, C.; NGAMWATTHANASILPA, B. Analyzing Technique for Electrical Energy Monitoring System in Thailand Hospital. **2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017**

IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe). Milan, Itay. 06-09 June 2017.

SCARPINO, P. A.; GRASSO, F. Analisys of Complex Hospital Electrical Systems. **2017 AEIT International Annual Conference**. Cagliari, Italy. 20-22 September 2017.

SCHNEIDER: Power Logic ION7550/ION7650 – Power and Energy Meter – User Guide. **Schneider Electric**, 2010.

SCHWANZ, D.; BOLLEN, M.; LARSSON, A. A Review of Solutions for Harmonic Mitigation. **2016 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power**. Belo Horizonte, Brazil. 16-19 October 2016, pp. 30-35. Electronic ISSN: 2164-0610.

SEKAR, T. C.; RABI, B. J. A Review and Study of Harmonic Mitigation Techniques. **2012 International Conference on Emerging Trends in Electrical Engineering and Energy Management (ICETEEEM)**. Chennai, India. 13-15 December 2012, pp. 93-97. Print ISBN 978-1-4673-4633-7.

SHIN, Y. J.; POWERS, E. J.; GRADY, M.; ARAPOSTATHIS, A. Power Quality Indices for Transient Disturbances. **IEEE Transactions on Power Delivery**. Vol. 21. Nº 1. January - 2006, pp. 253-261.

SIEMENS: White Paper - Harmonics in Power Systems – Causes, Effects and Control. **Siemens Industry, Inc.**, 2013. Pesquisado em Dezembro de 2019 e disponível em: https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:8ab2a02e-ad94-41cb-a362-438f016aa704/version:1570302838/drive-harmonics-in-power-systems-whitepaper.pdf.

SILVA, M. P. C. **Proposta de Modelagem e Simulação para Análise de Distorção Harmônica**. Dissertação (Mestrado) - UFRGS – Universidade do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 145 p. 2014.

SILVA, M. P. C.; LEBORGNE, R. C.; BARROZO, V. Análise de Alocação de Filtros para Mitigação de Distorção Harmônica em Sistemas Elétricos de Distribuição. **CLAGTEE 2017 – 12th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission**. Mar del Plata, Argentina. 12-15 November 2017.

SILVEIRA, M.; CORREIA, J. S. S. Qualidade de Energia Elétrica: Equipamentos Eletromédicos e sua Interação com o Sistema Elétrico. **XVII SNPTEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica**, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil, 19-24 Outubro 2003.

SIMSEKLER, M. C. E.; JAYARAMAN, R. Risk Identification Pratice in Patient Safety Context. **2018 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)**. Bangkok, Thailand. 16-19 December 2018. INSPEC Accession Number: 18377084.

SINGH, G. K. Power System Harmonics Research: A Survey. **European Transaction Electrical Power**, v. 19, p. 151-172, 2009.

SOUZA, W. A. **Estudos de Técnicas de Análise e Tecnologias para o Desenvolvimento de Medidores Inteligentes de Energia Residenciais**. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2016.

STEINMETZ, C. P.Symbolic Representation of General Alternating Waves of Double Frequency Vector Products. *Sixteenth General Meeting of American Institute of Electrical Engineers, 1899, Boston, USA*. **AIEE Transactions**, nº XVI, 1899, pp. 269-296, Disc. 297-301.

TAHER, M. A.; KAMEL, S.; ALI, Z. M. K-factor and Transformers Losses Under Harmonics. **2016 IEEE 18th International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)**. Cairo, Egypt. 27-29 December 2016. DOI: 10.1109/MEPCON.2016.7836978.

TRAFOMIL: TTI – Linha de Transformadores de Ultra-Isolação para Alimentação de Cargas Não Linear – Fator K. **Trafomil Transformadores Ltda.**, 2019. Pesquisado em Dezembro de 2019 e disponível em: http://www.trafomil.com.br/files/42.pdf.

UL 1561-2005: Dry-Type General Purpose and Power Transformers. **Underwrites Laboratories**, 2005.

UL: About. **Underwrites Laboratories**, 2019. Pesquisado em Dezembro de 2019 e disponível em: https://www.ul.com/about.

WANIEK, C.; WOHLFAHRT, T.; MYRZIK, J. M. A.; MEYER, J.; KLATT, M.; SCHEGNER, P. A Supraharmonics: Root Causes and Interactions Between Multiple Devices and the Low Voltage Grid. **2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)**. Torino, Italy. 26-29 September 2017. Print ISBN 978-1-5386-1953-7.

WEG: Transformadores de Distribuição a Óleo. **WEG Equipamentos Elétricos S.A.**, 2019. Pesquisado em Dezembro de 2019 e disponível em: https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Gera%C3%A7%C3%A3o%2C-Transmiss%C3%A3o-e-Distribui%C3%A7%C3%A3o/Transformadores-e-Reatores-a-%C3%93leo/Transformadores-de-Distribui%C3%A7%C3%A3o-a-%C3%93leo/c/GTD_TO_TOD.

APÊNDICE A

Medições do Conteúdo Harmônico das Cargas

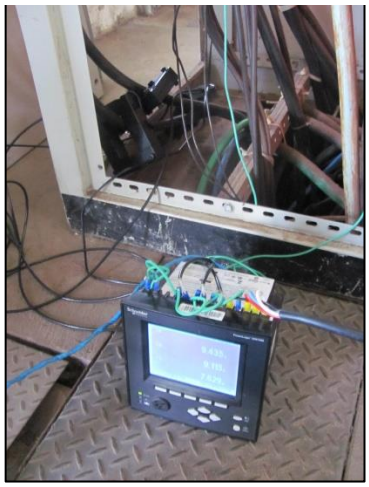
Esta seção apresenta a captura de informações sobre o conteúdo harmônico das correntes dos três equipamentos eletromédicos utilizados neste trabalho, que são: i) equipamento de raio X; ii) equipamento de tomografia computadorizada, e; iii) equipamento de ressonância magnética.

Os três equipamentos cujo conteúdo harmônico das correntes foi medido pertencem ao Hospital Estadual de Bauru, localizado no município de Bauru – SP, e encontravam-se em operação normal e rotina de utilização também normal, não sendo permitido que tais equipamentos fossem desligados ou que tivessem sua rotina de trabalho alterada para atenderem a alguma demanda específica do trabalho relativo às medições elétricas.

Diante desse fato, foram selecionados para serem utilizados neste trabalho, e serão apresentados a seguir, os valores obtidos para a máxima potência registrada durante o período de medição, que ocorreu em duas etapas, sendo a primeira nos dias 03, 04, 05 e 06 de Abril de 2019 e a segunda etapa no dia 21 de Maio de 2019.

O equipamento utilizado foi um medidor de qualidade de energia da marca Schneider Electric, modelo ION7650, conforme apresentado na Figura 57.

Figura 57 – Foto do medidor ION7650 utilizado nas medições



Fonte: O Próprio Autor

Esse equipamento permite a captura das componentes harmônicas até as de 511ª ordem. Porém, conforme as normas e recomendações técnicas relativas aos sistemas de energia (apresentadas na revisão bibliográfica deste trabalho) serão aqui consideradas até as de 50ª

ordem. Ele captura e grava as informações que, posteriormente, foram transferidas para um notebook, estando o medidor ainda no local das medições (SCHNEIDER ION7650, 2010).

Os sinais de corrente foram capturados através de três transformadores de corrente de núcleo partido, da marca Sibratec, com relação de 400/5A, conforme apresentado na Figura 58.

Figura 58 – Foto dos transformadores de corrente utilizados nas medições

Fonte: O Próprio Autor

O ponto de medição utilizado foi no quadro geral de distribuição em baixa tensão, na saída do alimentador de cada um dos equipamentos analisados. A Figura 59 ilustra um desses quadros de distribuição.

Figura 59 – Foto de um dos quadros de distribuição onde foram feitas medições

Fonte: O Próprio Autor

O quadro de distribuição apresentado na Figura 59 alimenta os equipamentos de Raio X e de Tomografia Computadorizada, e também outras cargas; enquanto que o equipamento de Ressonância Magnética é alimentado por outro quadro de distribuição em baixa tensão.

A1 – Medições no Equipamento de Raio X

O equipamento de raio X cujas correntes foram medidas é do tipo fixo (não portátil), da marca Philips, modelo Bucky Diagnost, série RX0747, que se encontra em operação desde o ano de 2002. Conforme informações obtidas junto ao hospital, esse equipamento realiza em média 40 exames por dia e cerca de 1000 exames por mês.

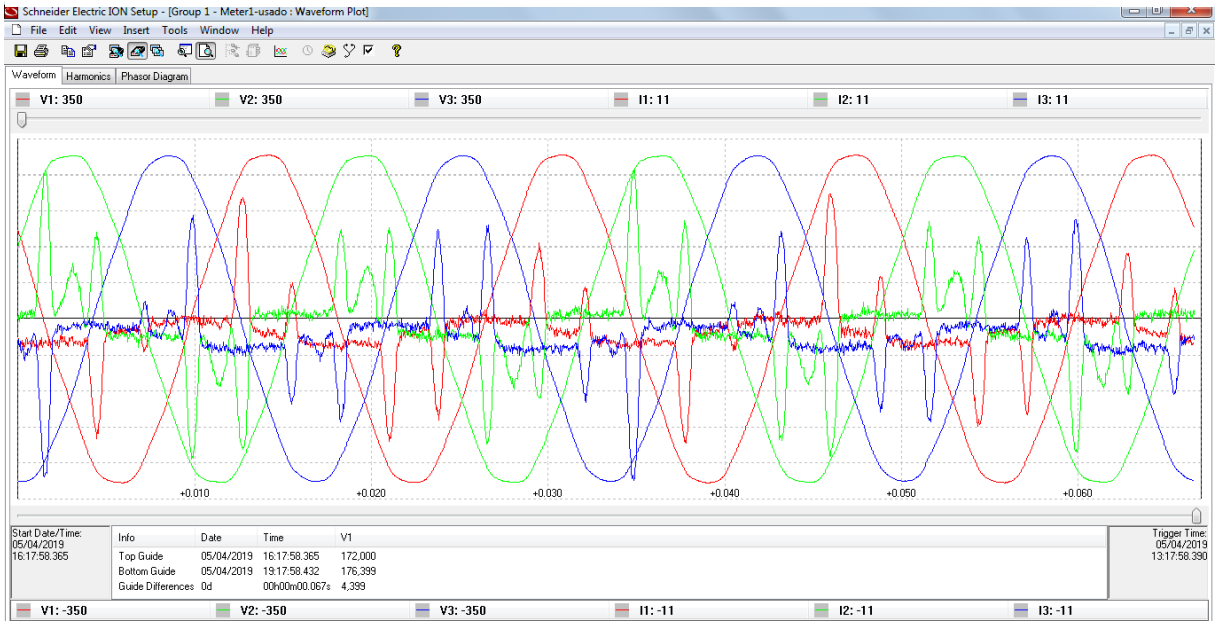
A Figura 60 apresenta uma foto do equipamento de raio X analisado.

Figura 60 – Foto do equipamento de raio X analisado

Fonte: O Próprio Autor

A Figura 61 apresenta as formas de onda das correntes e das tensões obtidas nas medições do equipamento de raio X, e a Figura 62 apresenta a imagem da planilha com os valores numéricos obtidos para a máxima carga observada durante o período de medição.

Figura 61 – Formas de onda de tensões e correntes do equipamento de raio X



Fonte: O Próprio Autor

Figura 62 – Imagem da planilha com os valores obtidos durante as medições no equipamento de raio X

VALORES MEDIDOS NO QGBT DO EQUIPAMENTO

Equipamento: **RAIO X**
Marca/Modelo: Philips / Bucky Diagnost (série RX0747)

Dados de Placa do Equipamento:
Potência Nominal de Entrada: **40 kVA**
Tensão de linha: **380 V**
Tipo de ligação: **Trifásica a três fios (estrela)**
Duração do Exame Medido: **1,5 segundos**

Valores Medidos na Carga à 46,45 % da Potência Nominal						
	Tensão de Fase (V)	Corrente de Fase (A)	Potência Aparente por Fase (kVA)	Fator de Potência (Deslocamento)	THDv	THDi
Fase 1	224,9	28,7	6,48	0,825	1,3%	59,8%
Fase 2	224,0	28,0	6,28	0,777	1,2%	61,7%
Fase 3	227,7	25,3	5,80	0,721	1,1%	71,5%
Média por Fase	*225,5*	*27,3*	*6,19*	*0,774*	*1,2%*	*64,3%*

	Correntes Medidas por Fase (A)							
Ordem (h)	I1 (A)	I2 (A)	I3 (A)	I1 (%)	I2 (%)	I3 (%)	**Imédia (%)**	Imédia (A)
1	24,58	23,74	20,50	-	-	-	-	22,94
2	1,55	1,50	1,34	6,31%	6,33%	6,55%	**6,4%**	1,47
3	4,52	4,46	4,51	18,40%	18,80%	22,00%	**19,7%**	4,50
4	0,64	0,66	0,66	2,60%	2,80%	3,20%	**2,9%**	0,65
5	6,24	6,17	6,29	25,40%	26,00%	30,70%	**27,4%**	6,24
6	0,15	0,15	0,16	0,60%	0,65%	0,80%	**0,7%**	0,16
7	7,99	7,93	8,00	32,50%	33,40%	39,00%	**35,0%**	7,97
8	0,39	0,39	0,35	1,60%	1,65%	1,73%	**1,7%**	0,38
9	3,05	2,99	3,03	12,40%	12,60%	14,80%	**13,3%**	3,02
10	0,25	0,28	0,37	1,00%	1,20%	1,80%	**1,3%**	0,30
11	3,88	3,85	3,90	15,80%	16,20%	19,00%	**17,0%**	3,87
12	0,10	0,11	0,11	0,40%	0,45%	0,56%	**0,5%**	0,11
13	2,09	2,09	2,07	8,50%	8,80%	10,10%	**9,1%**	2,08
14	0,09	0,08	0,09	0,35%	0,35%	0,42%	**0,4%**	0,09
15	3,17	3,13	3,10	12,90%	13,20%	15,10%	**13,7%**	3,13
16	0,08	0,09	0,10	0,32%	0,39%	0,47%	**0,4%**	0,09
17	3,59	3,58	3,57	14,60%	15,10%	17,40%	**15,7%**	3,58
18	0,07	0,07	0,06	0,30%	0,31%	0,31%	**0,3%**	0,07
19	2,70	2,71	2,73	11,00%	11,40%	13,30%	**11,9%**	2,71
20	0,07	0,07	0,06	0,28%	0,31%	0,30%	**0,3%**	0,07
21	1,84	1,83	1,87	7,50%	7,70%	9,10%	**8,1%**	1,85
22	0,05	0,05	0,04	0,20%	0,20%	0,20%	**0,2%**	0,05
23	2,14	2,14	2,13	8,70%	9,00%	10,40%	**9,4%**	2,14
24	0,02	0,04	0,02	0,10%	0,15%	0,12%	**0,1%**	0,03
25	2,16	2,40	1,87	8,80%	10,10%	9,10%	**9,3%**	2,14
26	0,04	0,04	0,03	0,15%	0,15%	0,16%	**0,2%**	0,04
27	0,69	0,69	0,66	2,80%	2,90%	3,20%	**3,0%**	0,68
28	0,02	0,02	0,02	0,10%	0,09%	0,08%	**0,1%**	0,02
29	1,62	1,64	1,60	6,60%	6,90%	7,80%	**7,1%**	1,62
30	0,02	0,02	0,02	0,09%	0,10%	0,10%	**0,1%**	0,02
31	2,95	2,92	2,89	12,00%	12,30%	14,10%	**12,8%**	2,92
32	0,01	0,02	0,02	0,05%	0,08%	0,09%	**0,1%**	0,02
33	0,81	0,85	0,86	3,30%	3,60%	4,20%	**3,7%**	0,84
34	0,01	0,01	0,02	0,05%	0,04%	0,08%	**0,1%**	0,01
35	1,65	1,59	1,58	6,70%	6,70%	7,70%	**7,0%**	1,61
36	0,01	0,01	0,01	0,04%	0,04%	0,05%	**0,0%**	0,01
37	0,00	0,19	0,00	0,00%	0,80%	0,00%	**0,3%**	0,06
38	0,01	0,00	0,01	0,03%	0,02%	0,04%	**0,0%**	0,01
39	1,33	1,33	1,29	5,40%	5,60%	6,30%	**5,8%**	1,32
40	0,00	0,00	0,00	0,00%	0,02%	0,02%	**0,0%**	0,00
41	1,40	1,42	1,50	5,70%	6,00%	7,30%	**6,3%**	1,44
42	0,00	0,00	0,00	0,01%	0,02%	0,01%	**0,0%**	0,00
43	1,13	1,14	1,13	4,60%	4,80%	5,50%	**5,0%**	1,13
44	0,00	0,00	0,00	0,01%	0,01%	0,01%	**0,0%**	0,00
45	1,06	1,07	1,09	4,30%	4,50%	5,30%	**4,7%**	1,07
46	0,00	0,00	0,00	0,00%	0,01%	0,01%	**0,0%**	0,00
47	1,20	1,23	1,21	4,90%	5,20%	5,90%	**5,3%**	1,22
48	0,00	0,00	0,00	0,00%	0,00%	0,01%	**0,0%**	0,00
49	0,00	0,00	0,21	0,00%	0,00%	1,00%	**0,3%**	0,07
50	0,00	0,00	0,00	0,00%	0,01%	0,00%	**0,0%**	0,00

Fonte: O Próprio Autor

A Figura 62 apresenta os valores para o conteúdo harmônico da corrente drenada pelo equipamento de raio X até sua 50ª ordem, para uma condição onde a potência demandada pelo equipamento foi de 46,45 % de sua potência nominal.

Conforme apresentado na revisão bibliográfica sobre os aspectos operacionais dos equipamentos de raio X, sua demanda de potência dependerá do tipo de exame (parte do corpo) a ser feito no paciente. Assim, durante o período de medições, a potência máxima (nominal) do equipamento não foi utilizada.

Destacam-se ainda na Figura 62 que a potência trifásica máxima medida foi de 18,6 kVA (46,45% da nominal); sua *THDi* foi de 64,3%; e que o Fator de Potência (deslocamento) foi de 0,774, ou seja, a carga apresenta comportamento predominantemente indutivo.

A2 – Medições no Equipamento de Tomografia Computadorizada

O equipamento de tomografia computadorizada analisado é da marca Hitachi, modelo Scenaria 128, série S3079, que se encontra em operação desde o ano de 2018. Conforme informações obtidas junto ao hospital, esse equipamento realiza em média 10 exames por dia e cerca de 200 exames por mês. Esse equipamento realiza 128 *slices* (cortes) durante o exame, conforme descrito na revisão bibliográfica neste trabalho.

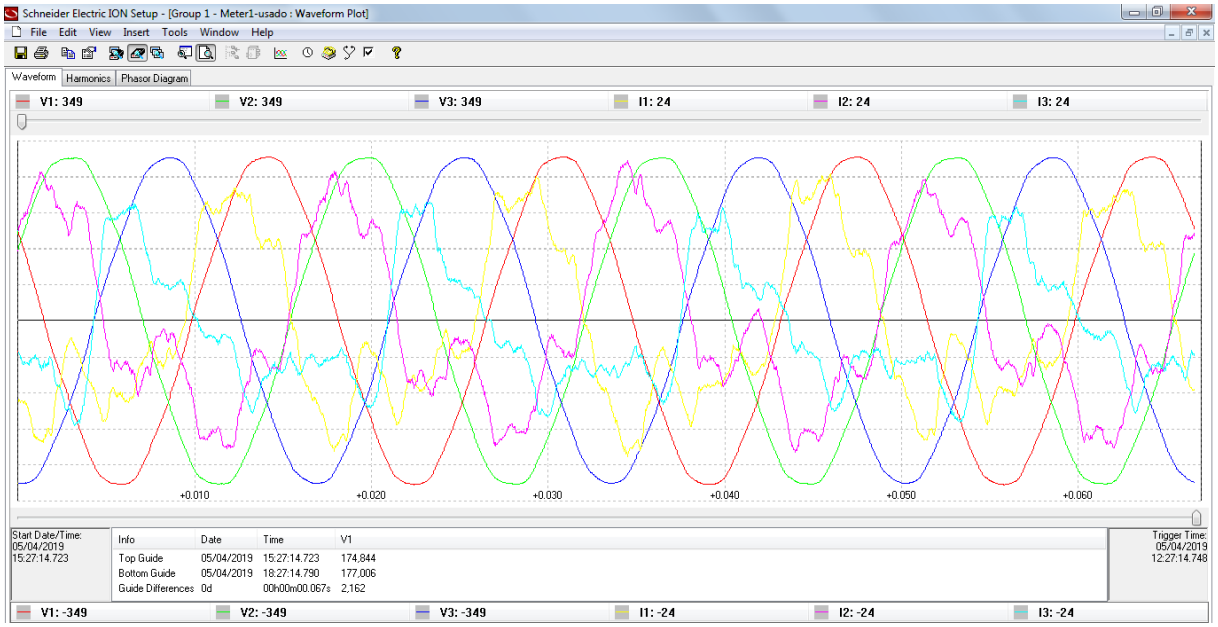
A Figura 63 apresenta uma foto do equipamento de tomografia computadoriza que teve medido o conteúdo harmônico de sua corrente elétrica.

Figura 63 – Foto do equipamento de tomografia computadorizada analisado

Fonte: O Próprio Autor

A Figura 64 apresenta as formas de onda das correntes e das tensões obtidas nas medições do equipamento de tomografia computadorizada.

Figura 64 – Formas de onda de tensões e correntes do equipamento de tomografia computadorizada



Fonte: O Próprio Autor

E a Figura 65 apresenta a imagem da planilha com os valores numéricos obtidos para a máxima carga observada durante o período de medição no equipamento de tomografia computadorizada.

A Figura 65 apresenta valores para o conteúdo harmônico da corrente drenada pelo equipamento de tomografia computadorizada até sua 50ª ordem, para uma condição onde sua total demandada foi de 42,57 % de sua potência nominal.

Conforme apresentado na revisão bibliográfica sobre os aspectos operacionais dos equipamentos de tomografia computadorizada, sua demanda de potência também dependerá do tipo de exame (parte do corpo) a ser feito no paciente. Assim, durante o período de medições, a potência máxima (nominal) do equipamento não foi utilizada.

Observam-se ainda na Figura 65 que a potência trifásica máxima medida foi de 42,6 kVA (42,57% da nominal); sua *THDi* foi de 38,4%; e que o Fator de Potência (deslocamento) foi de 0,984, ou seja, a carga apresenta-se como levemente indutiva.

Figura 65 – Imagem da planilha com os valores obtidos durante as medições no equipamento de tomografia computadorizada

VALORES MEDIDOS NO QGBT DO EQUIPAMENTO

Equipamento: **TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA**
Marca/Modelo: Hitachi / Scenaria 128 (série S3079)

Dados de Placa do Equipamento:
Potência Nominal de Entrada: **100 kVA**
Tensão de linha: **380 V**
Tipo de ligação: **Trifásica a três fios (estrela)**
Duração do Exame Medido: **30 segundos**

Valores Medidos na Carga à 42,57 % da Potência Nominal						
	Tensão de Fase (V)	Corrente de Fase (A)	Potência Aparente por Fase (kVA)	Fator de Potência (Deslocamento)	THDv	THDi
Fase 1	221,7	65,7	14,60	0,986	1,8%	38,3%
Fase 2	222,3	65,9	14,67	0,980	1,5%	37,6%
Fase 3	220,8	60,1	13,29	0,985	1,7%	39,2%
Média por Fase	*221,6*	*63,9*	*14,19*	*0,984*	*1,7%*	*38,4%*

	Correntes Medidas por Fase (A)							
Ordem (h)	I1 (A)	I2 (A)	I3 (A)	I1 (%)	I2 (%)	I3 (%)	**Imédia (%)**	**Imédia (A)**
1	61,30	61,60	55,74	-	-	-	-	**59,55**
2	1,53	1,45	1,31	2,50%	2,35%	2,35%	**2,4%**	**1,43**
3	11,49	11,23	10,70	18,74%	18,23%	19,20%	**18,7%**	**11,14**
4	0,63	0,63	0,59	1,03%	1,03%	1,05%	**1,0%**	**0,62**
5	8,11	8,09	7,80	13,23%	13,13%	14,00%	**13,5%**	**8,00**
6	1,41	1,26	1,20	2,30%	2,05%	2,15%	**2,2%**	**1,29**
7	9,76	9,79	9,20	15,92%	15,90%	16,50%	**16,1%**	**9,58**
8	0,46	0,45	0,44	0,75%	0,73%	0,79%	**0,8%**	**0,45**
9	9,38	9,38	8,53	15,30%	15,23%	15,30%	**15,3%**	**9,10**
10	0,39	0,40	0,35	0,63%	0,65%	0,62%	**0,6%**	**0,38**
11	8,89	8,50	8,14	14,50%	13,80%	14,60%	**14,3%**	**8,51**
12	0,32	0,32	0,29	0,52%	0,52%	0,52%	**0,5%**	**0,31**
13	8,46	8,48	7,73	13,80%	13,76%	13,86%	**13,8%**	**8,22**
14	0,31	0,31	0,28	0,51%	0,50%	0,50%	**0,5%**	**0,30**
15	0,95	0,92	0,89	1,55%	1,50%	1,59%	**1,5%**	**0,92**
16	0,14	0,12	0,13	0,23%	0,20%	0,23%	**0,2%**	**0,13**
17	1,35	1,29	1,23	2,20%	2,10%	2,20%	**2,2%**	**1,29**
18	0,12	0,12	0,11	0,20%	0,19%	0,20%	**0,2%**	**0,12**
19	0,95	0,95	0,87	1,55%	1,54%	1,56%	**1,6%**	**0,92**
20	0,12	0,12	0,10	0,20%	0,19%	0,18%	**0,2%**	**0,11**
21	0,74	0,74	0,70	1,20%	1,20%	1,26%	**1,2%**	**0,73**
22	0,09	0,09	0,08	0,15%	0,14%	0,15%	**0,1%**	**0,09**
23	0,43	0,42	0,37	0,70%	0,68%	0,67%	**0,7%**	**0,41**
24	0,06	0,06	0,07	0,10%	0,09%	0,12%	**0,1%**	**0,06**
25	0,40	0,40	0,35	0,65%	0,65%	0,63%	**0,6%**	**0,38**
26	0,03	0,03	0,05	0,05%	0,05%	0,09%	**0,1%**	**0,04**
27	0,40	0,40	0,39	0,65%	0,65%	0,70%	**0,7%**	**0,40**
28	0,03	0,02	0,03	0,05%	0,03%	0,06%	**0,0%**	**0,03**
29	0,25	0,25	0,22	0,41%	0,40%	0,40%	**0,4%**	**0,24**
30	0,00	0,01	0,00	0,00%	0,01%	0,00%	**0,0%**	**0,00**
31	0,25	0,22	0,25	0,40%	0,35%	0,45%	**0,4%**	**0,24**
32	0,00	0,01	0,01	0,00%	0,01%	0,01%	**0,0%**	**0,00**
33	0,25	0,24	0,24	0,40%	0,39%	0,43%	**0,4%**	**0,24**
34	0,00	0,01	0,01	0,00%	0,02%	0,01%	**0,0%**	**0,01**
35	0,23	0,22	0,21	0,38%	0,36%	0,38%	**0,4%**	**0,22**
36	0,00	0,00	0,01	0,00%	0,00%	0,01%	**0,0%**	**0,00**
37	0,21	0,18	0,23	0,35%	0,29%	0,41%	**0,4%**	**0,21**
38	0,00	0,00	0,00	0,00%	0,00%	0,00%	**0,0%**	**0,00**
39	0,21	0,12	0,20	0,35%	0,19%	0,36%	**0,3%**	**0,18**
40	0,00	0,00	0,01	0,00%	0,00%	0,01%	**0,0%**	**0,00**
41	0,18	0,15	0,16	0,30%	0,25%	0,28%	**0,3%**	**0,16**
42	0,00	0,00	0,01	0,00%	0,00%	0,01%	**0,0%**	**0,00**
43	0,18	0,14	0,14	0,29%	0,23%	0,26%	**0,3%**	**0,15**
44	0,00	0,00	0,00	0,00%	0,00%	0,00%	**0,0%**	**0,00**
45	0,18	0,12	0,08	0,29%	0,20%	0,15%	**0,2%**	**0,13**
46	0,00	0,00	0,00	0,00%	0,00%	0,00%	**0,0%**	**0,00**
47	0,15	0,06	0,08	0,25%	0,10%	0,15%	**0,2%**	**0,10**
48	0,00	0,00	0,00	0,00%	0,00%	0,00%	**0,0%**	**0,00**
49	0,12	0,06	0,06	0,20%	0,10%	0,10%	**0,1%**	**0,08**
50	0,00	0,00	0,00	0,00%	0,00%	0,00%	**0,0%**	**0,00**

Fonte: O Próprio Autor

A3 – Medições no Equipamento de Ressonância Magnética

O equipamento de ressonância magnética analisado é da marca Philips, modelo Intera 1,5 T, série MR3028, que se encontra em operação desde o ano de 2011. Conforme informações obtidas junto ao hospital, esse equipamento realiza em média 9 exames por dia e cerca de 180 exames por mês.

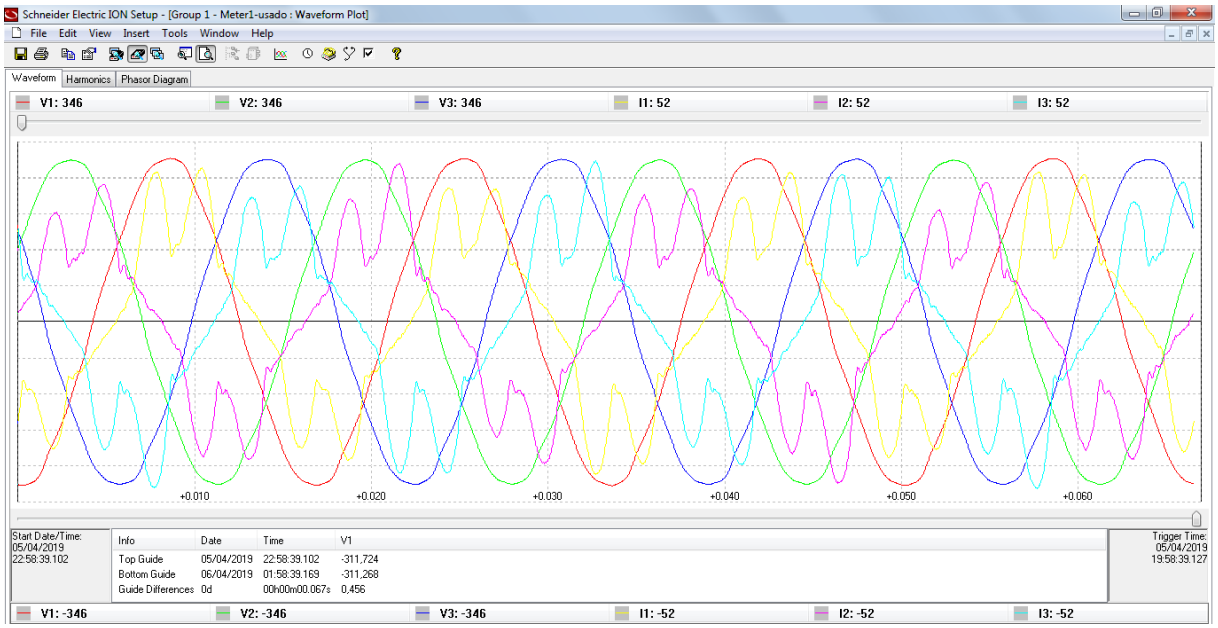
A Figura 66 apresenta uma foto do equipamento de ressonância magnética.

Figura 66 – Foto do equipamento de ressonância magnética analisado

Fonte: O Próprio Autor

A Figura 67 apresenta as formas de onda das correntes e das tensões obtidas nas medições do equipamento de ressonância magnética, e a Figura 68 apresenta a imagem da planilha com os valores numéricos obtidos para a máxima carga observada durante o período de medições.

Figura 67 – Formas de onda de tensões e correntes do equipamento ressonância magnética



Fonte: O Próprio Autor

Figura 68 – Imagem da planilha com os valores obtidos durante as medições no equipamento ressonância magnética

VALORES MEDIDOS NO QGBT DO EQUIPAMENTO

Equipamento: **RESSONÂNCIA MAGNÉTICA**
Marca/Modelo: Philips / Intera 1,5 T (Série MR3028)

Dados de Placa do Equipamento:
Potência Nominal de Entrada: **50 kVA**
Tensão de linha: **380 V**
Tipo de ligação: **Trifásica a três fios (estrela)**
Duração do Exame Medido: **120 segundos**

Valores Medidos na Carga à 54,84 % da Potência Nominal						
	Tensão de Fase (V)	Corrente de Fase (A)	Potência Aparente por Fase (kVA)	Fator de Potência (Deslocamento)	THDv	THDi
Fase 1	220,5	43,7	9,69	0,919	1,8%	31,0%
Fase 2	221,2	40,6	8,91	0,912	2,0%	31,7%
Fase 3	222,8	39,8	8,85	0,927	1,8%	31,2%
Média por Fase	*221,5*	*41,3*	*9,15*	*0,919*	*1,9%*	*31,3%*

	Correntes Medidas por Fase (A)							
Ordem (h)	I1 (A)	I2 (A)	I3 (A)	I1 (%)	I2 (%)	I3 (%)	**Imédia (%)**	Imédia (A)
1	41,68	38,62	37,78	-	-	-	-	39,36
2	3,96	3,69	3,57	9,50%	9,55%	9,45%	**9,5%**	3,74
3	1,71	1,58	1,55	4,10%	4,10%	4,10%	**4,1%**	1,61
4	2,35	2,18	2,08	5,63%	5,65%	5,50%	**5,6%**	2,20
5	9,60	9,23	8,35	23,04%	23,90%	22,10%	**23,0%**	9,06
6	3,39	3,15	3,07	8,13%	8,15%	8,12%	**8,1%**	3,20
7	5,68	5,29	5,10	13,62%	13,69%	13,50%	**13,6%**	5,35
8	0,33	0,32	0,30	0,80%	0,82%	0,80%	**0,8%**	0,32
9	0,88	0,81	0,76	2,10%	2,10%	2,00%	**2,1%**	0,81
10	0,27	0,25	0,24	0,65%	0,66%	0,64%	**0,7%**	0,26
11	1,05	0,98	0,94	2,52%	2,53%	2,50%	**2,5%**	0,99
12	0,60	0,55	0,54	1,43%	1,42%	1,43%	**1,4%**	0,56
13	1,15	1,10	1,04	2,75%	2,85%	2,75%	**2,8%**	1,10
14	0,25	0,27	0,23	0,60%	0,70%	0,60%	**0,6%**	0,25
15	0,46	0,44	0,42	1,10%	1,13%	1,10%	**1,1%**	0,44
16	0,10	0,10	0,09	0,25%	0,25%	0,25%	**0,3%**	0,10
17	1,15	1,08	1,04	2,76%	2,79%	2,75%	**2,8%**	1,09
18	0,06	0,07	0,06	0,15%	0,19%	0,15%	**0,2%**	0,06
19	1,03	0,96	0,93	2,46%	2,48%	2,45%	**2,5%**	0,97
20	0,02	0,02	0,02	0,05%	0,06%	0,05%	**0,1%**	0,02
21	0,40	0,39	0,37	0,97%	1,01%	0,97%	**1,0%**	0,39
22	0,01	0,02	0,01	0,03%	0,04%	0,03%	**0,0%**	0,01
23	0,29	0,29	0,26	0,69%	0,75%	0,68%	**0,7%**	0,28
24	0,00	0,00	0,00	0,01%	0,01%	0,00%	**0,0%**	0,00
25	0,20	0,18	0,15	0,48%	0,47%	0,40%	**0,5%**	0,18
26	0,00	0,00	0,00	0,01%	0,01%	0,00%	**0,0%**	0,00
27	0,08	0,10	0,06	0,20%	0,25%	0,15%	**0,2%**	0,08
28	0,00	0,00	0,00	0,00%	0,01%	0,00%	**0,0%**	0,00
29	0,05	0,08	0,04	0,13%	0,20%	0,10%	**0,1%**	0,06
30	0,00	0,01	0,00	0,01%	0,03%	0,00%	**0,0%**	0,01
31	0,07	0,07	0,00	0,17%	0,17%	0,00%	**0,1%**	0,05
32	0,00	0,00	4,91	0,00%	0,00%	13,00%	**4,3%**	1,64
33	0,02	0,02	0,00	0,04%	0,05%	0,01%	**0,0%**	0,01
34	0,00	0,00	0,00	0,00%	0,01%	0,00%	**0,0%**	0,00
35	0,05	0,05	0,05	0,13%	0,12%	0,13%	**0,1%**	0,05
36	0,00	0,00	0,00	0,01%	0,01%	0,01%	**0,0%**	0,00
37	0,05	0,04	0,04	0,11%	0,10%	0,10%	**0,1%**	0,04
38	0,00	0,00	0,00	0,00%	0,00%	0,01%	**0,0%**	0,00
39	0,03	0,03	0,03	0,07%	0,09%	0,09%	**0,1%**	0,03
40	0,00	0,01	0,00	0,00%	0,02%	0,00%	**0,0%**	0,00
41	0,04	0,04	0,03	0,09%	0,10%	0,07%	**0,1%**	0,03
42	0,00	0,00	0,00	0,00%	0,01%	0,00%	**0,0%**	0,00
43	0,03	0,03	0,02	0,07%	0,09%	0,06%	**0,1%**	0,03
44	0,00	0,00	0,00	0,00%	0,00%	0,00%	**0,0%**	0,00
45	0,01	0,39	0,00	0,02%	1,00%	0,01%	**0,3%**	0,13
46	0,00	0,00	0,00	0,00%	0,00%	0,00%	**0,0%**	0,00
47	0,02	0,02	0,01	0,04%	0,04%	0,03%	**0,0%**	0,01
48	0,00	0,00	0,00	0,00%	0,00%	0,01%	**0,0%**	0,00
49	0,00	0,00	0,00	0,01%	0,01%	0,01%	**0,0%**	0,00
50	0,00	0,00	0,00	0,00%	0,01%	0,00%	**0,0%**	0,00

Fonte: O Próprio Autor

A Figura 68 apresenta valores para o conteúdo harmônico da corrente drenada pelo equipamento de ressonância magnética até sua 50ª ordem, para uma condição onde sua potência demandada foi de 54,84 % de sua potência nominal.

Conforme apresentado na revisão bibliográfica sobre os aspectos operacionais dos equipamentos de ressonância magnética, sua demanda de potência também dependerá do tipo de exame (parte do corpo) a ser feito no paciente. Assim, durante o período de medições, a potência máxima (nominal) do equipamento também não foi utilizada.

Destacam-se ainda na Figura 68 que a potência trifásica máxima medida foi de 27,4 kVA (54,84% da nominal); sua *THDi* foi de 31,3% e que o Fator de Potência (deslocamento) foi de 0,919, ou seja, a carga é também do tipo predominantemente indutiva.

A4 – Dados Utilizados nas Simulações

Conforme recém apresentadas, as medições realizadas nos equipamentos não capturaram as condições operacionais na potência máxima de cada equipamento, e ainda contatou que a operação desses equipamentos em situações de plena carga depende das características dos exames a serem feitos em cada paciente.

Esta situação introduz um elemento probabilístico na análise das instalações elétricas hospitalares, reduzindo a probabilidade de esses equipamentos operarem simultaneamente e em plena carga, porém essa probabilidade existe e, caso ela ocorra, este trabalho analisa quais serão seus efeitos na distorção harmônica da tensão fornecida aos equipamentos.

Assim, considerou-se nesse trabalho uma situação na qual as cargas trabalham simultaneamente demandando potências individuais de 80% (oitenta por cento) de sua potência nominal. Essa consideração permitirá verificar a ocorrência da Autoperturbação e, caso as cargas trabalhem simultaneamente com potência individual superior a 80%, pelo princípio da superposição de efeitos, a ocorrência da Autoperturbação será agravada.

Outro ponto observado nas medições foi que os valores das componentes harmônicas das correntes variam ligeiramente entre as fases que alimentam os equipamentos eletromédicos. E ainda observou que eles estavam conectados em baixa tensão (380V), em sistemas trifásicos, com ligação do tipo estrela a três condutores.

Assim, serão utilizados nas simulações os valores percentuais médios dos componentes harmônicos na corrente de cada fase, e extrapolado linearmente para uma potência de 80% da potência nominal de cada equipamento. As Figuras 69, 70 e 71 apresentam as imagens das planilha com tais valores.

Figura 69 – Imagem da planilha com os valores do conteúdo harmônico médio para 80% da potencia nominal do equipamento de raio X

PROJEÇÃO DE VALORES PARA 80% DA CARGA DO EQUIPAMENTO

(a serem usados na simulação)

Equipamento: **RAIO X**

Marca/Modelo: Philips / Bucky Diagnost (série RX0747)

Dados de Placa do Equipamento:

Potência Nominal de Entrada: **40 kVA**

Tensão de linha: **380 V**

Tipo de ligação: **Trifásica a três fios (estrela)**

Valores Extrapolados para Carga à 80 % da Potência Nominal						
	Tensão de Fase (V)	Corrente de Fase (A)	Potência Aparente Trifásica (kVA)	Fator de Potência (Deslocamento)	THDv	THDi
Valores 80% PN	*225,5*	*47,0*	*32,00*	*0,774*	*1,2%*	*64,3%*

Ordem (h)	**Imédia (A)**	I (%)	Ordem (h)	**Imédia (A)**	I (%)
1	**39,51**	-	26	**0,06**	0,2%
2	**2,53**	6,4%	27	**1,17**	3,0%
3	**7,80**	19,7%	28	**0,04**	0,1%
4	**1,13**	2,9%	29	**2,81**	7,1%
5	**10,81**	27,4%	30	**0,04**	0,1%
6	**0,27**	0,7%	31	**5,06**	12,8%
7	**13,82**	35,0%	32	**0,03**	0,1%
8	**0,66**	1,7%	33	**1,46**	3,7%
9	**5,24**	13,3%	34	**0,02**	0,1%
10	**0,53**	1,3%	35	**2,78**	7,0%
11	**6,72**	17,0%	36	**0,02**	0,0%
12	**0,19**	0,5%	37	**0,11**	0,3%
13	**3,61**	9,1%	38	**0,01**	0,0%
14	**0,15**	0,4%	39	**2,28**	5,8%
15	**5,43**	13,7%	40	**0,01**	0,0%
16	**0,16**	0,4%	41	**2,50**	6,3%
17	**6,20**	15,7%	42	**0,01**	0,0%
18	**0,12**	0,3%	43	**1,96**	5,0%
19	**4,70**	11,9%	44	**0,00**	0,0%
20	**0,12**	0,3%	45	**1,86**	4,7%
21	**3,20**	8,1%	46	**0,00**	0,0%
22	**0,08**	0,2%	47	**2,11**	5,3%
23	**3,70**	9,4%	48	**0,00**	0,0%
24	**0,05**	0,1%	49	**0,13**	0,3%
25	**3,69**	9,3%	50	**0,00**	0,0%

Fonte: O Próprio Autor

Figura 70 – Imagem da planilha com os valores do conteúdo harmônico médio para 80% da potencia nominal do equipamento de tomografia computadorizada

PROJEÇÃO DE VALORES PARA 80% DA CARGA DO EQUIPAMENTO

(a serem usados na simulação)

Equipamento: **TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA**

Marca/Modelo: Hitachi / Scenaria 128 (série S3079)

Dados de Placa do Equipamento:

Potência Nominal de Entrada: **100 kVA**

Tensão de linha: **380 V**

Tipo de ligação: **Trifásica a três fios (estrela)**

Valores Extrapolados para Carga à 80 % da Potência Nominal						
	Tensão de Fase (V)	Corrente de Fase (A)	Potência Aparente Trifásica (kVA)	Fator de Potência (Deslocamento)	THDv	THDi
Valores 80% PN	*221,6*	*119,4*	*80,00*	*0,984*	*1,7%*	*38,4%*

Ordem (h)	**Imédia (A)**	I (%)	Ordem (h)	**Imédia (A)**	I (%)
1	**111,44**	-	26	**0,07**	0,1%
2	**2,67**	2,4%	27	**0,74**	0,7%
3	**20,87**	18,7%	28	**0,05**	0,0%
4	**1,16**	1,0%	29	**0,45**	0,4%
5	**14,99**	13,5%	30	**0,00**	0,0%
6	**2,41**	2,2%	31	**0,45**	0,4%
7	**17,95**	16,1%	32	**0,01**	0,0%
8	**0,84**	0,8%	33	**0,45**	0,4%
9	**17,02**	15,3%	34	**0,01**	0,0%
10	**0,71**	0,6%	35	**0,42**	0,4%
11	**15,94**	14,3%	36	**0,00**	0,0%
12	**0,58**	0,5%	37	**0,39**	0,4%
13	**15,39**	13,8%	38	**0,00**	0,0%
14	**0,56**	0,5%	39	**0,33**	0,3%
15	**1,72**	1,5%	40	**0,00**	0,0%
16	**0,25**	0,2%	41	**0,31**	0,3%
17	**2,41**	2,2%	42	**0,00**	0,0%
18	**0,22**	0,2%	43	**0,29**	0,3%
19	**1,73**	1,6%	44	**0,00**	0,0%
20	**0,21**	0,2%	45	**0,24**	0,2%
21	**1,36**	1,2%	46	**0,00**	0,0%
22	**0,16**	0,1%	47	**0,19**	0,2%
23	**0,76**	0,7%	48	**0,00**	0,0%
24	**0,12**	0,1%	49	**0,15**	0,1%
25	**0,72**	0,6%	50	**0,00**	0,0%

Fonte: O Próprio Autor

Figura 71 – Imagem da planilha com os valores do conteúdo harmônico médio para 80% da potencia nominal do equipamento de ressonância magnética

PROJEÇÃO DE VALORES PARA 80% DA CARGA DO EQUIPAMENTO

(a serem usados na simulação)

Equipamento: **RESSONÂNCIA MAGNÉTICA**

Marca/Modelo: Philips / Intera 1,5 T (Série MR3028)

Dados de Placa do Equipamento:

Potência Nominal de Entrada: **50 kVA**

Tensão de linha: **380 V**

Tipo de ligação: **Trifásica a três fios (estrela)**

Valores Extrapolados para Carga à 80 % da Potência Nominal						
	Tensão de Fase (V)	Corrente de Fase (A)	Potência Aparente Trifásica (kVA)	Fator de Potência (Deslocamento)	THDv	THDi
Valores 80% PN	*221,5*	*60,2*	*40,00*	*0,919*	*1,9%*	*31,3%*

Ordem (h)	**Imédia (A)**	I (%)	Ordem (h)	**Imédia (A)**	I (%)
1	**57,42**	-	26	**0,00**	0,0%
2	**5,45**	9,5%	27	**0,11**	0,2%
3	**2,35**	4,1%	28	**0,00**	0,0%
4	**3,21**	5,6%	29	**0,08**	0,1%
5	**13,21**	23,0%	30	**0,01**	0,0%
6	**4,67**	8,1%	31	**0,07**	0,1%
7	**7,81**	13,6%	32	**2,49**	4,3%
8	**0,46**	0,8%	33	**0,02**	0,0%
9	**1,19**	2,1%	34	**0,00**	0,0%
10	**0,37**	0,7%	35	**0,07**	0,1%
11	**1,45**	2,5%	36	**0,01**	0,0%
12	**0,82**	1,4%	37	**0,06**	0,1%
13	**1,60**	2,8%	38	**0,00**	0,0%
14	**0,36**	0,6%	39	**0,05**	0,1%
15	**0,64**	1,1%	40	**0,00**	0,0%
16	**0,14**	0,3%	41	**0,05**	0,1%
17	**1,59**	2,8%	42	**0,00**	0,0%
18	**0,09**	0,2%	43	**0,04**	0,1%
19	**1,41**	2,5%	44	**0,00**	0,0%
20	**0,03**	0,1%	45	**0,20**	0,3%
21	**0,56**	1,0%	46	**0,00**	0,0%
22	**0,02**	0,0%	47	**0,02**	0,0%
23	**0,41**	0,7%	48	**0,00**	0,0%
24	**0,00**	0,0%	49	**0,01**	0,0%
25	**0,26**	0,5%	50	**0,00**	0,0%

Fonte: O Próprio Autor

A extrapolação linear para obtenção dos valores a serem utilizados no estudo analítico e nas simulações foi efetuada considerando os seguintes critérios:

a) A Potência demandada será de 80% (oitenta por cento) da potência nominal do equipamento. Esse critério levou aos seguintes valores:
   - Raio X.....32 kVA
   - Tomografia Computadorizada.....80 kVA
   - Ressonância Magnética.....40 kVA

b) O percentual da distorção harmônica total nas correntes deverá ser mantido para a nova potência extrapolada como igual ao medido. Esse critério resultou em:
   - Raio X.....*THDi* = 64,3%
   - Tomografia Computadorizada..... *THDi* = 38,4%
   - Ressonância Magnética..... *THDi* = 31,3%

c) A projeção da corrente fundamental medida para o valor na nova condição de potência foi feita através de extrapolação linear, considerando-se o percentual da potência demandada durante as medições e o percentual de 80% da potência nominal desejado. Esse critério levou aos seguintes valores:
   - Raio X.....$I_{1(80\%)}$ = 39,51 A
   - Tomografia Computadorizada..... $I_{1(80\%)}$ = 111,44 A
   - Ressonância Magnética..... $I_{1(80\%)}$ = 57,42 A

d) A projeção do valor de cada componente harmônico das correntes, expresso em amperes, foi feita considerando-se o seu valor percentual médio da corrente fundamental. Esse critério levou aos valores apresentados nas Figuras 69, 70 e 71.

e) A determinação dos valores eficazes das correntes de cada equipamento, considerando sua componente fundamental e seu conteúdo harmônico foi feita a partir da Equação (35). Esse critério levou aos seguintes valores:
   - Raio X.....$I_{RMStotal(80\%)}$ = 47,0 A
   - Tomografia Computadorizada..... $I_{RMStotal(80\%)}$ = 119,4 A
   - Ressonância Magnética..... $I_{RMStotal(80\%)}$ = 60,2 A

Para possibilitar simplificações nas simulações, neste trabalho foram consideradas apenas as componentes harmônicas ímpares, até a 21ª ordem. Destaca-se novamente aqui que o efeito de se considerarem as demais harmônicas também deverá agravar o problema da Autoperturbação.

Outra simplificação efetuada foi a de se desconsiderar a distorção harmônica na tensão registrada durante as medições, ou seja, nas simulações será admitido que o conteúdo harmônico das correntes não tivesse correlação significativa com as distorções harmônicas observadas na tensão de alimentação durante as medições. A análise dessa correlação poderá ser feita em trabalhos futuros.

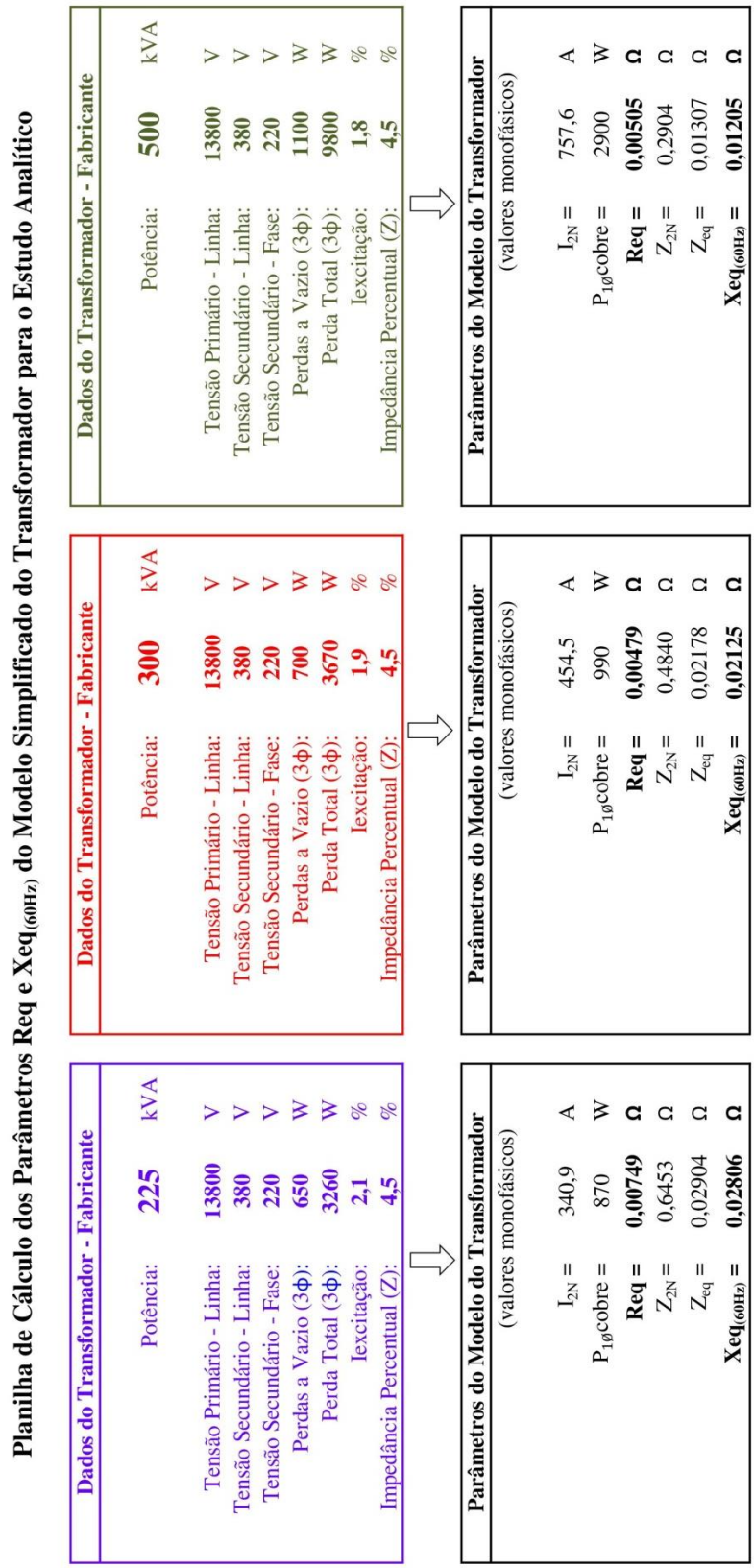
APÊNDICE B

Planilhas Desenvolvidas para o Estudo Analítico da Autoperturbação

Esta seção apresenta as planilhas elaboradas para o estudo da autoperturbação por harmônicos em transformadores, utilizando-se do software Excel, da empresa Microsoft. Ela está dividida em três partes, sendo: i) planilha para a determinação dos parâmetros do circuito equivalente monofásico para os três transformadores analisados; ii) a apresentação e a composição do conteúdo harmônico quando da simultaneidade das cargas, utilizado no estudo analítico, e; iii) os cálculos efetuados no estudo analítico.

As Figuras 72 a 76 apresentam as imagens das planilhas elaboradas.

Figura 72 – Imagem da planilha de cálculo dos rarâmetros Req e $Xeq_{(60Hz)}$ do modelo simplificado do transformador para o estudo analítico



Fonte: O Próprio Autor

Figura 73 – Imagem da planilha contendo o conteúdo harmônico das correntes dos equipamentos e sua composição para a simultaneidade das cargas, utilizada no estudo analítico

Conteúdo Harmônico das Correntes dos Equipamentos Utilizado no Estudo Analítico

Ressonância Magnética		
Potência Nominal =	**50**	kVA
(valores eficazes)		
Tensão de Linha =	380	V
I1 =	57,42	A
I3 =	2,35	A
I5 =	13,21	A
I7 =	7,81	A
I9 =	1,19	A
I11 =	1,45	A
I13 =	1,60	A
I15 =	0,64	A
I17 =	1,59	A
I19 =	1,41	A
I21 =	0,56	A
Icarga =	**59,58**	A
THDi =	**27,66%**	
Scarga =	**39,21**	kVA

Tomografia Computadorizada		
Potência Nominal:	**100**	kVA
(valores eficazes)		
Tensão de Linha:	380	V
I1 =	111,44	A
I3 =	20,87	A
I5 =	14,99	A
I7 =	17,95	A
I9 =	17,02	A
I11 =	15,94	A
I13 =	15,39	A
I15 =	1,72	A
I17 =	2,41	A
I19 =	1,73	A
I21 =	1,36	A
Icarga =	**119,15**	A
THDi =	**37,82%**	
Scarga =	**78,42**	kVA

Raios X		
Potência Nominal:	**40**	kVA
(valores eficazes)		
Tensão de Linha:	380	V
I1 =	39,51	A
I3 =	7,80	A
I5 =	10,81	A
I7 =	13,82	A
I9 =	5,24	A
I11 =	6,72	A
I13 =	3,61	A
I15 =	5,43	A
I17 =	6,20	A
I19 =	4,70	A
I21 =	3,20	A
Icarga =	**46,00**	A
THDi =	**59,60%**	
Scarga =	**30,27**	kVA

Ressonância + Tomografia		
Potência Total =	**150**	kVA
(valores eficazes)		
Tensão de Linha =	380	V
I1 =	168,86	A
I3 =	23,22	A
I5 =	28,20	A
I7 =	25,76	A
I9 =	18,21	A
I11 =	17,39	A
I13 =	16,99	A
I15 =	2,36	A
I17 =	4,00	A
I19 =	3,14	A
I21 =	1,92	A
Icarga =	**177,40**	A
THDi =	**32,20%**	
Scargas =	**116,76**	kVA

Ressonância + Tomografia + Raios X		
Potência Total =	**190**	kVA
(valores eficazes)		
Tensão de Linha =	380	V
I1 =	208,37	A
I3 =	31,02	A
I5 =	39,01	A
I7 =	39,58	A
I9 =	23,45	A
I11 =	24,11	A
I13 =	20,60	A
I15 =	7,79	A
I17 =	10,20	A
I19 =	7,84	A
I21 =	5,12	A
Icarga =	**221,98**	A
THDi =	**36,73%**	
Scargas =	**146,10**	kVA

Fonte: O Próprio Autor

Figura 74 – Imagem da planilha de cálculo de parâmetros de distorção harmônica para um transformador de 225 kVA, utilizada no estudo analítico

Cálculos dos Parâmetros de Distorção Harmônica para Trafo de 225 kVA

Parâmetros do Modelo Simplificado:		
Potência Nominal =	225	kVA
Tensão de Fase =	220	V
Req =	**0,00749**	**Ω**
$Xeq_{(60Hz)}$ =	**0,02806**	**Ω**

Apenas com a Ressonância Magnética

h	Req	Xeqh	ΔVReq	AVXeqh	AVZeqh	V_{Bh}
1	0,00749	0,02806	0,43008	1,61121	1,66762	218,33
3	0,00749	0,08418	0,0176	0,19782	0,19860	0,20
5	0,00749	0,1403	0,09894	1,85336	1,85600	1,86
7	0,00749	0,19642	0,0585	1,53404	1,53516	1,54
9	0,00749	0,25254	0,00891	0,30052	0,30065	0,30
11	0,00749	0,30866	0,01086	0,44756	0,44769	0,45
13	0,00749	0,36478	0,01198	0,58365	0,58377	0,58
15	0,00749	0,4209	0,00479	0,26938	0,26942	0,27
17	0,00749	0,47702	0,01191	0,75846	0,75856	0,76
19	0,00749	0,53314	0,01056	0,75173	0,75180	0,75
21	0,00749	0,58926	0,00419	0,32999	0,33001	0,33

Scarga =	39,21	kVA	Carregamento =	17,43%
V_{B1} =	218,33	V		
Soma (V_{Bh}^2) =	7,79	V		
V_{Brms} =	218,35	V		
R_{T1} =	0,76%		ΔR_{T1-h} =	0,01%
R_{Th} =	0,75%			

THD_V = 1,28% (somente com Ressonância Magnética)

Ressonância Magnética + Tomografia Computadorizada

h	Req	Xeqh	ΔVReq	AVXeqh	AVZeqh	V_{Bh}
1	0,00749	0,02806	1,26476	4,73821	4,90411	215,10
3	0,00749	0,08418	0,17392	1,95466	1,96238	1,96
5	0,00749	0,1403	0,21122	3,95646	3,96209	3,96
7	0,00749	0,19642	0,19294	5,05978	5,06346	5,06
9	0,00749	0,25254	0,13639	4,59875	4,60078	4,60
11	0,00749	0,30866	0,13025	5,3676	5,36918	5,37
13	0,00749	0,36478	0,12726	6,19761	6,19892	6,20
15	0,00749	0,4209	0,01768	0,99332	0,99348	0,99
17	0,00749	0,47702	0,02996	1,90808	1,90832	1,91
19	0,00749	0,53314	0,02352	1,67406	1,67422	1,67
21	0,00749	0,58926	0,01438	1,13138	1,13147	1,13

Scarga =	116,76	kVA	Carregamento =	51,89%
V_{B1} =	215,10	V		
Soma (V_{Bh}^2) =	142,32	V		
V_{Brms} =	215,43	V		
R_{T1} =	2,23%		ΔR_{T1-h} =	0,15%
R_{Th} =	2,08%			

THD_V = 5,55% (Ressonância + Tomografia)

Ressonância Magnética + Tomografia Computadorizada + Raios X

h	Req	Xeqh	ΔVReq	AVXeqh	AVZeqh	V_{Bh}
1	0,00749	0,02806	1,56069	5,84686	6,05157	213,95
3	0,00749	0,08418	0,23234	2,61126	2,62158	2,62
5	0,00749	0,14030	0,29218	5,4731	5,48090	5,48
7	0,00749	0,19642	0,29645	7,7743	7,77995	7,78
9	0,00749	0,25254	0,17564	5,92206	5,92467	5,92
11	0,00749	0,30866	0,18058	7,44179	7,44398	7,44
13	0,00749	0,36478	0,15429	7,51447	7,51605	7,52
15	0,00749	0,42090	0,05835	3,27881	3,27933	3,28
17	0,00749	0,47702	0,0764	4,8656	4,86620	4,87
19	0,00749	0,53314	0,05872	4,17982	4,18023	4,18
21	0,00749	0,58926	0,02352	3,01701	3,01710	3,02

Scarga =	146,10	kVA	Carregamento =	64,94%
V_{B1} =	213,95	V		
Soma (V_{Bh}^2) =	305,46	V		
V_{Brms} =	214,66	V		
R_{T1} =	2,75%		ΔR_{T1-h} =	0,32%
R_{Th} =	2,43%			

THD_V = 8,17% (Ressonância + Tomografia + Raios X)

Determinação dos Indicadores para o Transformador de 225kVA

Indicador	Cargas Ligadas RM	RM + TC	RM+TC+Rx	
$V_{B(RMS)}$ =	218,35	215,43	214,66	(Equações 28 + 30)
THD_V =	1,28%	5,55%	8,17%	(Equação 32)
TDD =	27,66%	32,20%	36,73%	(Equação 36)
DIN_V =	1,28%	5,54%	8,14%	(Equação 37)
F_{HL} =	1,93	2,58	2,96	(Equação 53)
K_{UL} =	0,11	1,80	3,71	(Equação 55)
K_{EN} =	1,05	1,10	1,13	(Equação 60)
R_{Th} =	0,75%	2,08%	2,43%	(Equação 52)
Carregamento =	17,43%	51,89%	64,94%	

Fonte: O Próprio Autor

Figura 75 – Imagem da planilha de cálculo de parâmetros de distorção harmônica para um transformador de 300 kVA, utilizada no estudo analítico

Cálculos dos Parâmetros de Distorção Harmônica para Trafo de 300 kVA

Parâmetros do Modelo Simplificado:		
Potência Nominal =	300	kVA
Tensão de Fase =	220	V
Req =	**0,00479**	**Ω**
$Xeq_{(60Hz)}$ =	**0,02125**	**Ω**

Apenas com a Ressonância Magnética

h	Req	Xeqh	ΔVReq	AVXeqh	AVZeqh	V_{Bh}
1	0,00479	0,02125	0,27504	1,22018	1,25079	218,75
3	0,00479	0,06375	0,01126	0,14981	0,15023	0,15
5	0,00479	0,10625	0,06328	1,40356	1,40499	1,40
7	0,00479	0,14875	0,03741	1,16174	1,16234	1,16
9	0,00479	0,19125	0,0057	0,22759	0,22766	0,23
11	0,00479	0,23375	0,00695	0,33894	0,33901	0,34
13	0,00479	0,27625	0,00766	0,442	0,44207	0,44
15	0,00479	0,31875	0,00307	0,204	0,20402	0,20
17	0,00479	0,36125	0,00762	0,57439	0,57444	0,57
19	0,00479	0,40375	0,00675	0,56929	0,56933	0,57
21	0,00479	0,44625	0,00268	0,2499	0,24991	0,25

Scarga =	39,21	kVA	Carregamento =	13,07%
V_{B1} =	218,75	V		
Soma (V_{Bh}^2) =	4,47	V		
V_{Brms} =	218,76	V		
R_{T1} =	0,57%		ΔR_{T1-h} =	0,00%
R_{Th} =	0,56%			
THD_V =	**0,97%**	**(somente com Ressonância Magnética)**		

Ressonância Magnética + Tomografia Computadorizada

h	Req	Xeqh	ΔVReq	AVXeqh	AVZeqh	V_{Bh}
1	0,00479	0,02125	0,80884	3,58828	3,67831	216,32
3	0,00479	0,06375	0,11122	1,48028	1,48445	1,48
5	0,00479	0,10625	0,13508	2,99625	2,99929	3,00
7	0,00479	0,14875	0,12339	3,8318	3,83379	3,83
9	0,00479	0,19125	0,08723	3,48266	3,48375	3,48
11	0,00479	0,23375	0,0833	4,06491	4,06577	4,07
13	0,00479	0,27625	0,08138	4,69349	4,69419	4,69
15	0,00479	0,31875	0,0113	0,75225	0,75233	0,75
17	0,00479	0,36125	0,01916	1,445	1,44513	1,45
19	0,00479	0,40375	0,01504	1,26778	1,26786	1,27
21	0,00479	0,44625	0,0092	0,8568	0,85685	0,86

Scarga =	116,76	kVA	Carregamento =	38,92%
V_{B1} =	216,32	V		
Soma (V_{Bh}^2) =	81,60	V		
V_{Brms} =	216,51	V		
R_{T1} =	1,67%		ΔR_{T1-h} =	0,09%
R_{Th} =	1,59%			
THD_V =	**4,18%**	**(Ressonância + Tomografia)**		

Ressonância Magnética + Tomografia Computadorizada + Raios X

h	Req	Xeqh	ΔVReq	AVXeqh	AVZeqh	V_{Bh}
1	0,00479	0,02125	0,99809	4,42786	4,53896	215,46
3	0,00479	0,06375	0,14859	1,97753	1,98310	1,98
5	0,00479	0,10625	0,18686	4,14481	4,14902	4,15
7	0,00479	0,14875	0,18959	5,88753	5,89058	5,89
9	0,00479	0,19125	0,11233	4,48481	4,48622	4,49
11	0,00479	0,23375	0,11549	5,63571	5,63690	5,64
13	0,00479	0,27625	0,09867	5,69075	5,69161	5,69
15	0,00479	0,31875	0,03731	2,48306	2,48334	2,48
17	0,00479	0,36125	0,04886	3,68475	3,68507	3,69
19	0,00479	0,40375	0,03755	3,1654	3,16562	3,17
21	0,00479	0,44625	0,01504	2,2848	2,28485	2,28

Scarga =	146,10	kVA	Carregamento =	48,70%
V_{B1} =	215,46	V		
Soma (V_{Bh}^2) =	175,13	V		
V_{Brms} =	215,87	V		
R_{T1} =	2,06%		ΔR_{T1-h} =	0,18%
R_{Th} =	1,88%			
THD_V =	**6,14%**	**(Ressonância + Tomografia + Raios X)**		

Determinação dos Indicadores para o Transformador de 300kVA

Indicador	Cargas Ligadas RM	RM + TC	RM+TC+Rx	
$V_{B(RMS)}$ =	218,76	216,51	215,87	(Equações 28 + 30)
THD_V =	0,97%	4,18%	6,14%	(Equação 32)
TDD =	27,66%	32,20%	36,73%	(Equação 36)
DIN_V =	0,97%	4,17%	6,13%	(Equação 37)
F_{HL} =	1,93	2,58	2,96	(Equação 53)
K_{UL} =	0,06	1,01	2,09	(Equação 55)
K_{EN} =	1,05	1,10	1,13	(Equação 60)
R_{Th} =	0,56%	1,59%	1,88%	(Equação 52)
Carregamento =	13,07%	38,92%	48,70%	

Fonte: O Próprio Autor

Figura 76 – Imagem da planilha de cálculo de parâmetros de distorção harmônica para um transformador de 500 kVA, utilizada no estudo analítico

Cálculos dos Parâmetros de Distorção Harmônica para Trafo de 500 kVA

Parâmetros do Modelo Simplificado:		
Potência Nominal =	500	kVA
Tensão de Fase =	220	V
Req =	**0,00505**	**Ω**
$Xeq_{(60Hz)}$ =	**0,01205**	**Ω**

Apenas com a Ressonância Magnética

h	Req	Xeqh	ΔVReq	AVXeqh	AVZeqh	V_{Bh}
1	0,00505	0,01205	0,28997	0,69191	0,75022	219,25
3	0,00505	0,03615	0,01187	0,08495	0,08578	0,09
5	0,00505	0,06025	0,06671	0,7959	0,79869	0,80
7	0,00505	0,08435	0,03944	0,65877	0,65995	0,66
9	0,00505	0,10845	0,00601	0,12906	0,12920	0,13
11	0,00505	0,13255	0,00732	0,1922	0,19234	0,19
13	0,00505	0,15665	0,00808	0,25064	0,25077	0,25
15	0,00505	0,18075	0,00323	0,11568	0,11573	0,12
17	0,00505	0,20485	0,00803	0,32571	0,32581	0,33
19	0,00505	0,22895	0,00712	0,32282	0,32290	0,32
21	0,00505	0,25305	0,00283	0,14171	0,14174	0,14

Scarga =	39,21	kVA	Carregamento =	7,84%
V_{B1} =	219,25	V		
Soma (V_{Bh}^2) =	1,44	V		
V_{Brms} =	219,25	V		
R_{T1} =	0,34%		ΔR_{T1-h} =	0,00%
R_{Th} =	0,34%			

THD_V = 0,55% (somente com Ressonância Magnética)

Ressonância Magnética + Tomografia Computadorizada

h	Req	Xeqh	ΔVReq	AVXeqh	AVZeqh	V_{Bh}
1	0,00505	0,01205	0,85274	2,03476	2,20623	217,79
3	0,00505	0,03615	0,11726	0,8394	0,84755	0,85
5	0,00505	0,06025	0,14241	1,69905	1,70501	1,71
7	0,00505	0,08435	0,13009	2,17286	2,17675	2,18
9	0,00505	0,10845	0,09196	1,97487	1,97701	1,98
11	0,00505	0,13255	0,08782	2,30504	2,30672	2,31
13	0,00505	0,15665	0,0858	2,66148	2,66287	2,66
15	0,00505	0,18075	0,01192	0,42657	0,42674	0,43
17	0,00505	0,20485	0,0202	0,8194	0,81965	0,82
19	0,00505	0,22895	0,01586	0,7189	0,71908	0,72
21	0,00505	0,25305	0,0097	0,48586	0,48595	0,49

Scarga =	116,76	kVA	Carregamento =	23,35%
V_{B1} =	217,79	V		
Soma (V_{Bh}^2) =	26,29	V		
V_{Brms} =	217,85	V		
R_{T1} =	1,00%		ΔR_{T1-h} =	0,03%
R_{Th} =	0,98%			

THD_V = 2,35% (Ressonância + Tomografia)

Ressonância Magnética + Tomografia Computadorizada + Raios X

h	Req	Xeqh	ΔVReq	AVXeqh	AVZeqh	V_{Bh}
1	0,00505	0,01205	1,05227	2,51086	2,72244	217,28
3	0,00505	0,03615	0,15665	1,12137	1,13226	1,13
5	0,00505	0,06025	0,197	2,35035	2,35859	2,36
7	0,00505	0,08435	0,19988	3,33857	3,34455	3,34
9	0,00505	0,10845	0,11842	2,54315	2,54591	2,55
11	0,00505	0,13255	0,12176	3,19578	3,19810	3,20
13	0,00505	0,15665	0,10403	3,22699	3,22867	3,23
15	0,00505	0,18075	0,03934	1,40804	1,40859	1,41
17	0,00505	0,20485	0,05151	2,08947	2,09010	2,09
19	0,00505	0,22895	0,03959	1,79497	1,79540	1,80
21	0,00505	0,25305	0,01586	1,29562	1,29571	1,30

Scarga =	146,10	kVA	Carregamento =	29,22%
V_{B1} =	217,28	V		
Soma (V_{Bh}^2) =	56,42	V		
V_{Brms} =	217,41	V		
R_{T1} =	1,24%		ΔR_{T1-h} =	0,06%
R_{Th} =	1,18%			

THD_V = 3,46% (Ressonância + Tomografia + Raios X)

Determinação dos Indicadores para o Transformador de 225kVA

Indicador	Cargas Ligadas			
	RM	RM + TC	RM+TC+Rx	
$V_{B(RMS)}$ =	219,25	217,85	217,41	(Equações 28 + 30)
THD_V =	0,55%	2,35%	3,46%	(Equação 32)
TDD =	27,66%	32,20%	36,73%	(Equação 36)
DIN_V =	0,55%	2,35%	3,45%	(Equação 37)
F_{HL} =	1,93	2,58	2,96	(Equação 53)
K_{UL} =	0,02	0,36	0,75	(Equação 55)
K_{EN} =	1,05	1,10	1,13	(Equação 60)
R_{Th} =	0,34%	0,98%	1,18%	(Equação 52)
Carregamento =	7,84%	23,35%	29,22%	

Fonte: O Próprio Autor

APÊNDICE C

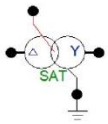
Planilhas Desenvolvidas para o Cálculos dos Parâmetros dos Modelos dos Transformadores em *ATPDraw*

Esta seção apresenta as planilhas utilizadas para a determinação dos parâmetros dos modelos dos transformadores a serem aplicados no bloco SATTRAFO do *ATPDraw*.

A metodologia utilizada foi a apresentada por (SANTILIO, REIS, et al., 2012), que está reproduzida parcialmente no Anexo III, e a versão eletrônica da planilha foi obtida junto a um dos autores, o Prof. Dr. Fabrício Parra Santilio.

As Figuras 77 a 79 apresentam as imagens das planilhas elaboradas para os transformadores utilizados neste trabalho, quais sejam, 225 kVA, 300 kVA e 500 kVA, respectivamente. Os dados originais e característicos de cada um desses transformadores foram obtidos da "folha de dados" apresentadas no Anexo I.

Figura 77 – Imagem da planilha de cálculo dos parâmetros do transformador de 225 kVA a serem implementados no bloco SATTRAFO



Delta-estrela (Δ-Y)

DADOS DE ENTRADA

Frequência =>	**f**	**=**	**60**	**Hz**	
Potência trifásica =>	**S**	**=**	**225**	**kVA**	
Tensão FF nominal do primário =>	**V1**	**=**	**13,8**	**kV**	
Tensão FF nominal do secundário =>	**V2**	**=**	**0,38**	**kV**	
Impedância =>	**Z**	**=**	**4,50**	**%**	
Resistência =>	**R**	**=**	**1,16**	**%**	(do cálculo analítico)
Corrente a vazio (excitação) =>	**Io**	**=**	**2,10**	**%**	
Perdas em vazio =>	**Po**	**=**	**650**	**W**	

Cálculo da reatância total:

X= 4,35 %

Cálculo das correntes:

Inp =	9,41	[A] 3ϕ	
Ins =	341,85	[A] 3ϕ	
In1 =	5,43	[A] 1ϕ	(por fase nas bobinas do primário)
In2 =	341,85	[A] 1ϕ	(por fase nas bobinas do secundário)
Io =	0,161405	[A]	(corrente de pico a vazio em ampéres)

Calculo da impedância base:

Zbp = 2539,2 [Ω]

Zbs = 0,64 [Ω]

Cálculo da resistência de magnetização:

Rmag = 292985 [Ω]

Rmag = 0,293 [MΩ]

Cálculo da reatância e indutância primária:

Xp = 55,2012 [Ω]

Lp = 146,4257 [mH]

Cálculo da resistência primária:

Rp = 14,7274 [Ω]

Cálculo da reatância e indutância secundária:

Xs = 0,0140 [Ω]

Ls = 0,0370 [mH]

Cálculo da resistência secundária:

Rs = 0,0037 [Ω]

Cálculo fluxo λo:

λoRMS = 51,8018018 [Wb] e λoPICO = 73,2588107 [Wb]

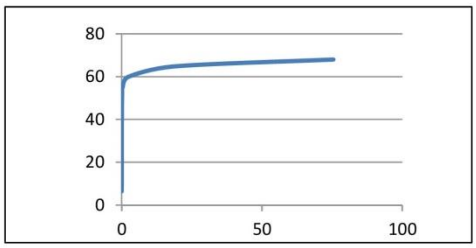
Dados para o ATP

Atributos

V prim =	**13800**	**[V]**
V sec =	**219,39**	**[V]**
R prim =	**14,7274**	**[Ω]**
R sec =	**0,0037**	**[Ω]**
XLprim =	**55,2012**	**[Ω]**
XL sec =	**0,0140**	**[Ω]**
Io =	**0,161405**	**[A]**
Fo =	**73,258811**	**[Wb]**
Rmag =	**292985**	**[Ω]**

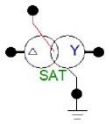
Características de Saturação (chapa de aço silício de grãos orientados da Acesita)

H [A/m]	B [T]	**Ipico [A]**	**F (λpico) [Wb]**
6,684	0,20	**0,016813**	**6,475225**
11,099	0,40	**0,027919**	**12,950450**
17,729	0,80	**0,044596**	**25,900901**
23,805	1,20	**0,059880**	**38,851351**
31,495	1,40	**0,079223**	**45,326577**
64,166	1,60	**0,161405**	**51,801802**
136,311	1,70	**0,342880**	**55,039414**
946,842	1,85	**2,381711**	**59,895833**
7419,727	2,00	**18,663772**	**64,752252**
30000,000	2,10	**75,462773**	**67,989865**



Fonte: O Próprio Autor

Figura 78 – Imagem da planilha de cálculo dos parâmetros do transformador de 300 kVA a serem implementados no bloco SATTRAFO



Delta-estrela (Δ-Y)

DADOS DE ENTRADA

Frequência =>	**f**	**=**	**60**	**Hz**	
Potência trifásica =>	**S**	**=**	**300**	**kVA**	
Tensão FF nominal do primário =>	**V1**	**=**	**13,8**	**kV**	
Tensão FF nominal do secundário =>	**V2**	**=**	**0,38**	**kV**	
Impedância =>	**Z**	**=**	**4,50**	**%**	
Resistência =>	**R**	**=**	**0,99**	**%**	(do cálculo analítico)
Corrente a vazio (excitação) =>	**Io**	**=**	**1,90**	**%**	
Perdas em vazio =>	**Po**	**=**	**700**	**W**	

Cálculo da reatância total:

X= 4,39 %

Cálculo das correntes:

Inp =	12,55	[A] 3ϕ	
Ins =	455,80	[A] 3ϕ	
In1 =	7,25	[A] 1ϕ	(por fase nas bobinas do primário)
In2 =	455,80	[A] 1ϕ	(por fase nas bobinas do secundário)
Io =	0,194711	[A]	(corrente de pico a vazio em ampéres)

Calculo da impedância base:

Zbp = 1904,4 [Ω]

Zbs = 0,48 [Ω]

Cálculo da resistência de magnetização:

Rmag = 272057 [Ω]

Rmag = 0,272 [MΩ]

Cálculo da reatância e indutância primária:

Xp = 41,7992 [Ω]

Lp = 110,8758 [mH]

Cálculo da resistência primária:

Rp = 9,4268 [Ω]

Cálculo da reatância e indutância secundária:

Xs = 0,0106 [Ω]

Ls = 0,0280 [mH]

Cálculo da resistência secundária:

Rs = 0,0024 [Ω]

Cálculo fluxo λo:

λoRMS = 51,8018018 [Wb] e λoPICO = 73,2588107 [Wb]

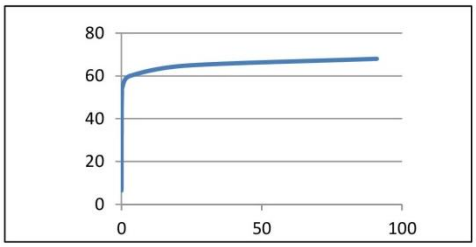
Dados para o ATP

Atributos

V prim =	**13800**	**[V]**
V sec =	**219,39**	**[V]**
R prim =	**9,4268**	**[Ω]**
R sec =	**0,0024**	**[Ω]**
XLprim =	**41,7992**	**[Ω]**
XL sec =	**0,0106**	**[Ω]**
Io =	**0,194711**	**[A]**
Fo =	**73,258811**	**[Wb]**
Rmag =	**272057**	**[Ω]**

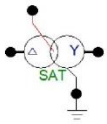
Características de Saturação (chapa de aço silício de grãos orientados da Acesita)

H [A/m]	B [T]	**Ipico [A]**	**F (λpico) [Wb]**
6,684	0,20	**0,020282**	**6,475225**
11,099	0,40	**0,033680**	**12,950450**
17,729	0,80	**0,053798**	**25,900901**
23,805	1,20	**0,072236**	**38,851351**
31,495	1,40	**0,095571**	**45,326577**
64,166	1,60	**0,194711**	**51,801802**
136,311	1,70	**0,413633**	**55,039414**
946,842	1,85	**2,873175**	**59,895833**
7419,727	2,00	**22,515027**	**64,752252**
30000,000	2,10	**91,034456**	**67,989865**



Fonte: O Próprio Autor

Figura 79 – Imagem da planilha de cálculo dos parâmetros do transformador de 500 kVA a serem implementados no bloco SATTRAFO



Delta-estrela (Δ-Y)

DADOS DE ENTRADA

Frequência =>	**f**	**=**	**60**	**Hz**	
Potência trifásica =>	**S**	**=**	**500**	**kVA**	
Tensão FF nominal do primário =>	**V1**	**=**	**13,8**	**kV**	
Tensão FF nominal do secundário =>	**V2**	**=**	**0,38**	**kV**	
Impedância =>	**Z**	**=**	**4,50**	**%**	
Resistência =>	**R**	**=**	**1,74**	**%**	(do cálculo analítico)
Corrente a vazio (excitação) =>	**Io**	**=**	**1,80**	**%**	
Perdas em vazio =>	**Po**	**=**	**1100**	**W**	

Cálculo da reatância total:

X= 4,15 %

Cálculo das correntes:

Inp =	20,92	[A] 3ϕ	
Ins =	759,67	[A] 3ϕ	
In1 =	12,08	[A] 1ϕ	(por fase nas bobinas do primário)
In2 =	759,67	[A] 1ϕ	(por fase nas bobinas do secundário)
Io =	0,307438	[A]	(corrente de pico a vazio em ampéres)

Calculo da impedância base:

Zbp = 1142,64 [Ω]

Zbs = 0,29 [Ω]

Cálculo da resistência de magnetização:

Rmag = 173127 [Ω]

Rmag = 0,173 [MΩ]

Cálculo da reatância e indutância primária:

Xp = 23,7097 [Ω]

Lp = 62,8920 [mH]

Cálculo da resistência primária:

Rp = 9,9410 [Ω]

Cálculo da reatância e indutância secundária:

Xs = 0,0060 [Ω]

Ls = 0,0159 [mH]

Cálculo da resistência secundária:

Rs = 0,0025 [Ω]

Cálculo fluxo λo:

λoRMS = 51,8018018 [Wb] e λoPICO = 73,2588107 [Wb]

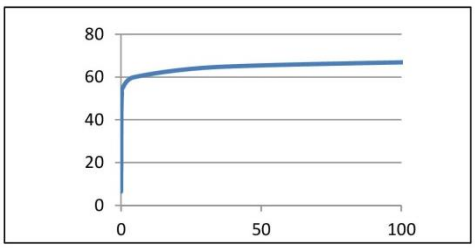
Dados para o ATP

Atributos

V prim =	**13800**	**[V]**
V sec =	**219,39**	**[V]**
R prim =	**9,9410**	**[Ω]**
R sec =	**0,0025**	**[Ω]**
XLprim =	**23,7097**	**[Ω]**
XL sec =	**0,0060**	**[Ω]**
Io =	**0,307438**	**[A]**
Fo =	**73,258811**	**[Wb]**
Rmag =	**173127**	**[Ω]**

Características de Saturação (chapa de aço silício de grãos orientados da Acesita)

H [A/m]	B [T]	**Ipico [A]**	**F (λpico) [Wb]**
6,684	0,20	**0,032025**	**6,475225**
11,099	0,40	**0,053178**	**12,950450**
17,729	0,80	**0,084945**	**25,900901**
23,805	1,20	**0,114057**	**38,851351**
31,495	1,40	**0,150902**	**45,326577**
64,166	1,60	**0,307438**	**51,801802**
136,311	1,70	**0,653105**	**55,039414**
946,842	1,85	**4,536592**	**59,895833**
7419,727	2,00	**35,550043**	**64,752252**
30000,000	2,10	**143,738614**	**67,989865**



Fonte: O Próprio Autor

ANEXO I

Folhas de Dados de Transformadores

Esta seção apresenta as folhas de dados para transformadores de distribuição produzidos pela WEG Equipamentos Elétricos S.A., com potências nominais de 225 kVA, 300 kVA e 500 kVA, com tensão primária de 13,8 V e secundária de 380/220 V (WEG, 2019).

Imagem da Folha (1/2) de Dados de Transformador WEG de **225 kVA**, 13,8/0,38 kV

FOLHA DE DADOS

Transformador Óleo Distribuição

Identificação

Código do produto:	14093610
Tipo :	Transformador abaixador
Norma / Especificação :	NBR 5440

Características do ambiente

Instalação :	Ao tempo
Altitude máxima de instalação (m.s.n.m) :	1000.0
Atmosfera :	Não agressiva
Temperatura máxima do ambiente (°C) :	40.0

Características elétricas

Frequência (Hz): 60.0	Fases: Trifásico	Grupo de ligação: Dyn1

Enrolamento	Potência (kVA)		Tensão (kV)	Ligação	Comutação
	ONAN				
Alta tensão	225.0		13.8 -6 x 0.6kV	Triângulo	CST
Baixa Tensão	225.0		0.38	Estrela	

Elevação de temperatura dos enrolamentos média (°C)	65.0
Elevação de temperatura dos enrolamentos ponto mais quente (°C)	80.0
Classe do material isolante	E (120 ºC)

Ensaios dielétricos	Alta tensão		Baixa Tensão	
	Fase	Neutro	Fase	Neutro
Nível de isolamento (kV)	15.0		1.2	1.2
Tensão de impulso (pleno) (kV)	95.0		30.0	30.0
Tensão de impulso (cortado) (kV)	105.0		33.0	
Tensão aplicada (kV)	34.0		10.0	10.0
Tensão induzida (kV)	2 x Vn		2xVn	2xVn

Temperatura de Referência @ 85.0 ºC - ONAN	100%
Perdas a vazio (W)	650.0
Perdas em carga (W)	
Perda Total (W)	3260.0
Corrente de excitação (%)	2.1

	Base		Impedância @ 85.0 ºC - ONAN (%)
Alta/Baixa tensão	Posição (kV)	Potência (kVA)	4.5
	13.8 / 0.38	225.0	

Refrigeração	ONAN
Nível de ruído (dB)	55.0
Descargas parciais (pC)	300.0
Corrente de inrush (Apk)	
Fator K	K1

Fator de Carga [%]	Regulação (100% de carga)		
	ONAN (Φ = 0.8)	ONAN (Φ = 0.9)	ONAN (Φ = 1)
100	3.58	3.0	1.25

Rev.	Resumo das modificações	Executado	Verificado	Data

Executor				
Verificador			Página	Revisão
Data	06/09/2018		1 / 2	

Imagem da Folha (2/2) de Dados de Transformador WEG de **225 kVA**, 13,8/0,38 kV

FOLHA DE DADOS

Transformador Óleo Distribuição

Fator de Carga [%]	Rendimento		
	ONAN (Φ = 0.8)	ONAN (Φ = 0.9)	ONAN (Φ = 1)
25	98.23	98.42	98.58
50	98.57	98.73	98.86
75	98.46	98.62	98.76
100	98.22	98.42	98.57

Características construtivas

Forma construtiva :	Selado
Liquido isolante :	Mineral naftênico A
Pintura de acabamento :	Cinza munsell N 6,5
Material dos condutores AT/BT :	Al/Al
Buchas de alta tensão :	Superior
Buchas de baixa tensão :	Lateral

Acessórios

Acionamento do comutador externo na lateral
Placa de identificação (alumínio)
Radiadores fixos
Suporte para para-raios
Suporte para poste
Dispositivo de alívio de pressão
Rodas
Conector de aterramento
Ganchos de suspensão

Ensaios

Rotina: Sim
Tipo: Conforme ordem de compra
Especial: Conforme ordem de compra

Notas

As informações contidas são valores de referência. Sujeito a alterações sem aviso prévio.

Rev.	Resumo das modificações	Executado	Verificado	Data

Executor				
Verificador			Página	Revisão
Data	06/09/2018		2 / 2	

Imagem da Folha (1/2) de Dados de Transformador WEG de **300 kVA**, 13,8/0,38 kV

FOLHA DE DADOS

Transformador Óleo Distribuição

Identificação

Código do produto:	14537582
Tipo :	Transformador abaixador
Norma / Especificação :	NBR 5440

Características do ambiente

Instalação :	Ao tempo
Altitude máxima de instalação (m.s.n.m) :	1000.0
Atmosfera :	Não agressiva
Temperatura máxima do ambiente (°C) :	40.0

Características elétricas

Frequência (Hz): 60.0	Fases: Trifásico	Grupo de ligação: Dyn1

Enrolamento	Potência (kVA)		Tensão (kV)	Ligação	Comutação
	ONAN				
Alta tensão	300.0		13.8 -6 x 0.6kV	Triângulo	CST
Baixa Tensão	300.0		0.38	Estrela	

Elevação de temperatura dos enrolamentos média (°C)	65.0
Elevação de temperatura dos enrolamentos ponto mais quente (°C)	80.0
Classe do material isolante	E (120 ºC)

Ensaios dielétricos	Alta tensão		Baixa Tensão	
	Fase	Neutro	Fase	Neutro
Nível de isolamento (kV)	15.0		1.2	1.2
Tensão de impulso (pleno) (kV)	95.0		30.0	30.0
Tensão de impulso (cortado) (kV)	105.0		33.0	
Tensão aplicada (kV)	34.0		10.0	10.0
Tensão induzida (kV)	2 x Vn		2xVn	2xVn

Temperatura de Referência @ 85.0 ºC - ONAN	100%
Perdas a vazio (W)	700.0
Perdas em carga (W)	
Perda Total (W)	3670.0
Corrente de excitação (%)	1.9

	Base		Impedância @ 85.0 ºC - ONAN (%)
Alta/Baixa tensão	Posição (kV)	Potência (kVA)	4.5
	13.8 / 0.38	300.0	

Refrigeração	ONAN
Nível de ruído (dB)	55.0
Descargas parciais (pC)	300.0
Corrente de inrush (Apk)	
Fator K	K1

Fator de Carga [%]	Regulação (100% de carga)		
	ONAN (Φ = 0.8)	ONAN (Φ = 0.9)	ONAN (Φ = 1)
100	3.47	2.87	1.09

Rev.	Resumo das modificações	Executado	Verificado	Data

Executor				
Verificador			Página	Revisão
Data	16/12/2019		1 / 2	

Imagem da Folha (2/2) de Dados de Transformador WEG de **300 kVA**, 13,8/0,38 kV

FOLHA DE DADOS

Transformador Óleo Distribuição

Fator de Carga [%]	Rendimento		
	ONAN (Φ = 0.8)	ONAN (Φ = 0.9)	ONAN (Φ = 1)
25	98.55	98.7	98.83
50	98.81	98.94	99.05
75	98.7	98.84	98.96
100	98.49	98.66	98.79

Características construtivas

Forma construtiva :	Selado
Liquido isolante :	Mineral naftênico A
Pintura de acabamento :	Cinza munsell N 6,5
Material dos condutores AT/BT :	Al/Al
Buchas de alta tensão :	Superior
Buchas de baixa tensão :	Lateral

Acessórios

Acionamento do comutador externo na lateral
Base de apoio
Placa de identificação (alumínio)
Radiadores fixos
Suporte para para-raios
Suporte para poste
Dispositivo de alívio de pressão
Conector de aterramento
Ganchos de suspensão

Ensaios

Rotina: Sim
Tipo: Conforme ordem de compra
Especial: Conforme ordem de compra

Notas

As informações contidas são valores de referência. Sujeito a alterações sem aviso prévio.

Rev.	Resumo das modificações	Executado	Verificado	Data

Executor				
Verificador			Página	Revisão
Data	16/12/2019		2 / 2	

Imagem da Folha (1/2) de Dados de Transformador WEG de **500 kVA**, 13,8/0,38 kV

FOLHA DE DADOS

Transformador Óleo Distribuição

Identificação

Código do produto:	13637134
Tipo :	Transformador abaixador
Norma / Especificação :	NBR 5356

Características do ambiente

Instalação :	Ao tempo
Altitude máxima de instalação (m.s.n.m) :	1000.0
Atmosfera :	Não agressiva
Temperatura máxima do ambiente (°C) :	40.0

Características elétricas

Frequência (Hz): 60.0	Fases: Trifásico	Grupo de ligação: Dyn1

Enrolamento	Potência (kVA)		Tensão (kV)	Ligação	Comutação
	ONAN				
Alta tensão	500.0		13.8 -4x0.6 kV	Triângulo	CST
Baixa Tensão			0.38	Estrela	

Elevação de temperatura dos enrolamentos média (°C)	65.0
Elevação de temperatura dos enrolamentos ponto mais quente (°C)	80.0
Classe do material isolante	E (120 ºC)

Ensaios dielétricos	Alta tensão		Baixa Tensão	
	Fase	Neutro	Fase	Neutro
Nível de isolamento (kV)	15.0		1.2	1.2
Tensão de impulso (pleno) (kV)	95.0		30.0	30.0
Tensão de impulso (cortado) (kV)	105.0		33.0	
Tensão aplicada (kV)	34.0		10.0	10.0
Tensão induzida (kV)	2 x Vn		2xVn	2xVn

Temperatura de Referência @ 85.0 ºC - ONAN	100%
Perdas a vazio (kW)	1.1
Perdas em carga (kW)	0.0
Perda Total (kW)	9.8
Corrente de excitação (%)	1.8

	Base		Impedância @ 85.0 ºC - ONAN (%)
	Posição (kV)	Potência (kVA)	
Alta/Baixa tensão	13.8 / 0.38	500.0	4.5

Refrigeração	ONAN
Nível de ruído (dB)	56.0
Descargas parciais (pC)	300.0
Corrente de inrush (Apk)	
Fator K	K1

Fator de Carga [%]	Regulação (100% de carga)		
	ONAN (Φ = 0.8)	ONAN (Φ = 0.9)	ONAN (Φ = 1)
100	3.91	3.42	1.83

Rev.	Resumo das modificações	Executado	Verificado	Data

Executor				
Verificador			Página	Revisão
Data	16/12/2019		1 / 2	

Imagem da Folha (2/2) de Dados de Transformador WEG de **500 kVA**, 13,8/0,38 kV

FOLHA DE DADOS

Transformador Óleo Distribuição

Fator de Carga [%]	Rendimento		
	ONAN (Φ = 0.8)	ONAN (Φ = 0.9)	ONAN (Φ = 1)
25	98.38	98.56	98.7
50	98.39	98.57	98.71
75	98.04	98.26	98.43
100	97.61	97.87	98.08

Características construtivas

Forma construtiva :	Tanque corrugado
Liquido isolante :	Mineral naftênico A
Pintura de acabamento :	Cinza munsell N 6,5
Material dos condutores AT/BT :	Al/Al
Buchas de alta tensão :	Superior
Buchas de baixa tensão :	Superior

Acessórios

Acionamento do comutador a vazio
Conector de aterramento
Dispositivo de alívio de pressão
Dispositivo para retirada do óleo
Válvula de drenagem de óleo
Placa de identificação (alumínio)
Rodas
Visor de nível de óleo
Olhais para suspensão
Válvula de drenagem de óleo
Dispositivo multifuncional R.I.S.
Meios de ligação para filtro
Apoios para macaco

Ensaios

Rotina: Sim
Tipo: Conforme ordem de compra
Especial: Conforme ordem de compra

Notas

As informações contidas são valores de referência. Sujeito a alterações sem aviso prévio.

Rev.	Resumo das modificações	Executado	Verificado	Data

Executor				
Verificador			Página	Revisão
Data	16/12/2019		2 / 2	

ANEXO II

Dados do Sistema Elétrico Utilizado na Simulação Computacional

Esta seção apresenta como foram obtidos os dados do sistema elétrico estudado (vide Figura 42), cujos parâmetros foram introduzidos no modelo elétrico elaborado para simulação computacional.

II.1 – Imagem do Relatório de Curto Circuito no *PAC* (CPFL)

cpfl paulista
Rod. Campinas Mogi-Mirim, km 2,5
Campinas. SP. Brasil. 13088-900
cpfl@cpfl.com.br www.cpfl.com.br

RELATÓRIO DE CURTO CIRCUITO

USP Hospital
UC 4000399163

BAURU - SP

As correntes de curto circuito e as impedâncias no ponto de entrega são referentes ao alimentador **EST 04** e poderão sofrer alterações em função de eventuais alterações na configuração do Sistema Elétrico. Como referência, informamos que o máximo valor de curto circuito previsto nas barras de Média Tensão (15kV) das subestações é de 10kA simétrica.

Os valores de correntes de curto circuito e impedância no ponto de entrega do consumidor serão:

Coordenadas do Ponto de Entrega: 700049/529027

Correntes de curto circuito:

Curto circuito	Simétrica (A)	Assimétrica (A)
Trifásico	3675	5668
Bifásico	3183	4908
Fase – Terra (Zn= 0 Ω)	2591	3837
Fase – Terra (Zn= 40 Ω)	195	199

Impedâncias:

$Z^1 = Z^2$	0,4454 + j2,1216 ohms
Z^0	1,3587 + j4,7027 ohms

Bauru, 09 de Dezembro de 2014.

II.2 – Imagem Parcial de Catálogo de Cabos Tipo Afumex da Marca Prysmian

Afumex® 1kV

Identificação

Formação	Cores das Veias	Cores de Cobertura	Seções
Unipolar	-	Conforme tabela de cores (XX)	1,5 mm² até 500 mm²
Bipolar	Preta e Azul-Claro	Preta	1,5 mm² até 120 mm²
Tripolar	Preta, Azul-Claro e Verde ou Preta, Azul-Claro e Branca	Preta	1,5 mm² até 240 mm²
Tetrapolar	Preta, Azul-Claro, Vermelha e Verde ou Preta, Azul-Claro, Branca e Vermelha	Preta	1,5 mm² até 240 mm²
Pentapolar	Preta, Branca, Vermelha, Azul-Claro e Verde	Preta	1,5 mm² até 120 mm²

Outras identificações e cores de cobertura sob consulta.

Afumex® Flex 0,6/1kV (Unipolar)

Part Number	Seção (mm²)	Diâmetro nominal condutor (mm)	Espessura nominal isolação (mm)	Espessura nominal cobertura (mm)	Diâmetro nominal externo (mm)	Peso (kg/km)	Peso líquido do condutor (kg/km)	Rcc (20°C) (Ω/km)[1]	Rca (90°C) (Ω/km)[2]	Queda de tensão (fp = 0.92) (V/A*km) [3]	Capacidade de condução de corrente (A) [4]
239004XX	1x1,5	1,5	0,7	0,9	4,8	33	12	13,3	16,9	27,1	21
239014XX	1x2,5	1,9	0,7	0,9	5,2	44	19	7,98	10,17	16,3	29
239024XX	1x4	2,4	0,7	0,9	5,7	59	31	4,95	6,31	10,1	40
239034XX	1x6	3,0	0,7	0,9	6,2	78	47	3,30	4,21	6,8	53
239044XX	1x10	3,9	0,7	1,0	7,4	121	81	1,91	2,43	3,9	74
239054XX	1x16	5,5	0,7	1,0	9,0	179	128	1,21	1,54	2,5	101
239064XX	1x25	6,2	0,9	1,1	10,3	272	203	0,780	0,995	1,6	135
239074XX	1x35	8,2	0,9	1,1	12,4	368	282	0,554	0,707	1,2	169
239084XX	1x50	9,2	1,0	1,2	13,8	524	407	0,386	0,493	0,83	207
239094XX	1x70	10,9	1,1	1,2	15,7	712	573	0,272	0,349	0,60	268
239104XX	1x95	12,6	1,1	1,3	17,5	920	757	0,206	0,266	0,46	328
239114XX	1x120	14,1	1,2	1,3	19,2	1.155	969	0,161	0,209	0,37	383
239124XX	1x150	16,0	1,4	1,4	21,7	1.446	1.217	0,129	0,169	0,31	444
239134XX	1x185	17,5	1,6	1,4	23,6	1.730	1.468	0,106	0,141	0,26	510
239144XX	1x240	20,0	1,7	1,5	26,6	2.262	1.946	0,0801	0,1099	0,21	607
239154XX	1x300	24,4	1,8	1,6	30,6	2.860	2.460	0,0641	0,0916	0,18	703
239164XX	1x400	26,2	2,0	1,7	34,3	3.673	3.192	0,0486	0,0738	0,15	823
239174XX	1x500	31,4	2,2	1,8	38,6	4.590	4.010	0,0384	0,0635	0,14	946

Tabela de cores (XX)

Cores	Branco	Preto	Vermelho	Cinza	Verde	Azul-claro	Amarelo
Código	01	02	03	04	05	06	09

Identifique aqui o modelo do seu cabo!

239054 XX → Código de cores

↓

Part number padrão para seção de 16 mm²

Exemplo:

239054 02 → Cor preta

↓

Part number padrão para seção de 16 mm²

ANEXO III

Dados do *ATPDraw* sobre os Blocos Utilizados na Simulação

Esta seção apresenta os dados do software *ATPDraw* com informações sobre os parâmetros dos blocos utilizado para o modelamento do sistema elétrico, que permitiu a simulação computacional realizada neste trabalho.

III.1 – Imagem do *ATPDraw* para o Bloco ACSOURCE

```
Name : ACSOURCE - Steady-state (cosinus) function (current or voltage). 1 or 3 phase. Grounded or
ungrounded.
       TYPE 14 (+type 18 for ungrounded voltage source).
Card : SOURCE
Data : AmplitudeA = The peak value of phase A in [A] or [V] of the function. 3x1-phase source has
also B and C.
       Frequency  = Frequence in [Hz].
       PhaseAngleA= Phase angle in [deg] or [sec] for phase A. 3x1-phase source has also B and C.
       StartA     = Starting time in [sec.] phase A. Add negative value to include in steady-state.
                    Source value zero for T<StartA. 3x1-phase source has also B and C.
       StopA      = Ending time in [sec] phase A. Source value zero for T>StopA. 3x1-phase source
has also B and C.
       Current/Voltage: Select current or voltage source. Current source has rombe-shaped icon.
       Single phase/3-phase/3x1-phase: 3-phase model assumes symmetrical source with equal
amplitudes and start/stop times.
                                       Positive phase sequence: Phase B shifted -120 deg., phase C
shifted +120 deg.
                                       3x1-phase enables full control of all phase quantities.
                                       Use this to allow external control via
$PARAMETERS/Variables.
       Degrees/Seconds: Unit of phase angle.
       Peak L-G/RMS L-G/RMS-L-L: Amplitude multiplied by 1, sqrt(2), sqrt(2/3) respectively. Not
used if Amplitude is a Variable.
       Grounded/Ungrounded: ATP requires generally grounded sources.
                            Ungounded voltage sources handled via type 18 ideal transformers.
                            Ungrounded current sources handled by using two sources with opposite
polarity.

Node :     AC= 1 or 3-phase node.
               1. node = phase A, phase shift PhaseAngleA.
               2. node = phase B, phase shift PhaseAngleB.
               3. node = phase C, phase shift PhaseAngleC.

For trapped charge functions: Specify a current source, a very low frequency, Tsta=5432. and Tsto=
0.
RuleBook: VII.C.4 + VII.C.7
```

III.2 – Imagem do *ATPDraw* para o Bloco LINESY_3

```
Name : LINESY_3 - Symmetric RL coupled line.
       Data given in positive and zero sequence.
Card : BRANCH
Data :  Ro= Zero sequence impedance (real part)
        Lo= Zero sequence impedance (imaginary part)
        R+= Positive sequence impedance (real part)
        L+= Positive sequence impedance (imaginary part)
            R0 and R+ in [ohm/m]
            L0 and L+ in [mH/m] if Xopt.=0
                      in [Ohm/m] if Xopt.=power frequency
                      Xopt. is set in menu: ATP|Settings/Simulation.
     Length= Length of the line in meter.
Node :  IN1= Start node 3-phase
       OUT1= End node 3-phase.
RuleBook: IV.C.2
```

III.3 – Imagem do *ATPDraw* para o Bloco SATTRAFO

```
Name : SatTrafo - General saturable transformer. 3 phase. 2 or 3 windings.
       Wye, Delta with all phase shifts. Auto, and Zigzag  with most common configurations.
Card : BRANCH
Data :    Io= Current [A] through magnetizing branch (MB) at steady state.
          Fo= Flux [Wb-turn] in MB at steady state.
              The pair Io, Fo defines the inductance in MB at steady state.
          Rm= Resistance in magnetizing branch in [ohm]. 5-leg core or 3-leg shell.
              The magnetizing branch is always connected to the PRIMARY winding and Rm is referred
to this voltage.
          R0= Reluctance of zero-sequence air-return path for flux. 3-leg core-type
         Vrp= Rated voltage in [V] primary winding (only the voltage ratios matter).
          Rp= Resistance in primary winding in [ohm].
          Lp= Inductance in primary winding in [mH] if Xopt.=0
              Inductance in primary winding in [ohm] if Xopt.=power freq.
         Vrs= Rated voltage in [V] secodary winding.
          Rs= Resistance in secondary winding in [ohm].
          Ls= Inductance in secondary winding in [mH] if Xopt.=0
              Inductance in secondary winding in [ohm] if Xopt.=power freq.
         Vrt= Rated voltage in [V] tertiary winding.
          Rt= Resistance in tertiary winding in [ohm].
          Lt= Inductance in tertiary winding in [mH] if Xopt.=0
              Inductance in tertiary winding in [ohm] if Xopt.=power freq.
         RMS= unchecked: Current/Flux characteristic must be entered.
              checked:   Irms/Urms characteristic must be entered.
                         ATPDRAW performs a SATURATION calculation.
 3-leg core = checked: 3-leg core type transformer assumed. TRANSFORMER THREE PHASE
              unchecked: 5-leg or 3-leg shell type assumed. TRANSFORMER.
     3-wind.= turn on tertiary winding.
Output specified the magnetization branch output (power&energy not supported).
Node :     P= Primary side. 3-phase node.
           S= Secondary side. 3-phase node.
          PN= Neutral point primary side.
          SN= Neutral point secondary side.
           T= Tertiary side. 3-phase node.
          TN= Neutral point tertiary side.
         Sat= Internal node, connection of the magnetization circuit with saturation.
The coupling is specified for each winding, with four coupling options: Y, D, A, Z
  All phase shifts are supported.
Special note on Auto-transformers:
  The primary and secondary windings must be of coupling A(uto).
Special note on ZigZag-transformers:
  For this type the user can specify a phase shift in the range <-60,0>&<0,60>.
  Note that the values -60, 0 and +60 degrees are illegal (as one of the winding parts
degenerates).
  The phase shift is given relative to a Y-coupled winding.
  If the primary winding is Zigzag-coupled, all other windings will be shifted with it.
  If the primary winding is D-coupled, 30 deg. must be added/subtracted to the phase shifts.
  For negative phase shifts the phase A winding starts on leg 1 (called z with voltage Uz)
  and continues in the opposite direction on leg 3 (called y with voltage Uy).
  For negative phase shifts the phase A starts on leg 1
  and continues in the opposite direction on leg 2.
  The normal situation is to specify a phase shift of +/- 30 deg.
  in which case the two parts of the winding have the same voltage level and leakage impedance.
  In general the ratio between the second part of the winding Uy and the first part Uz is
  n=Uy/Uz=sin(a)/sin(60-a) where a is absolute value of the phase shift.
  This gives:
  Uz=U/(cos(a)+n*cos(60-a)) and Uy=Uz*n
  Lz=L/(1+n*n) and Ly=Lz*n*n, Rz=R/(1+n) and Ry=Rz*n
  where Lz and Ly are the leakage inductance of each part of the winding (L is the total leakage
inductance)
  and Rz and Ry are the winding resistance of each winding part (R is the total).
  The parameters Uz, Uy, Zz, and Zy are automatically calculated by ATPDraw based on the
  equivalent parameters U and Z and the phase shift, a.


Points: It's possible to enter 9 points on the current/flux characteristic.
        The required menu is performed immedeately after the input menu.
        The points should be entered as increasingly larger values.
        The point (0,0) is not permitted (added internally in ATP).
RuleBook: IV.E.1-2 or 3.
```

III.4 –Exemplo de Modelagem de Transformadores Trifásicos no *ATPDraw*

– Esta Imagem é Parte Integrante da Apostila do Curso de ATPDraw do Prof. Dr. Fabrício Parra Santilio (obtida com o autor) – parte 1 de 9

5 - MODELAGEM DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS DE DOIS ENROLAMENTOS NO ATP

5.1 – Introdução

A introdução e toda parte teórica de transformadores monofásico, e consequentemente, trifásico de dois enrolamentos foram apresentadas no item 4, cujo titulo é "Modelagem de Transformadores Monofásicos no ATP".

Na sequencia será apresentado apenas a modelagem e parametrização dos transformadores de dois enrolamento no ATPDraw.

5.2 – Localização dos transformadores trifásicos de dois enrolamentos no ATPDraw

Os transformadores de dois enrolamentos, no ATPDraw, podem ser obtidos conforme mostra a Figura 5.1

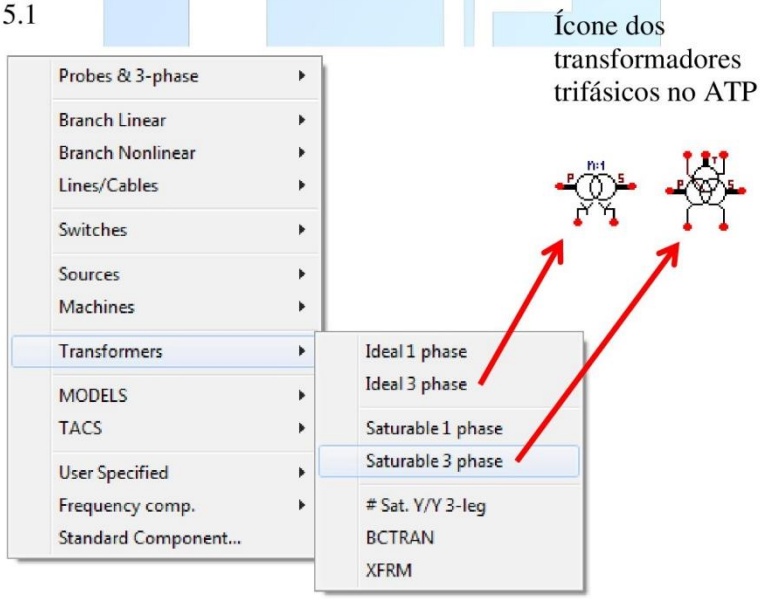


Figura 5.1 – Localização dos transformadores trifásicos de dois enrolamentos no ATP.

5.3 - Características dos transformadores de dois enrolamentos no ATPDraw

Na Figura 5.2 a seguir encontra-se apresentada a tela do "Component: TRAFO_I3.sup" para transformadores trifásicos ideais no ATPDraw.

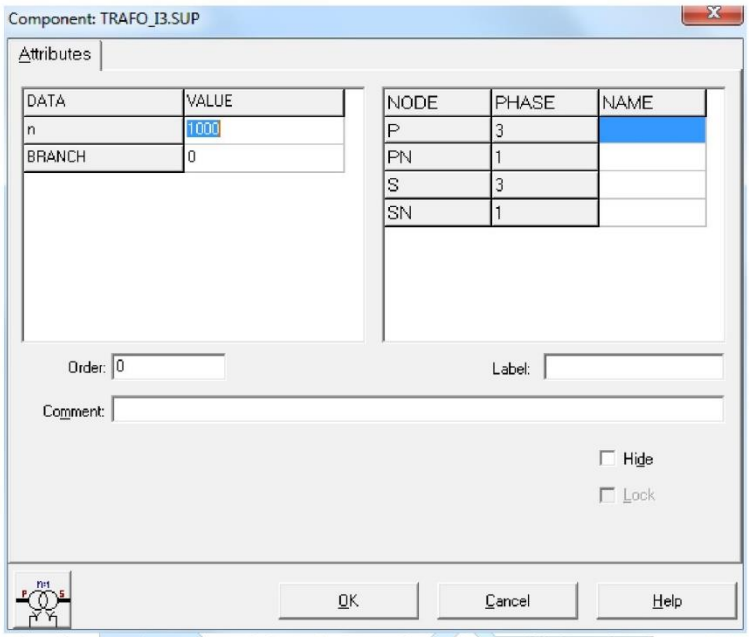


Figura 5.2 - Tela de visualização das características dos transformadores trifásicos ideais no ATPDraw.

No **Help**, podemos encontrar a informação do único parâmetro para especificar esse componente no ATPDraw:

Nome: TRAFO_I3 - transformador ideal trifásico.

Cartão: SOURCE/BRANCH

Dado: n Relação de transformação.

Tensão do primário dividida pela tensão do secundário.

Relação entre os enrolamentos secundário e primário.

BRANCH

0 – Opção SOURCE: fornece um melhor controle de inicialização.

1 – Opção BRANCH: permite melhor aterramento dos terminais e conexão das chaves.

III.4 – Imagem de Exemplo de Modelagem de Transformadores Trifásicos no *ATPDraw* – Esta Imagem é Parte Integrante da Apostila do Curso de ATPDraw do Prof. Dr. Fabrício Parra Santilio (obtida com o autor) – parte 3 de 9

Nó P = Primário
PN = Neutro do Primário
S = Secundário
SN = Neutro do Secundário

Para a simulação de transformadores saturáveis no ATPDraw, precisamos entrar com algumas características do transformador através das informações fornecidas pelo fabricante. Antes precisamos transformar as informações do fabricante nos parâmetro do ATPDraw. Na Figura 5.3 a seguir encontra-se apresentada a tala do "Component: SATTRAFO.sup" para transformadores trifásicos saturáveis de dois e três enrolamentos no ATPDraw, caracterizando os principais parâmetros necessários para a simulação.

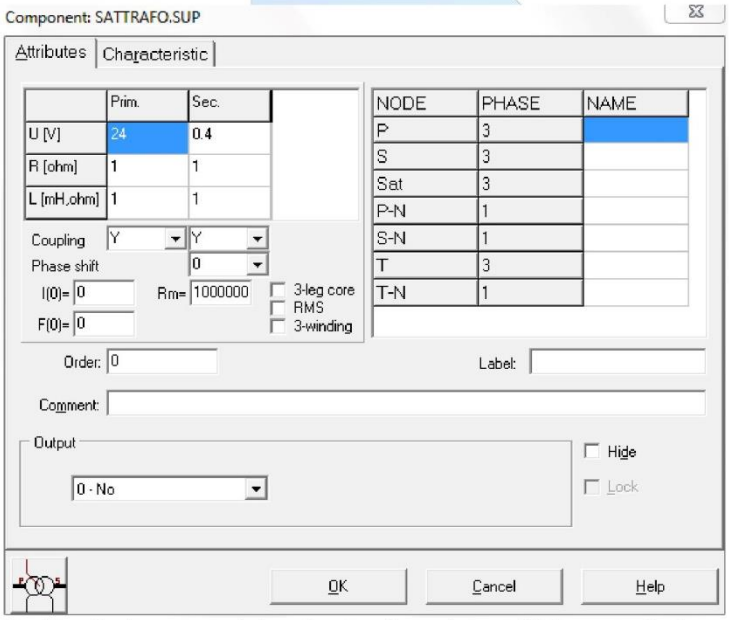


Figura 5.3 - Tela de visualização das características dos transformadores trifásicos saturáveis no ATPDraw.

No **Help**, podemos encontrar as informações de cada parâmetro e suas respectivas unidades, que o ATPDraw utiliza.

Nome: SATTRAFO - transformador saturável trifásico – 2 ou 3 enrolamentos.

Cartão: BRANCH

Dados: Io Corrente [A] através do ramo magnetizante (MB- *Magneting Branch*) em regime permanente.

Fo	Fluxo [Wb-espira] no MB em regime permanente.
	O par Io, Fo define a indutância no MB em regime permanente.
Rmag	Resistência de magnetização no ramo magnetizante em [ohm].
Rp	Resistência no enrolamento primário em [ohm].
Lp	Indutância no enrolamento primário em [mH] se Xopt.=0
	Indutância no enrolamento primário em [ohm] se freq de Xopt= power.
Vrp	Tensão em [kV] aplicada sobre o enrolamento primário.
Rs	Resistência no enrolamento secundário em [ohm].
Ls	Indutância no enrolamento secundário em [mH] se Xopt.=0
	Indutância no enrolamento secundário em [ohm] se freq de Xopt= power.
Vrs	Tensão em [kV] aplicada sobre o enrolamento secundário.
RMS	Definição da característica não-linear: 0: A característica da corrente/fluxo deve ser incorporada. 1: A característica de Irms/Urms deve ser incorporada. ATPDraw executa um cálculo de SATURATION.
3-winding	Opção para ativar e desativar o terceiro enrolamento.
Nó	P = Lado Primário. Nó trifásico PN = Neutro do primário S = Lado Secundário. Nó trifásico SN = Neutro do secundário

A tensão no primário (Vrp) e a tensão no secundário (Vrs) vão depender do tipo de enrolamento. Para um enrolamento do tipo Y a tensão Vrp ou Vrs, é a tensão fase-neutro, e para o enrolamento do tipo Δ a tensão Vrp ou Vrs, é a tensão fase-fase aplicada sobre o enrolamento.

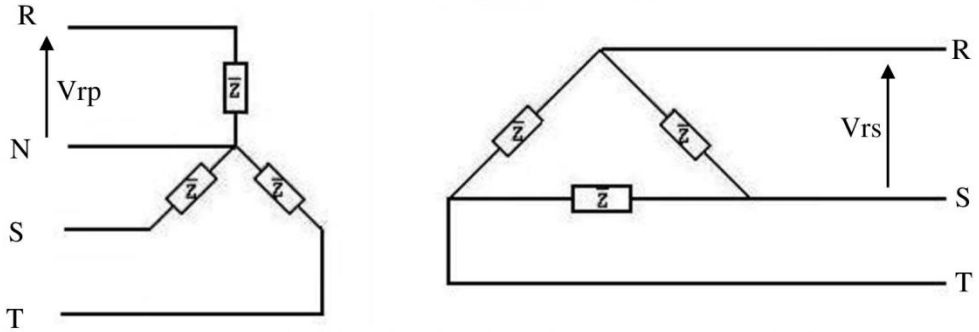
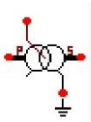


Figura 5.4 - Tensões Vrp e Vrs para transformador Y-Δ

5.4 - Exemplos de Aplicações

5.4.1 - Transformador D – Y



Para exemplificar a utilização de transformadores trifásicos de dois enrolamentos no ATP, utiliza-se o seguinte transformador como exemplo:

- Transformador trifásico de 60 Hz;
- Potência nominal: S_n=300 kVA;
- Tensões nominais de linha: 13,8/0,38 kV;
- Impedância Z%: Z_{CC} = 4,5%;
- Resistência R%: R_{CC} = 1,12%;
- Corrente a vazio: I_o = 1,8%;
- Ligação Delta Estrela - aterrado.

Passo a passo:

1) Relação de transformação (α)

$$\alpha = \frac{V_p}{V_S} = \frac{13800}{220} = 62{,}73$$

2) Corrente nominal no primário e secundário (Ip e Is)

Corrente nominal do primário:

$$I_{np} = \frac{S_{1\phi}}{V_{rp}} = \frac{100}{13{,}8} = 7{,}25 \text{ [A]}$$

$$\text{Configuração } \Delta : I_{np(Linha)} = \sqrt{3} \cdot I_{np(Fase)} = \sqrt{3} \cdot 7{,}25 = 12{,}56 \text{ [A]}$$

Corrente nominal do secundário:

$$I_{ns} = \frac{S_{1\phi}}{V_{rs}} = \frac{100}{0{,}22} = 454{,}54 \text{ [A]}$$

$$\text{Configuração } Y : I_{np(Linha)} = I_{np(Fase)} = 454{,}54 \text{ [A]}$$

3) Corrente a vazio (I_0)

Como a corrente a vazio foi fornecida, então não usaremos o valor de 2% e sim o de 1,8%. Dessa forma:

$$I_0 = \frac{I_0\%}{100} \cdot \frac{S_{1\phi}}{V_{rp}} = \frac{1,8}{100} \cdot \frac{100}{13,8} = 0,130 \text{ [A]}$$

$$I_{0(pico)} = \sqrt{2} \cdot 0,130 = 0,184 \text{ [A]}$$

É importante notar que o valor que deve ser inserido no ATP é o valor de pico da corrente de magnetização.

4) Potência a vazio (P_0)

A potência a vazio (perdas no núcleo) pode ser estimada sob a seguinte equação:

$$P_0 = V_{rp} \cdot I_{0(RMS)} \cdot \cos\varphi_0$$

$$\text{Assumindo}, \cos\varphi_0 \approx 0,2$$

$$P_0 = 13800 \cdot 0,130 \cdot 0,2 = 358,8 \text{ [W]}$$

$$P_{0(3\phi)} = 3 \cdot P_0 = 3 \cdot 358,8 = 1076,4 \quad \text{[W]}$$

Observe que para o cálculo da perda a vazio foi utilizado o valor RMS da corrente de magnetização e não o valor de pico.

5) Impedância do primário e secundário (Zp e Zs)

Impedância do primário:

$$Z_{base(p)} = \frac{V_{rp}^2}{S_{1\phi}} = \frac{13,8^2}{0,1} = 1904,4 \text{ [}\Omega\text{]}$$

$$Z_{T(p)} = Z_{base(p)} \times \frac{Zcc}{100} = 1904,4 \times \frac{4,5}{100} = 85,698 \text{ [}\Omega\text{]}$$

$$Z_P = \frac{Z_{T(p)}}{2} = \frac{85,698}{2} = 42,849 \text{ [}\Omega\text{]}$$

Impedância do secundário:

$$Z_S = \frac{Z_p}{\alpha^2} = \frac{42,849}{62,73^2} = 0,01089 [\Omega]$$

Ou:

$$Z_{base(s)} = \frac{V_{rs}^2}{S_{1\phi}} = \frac{0,22^2}{0,1} = 0,484 \text{ [}\Omega\text{]}$$

$$Z_{T(s)} = Z_{base(s)} \times \frac{Zcc}{100} = 0,484 \times \frac{4,5}{100} = 0,02178 \text{ [}\Omega\text{]}$$

$$Z_S = \frac{Z_{T(s)}}{2} = \frac{0{,}02178}{2} = 0{,}01089 \ [\Omega]$$

$$Z_p = Z_S \times \alpha^2 = 0{,}01089 \times 62{,}73^2 = 42{,}85 \ [\Omega]$$

6) Resistência do primário e secundário (Rp e Rs)

A resistência do primário e do secundário pode ser estimada a partir do valor de R%, a qual tem o valor de 1,12%. Na ausência desse valor pode estimar um valor igual a 1%. Assim, tem-se que:

Resistência do primário:

$$R_p = \frac{R\%}{2 \cdot 100} \cdot Z_{base(p)} = \frac{1{,}12}{2 \cdot 100} \cdot 1904{,}4 = 10{,}66 \ [\Omega]$$

Resistência do secundário:

$$R_S = \frac{R\%}{2 \cdot 100} \cdot Z_{base(s)} = \frac{1{,}12}{2 \cdot 100} \cdot 0{,}484 = 0{,}00271 \ [\Omega]$$

ou

$$R_S = \frac{R_p}{\alpha^2} = \frac{10{,}66}{62{,}73^2} = 0{,}00271 \ [\Omega]$$

7) Potência de curto-circuito (P_{cc})

A potência de curto-circuito (perdas no cobre), pode ser estimada baseada nos valores de Rp e Rs, sob a seguinte equação:

$$P_{cc} = R_p \cdot I^2_{np(Fase-RMS)} + R_s \cdot I^2_{ns(Fase-RMS)} = 10{,}66 \cdot 7{,}25^2 + 0{,}00271 \cdot 454{,}54^2 = 1120{,}22 \quad [W]$$

$$P_{cc(3\phi)} = 3 \cdot P_{cc} = 3 \cdot 1120{,}22 = 3360{,}66 \quad [W]$$

8) Reatância do primário e secundário (Xp e Xs)

Reatância do primário:

$$X_P = \sqrt{Z_P^2 - R_P^2} = \sqrt{42{,}849^2 - 10{,}66^2} = 41{,}5 \ [\Omega]$$

Reatância do secundário:

$$X_S = \sqrt{Z_S^2 - R_S^2} = \sqrt{0{,}01089^2 - 0{,}00271^2} = 0{,}01055 \ [\Omega]$$

ou

$$X_S = \frac{X_p}{\alpha^2} = \frac{41{,}5}{62{,}73^2} = 0{,}01055 \ [\Omega]$$

9) Indutância do primário e secundário (Lp e Ls)

Indutância do primário:

$$L_P = \frac{X_P}{377} \times 1000 = \frac{41{,}5}{377} \times 1000 = 110{,}08 \ [mH]$$

Indutância do secundário:

$$L_S = \frac{X_S}{377} \times 1000 = \frac{0{,}01055}{377} \times 1000 = 0{,}028 \ [mH]$$

10) Resistência de magnetização (R_{mag})

$$R_{mag} = \frac{V_{rp}^{\ 2}}{P_0} = \frac{13800^2}{1076{,}4} = 176923{,}07 \ [\Omega]$$

11) Fluxo de magnetização (λ_0)

$$\lambda_0 = \frac{V_{rp}}{4{,}44 \cdot f} = \frac{13800}{4{,}44 \cdot 60} = 51{,}8 \ [\text{Wb-espira}]$$

Em resumo teremos as seguintes informações:

Dados de Entrada:

Sigla	Definição	Unidade
$S_{1\phi}$	Potência monofásica aparente	100 [kVA]
V_{rp}	Tensão sobre o enrol. primário	13,8 [kV]
V_{rs}	Tensão sobre o enrol. secundário	0,22 [kV]
f	Frequência da rede	60 [Hz]
$Z\%$	Impedância percentual	4,5 [%]
$R\%$	Resistência percentual	1,12 [%]
$I_0\%$	Corrente a vazio	1,8 [%]

III.4 – Imagem de Exemplo de Modelagem de Transformadores Trifásicos no *ATPDraw* – Esta Imagem é Parte Integrante da Apostila do Curso de ATPDraw do Prof. Dr. Fabrício Parra Santilio (obtida com o autor) – parte 9 de 9

Dados de Saída/Estimados:

Sigla	Definição	Unidade
α	Relação de transformação	62,73
$I_{np(Linha)}$	Corrente nominal do primário	12,56 [A]
$I_{ns(Linha)}$	Corrente nominal do secundário	454,54 [A]
I_0	Corrente a vazio	0,184 [A]
P_0	Potência a vazio	1076,4[W]
Z_p	Impedância do primário	42,849 [Ω]
Z_s	Impedância do secundário	0,01089 [Ω]
R_p	Resistência do primário	10,66 [Ω]
R_s	Resistência do secundário	0,00271 [Ω]
P_{cc}	Potência de curto-circuito	3360,66 [W]
X_p	Reatância do primário	41,5 [Ω]
X_s	Reatância do secundário	0,01055 [Ω]
L_p	Indutância do primário	110,08 [mH]
L_s	Indutância secundária	0,028 [mH]
R_{mag}	Resistência de magnetização	176923,07 [Ω]
λ_0	Fluxo no ramo magnetizante	51,8 [Wb-espira]

Os dados em destaque são os parâmetros de entrada para o componente SATTRAFO no ATPDraw.

III.5 – Imagem do *ATPDraw* para o Bloco LINERL_3

```
Name : LINERL_3 - Coupled RL 3-phase line.
Card : BRANCH
Data :  R11= Resistance in phase 1
        R12= Resistance between phase 1 and phase 2
        R22= Resistance in phase 2
        R13= Resistance between phase 1 and phase 3
        R23= Resistance between phase 2 and phase 3
        R33= Resistance in phase 3
             Resistances in [Ohm/m]
        L11= Inductanse in phase 1
        L12= Inductance between phase 1 and phase 2
        L22= Inductance in phase 2
        L13= Inductanse between phase 1 and phase 3
        L23= Inductance between phase 2 and phase 3
        L33= Inductance in phase 3
             Inductances in [mH/m] if Xopt.=0
             Inductances in [Ohm/m] if Xopt.=power frequency
             Xopt. is set in menu: ATP|Settings/Simulation.
     Length= Length of the line in meter.
Node :  IN1= Start node. 3-phase.
       OUT1= End node. 3-phase.
RuleBook: IV.C
```

III.6 – Imagem do *ATPDraw* para a Tela ATP Settings

Simulation settings

The following table describes the Simulation settings available in the ATP Settings dialog box:

Option	Description
delta T	Time step of simulation in seconds.
Tmax	End time of simulation in seconds.
Xopt	Inductances in [mH] if zero; otherwise, inductances in [Ohm] with Xopt as frequency.
Copt	Capacitances in [micro-Farad] if zero; otherwise, capacitances in [micro-mho] with Copt as frequency.
Freq	System frequency in Hz.
Power Frequency	Checking this button enables the system frequency to be typed in and written to the SYSTEM FREQUENCY request card in the ATP file. Power frequency specification is required for Harmonic Frequency Scan simulations.

Simulation type. Select between
Time domain
Frequency Scan
Harmonic Frequency Scan

If Frequency Scan is selected the FREQUENCY SCAN option of ATP is enabled.

min:	Starting frequency for the frequency scan
max:	Ending frequency for the frequency scan
df:	Frequency increment. Leave 0 in logarithmic scan
NPD:	Number of frequencies per decades in logarithmic scan.

If Frequency Scan or Harmonic is selected the user can select which component of the solution to print out.
Magnitude only: Default request
Magnitude & Angle: POLAR OUTPUT VARIABLES
Magnitude & Angle & Real/Imag: BOTH POLAR AND RECTANGULAR
Real/Imag: RECTANGULAR OUTPUT VARIABLES
Other combinations are illegal and are prevented by button logic.