UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

ADRIANO PINHEIROS FRAGOSO

Impactos econômicos das distorções harmônicas no sistema de iluminação pública

NITERÓI
2024

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

ADRIANO PINHEIROS FRAGOSO

Impactos econômicos das distorções harmônicas no sistema de iluminação pública

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações. Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica.

Orientador:

Prof. Dr. Márcio Zamboti Fortes

Coorientador:

Prof. DSc.Vitor Hugo Ferreira

NITERÓI

2024

(Espaço reservado para a ficha catalográfica)

ADRIANO PINHEIROS FRAGOSO

IMPACTOS ECONÔMICOS DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS NO SISTEMA DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a Obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações.

Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica.

BANCA EXAMINADORA

_____

(Prof. Dr. Marcio Zamboti Fortes - Orientador - UFF)

_____

(Prof. Dr. Vitor Hugo Ferreira - Coorientador -UFF)

_____

(Prof. Dr. Angelo Cesar Colombini – UFF)

_____

(Prof. Dr. Teófilo Miguel de Souza - UNESP)

_____

(Prof. Dr. Luiz Octávio Gavião - ESG)

_____

(Prof. Dr. Gustavo Fernandes Rodrigues - UFSJ)

Niterói

(Agosto/2024)

À minha mãe e meu pai, por ter me dado amor e condições de estudar e trilhar o meu caminho.

Aos meus irmãos pelo apoio e parceria de sempre.

Aos meus amados sobrinhos.

Ao meu tio Aderaldo Pereira da Silva (in memoriam) professor e ativista do movimento negro, primeiro a obter o grau de Doutor na nossa família e quem abriu meus olhos para enxergar a educação como um elemento transformador e de crescimento, minha eterna gratidão.

.

Agradecimentos

Antes de tudo, agradeço a Deus, pelas bençãos e por me permitir realizar este curso.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense por me possibilitar essa experiência e aprendizado pessoal e profissional.

Ao professor Márcio Zamboti Fortes, pela orientação e pelas lições aprendidas durante a realização deste curso.

Ao professor Geraldo Martins Tavares, por ser meu grande incentivador de fazer o doutorado, pelos longos anos de amizade, pelos conselhos e aprendizado.

Ao Laboratório de Luminotécnica da Universidade Federal Fluminense, pela oportunidade de fazer parte desta equipe maravilhosa, onde tenho vários amigos, em especial, Clínio Freitas Brasil, Marco Antônio Queiroz, Antônio Marcos Estrela e Camile Ferreira Nogueira.

Resumo

O presente trabalho apresenta uma metodologia para uma estimativa dos impactos econômicos das distorções harmônicas no sistema de Iluminação Pública oriundos da aplicação da tecnologia *LED* e *HID* para iluminação viária, fazendo uma comparação de qual tecnologia proporciona melhores resultados para tais perdas. Para isso, buscaram-se na literatura especializada fundamentos sobre Qualidade de Energia Elétrica - QEE e distorções harmônicas, apresentando conceitos e os principais distúrbios causados por cargas não lineares, que é o caso de uma luminária *LED*. Adicionalmente, foram realizadas medições em laboratório, relacionadas à QEE em amostras de variados fabricantes com a finalidade de aplicar o método *IEEE 1459:2010 Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions* para calcular as perdas harmônicas e, consequentemente, estimativa dos impactos econômicos com aplicação da tecnologia *LED* em grande escala. Como resultados, o trabalho estimou que as perdas atuais na Iluminação Pública – IP são de aproximadamente 160 milhões de reais relacionadas a distorções harmônicas, considerando uma participação de 20% de tecnologia *LED* e 80% de tecnologia *HID*. Se o parque de IP fosse exclusivamente de tecnologia LED, a economia anual seria de quase 123 milhões de reais. O trabalho também mostrou o potencial de mitigação dessas perdas através do fator de potência e da distorção harmônica total - DHT, que foram, respectivamente, 17% e 12%. Por fim, o presente trabalho também visa desenvolver uma ferramenta computacional que possa estimar o fator-K e *o k-factor* dos transformadores de distribuição para auxiliar os profissionais atuantes na área.

Palavras-chaves: qualidade de energia, distorções harmônicas, iluminação pública, tecnologia *LED*.

Abstract

This work presents a methodology for estimating the economic impacts of harmonic distortions in the Public Lighting system caused by the application of LED and HID technology for street lighting. It includes a comparison to determine of which technology provides better results such losses. To achieve this, we reviewed specialized literature for fundamentals on Electric Power Quality - QEE PQ and harmonic distortions, presenting relevant concepts and the main disturbances caused by non-linear loads, such as those from LED luminaires. Additionally, we conducted laboratory measurements related to PQ on several samples from different manufacturers. The purpose was to apply the IEEE 1459:2010 Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions method to calculate harmonic losses and, consequently, estimate the economic impacts of large-scale LED technology implementation. As results, the study estimated that the current losses in Public Lighting - IP are approximately 160 million reais related to harmonic distortions, considering a 20% share of LED technology and 80% of HID technology. If the IP park were exclusively LED technology, the annual savings are almost 123 million reais. The work also showed the potential of mitigation of these losses through the power factor and total harmonic distortion - DHT, which were respectively 17% and 12%. Finally, this work also aims to develop a computational tool that can estimate the k-factor of distribution transformers to assist professionals working in this area.

Keywords: power quality, harmonics, public lighting, LED lighting.

Lista de Figuras

FIGURA 1 - TRANSITÓRIO IMPULSIVO CAUSADO POR DESCARGA ATMOSFÉRICA 30
FIGURA 2 - TRANSITÓRIO OSCILATÓRIO 32
FIGURA 3 - AFUNDAMENTO DE TENSÃO – SAG 34
FIGURA 4 - ELEVAÇÃO DE TENSÃO - SWELL 34
FIGURA 5 - DESIQUILÍBRIO DE TENSÕES 36
FIGURA 6 - FUNDAMENTAL, SEGUNDA E TERCEIRO HARMÔNICO 44
FIGURA 7 - FORMAS DE ONDA DE CORRENTE DE UMA FONTE CHAVEADA 54
FIGURA 8 - ESPECTROS DE CONTEÚDO HARMÔNICO DE UMA FONTE CHAVEADA 54
FIGURA 9 - CURVA DE EXCITAÇÃO DE TRANSFORMADOR 55
FIGURA 10 - CIRCUITO EQUIVALENTE DE UM DISPOSITIVO A ARCO..... 57
FIGURA 11 - FORMA DE ONDA DA CORRENTE DE UM DISPOSITIVO A ARCO 57
FIGURA 12 - ESPECTROS DE CONTEÚDO HARMÔNICO DE UM DISPOSITIVO A ARCO 58
FIGURA 13 - TRIÂNGULO DAS POTÊNCIAS..... 65
FIGURA 14 - TETRAEDRO DE BUDEANU..... 67
FIGURA 15 - POTÊNCIA APARENTE IEEE 1459 71
FIGURA 16 - FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA..... 74
FIGURA 17 - FONTE DE POTÊNCIA *ITECH*..... 77
FIGURA 18 - WATTÍMETRO YOKOGAWA WT-210..... 78
FIGURA 19 - GRÁFICO DE BARRAS DE CONTEÚDO HARMÔNICO 78
FIGURA 20 - FORMA DE ONDA COM CONTEÚDO HARMÔNICO..... 78
FIGURA 21- LUMINÁRIA *LED* INSTALADA NO GONIOFOTÔMETRO 79
FIGURA 22 - POTÊNCIA ATIVA HARMÔNICA EM FUNÇÃO DA POTÊNCIA ATIVA 81
FIGURA 23 - POTÊNCIA DE DISTORÇÃO HARMÔNICA EM FUNÇÃO DA POTÊNCIA ATIVA..... 81
FIGURA 24 - POTÊNCIA DE DISTORÇÃO DE CORRENTE EM FUNÇÃO DA POTÊNCIA ATIVA..... 82
FIGURA 25 - POTÊNCIA DE DISTORÇÃO DE CORRENTE EM FUNÇÃO DA POTÊNCIA ATIVA..... 82
FIGURA 26 - CIRCUITO PADRÃO DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA 86
FIGURA 27 - CORRENTE HARMÔNICA EM FUNÇÃO DA POTÊNCIA ATIVA..... 87
FIGURA 28 - POTÊNCIA ATIVA HARMÔNICA EM FUNÇÃO DA POTÊNCIA ATIVA PARA FP $\geq$ 0,9694
FIGURA 29 - CORRENTE HARMÔNICA EM FUNÇÃO DA POTÊNCIA ATIVA..... 95
FIGURA 30 - POTÊNCIA ATIVA HARMÔNICA EM FUNÇÃO DA POTÊNCIA ATIVA PARA $DHT_I \leq 8\%$98
FIGURA 31 - CORRENTE HARMÔNICA EM FUNÇÃO DA POTÊNCIA ATIVA $DHT_I \leq 8\%$ 99

Lista de Tabelas

TABELA 1 - CARACTERÍSTICAS TÍPICAS DOS EVENTOS TRANSITÓRIOS 31
TABELA 2 - CLASSIFICAÇÃO DAS VARIAÇÕES DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO 33
TABELA 3 - LIMITES DE DISTORÇÃO HARMÔNICA TOTAL DE TENSÃO 42
TABELA 4 - LIMITES DE DISTORÇÃO HARMÔNICA INDIVIDUAL DE TENSÃO 43
TABELA 5 - PERFIL HARMÔNICO PARA DIMENSIONAR TRANSFORMADOR 47
TABELA 6 - DISTORÇÃO DE CORRENTE HARMÔNICA PARA TENSÃO DE 120V A 69KV 49
TABELA 7 - DISTORÇÃO DE CORRENTE HARMÔNICA PARA TENSÃO DE > 69 KV A 161 KV ... 50
TABELA 8 - DISTORÇÃO DE CORRENTE HARMÔNICA PARA TENSÃO > 161 KV 50
TABELA 9 - NÍVEIS DE COMPATIBILIDADE PARA TENSÕES HARMÔNICAS INDIVIDUAIS EM BAIXA TENSÃO 51
TABELA 10 - VALORES DE REFERÊNCIA DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS TOTAIS DE TENSÃO 52
TABELA 11 - VALORES DE REFERÊNCIA DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS INDIVIDUAIS DE TENSÃO 52
TABELA 12 - CONTEÚDO HARMÔNICO DA CORRENTE DE MAGNETIZAÇÃO 55
TABELA 13 - EVOLUÇÃO DA ILUMINAÇÃO PÚBLICA NO BRASIL 75
TABELA 14 - PARTICIPAÇÃO REGIONAL DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA 75
TABELA 15 - CARACTERÍSTICAS DAS LÂMPADAS DE SÓDIO 76
TABELA 16 - TABELA DE ORDENS HARMÔNICAS 79
TABELA 17 - RESUMO DAS POTÊNCIAS ELÉTRICAS 85
TABELA 18 - PERDAS NO TRANSFORMADOR 90
TABELA 19 - INFORMAÇÕES DAS LÂMPADAS HID CENÁRIO ATUAL 105
TABELA 20 - DADOS DE DISTORÇÃO DAS LÂMPADAS *HID* 105
TABELA 21 - INFORMAÇÕES DAS LÂMPADAS *HID* CENÁRIO 100% 109
TABELA 22 - RESUMO EXECUTIVO DAS PERDAS 114

Lista de Abreviaturas e Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	*Alternating current*
AMN	Associação Mercosul de Normalização
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AT	Alta tensão
BT	Baixa tensão
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Continua
CCAT	Corrente Contínua e Eletrônica de Potência
CIGRE	*Grand Réseaux Électriques a Haute Tension*
COPANT	Comissão Panamericana de Normas Técnicas
DC	*Direct Current*
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
DHI	Distorção Harmônica Individual
DHT	Distorção Harmônica Total
DIC	Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão
DICRI	Duração da Interrupção Individual ocorrida em dia crítico por unidade consumidora ou por ponto de conexão
DMIC	Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão
DTD	Distorção Total de Demanda
EA	Energia Ativa
EMC	*Electromagnetic compatibility*
ER	Energia Reativa
EUA	Estados Unidos da América
FACTS	*Flexible Alternating Current Transmission System*
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
FIC	Frequência de Interrupção Individual por Unidade

	Consumidora ou por Ponto de Conexão
FMM	Força Magnetomotriz
HID	*High Intensity Discharge*
Hi-PF	*High Power Factor*
IEA	*International Energy Agency*
IEC	*International Electrotechnical Commission*
IEEE	*Institute of Electrical and Electronics Engineers*
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia Qualidade e Tecnologia
IP	Iluminação publica
ISO	*International Organization for Standardization*
LABLUX	Laboratório de Luminotécnica da Universidade Federal Fluminense
LED	*Light Emitting Diode*
LFC	Lâmpadas Fluorescentes Compactas
MME	Ministério de Minas e Energia
MT	Média Tensão
NBR	Norma Brasileira
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
PEE	Programas de Eficiência Energética
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
QR	*Quase-resonant*
RFB	Receita Federal Brasileira
rms	*Root Mean Square*
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SSL	*Solid State Lighting*
TUSD	Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição
VTCD	Variações de Tensão de Curta Duração

Lista de Símbolos

a_0	Componente de ordem zero da Série de Fourier
a_n	Componente par da Série de Fourier
b_n	Componente ímpar da Série de Fourier
C_1	Componente de frequência fundamental
C_h	Componente de frequência harmônica de ordem h
C_n	Componente de ordem n da Série de Fourier Harmônica
C_{fp}	Tarifa fora da ponta
C_{fp}	Tarifa na ponta
cos	Cosseno
D	Potência de Distorção
DHI	Distorção harmônica individual
DHT_I	Distorção Harmônica Total de Corrente
DHT_V	Distorção Harmônica Total de Tensão
D_I	Potência de Distorção de Corrente
DTD	Taxa de distorção de demanda
DTT%	Distorção Harmônica Total de Tensão
$DTT_I\%$	Distorção Harmônica Total de Tensão de componentes ímpares não múltiplas de 3
$DTT_{P\%}$	Distorção Harmônica Total de Tensão de componentes pares não múltiplas de 3
$DTT_3\%$	Distorção Harmônica Total de Tensão de componentes múltiplas de 3
D_V	Potência de Distorção de Tensão
fp	Fator de Potência
fp_f	Fator de Potência na frequência fundamental
f(t)	Função do tempo
F(t)	Forma de onda não senoidal periódica
FD	Fator de Desequilíbrio
F_{HL}	Fator de perdas harmônicas
I	Corrente

$i(t)$	Corrente em função do tempo
I_0	Corrente Contínua
I_h	Componente de corrente harmônica h
I_H	Corrente Harmônica Total
I_f	Corrente Fundamental
I_F	Corrente em fase
I_L	Corrente média anual de demanda máxima
I_m	Corrente máxima
I_n	Corrente harmônica de ordem n
I_q	Corrente reativa
I_{rms}	Valor Eficaz de Corrente
$I_{rms,n}$	Valor Eficaz de Corrente de ordem n
$I_{rms,1}$	Valor Eficaz de Corrente de ordem 1
I_w	Corrente ativa
Iq	Corrente em quadratura
j	Índice Complexo
n	Ordem harmônica
n_I	Máxima Ordem Harmônica ímpar não múltipla de 3
$n_{máx}$	Máxima Ordem Harmônica
n_P	Máxima Ordem Harmônica par não múltipla de 3
n_3	Máxima Ordem Harmônica múltipla de 3
P	Potência Ativa
P_1	Potência Ativa Fundamental
P_H	Potência Ativa Harmônica
$p(t)$	Potência instantânea
P	Perdas
Q	Potência Reativa
Q_1	Potência Reativa Fundamental
Q_h	Potência Reativa Harmônica
R	Resistência
R_a	Índice de Reprodução de Cor Geral
R_i	Índices Cromáticos
S	Potência Aparente

sen	Seno
S_f	Potência Aparente Fundamental
S_H	Potência Aparente Harmônica
$S_{h,n}$	Potência Aparente Harmônica de ordem n
S_N	Potência Aparente Não-Fundamental
t	Tempo
t_{fp}	Tempo fora da ponta
t_p	Tempo na ponta
T	Período de tempo
TA	Tensão de Atendimento
TL	Tensão de Leitura
TN	Tensão Nominal
V	Tensão Nominal
$V-$	Magnitude da tensão de sequência negativa
$V+$	Magnitude da tensão de sequência positiva
V_1	Tensão Fundamental
Vab	Magnitude da tensão de linha ab (*rms*)
Vbc	Magnitude da tensão de linha bc (*rms*)
Vca	Magnitude da tensão de linha ca (*rms*)
V_H	Tensão Harmônica Total
V_h	Tensão de pico de ordem h
V_m	Tensão máxima
V_n	Tensão harmônica de ordem n
V_q	Tensão reativa
V_{rms}	Valor Eficaz de Tensão
$V_{rms,n}$	Valor Eficaz de Tensão de ordem n
$V_{rms,1}$	Valor Eficaz de Tensão de ordem 1
V_w	Tensão ativa
$v(t)$	Tensão em função do tempo
V_0	Tensão Contínua
V_1	Tensão de ordem 1
X	Reatância
Z	Impedância

Θ	Ângulo de Fase da Tensão
Θ_n	Ângulo de Fase de ordem n
Θ_1	Ângulo de Fase da Tensão de ordem 1
ϕ	Ângulo de Fase da Corrente
ϕ_n	Ângulo de Fase da Corrente Harmônica de ordem n
ϕ_1	Ângulo de Fase da Corrente de ordem 1
δ_h	Ângulo de Fase da Tensão
ω	Frequência angular
ω_0	Frequência Fundamental

Sumário

Capítulo 1 - Introdução 18
1.1 Motivação 21
1.2 Objetivos 22
1.3 Estrutura do Trabalho 22
Capítulo 2 - Qualidade de Energia Elétrica 24
2.1 Considerações iniciais 24
2.2 Aspectos Normativos 25
2.3 Principais Distúrbios associados à QEE 28
2.3.1 Transitórios 29
2.3.2 Variações de Tensão de Curta Duração - VTCD 32
2.3.3 Variações de Tensão de Longa Duração - VTLD 34
2.3.4 Desequilíbrios 35
2.3.5 Distorções 37
2.3.6 Flutuações de Tensão 37
2.3.7 Variações de Frequência 38
Capítulo 3 - Distorções Harmônicas 39
3.1 Caracterização e indicadores harmônicos 40
3.1.1 Distorção Harmônica Total (DHT) 40
3.1.2 Distorção Harmônica Individual (DHI) 42
3.1.3 Distorção Total de Demanda (DTD) 44
3.1.4 Fator K 45
3.1.5 Fator F_{HL} 46
3.1.6 Factor K 46
3.2 Medição de harmônicos 47
3.3 Regulamentos e padronização de harmônicos 49
3.3.1 IEEE Std. 519-2014 49
3.3.2 Normas IEC 61000 50
3.3.3 Resolução ANEEL 956/2021 52
3.4 Equipamentos geradores de harmônicos 53
3.4.1 Conversores estáticos 53

3.4.2 Transformadores 55
3.4.3 Máquinas rotativas 56
3.4.4 Dispositivos a arco 56
3.5 Efeitos da distorção harmônica 58
3.5.1 Cabos de energia 59
3.5.2 Transformadores 60
Capítulo 4 - Teorias de Potência elétrica 62
4.1 Teoria clássica de potências em regime senoidal 62
4.2 Proposição de Budeanu 65
4.3 Proposição da norma IEEE 1459:2010 68
Capítulo 5 - Estimativa dos Impactos Econômicos das Harmônicas 73
5.1 Introdução 73
5.2 Metodologia 73
5.3 Estimativa das Perdas de distorção harmônica de luminárias *LED* na Carga 80
5.3.1 Potência ativa harmônica 83
5.3.2 Potência de distorção harmônica 84
5.3.3 Potência de distorção de corrente 84
5.3.4 Potência de distorção de tensão 85
5.4 Estimativa das Perdas de distorção harmônica de luminárias *LED* nos circuitos de alimentação 86
5.5 Estimativa das Perdas de distorção harmônica de luminárias *LED* no transformador 88
5.6 Estimativa econômica das Perdas de distorção harmônica de luminárias *LED* na rede de distribuição – Cenário atual 90
5.7 Estimativa das Perdas de distorção de luminárias LED – Cenário fp ≥ 0,96 93
5.8 Estimativa das Perdas de distorção de luminárias LED – Cenário $DHT_i \leq 8\%$ 98
5.9 Estimativas das Perdas econômicas de distorção harmônica de luminárias *LED* na rede de distribuição para o cenário de 100% *LED* 101
5.10 Estimativas das Perdas econômicas de distorção harmônica de luminárias *HID* na rede de distribuição – Cenário atual 104
5.11 Estimativas das Perdas econômicas de distorção harmônica de luminárias *HID* na rede de distribuição com 100% *HID* 109

Capítulo 6 - Conclusões e Trabalhos Futuros.....112
6.1 Conclusões..... 112
6.2 Trabalhos Futuros..... 114
Bibliografia 116
Apêndice A – Levantamento dos registros ativos de luminárias *LED* certificadas ...121
Apêndice B - Medição de parâmetros elétricos de Luminárias *LED* 124
Apêndice C - Medição para fator de compensação.....127
Apêndice D – Dados de Medição em lâmpadas *H*.....128
Anexo A – Dados do transformador WEG a óleo de 112,5kVA 129

Capítulo 1 - Introdução

A preocupação da sociedade contemporânea com a redução das emissões de dióxido de carbono (CO_2) é uma realidade a nível mundial com objetivos de minimizar os efeitos das mudanças climáticas e a intensificação do efeito Estufa. Uma das formas de reduzir essas emissões é o emprego de tecnologias de maior eficiência energética, pois conseguem realizar o mesmo trabalho útil, com uma demanda de potência inferior, diminuindo o consumo energético.

Ao longo dos últimos anos a indústria da iluminação vem passando uma grande transformação com a utilização da tecnologia *Light Emitting Diode* (*LED*) comparada a que ocorreu com o surgimento da lâmpada incandescente de *Thomas Edison* em 1879. Há disponível no mercado brasileiro produtos mais eficientes, mais duráveis e não mercuriais, quando comparados com as tecnologias convencionais.

De acordo com o Plano Nacional de Energia (PNE), elaborado pelo Ministério de Minas e Energia (MME), algumas das medidas adotadas para se conter a ineficiência energética são a substituição por tecnologias mais eficientes e a melhor organização, conservação e gestão do uso da energia, estabelecendo uma meta de redução de 10% do consumo de energia até de 2030. [1]

A iluminação consome cerca de 20% de toda energia gerada no planeta, correspondendo a aproximadamente 1.900 milhões de toneladas de CO_2. [2] Esse montante corresponde a 70% das emissões mundiais dos automóveis de passeio e mais do que o triplo das emissões do setor de aviação. [3]

Segundo o Banco Mundial, o parque de iluminação pública (IP) brasileiro possui cerca de 18 milhões de pontos registrados, que são energizados inteiramente na hora de ponta, representando 4,3% do consumo total de energia elétrica do país e abrange de 3% a 5% do orçamento dos municípios. Desse total, 71% são de lâmpadas a vapor de sódio e 23,6% de lâmpadas de mercúrio. O custo aproximado para substituir todo parque de IP pela tecnologia *LED* é de aproximadamente R$ 28 bilhões de reais [4].

Dado o perfil do consumo da IP e o crescimento da aplicação da tecnologia *LED*, cria-se um potencial de redução da demanda e do consumo energético. Por outro lado, ao se trocar a tecnologia de lâmpadas descarga de alta intensidade (*HID - High Intensity Discharge*) pela tecnologia *LED*, há uma modificação no perfil das distorções harmônicas na rede elétrica, que

deve ser estudado para uma análise mais detalhada e precisa do impacto energético e financeiro dessa tecnologia.

Para atender e otimizar o fornecimento de energia elétrica, faz-se um planejamento da expansão do sistema levando em consideração as tecnologias atuais. Quando surge uma tecnologia mais eficiente com potencial de utilização em grande escala, é de se esperar que haja impactos energéticos e econômicos a médio e longo prazo.

Consultando a literatura, foram encontrados inúmeros trabalhos abordando os impactos das distorções harmônicas provocadas pela tecnologia *LED*, com foco no desempenho energético e na qualidade de energia elétrica (QEE). *Davidovic* [5] escreveu um trabalho sobre distorções harmônicas de tensão nas instalações de luminárias *LED* de via pública, na qual considera dois problemas de QEE: distorção de tensão e queda de tensão ao longo da linha de diferentes instalações elétricas. A pesquisa inclui três partes: (1) desenvolvimento de um novo modelo e do *software* correspondente para o cálculo dos harmônicos de tensão nas instalações de IP trifásica com *LED*, onde a carga é não simétrica e não linear. (2) Experimentos em duas seções de uma instalação piloto de IP, uma com 6 postes com branco neutro e o outro com 5 luminárias *LED* brancas quentes (os primeiros eram com *drivers* convencionais, e os últimos com *drivers* aprimorados em relação às emissões harmônicas). (3) O *software* desenvolvido foi aplicado a quatro instalações de iluminação de ruas típicas, duas com um lado único e duas com *layout* de poste central. O principal resultado foi a determinação do número máximo permitido de luminárias *LED* que podem ser conectadas ao cabo de alimentação sem exceder qualquer um dos limites relacionados à queda de tensão, distorção harmônica de tensão total e harmônica de tensão individual nos regimes de IP total ou reduzida. [5]

Neste trabalho realizado por Adragna sobre projeto de *drivers* eletrônicos da Universidade da Catânia, na Itália, investigaram-se os diferentes problemas relacionados com a distorção da corrente de entrada em um *driver* de *LED QR flyback*. Vários efeitos, como a distorção causada pela corrente de toque, distorção devido à corrente de fuga do transformador e distorção devido ao capacitor de armazenamento de entrada foram experimentalmente relatados e forneceram como resultado algumas orientações para projeto de um *driver QR Hi-PF flyback*. [6]

Em [7] *Djuretic* aplica cenários de dimerização, onde maiores ganhos de economia de energia podem ser alcançados por uma luminária *LED* quando comparado por uma luminária de sódio de alta pressão correspondente à instalação. No entanto, ambos os experimentos de campo mostraram que os *drivers* de *LED* testados (de características de regulação padrão ou

melhoradas) têm a desvantagem de fatores de potência baixos em níveis de iluminância mais baixos, em torno de 0,67. Além disso, uma maior presença de harmônicos de corrente e altos valores da distorção harmônica total foram observados em níveis baixos de intensidade luminosa, representando outra desvantagem da tecnologia *LED* em relação à qualidade de energia. As características elétricas relevantes dos *drivers LED* comumente usados foram analisadas em detalhes e as razões para a baixa qualidade de energia foram identificadas. Uma nova geração de *drivers* de *LED* com uma considerável faixa mais estreita de tensão de entrada permitirá fatores de potência aceitáveis e emissões limitadas de harmônicas de corrente a serem alcançadas em praticamente toda faixa de intensidade luminosa. [7]

Neste trabalho de *Eveliina* sobre luminárias inteligentes, a aplicação da tecnologia *LED* em substituição a tecnologia convencional *HID* acarretou uma economia de energia de 19 a 44%. Ao incorporar um controle inteligente através de sensores integrados sem fio com base no fluxo dos pedestres, essa economia variou entre 40 e 60%. [8]

Em [9], *Wisniewski* analisou a efetiva economia de energia, na tecnologia *LED*, conforme a variação do fluxo luminoso através do processo de dimerização. Porém, antes de estabelecer o processo de estabilização do fluxo luminoso, o autor destacou a importância de analisar a economia de energia prevista para o método e as consequências negativas propiciadas na rede. Sendo assim, o autor propôs dois métodos diferentes. O primeiro método estabelece uma relação linear entre a potência da amostra e do fluxo luminoso. Para comprovar o primeiro método proposto foram consideradas duas retas. A primeira é compreendida pela linha teórica, sendo considerados dois pontos extremos, ou seja, potência e fluxo luminoso nominal, potência e fluxo luminoso mínimo. A segunda reta é compreendida entre a variação do fluxo luminoso e medição da potência para o respectivo fluxo luminoso. O autor concluiu que o método indicou uma alta variação da potência medida e teórica, sendo assim, não sendo um método adequado para análise de economia de energia. O segundo método proposto pelo autor coincide em realizar a análise de economia de energia através do *software* DIALUX. Para comprovação do método, foi medido o fluxo luminoso em alguns pontos de uma sala real e a média dos valores foi inserida no *software*. O autor concluiu que a simulação é um método válido para análise da economia de energia em processos de variação do fluxo luminoso. O autor também concluiu que o processo de economia de energia resulta em um aumento na distorção harmônica de corrente e redução no fator de potência, conforme a redução do fluxo luminoso. Portanto, foi recomendada uma análise da economia estabelecida e as consequências do processo para assim chegar a uma conclusão de viabilidade. [9]

Fonseca em [10] propôs uma topologia de controlador para lâmpada *LED* distinta das usuais. Para comprovar seu estudo, o autor utilizou um conversor de estágio único com e sem ponte. O estágio único tem como finalidade uma correção de fator de potência. Com a topologia proposta, analisando os resultados apresentados pelo autor, o nível de distorção harmônica de corrente e fator de potência foram de 15% e 0,98, respectivamente, considerando potência nominal. Entretanto, reduzindo a potência de saída para 30% da nominal, o nível de distorção harmônica de corrente e fator de potência foram de 60% e 0,85, respectivamente. Porém o autor caracterizou o projeto como viável, pois a topologia, operando em potência nominal, atendeu aos limites impostos na Classe C da norma IEEE 61000-3-2-2020. [10]

Vários outros trabalhos encontrados abordando a tecnologia *LED* abordam diferentes enfoques diretamente no produto em termos de eficiência energética e Qualidade de Energia Elétrica [11] [12] [13] [14], e em outros trabalhos foram analisados os impactos diretamente da rede elétrica ou no sistema de IP [15] [16].

Entretanto, não foram encontradas na literatura estimativas dos impactos econômicos de uma aplicação da tecnologia *LED* para IP em redes de distribuição de baixa tensão (perdas na carga, nos circuitos de alimentação e nos transformadores alimentadores) oriundos das distorções harmônicas de correntes, principalmente para uma aplicação em larga escala, como é o caso do sistema de IP brasileiro. Este trabalho visa contribuir nesta lacuna encontrada na literatura apresentando uma contribuição para estimativas econômicas sobre os problemas de qualidade de energia elétrica.

1.1 Motivação

A inexistência de metodologias que avaliam os impactos econômicos a respeito da aplicação da tecnologia *LED* no sistema IP em escala nacional, que é de grande relevância para os agentes de planejamento do Sistema Elétrico de Potência (SEP) e dos Programas de Eficiência Energética (PEE), motivou a elaboração do presente trabalho.

Adicionalmente, no trabalho apresentado por Duarte [17], as aplicações da eletrônica de potência são apontadas como uma forma de aumentar a eficiência energética e seus impactos econômicos sobre as empresas do setor elétrico, envolvendo transmissão, geração e distribuição, os consumidores, bem como as indústrias de forma geral. A necessidade de estimativas mais precisas e detalhadas dos impactos econômicos das distorções harmônicas nas redes elétricas de

distribuição com o crescimento da utilização da eletrônica de potência ganha mais relevância para auxiliar todos os agentes do setor elétrico, envolvendo transmissão, geração e distribuição, os consumidores, bem como as indústrias de forma geral.

Em pesquisa bibliométrica realizada da literatura no banco de dados SCOPUS, verificamos um crescimento de estudos sobre distorções harmônicas em *LED* nos últimos dez anos, porém verificamos também lacunas quanto aos impactos econômicos.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem por objetivo principal desenvolver uma metodologia para avaliar os impactos econômicos gerados pelas distorções harmônicas nas redes elétricas de distribuição do sistema de IP devidos à aplicação em larga escala da tecnologia *LED*.

Adicionalmente, este trabalho também visa o desenvolvimento de uma ferramenta computacional para auxiliar aos gestores energéticos municipais no entendimento do impacto das distorções harmônicas com a aplicação da tecnologia *LED* na IP nos transformadores de distribuição, para um melhor planejamento e operação destes que são bastante afetados na presença de cargas não lineares.

A presente pesquisa busca responder as seguintes questões:

- Qual a estimativa econômica das perdas harmônicas causadas por luminárias *LED* de via pública na rede de distribuição?
- Essas perdas podem ser mitigadas? De que formas e em quanto?
- Visto que o segmento de IP está passando uma transição tecnológica, da *HID* para a *LED*, em termos de distorções harmônicas o impacto é positivo ou negativo?

1.3 Estrutura do Trabalho

O desenvolvimento dessa pesquisa está estabelecido como descrito a seguir.

O capítulo 2 abordou os conceitos de QEE, definições, principais indicadores, aspectos normativos e os principais distúrbios associados à QEE.

O capítulo 3 abordou os conceitos de distorções harmônicas.

O capítulo 4 apresentou conceitos de teorias de potências, Budeanu, e o método IEEE 1459:2010.

No Capítulo 5, foi desenvolvida uma metodologia para estimar os impactos econômicos das distorções harmônicas de corrente no sistema de IP, estimando os valores de perdas nas cargas de IP, nos circuitos de alimentação e as perdas nos transformadores alimentadores desse sistema. Além disso, foram comparados com as perdas provenientes da tecnologia *HID*.

No Capítulo 6 foram apresentadas as Considerações Finais e apresentadas sugestões de trabalhos futuros.

Capítulo 2 - Qualidade de Energia Elétrica

2.1 Considerações iniciais

A menção mais antiga do termo QEE conhecido foi em um artigo publicado em 1968, que detalhou um estudo da Marinha dos EUA após especificações para a potência exigida por equipamentos eletrônicos, oferecendo uma visão geral para este campo, incluindo o uso de equipamentos de monitoramento e até mesmo a sugestão do uso de uma chave de transferência estática. [18]

Já em 1970, a QEE é mencionada como um dos objetivos do projeto do sistema de energia industrial, juntamente com segurança, confiabilidade e baixo custo operacional [19]. Quase ao mesmo tempo, o termo qualidade de tensão foi usado por *Knoller* [20] e *Lidholm* [21] nos Países Escandinavos, e *Konstantinov* [22] na União Soviética, principalmente com referência as variações na magnitude da tensão.

Entretanto, o tratamento da QEE se entende para além dos níveis de transmissão e distribuição. O recente aumento do interesse pela QEE pode ser explicado pela crescente aplicação de equipamentos eletrônicos mais sensíveis e dependentes das condições de operação do sistema de energia elétrica do que seus equivalentes de 10 ou 20 anos atrás. As empresas também se tornaram mais sensíveis às perdas de tempo de produção devido às suas margens de lucro reduzidas em um mundo cada vez mais globalizado.

Não há uma definição padrão para o termo Qualidade de Energia Elétrica (QEE), visto que a disponibilidade, a instalação elétrica, a suscetibilidade dos equipamentos, o aterramento e as interferências eletromagnéticas podem ser determinantes. Quase que sempre, os problemas de QEE são gerados pelo usuário através dos tipos de cargas que estes conectam a rede. QEE é a busca por desenvolvimento de meios para erradicar ou minimizar problemas em dispositivos elétricos e eletrônicos. [23]

Segundo Leão [24], QEE pode ser entendido como um conceito guarda-chuva que compreende uma variedade de fenômenos eletromagnéticos que levam ao desvio na forma de onda da tensão e corrente elétrica. O termo QEE é comumente utilizado para descrever o fornecimento de energia elétrica que aciona uma carga elétrica adequadamente, isto é, sem causar prejuízo de desempenho e de vida útil.

Para *Fuchs*, apesar das diferentes definições, QEE visa expressar a qualidade da tensão e/ou a qualidade da corrente e pode ser definida como: a medida, análise e melhoria da tensão do barramento para manter uma forma de onda de tensão senoidal e frequência nominal. [25]

De acordo com o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) [26], QEE é a medida pela qual a energia elétrica pode ser bem utilizada pelos consumidores, incluindo a continuidade de suprimento e de conformidade de indicadores desejáveis do produto para uma operação segura, tanto para a fonte quanto à carga.

O desenvolvimento de produtos de maior eficiência energética, com o emprego de eletrônica de potência, aumentou a quantidade de harmônicos na rede elétrica, provocando o aumento de problemas de QEE. Um reator eletrônico ou *driver* de luminária *LED*, por exemplo, utilizam fontes chaveadas para substituir o tradicional reator eletromagnético. Apesar do melhor rendimento, essas fontes necessitam de um maior controle de qualidade para amenizar a geração de harmônicos, seja através de topologias mais robustas ou da utilização de filtros. A preocupação com a QEE tem se elevado principalmente nos últimos 15 anos em razão do aumento da quantidade de equipamentos e processos elétricos mais suscetíveis, além do crescimento das cargas não lineares. [27]

2.2 Aspectos Normativos

As principais organizações internacionais que tratam dos problemas associados à QEE são:

- IEEE – *Institute of Electrical and Electronics Engineers*;
- IEC – *International Electrotechnical Commission*;
- CIGRE – *Grand Réseaux Électriques a Haute Tension*;

O IEEE é uma organização internacional que desenvolve normas relacionadas a produtos e serviços, nos setores de telecomunicações, de tecnologia da informação e de geração de energia. A norma *IEEE 1159:2019 – Recommendend Practice for Monitoring Electric Power Quality* descreve detalhadamente os fenômenos eletromagnéticos que ocorrem nos sistemas elétricos, às condições nominais, desvios e os índices que quantificam os distúrbios de QEE. [28]

A *International Electrotechnical Commission* (IEC) é uma organização global sem fins lucrativos para desenvolver a infraestrutura de qualidade e o comércio internacional de

produtos elétricos e eletrônicos, consistentemente seguros e confiáveis, facilitando a inovação técnica, promoção da energia eficiente e sustentável, urbanização inteligente e mitigação das mudanças climáticas. Reúne mais de 170 países e fornece uma plataforma de padronização global, neutra e independente para 20.000 especialistas em todo o mundo. [29]

A família de normas *IEC 61000* aborda o tema da QEE, a *IEC 61000-4-30-2015 Power Quality Measurement Methods* define os requisitos técnicos para equipamentos de medição de QEE, bem como frequência de alimentação, magnitude da tensão, tensão de alimentação, cintilação, transitórios de tensão, corrente harmônica, Inter-harmônicos, dentre outros. [30]

O CIGRE é uma organização internacional, sem fins lucrativos, fundada em 1921 na França, que trata de assuntos técnicos, econômicos, ambientais e de regulamentação relacionados a sistemas elétricos de grande porte. Na área de QEE, realiza estudos sobre continuidade do fornecimento, magnitude, frequência e equilíbrio entre fases da onda de tensão. [31]

O Comitê Nacional Brasileiro de Produção e Transmissão de Energia Elétrica - CIGRÉ-Brasil é uma sociedade civil, sem fins lucrativos, fundada em 1971, que tem por objetivo promover o intercâmbio e desenvolvimento técnico, tecnológico e da engenharia no Brasil, no campo da produção de energia elétrica, de sua transmissão em alta tensão e distribuição.

Dentre os vários comitês de estudo, dois tratam especificamente de aspectos relacionados à qualidade de energia e sua avaliação:

- CE-B4 Elos de Corrente Contínua e Eletrônica de Potência CCAT: aspectos econômicos, aplicações, planejamento, projeto, desempenho, controle, proteção, construção e teste. Eletrônica de potência elevada: desenvolvimento de novas tecnologias em conversores incluindo controles, novos semicondutores, aplicações destas tecnologias em CCAT, FACTS e qualidade de energia.
- CE-C4 Desempenho de Sistemas Elétricos Estudos, desenvolvimentos e recomendações de métodos e instrumentos para análises e medições do desempenho de sistemas elétricos relacionado com a Qualidade da Energia Elétrica, Compatibilidade Eletromagnética, Descargas Atmosféricas e Coordenação de Isolamentos. [32]

Os objetivos dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica são relativos à QEE, relacionados à qualidade do serviço prestado, ao produto, ao tratamento comercial e à

segurança do trabalho e instalações conforme descritos na Resolução 956 da ANEEL, anexo VIII. [33]

Para a qualidade do produto, este módulo define a terminologia e os indicadores, caracteriza os fenômenos, estabelece os limites ou valores de referência, a metodologia de medição, a gestão das reclamações relativas à conformidade de tensão em regime permanente e às perturbações na forma de onda de tensão e os estudos específicos de qualidade da energia elétrica para fins de acesso aos sistemas de distribuição.

Para a qualidade do fornecimento de energia elétrica, este módulo estabelece a metodologia para apuração dos indicadores de continuidade e dos tempos de atendimento a ocorrências emergenciais, definindo padrões e responsabilidades.

Os parâmetros de qualidade do produto, em regime permanente ou transitório, definidos na Resolução Aneel 956, são:

a. Parâmetros de QEE em regime permanente:

- tensão em regime permanente;
- fator de potência;
- harmônicos;
- desequilíbrio de tensão;
- flutuação de tensão e;
- variação de frequência.

b. Parâmetro de QEE em regime transitório

- variações de tensão de curta duração – VTCD.

Para as concessionárias de distribuição de energia, os indicadores de continuidade de serviços são:

- DIC: Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão;
- FIC: Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão;
- DMIC: Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão;

- DICRI: Duração da Interrupção Individual ocorrida em Dia Crítico por unidade consumidora ou por ponto de conexão;
- DEC: Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora;
- FEC: Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora. [33]

No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) é o órgão responsável pela normatização técnica, sendo a representante do país junto às seguintes entidades internacionais: ISO (*International Organization for Standardization*), IEC (*International Electrotechnical Commission*); IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), CIGRE (*Grand Réseaux Électriques a Haute Tension*) e também junto às entidades regionais COPANT (Comissão Panamericana de Normas Técnicas) e a AMN (Associação Mercosul de Normalização). [34]

A ABNT não define normas relativas ao serviço qualidade da energia elétrica, que é regulado pela Resolução 956 da ANEEL, mas define especificações técnicas para equipamentos e produtos eletroeletrônicos, que servem como base para a certificação através das portarias do INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia Qualidade e Tecnologia e ANATEL – Agência Nacional de Telecomunicações. [33] [34]

Por exemplo, a Portaria Nº 62, de 17 de fevereiro de 2022 aprova o regulamento técnico da qualidade e os requisitos de avaliação da conformidade para luminárias para a iluminação pública viária, utilizando a norma *ABNT NBR 16026:2012 Dispositivo de controle eletrônico c.c. ou c.a. para módulos de LED – Requisitos de desempenho.*

No que se refere à QEE, esta Portaria estabelece:

- Fator de potência deve ser igual ou maior que 0,92;
- As harmônicas da corrente de alimentação devem estar em conformidade com a norma IEC 61000-3-2:2014 ((*Electromagnetic compatibility (EMC) - Limits for harmonic current emissions (equipment input current < 16 A per phase*));
- Devem ser previstos filtros no controlador (*driver*) para supressão de interferência eletromagnética e de radiofrequência. [35]

2.3 Principais Distúrbios associados à QEE

O termo QEE refere-se a uma variedade de fenômenos eletromagnéticos conduzidos que afetam a caracterização da tensão e a corrente em um dado tempo e ponto do sistema

elétrico. O diagnóstico correto e adequado do tipo de fenômeno auxilia na mitigação dos efeitos. Para esse melhor entendimento, veremos na sequência deste texto as definições desses principais eventos:

2.3.1 Transitórios

Os transitórios são variações de natureza indesejada e momentânea de corrente e/ou tensão de curtíssima duração e de alta magnitude. São de grande importância para o sistema elétrico porque fazem com que os equipamentos sejam submetidos a maiores níveis de tensões ou a correntes, podendo até mesmo deixá-los inutilizáveis. Podem ser causados pela abertura de uma chave, ocorrência de uma falta ou uma descarga atmosférica. [36]

Também podem ser entendidos como manifestações ou respostas elétricas locais ou nas adjacências, oriundas de alterações súbitas nas condições operacionais de um sistema de energia elétrica. [37]

De modo geral, os transitórios podem ser classificados como impulsivo ou oscilatório, em virtude da forma de onda da corrente ou da tensão.

- Transitórios impulsivos:

Transitórios impulsivos são mudanças repentinas de frequência na condição de regime permanente de tensão ou corrente de forma unidirecional em polaridade (positivo ou negativo). [28]

São normalmente caracterizados pelos tempos de subida de descida, que também podem ser revelados pelo seu conteúdo espectral. Como exemplo, um transitório impulsivo de 1,2 x 50-µ s 2000V sobe de zero até seu valor máximo de 2.000 V em 1,2µs e então decai para metade do seu valor de pico em 50µs. [36]

A Figura 1 apresenta uma curva de um transitório impulsivo causado por uma descarga atmosférica.

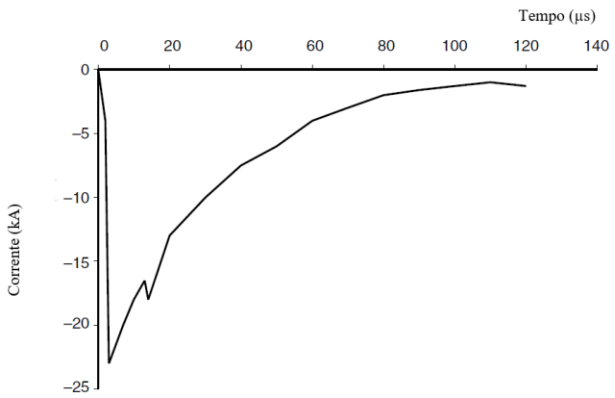

Figura 1 - Transitório impulsivo causado por descarga atmosférica

Fonte: Dugan et al. [36]

- Transitórios oscilatórios:

São mudanças repentinas de frequência na condição de regime permanente de tensão ou corrente que inclui ambos os valores de polaridade positiva e negativa. Consistem em tensão ou corrente cujo valor instantâneo da polaridade altera rapidamente. É descrito por seu conteúdo de espectro (frequência predominante), duração e magnitude. Podem ser classificados como alta, média ou baixa frequência, conforme apresentado na Tabela 1. [28]

Transitórios oscilatórios com frequências principais inferiores a 300 Hz também podem ser encontrados no sistema de distribuição. Estes são geralmente associados com ferro-ressonância e energização do transformador. [36]

Os transitórios envolvendo capacitores em série também podem se enquadrar nessa categoria. Eles ocorrem quando o sistema responde ressoando com sons de baixa frequência na corrente de energização do transformador (segundo e terceiro harmônico) ou quando condições incomuns resultam em ferro-ressonância. [36]

A Tabela 1 apresenta as categorias e características típicas dos fenômenos eletromagnéticos nos sistemas elétricos.

Tabela 1 - Características típicas dos eventos transitórios

Categorias	Conteúdo espectral típico	Duração típica	Magnitude de tensão típica
1.0 Transientes			
1.1 Impulsivo			
1.1.1 Nanossegundo	5-ns rise	<50 ns	
1.1.2 Microssegundo	1-µs rise	50 ns–1 ms	
1.1.3 Milissegundo	0,1-ms rise	>1 ms	
1.2 Oscilatório			
1.2.1 Baixa frequência	<5 kHz	0,3–50 ms	0–4 pu
1.2.2 Média frequência	5–500 kHz	20 µs	0–8 pu
1.2.3 Alta frequência	0,5–5 MHz	5 µs	0–4 pu
2.0 Variações de curta duração			
2.1 Instantâneo			
2.1.1 Interrupção		0,5–30 ciclos	<0,1 pu
2.1.2 Sag (dip)		0,5–30 ciclos	0,1–0,9 pu
2.1.3 Swell		0,5–30 ciclos	1,1–1,8 pu
2.2 Momentâneo			
2.2.1 Interrupção		30 ciclos –3 s	<0,1 pu
2.2.2 Sag (dip)		30 ciclos –3 s	0,1–0,9 pu
2.2.3 Swell		30 ciclos –3 s	1,1–1,4 pu
2.3 Temporário			
2.3.1 Interrupção		3 s–1 min	<0,1 pu
2.3.2 Sag (dip)		3 s–1 min	0,1–0,9 pu
2.3.3 Swell		3 s–1 min	1,1–1,2 pu
3.0 Variações de longa duração			
3.1 Interrupção sustentada		>1 min	0,0 pu
3.2 Subtensões		>1 min	0,8–0,9 pu
3.3 Sobretensões		>1 min	1,1–1,2 pu
4.0 Desequilíbrio de tensão		Estado constante	0,5–2%
5.0 Distorção de forma de onda			

5.1 Deslocamento CC		Estado constante	0–0,1%
5.2 Harmônicos	0–100th harmônico	Estado constante	0–20%
5.3 Interharmônicos	0–6 kHz	Estado constante	0–2%
5.4 Notching		Estado constante	
5.5 Ruído	Banda larga	Estado constante	0–1%
6.0 Flutuações de tensão	<25 Hz	Intermitente	0,1–7%
			0,2–2 Pst
7.0 Variações de frequência de alimentação		<10 s	

NOTA: s - segundo, ns - nanosegundo, µs - microsegundo, ms - millisegundo,

kHz - kilohertz, MHz - megahertz, min - minuto, pu - por unidade.

Fonte: Fuchs et al. [25]

A Figura 2 apresenta um transitório oscilatório de corrente proveniente da energização de um capacitor.

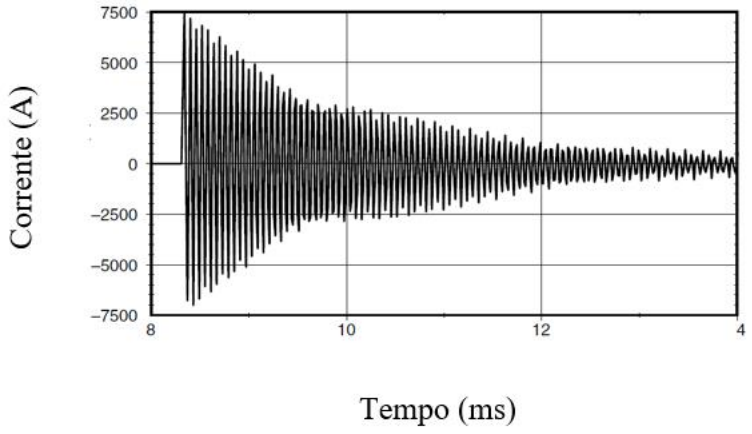

Figura 2 - Transitório oscilatório
Fonte: Dugan et al. [36]

2.3.2 Variações de Tensão de Curta Duração - VTCD

São variações do valor *rms* da tensão ou corrente nominal por um tempo maior que 0,5 ciclo da frequência de potência, mas menor ou igual a 1 min. Quando a variação *rms* é a tensão, ela pode ser descrita usando um modificador que indica a magnitude de uma variação

de tensão (por exemplo, queda, aumento, interrupção) e possivelmente um modificador indicando a duração da variação (por exemplo, instantâneo, momentâneo, temporário). [28]

De acordo com o Módulo 8 do PRODIST, são desvios significativos na amplitude do valor eficaz da tensão durante um intervalo de tempo inferior a três minutos e podem ser classificadas de acordo com o tempo de perturbação. Quando a duração é inferior ou igual a 3 segundos, é classificada como momentânea, para duração superior a 3 segundos e inferior a 3 minutos é classificada como temporária. Esses detalhes são apresentados na Tabela 2. [33]

Alguns equipamentos são sensíveis à magnitude dos afundamentos, como por exemplo, relés de proteção de subtensão e tipos de máquinas automatizadas. Já outros aparelhos são sensíveis à magnitude e à duração da variação de tensão de curta duração. Esses equipamentos podem apresentar mau funcionamento, daí a importância do monitoramento desses eventos. [27]

Tabela 2 - Classificação das Variações de Tensão de Curta Duração

	Denominação	Duração da Variação	Amplitude da tensão (valor eficaz) em relação à tensão de referência
Variação Momentânea de Tensão	Interrupção Momentânea de Tensão	Inferior ou igual a três segundos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Momentâneo de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Momentânea de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior a 1,1 p.u
Variação Temporária de Tensão	Interrupção Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Temporário de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior a 1,1 p.u

Fonte: ANEEL, Resolução Normativa Nº 956 de 7/12/2021. [33]

A Figura 3 apresenta o afundamento de uma tensão ou *sag*. A forma de onda diminui a sua amplitude em alguns ciclos e em seguida retorna para a sua amplitude nominal.

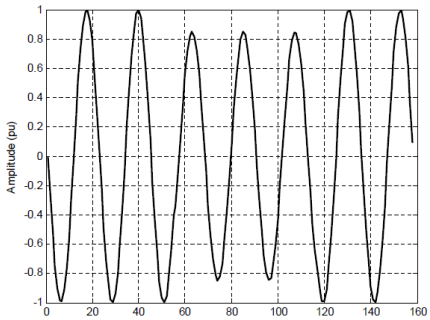

Figura 3 - Afundamento de Tensão – sag
Fonte: Dugan et al. [36]

Assim como os *sags*, os *swells*, elevações de tensão, geralmente estão associados a condições de falha do sistema, mas não são tão comuns quanto às quedas de tensão. Uma maneira que um *swell* pode ocorrer é na presença de faltas monofásicas (curto-circuito fase-terra) no sistema elétrico da concessionária. A Figura 4 ilustra um aumento de tensão causado por uma falha monofásica. Podem também serem causadas pelo desligamento de uma grande carga ou energizando um grande banco de capacitores. [36]

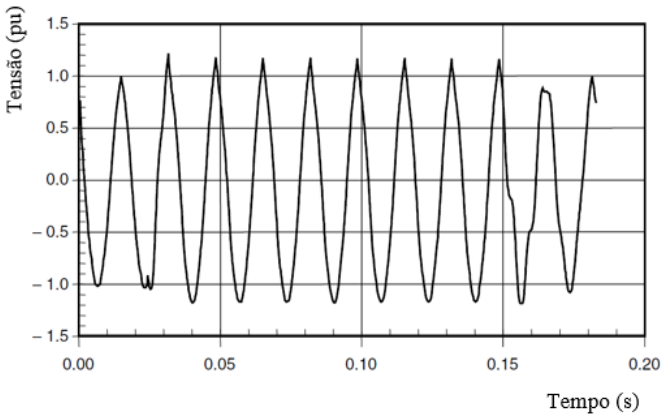

Figura 4 - Elevação de Tensão - swell
Fonte: Dugan et al. [36]

2.3.3 Variações de Tensão de Longa Duração - VTLD

São variações do valor *rms* da tensão ou corrente do nominal por um tempo superior a 1 min. O termo geralmente é descrito usando um modificador indicando a magnitude de uma variação de tensão (por exemplo, subtensão, sobretensão, interrupção de tensão). [28]

As variações de longa duração podem ser sobretensões ou subtensões, geralmente não são o resultado de falhas do sistema, mas são causadas por variações de carga no sistema de distribuição. [37]

Uma sobretensão é um aumento no valor *rms* da tensão superior a 1,1 pu, na frequência da rede, com duração superior a 1 min. É geralmente o resultado da comutação de carga (por exemplo, desligar uma grande carga ou energizar um banco de capacitores).

O chaveamento dos bancos de capacitores, durante os horários picos de carga para compensar a demanda reativa atrasada da carga, é acompanhado por um surto de corrente que é inicialmente limitada pela impedância característica do sistema e da resistência da linha. Uma redução acentuada na tensão é seguida por um aumento de tensão, que decai por oscilação a uma frequência determinada pela indutância e capacitância do circuito. [38]

Subtensão é a diminuição no valor *rms* da tensão para menos de 0,90 pu, na frequência da rede, por um período superior a 1 min. As subtensões são o resultado de eventos de comutação contrários dos eventos que causam as sobretensões. Uma carga ligando ou um desligamento do banco de capacitores pode causar uma subtensão até equipamento de regulação de tensão no sistema pode trazer a tensão de volta para dentro das tolerâncias. Circuitos sobrecarregados podem resultar em subtensões também. [27]

2.3.4 Desequilíbrios

Segundo o a *IEEE 1159-2019*, Desequilíbrios são a razão entre a componente de sequência negativa e a componente de sequência positiva da tensão do sistema trifásico. [28]

Embora seja inadequado, na prática, mede-se o desequilíbrio de tensão através da medição das magnitudes das tensões de fase, sem levar em consideração os ângulos de fases entre elas. O sistema elétrico é considerado em desequilíbrio quando há uma diferença entre os valores absolutos de tensão entre as fases e também, quando ocorre um deslocamento diferente de 120 graus entre as fases. [39]

O nível de desequilíbrios entre as fases deve, obrigatoriamente, ser monitorado, avaliado e controlado por parte das distribuidoras. [25]

A ANEEL define o desequilíbrio de tensão como sendo o fenômeno caracterizado por qualquer diferença verificada nas amplitudes entre as três tensões de fase de um determinado sistema trifásico, ou na defasagem elétrica de 120° entre as tensões de fase do mesmo sistema. [33]

A Figura 5 ilustra as formas de onda de um sistema trifásico desequilibrado:

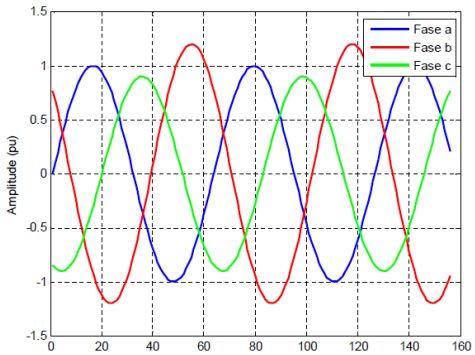

Figura 5 - Desiquilíbrio de tensões
Fonte: Autoria própria

O PRODIST utiliza o método das componentes simétricas para caracterizar o desiquilíbrio. Neste método, o grau de desequilíbrio é definido pela relação entre os módulos da tensão de sequência negativa e da tensão de sequência positiva, conforme expresso pela Equação 1. [33]

$$FD\% = \frac{V-}{V+} . 100\%[\%] \tag{1}$$

Onde:

FD - Fator de Desequilíbrio;

V- - Magnitude da tensão de sequência negativa (*rms*);

V+ - Magnitude da tensão de sequência positiva (*rms*).

Alternativamente, o fator de desiquilíbrio também pode ser expresso de acordo com a Equação 2:

$$FD\% = 100 \sqrt{\frac{1-\sqrt{3-6\beta}}{1-\sqrt{3+6\beta}}}[\%] \tag{2}$$

Sendo:

$$\beta = \frac{{V_{ab}}^4 + {V_{bc}}^4 + {V_{ca}}^4}{({V_{ab}}^4 + {V_{bc}}^4 + {V_{ca}}^4)^2} \tag{3}$$

Onde:
Vab, *Vbc* e *Vca* - Magnitudes das tensões trifásicas de linha (*rms*).

As normas internacionais IEC 61000-3-x estabelecem como o limite de 2% para a baixa tensão e a média tensão, e 1% para a alta tensão. No Brasil, o valor limite é de 3% para a tensão inferior a 2,3kV e de 2% para tensões acima de 2,3kV e inferiores a 230kV. [33]

2.3.5 Distorções

São desvios da forma de onda, em regime permanente, de uma onda senoidal ideal, na frequência fundamental que são caracterizados principalmente pelo seu conteúdo espectral de desvio. De acordo com *Masoum*, podem ser subdivididas conforme em: [25]

• Harmônicos: sinais de tensões ou correntes senoidais de frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental (60 Hz) na qual opera o sistema de energia elétrica. Estes harmônicos distorcem as formas de onda da tensão e corrente e são oriundos de equipamentos e cargas com características não lineares instalados no sistema de energia;

• Inter-harmônicos: componentes de frequência, em tensão ou corrente, que não são múltiplos inteiros da frequência fundamental do sistema supridor (60 Hz);

• Nível CC: a presença de tensão ou corrente CC em um sistema elétrico CA é denominado "DC offset";

• *Voltage notching*: também conhecido como corte de tensão, é uma perturbação periódica da tensão causada pela operação normal de dispositivos de eletrônica de potência quando a corrente é comutada de uma fase para outra.

• Ruído: é o sinal elétrico indesejado com conteúdo espectral de banda larga inferior a 200 kHz sobreposta à tensão ou corrente do sistema de energia nos condutores de fase ou encontrada nos neutros condutores ou linhas de sinal. [25]

2.3.6 Flutuações de Tensão

São uma série de variações de tensão sistemáticas e intermitentes dentro de uma faixa entre 0,9 e 1,1pu da tensão nominal. Este termo tem sido usado de forma incorreta como cintilação, que é derivado do impacto da tensão flutuação nas lâmpadas de modo que sejam percebidas pelo olho humano como *flicker*. O termo cintilação é derivado do impacto da tensão flutuação nas lâmpadas de modo que sejam percebidas pelo olho humano como *flicker*. Para ser tecnicamente correto, a flutuação de tensão é um fenômeno eletromagnético,

fenômeno enquanto *flicker* é um resultado indesejável da flutuação de tensão em algumas cargas. No entanto, os dois termos estão frequentemente ligados juntos em padrões. Portanto, usaremos também o termo comum oscilação de tensão para descrever tais flutuações de tensão. [36]

Segundo ANEEL, flutuações de tensão são caracterizados por eventos de variação contingente, irregular e com um intervalo temporal desconhecido do valor eficaz de tensão ou valor de pico instantâneo da tensão. [33]

2.3.7 Variações de Frequência

São pequenos desvios momentâneos do valor da frequência fundamental da tensão decorrentes do desequilíbrio entre a geração da energia elétrica e a demanda solicitada pela carga. A sua duração e magnitude dependem essencialmente da dimensão do desequilíbrio ocorrido, da característica dinâmica da carga e do tempo de resposta do sistema de geração às variações de potência. [36]

O PRODIST também regulamentou limites conforme condição de operação do sistema. Em regime permanente, a frequência deve estar estabilizada entre 59,9 e 60,1 Hz. No caso de uma eventual intercorrência, o tempo de resposta do sistema para reestabelecer a condição considerada estável varia conforme o nível de perturbação. Em condições extremas, a frequência do sistema não pode ultrapassar o 66 Hz e nem ser inferior a 56,5 Hz. [33]

Capítulo 3 - Distorções Harmônicas

O termo *harmônica* tem origem na área de acústica e de instrumentos musicais, onde representa a amplitude de vibração de uma corda ou coluna de ar numa frequência múltipla da frequência básica de oscilação. [40]

O fornecimento de energia elétrica para um sistema elétrico ideal se dá com uma forma de onda de tensão senoidal, com frequência fixa e com amplitude constante. Contudo, dependendo das características da carga, a corrente absorvida pode não ser senoidal, e, por consequência, a tensão recebida nos terminais do consumidor torna-se distorcida. A quantificação do desvio em relação à forma de onda com padrão senoidal é dada por meio do conteúdo harmônico. [17]

Harmônicos são caracterizados como deformações dos sinais de tensão e de corrente elétrica em relação à onda senoidal da frequência fundamental. No Brasil, a frequência de geração de energia elétrica é de 60 Hz. As componentes harmônicas são múltiplas inteiras desta frequência, tendo como componente de segundo harmônico uma onda senoidal de 120 Hz, terceiro harmônico uma onda senoidal de 180 Hz e assim sucessivamente. [33]

O principal objetivo da qualidade de energia é fornecer energia sem distorções harmônicas, pois uma das principais responsabilidades da concessionária é fornecer aos consumidores uma tensão senoidal, com amplitude e frequência constantes. No entanto, fornecer energia a consumidores que causam perturbações no sistema pode comprometer não somente o responsável pelo distúrbio, como também os demais consumidores conectados à mesma rede. [41]

O nível de distorção harmônica presente na tensão ou na corrente pode ser quantificado por meio da ferramenta matemática denominada Série de Fourier. Sabe-se, matematicamente, que qualquer sinal não senoidal periódico pode ser decomposto por meio desta série como o somatório do sinal senoidal em frequência fundamental e de sinais senoidais cujas frequências são múltiplas inteiros da fundamental, com uma eventual componente contínua [42].

3.1 Caracterização e indicadores harmônicos

Para uma melhor compreensão sobre as distorções harmônicas e os seus efeitos no sistema elétrico como um todo, é necessário a utilização de indicadores para a quantificação para que tais fenômenos possam ser mitigados. São apresentados nesta seção os principais indicadores de harmônicos para a realização dessa pesquisa.

3.1.1 Distorção Harmônica Total (DHT)

Para identificar as componentes harmônicas presentes em uma onda não senoidal, geralmente se emprega a série de Fourier, uma ferramenta matemática de grande aplicação na ciência e engenharia, desenvolvida pelo matemático francês Jean-Baptiste Joseph Fourier (1768-1830). [42]

Uma forma de onda não senoidal periódica pode ser expressa conforme a Equação (4):

$$F(t)=\frac{1}{2}a_0+\sum_{n=1}^{\infty}(a_n \cos h\omega_1 t+b_n \operatorname{sen} h\omega_1 t) \tag{4}$$

Onde a_0 é a componente DC, quando existente, dada pela Equação (5). E os coeficientes a_n e b_n são expressos pelas Equações (6) e (7).

$$a_0 = \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi} f(t)\,d(\omega t) \quad h = 1, \dots, \infty \tag{5}$$

$$a_n = \frac{1}{\pi}\int_{0}^{2\pi} f(t)\cos(h\omega t)\,d(\omega t) \quad h = 1, \dots, \infty \tag{6}$$

$$b_n = \frac{1}{\pi}\int_{0}^{2\pi} f(t)\operatorname{sen}(h\omega t)\,d(\omega t) \quad h = 1, \dots, \infty \tag{7}$$

Considerando as grandezas de corrente ou tensão elétrica como funções periódicas, com frequência de 60 Hz, podemos escrevê-las na forma da série de Fourier, sendo expressas como nas Equações (8) e (9). [24]

$$v(t) = V_0 + V_1\, sen(\omega_1 t + \varphi_1) + V_2\, sen(\omega_1 t + \varphi_2) + \cdots \quad (8)$$

$$i(t) = I_0 + I_1\, sen(\omega_1 t + \delta_1) + V_2\, sen(\omega_1 t + \delta_2) + \cdots \quad (9)$$

Onde os termos:

V_0, I_0 são tensão e corrente em corrente contínua;

V_h, I_h são tensão e corrente de pico de ordem h;

ω_1 é a frequência angular da onda fundamental;

φ_h, δ_h são ângulos de fase da tensão e da corrente.

A equação geral para a taxa de distorção harmônica total para um sinal é definida pela Equação (10):

$$DHT = \sqrt{\frac{soma\ dos\ quadrados\ das\ amplitudes\ de\ todas\ as\ harmônicas}{quadrado\ da\ amplitude\ da\ fundamental}} \times 100\% \quad (10)$$

Este indicador demonstra a ação conjunta de todas as frequências harmônicas presentes no sinal de tensão ou corrente, representando uma distorção eficaz resultante.

Desta maneira, é possível avaliar quão distorcida uma onda está com relação a uma onda senoidal. No caso de uma onda puramente senoidal, o DHT é 0%. Para ondas muito distorcidas, o índice pode chegar a 100%. [25]

A distorção harmônica total para tensão é dada pela Equação (11):

$$DHT_V = \frac{\sqrt{\sum_{h\neq 1} V_h{}^2}}{V_1} \times 100\% \quad (11)$$

Onde:

V_1 é o valor *rms* da componente da tensão na frequência fundamental;

h é a ordem harmônica;

V_h é o valor *rms* da componente da tensão na frequência harmônica. [24]

De forma análoga, temos a distorção harmônica total de corrente, na equação (12).

$$DHT_I = \frac{\sqrt{\sum_{h\neq 1} I_h^{\,2}}}{I_1} \times 100\% \tag{12}$$

Onde:

I_1 é o valor *rms* da componente da corrente na frequência fundamental;

h é a ordem harmônica;

I_h é o valor *rms* da componente da corrente na frequência harmônica. [24]

O Valor de DHT_V é em geral menor que 10% e já o valor de DHT_I pode variar de poucos por cento a mais de 100%. [24]

A Tabela 3 apresenta os valores de referência estabelecidos pela ANEEL para a distorção harmônica total de tensão em função da tensão do sistema elétrico.

Tabela 3 - Limites de Distorção harmônica total de Tensão

Tensão Nominal	Distorção harmônica total de tensão (DTT) [%]
Vn ≤ 1 kV	10
1 kV < Vn ≤ 13,8 kV	8
13,8 kV < Vn ≤ 69 kV	6
69 kV < Vn < 230 kV	3

Fonte: ANEEL, Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica nos Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) – Módulo 8, 2018. [33]

3.1.2 Distorção Harmônica Individual (DHI)

A Distorção harmônica individual também é conhecida como fator harmônico e é definida como a porcentagem de harmônica de ordem *h* com relação a fundamental, expressa pela equação (13). [24]

$$DHI = \frac{C_h}{C_1} \times 100\% \tag{13}$$

Onde:

C_1 o valor *rms* da componente da tensão ou corrente na frequência fundamental;

h é a ordem harmônica;

C_h é o valor *rms* da componente da tensão ou corrente na frequência harmônica de ordem h.

Tabela 4 - Limites de Distorção harmônica individual de Tensão

Ordem Harmônica	Vn ≤ 1kV		1 kV < Vn < 13,8 kV	13,8 kV < Vn < 69 kV	69 kV < Vn < 230 kV
Ímpares não múltiplos de 3	5	7,5	6	4,5	2,5
	7	6,5	5	4	2
	11	4,5	3,5	3	1,5
	13	4	3	2,5	1,5
	17	2,5	2	1,5	1
	19	2	1,5	1,5	1
	23	2	1,5	1,5	1
	25	2	1,5	1,5	1
	> 25	1,5	1	1	0,5
Ímpares múltiplos de 3	3	6,5	5	4	2
	9	2	1,5	1,5	1
	15	1	0,5	0,5	0,5
	21	1	0,5	0,5	0,5
	> 21	1	0,5	0,5	0,5
Pares	2	2,5	2	1,5	1
	4	1,5	1	1	0,5
	6	1	0,5	0,5	0,5
	8	1	0,5	0,5	0,5
	10	1	0,5	0,5	0,5
	12	1	0,5	0,5	0,5
	> 12	1	0,5	0,5	0,5

Fonte: ANEEL, Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica nos Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) – Módulo 8, 2018. [33]

Quando nos referimos a componente de terceira harmônica, significa que essa componente é múltipla de três em relação à frequência nominal de sistema elétrico, que é de 60Hz, portanto, essa componente representa a frequência de 180Hz, a componente de quinta harmônica representa a frequência de 300Hz, e assim por diante. [38]

A Figura 6 apresenta as curvas de uma tensão na frequência fundamental V_1, segundo harmônico V_2 e terceiro harmônico V_3, respectivamente.

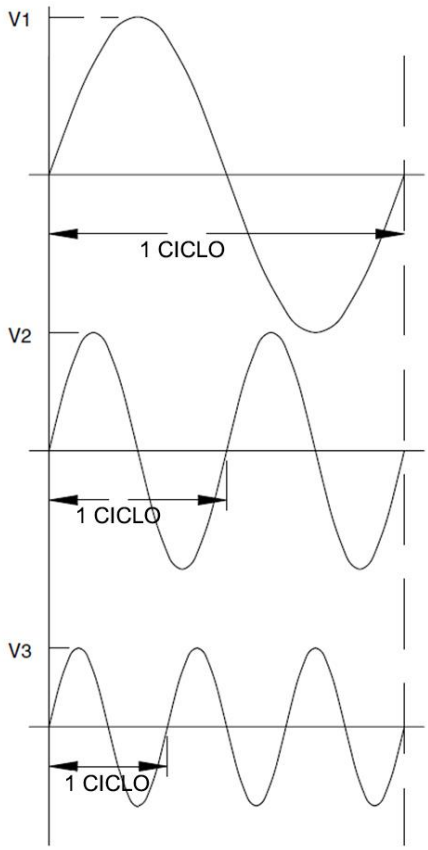

Figura 6 - Fundamental, segunda e terceiro harmônico
Fonte: Sankaran [38]

3.1.3 Distorção Total de Demanda (DTD)

O índice de taxa de distorção de demanda – DTD, do termo inglês *Total Demand Distortion* é semelhante ao apresentado na Equação (12), com a diferença de que a distorção é expressa como um percentual da média dos últimos doze meses da demanda média máxima mensal da corrente fundamental. A média anual da demanda máxima I_L, permite avaliar o nível de distorção de corrente com base na capacidade máxima da instalação, conforme apresentado na equação 14.

$$DTD = \frac{\sqrt{\sum_{h\neq 1} {I_h}^2}}{I_L} \times 100\% \tag{14}$$

Onde:

I_h é o valor *rms* da componente de corrente harmônica h;

h é a ordem harmônica;

I_L é a corrente média anual de demanda máxima

Uma unidade consumidora com níveis baixos de DTD provavelmente não causará níveis inaceitáveis de distorção de tensão. O DTD mede o conteúdo harmônico na forma de onda da corrente, portanto, será sempre menor que o DHT_I. [24]

3.1.4 Fator K

Os transformadores convencionais são projetados para uma potência nominal considerando que vão alimentar cargas lineares, que não produzem harmônicas, baseando-se no aquecimento provocado pelas correntes senoidais de 60 Hz. No entanto, o atual estágio de desenvolvimento tecnológico da sociedade contemporânea é composto por uma grande difusão de produtos com aplicações de eletrônica de potência, que são cargas não lineares. [25]

Para compensar esse problema, os fabricantes estabeleceram o parâmetro "fator K" com objetivo de compensar o calor adicional oriundo das perdas harmônicas através da redução do carregamento. Se o fator da carga for menor ou igual ao fator K do transformador, a operação está em conformidade, do contrário o carregamento máximo deverá ser reduzido.

Existem duas abordagens a serem consideradas em transformadores que alimentam cargas não lineares com alto conteúdo de harmônicos:

- Projetar a capacidade harmônica do transformador prevendo que será para alimentar determinado perfil de cargas não lineares;
- Desclassificar os transformadores convencionais para compensar os efeitos adversos das distorções harmônicas. [24]

De acordo com a IEEE Std. 1100 (2005), o fator K pode ser calculado por:

$$Fator\ K = \sum_{h=1}^{N} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 \times h^2 \tag{15}$$

Onde:

I_h é o valor *rms* da componente de corrente harmônica h;

h é a ordem harmônica;

I_1 é o valor *rms* da componente de corrente na frequência fundamental. [43]

3.1.5 Fator F_{HL}

Alternativamente ao fator K, a IEEE Std. C57.110 (2008) apresenta uma outra metodologia para compensar o suprimento de cargas não lineares através do fator de perdas harmônica F_{HL}, que é dado pela seguinte expressão:

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{N}\left(\frac{I_h}{I}\right)^2 \times h^2}{\sum_{h=1}^{N}\left(\frac{I_h}{I}\right)^2} \tag{16}$$

Onde:

I_h é o valor *rms* da componente de corrente harmônica h;

h é a ordem harmônica;

I_1 é o valor *rms* da componente de corrente na frequência fundamental. [44]

A principal diferença entre o fator K e o F_{HL} é que este último independe dos valores de magnitudes da corrente, uma vez que essa pode ser normalizada tanto pela corrente *rms* verdadeira quanto pela *rms* fundamental.

3.1.6 Factor K

O terceiro fator que também pode ser utilizado para corrigir o problema das perdas adicionais em transformadores, oriundas do carregamento com elevado conteúdo harmônico, é o Factor K, criado na Europa, atuando com objetivo de se evitar o superdimensionamento dos transformadores. [45]

Mantendo o conceito do fator K como referência, é possível compreender a ideia desse fator, como um *de-rating* ou redimensionamento. De acordo com a composição harmônica de uma carga a ser alimentada, por um transformador seja a óleo ou a seco, e, calcula-se um

valor que vai redefinir o quanto um determinado transformador projetado para o regime senoidal puro vai conseguir ser carregado sem sofrer por sobreaquecimento. [45]

Como forma de exemplo, consideremos que precisamos especificar um transformador para alimentar uma carga com o perfil harmônico apresentado na Tabela 5. Como o fator K foi igual a 11,61, deve ser escolhido o próximo nominal acima, que seria o fator K=13. Se a carga fosse alimentada por um transformador com fator K=1, o carregamento máximo deveria ser redimensionado para 78,52% da potência nominal do transformador.

Tabela 5 - Perfil harmônico para dimensionar transformador

Ordem harmônica	Corrente I_n (A)	$(I_n/I1)$	$(I_n/I_1)^2$	(I_n/I)	$(I_n/I)^2$	$n^2(I_n/I)^2$	$n^{q(q=1,7)}$	$n^q(I_n/I_1)^2$
1	1,0000	1,0000	1,0000	0,6761	0,4571	0,4571	1,0000	1,0000
3	0,8200	0,8200	0,6724	0,5544	0,3074	2,7663	6,4730	4,3525
5	0,5800	0,5800	0,3364	0,3921	0,1538	3,8444	15,4258	5,1893
7	0,3800	0,3800	0,1444	0,2569	0,0660	3,2344	27,3317	3,9467
9	0,1800	0,1800	0,0324	0,1217	0,0148	1,1997	41,8998	1,3576
11	0,0450	0,0450	0,0020	0,0304	0,0009	0,1120	58,9342	0,1193
					K =	**11,6138**	Σ	14,97
							Σ(I1/I)2	6,841
							K	1,27
							De-rate	**78,52%**

Fonte: Autoria própria

3.2 Medição de harmônicos

A medição está presente em quase todas as atividades humanas e é fundamental para a compreensão e desenvolvimento da ciência e tecnologia. Para *Lord Kelvin*: *"quando você consegue mensurar o que você está falando, e expressar isso em números, você sabe alguma coisa sobre isso; de outro modo, o tipo de conhecimento que você possui é escasso e insatisfatório"* [46].

Além de diagnosticar as incompatibilidades entre a fonte de energia elétrica e a carga, medição das grandezas elétricas pode ajudar na análise da causa raiz de problemas, avaliar a conformidade com os requisitos legais, prever o comportamento futuro de equipamentos, no planejamento do sistema e na mitigação dos problemas de QEE. [24]

A primeira geração de medidores com monitoramento dedicado à QEE começou em meados da década de 1970. A saída desses medidores foi primeiramente baseada em texto,

indicando uma perturbação pelo tipo de evento e magnitude. A segunda geração incluía saídas gráficas das formas de onda que foram capturadas como parte do evento. Em meados da década de 1980, veio a terceira geração de monitores com taxas de amostragem de mega-hertz para fornecer informações sobre transientes de média e alta frequência. A presente ou quarta geração desacoplou os vários componentes dentro dos sistemas e utiliza padrões-baseados em protocolos de comunicação e técnicas de medição. Isso permite maior flexibilidade e sofisticação reduzindo custos. [28]

A principal norma internacional para a medição de harmônicos é a *IEC 61000-4-30:2015 Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods*, que define os métodos para medição e interpretação de resultados confiáveis, reproduzíveis e comparáveis, tanto para os harmônicos quanto os inter-harmônicos. Esta norma define os medidores de QEE em três classes: [47]

Classe A: Equipamentos destinados a realizar medições para avaliação de conformidade com padrões ou quando há contestações entre concessionárias e unidades consumidoras finais. Os harmônicos devem ser medidos até a 50ª ordem e a incerteza máxima é de ±5%;

Classe S: Equipamentos destinados a realizar diagnósticos para QEE. Os harmônicos devem ser medidos até a 40ª ordem e a incerteza máxima deve ter duas vezes o nível definido na *IEC 61000-4-7 (2002) AMD1:2008* para classe II;

Classe B: Essa classe agrupa os instrumentos que não atendem às classes anteriores que não são requisitos para valores de incertezas, com finalidades de investigações qualitativas ou de baixa importância. [47]

Os requisitos mínimos para medição das distorções harmônicas são:

- Taxa amostral: 16 amostras/ciclo;
- Conversor A/D de sinal de tensão: 12 bits;
- Precisão máxima: 1% da leitura;
- Ordem harmônica: da ordem fundamental até a 25ª. [24] [33]

Nas medições de sinais elétricos, os protocolos de medição devem ser considerados para tratamento dos valores e realização dos cálculos dos indicadores de QEE, a saber:

- Taxa de amostragem do sinal medido;
- Resolução do conversor analógico-digital;
- Janela de integração ou intervalo de tempo de medições; e

- Expressão de cálculo – agregação das amostras. [24]

3.3 Regulamentos e padronização de harmônicos

Apresentam-se nesta seção os principais documentos normativos que dizem respeito à geração e propagação de correntes harmônicas que são aplicáveis ao sistema elétrico.

3.3.1 IEEE Std. 519-2014

A norma IEEE *Std*. 519-2014 – *Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems* – define os procedimentos para controle dos conteúdos harmônicos em sistema de potência. O local de conexão entre as fontes e cargas é descrito como Ponto de Acoplamento Comum - PAC, ponto mais próximo do consumidor, no lado da concessionária. Os requisitos são estabelecidos a fim de analisar a qualidade da energia fornecida neste ponto. [48]

Os limites das distorções harmônicas de corrente dependem do nível de tensão e da corrente de curto-circuito em percentual da máxima corrente fundamental da carga que é apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 - Distorção de corrente harmônica para tensão de 120V a 69kV

I_{CC}/I_C	n<11	11≤n<17	17<=n<23	23≤n<35	n≤35
<20	4,0%	2,0%	1,5%	0,k	0,3%
20-50	7,0%	3,5%	2,5%	1,0%	0,5%
50-100	10,0%	4,5%	4,0%	1,5%	0,7%
100-1000	12,0%	5,5%	5,0%	2,0%	1,0%
>1000	15,0%	7,0%	6,0%	2,5%	1,4%

Fonte: IEEE *Std*. 519-2014. [48]

Onde:

I_{CC}= máxima corrente de curto-circuito / I_C= máxima demanda de corrente de carga

A Tabela 7 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**apresenta os limites de correntes para sistemas de distribuição entre > 69 kV até 161 kV.

Tabela 7 - Distorção de corrente harmônica para tensão de > 69 kV a 161 kV

I_{CC}/I_C	n<11	11<=n<17	17<=n<23	23<=n<35	n<=35
<20	2,0%	1,0%	0,75%	0,3%	0,15%
20-50	3,5%	1,75%	1,25%	0,5%	0,25%
50-100	5,0%	2,25%	2,0%	0,75%	0,35%
100-1000	6,0%	3,75%	2,5%	1,0%	0,5%
>1000	7,5%	3,5%	3,0%	1,25%	0,7%

Fonte: IEEE *Std*. 519-2014. [48]

A Tabela 8 apresenta limites de correntes para sistemas de distribuição maiores que 161 kV.

Tabela 8 - Distorção de corrente harmônica para tensão > 161 kV

I_{CC}/I_C	n<11	11≤n<17	17≤n<23	23≤n<35	n≤35
<50	2,0%	1,0%	0,75%	0,3%	0,15%
>50	3,0%	1,5%	1,15%	0,45%	0,22%

Fonte: IEEE *Std*. 519-2014. [48]

3.3.2 Normas IEC 61000

Os documentos normativos da IEC que abordam as questões relativas às distorções harmônicas são:

- IEC 61000-2 (2002) – limites de tensões harmônicas individuais e totais para baixa tensão (BT ≤ 1kV);
- IEC 61000-3-2 (2018) - limites para emissão de harmônicos de correntes harmônicas produzidas por equipamentos com consumo de até 16A por fase conectados em sistemas BT;

- IEC 61000-3-4 (2001a) - limites para emissão de harmônicos de correntes harmônicas produzidas por equipamentos com consumo superior a 16A por fase conectados em sistemas BT;
- IEC 61000-3-6 (2008) - limites de emissão de harmônicos de corrente por cargas não lineares conectadas aos sistemas de média (1kV < MT ≤ 35kV) e alta tensão (35kV < AT ≤ 230kV). Estabelece valores indicativos, expressos como valores percentuais da tensão nominal, em termos de planejamento do sistema, para se avaliar o impacto de todos os consumidores no sistema supridor;
- IEC 61000-4-7 (2002) – orientações para aplicação de instrumentos de medição de frequências até 2.500 Hz, servindo como guia geral dos requisitos básicos da instrumentação. [17] [49]

A norma IEC 61000-2-2 estabelece os requisitos de distorções harmônicas para sistemas de distribuição em baixa tensão com tensão nominal até 420V monofásico ou 690V trifásico com frequência nominal de 50 ou 60Hz. Considera distúrbios da frequência fundamental até a 50ª ordem. A Tabela 9 apresenta os níveis de harmônicos individuais em redes de baixa tensão. [50]

Tabela 9 - Níveis de compatibilidade para tensões harmônicas individuais em baixa tensão

Ordem Ímpar	Tensão Harmônica	Ordem ímpar Múltiplo de 3	Tensão Harmônica (%)	Ordem Par	Tensão Harmônica (%)
5	6,0	3	5,0	2	2,0
7	5,0	9	1,5	4	1,0
11	3,5	15	0,3	6	0,5
13	3,0	21	0,2	8	0,5
17	2,0	>21	0,2	10	0,2
19	1,5	-	-	>12	0,2
23	1,5	-	-	-	-
25	1,5	-	-	-	-
>25	0,2+1,3*25/h	-	-	-	-
DHT_V (até o 40° harmônico) < 8%					

Fonte: IEC 61000-2-2 (2002). [50]

3.3.3 Resolução ANEEL 956/2021

O anexo VIII da Resolução normativa apresenta os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST para os requisitos de Qualidade do fornecimento de energia elétrica, onde estabelece os valores de referência para as distorções harmônicas totais de tensão que são indicados na Tabela 10**Erro! Fonte de referência não encontrada.**. [33]

Tabela 10 - Valores de Referência das distorções harmônicas totais de tensão

Tensão nominal do Barramento	Distorção Harmônica Total de Tensão (%)
$V_N \leq 1$ kV	10,0
1 kV < $V_N \leq 13{,}8$ kV	8,0
13,8 kV < $V_N \leq 69$ kV	6,0
69 kV < $V_N < 230$ kV	3,0

Fonte: PRODIST. [33]

Para harmônicas individuais de tensão, os valores são indicados na Tabela 11.

Tabela 11 - Valores de Referência das distorções harmônicas individuais de tensão

Ordem Harmônica		Distorção Harmônica Individual de Tensão (%)			
		Vn≤1kV	1 kV < Vn ≤ 13,8 kV	13,8 kV < Vn ≤ 69 kV	69 kV < Vn < 230 kV
Ímpares não múltiplas de 3	5	7,5	6	4,5	2,5
	7	6,5	5	4	2
	11	4,5	3,5	3	1,5
	13	4	3	2,5	1,5
	17	2,5	2	1,5	1
	19	2	1,5	1,5	1
	23	2	1,5	1,5	1
	25	2	1,5	1,5	1
	>25	1,5	1	1	0,5
Ímpares múltiplas de 3	3	6,5	5	4	2
	9	2	1,5	1,5	1
	15	1	0,5	0,5	0,5

Ordem Harmônica		Distorção Harmônica Individual de Tensão (%)			
		Vn≤1kV	1 kV < Vn ≤ 13,8 kV	13,8 kV < Vn ≤ 69 kV	69 kV < Vn < 230 kV
	21	1	0,5	0,5	0,5
	>21	1	0,5	0,5	0,5
Pares	2	2,5	2	1,5	1
	4	1,5	1	1	0,5
	6	1	0,5	0,5	0,5
	8	1	0,5	0,5	0,5
	10	1	0,5	0,5	0,5
	12	1	0,5	0,5	0,5
	>12	1	0,5	0,5	0,5

Fonte: PRODIST. [33]

3.4 Equipamentos geradores de harmônicos

No passado, os problemas de distorções harmônicas recebiam baixa importância, pois tinham magnitudes insignificantes, uma vez que havia poucos equipamentos com características não lineares no sistema elétrico. As harmônicas eram diretamente associadas ao projeto e funcionamento dos transformadores e máquinas elétricas, embora só causem impactos significativos quando funcionam fora das suas condições normais de operação. [44]

O sistema elétrico atual está dominado por vários equipamentos com características não lineares que podem ser divididos em três categorias, a saber:

- Dispositivos eletrônicos de potência (conversores estáticos);
- Dispositivos ferromagnéticos (transformadores e motores);
- Dispositivos a arco (iluminação a descarga e fornos elétricos a arco). [24]

3.4.1 Conversores estáticos

Os avanços na tecnologia de dispositivos semicondutores alimentaram uma revolução na eletrônica de potência na última década e há todas as indicações de que essa tendência continuará. Tais equipamentos incluem: acionamentos de motor de velocidade variável, fontes

de alimentação eletrônicas, carregadores de bateria, reatores eletrônicos, retificadores e inversores. Uma grande preocupação em edifícios comerciais e residenciais é que as fontes de alimentação para equipamentos eletrônicos monofásicos são as geradoras mais expressivas de corrente harmônica. [36]

Os conversores estáticos podem ser resumidos em 3 grandes grupos:

- Conversores de alta potência, na faixa de MW, geralmente usados em linhas de transmissão corrente contínua - c.c. e na indústria de redução de metais;
- Conversores de média potência, usados para o controle de motores em indústrias e tração ferroviária;
- Conversores de baixa potência (retificadores), que alimentam cargas monofásicas, como aparelhos de televisão e carregadores de bateria. [51]

As Figuras 7 e 8 apresentam as características de conteúdo harmônico de uma fonte chaveada monofásica, onde se pode verificar um alto teor da 3ª ordem.

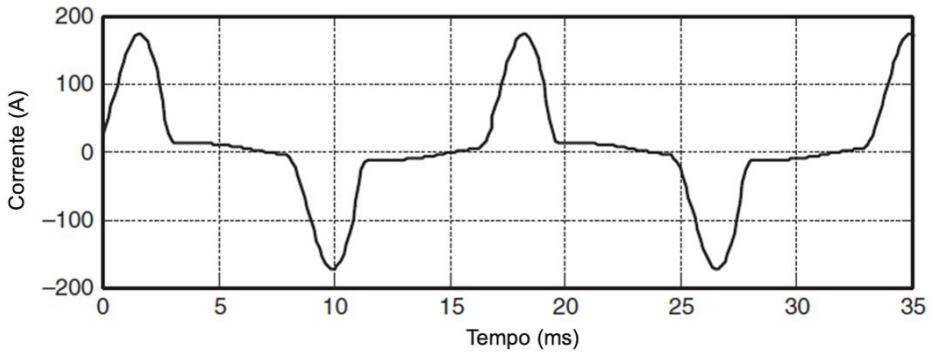

Figura 7 - Formas de onda de corrente de uma fonte chaveada

Fonte: Dugan et al. [36].

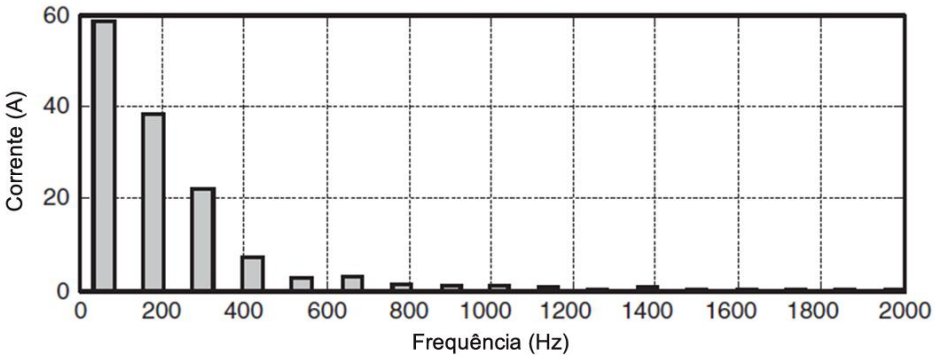

Figura 8 - Espectros de conteúdo harmônico de uma fonte chaveada

Fonte: Dugan et al. [36].

3.4.2 Transformadores

Os transformadores são geradores de harmônicos devido às características magnetizantes não lineares do aço. São projetados para operar normalmente logo abaixo do "joelho" da característica de saturação magnetizante, conforme apresentado na Figura 9. Quando operam acima da tensão nominal, o núcleo de ferro fica saturado e passa a exigir uma corrente de magnetização bem acima dos valores nominais, gerando distorções harmônicas.

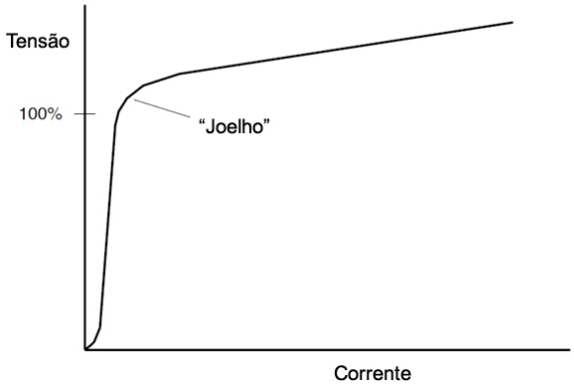

Figura 9 - Curva de excitação de transformador

Fonte: Dugan et al. [36].

Em razão da simetria do ciclo de histerese, a forma de onda da corrente de magnetização é alternada, com distorção de ordem impar e sem a componente c.c.. A Tabela 12 apresenta o conteúdo harmônico da corrente de magnetização de um transformador monofásico de baixa tensão. [24]

Tabela 12 - Conteúdo harmônico da corrente de magnetização

h	**1**	**3**	**5**	**7**	**9**	**11**	**13**
$\lvert i_h \rvert$ p.u.	1,0000	0,5176	0,1106	0,0303	0,0201	0,0080	0,0060
i_h º	-118,5	9,9	100,3	46,6	147,2	105,6	172,1

Fonte: Ruth et al. [24].

Embora a corrente de excitação do transformador seja rica em harmônicos no valor nominal de tensão, é tipicamente menor que 1% de corrente da carga total. Os

transformadores não são tão preocupantes quanto os conversores de potência eletrônicos e dispositivos de arco. [36]

3.4.3 Máquinas rotativas

As máquinas rotativas geram harmônicas de natureza espacial ou temporal. As harmônicas temporais podem vir de conversores de potência ou inversores de frequência, que são conectados entre a rede elétrica e a máquina para variar os níveis de tensão e frequência respectivamente, ou ainda dispositivos eletrônicos que ajudam na partida dos motores, tais como o *soft-starter*, bastante utilizados em motores de indução de gaiola, geram harmônicas de baixas ordens na tensão e na corrente. Essas harmônicas, além de poluir a rede elétrica, também geram perdas adicionais aos motores. [52]

As fontes de harmônicas de natureza espacial são as geradas internamente no motor, podem ser originadas nos enrolamentos, nas ranhuras, no entreferro, etc. Nessa abordagem, considera-se que a máquina é excitada por tensões senoidais, e que a força magnetomotriz - FMM gerada pelas correntes que circulam nas bobinas tem uma variação no tempo perfeitamente senoidal. Contudo, a variação no espaço interior da máquina não é senoidal, mas sim retangular. Portanto, a FMM resultante é uma função não senoidal do ângulo do espaço. É a amplitude dessa onda retangular que varia senoidalmente no tempo. As harmônicas espaciais são resultadas das distribuições não senoidais das bobinas na máquina e nas ranhuras. Isso tem efeitos nas características de torque-velocidade da máquina também. [53]

3.4.4 Dispositivos a arco

Nesta categoria podemos incluir fornos elétricos a arco, equipamentos de solda a arco e os tipos de iluminação a descarga (fluorescente, vapor de sódio, vapor metálico e vapor de mercúrio) com reator magnético. Como mostrado na Figura 10, o arco é basicamente uma fonte de tensão em série com uma reatância que limita a corrente a um valor razoável e seguro. [36]

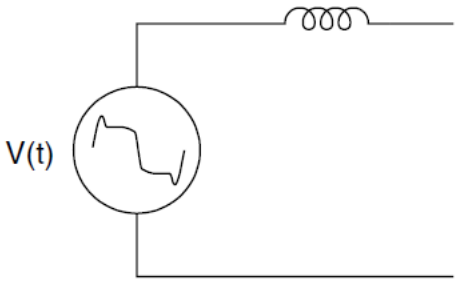

Figura 10 - Circuito equivalente de um dispositivo a arco
Fonte: Dugan et al. **[36]**.

As características tensão-corrente dos arcos elétricos não são lineares. Após a ignição do arco, a tensão diminui à medida que a corrente do arco aumenta, limitada apenas pela impedância do sistema de energia. Este dá ao arco a aparência de ter uma resistência negativa para uma porção de seu ciclo de funcionamento tal como em aplicações da iluminação fluorescente. Em aplicações de forno de arco elétrico, a impedância limitante é principalmente o cabo e as ligações da fornalha com alguma contribuição do sistema de energia e transformador de forno. Correntes superiores a 60.000 A são comuns. [36]

O conteúdo harmônico de uma carga de forno de arco e outros dispositivos de arco são semelhantes ao do lastro magnético mostrado nas Figuras 11 e 12.

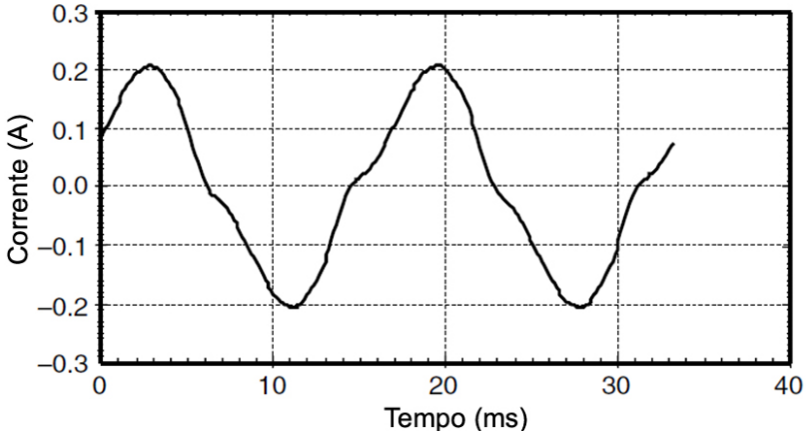

Figura 11 - Forma de onda da corrente de um dispositivo a arco
Fonte: Dugan et al. **[36]**.

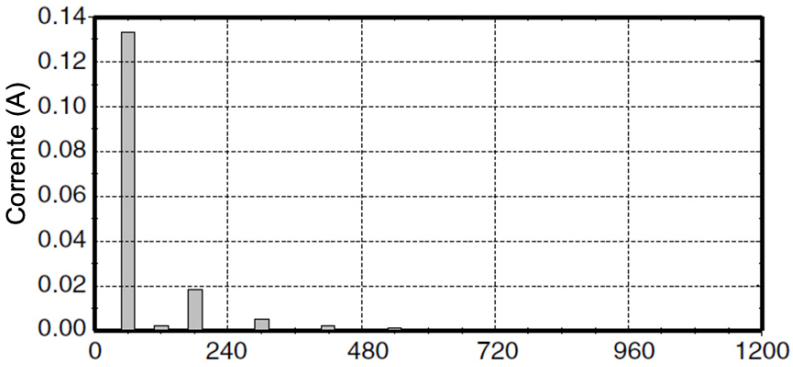

Figura 12 - Espectros de conteúdo harmônico de um dispositivo a arco
Fonte: Dugan et al. **[36].**

A fornalha de arco gera cintilação de tensão no ponto comum de acoplamento com a rede. Para a fabricação de aço, são utilizados geralmente fornos de arco de potência a partir de 100 MW. Um ciclo de fusão pode ser dividido em três etapas distintas durante o período de perfuração, fusão período e período de reaquecimento. [54]

A tensão total é aplicada durante o período de fusão, e o tempo necessário para a fusão é bastante grande em comparação com outras etapas. Devido ao comprimento de arco desigual, a tensão na barra flutua continuamente durante o ciclo de derretimento. Para grandes fornos de arco, controladores de tensão reativa são necessários para manter a tensão dentro dos limites especificados. [54]

3.5 Efeitos da distorção harmônica

As distorções harmônicas têm muitos efeitos nocivos que tornam este fenômeno tão insidioso, é que seus efeitos muitas vezes não são conhecidos até a falha ocorrer. Portanto, o entendimento sobre como os distúrbios são gerados e interagem dentro de um sistema de energia e como eles afetam os componentes é importante para prevenir falhas. Mesmo que não ocorram falhas, a má qualidade de energia e os harmônicos aumentam as perdas e diminuem a vida útil dos componentes do sistema de energia e dispositivos de uso final. [25]

Os efeitos adversos da presença dos harmônicos nas redes elétricas de distribuição podem afetar a operação de equipamentos e componentes dos sistemas de potência dos quais citamos:

- Redução do fator de potência;
- Aumento da corrente do neutro, podendo exceder o valor das correntes de fase;

- Sobreaquecimento de transformadores e motores;
- Atuação indesejada dos dispositivos de proteção;
- Avaria em banco de capacitores, que são sensíveis à presença de harmônicos;
- Aumento das tensões neutro-terra;
- Aumento da temperatura nos condutores, devido ao aumento da corrente eficaz e das perdas por Joule;
- Estresse no isolamento, devido à ação de correntes harmônicas;
- Mudança no fator de crista;
- Aumento de vibração;
- Aumento do ruído audível;
- Capacidade de ruptura de disjuntores;
- Influência nas reatâncias indutivas e capacitivas;
- Interferência na atuação de relés de proteção, cuja operação é baseada em tensão/corrente de pico ou tensão zero;
- Alteração nas respostas dos dispositivos de medição a sinais não lineares;
- Queima de fusíveis sem sobrecarga aparente;
- Queima de motores de indução;
- Interferência nos sistemas de telefonia e comunicação;
- Aumento da energia não ativa circulante, exigindo sobredimensionamento de condutores e transformadores;
- Aumento das perdas nos transformadores por operarem fora das condições nominais;
- Ressonâncias dos componentes indutivos da rede elétrica com capacitores. [24] [55] [23]

Como a presente pesquisa se dá na rede de distribuição, iremos abordar os efeitos das distorções harmônicas nos cabos de energia e transformadores.

3.5.1 Cabos de energia

O fluxo da corrente não senoidal em um condutor causará um aquecimento adicional do que seria esperado para o valor *rms* da corrente sem conteúdo harmônico. Isto ocorre

devido a dois fenômenos conhecidos como efeito *skin* e efeito de proximidade, ambos variam em função da freqüência, assim como do tamanho e do afastamento do condutor.

O efeito *skin* ou efeito pelicular acontece porque a indutância das sessões retas do condutor não é uniforme. Como o centro do condutor é enlaçado por mais linhas de fluxo que a superfície, sua indutância nesse ponto é maior, fazendo com que a corrente circule com menor densidade no centro do condutor, que acaba aumentando a resistência do condutor.

O efeito proximidade acontece devido à interação do campo eletromagnético entre dois ou mais condutores próximos entre si, de tal maneira que distorce a distribuição de correntes dos mesmos, aumentando o valor da resistência c.a. dos condutores. A magnitude do aumento depende das características físicas dos condutores, da quantidade de condutores e das frequências das correntes. [56]

3.5.2 Transformadores

Os transformadores são projetados para fornecer a energia necessária para as cargas conectadas com perdas mínimas na frequência fundamental. Porém, a distorção harmônica da corrente, em particular, bem como da tensão contribuirá significativamente para o aquecimento adicional. De regra geral, um transformador em que a distorção de corrente excede 5 por cento é um candidato para *derating* para harmônicos. [44]

Existem três efeitos que resultam no aumento do aquecimento do transformador quando a corrente de carga inclui componentes harmônicos:

- Corrente *rms*: Se o transformador for dimensionado apenas para os requisitos de kVA da carga, correntes harmônicas podem resultar no transformador em correntes *rms* maiores que sua capacidade. O aumento total *rms* resulta em aumento das perdas do condutor;
- Perdas por correntes parasitas: Estas são correntes induzidas em um transformador causadas pelos fluxos magnéticos. Estas correntes induzidas fluem nos enrolamentos, no núcleo, e em outros corpos condutores sujeitados ao campo magnético do transformador e causam aquecimento adicional. Este componente das perdas do transformador aumenta com o quadrado da frequência da corrente causando as correntes de Foucault. Portanto, isso se

torna um componente relevante das perdas do transformador para aquecimento harmônico;

- Perdas no núcleo: na presença de harmônicos, o aumento das perdas no núcleo será dependente do efeito dos harmônicos sobre a tensão e do projeto do núcleo do transformador. Aumentando a distorção de tensão, aumentam as correntes parasitas nas laminações do núcleo. O impacto que isso terá depende da espessura das laminações do núcleo e da qualidade do aço do núcleo. O aumento nessas perdas devido a harmônicos geralmente não é tão crítico quanto o dois anteriores. [36]

As harmônicas também causam a redução da expectativa de vida útil dos equipamentos em função do aumento da tensão, que causa uma maior deterioração do isolamento e do incremento de corrente, que causa aumento do sobreaquecimento, como ocorre em motores e transformadores. [57] [58]

O aumento da circulação de correntes harmônicas no sistema elétrico acarreta maiores perdas por efeito joule nas linhas de transmissão, na rede distribuição e nos transformadores de potência que, por sua vez, afeta o fluxo, as potências ativas e não ativas. Apesar disso, essas perdas de origem harmônicas não são contabilizadas pelas empresas distribuidoras de energia. [59] [60]

Capítulo 4 - Teorias de Potência elétrica

As definições básicas de teorias de potência elétrica apresentadas em livros de circuitos elétricos são amplamente aceitas quando tratamos de sinais puramente senoidais, visto que durante décadas, as cargas supridas pelos sistemas elétricos eram de fato compostas em sua grande maioria por cargas lineares. [61] [62]

No entanto, o desenvolvimento e disseminação das aplicações da eletrônica de potência aos sistemas de energia elétrica proporcionaram considerável acréscimo das distorções harmônicas de tensão e corrente. Segundo *Firlit*, o estudo da teoria de potência elétrica na presença de distorções harmônicas está em desenvolvimento para uma compreensão mais adequada de como funciona a transferência de energia em um circuito elétrico. [63]

Neste sentido, apresentaremos neste capítulo algumas das principais definições de teorias de potência elétrica desenvolvidas por cientistas e engenheiros eletricistas com objetivo de contribuir com a quantificação da potência reativa na presença das distorções harmônicas.

4.1 Teoria clássica de potências em regime senoidal

No domínio do tempo, a potência instantânea $p(t)$ aplicada a uma carga varia de acordo com os sinais de tensão $v(t)$e corrente $i(t)$, conforme as equações 17, 18, 19 e 20.

$$v(t) = V_m\cos(\omega t + \alpha) \tag{17}$$

$$i(t) = I_m\cos(\omega t + \alpha \pm \varphi) \tag{18}$$

$$p(t) = v(t)i(t) = V_m I_m\cos(\omega t + \alpha)\cos(\omega t + \alpha \pm \varphi) \tag{19}$$

$$p(t) = VI\cos\varphi + VI\cos\varphi\cos(2\omega t + 2\alpha) \pm VI sen\,\varphi\, sen(2\omega t + 2\alpha) \tag{20}$$

Onde:

V_m e I_m são os valores de pico, de tensão e corrente respectivamente;

V e I são os valores eficazes ou *rms*;

α é um ângulo de fase arbitrário medido sempre em relação à origem;

φ representa a diferença angular entre os sinais de tensão e corrente.

O valor médio do sinal de potência $p(t)$ sobre um período T é dado por:

$$p(t)(médio) = \int_{\frac{-T}{2}}^{\frac{T}{2}} p(t)\, dt = VIcos\ \varphi = P \tag{21}$$

Onde:

O valor de T é definido como sendo o período dos sinais de tensão e corrente.

A potência ativa média é definida como a componente escalar dentro da expressão da potência média instantânea, $VIcos\ \varphi$, o primeiro termo da equação (20).

O segundo termo da equação (20), $VIcos\ \varphi \cos(2\omega t + 2\alpha)$, de acordo com a IEEE 1459-2010, esse termo, chamado de potência intrínseca, é considerado como um componente oscilatório, presente no fluxo de energia, mas que não acarreta em perdas. [64] [65]

O terceiro termo da equação (20), $VIsen\ \varphi$, define a potência reativa, que é considerada a amplitude desse termo, cujo valor médio é zero. Essa teoria foi aceita à época pelo fato de não existir eletrônica de potência e os componentes predominantes serem capacitores e indutores, que são dispositivos de armazenamento de energia. [64]

Outro conceito importante é a potência aparente, que consiste na capacidade máxima de potência que seu sistema consegue transmitir. A transmissão da potência ativa é reduzida em razão da presença da potência reativa. A potência aparente é definida como o produto dos valores eficazes da tensão pela corrente, conforme a equação 19. [64]

$$S = VI \tag{22}$$

Ao analisarmos a equação (20), podemos perceber que os termos P e Q são resultados de dois fenômenos distintos. O primeiro, potência ativa P, resulta da tensão em fase com a corrente em fase. O segundo, potência reativa Q, resulta da tensão em quadratura com a corrente. [64]

Decompondo-se a corrente em dois componentes, um em fase e outro em quadratura, tem-se:

$$If = I \cos \varphi \tag{23}$$

$$Iq = I \operatorname{sen} \varphi \tag{24}$$

Da teoria de números complexos, podemos definir:

$$\mathrm{I} = If + jIq = \sqrt{If^2 + Iq^2} \tag{25}$$

Consequentemente, P, Q e S podem ser reescritos como:

$$P = VIf \tag{26}$$

$$Q = jVIq \tag{27}$$

A potência aparente complexa $\boldsymbol{S}$ é definida como:

$$\boldsymbol{S} = VIcos\ \varphi + jVIsen\ \varphi = P + jQ \tag{28}$$

$$|\boldsymbol{S}| = \sqrt{P^2 + Q^2} \tag{29}$$

Onde:
I_f e I_q representam as correntes em fase e em quadratura, respectivamente;

j representa a unidade complexa imaginária. [64]

Por fim, ainda há o conceito do fator de potência, fp, que é definido na equação (30):

$$fp = \frac{P}{S} \tag{30}$$

A norma IEEE 1459-2010 define o fator de potência como o grau de carregamento de uma linha e que pode ser interpretado como a razão entre a energia transmitida para a carga e a energia máxima que poderia ser transmitida desde que as perdas na linha sejam mantidas constantes. [64]

Das equações (22), (23) e (25), concluímos que o fator de potência também pode ser escrito conforme equação (31):

$$fp = \cos\varphi \tag{31}$$

Sendo assim, a potência aparente complexa corresponde a uma parcela real (potência ativa) e uma parcela imaginária (potência reativa), como mostra o triângulo das Potências na Figura 13.

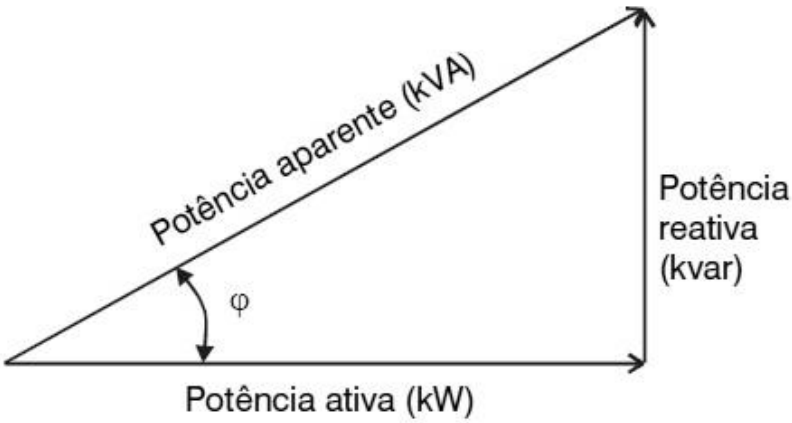

Figura 13 - Triângulo das potências
Fonte: *Akagi*. [64]

4.2 Proposição de Budeanu

Em 1927, *Constantin Budeanu*, engenheiro eletricista romeno, propôs a primeira teoria sobre potência na presença de distorções harmônicas e desequilíbrios, sendo pioneiro na utilização das Séries de Fourier para descrever as propriedades dos circuitos elétricos tratando as formas de onda como um somatório de componentes com diferentes frequências. [66]

Budeanu postulou que a potência aparente em condições não senoidais é composta de três componentes ortogonais, no domínio da frequência, podendo, assim, utilizar este método apenas em condições de regime permanente. Nas equações (32) e (33) são apresentadas as expressões para os cálculos da potência ativa e reativa, respectivamente:

$$P = \sum_{n=1}^{\infty} P_n = \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \cos \emptyset n \tag{32}$$

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} Q_n = \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \operatorname{sen} \emptyset n \tag{33}$$

Onde:

P_n é o valor rms da potência ativa de ordem n;

Q_n é o valor rms da potência reativa de ordem n;

V_n é o valor rms da tensão de ordem n;

I_n é o valor rms da corrente de ordem n;

$\emptyset n$ é a defasagem angular entre a tensão e corrente;

n representa a ordem harmônica.

Analisando as expressões apresentadas nas equações (32) e (33), constata-se que as definições da potência ativa e reativa foram quantificadas por meio de um somatório de contribuições individuais. Porém, em uma análise mais detalhada, identificam-se os cruzamentos de tensão e corrente em diferentes frequências, fato esse que implica que este cálculo desconsidera contribuições positivas ou até negativas no cálculo final. [67]

Budeanu propôs o Tetraedro de Potência, como forma de compensar as parcelas não consideradas nos cálculos das equações (32) e (33), o qual foi denominado potência de distorção. Esta nova definição de relação de potências comprovou ser mais adequada para a análise de potência em condições não senoidais. [66]

A potência de distorção D, proposta por *Budeanu*, consiste no produto cruzado entre tensões e correntes harmônicas de diferentes frequências e foi definida como:

$$D^2 = S^2 - P^2 - Q^2 \tag{34}$$

Onde:

S é o valor rms da potência aparente;

P é o valor rms da potência ativa;

Q é o valor rms da potência reativa;

A potência aparente pode ser expressa conforme a equação (35):

$$S^2 = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \tag{35}$$

A partir da potência de distorção D, as potências podem ser representadas graficamente em três dimensões, representação gráfica conhecida como o tetraedro de potência, conforme apresentado na Figura 14.

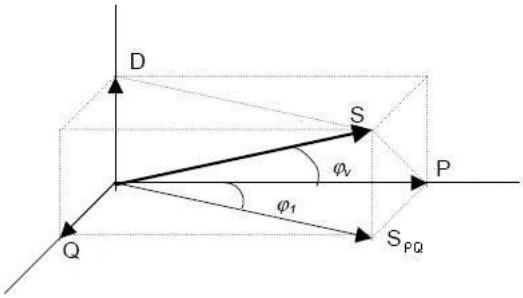

Figura 14 - Tetraedro de Budeanu
Fonte: *Budeanu.* [66]

Apesar do avanço, a proposição de *Budeanu* leva consigo alguns questionamentos:

- Impossibilidade de separar os efeitos entre cargas não lineares e reatâncias;
- Impossibilidade de se obter parâmetros para compensação ativa ou passiva;
- a potência reativa não pode ser compensada de forma independente da potência de distorção. [68]

4.3 Proposição da norma IEEE 1459:2010

O "*IEEE Working Group on Nonsinusoidal Situations: Effects on Meter Performance and Definition of Power*" propôs novas definições de potência na norma IEEE 1459:2010. A principal diferença dessa proposta é a separação das grandezas em fundamental e fora da fundamental. [65]

Para condições de regime permanente, com tensão ou corrente instantâneas periódicas não-sinusoidais, surgem dois componentes distintos: os componentes de frequência fundamental do sistema de potência v_1 e i_1 e os componentes de frequência fora da frequência fundamental v_H e i_H, conforme equações (36), (37), (38), (39), (40) e (41).

$$v = v_1 + v_H \tag{36}$$

$$i = i_1 + i_H \tag{37}$$

onde

$$v_1 = \sqrt{2V_1}\,sen(\omega t - \alpha_1) \tag{38}$$

$$i_1 = \sqrt{2I_1}\,sen(\omega t - \beta_1) \tag{39}$$

$$v_H = V_0 + \sqrt{2}\sum_{h\neq 1} V_H\, sen(h\omega t - \alpha_h) \tag{40}$$

$$i_H = I_0 + \sqrt{2}\sum_{h\neq 1} I_H\, sen(h\omega t - \beta_h) \tag{41}$$

Em valores *rms*, equações (42) e (43).

$$V^2 = V_1^2 + V_H^2 \tag{42}$$

$$I^2 = I_1^2 + I_H^2 \tag{43}$$

Onde:

V_1 é o valor rms da tensão na frequência fundamental;

V_H é o valor rms da tensão fora da frequência fundamental;

I_1 o valor rms da corrente na frequência fundamental;

I_H é o valor rms da corrente fora da frequência fundamental.

A distorção total de uma onda não senoidal pode ser estimada com a distorção harmônica total. As equações (44) e (45) expressam a distorção harmônica total da tensão e a distorção harmônica total da corrente, respectivamente. [65]

$$DHT_V = \frac{V_H}{V_1} = \sqrt{\left(\frac{V}{V_1}\right)^2 - 1} \tag{44}$$

$$DHT_I = \frac{I_H}{I_1} = \sqrt{\left(\frac{I}{I_1}\right)^2 - 1} \tag{45}$$

A potência ativa é expressa como a soma de contribuições fundamentais (potência ativa fundamental) e harmônicas (potência ativa harmônica), conforme equação (46).

$$P = P_1 + P_H \tag{46}$$

As contribuições fundamentais são geradas somente pela frequência fundamental, conforme expressas nas equações (47) e (48), e as contribuições harmônicas são todas as contribuições de componentes de frequências ordens superiores a fundamental, equação (49). [65]

$$P_1 = V_1 I_1 \cos\theta_1 \tag{47}$$

$$Q_1 = V_1 I_1 \operatorname{sen}\theta_1 \tag{48}$$

$$P_H = V_0 I_0 + \sum_{h \neq 1}^{\infty} V_h I_h \cos\theta_h \tag{49}$$

A potência aparente também pode ser expressa como a soma de contribuições fundamentais e harmônicas, conforme equação (50).

$$S^2 = (VI)^2 = \left({V_1}^2 + {V_H}^2\right)\left({I_1}^2 + {I_H}^2\right) \tag{50}$$

Desenvolvendo a equação (50), obtém-se a equação (51).

$$S^2 = (V_1 I_1)^2 + (V_1 I_H)^2 + (V_H I_1)^2 + (V_H I_H)^2 \tag{51}$$

Nas equações (50) e (51), a potência aparente é expressa em função da corrente e tensão harmônicas com frequência diferente da fundamental possuindo o índice "*H*" e com índice "1" a tensão e corrente eficazes na frequência fundamental.

A potência aparente fundamental, associada à corrente e tensão fundamentais, é apresentada na equação (52), a potência aparente poderá ser expressa como soma das contribuições fundamental e não fundamental, conforme equação (53).

$$S_1 = V_1 I_1 = \sqrt{\left({P_1}^2 + {Q_1}^2\right)} \tag{52}$$

$$S = \sqrt{{S_1}^2 + {S_N}^2} \tag{53}$$

A contribuição não fundamental da potência aparente é expressa pela equação (54), surgindo, assim, contribuições de potência de distorção de corrente, potência de distorção de tensão e potência aparente harmônica, as quais não eram consideradas anteriormente.

A potência aparente harmônica está associada à corrente e tensão harmônicas, sendo expressa na equação (55). As potências de distorção de corrente e tensão ocorrem devido à contribuição da DHT_I e DHT_V, resultado das interações entre tensão fundamental com

correntes harmônicas, e corrente fundamental com tensões harmônicas, as quais se apresentam conforme as equações (56) e (57) respectivamente.

$$S_N = \sqrt{{D_I}^2 + {D_V}^2 + {S_H}^2} \tag{54}$$

$$S_H = V_H I_H = S_1 DHT_I DHT_V \tag{55}$$

$$D_I = V_1 I_H = S_1 DHT_I \tag{56}$$

$$D_V = V_H I_1 = S_1 DHT_V \tag{57}$$

A potência aparente harmônica é composta pela potência ativa harmônica mais a parcela de potência de distorção harmônica conforme equação (58).

$$S_H = \sqrt{{P_H}^2 + {D_H}^2} \tag{58}$$

Considerando todas as contribuições para a potência aparente apresentadas, o fluxograma da potência aparente conforme definições da norma *IEEE* 1459:2010 é mostrado na Figura 15. [65]

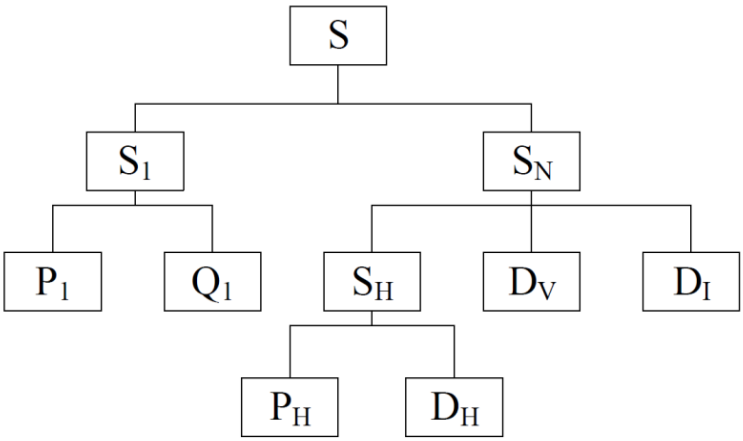

Figura 15 - Potência aparente IEEE 1459
Fonte: Autoria própria

O fator de potência equivalente apresentará redução, devido à contribuição das tensões e correntes harmônicas do sistema, referente a potências que não realizam trabalho, sendo considerado o fator de potência fundamental referente à frequência fundamental do sistema, expresso na equação (59). O fator de potência considerando as frequências harmônicas é apresentado na equação (60).

$$FP_1 = cos\theta_1 \frac{P_1}{S_1} \tag{59}$$

$$FP = \frac{P_1 + P_H}{\sqrt{{S_1}^2 + {S_N}^2}} \tag{60}$$

Capítulo 5 - Estimativa dos Impactos Econômicos das Harmônicas

5.1 Introdução

De modo geral, os Programas de eficiência Energética no Brasil consideram o sistema composto por formas de ondas de tensão e corrente puramente senoidais com frequência de 60Hz e não avaliam os impactos oriundos das distorções harmônicas de tensão e corrente nas redes elétricas, que implicam na deterioração da qualidade de energia, degradação da vida útil dos equipamentos, funcionamento inadequado da proteção, erros no sistema de medição de energia. Embora haja um efeito positivo na economia de energia, demonstra uma necessidade de metodologias que contemplem os impactos energéticos e econômicos das distorções harmônicas. [69]

A medição e o faturamento de energia ocorrem com base na frequência nominal da rede, 60Hz, ignorando os harmônicos e as perdas oriundas destas, nesse contexto, o presente trabalho buscou desenvolver uma metodologia dos impactos econômicos das perdas harmônicas do sistema de Iluminação Pública com tecnologia *LED*, considerando um parque com 100% dessa tecnologia. [70]

A dificuldade inicial dessa pesquisa foi a ausência de informações detalhadas acerca das participações das tecnologias empregadas na iluminação pública, assim como os dados elétricos destas.

5.2 Metodologia

Para o desenvolvimento desta pesquisa, seguimos os passos do fluxograma apresentado na Figura 16, que é detalhado na presente seção.

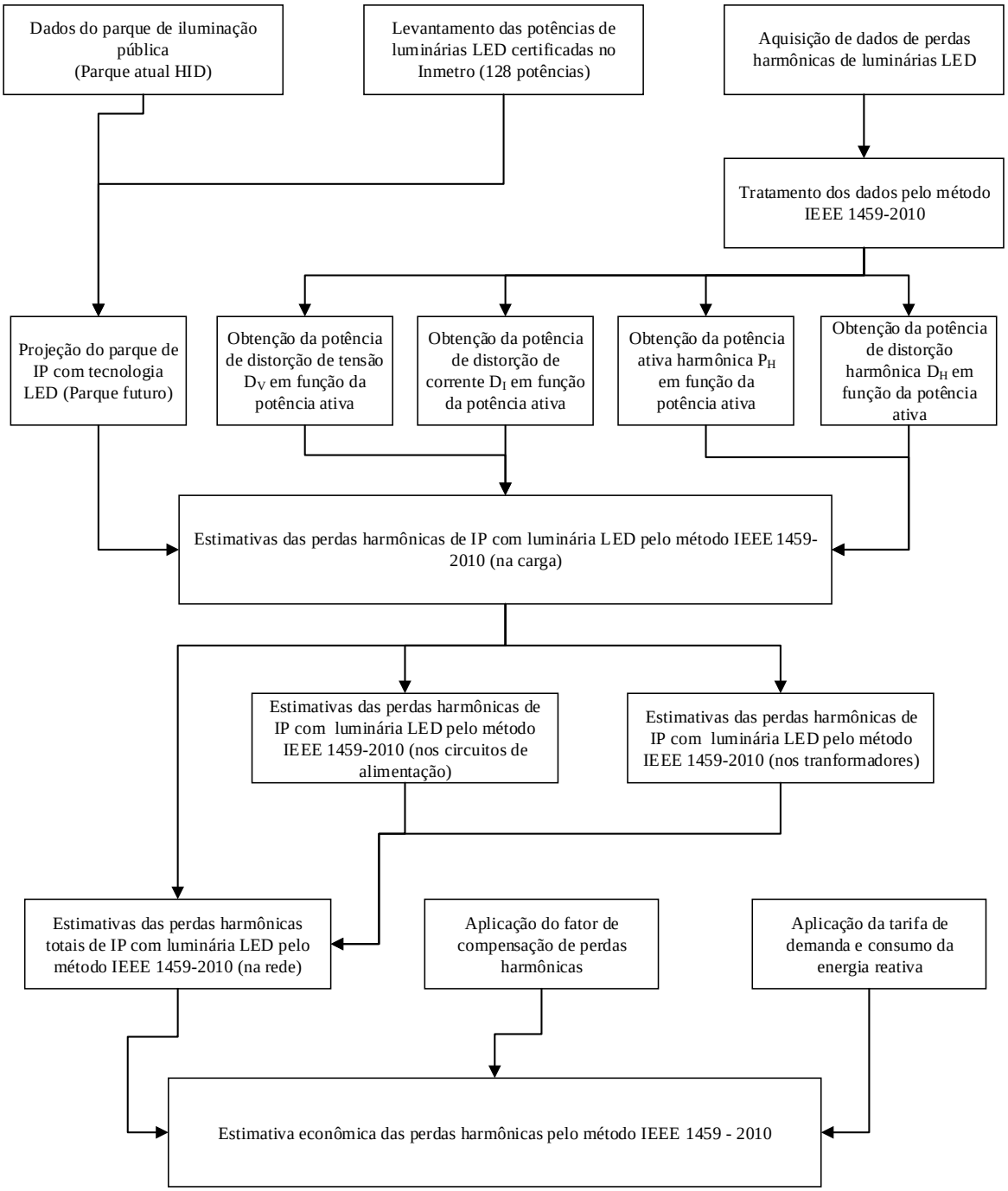

Figura 16 - Fluxograma da metodologia

Em 2021, o Brasil contava com 5565 municípios [71], tornando-se um grande desafio a gestão da Iluminação Pública de forma eficiente e, necessitando, cada vez mais, de mais especialização para a realização desse serviço. A Tabela **Erro! Fonte de referência não encontrada.**13 apresenta a evolução do número de pontos, potência instalada e Consumo de energia desde 1995 até 2018. [72]

Tabela 13 - Evolução da Iluminação Pública no Brasil

	1995	1999	2004	2008	2012	2018
Número de pontos(milhões)	8,8	11,3	13,4	14,7	16,10	16,13
Potência Instalada	1,74	1,90	2,22	2,42	2,61	2,52
Consumo de energia (TWh por ano)	7,64	8,31	9,73	10,62	11,43	10,49

Fonte: Kirchner. [72]

A Tabela 14 apresenta a participação de cada região no total de números no Brasil. Vemos que a região Sudeste representa mais de 43% de todo o parque brasileiro de IP.

Tabela 14 - Participação regional de Iluminação Pública

Região	Número de Pontos	Percentual
Norte	1.048.037	6,49%
Nordeste	4.231.307	26,20%
Centro-Oeste	1.604.702	9,94%
Sudeste	7.017.070	43,45%
Sul	2.247.070	13,92%
Total	16.148.186	100,00%

Fonte: Kirchner. [72]

Por uma questão de limitação da tecnologia *HID*, a Portaria Inmetro 483/2010, que regulamenta as lâmpadas de sódio, limita a quantidade potências nominais possíveis em apenas cinco, conforme a Tabela 15. Além disso, as eficiências energéticas possuem uma faixa curta de variação, uma vez que a tecnologia atingiu seu estado de saturação. [73]

Tabela 15 - Características das lâmpadas de sódio

Características elétricas e fotométricas a 100h		**LÂMPADA A VAPOR DE SÓDIO A ALTA PRESSÃO OVÓIDE E TUBULAR**									
		70 W		**100 W**		**150 W**		**250 W**		**400 W**	
Tensão nos terminais da lâmpada (V eficaz)	Objetivo	90		100		100		100		105/100	
	Máximo	105		115		115		115		120/117	
	Mínimo	75		85		85		85		90/74	
Corrente da lâmpada (A)		0,98		1,20		1,80		3,00		4,45/4,6	
Potência da lâmpada (W eficaz)		70		100		150		250		400/392	
Tipo da lâmpada (Bulbo)		**Ovóide**	**Tubular**	**Ovóide**	**Tubular**	**Ovóide**	**Tubular**	**Ovóide**	**Tubular**	**Ovóide**	**Tubular**
Eficiência luminosa média (lm/W) - declarada e medida		80	85	90	95	100	102	100	105	110	115

Fonte: Portaria Inmetro 483/2010. [73]

Diferentemente da tecnologia *HID*, a Portaria nº62/2022 de luminárias *LED* não tem limitação de potência nominal a ser escolhida pelos fabricantes, como consequência, há uma quantidade muito maior de potências certificadas no mercado. [35]

Não foram encontradas informações atualizadas a respeito da quantidade total de pontos de IP no País, por isso, fizemos uma extrapolação da Tabela 10 para o ano de 2023, encontrando a quantidade de 18.907.200.

Não foram encontrados dados oficiais acerca da quantidade de luminárias *LED* instaladas atualmente no parque de iluminação pública do País, encontramos a informação em um *site* especializado que é de 20%, portanto adotaremos este número para a realização da presente pesquisa. [74]

No sentido de fazer uma projeção do parque de iluminação pública, de 18.907.200 de pontos, com tecnologia predominantemente de *HID*, com poucas opções de potências nominais, para o cenário com a tecnologia *LED*, com várias opções de potências nominais, fez-se um levantamento das potências das luminárias *LED* certificadas com registros ativos no *site* do Inmetro e distribuímos esses pontos proporcionalmente com a representatividade de cada potência.

Nesse levantamento, foram encontradas 1.484 potências certificadas, das quais 128 são de 150W, representando 8,63% do total, conforme apresentado no **Apêndice A - Levantamento dos registros ativos de luminárias *LED* certificadas**. Para essa projeção, a potência de 150W representa 8,63% dos 18.907.200 pontos, correspondendo a 1.591.834

pontos. Para a potência de 100W, foram encontrados 119 registros, que representam 8,02% do total, correspondendo a 1.294.902 pontos. Esse mesmo raciocínio foi estendido para as 124 potências diferentes certificadas. [75]

Os dados das grandezas elétricas disponíveis do sistema de iluminação pública desse parque projetado são as quantidades de pontos por potência ativa, que acaba coincidindo com as potências nominais e comercializadas. Dado isso, o passo seguinte foi a realização de medições laboratoriais em luminárias *LED* para que fossem estimadas as componentes de potências harmônicas descritas pelo método *IEEE* 1459:2010 com a finalidade de construção de relações matemáticas dessas componentes de potências harmônicas em função da potência ativa.

Foram realizadas medições em luminárias *LED* a fim de se obterem as características elétricas no Laboratório de Luminotécnica da Universidade Federal Fluminense - LABLUX que, acreditado junto ao INMETRO, desde 2011, realiza testes em lâmpadas e luminárias para comprovar índices de eficiência energética, segurança elétrica e compatibilidade eletromagnética estabelecidos pelos regulamentos de avaliação de conformidade do Programa Brasileiro de Etiquetagem, além de pesquisas na área de luminotécnica, eficiência energética e qualidade de energia.

A alimentação das luminárias nos ensaios foi feita através da fonte de potência *Itech* modelo IT7626, com ± 0,3% de precisão, apresentado na Figura 17. As medições elétricas foram realizadas pelo wattímetro *Yokokawa* modelo WT-210, com ± 0,2% de precisão, apresentado na Figura 18. Para a análise e visualização dos conteúdos harmônicos, foi utilizado o *software WT-Viewer*, conforme Figuras 19 e 20.

Figura 17 - Fonte de potência *Itech*
Fonte: Autoria própria

Figura 18 - Wattímetro Yokogawa Wt-210
Fonte: Autoria própria

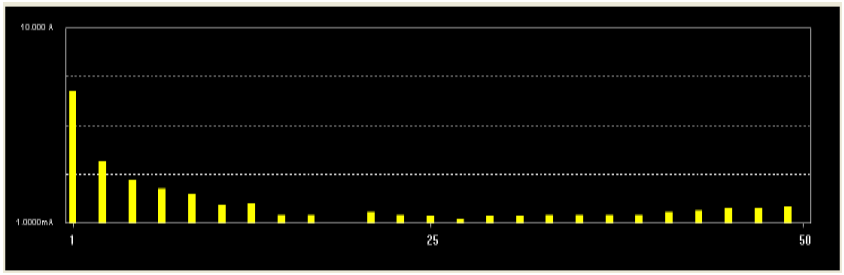

Figura 19 - Gráfico de barras de conteúdo harmônico
Fonte: Autoria própria

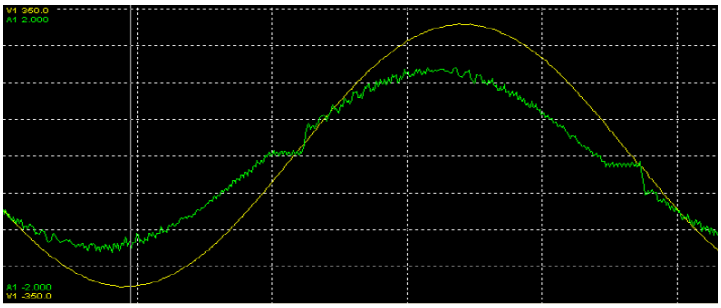

Figura 20 - Forma de onda com conteúdo harmônico
Fonte: Autoria própria

De acordo com a Resolução Aneel 956, o espectro harmônico a ser considerado para fins do cálculo das expressões relacionadas com a distorção harmônica total deve compreender uma faixa de frequências que considere desde a componente fundamental até pelo menos a 40ª ordem harmônica e instrumentos com precisão de até 1%. Para o presente estudo, as leituras consideraram até a 50ª ordem e a precisão do wattímetro utilizado foi de ± 0,2%. A Tabela 16 apresenta os dados de medição das ordens harmônica de uma luminária de 150W, que é apresentada na Figura 23, instalada no goniofotômetro. [33]

Tabela 16 - Tabela de ordens harmônicas

THDI (%)	*Potência (W)*	*Fator de Potência*	*Corrente (A)*	*Fluxo luminoso (lm)*	*Eficiência (lm/W)*
2,3	149,8	0,9820	0,693	21052	140,5
Harmônicos	Ordem	2	3	5	7
	(%)	0,1	1,0	0,6	0,8
	Ordem	9	11	13	15
	(%)	0,8	0,6	0,5	0,5
	Ordem	17	19	21	23
	(%)	0,6	0,3	0,4	0,5
	Ordem	25	27	29	31
	(%)	0,3	0,3	0,3	0,3
	Ordem	33	35	37	39
	(%)	0,1	0,2	0,2	0,1

Figura 21 - Luminária *LED* instalada no goniofotômetro

Foram realizadas medições em 92 luminárias de variadas potências e diversos fabricantes, conforme apresentado no **Apêndice B – Medição de parâmetros elétricos de Luminárias LED**. Foram medidos os seguintes parâmetros: Potência aparente (S), Potência ativa (P), Potência reativa (Q), fator de potência (fp), Distorção harmônica total de corrente (DHT_i), Distorção harmônica total de tensão (DHT_v), Potência ativa fundamental (P_1) e fator de potência na frequência fundamental (fp_f) que são adquiridos através do *software WTViewer*, a partir destes parâmetros medidos foram calculadas as seguintes

grandezas: Potência aparente fundamental (S_f), Potência reativa fundamental (Q_1), Potência aparente Não-Fundamental (S_N), Potência de distorção de corrente (D_I), Potência de distorção de tensão (D_V), Potência aparente harmônica (S_H), Potência ativa harmônica (P_H) e Potência de distorção harmônica (D_H) através das definições propostas pela *IEEE* 1459:2010. [65]

5.3 Estimativa das perdas de distorção harmônica de luminárias *LED* na Carga

Conforme visto no item 4.3, o método *IEEE* 1459 distingue as componentes de potência entre a frequência fundamental, potência ativa e potência reativa, e as componentes não fundamentais, consideradas como componentes de distorção.

As componentes de distorções são:

- Potência ativa harmônica - P_H;
- Potência de distorção harmônica - D_H;
- Potência de distorção de corrente - D_I;
- Potência de distorção de tensão - D_V. [65]

Nesta seção, iremos utilizar a base de dados criada por meio das medições em laboratório em luminárias *LED*, conforme apresentado no **Apêndice B - Medição de parâmetros elétricos de luminárias *LED*,** para construir correlações dessas componentes de distorções em função da potência ativa, uma vez que é a única informação que teremos do parque projetado com tecnologia *LED*.

- Potência ativa harmônica em função da potência ativa

A partir dos dados obtidos em laboratório, foi possível determinar uma correlação $P_H(P)$ entre a potência ativa harmônica P_H e a potência ativa P. A Figura 22 apresenta o comportamento da potência ativa harmônica em função da potência ativa.

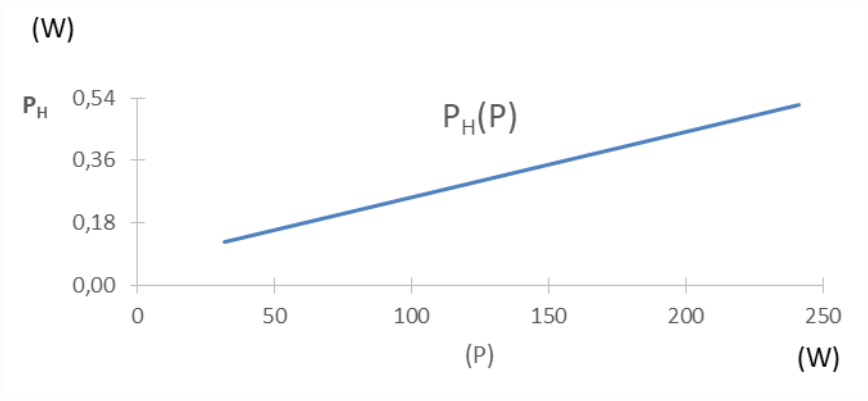

Figura 22 - Potência ativa harmônica em função da potência ativa
Fonte: Autoria própria

- Potência de distorção harmônica em função da potência ativa

A Figura 23 apresenta a correlação $D_H(P)$ da potência de distorção harmônica D_H em função da potência ativa P.

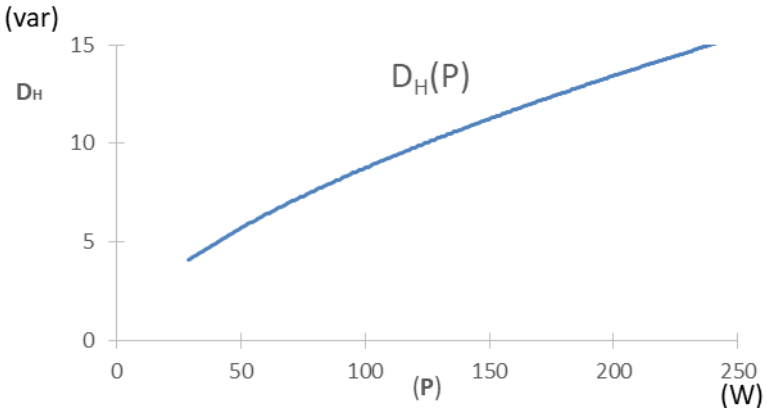

Figura 23 - Potência de distorção harmônica em função da potência ativa
Fonte: Autoria própria

- Potência de distorção de corrente em função da potência ativa

A Figura 24 apresenta a correlação $D_I(P)$ da potência de distorção harmônica D_I em função da potência ativa P.

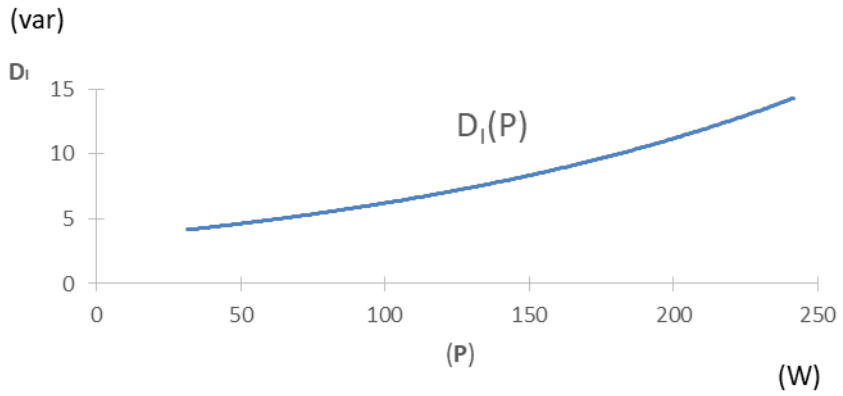

Figura 24 - Potência de distorção de corrente em função da potência ativa
Fonte: Autoria própria

- Potência de distorção de tensão em função da potência ativa

A Figura 25 apresenta correlação $D_V(P)$ da potência de distorção harmônica D_V em função da potência ativa P.

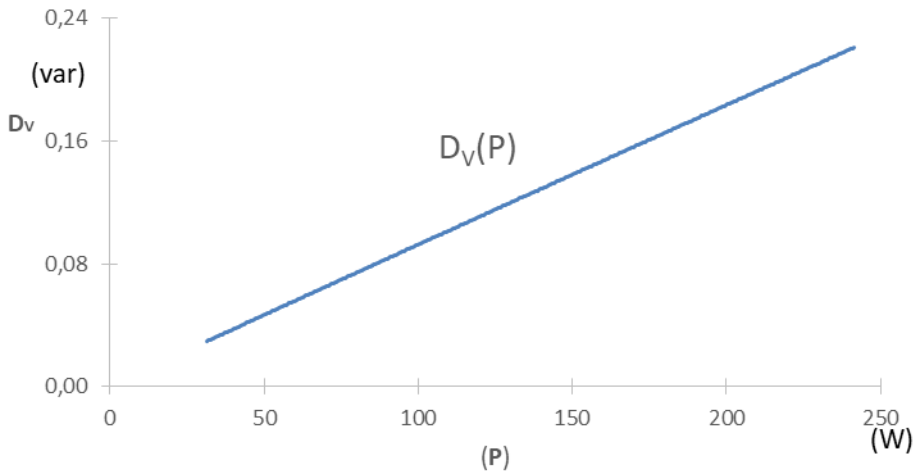

Figura 25 - Potência de distorção de corrente em função da potência ativa
Fonte: Autoria própria

O objetivo principal dessa pesquisa é estimar as perdas elétricas oriundas exclusivamente das distorções harmônicas de luminárias *LED*, para isso, foi considerado que essa tecnologia corresponde a 20% da iluminação pública do País, isto é, 20% de 18.907.200 pontos, conforme distribuição apresentada no apêndice A.

Com os dados das curvas obtidas em função da potência ativa, é possível calcular a demanda de perdas total para cada componente de distorção de acordo com o método *IEEE 1459-2010*.

A perda total de cada componente de distorção será o somatório do produto de cada número de pontos atribuídos a cada potência do parque projetado pelo valor da curva de distorção para esse valor de potência pelo fator de compensação. Esses cálculos são apresentados nas seções 5.3.1, 5.3.2, 5.3.3 e 5.3.3.

5.3.1 Potência ativa harmônica

O valor total P_H da potência ativa harmônica é apresentado na equação (61):

$$P_H = \sum_{n=1}^{124} N_n \text{ x } C_{PH} \text{ x } F_c = 1.262{,}26\ kW \tag{61}$$

Onde:

n: número de potências ativas com registro ativo no Inmetro;

N_n: Número de pontos de iluminação atribuído a cada potência com registro no Inmetro;

C_{PH}: Curva da potência ativa harmônica em função da potência ativa;

F_c: Fator de compensação.

O fator de compensação F_c é necessário porque quando milhares de cargas não lineares são ligadas ao mesmo, o fator de potência aumenta e o valor de DHT_i reduz. No estudo realizado no Laboratório de Luminotécnica da Universidade Federal Fluminense sobre o efeito harmônico da associação de lâmpadas fluorescentes compactas mostrou que o valor de DHT_i reduziu em média 60% quando a quantidade de lâmpadas energizadas aumentou de 196 para 1.117. [76]

Para a presente pesquisa, realizamos um conjunto de medições em 20 luminárias LED de maneira que a 1ª medição foi com apenas 1 luminária, a 2ª medição foi com 2 luminárias, e assim por diante até a medição das 20 luminárias simultaneamente. Com esses dados, extraímos os valores médio, mínimo e máximo de DHT_i e encontramos que a maior compensação para o valor DHT_i máximo foi de 0,65, valor esse que foi adotado para a realização dos cálculos. Os dados dessas medições se encontram no **Apêndice C – Medições para fator de compensação.**

5.3.2 Potência de distorção harmônica

O valor total D_H da potência de distorção harmônica é apresentada na equação (62):

$$D_H = \sum_{n=1}^{124} N_n \text{ x } C_{DH} \text{ x } F_c = 33.858{,}28\ kvar \tag{62}$$

Onde:

n: número de potências ativas com registro ativo no Inmetro;

N_n: Número de pontos de iluminação atribuído a cada potência com registro no Inmetro;

C_{DH}: Curva da potência de distorção harmônica em função da potência ativa;

F_c: Fator de compensação.

5.3.3 Potência de distorção de corrente

O valor total D_I da potência de distorção de corrente é apresentado na equação (63):

$$D_I = \sum_{n=1}^{124} N_n \text{ x } C_{DI} \text{ x } F_c = 33.110{,}49\ kvar \tag{63}$$

Onde:

n: número de potencias ativa com registro ativo no Inmetro;

N_n: Número de pontos de iluminação atribuído a cada potência com registro no Inmetro;

C_{DI}: Curva da potência de distorção harmônica em função da potência ativa;

F_c: Fator de compensação.

5.3.4 Potência de distorção de tensão

O valor total D_V da potência de distorção de tensão é apresentado na equação (64):

$$D_V = \sum_{n=1}^{124} N_n \text{ x } C_{DV} \text{ x } F_c = 408{,}29\ kvar \tag{64}$$

Onde:

n: número de potências ativas com registro ativo no Inmetro;

N_n: Número de pontos de iluminação atribuído a cada potência com registro no Inmetro;

C_{DV}: Curva da potência de distorção harmônica em função da potência ativa;

F_c: Fator de compensação.

A Tabela 17 apresenta um resumo geral das potências pelo método clássico do triângulo de potências e as componentes de distorção de acordo com o método IEEE 1459-2010. A componente potência ativa harmônica P_H, em kW, representa as perdas geradas pelas distorções harmônicas, totalizando 1.262,25kW na carga. As demais componentes, de natureza reativa, apesar de não causarem perdas elétricas, causam impacto de carregamento do sistema, diminuindo a capacidade de carregamento dos transformadores de distribuição.

Tabela 17 - Resumo das potências elétricas

Método do triângulo de potências				Método IEEE 1459-2010			
Potência aparente (S)	Potência ativa (P)	Potência reativa (Q)	fator de potência	P_H	D_H	D_I	D_V
435.832,93 kVA	418.766,45 kW	120.768,17 kvar	0,958	1.262,25 kW	33.858,28 kvar	33.110,49 kvar	408,28 kvar

Fonte: Autoria própria

5.4 Estimativa das perdas de distorção harmônica de luminárias *LED* nos circuitos de alimentação

Conforme apresentado na seção 3.5.1, as correntes harmônicas geram perdas adicionais por aquecimento quando comparadas ao carregamento de uma carga sem conteúdo harmônico. Nesta seção, iremos estimar as perdas das distorções harmônicas geradas nos circuitos de alimentação do sistema de iluminação pública. Para isso, iremos definir um circuito padrão conforme apresenta a Figura 26.

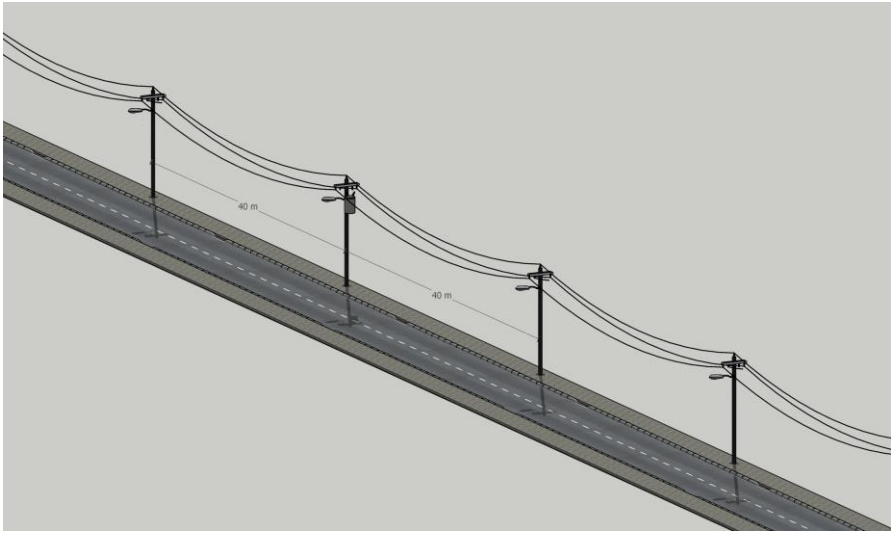

Figura 26 - Circuito padrão de iluminação pública
Fonte: Autoria própria

Foi definido que cada transformador de distribuição alimenta o poste em que este está fisicamente instalado mais cinco postes à esquerda e mais cinco postes à direita, totalizando 11 pontos, com um espaçamento médio de 40m e desconsideramos as perdas por circuito nos postes em que o transformador está instalado, visto que a distância é muito curta.

Adotando o critério da queda de tensão, limitada a 5%, encontramos que o cabo de cobre com bitola de 2,5 mm^2 atende a essa condição.

A perda em cada circuito padrão de iluminação pública de distribuição é apresentada na equação (65):

$$P_{Circuito} = R_{cabo} \text{ x } {I_h}^2 \tag{65}$$

Onde:

R_{cabo}: Resistência do cabo de alimentação por cabo e por trecho em Ω;

I_h: representa a corrente *rms* harmônica desse circuito padrão em A;

De acordo com a 2ª lei de Ohm, o valor da resistência total do circuito de alimentação pode ser expresso de acordo com a equação (66).

$$R_{cabo} = \sigma \text{ x } \frac{L}{A} = 0{,}0172 \text{ x } \frac{200}{2{,}5\text{x}10^{-6}} = 1{,}376\ \Omega \tag{66}$$

Onde:

σ: resistividade do cobre = 0,0172 Ωmm^2/m;

L: Comprimento do circuito = 200m;

A: Sessão nominal do cabo = 2,5m^2.

A potência média do parque de tecnologia *LED* projetado é de 110,7W, que foi considerado a potência do nosso circuito padrão de iluminação. Com os dados obtidos nas medições, fizemos uma correlação do valor da corrente harmônica rms em função da potência ativa, conforme apresentado na Figura 27.

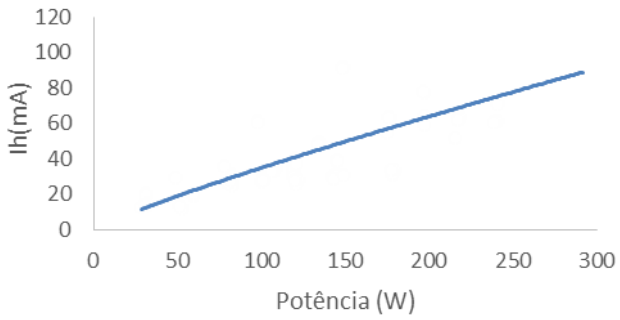

Figura 27 - Corrente harmônica em função da potência ativa
Fonte: autoria própria

Para a potência média de 110,7W, a corrente harmônica correspondente é de 39,16mA para uma luminária. Para cada lado do circuito, temos 5 luminárias, portanto, a corrente que circulará em cada lado do circuito é de 0,1958A.

Aplicando os valores obtidos na equação (67), temos:

$$P_{Circuito} = 1{,}376 \text{ x } (0{,}1958)^2 = 52{,}74mW \quad (67)$$

O circuito padrão possui 11 pontos. 20% do parque de iluminação pública com tecnologia *LED* corresponde a 3.781.440 pontos. Portanto, a perda total nos circuitos de alimentação é dada pela equação (68):

$$P_{Total_Circuito} = 2 \text{ x } 2 \text{ x } \frac{3.781.440}{11} \text{ x } 0{,}5274 = 72{,}52\text{kW} \quad (68)$$

Lembramos que o valor de R_{cabo} calculado foi apenas para um cabo de um lado do circuito, por isso multiplicamos por 2 por ser uma alimentação com 2 cabos e multiplicamos novamente por 2 para representar os dois lados do circuito.

5.5 Estimativa das perdas de distorção harmônica de luminárias *LED* no transformador

Conforme visto em 3.5.2, as correntes harmônicas geram perdas adicionais ao transformador, quando comparado com um carregamento linear. Esse ambiente cada vez mais composto por cargas não lineares tem sido objeto de inúmeras pesquisas para um melhor entendimento dos impactos dessas no transformador como um todo.

Belchior realizou uma análise experimental do acréscimo de perdas em transformadores devido à circulação de correntes distorcidas, com 2 transformadores a seco de 5kVA e 10kVA e 1 transformador a óleo de 10kVA. Os experimentos consistiram em ensaios comparativos de carregamento para cada transformador suprindo carga linear (banco de resistores) e carga não-linear (retificador de 6 pulsos não-controlado) com base na *IEEE* C57.110-2008. A partir dos resultados, o estudo concluiu que o aquecimento proporcionado pela carga não-linear foi em média 10% maior do que o banco de resistores, simbolizando um acréscimo de perdas que pode ser problemático para o transformador. [77]

Neste trabalho realizado na Universidade Federal de Itajubá, foi pesquisado o Impacto causado pelo uso de cargas não lineares em transformadores para reforçar a prestabilidade das características comportamentais dos transformadores, bem como analisar os possíveis impactos sofridos quando estes alimentam cargas com características não lineares. Foram

realizadas medições laboratoriais, em um transformador delta/estrela de 2kVA, de potência, distorção harmônica e fator de potência. Primeiramente, o transformador alimentou um carregamento puramente resistivo de 2kW, lâmpadas incandescentes, onde se obteve o valor total nominal das perdas do transformador que foi de 192W. De posse desses dados, buscou-se atingir o mesmo valor de perdas nominais totais com carga não linear, composta de computadores e lâmpadas fluorescentes compactas – LFCs. A conclusão da pesquisa foi que as perdas obtidas pelas cargas lineares foram aproximadamente 8% maiores do que as obtidas para as cargas lineares. [78]

Iremos utilizar como referência o transformador a óleo de 112,5kVA 13,8kV/220V do fabricante WEG, conforme **Anexo A - Folha de dados Transformador WEG**, onde iremos considerar as seguintes informações:

- Fator k = 1;
- Impedância série: 3,5%;
- Perdas totais 1520,0W. [79]

Esses dados significam que esse transformador tem uma perda de 1520,0W quando carregado até sua potência nominal com uma carga linear e fator de potência unitário.

Considerando 20% de participação da tecnologia *LED* na iluminação pública, a potência total do parque é de:

- 418.766,45kW
- 120.768,17kvar
- 435.832,93kVA.

Para cada 112,5kVA de carregamento linear com fator de potência unitário, o transformador irá consumir 1520W de perdas totais. Para o carregamento de 435.832,93kVA, as perdas proporcionais seriam de 5.888,58kW para também um carregamento linear, com fator de potência unitário. No caso de luminárias *LED*, carregamento não linear, as perdas totais aumentariam em 8%, passando a ser 6.359,67kW, nas quais a contribuição das perdas exclusivas das distorções harmônicas no transformador é de 471,09 kW, que é a diferença entre as perdas das cargas lineares e não lineares, conforme apresentado na Tabela 18.

Tabela 18 - Perdas no transformador

Tipo de carga	Demanda (kVA)	Perdas (kW)	Perdas exclusivas por distorção (kW)
Linear com fp unitário	435.832,90	5.888,58	471,09
Não linear	435.832,90	6.359,67	

Fonte: Autoria própria

O fator k médio das 92 luminárias *LED* analisadas foi de 7,06 e o redimensionamento médio recomendado (*k-factor*) foi de 83%. Isto significa que para não ter redução da vida útil, os transformadores que alimentassem exclusivamente esse perfil harmônico podem ser carregados de no máximo 83% da sua capacidade nominal.

5.6 Estimativa econômica das perdas de distorção harmônica de luminárias *LED* na rede de distribuição – Cenário atual

A estimativa das perdas harmônicas causadas pelas luminárias *LED* na rede de distribuição será a soma das perdas nas harmônicas na carga, nos circuitos de alimentação e das perdas nos transformadores. Essa estimativa é apresentada na equação (69):

$$P_{rede} = P_{Carga} + P_{Total_Circuito} + P_{Transformador} = 1.805{,}87\text{kW} \quad (69)$$

A Resolução normativa ANEEL nº 1000/2021 define que as cargas de iluminação pública devem ser separadas das demais cargas para a aplicação tarifária, mediante instalação de medição exclusiva ou estimativa do consumo, onde se aplicam as tarifas homologadas para o grupo A, e, para o grupo B, as tarifas homologadas do subgrupo B4. [80]

Os grupos tarifários são classificações fixas das unidades consumidoras conforme a tensão utilizada. Isso permite um melhor ajuste dos preços para cada perfil de consumo dos contratantes.

O grupo A abrange as unidades consumidoras com fornecimento igual ou maior que 2,3kV, ou atendidas por um sistema subterrâneo de distribuição em tensão secundária (tensões

inferiores a 2,3 kV). É característica desse grupo a tarifa binômia, ou seja, os contratantes precisam determinar qual será a potência de sua unidade consumidora e contratar o valor de demanda referente.

Dentro do grupo A, existem outras classificações: os subgrupos A1, A2 e A3, que formam os consumidores de alta tensão. E, os subgrupos A3a e A4, sendo os consumidores de média tensão, conforme listado a seguir.

- A1 – tensão de fornecimento igual ou superior a 230 kV;
- A2 – tensão de fornecimento de 88 kV a 138 kV;
- A3 – tensão de fornecimento de 69 kV;
- A3a – tensão de fornecimento de 30 kV a 44 kV;
- A4 – tensão de fornecimento de 2,3 kV a 25 kV;
- AS – tensão de fornecimento inferior a 2,3 kV, a partir de sistema subterrâneo de distribuição; [80]

O grupo B é composto pelas unidades consumidoras com tensão de fornecimento inferior a 2,3 kV. A tarifação para esse grupo é monômia, isto é, os consumidores têm tarifas aplicáveis unicamente ao consumo de energia elétrica, não precisando contratar o valor de demanda. As unidades consumidoras do grupo B apresentam as seguintes divisões:

- B1 – classe residencial;
- B2 – classe rural;
- B3 – demais classes;
- B4 – iluminação pública [80]

Apesar das perdas de distorção harmônicas ocorrerem na baixa tensão, enquadramento do subgrupo B4, são as distribuidoras de energia que primeiramente arcam com esses custos e posteriormente repassam tais perdas nos valores das tarifas para o consumidor final. Além disso, as perdas harmônicas causam impactos tanto por consumo quanto por demanda, por esse motivo, iremos adotar o subgrupo A4 para fins de aplicação dos valores de tarifa da presente pesquisa.

Em pesquisa na Base de Dados das Tarifas das Distribuidoras de Energia Elétrica da ANEEL para o ano de 2023, obtivemos os seguintes valores tarifários médios:

- Valor do kWh(ponta): R$ 0,5489;
- Valor do kWh(fora de ponta): R$ 0,3731;
- Valor do TUSD(ponta): R$ 2,36894;
- Valor do TUSD(fora de ponta): R$ 0,21050;
- Valor do kW(ponta): R$ 50,64.

Onde TUSD: Tarifa de uso do sistema de distribuição.

As perdas econômicas possuem tanto contribuição do consumo de energia quanto da demanda. Para o cálculo das perdas referente ao consumo de energia elétrica, tem uma parcela da energia consumida propriamente dita e uma outra parcela referente ao uso do sistema de distribuição.

Considerando que as luminárias permanecem acesas durante 12h por dia, das quais, 3h serão durante o horário de ponta, 12 meses por ano e 30 dias por mês. A equação (70) apresenta a expressão das perdas anuais referentes ao consumo de energia:

$$P_{consumo} = 12 \text{ x } 30 \text{ x } P_{rede} \text{ x } \left(t_{fp} \text{ x } C_{fp} + t_p \text{ x } C_p\right) = R\$\ 3.253.556{,}52 \quad (70)$$

Onde:

P_{rede} = 1.805,87kW;

t_{fp} = 9h;

t_p = 3h;

C_{fp} = R$ 0,3731

C_p = R$ 0,5489

A outra componente que impacta o custo das perdas por consumo de energia é o uso do sistema de distribuição. A equação (71) apresenta a expressão dessa perda anual:

$$P_{tusd} = 12 \text{ x } 30 \text{ x } P_{rede} \text{ x } \left(t_{fp} \text{ x } C'_{fp} + t_p \text{ x } C'_p\right) = R\$\ 5.851.876{,}95 \quad (71)$$

Onde:

P_{rede} = 1.805,87kW;

t_{fp} = 9h;

t_p = 3h;

C'_{fp} = R$ 0,21050

C'_p = R$ 2,36894

Uma das características bem específicas do consumo de iluminação pública é que, de modo geral, os pontos são ligados ao mesmo tempo, gerando uma demanda máxima constante, exceto devido a algum fuso-horário em algum Estado e durante o horário de ponta. Por esse motivo, a demanda também tem uma parcela relevante para o consumo e, consequentemente, para as perdas harmônicas. A equação (72) apresenta a expressão para o cálculo das perdas econômicas devido à demanda.

$$P_{demanda} = 12 \text{ x } P_{rede} \text{ x } t_{demanda} = R\$\ 1.097.607{,}79 \quad (72)$$

Onde:

P_{rede} = 1.805,87kW;

$t_{demanda}$ = R$ 50,65/kW;

Portanto, a perda econômica total oriunda das distorções harmônicas das luminárias *LED* na rede de distribuição será a soma dessas contribuições, conforme apresentado pela equação (73):

$$P_{total} = P_{consumo} + P_{tusd} + P_{demanda} = R\$\ 10.203.041{,}26 \quad (73)$$

5.7 Estimativa das perdas de distorção de luminárias LED – Cenário fp ≥ 0,96

O principal objetivo da presente pesquisa é estimar o valor total das perdas harmônicas causadas pelas luminárias *LED* na rede de distribuição, conforme apresentado na seção

anterior. O segundo objetivo é apresentar uma possibilidade de mitigação dessas perdas, assim como a sua quantificação.

Por definição, o fator de potência é inversamente proporcional à taxa de distorção harmônica total, portanto, quanto maior for o fator de potência, menores serão as perdas por distorção. Para o cenário geral apresentado na seção 5.6, o fator de potência médio foi de 0,9580. Nesta seção, iremos realizar os mesmos cálculos, mas considerando apenas as luminárias com fator de potência maior ou igual a 0,96, que resultou em um fator de potência médio de 0,9738.

Aplicando o método IEEE 1459-2010 com os dados obtidos em laboratórios, temos a curva que apresenta a correlação da potência ativa harmônica $P_{H0,96}$ em função da potência ativa para fator de potência igual ou superior a 0,96, conforme apresentado pela Figura 28.

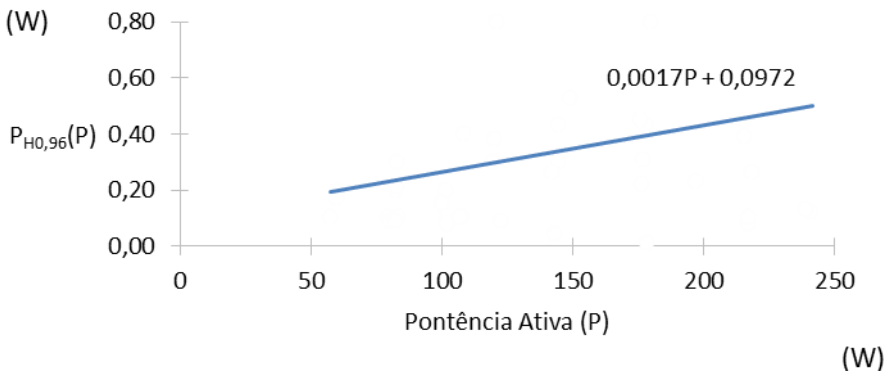

Figura 28 - Potência ativa harmônica em função da potência ativa para fp ≥ 0,96
Fonte: Autoria própria

A perda total $P_{H0,96}$ da potência ativa harmônica na carga para fp ≥ 0,96 é apresentada na equação (74):

$$P_{H0,96} = \sum_{n=1}^{124} N_n \text{ x } C_{PH0,96} \text{ x } F_c = 1.079,46\ kW \tag{74}$$

Onde:

n: número de potências ativas com registro ativo no Inmetro;

N_n: Número de pontos de iluminação atribuído a cada potência com registro no Inmetro;

$C_{PH0,96}$: Curva da Perda de potência ativa harmônica em função da potência ativa para fp ≥ 0,96;

F_c: Fator de compensação.

A perda em cada circuito padrão de iluminação pública de distribuição é apresentada na equação (75):

$$P_{Circuito0,96} = R_{cabos} \text{ x } I_{h0,96}{}^{2} \tag{75}$$

Onde:

R_{cabo}: Resistência do cabo de alimentação = 1,376Ω;

$I_{h0,96}$: representa a corrente *rms* harmônica desse circuito padrão em A;

A potência média do parque de tecnologia *LED* para esse cenário é de 110,14W. Com os dados obtidos nas medições, fizemos uma correlação do valor da corrente harmônica rms em função da potência ativa, conforme apresentado na Figura 29.

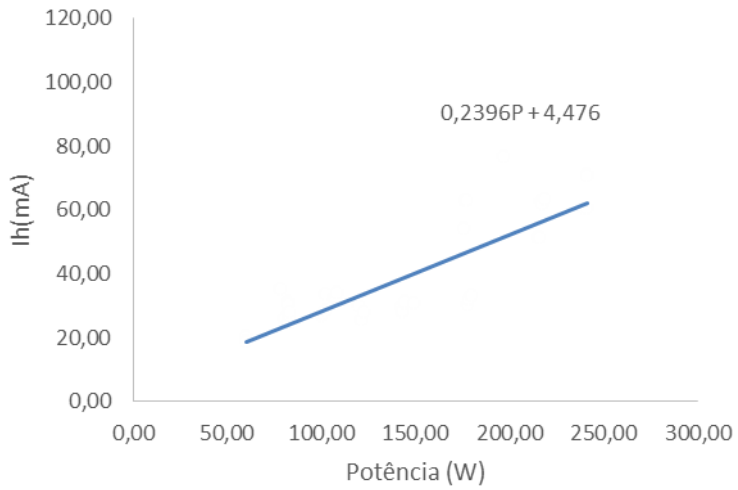

Figura 29 - Corrente harmônica em função da potência ativa
Fonte: autoria própria

Para a potência de 110,14W, a corrente harmônica correspondente é de 30,87mA para uma luminária. Para cada lado do circuito temos 5 luminárias, portanto a corrente que circulará em cada lado do circuito é de 0,1543A.

Aplicando os valores obtidos na equação (76), temos:

$$P_{Circuito0,96} = 1,376 \text{ x } (0,1543)^2 = 32,77mW \tag{76}$$

A perda total nos circuitos de alimentação é dada pela equação (77):

$$P_{Total_Circuito} = 2 \text{ x } 2 \text{ x } \frac{3.781.440}{11} \text{ x } 0{,}3277 = 45{,}06\text{kW} \qquad (77)$$

Considerando 20% de participação da tecnologia *LED* na iluminação pública para fp ≥0,96, a potência total é de:

- 416.519,18kW;
- 99.722,25kvar;
- 428.290,50kVA.

Para o carregamento de 428.290,50kVA, as perdas totais são de 5.786,68 kW para também um carregamento linear, com fator de potência unitário. No caso de luminárias *LED*, carregamento não linear, as perdas totais aumentariam em 8%, passando a ser 6.249.614,97kW, nas quais, a contribuição das perdas exclusivas das distorções harmônicas no transformador é de 462,93 kW.

A estimativa das perdas harmônicas causadas pelas luminárias *LED* na rede de distribuição para fp≥0,96 é apresentada na equação (78):

$$P_{rede0,96} = P_{Carga} + P_{Total_Circuito} + P_{Transformador} = 1.587{,}45\text{kW} \qquad (78)$$

A equação (79) apresenta a expressão das perdas anuais referentes ao consumo de energia:

$$P_{consumo0,96} = 12 \text{ x } 30 \text{ x } P_{rede0,96} \text{ x } \left(t_{fp} \text{ x } C_{fp} + t_p \text{ x } C_p\right) = R\$\ 2.860.038{,}82 \qquad (79)$$

Onde:

$P_{rede0,96}$ = 1.587,45kW ;

t_{fp} = 9h;

t_p = 3h;

C_{fp} = R$ 0,3731;

C_p = R$ 0,5489.

A equação (80) apresenta a expressão dessa perda anual:

$$P_{tusd0,96} = 12 \text{ x } 30 \text{ x } P_{rede0,96} \text{ x } \left(t_{fp} \text{ x } C_{fp} + t_p \text{ x } C_p\right) = R\$\ 5.144.0,92,36 \quad (80)$$

Onde:

$P_{rede0,96}$ = 1.587,45kW;

t_{fp} = 9h;

t_p = 3h;

C_{fp} = R$ 0,21050;

C_p = R$ 2,36894.

A equação (81) apresenta a expressão para o cálculo das perdas econômicas devido à demanda.

$$P_{demanda} = 12 \text{ x } P_{rede0,96} \text{ x } t_{demanda} = R\$\ 964.852,11 \quad (81)$$

Onde:

$P_{rede0,96}$ = 1.587,45kW;

$t_{demanda}$ = R$ 50,65/kW.

Portanto, a perda econômica total oriunda das distorções harmônicas das luminárias *LED* na rede de distribuição para fp≥0,96 será a soma dessas contribuições, conforme apresentado pela equação (82):

$$P_{total0,96} = P_{consumo0,96} + P_{tusd0,96} + P_{demanda0,96} = R\$\ 8.968.983,28 \quad (82)$$

5.8 Estimativa das perdas de distorção de luminárias LED – Cenário $DHT_i \leq 8\%$

Nesta seção, iremos considerar apenas as luminárias com DHT_i menor ou igual a 8%. A média do valor de DHT_i das amostras foi de 5,9%.

Aplicando o método IEEE 1459-2010 com os dados obtidos em laboratórios, temos a curva que apresenta a correlação da potência ativa harmônica $P_{H8\%}$ em função da potência ativa para DHT_i menor ou igual a 8%, conforme apresentado pela Figura 30.

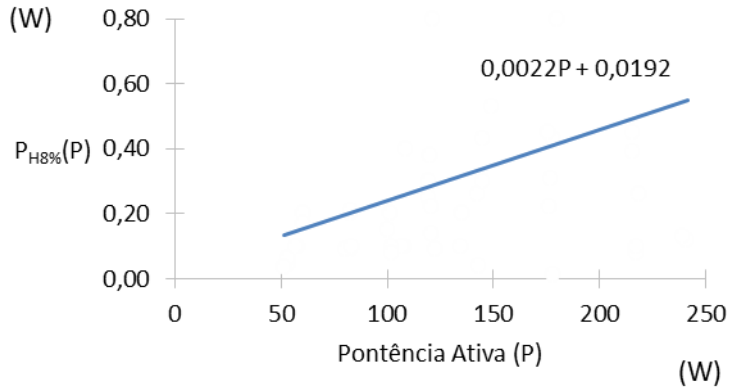

Figura 30 - Potência ativa harmônica em função da potência ativa para $DHT_i \leq 8\%$
Fonte: Autoria própria

A perda total $P_{H8\%}$ da potência ativa harmônica na carga para DHTi ≤ 8% é apresentada na equação (83):

$$P_{H8\%} = \sum_{n=1}^{124} N_n \text{ x } C_{PH8\%} \text{ x } F_c = 993{,}89\ kW \tag{83}$$

Onde:

n: número de potências ativas com registro ativo no Inmetro;

N_n: Número de pontos de iluminação atribuído a cada potência com registro no Inmetro;

$C_{PH8\%}$: Curva da Perda de potência ativa harmônica em função da potência ativa $DHT_i \leq 8\%$;

F_c: Fator de compensação.

A perda em cada circuito padrão de iluminação pública de distribuição é apresentada na equação (84):

$$P_{Circuito8\%} = \text{ x } R_{cabos} \text{ x } I_{h8\%}{}^{2} \tag{84}$$

Onde:

R_{cabo}: Resistência do cabo de alimentação = 1,376Ω;

$I_{h8\%}$: representa a corrente *rms* harmônica desse circuito padrão em A;

A potência média ponderada do parque de tecnologia *LED* para esse cenário é de 110,23W. Com os dados obtidos nas medições, fizemos uma correlação do valor da corrente harmônica rms em função da potência ativa, conforme apresentado na Figura 31.

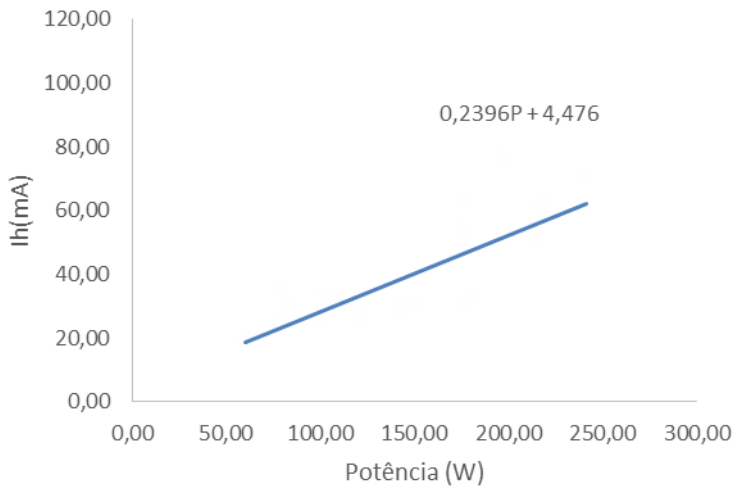

Figura 31 - Corrente harmônica em função da potência ativa DHT$_i$ ≤8%
Fonte: autoria própria

Para a potência de 110,23W, a corrente harmônica correspondente é de 30,34mA para uma luminária. Para cada lado do circuito, temos 5 luminárias, portanto, a corrente que circulará em cada lado do circuito é de 0,1517A.

Aplicando os valores obtidos na equação (85), temos:

$$P_{Circuito} = 1{,}376 \text{ x } (0{,}1517)^2 = 31{,}68mW \tag{85}$$

A perda total nos circuitos de alimentação é dada pela equação (86):

$$P_{Total_Circuito} = 2 \text{ x } 2 \text{ x } \frac{3.781.440}{11} \text{ x } 0{,}3277 = 43{,}55\text{kW} \quad (86)$$

Considerando 20% de participação da tecnologia *LED* na iluminação pública para $DHT_i \leq 8\%$, a potência total é de:

- 416.844,29kW;
- 104.778,98kvar;
- 429.811,35kVA.

Para o carregamento de 429.811,35kVA, as perdas totais são de 5.807,22kW para também um carregamento linear, com fator de potência unitário. No caso de luminárias *LED*, carregamento não linear, as perdas totais aumentariam em 8%, passando a ser 6.271.807,23kW, nas quais, a contribuição das perdas exclusivas das distorções harmônicas no transformador é de 464,58kW.

A estimativa das perdas harmônicas causadas pelas luminárias *LED* na rede de distribuição para $DHT_i \leq 8\%$ é apresentada na equação (87):

$$P_{rede8\%} = P_{Carga8\%} + P_{Total_{Circuitos}8\%} + P_{Transformador8\%} = 1.502{,}02\text{kW} \quad (87)$$

A equação (88) apresenta a expressão das perdas anuais referentes ao consumo de energia:

$$P_{consumo8\%} = 12 \text{ x } 30 \text{ x } P_{rede8\%} \text{ x } \left(t_{fp} \text{ x } C_{fp} + t_p \text{ x } C_p\right) = R\$\ 2.706.123{,}35 \quad (88)$$

Onde:

$P_{rede8\%}$ = 1.502,02kW;

t_{fp} = 9h;

t_p = 3h;

C_{fp} = R$ 0,3731;

C_p = R$ 0,5489.

A equação (89) apresenta a expressão dessa perda anual:

$$P_{tusd8\%} = 12 \text{ x } 30 \text{ x } P_{rede8\%} \text{ x } \left(t_{fp} \text{ x } C'_{fp} + t_p \text{ x } C'_p\right) = R\$\ 4.867.258{,}56 \quad (89)$$

Onde:

$P_{rede8\%}$ = 1.502,02kW;

t_{fp} = 9h;

t_p = 3h;

C'_{fp} = R$ 0,21050;

C'_p = R$ 2,36894.

A equação (90) apresenta a expressão para o cálculo das perdas econômicas devido à demanda.

$$P_{demanda8\%} = 12 \text{ x } P_{rede0{,}96} \text{ x } t_{demanda} = R\$\ 912.927{,}76 \quad (90)$$

Onde:

$P_{rede8\%}$ = 1.502,02kW;

$t_{demanda}$ = R$ 50,65/kW.

Portanto, a perda econômica total oriunda das distorções harmônicas das luminárias *LED* na rede de distribuição para $DHT_i \leq 8\%$ será a soma dessas contribuições, conforme apresentado pela equação (91):

$$P_{total8\%} = P_{consumo8\%} + P_{tusd8\%} + P_{demanda8\%} = R\$\ 8.486.309{,}66 \quad (91)$$

5.9 Estimativas das perdas econômicas de distorção harmônica de luminárias *LED* na rede de distribuição para o cenário de 100% *LED*

Vamos considerar nessa seção o cenário em que 100% da IP é ocupado pela tecnologia *LED*, isto é, 18.907.200 pontos.

Aplicando o método IEEE 1459-2010 com os dados obtidos em laboratórios, temos a curva que apresenta a correlação da potência ativa harmônica P_H em função da potência ativa conforme apresentado pela Figura 22.

A perda total da potência ativa harmônica na carga para 100% do parque de IP com tecnologia *LED* é apresentada na equação (92):

$$P_{carga100\%} = \sum_{n=1}^{124} N_n \text{ x } C_{PH100\%} \text{ x } F_c = 6.483,11\ kW \quad (92)$$

Onde:

n: número de potências ativas com registro ativo no Inmetro;

N_n: Número de pontos de iluminação para 100% do parque de IP com tecnologia *LED* atribuído a cada potência com registro no Inmetro;

$C_{PH100\%}$: Curva da Perda de potência ativa harmônica em função da potência ativa;

F_c: Fator de compensação.

A perda total nos circuitos de alimentação é dada pela equação (93):

$$P_{Total_{Circuito100\%}} = 2 \text{ x } 2 \text{ x } \frac{18.907.200}{11} \text{ x } 0,5274 = 362,620\text{kW} \quad (93)$$

Considerando 100% de participação da tecnologia *LED* na iluminação pública, a potência total é de:

- 2.079.861.210,03kW;
- 605.353.573,97kvar;
- 2.166.166.106,59kVA.

Para o carregamento de 2.166.166.106,59kVA, as perdas totais são de 28.101,23kW para também um carregamento linear, com fator de potência unitário. No caso de luminárias *LED*, carregamento não linear, as perdas totais aumentariam em 8%, passando a ser 31.608,69kW, nas quais, a contribuição das perdas exclusivas das distorções harmônicas no transformador é de 2.341,38kW.

A estimativa das perdas harmônicas causadas pelas luminárias *LED* na rede de distribuição para $DHT_i \leq 8\%$ é apresentada na equação (94):

$$P_{rede100\%} = P_{Carga100\%} + P_{Total_{Circuito_{100}\%}} + P_{Transformador100\%} = 9.187{,}11\text{kW} \quad (94)$$

A equação (95) apresenta a expressão das perdas anuais referentes ao consumo de energia:

$$P_{consumo100\%} = 12 \text{ x } 30 \text{ x } P_{rede100\%} \text{ x } \left(t_{fp} \text{ x } C_{fp} + t_p \text{ x } C_p\right) = R\$\ 16.552.011{,}85 \quad (95)$$

Onde:

$P_{rede100\%}$ = 9.187,11kW;

t_{fp} = 9h;

t_p = 3h;

C_{fp} = R$ 0,3731;

C_p = R$ 0,5489.

A equação (96) apresenta a expressão da perda pelo uso do sistema de distribuição anual:

$$P_{tusd100\%} = 12 \text{ x } 30 \text{ x } P_{rede100\%} \text{ x } \left(t_{fp} \text{ x } C'_{fp} + t_p \text{ x } C'_p\right) = R\$\ 29.770.602{,}11 \quad (96)$$

Onde:

$P_{rede100\%}$ = 9.187,11kW;

t_{fp} = 9h;

t_p = 3h;

C'_{fp} = R$ 0,21050;

C'_{p} = R$ 2,36894.

A equação (97) apresenta a expressão para o cálculo das perdas econômicas devido à demanda.

$$P_{demanda100\%} = 12 \text{ x } P_{rede100\%} \text{ x } t_{demanda} = R\$\ 5.583.925{,}46 \quad (97)$$

Onde:

$P_{rede100\%}$ = 9.187,11kW;

$t_{demanda}$ = R$ 50,65/kW.

Portanto, a perda econômica total oriunda das distorções harmônicas das luminárias *LED* na rede de distribuição para 100% de tecnologia *LED* será a soma dessas contribuições, conforme apresentado pela equação (98):

$$P_{total100\%} = P_{consumo100\%} + P_{tusd100\%} + P_{demanda100\%} = R\$\ 51.906.539{,}43 \quad (98)$$

5.10 Estimativas das perdas econômicas de distorção harmônica de luminárias *HID* na rede de distribuição – Cenário atual

No sentido de levantarmos o valor total das perdas de distorção harmônicas na rede de distribuição, iremos nessa seção estimar as perdas oriundas da tecnologia convencional *HID*, considerando lâmpadas a vapor de sódio e lâmpadas multivapor metálicas.

Considerando que o tamanho do parque de IP é de 18.907.200 pontos e que 20% são compostos pela tecnologia *LED*, os 80% restante são destinados à tecnologia *HID*, isto é, 15.125.760 pontos.

Não há informações oficiais disponíveis sobre o detalhamento do parque de IP, relacionando a tecnologia utilizada, assim como o quantitativo das potências utilizadas. Essa

informação é crucial para realização dos cálculos das perdas de acordo com a presente metodologia. A Portaria da Receita Federal Brasileira (RFB) nº 361 de 14 de março de 2016 permitia que os dados estatísticos aduaneiros fossem acessados para quaisquer produtos livremente para qualquer cidadão, mas essa Portaria foi revogada pela Portaria nº 100/2021. Acessando ao último ano de dados disponíveis, conseguimos levantar que no ano de 2021, foram importadas 4.064.678 lâmpadas destinadas a IP, das quais, mais de 85% foram de tecnologia vapor de sódio e multivapor metálico. Dentro dessas duas tecnologias, mais de 90% foram com as potências de 70W, 100W, 150W, 250W e 400W. Expandindo esses números proporcionalmente para atingir os 15.125.760 pontos, temos o detalhamento apresentado na Tabela 19. [81]

Tabela 19 - Informações das lâmpadas HID cenário atual

DESCRIÇÃO	70W	100W	150W	250W	400W	TOTAL
SÓDIO	4130474	1756094	1465232	1175064	570030	9096894
METÁLICO	1262678	229362,9	1063748	1774320	1698757	6028866
TOTAL	5393151	1985457	2528980	2949384	2268787	15125760

Fonte: Receita Federal do Brasil

Com isso, iremos considerar os dados de importação de 2021 como referência para o detalhamento do parque de *HID* de IP para realizarmos os cálculos da presente pesquisa.

Aplicando o método IEEE 1459-2010 com os dados obtidos em laboratório com medições de lâmpadas *HID*, conforme apresentado no **Apêndice D – Dados de medições em lâmpadas *HID***, temos os valores médios das componentes de distorção para cada potência medida por tecnologia, conforme apresentado na Tabela 20.

Tabela 20 - Dados de distorção das lâmpadas *HID*

Tecnologia	**Potência (W)**	**Medições**			
		P_h (W)	D_h (var)	D_i (var)	D_v (var)
Vapor de Sódio	70	0,84	11,80	23,31	0,03
	100	0,53	13,13	22,05	0,03
	150	0,62	16,85	35,16	0,05
	250	1,12	28,08	58,36	0,11
	400	3,32	53,36	85,50	0,17
Vapor metálico	70	0,13	6,89	19,33	0,03
	100	0,56	11,86	18,55	0,04
	150	1,49	24,05	30,98	0,06
	250	2,62	32,77	72,89	0,10
	400	4,58	36,27	74,46	0,17

Fonte: Autoria própria

A perda total $P_{H(HID)}$ da potência ativa harmônica na carga para cenário apresentado no parque de IP com tecnologia *HID* é apresentada na equação (99):

$$P_{H(HID)} = \sum_{n=1}^{10} N_n \text{ x } C_{HID}(p) \text{ x } F_c = 16.521{,}574\ kW \tag{99}$$

Onde:

n: número de potências ativas com registro ativo no Inmetro;

N_n: Número de pontos de iluminação para 80% do parque de IP com tecnologia *HID* atribuído a cada potência com registro no Inmetro;

$C_{HID}(p)$: Valor da Perda de potência ativa harmônica da tecnologia *HID* em função da potência ativa;

F_c: Fator de compensação.

A perda em cada circuito padrão de iluminação pública de distribuição é apresentada na equação (100):

$$P_{CircuitoHID} = R_{cabos} \text{ x } I_{HID}{}^2 \tag{100}$$

Onde:

R_{cabo}: Resistência do cabo de alimentação por cabo e trecho = 1,376Ω;

I_{HID}: representa a corrente *rms* harmônica do circuito padrão em A;

A potência média do parque de tecnologia *HID* para esse cenário é de 203,2W, que corresponde à corrente harmônica de 184,8mA para uma luminária. Como o circuito padrão é de 11 pontos, onde as perdas no ponto central em que está instalado o transformador foram ignoradas, para cada lado do circuito temos 5 luminárias, portanto, a corrente que circulará em cada lado do circuito é de 0,9239A.

A equação (101) apresenta os valores das perdas em um cabo para um trecho no circuito de distribuição padrão definido no presente estudo.

$$P_{CircuitoHID} = 1{,}376 \text{ x } (0{,}9239)^2 = 1{,}174W \tag{101}$$

A perda total nos circuitos de alimentação é dada pela equação (102):

$$P_{Total_CircuitoHID} = 2 \text{ x } 2 \text{ x } \frac{15.125.760}{11} \text{ x } 1{,}174 = 6.460{,}4\text{kW} \quad (102)$$

Considerando 80% de participação da tecnologia *HID* na iluminação pública, a potência total é de:

- 3.073.554.432,3kW;
- 836. 531.669,1kvar;
- 3.185.360.589,6kVA.

Para o carregamento de 3.185.360.589,6kVA, as perdas exclusivas das distorções harmônicas no transformador são de 3.443,1kW.

A estimativa das perdas harmônicas causadas pelas luminárias *HID* na rede de distribuição é apresentada na equação (103):

$$P_{redeHID} = P_{CargaHID} + P_{Total_{CircuitoHID}} + P_{TransformadorHID} = 26.425{,}07\text{kW} \quad (103)$$

A equação (104) apresenta a expressão das perdas anuais referentes ao consumo de energia:

$$P_{consumoHID} = 12 \text{ x } 30 \text{ x } P_{redeHID} \text{ x } \left(t_{fp} \text{ x } C_{fp} + t_p \text{ x } C_p\right) = R\$\ 47.608.893{,}12 \quad (104)$$

Onde:

$P_{redeHID}$ = 26. 425,07kW;

t_{fp} = 9h;

t_p = 3h;

C_{fp} = R$ 0,3731;

C_p = R$ 0,5489.

A equação (105) apresenta a expressão da perda pelo uso do sistema de distribuição anual:

$$P_{tusdHID} = 12 \text{ x } 30 \text{ x } P_{redeHID} \text{ x } \left(t_{fp} \text{ x } C'_{fp} + t_p \text{ x } C'_p\right) = R\$\ 85.629.796{,}96 \quad (105)$$

Onde:

$P_{redeHID}$ = 26. 425,07kW;

t_{fp} = 9h;

t_p = 3h;

C'_{fp} = R$ 0,21050;

C'_p = R$ 2,36894.

A equação (106) apresenta a expressão para o cálculo das perdas econômicas devido à demanda.

$$P_{demandaHID} = 12 \text{ x } P_{redeHID} \text{ x } t_{demanda} = R\$\ 16.061.159{,}98 \quad (106)$$

Onde:

$P_{redeHID}$ = 26. 425,07kW;

$t_{demanda}$ = R$ 50,65/kW.

Portanto, a perda econômica total oriunda das distorções harmônicas das luminárias *HID* na rede de distribuição para 80% do parque de IP será a soma dessas contribuições, conforme apresentado pela equação (107):

$$P_{totalHID} = P_{consumoHID} + P_{tusdHID} + P_{demandaHID} = R\$\ 149.229.850{,}05 \quad (107)$$

5.11 Estimativas das perdas econômicas de distorção harmônica de luminárias *HID* na rede de distribuição com 100% *HID*

Nesta última seção, para fins de comparação com a tecnologia *LED*, iremos estimar o valor total das perdas de distorção harmônicas na rede de distribuição considerando que 100% do parque de IP é composto pela *HID*, considerando lâmpadas a vapor de sódio e lâmpadas multivapor metálicas.

A Tabela 21 apresenta a distribuição dos 18.907.200 pontos detalhados por potências e tecnologias.

Tabela 21 - Informações das lâmpadas *HID* cenário 100%

DESCRIÇÃO	70W	100W	150W	250W	400W	TOTAL
SÓDIO	5163092	2195118	1831541	1468830	712537	11371118
METÁLICA	1578347,293	286703,6	1329685	2217901	2123446	7536082
TOTAL	6741439	2481822	3161225	3686731	2835983	18907200

Fonte: Receita Federal do Brasil.

A perda total $P_{H(HID100\%)}$ da potência ativa harmônica na carga para cenário apresentado no parque de IP com tecnologia *HID* é apresentada na equação (108):

$$P_{H(HID100\%)} = \sum_{n=1}^{10} N_n \text{ x } C_{HID100\%}(p) \text{ x } F_c = 18.531{,}659\ kW \tag{108}$$

Onde:

n: número de potências ativas com registro ativo no Inmetro;

N_n: Número de pontos de iluminação para 100% do parque de IP com tecnologia *HID* atribuído a cada potência com registro no Inmetro;

$C_{HID100\%}(p)$: Valor da Perda de potência ativa harmônica da tecnologia *HID* em função da potência ativa;

F_c: Fator de compensação.

A potência média do parque de tecnologia *HID* para esse cenário é de 203,2W, que resulta em uma perda de 1,174W para cada circuito padrão definido na presente pesquisa.

A perda total nos circuitos de alimentação é dada pela equação (109):

$$P_{CircHID100\%} = 2 \text{ x } 2 \text{ x } \frac{18.907.200}{11} \text{ x } 1{,}174 = 8.075{,}9\text{kW} \qquad (109)$$

Considerando 100% de participação da tecnologia *HID* na iluminação pública, a potência total é de:

- 3.841.943.040,0kW;
- 1.045.664.586,3kvar;
- 3.981.700.735,8kVA.

Para o carregamento de 3.981.700.735,8kVA, as perdas exclusivas das distorções harmônicas no transformador são de 4.303,7kW.

A estimativa das perdas harmônicas causadas pelas luminárias *HID* na rede de distribuição é apresentada na equação (110):

$$P_{redeHID100\%} = P_{CargaHID100\%} + P_{CircHID100\%} + P_{TransfHID100\%} = 30.911{,}26\text{kW} \qquad (110)$$

A equação (111) apresenta a expressão das perdas anuais referentes ao consumo de energia:

$$P_{consHID100\%} = 12 \text{ x } 30 \text{ x } P_{redeHID100\%} \text{ x } \left(t_{fp} \text{ x } C_{fp} + t_p \text{ x } C_p\right) = R\$\ 55.691.455{,}24 \qquad (111)$$

Onde:

$P_{redeHID100\%}$ = 30.911,26kW ;

t_{fp} = 9h;

t_p = 3h;

C_{fp} = R$ 0,3731;

C_p = R$ 0,5489.

A equação (112) apresenta a expressão da perda pelo uso do sistema de distribuição anual:

$$P_{tusdHID100\%} = 12 \text{ x } 30 \text{ x } P_{redeHID100\%} \text{ x } \left(t_{fp} \text{ x } C'_{fp} + t_p \text{ x } C'_p\right) = R\$\ 100.167.168{,}19 \qquad (112)$$

Onde:

$P_{redeHID100\%}$ = 30.911,26kW ;

t_{fp} = 9h;

t_p = 3h;

C'_{fp} = R$ 0,21050;

C'_p = R$ 2,36894.

A equação (113) apresenta a expressão para o cálculo das perdas econômicas devido à demanda.

$$P_{demHID100\%} = 12 \text{ x } P_{redeHID100\%} \text{ x } t_{demanda} = R\$\ 18.787.863{,}22 \qquad (113)$$

Onde:

$P_{redeHID100\%}$ = 30.911,26kW ;

$t_{demanda}$ = R$ 50,65/kW.

Portanto, a perda econômica total oriunda das distorções harmônicas das luminárias *HID* na rede de distribuição para 1000% do parque de IP será a soma dessas contribuições, conforme apresentado pela equação (114):

$$P_{totalHID100\%} = P_{consHID100\%} + P_{tusdHID100\%} + P_{demHID100\%} = R\$\ 174.646.486{,}66 \qquad (114)$$

Capítulo 6 - Conclusões e Trabalhos Futuros

6.1 Conclusões

Diante da necessidade crescente de produção de energia para atender à demanda da nossa sociedade atual, a substituição de produtos convencionais por outros com tecnologias mais eficientes é sempre uma ótima opção para economia de energia, como vem acontecendo com a tecnologia *LED*.

A disseminação da tecnologia *LED* no segmento de iluminação pública deve-se ao desenvolvimento da eletrônica de potência, uma vez que uma luminária *LED* é um conversor eletrônico e embora o primeiro pensamento nessa aplicação seja os ganhos de eficiência energética, essa tecnologia tem o potencial de trazer benefícios também sob o aspecto da qualidade de energia elétrica, que tem se tornado cada vez mais desafiador, frente à complexidade das cargas de natureza não lineares e mais sensíveis aos problemas de fornecimento de energia do sistema elétrico.

Como objetivo principal, a presente pesquisa estimou a perda econômica anual da tecnologia LED no sistema de iluminação pública brasileiro oriunda das distorções harmônicas, levando em consideração a participação de 20% desta tecnologia. O valor dessas perdas foi de R$ 10.203.041,26 por ano.

Apesar de não ter sido objeto de estudo na presente pesquisa, viu-se que as distorções harmônicas reduzem a capacidade de carregamento dos transformadores, para o nosso caso, de 83%, implicando na necessidade de aquisição e instalação de mais transformadores ou o sobredimensionamento dos existentes, que acarreta um impacto econômico adicional, pois, do contrário, os transformadores virão a ter a sua vida útil reduzida.

Além das perdas por aquecimento, as distorções harmônicas criam um carregamento bastante significativo de potência reativa nos transformadores de potência, fato esse que também tem suas implicações energéticas e econômicas.

Um outro objetivo da pesquisa foi apresentar alternativas para mitigação dos impactos das distorções harmônicas na rede de distribuição. A primeira alternativa foi o critério do fator de potência, onde fixamos em ≥0,96, que fez com que o valor das perdas anuais diminuísse para R$ 8.968.983,28, uma redução de 12%.

Uma outra alternativa de mitigação das perdas harmônicas foi limitar o DHT_I a 8%, uma vez que esse parâmetro significa a magnitude das distorções harmônicas. Neste caso, o valor das perdas diminuiria para R$ 8.486.309,66, redução de 17%.

Apesar de que foram reduções importantes comparadas ao porte do sistema elétrico, tiveram um alcance pormenorizado em função da tecnologia *LED* apresentar um alto fator de potência e uma baixa taxa de distorção harmônica, principalmente quando comparada aos demais produtos eletrônicos do sistema. Por outro lado, essa alternativa traz o benefício de reduzir tais perdas diretamente nos locais de origem, que é no próprio produto. É um potencial benefício de mitigação que não ocorre no caso das perdas comerciais, como no furto de energia.

O valor das perdas dos 80% restantes do parque atual, que é ocupado pela tecnologia *HID*, foi de R$ 149.229.850,05. Somando com os 20% da tecnologia *LED*, significa que o valor total anual das perdas na rede de distribuição é de 159.432.891,31, segmento que corresponde a 4,3% do consumo total de energia no Brasil.

Haja vista que estamos passando por uma transição tecnológica na iluminação com a chegada dos *LEDs*, faz-se necessário compararmos a magnitude das perdas desta tecnologia com a tecnologia convencional *HID*. Neste sentido, estimamos o valor das perdas para o cenário de 100% de ocupação para as duas tecnologias. No caso da tecnologia *LED*, o valor encontrado foi de R$ 51.906.539,43. Para o cenário de 100% com as *HIDs*, o valor encontrado foi de R$ 174.646.486,66.

Esses dados nos permitem concluir que a tecnologia *LED* tem o potencial mínimo, uma vez que não estimamos os impactos das desclassificações dos transformadores, de redução de perdas harmônicas anuais de R$ 122.739.947,23.

A Tabela 22 apresenta um resumo executivo das perdas que foram estimadas na presente pesquisa.

Tabela 22 - Resumo executivo das perdas

	Tecnologia LED	Tecnologia HID	Total	Economia
Cenário atual	R$ 10.203.041,26	R$ 149.229.850,05	R$ 159.432.891,31	-
Cenário LED fp 0,96	R$ 8.968.983,28	-	-	12%
Cenário LED THD 8%	R$ 8.486.309,66	-	-	17%
Cenário 100%	R$ 51.906.539,43	R$ 174.646.486,66	-	R$ 122.739.947,23

Fonte: Elaboração própria

No sentido de auxiliar os profissionais dessa área, criamos um aplicativo, Harm-Trafo, que, com a entrada dos valores das distorções harmônicas, calcula o valor do Fator-k, para o correto dimensionamento do transformador e também o *k-factor*, que faz o redimensionamento do carregamento máximo que um transformador pode alimentar sem que o mesmo possa ser danificado pelas distorções harmônicas.

6.2 Trabalhos Futuros

A principal contribuição desse trabalho foi a elaboração de uma metodologia que estimasse as perdas econômicas das distorções harmônicas do sistema de iluminação pública. No segmento residencial, não há a exigência de alto fator de potência, portanto, fica uma lacuna para que fossem levantados os valores das perdas por distorções das lâmpadas *LED* residenciais.

Como apresentado, as luminárias *LED*, por serem cargas não lineares, aumentam as perdas nos transformadores de distribuição. Como sugestão de trabalho futuro, deixamos a sugestão de levantar essas perdas em um transformador de distribuição a óleo, podendo inclusive comparar o impacto quando são agrupados outros tipos de cargas neste alimentador.

Como consequência das distorções harmônicas, os transformadores devem ter sua capacidade de carregamento reduzida, que implica na aquisição de mais transformadores para atender à demanda ou à substituição do instalado por um de maior potência, acarretando em um sobredimensionamento. Deixamos como sugestão: qual o impacto dessas desclassificações no sistema elétrico?

Uma vez que a tecnologia *LED* também trouxe impactos positivos nas perdas por distorções, sugerimos a criação de uma metodologia para averiguação dos impactos de eficiência energética levando em consideração as distorções harmônicas, visto que, atualmente, os Programas de Eficiência Energética não fazem esse tipo de abordagem.

Bibliografia

[1] Ministério de Minas e Energia - MME, “Plano Nacional de eficiência Energética,” Brasília, 2011.

[2] A. Almeida, G. Zissis, M. Quicheron e P. Bertoldi, “Accelerating the deployment of solid state lighting (SSL) in Europe. JRC Scientif and Policy Reports.,” Luxembourg, 2013.

[3] International Energy Agency, “Ligth´s labour´s lost Policies for energy efficiente lighting,” 2006.

[4] World Bank Group, “Lighting Brazilian Cities: Business Models for Energy Efficiente Public Street Lighting,” 2017.

[5] M. Davidovic, N. Djordjevic, J. Mikulovic, M. Kostic e Z. Radakovic, “Voltage distortion in LED street lighting installations,” *Electrical Engineering,* 2021.

[6] C. Adragna, G. Gritti, A. Raciti, A. R. S e G. Susinni, “Analysis of the Input Current Distortion and Guidelines for Designing High Power Factor Quasi-Resonant Flyback LED Drivers,” *Energies,* 10 June 2020.

[7] A. Djuretic, V. Skerovic, N. Arsic e M. Kostic, “Luminous flux to input power ratio, power factor and harmonics when dimming high-pressure sodium and LED luminaires used in road lighting,” *Lighting Research & Technology,* 20 April 2018.

[8] J. Eveliina, E. Tetri, O. Tapaninen e V. Heikkinen, “A smart LED luminaire for energy savings in pedestrian road lighting.,” *Lighting Research and Technology,* 2015.

[9] A. Wiśniewski, “Calculations of energy savings using lighting control systems,” *Power systems and power electronics,* vol. 68, 2020.

[10] Z. P. Fonseca, C. B. Nascimento e A. A. Badin, “Single-stage PFC bridgeless converter,” *Electronics Letters,* vol. 56, nº 23, 12 November 2020.

[11] G. Abdelmessih, J. Alonso, M. Costa e W. tsai, “Fully Integrated Buck and Boost Converter as a High Efficiency, High-Power-Density Off-Line LED Driver,” *IEEE Transactions on Power Electronics,* vol. 35, 14 November 2020.

[12] C. Cheng e H. Wu, “A cost-effective eletronic lighting driver with high-power-factor and soft-switching for supplying an LED street-light lamp,” *Wiley,* 29 December 2020.

[13] M. Singh, Impact of high frequency conducted voltage disturbances on LED driver circuits, 2017.

[14] S. Ronnberg, M. Bollen, H. Amaris, G. Chang e J. Desmet, “On waveform distortion in the frequency range 2kHz-150kHz,” *Review and research challenges,* 2017.

[15] S. Ngaopitakkul e A. Yoomak, “Investigation and Feasibility Evaluation of Using Nanogrid Technology Integrated Into Road Lighting System,” *IEEEAcess,* 2020.

[16] H. Shareef e O. Krause, “Impact of large-scale installation of LED lamps in a distribution system,” *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences,* 2015.

[17] C. Duarte, “Impactos Econômicos dos harmônicos de corrente das cargas não lineares em redes elétricas de distribuição residenciais,” 2010.

[18] H. Kajihara, “Quality power for electronics,” *Electro- Technology,* vol. 82, nº 5, 1968.

[19] H. McFadden, “Power system analysis-what it can do to industrial plants,” em *Conference Record of the 5th Annual Meeting of the IEEE Industry and General Applications Group*, Chicago, 1970.

[20] P. Lonnstam e M. Knoller, “Voltage quality and voltage tendency recorders,” *Siemens Review*, vol. 36, nº 8, pp. 302-303, 1969.

[21] A. Lidholm, “Measuring techniques applicable to the determination of voltage quality in low-voltage,” *ERA*, vol. 42, nº 5, pp. 99-101, 1969.

[22] B. Konstantinov, “Financial losses due to deterioration of voltage,” *Electric-Technology-USSR*, vol. 1, pp. 119-123, 1970.

[23] R. Aldabó, Qualidade na Energia Elétrica - Efeitos dos distúrbios, diagnósticos e soluções, São Paulo: Artliber, 2013.

[24] R. Leão, R. Sampaio e R. Antunes, Harmônicos em Sistemas Elétricos, Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

[25] M. Masoum e F. Fuchs, Power Quality in Power Systems and Electrical Machines, Elsevier, 2015.

[26] Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS, “Padroões de Desempenho da Rede Básica - Submódulo 2.2,” 2002.

[27] N. Kagan, Estimação de indicadores de qualidade da energía elétrica, São Paulo: Blucher, 2020.

[28] IEEE, *IEEE 1159 - Recommended Practice for monitoring Electric Power Quality,* 2019.

[29] IEC, “International Electrotechnical Comission,” [Online]. Available: https://www.iec.ch/homepage. [Acesso em 15 Março 2022].

[30] IEC, *IEC 61000-4-30 Power Quality Measurement Methods,* 2015.

[31] International Council on Large Electric Systems – CIGRÈ, “http://www.cigre.org/,” CIGRÈ, [Online]. Available: http://www.cigre.org/. [Acesso em 03 01 2023].

[32] “ Comitê Nacional Brasileiro de Produção e Transmissão de Energia Elétrica - CIGRÉ-Brasil,” CIGRÉ-Brasil, [Online]. Available: http://www.cigre.org.br/. [Acesso em 03 01 2023].

[33] ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica, “Resolução Normativa ANEEL Nº 956 DE 07/12/2021,” Brasília-DF, 2021.

[34] S. Deckmann e J. Pomilio, *Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica,* 2020.

[35] Inmetro, *Portaria Nº 62, de 17 de fevereiro de 2022 - Aprova o Regulamento Técnico da Qualidade e os Requisitos de Avaliação da Conformidade para Luminárias para Iluminação Pública Viária - Consolidado.,* Rio de Janeiro, 2022.

[36] R. Dugan, M. McGranaghan, S. Santoso e H. Beaty, Electrical Power Systems Quality, New York: McGraw-Hill, 2003.

[37] O. J, *Qualidade da energia elétrica: definição e análise dos itens de qualidade. Cap. II, Universidade Federal de Uberlândia, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Departamento de Engenharia Elétrica, Grupo de Qualidade e Racionalização da Energia Elétrica.,* 2000.

[38] S. C, Power Quality, CRC Press LLC, 2002.

[39] H. S. Bronzeado, Á. J. P. Ramos, J. D. Oliveira, J. P. G. Abreu e A. e. B. C. A. L. Arruda, “Uma proposta de Termos e Definições Associados à Qualidade da Energia Elétrica,” em *II SBQEE* , São Lourenço - MG: EFEI, 1997.

[40] A. Farias, D. Arentz e U. Castellano, “Sobrecarga Harmônica e Implantação de Sistema de Monitoramento e Alarme nas Subestações de Ibiúna e Foz de Iguaçu de Furnas.,” *SBQEE. Anais. Aracajú,* 2003.

[41] M. Isoni, *A moderna Eficientização energética e seus possíveis efeitos sobre o desempenho operacional de equipamentos e instalações elétricas,* 2001.

[42] L. Silva, *Efeitos das distorções harmônicas (tensões e correntes) e desequilíbrios (tensões) em medidores eletrônicos trifásicos de energia elétrica,* Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2008.

[43] IEEE, *1100-2005 - Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment.*

[44] IEEE, *C57.110-2008 Recommended Practice for Establishing Liquid-Filled and Dry-Type Power and Distribution Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents.*

[45] British Standards Institution, *Three-phase oil-immersed distribution transformers 50 Hz, from 50 kVA to 2500 kVA with highest voltage for equipment not exceeding 36 kV – Part 3 - BS EN 50464-3. London, 2007.*

[46] F. Pinheiro, “Concepções sobre a medição na história da filosofia,” *PERI,* 2017.

[47] IEC, *61000-4-30:2015 Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods.*

[48] IEEE, *519-2014 Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems.*

[49] M. Suhet, *Análise de Tecnicas de Medição de Potência Reativa em Medidores Eletrônicos. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, COPPE/UFRJ.,* Rio de Janeiro, 2008.

[50] IEC, *61000-2-2:2002 Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2-2: Environment - Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems..*

[51] C. Mello, *Efeitos das Tensões e Correntes Harmônicas sobre o Sistema Elétrico e seus Componentes, Dissertação de Mestrado nº 51, PPGEE, UFMG,1988.*

[52] I. Boldea e S. Nasar, *The Induction Machines Design Handbook, 2nd ed. Taylor & Francis Group, LLC, 2010..*

[53] K. Vasudevan, G. Rao e P. Rao, *Electrical Machines II, Indian Institute of Technology Madras, vol. 42, n. 28, 2011..*

[54] R. Vedam e M. Sarma, Power Quality VAR Compensation in Power Systems, Taylor & Francis Group, LLC, 2009.

[55] J. Pomílio e S. Deckmann, “Characterization and compensation of harmonics and reactive power of residential and commercial loads.,” *IEEE Transactions on Power Delivery,* 2007.

[56] D. Gonzales, *"Influência de Correntes Harmônicas na Perda de Vida ùtil de Transformadores de Distribuição" - Dissertação de Mestrado, FEIS-UNESP,* 2002.

[57] E. Fuchs, D. Roesler e K. Kovacs, “Aging of electrical appliances due to harmonics of the power system's,” *IEEE transactions on Power Delivery,* julho 1986.

[58] A. Naves e F. Garcia, “Efeitos harmônicos da aplicação de bancos de capacitores em indústrias eletrointesivas sobre a rede elétrica de alta tensão - Casos reais,” em *VI SBQEE,* Belém - PA, 2005.

[59] F. Tofoli, S. Sanhueza e A. Oliveira, “On the study of losses in cables ans transformers

in nonsinusoidal conditions," *IEEE Transactions Power Delivery*, abril 2006.

[60] J. Resende, M. Samesina, D. Gomes, L. Couto e J. Júnior, "Avaliação das perdas técnicas em sistemas elétricos de distribuição suprindo cargas não lineares.," em *V SBQEE*, Aracajú - SE, 2003.

[61] R. L. Boylestad, Introdução à análise de circuitos. 10ª. ed., Pearson Education do Brasil, 2004.

[62] J. D. Irwin e R. M. Nelms, Análise Básica de Circuitos para Engenharia. 10ª. ed., Rio de Janeiro: LTC Editora, 2013.

[63] A. Firlit, *Power Theory with Non-sinusoidal Waveforms. In: BAGGINI, A. Handbook of Power Quality. 1ª. ed. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2008.*.

[64] H. Akagi, E. H. Watanabe e M. Aredes, Instantaneous Power Theory and Applications to power conditioning, Wiley-IEEE Press, 2007.

[65] IEEE, *1459:2010 Trial-Use Standard Definitions for the Measurement of Electrical Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalaced Conditions*, IEEE Standard.

[66] C. Budeanu, *Puissances réactives et fictives (Potências reativas e fictícias). Bucarest: Institut National Roumain, 1927.*.

[67] L. Czarnecki, *What is wrong in Budeanu concept of reactive power and distortion power and why it should be abandoned. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, v. IM-36, n. 3, p. 834–837, Setembro 1987.*.

[68] J. Pretorius, J. Van Wyk e P. Swart, *An Evaluation of Some Alternative Methods of Power Resolutions in a Large Insdustrial Plant, Proceedings of the Eighths International Conference on Harmonics and Quality of Power, vol. 1.*.

[69] C. Penna e P. Ajeje, "O Impacto do Programas de Eficiência Energética na Qualidade de Energia Elétrica".

[70] D. Seeto, S. He e C. Woo, "Princing Eletric Harmonics," *Energy*, pp. 617-621, 1995.

[71] IBGE, "Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Demográfico 2010," 2010. [Online]. Available: www.censo2010.ibge.gov.br. [Acesso em 2021 Abril 15].

[72] Kircnher Consultoria em energia, "Relatório da Potência Instalada e do Consumo Estimado do Parque de Iluminação Pública Brasileiro," 2019.

[73] Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, *Portaria Inmetro 483/2010 - Requisitos de Avaliação da Conformidade para Lâmpadas à Vapor de Sódio.*

[74] Exati, "Blog Exati," Exati, 2. [Online]. Available: https://blog.exati.com.br/iluminacao-publica-de-led/. [Acesso em 23 08 2022].

[75] Inmetro, "Inmetro," [Online]. Available: http://www.inmetro.gov.br/prodcert/certificados/lista.asp. [Acesso em 14 08 2023].

[76] O. Lopes, A. Pereira, M. Fortes, A. Fragoso e G. Tavares, "Efeito Harmônico da Associação de Lâmpadas Fluorescentes Compactas," em *XI Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica*, 2015.

[77] F. Belchior, M. Parentoni, R. Ramalho, I. Lino, L. Emerencio e A. Bernardi, *Análise experimental do acréscimo de perdas em transformadores devido à circulação de correntes distorcidas.*, 2012.

[78] F. Délvio, N. Fernando, J. Francisco, I. Abreu, J. Parentoni e P. Silveira, *Impacto causado pelo uso de cargas não lineares em transformadores*, 2010.

[79] WEG, WEG, [Online]. Available: https://www.weg.net/catalog/weg/. [Acesso em 02 12 2023].

[80] ANEEL, *Resolução Normativa Nº 1.000, de 7 de dezembro de 2021*, Distrito Federal, 2021.

[81] "Dados Estatísticos Aduaneiros," Receita Federal do Brasil, 2021. [Online]. Available: http://normas.receita.fazenda.gov.br/sijut2consulta/link.action?idAto=72225.

Apêndice A – Levantamento dos registros ativos de luminárias *LED* certificadas

Potência (W)	Quantidade de modelos	Percentual de registros	Número de luminárias LED
150	128	8,63%	1.392.835
100	119	8,02%	1.294.902
120	117	7,88%	1.273.139
60	99	6,67%	1.077.271
50	91	6,13%	990.219
200	85	5,73%	924.930
30	76	5,12%	826.996
80	75	5,05%	816.115
40	68	4,58%	739.944
180	61	4,11%	663.773
90	44	2,96%	478.787
70	40	2,70%	435.261
130	20	1,35%	217.631
55	19	1,28%	206.749
240	19	1,28%	206.749
110	17	1,15%	184.986
140	17	1,15%	184.986
20	15	1,01%	163.223
170	14	0,94%	152.341
250	14	0,94%	152.341
135	13	0,88%	141.460
58	11	0,74%	119.697
54	9	0,61%	97.934
75	9	0,61%	97.934
65	8	0,54%	87.052
115	8	0,54%	87.052
160	8	0,54%	87.052
270	8	0,54%	87.052
22	7	0,47%	76.171
35	7	0,47%	76.171
46	7	0,47%	76.171
165	7	0,47%	76.171
175	7	0,47%	76.171
190	7	0,47%	76.171
220	7	0,47%	76.171
44	6	0,40%	65.289
45	6	0,40%	65.289
52	6	0,40%	65.289
91	6	0,40%	65.289
145	6	0,40%	65.289
210	6	0,40%	65.289

37	5	0,34%	54.408
48	5	0,34%	54.408
77	5	0,34%	54.408
95	5	0,34%	54.408
117	5	0,34%	54.408
194	5	0,34%	54.408
68	4	0,27%	43.526
72	4	0,27%	43.526
87	4	0,27%	43.526
116	4	0,27%	43.526
128	4	0,27%	43.526
147	4	0,27%	43.526
154	4	0,27%	43.526
230	4	0,27%	43.526
245	4	0,27%	43.526
400	4	0,27%	43.526
600	4	0,27%	43.526
33	3	0,20%	32.645
36	3	0,20%	32.645
38	3	0,20%	32.645
42	3	0,20%	32.645
51	3	0,20%	32.645
78	3	0,20%	32.645
98	3	0,20%	32.645
105	3	0,20%	32.645
148	3	0,20%	32.645
163	3	0,20%	32.645
225	3	0,20%	32.645
15	2	0,13%	21.763
24	2	0,13%	21.763
25	2	0,13%	21.763
47	2	0,13%	21.763
64	2	0,13%	21.763
74	2	0,13%	21.763
88	2	0,13%	21.763
94	2	0,13%	21.763
96	2	0,13%	21.763
97	2	0,13%	21.763
106	2	0,13%	21.763
113	2	0,13%	21.763
125	2	0,13%	21.763
155	2	0,13%	21.763
173	2	0,13%	21.763
174	2	0,13%	21.763
181	2	0,13%	21.763
186	2	0,13%	21.763
201	2	0,13%	21.763
207	2	0,13%	21.763

215	2	0,13%	21.763
233	2	0,13%	21.763
235	2	0,13%	21.763
260	2	0,13%	21.763
274	2	0,13%	21.763
26	1	0,07%	10.882
34	1	0,07%	10.882
39	1	0,07%	10.882
61	1	0,07%	10.882
62	1	0,07%	10.882
66	1	0,07%	10.882
71	1	0,07%	10.882
83	1	0,07%	10.882
85	1	0,07%	10.882
101	1	0,07%	10.882
108	1	0,07%	10.882
112	1	0,07%	10.882
124	1	0,07%	10.882
132	1	0,07%	10.882
142	1	0,07%	10.882
143	1	0,07%	10.882
149	1	0,07%	10.882
157	1	0,07%	10.882
161	1	0,07%	10.882
167	1	0,07%	10.882
179	1	0,07%	10.882
187	1	0,07%	10.882
209	1	0,07%	10.882
247	1	0,07%	10.882
255	1	0,07%	10.882
265	1	0,07%	10.882
290	1	0,07%	10.882
300	1	0,07%	10.882
302	1	0,07%	10.882
350	1	0,07%	10.882

Apêndice B - Medição de parâmetros elétricos de Luminárias *LED*

DESCRIÇÃO	S	P	Q	fp	DHTi	D_I	D_V	P_H	D_H
LUMINÁRIA LED 240W 4000K	246,00	241,13	45,85	0,9827	5,3	13,02	0,22	0,12	21,01
LUMINÁRIA LED 240W 4000K	245,00	241,36	45,90	0,9825	6,4	15,52	0,22	1,06	14,78
LUMINÁRIA LED 240W 4000K	243,90	239,27	46,50	0,9814	5,4	13,20	0,22	0,13	13,34
LUMINÁRIA LED 220W 4000K	223,35	218,74	44,63	0,9778	6,2	13,82	0,20	0,26	4,79
LUMINÁRIA LED 220W 4000K	219,98	215,68	44,63	0,9795	5,1	11,08	0,20	0,39	11,19
LUMINÁRIA LED 220W 4000K	222,01	217,11	45,36	0,9788	6,3	13,82	0,20	0,10	13,86
LUMINÁRIA LED 200W 4000K	209,87	197,70	69,65	0,9425	7,2	14,93	0,19	0,95	24,72
LUMINÁRIA LED 180W 4000K	182,93	178,29	39,52	0,9754	3,7	6,83	0,16	0,01	10,26
LUMINÁRIA LED 180W 4000K	182,29	178,13	39,52	0,9760	3,6	6,58	0,16	0,43	10,22
LUMINÁRIA LED 180W 4000K	183,80	179,95	39,61	0,9763	4,0	7,38	0,16	0,80	14,85
LUMINÁRIA LED 150W 4000K	146,03	142,31	34,33	0,9721	4,6	6,65	0,13	0,26	8,96
LUMINÁRIA LED 150W 4000K	148,64	144,69	34,21	0,9737	4,8	7,06	0,13	0,30	12,73
LUMINÁRIA LED 150W 4000K	147,14	143,19	34,08	0,9729	4,2	6,10	0,13	0,04	8,87
LUMINÁRIA LED 120W 4000K	124,63	119,58	35,12	0,9585	6,0	7,41	0,11	0,25	8,65
LUMINÁRIA LED 120W 4000K	125,98	120,63	34,90	0,9593	7,1	8,90	0,11	0,22	14,44
LUMINÁRIA LED 120W 4000K	124,41	119,80	33,55	0,9636	5,4	6,61	0,11	0,30	12,24
LUMINÁRIA LED 100W 4000K	101,93	100,10	19,21	0,9804	5,6	5,65	0,09	0,15	5,94
LUMINÁRIA LED 100W 4000K	103,18	101,30	19,61	0,9813	5,9	6,04	0,09	0,20	7,15
LUMINÁRIA LED 100W 4000K	104,06	102,10	20,10	0,9807	7,0	7,24	0,09	0,10	6,30
LUMINÁRIA LED 80W 4000K	85,90	83,20	20,96	0,9695	7,1	6,08	0,08	0,10	6,57
LUMINÁRIA LED 80W 4000K	85,14	82,50	21,05	0,9671	7,6	6,46	0,08	0,20	5,15
LUMINÁRIA LED 80W 4000K	85,58	82,80	21,64	0,9674	8,1	6,84	0,08	0,30	8,54
LUMINÁRIA LED 240W 5000K	244,66	241,36	45,82	0,9825	6,3	15,49	0,22	1,07	8,36
LUMINÁRIA LED 220W 5000K	219,88	215,82	44,63	0,9795	5,1	11,29	0,20	0,45	8,38
LUMINÁRIA LED 220W 5000K	221,74	217,19	45,36	0,9789	6,1	13,59	0,20	0,08	8,57
LUMINÁRIA LED 180W 5000K	182,34	178,68	39,53	0,9753	3,9	7,05	0,16	0,92	9,67
LUMINÁRIA LED 150W 5000K	148,64	144,65	34,26	0,9765	4,6	6,72	0,13	0,43	14,92
LUMINÁRIA LED 150W 5000K	147,11	143,18	34,08	0,9727	4,2	6,11	0,13	1,19	20,82
LUMINÁRIA LED 120W 5000K	125,91	120,82	35,79	0,9591	6,51	8,16	0,11	0,14	8,13
LUMINÁRIA LED 120W 5000K	124,42	119,90	33,48	0,9634	5,33	6,60	0,11	0,38	11,47
LUMINÁRIA LED 100W 5000K	104,39	102,06	21,39	0,9786	7,1	7,37	0,09	0,08	9,20
LUMINÁRIA LED 100W 5000K	102,22	101,27	20,20	0,9808	6,0	6,07	0,09	1,25	8,62
LUMINÁRIA LED 80W 5000K	86,01	83,18	21,51	0,9685	6,9	5,87	0,08	0,10	8,95
LUMINÁRIA LED 80W 5000K	85,35	82,50	21,28	0,9679	6,4	5,38	0,08	0,09	9,30
LUMINÁRIA LED 80W 5000K	85,35	82,70	21,83	0,9656	8,0	6,77	0,08	0,21	5,53
LUMINÁRIA LED 60W 5000K	62,07	60,19	15,66	0,9682	6,7	4,12	0,06	0,20	7,28
LUMINÁRIA LED 60W 5000K	62,15	60,09	15,49	0,9676	7,2	4,45	0,06	0,17	8,45
LUMINÁRIA LED 30W 5000K	34,56	31,45	14,77	0,9104	12,3	4,16	0,03	0,13	5,88
LUMINÁRIA LED 30W 5000K	34,53	31,58	14,72	0,9097	12,8	4,31	0,03	0,35	6,54
LUMINÁRIA LED 120W 5000K	125,20	122,83	24,51	0,9806	4,9	6,12	0,11	0,09	6,36

LUMINÁRIA LED 120W 5000K	123,80	121,30	24,15	0,9809	4,6	5,64	0,11	0,80	15,28
LUMINÁRIA LED 200W 4000K	202,60	197,20	46,20	0,9735	8,3	16,78	0,18	0,23	14,52
LUMINÁRIA LED 180W 4000K	181,35	175,75	44,29	0,9693	6,6	11,91	0,16	0,45	15,91
LUMINÁRIA LED 180W 4000K	189,88	176,94	71,35	0,9691	7,6	13,79	0,16	0,31	53,76
LUMINÁRIA LED 180W 4000K	181,77	176,47	43,25	0,9712	7,6	13,81	0,16	0,22	13,11
LUMINÁRIA LED 180W 4000K	152,85	149,03	35,51	0,9728	4,4	6,74	0,14	0,53	10,95
LUMINÁRIA LED 80W 4000K	81,60	80,41	14,11	0,9849	7,0	5,70	0,07	0,09	4,59
LUMINÁRIA LED 108W 5000K	113,00	108,50	31,60	0,9603	6,0	6,74	0,10	0,40	8,68
LUMINÁRIA LED 108W 5000K	112,10	107,80	30,90	0,9612	5,4	6,01	0,10	0,10	2,08
LUMINÁRIA LED 108W 5000K	111,30	106,90	30,80	0,9610	5,5	6,09	0,10	0,10	2,74
LUMINÁRIA LED 135W 5000K	142,10	135,40	42,60	0,9539	7,8	11,04	0,13	0,20	1,76
LUMINÁRIA LED 135W 5000K	141,30	134,40	43,20	0,9522	6,2	8,78	0,13	0,10	9,12
LUMINÁRIA LED 50W 4000K	51,50	49,30	15,00	0,9570	11,3	5,79	0,05	0,10	2,71
LUMINÁRIA LED 50W 4000K	51,70	49,30	15,90	0,9528	11,8	6,01	0,05	0,10	4,59
LUMINÁRIA LED 60W 4000K	59,40	57,00	16,70	0,9598	5,9	3,47	0,05	0,10	4,14
LUMINÁRIA LED 60W 4000K	60,10	57,70	16,60	0,9609	5,7	3,39	0,05	0,10	3,08
LUMINÁRIA LED 80W 4000K	80,50	79,30	13,80	0,9851	8,7	6,95	0,07	0,10	3,35
LUMINARIA LED 300W 5000K	305,02	291,32	90,37	0,9551	13,6	41,11	0,27	0,03	9,98
LUMINARIA LED 300W 5000K	304,58	290,90	90,24	0,9551	13,2	39,87	0,27	0,10	12,05
LUMINARIA LED 300W 5000K	304,35	290,50	90,76	0,9545	13,4	40,32	0,27	0,17	13,56
LUMINARIA LED 250W 5000K	257,72	244,52	81,41	0,9488	13,0	33,33	0,23	0,07	6,79
LUMINARIA LED 200W 5000K	211,82	198,60	73,65	0,9376	13,2	27,21	0,19	1,30	40,48
LUMINARIA LED 200W 5000K	211,90	198,66	73,74	0,9375	13,1	27,02	0,19	1,26	40,30
LUMINARIA LED 200W 5000K	211,92	198,70	73,69	0,9376	13,2	27,25	0,19	1,38	39,57
LUMINARIA LED 150W 5000K	163,08	149,54	65,05	0,9170	12,8	19,95	0,14	0,52	43,50
LUMINARIA LED 150W 5000K	163,14	149,60	65,07	0,9170	12,9	20,10	0,14	0,70	43,83
LUMINARIA LED 150W 5000K	163,05	149,50	65,08	0,9169	13,2	20,59	0,14	0,52	42,84
LUMINARIA LED 100W 5000K	109,55	100,80	42,91	0,9201	13,1	13,65	0,09	1,24	30,86
LUMINARIA LED 100W 5000K	109,63	100,85	42,99	0,9199	13,2	13,75	0,09	1,35	31,26
LUMINARIA LED 100W 5000K	109,65	100,91	42,90	0,9203	13,1	13,64	0,09	1,43	31,48
LUMINARIA LED 50W 5000K	51,66	49,20	15,77	0,9523	12,9	6,59	0,05	0,23	3,79
LUMINARIA LED 50W 5000K	51,66	49,20	15,77	0,9523	13,1	6,69	0,05	0,23	3,61
LUMINARIA LED 50W 5000K	52,60	50,10	16,02	0,9525	13,0	6,64	0,05	1,17	10,73
LUMINARIA LED 50W 5700K	52,00	49,52	15,87	0,9523	12,5	6,33	0,05	0,55	8,64
LUMINARIA LED 50W 5700K	51,94	49,47	15,83	0,9524	12,5	6,35	0,05	0,50	8,22
LUMINARIA LED 50W 5700K	51,94	49,48	15,82	0,9525	12,5	6,33	0,05	0,55	8,56
LUMINARIA LED 200W 5700K	210,37	197,24	73,15	0,9376	12,7	26,43	0,19	0,02	5,30
LUMINARIA LED 200W 5700K	211,60	198,40	73,58	0,9376	12,7	26,63	0,19	0,75	19,65
LUMINARIA LED 200W 5700K	211,52	198,32	73,55	0,9376	12,7	26,61	0,19	0,53	15,88
LUMINARIA LED 30W 6000K	31,01	29,20	10,45	0,9415	9,5	2,90	0,03	0,01	4,04
LUMINARIA LED 30W 6000K	31,48	29,78	10,22	0,9458	9,8	3,05	0,03	0,01	4,32
LUMINARIA LED 30W 6000K	30,68	28,90	10,30	0,9420	9,2	2,79	0,03	0,01	4,07
LUMINARIA LED 50W 5000K	55,08	52,83	15,57	0,9592	5,3	2,91	0,05	0,06	5,66
LUMINARIA LED 50W 5000K	55,06	52,84	15,49	0,9596	5,3	2,89	0,05	0,04	5,29
LUMINARIA LED 50W 5000K	53,66	51,50	15,08	0,9597	5,7	3,07	0,05	0,03	4,74
LUMINARIA LED 30W 5000K	34,17	32,35	11,02	0,9466	9,4	3,16	0,03	0,02	4,35

LUMINARIA LED 30W 5000K	33,75	31,90	11,02	0,9452	8,5	2,84	0,03	0,09	4,70
LUMINARIA LED 150W 5000K	161,25	148,87	61,97	0,9232	12,5	19,90	0,14	0,07	8,14
LUMINARIA LED 150W 5000K	161,13	148,77	61,89	0,9233	12,5	19,95	0,14	0,05	7,12
LUMINARIA LED 150W 5000K	161,14	148,78	61,89	0,9233	12,4	19,87	0,14	0,12	8,29
LUMINARIA LED 100W 5000K	106,41	97,96	41,55	0,9206	12,6	13,25	0,09	0,01	7,13
LUMINARIA LED 100W 5000K	106,33	97,90	41,50	0,9207	12,6	13,25	0,09	0,01	6,32

Apêndice C - Medição para fator de compensação

Medições	Pot. Ativa (W)	FP	THD_i Médio (%)	THD_i Mínimo (%)	THD_i Máximo (%)
1 a 1	29,60	0,95	8,72	8,29	9,97
1 a 2	79,28	0,96	5,80	5,71	5,95
1 a 3	129,53	0,97	6,31	6,20	6,38
1 a 4	182,22	0,97	5,53	5,50	5,58
1 a 5	229,83	0,97	5,43	5,38	5,47
1 a 6	256,15	0,96	5,70	5,65	5,73
1 a 7	284,70	0,96	5,98	5,95	6,02
1 a 8	335,86	0,96	5,95	5,90	6,00
1 a 9	376,94	0,96	6,12	6,09	6,15
1 a 10	422,12	0,96	5,64	5,60	5,66
1 a 11	462,63	0,96	5,84	5,81	5,85
1 a 12	491,39	0,96	5,97	5,94	6,00
1 a 13	541,62	0,96	6,00	5,97	6,04
1 a 14	590,21	0,96	6,20	6,17	6,23
1 a 15	618,72	0,96	6,15	6,13	6,19
1 a 16	641,41	0,95	6,37	6,34	6,39
1 a 17	670,21	0,95	6,54	6,51	6,56
1 a 18	715,74	0,96	6,27	6,25	6,30
1 a 19	763,87	0,95	6,59	6,56	6,61
1 a 20	793,61	0,95	6,51	6,50	6,53
Fator de Compensação			**0,75**	**0,78**	**0,65**

Apêndice D – Dados de Medição em lâmpadas *H*

DESCRIÇÃO	S	P	Q	fp	S1	fp1	DI	DV	PH	DH
RVS 70W ENCE	90,76	87,73	23,26	0,9666	87,66	0,9988	22,2	0,03	0,18	7,81
RVS 100W ENCE	118,36	112,73	36,08	0,9524	115,78	0,9716	22,43	0,03	0,24	10,08
RVS 150W ENCE	185,49	176,74	56,31	0,9528	181,83	0,9698	34,64	0,05	0,4	12
RVS 250W ENCE	304,06	291,87	85,25	0,9599	296,61	0,9784	59,53	0,12	1,67	30,5
RVS 400W ENCE	463,65	444,44	132,08	0,9586	450,96	0,9726	78,87	0,18	5,84	73,18
RVS 70W PROCEL	88,07	83,91	26,66	0,953	83,27	0,9966	24,85	0,02	0,92	14,27
RVS 100W PROCEL	117,91	112,85	34,16	0,9571	115,69	0,9745	21,6	0,03	0,11	7,21
RVS 150W PROCEL	186,55	178,85	53,2	0,9585	181,94	0,9761	35,99	0,05	1,26	20,07
RVS 250W PROCEL	300,45	291,18	74,66	0,9686	295,05	0,9859	56,41	0,09	0,29	5,74
RVS 400W PROCEL	469,35	446,46	143,95	0,9518	457,85	0,9702	91,39	0,18	2,25	47,98
RVS 70W	91,12	88,4	22,07	0,9702	87,18	0,9977	22,87	0,03	1,42	13,32
RVS 100W	119,21	113,22	37,25	0,9499	115,03	0,9735	22,13	0,02	1,24	22,09
RVS 150W	187,45	178,11	58,42	0,9502	183,25	0,9709	34,85	0,05	0,19	18,48
RVS 250W	299,85	287,89	83,86	0,9601	290,01	0,9879	59,15	0,12	1,39	48
RVS 400W	461,29	440,81	135,93	0,9556	451,48	0,9722	86,23	0,14	1,88	38,91
RVM 70W	93,17	90,83	20,75	0,9749	90,86	0,9986	19,32	0,03	0,1	7,25
RVM 100W	123,49	121,44	22,45	0,9833	121,68	0,9967	19,59	0,04	0,16	7,72
RVM 150W	186,54	177,19	58,34	0,9498	183,65	0,9639	30,54	0,06	0,17	11,71
RVM 250W	313,52	303,41	78,59	0,9681	304,49	0,9947	71,22	0,12	0,53	22,48
RVM 400W	482,1	476	76,2	0,9874	475,25	1	75,47	0,19	0,75	29,35
RVM 70W	93,75	90,33	25,1	0,9635	91,19	0,9897	19,77	0,04	0,08	9,11
RVM 100W	122,26	120,25	22,05	0,9836	120,56	0,9952	17,6	0,04	0,27	10,1
RVM 150W	190,27	180,83	59,18	0,9504	184,12	0,9612	31,21	0,06	3,85	36,22
RVM 250W	322,93	313,3	78,25	0,9702	313,06	0,9923	73,96	0,09	2,65	28,24
RVM 400W	470,64	465,04	72,39	0,9881	462,91	0,9899	72,04	0,19	6,81	44,52
RVM 70W	91,98	89,33	21,92	0,9712	89,91	0,9912	18,91	0,03	0,21	4,31
RVM 100W	126,56	124,46	22,93	0,9835	123,93	0,9941	18,46	0,04	1,26	17,77
RVM 150W	184,64	175,42	57,6	0,9501	180,36	0,9702	31,18	0,07	0,43	24,22
RVM 250W	327,77	317,66	80,79	0,9692	315,82	0,991	73,5	0,09	4,68	47,59
RVM 400W	471,6	465,83	73,59	0,9878	464,11	0,9904	75,88	0,14	6,18	34,94

Anexo A – Dados do transformador WEG a óleo de 112,5kVA

FOLHA DE DADOS

Transformador Óleo Distribuição

Identificação

Código do produto:	16343305
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	112.5		13.8 -6 x 0.6kV	Triângulo	CST
Baixa Tensão	112.5		0.22	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 °C)

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 °C - ONAN	100%
Perdas a vazio (W)	280.0
Perdas em carga (W)	
Perda Total (W)	1520.0
Corrente de excitação (%)	2.5

	Base		Impedância @ 85.0 °C - ONAN (%)
Alta/Baixa tensão	Posição (kV)	Potência (kVA)	3.5
	13.8 / 0.22	112.5	

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	2.89	2.47	1.16

Rev.	Resumo das modificações	Executado	Verificado	Data

Executor			Página	Revisão
Verificador				
Data	15/12/2023		1 / 2	

FOLHA DE DADOS

Transformador Óleo Distribuição

Fator de Carga [%]	Rendimento		
	ONAN (Φ = 0.8)	ONAN (Φ = 0.9)	ONAN (Φ = 1)
25	98.41	98.59	98.73
50	98.7	98.84	98.95
75	98.57	98.72	98.85
100	98.33	98.52	98.66

Características construtivas

Forma construtiva :	Selado
Líquido 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			Página	Revisão
Verificador				
Data	15/12/2023		2 / 2	