

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - UNIFEI  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
ELÉTRICA  
ENGENHARIA ELÉTRICA

Efeitos da Disseminação de Lâmpadas LED  
nos Sistemas de Distribuição.

Ana Luísa do Amaral Batista

Itajubá, 17 de dezembro de 2020

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - UNIFEI  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
ELÉTRICA  
ENGENHARIA ELÉTRICA**

**Ana Luísa do Amaral Batista**

**Efeitos da Disseminação de Lâmpadas LED  
nos Sistemas de Distribuição.**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

**Área de Concentração: Sistema Elétrico de Potência**

**Orientador: Prof. Dr. José Maria de Carvalho Filho**

**Coorientador: Prof. Dr. Thiago Clé de Oliveira**

**17 de dezembro de 2020**

**Itajubá**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - UNIFEI  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
ELÉTRICA  
ENGENHARIA ELÉTRICA

# Efeitos da Disseminação de Lâmpadas LED nos Sistemas de Distribuição.

Ana Luísa do Amaral Batista

Dissertação aprovada por banca examinadora em  
17 de Dezembro de 2020, conferindo ao autor o  
título de **Mestre em Ciências em Engenharia  
Elétrica.**

***Banca Examinadora:***

Prof. Dr. José Maria de Carvalho Filho  
Prof. Dr. Thiago Clé de Oliveira  
Prof. Dr. Fernando Nunes Belchior  
Prof. Dr. José Eugênio Lopes de Almeida

Itajubá  
2020

Ana Luísa do Amaral Batista

## **Efeitos da Disseminação de Lâmpadas LED nos Sistemas de Distribuição**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

Trabalho aprovado. Itajubá, 17 de Dezembro de 2020:

---

**Prof. Dr. José Maria de Carvalho  
Filho**  
Orientador

---

**Prof. Dr. Thiago Clé de Oliveira**  
Coorientador

---

**Prof. Dr. Fernando Nunes Belchior**

---

**Prof. Dr. José Eugênio Lopes de  
Almeida**

Itajubá  
17 de dezembro de 2020

# Agradecimentos

Agradeço a Deus por ter me dado força a cada dia para completar essa conquista. Aos meus pais que me deram todo suporte e apoio, nesta e em todas as etapas da minha vida e aos meus familiares sempre presentes.

Agradeço ao professor e membro desta banca Fernando Belchior pelo incentivo a dar continuidade ao Trabalho de Conclusão de Graduação. A Bruna Lopes, que foi minha dupla neste trabalho, por me permitir dar continuidade a este estudo.

Agradeço aos professores José Maria e Thiago Clé que toparam o desafio de me orientarem na continuidade do desenvolvimento dessa pesquisa. Ao Lúcio Mota sempre presente e disponível para me ajudar no laboratório e nas medições em campo.

Agradeço a UNIFEI por ter me formado como profissional. E a CAPES e a FUPAI pelo apoio financeiro a este estudo, com a bolsa e com o fornecimento de recursos, respectivamente. Agradeço também as igrejas Matriz de Santo Antônio, Matriz Nossa Senhora da Soledade, Matriz de São Benedito e ao Santuário Nossa Senhora da Agonia pela disponibilidade na realização das medições. E ainda a SX Lighting e a GSI pela parceria.

Agradeço aos meus amigos, principalmente com aqueles que dividi os tempos de mestrado, Kely, Nicolas, Fernando, Elisa, Bruno, Leonardo e Marcos. Também aos estudantes da graduação que contribuíram com este trabalho, Rauny, Jéssica, Flávio, Henrique e Júlia.

*"Faça o teu melhor, na condição que você tem, enquanto você não tem condições melhores, para fazer melhor ainda!"*  
*(Mário Sergio Cortella)*

# Resumo

O presente trabalho apresenta os resultados de uma investigação do impacto dos distúrbios da qualidade da energia elétrica nas tecnologia LED de iluminação. Tais distúrbios quando presentes no sistema elétrico, podem causar danos aos equipamentos mais sensíveis.

Ao mesmo tempo, a não-linearidade das novas tecnologias de iluminação pode gerar poluições no sistema de distribuição e conseqüentemente causarem problemas de qualidade da energia elétrica no sistema de distribuição. Neste cenário, a disseminação do uso das lâmpadas e refletores LED nos últimos anos se tornou uma preocupação de diversos pesquisadores no mundo.

A fim de determinar essa relação causa-efeito entre a iluminação LED e o sistema de distribuição, este trabalho utilizou lâmpadas de baixa potência, normalmente utilizadas na iluminação residencial e lâmpadas de mais alta potência, utilizadas na indústria e para iluminação pública.

Essas lâmpadas foram testadas em ambiente laboratorial, onde é possível controlar as variáveis a fim de determinar o comportamento singular de cada tecnologia estudada. Adicionalmente, o impacto desta nova tecnologia de iluminação sobre os indicadores de qualidade de energia nos sistemas de distribuição pôde ser verificado através de medições em instalações que apresentam grandes quantidades de lâmpadas LED.

**Palavras-chaves:** Qualidade da Energia Elétrica. Sistema de Distribuição. Lâmpadas LED.

# Abstract

This work presents the results of an investigation of the impact of power quality disturbances in LED lighting technology. When existing such disturbances in the electrical system, they can cause damage to the most sensitive equipments.

At the same time, the non-linearity feature of new lighting technologies may generate disturbances in the distribution system and consequently, cause power quality problems in the distribution system. In this scene, the widespread use of LED lamps and flooglights, in recent years, has become a concern for several worldwide's researchers.

In order to determine this cause-effect relationship between LED lighting and the distribution system, this work tested low power lamps, normally used in residential illumination and higher power lamps, used in industry and for public lighting.

These lamps were tested in a laboratory setting, where it was possible to control the variables in order to determine the unique behavior of each technology studied. In addition, the new lighting technology's impact on the power quality indicators in the distribution systems could be verified through measurements in establishment that have large quantities of LED lamps.

**Key-words:** Eletric Power Quality. Distribution System. LED Lamps.

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Matriz Energética Mundial . . . . .	22
Figura 2 – Pesquisa Mercado de Iluminação 2013 . . . . .	23
Figura 3 – Pesquisa Mercado de Iluminação 2018 . . . . .	23
Figura 4 – Representação da Relação Sistema Lâmpada . . . . .	25
Figura 5 – Distúrbios que afetam a qualidade da energia elétrica . . . . .	28
Figura 6 – Decomposição em Harmônicos de uma Onda Distorcida . . . . .	31
Figura 7 – Decomposição em Harmônicos de uma Onda Distorcida . . . . .	31
Figura 8 – Potência de Distorção . . . . .	32
Figura 9 – Distribuição Acumulada Complementar da Sensação de Cintilação . . . . .	36
Figura 10 – Lâmpada Incandescente . . . . .	39
Figura 11 – Esboço da Lâmpada Incandescente . . . . .	39
Figura 12 – Lâmpada Fluorescente Compacta . . . . .	40
Figura 13 – Lâmpada LED . . . . .	41
Figura 14 – Diagrama de Blocos Típico de uma lâmpada LED . . . . .	41
Figura 15 – Composição básica das lâmpadas vapor de sódio a alta pressão . . . . .	42
Figura 16 – Funcionamento da Lâmpada Mista . . . . .	44
Figura 17 – Resposta Espectral para Detecção de Luz Ambiente e no Sensor . . . . .	48
Figura 18 – Placa Arduino Uno . . . . .	48
Figura 19 – Esquema de Conexão dos Equipamentos Utilizados no Experimento . . . . .	49
Figura 20 – Ligação Real dos Equipamentos Utilizados no Experimento . . . . .	49
Figura 21 – Forma de Onda de Tensão em tensão de regime permanente . . . . .	50
Figura 22 – Tensão Harmônica em tensão de regime permanente . . . . .	51
Figura 23 – Variação da Tensão Aplicada pela Fonte na Lâmpada . . . . .	51
Figura 24 – Tensões Aplicadas durante o ensaio de Flutuação de Tensão . . . . .	52
Figura 25 – Distribuição Harmônica das Tensões Aplicadas 127V . . . . .	53
Figura 26 – Forma de Onda de Tensão IEC . . . . .	54
Figura 27 – Forma de Onda de Tensão PRODIST . . . . .	54
Figura 28 – Forma de Onda de Tensão EN . . . . .	55
Figura 29 – Forma de Onda de Tensão ONS . . . . .	55
Figura 30 – Forma de Onda de Tensão IEEE . . . . .	56
Figura 31 – Tensão de Regime Permanente LED1 . . . . .	57
Figura 32 – Tensão de Regime Permanente LED2 . . . . .	58
Figura 33 – Harmônicos de Corrente para LED2 . . . . .	59
Figura 34 – Forma de Onda da Corrente para LED2 . . . . .	59
Figura 35 – Harmônicos de Corrente para LED1 . . . . .	59
Figura 36 – Forma de Onda da Corrente para LED1 . . . . .	60

Figura 37 – Flutuação de Tensão LED1 . . . . .	61
Figura 38 – Histograma Luminosidade durante Flutuação de Tensão LED1 . . . . .	61
Figura 39 – Flutuação de Tensão LED8 . . . . .	62
Figura 40 – Histograma Luminosidade durante Flutuação de Tensão LED8 . . . . .	62
Figura 41 – Distribuição Harmônica Total 127V . . . . .	63
Figura 42 – Distribuição Harmônica Total 220V . . . . .	64
Figura 43 – Luminosidade LED7 . . . . .	73
Figura 44 – Luminosidade LED8 . . . . .	74
Figura 45 – Suportabilidade a Subtensão de LED1 . . . . .	75
Figura 46 – Suportabilidade a Subtensão de LED2 . . . . .	76
Figura 47 – Suportabilidade a Subtensão de LED3 . . . . .	77
Figura 48 – Suportabilidade a Subtensão de LED4 . . . . .	77
Figura 49 – Suportabilidade a Subtensão de LED5 . . . . .	78
Figura 50 – Suportabilidade a Subtensão de LED6 . . . . .	79
Figura 51 – Suportabilidade a Subtensão de LED7 . . . . .	79
Figura 52 – Suportabilidade a Subtensão de LED8 . . . . .	80
Figura 53 – Refletor LED Industrial . . . . .	82
Figura 54 – Refletor LED Pública . . . . .	83
Figura 55 – Lâmpada de Vapor de Sódio . . . . .	84
Figura 56 – Lâmpada Mista . . . . .	85
Figura 57 – Estabilização do Refletor LED Industrial . . . . .	87
Figura 58 – Estabilização do Refletor LED Pública . . . . .	87
Figura 59 – Estabilização do Mista . . . . .	88
Figura 60 – Estabilização do Vapor de Sódio . . . . .	88
Figura 61 – Tensão de Regime Permanente para lâmpadas de alta potência . . . . .	90
Figura 62 – Componentes Harmônicas para Tensão de Regime Permanente . . . . .	90
Figura 63 – Forma de onda das Correntes em Tensão de Regime Permanente . . . . .	91
Figura 64 – Flutuação de Tensão . . . . .	93
Figura 65 – Distribuição Harmônica de Correntes para a IEC . . . . .	94
Figura 66 – Distribuição Harmônica de Correntes para o PRODIST . . . . .	95
Figura 67 – Comparativo de forma de onda para Refletor LED Industrial . . . . .	97
Figura 68 – Comparativo de forma de onda para Refletor LED Público . . . . .	97
Figura 69 – Comparativo de forma de onda para Lâmpada de Vapor de Sódio . . . . .	98
Figura 70 – Comparativo de forma de onda para Lâmpada de Mista . . . . .	98
Figura 71 – Suportabilidade a Subtensão Refletor LED Industrial . . . . .	100
Figura 72 – Suportabilidade a Subtensão Refletor LED Publico . . . . .	100
Figura 73 – Suportabilidade a Subtensão Vapor de Sódio . . . . .	101
Figura 74 – Suportabilidade a Subtensão Mista . . . . .	101
Figura 75 – Igreja Matriz de Santo Antônio . . . . .	105

Figura 76 – Vista interna da Igreja Matriz de Santo Antônio . . . . .	105
Figura 77 – Sistema de Distribuição da Igreja Matriz de Santo Antônio . . . . .	106
Figura 78 – Curva de Carga do Transformador da Igreja Matriz de Santo Antônio .	107
Figura 79 – Igreja Matriz Nossa Senhora da Soledade . . . . .	107
Figura 80 – Vista interna da Igreja Matriz Nossa Senhora da Soledade . . . . .	108
Figura 81 – Sistema de Distribuição da Igreja Matriz Nossa Senhora da Soledade .	109
Figura 82 – Curva de Carga do Transformador da Igreja Matriz Nossa Senhora da Soledade . . . . .	109
Figura 83 – Igreja Matriz de São Benedito . . . . .	110
Figura 84 – Vista interna da Igreja Matriz de São Benedito . . . . .	110
Figura 85 – Sistema de Distribuição da Igreja Matriz de São Benedito . . . . .	111
Figura 86 – Curva de Carga do Transformador da Igreja Matriz de São Benedito .	112
Figura 87 – Santuário Nossa Senhora da Agonia . . . . .	112
Figura 88 – Vista interna do Santuário Nossa Senhora da Agonia . . . . .	113
Figura 89 – Sistema de Distribuição do Santuário Nossa Senhora da Agonia . . . .	114
Figura 90 – Curva de Carga do Transformador do Santuário Nossa Senhora da Agonia	114
Figura 91 – Tensão Eficaz na Igreja Matriz de Santo Antônio . . . . .	116
Figura 92 – Corrente na Igreja Matriz de Santo Antônio . . . . .	116
Figura 93 – Potência Ativa na Igreja Matriz de Santo Antônio . . . . .	117
Figura 94 – Potência Reativa na Igreja Matriz de Santo Antônio . . . . .	117
Figura 95 – Fator de potência na Igreja Matriz de Santo Antônio . . . . .	118
Figura 96 – Flutuação de Tensão na Igreja Matriz de Santo Antônio . . . . .	118
Figura 97 – Frequência na Igreja Matriz de Santo Antônio . . . . .	119
Figura 98 – Tensão e Corrente de Neutro na Igreja Matriz de Santo Antônio . . . .	119
Figura 99 – Percentis 5%, 95% e 99% do desequilíbrio de tensão na Igreja Matriz de Santo Antônio . . . . .	120
Figura 100 – Distorção Harmônica Total de Tensão na igreja Matriz de Santo Antônio	121
Figura 101 – Distorção Harmônica Total de Corrente na igreja Matriz de Santo Antônio	121
Figura 102 – Percentis da Distorção Harmônica Total de Tensão na Igreja Matriz de Santo Antônio . . . . .	122
Figura 103 – Percentis da Distorção Harmônica Total de Corrente na Igreja Matriz de Santo Antônio . . . . .	122
Figura 104 – Pontos de análise das ordens harmônicas na Igreja Matriz de Santo Antônio . . . . .	123
Figura 105 – Harmônicos de Tensão – Fase A – Igreja Matriz de Santo Antônio . . .	124
Figura 106 – Harmônicos de Corrente – Fase A – Igreja Matriz de Santo Antônio . .	124
Figura 107 – Harmônicos de Tensão – Fase B – Igreja Matriz de Santo Antônio . . .	125
Figura 108 – Harmônicos de Corrente – Fase B – Igreja Matriz de Santo Antônio . .	125
Figura 109 – Harmônicos de Tensão – Fase C – Igreja Matriz de Santo Antônio . . .	126

Figura 110 – Harmônicos de Corrente – Fase C – Igreja Matriz de Santo Antônio . . .	126
Figura 111 – Tensão Eficaz na Igreja Matriz Nossa Senhora da Soledade . . . . .	128
Figura 112 – Corrente na Igreja Matriz Nossa Senhora da Soledade . . . . .	128
Figura 113 – Potência Ativa na Igreja Matriz Nossa Senhora da Soledade . . . . .	129
Figura 114 – Potência Reativa na Igreja Matriz Nossa Senhora da Soledade . . . . .	129
Figura 115 – Fator de potência na Igreja Matriz Nossa Senhora da Soledade . . . . .	130
Figura 116 – Flutuação de Tensão na Igreja Matriz Nossa Senhora da Soledade . . . .	130
Figura 117 – Frequência na Igreja Matriz Nossa Senhora da Soledade . . . . .	131
Figura 118 – Tensão e Corrente de Neutro na Igreja Matriz Nossa Senhora da Soledade	131
Figura 119 – Percentis 5%, 95% e 99% do desequilíbrio de tensão na Igreja Matriz Nossa Senhora da Soledade . . . . .	132
Figura 120 – Distorção Harmônica Total de Tensão na Igreja Matriz Nossa Senhora da Soledade . . . . .	133
Figura 121 – Distorção Harmônica Total de Corrente na Igreja Matriz Nossa Senhora da Soledade . . . . .	133
Figura 122 – Percentis da Distorção Harmônica Total de Tensão na Igreja Matriz Nossa Senhora da Soledade . . . . .	134
Figura 123 – Percentis da Distorção Harmônica Total de Corrente na Igreja Matriz Nossa Senhora da Soledade . . . . .	134
Figura 124 – Pontos de análise das ordens harmônicas na Igreja Matriz Nossa Se- nhora da Soledade . . . . .	135
Figura 125 – Harmônicos de Tensão – Fase A – Igreja Matriz Nossa Senhora da Soledade . . . . .	136
Figura 126 – Harmônicos de Corrente – Fase A – Igreja Matriz Nossa Senhora da Soledade . . . . .	136
Figura 127 – Harmônicos de Tensão – Fase B – Igreja Matriz Nossa Senhora da Soledade . . . . .	137
Figura 128 – Harmônicos de Corrente – Fase B – Igreja Matriz Nossa Senhora da Soledade . . . . .	137
Figura 129 – Harmônicos de Tensão – Fase C – Igreja Matriz Nossa Senhora da Soledade . . . . .	138
Figura 130 – Harmônicos de Corrente – Fase C – Igreja Matriz Nossa Senhora da Soledade . . . . .	138
Figura 131 – Tensão Eficaz Igreja Matriz de São Benedito . . . . .	140
Figura 132 – Corrente Igreja Matriz de São Benedito . . . . .	140
Figura 133 – Potência Ativa Igreja Matriz de São Benedito . . . . .	141
Figura 134 – Potência Reativa Igreja Matriz de São Benedito . . . . .	141
Figura 135 – Fator de potência Igreja Matriz de São Benedito . . . . .	142
Figura 136 – Flutuação de Tensão Igreja Matriz de São Benedito . . . . .	142

Figura 137 – Frequência Igreja Matriz de São Benedito . . . . .	143
Figura 138 – Tensão e Corrente de Neutro Igreja Matriz de São Benedito . . . . .	143
Figura 139 – Percentis 5%, 95% e 99% do desequilíbrio de tensão Igreja Matriz de São Benedito . . . . .	144
Figura 140 – Distorção Harmônica Total de Tensão na Igreja Matriz de São Benedito	145
Figura 141 – Distorção Harmônica Total de Corrente na Igreja Matriz de São Benedito	145
Figura 142 – Percentis da Distorção Harmônica Total de Tensão Igreja Matriz de São Benedito . . . . .	146
Figura 143 – Percentis da Distorção Harmônica Total de Corrente Igreja Matriz de São Benedito . . . . .	146
Figura 144 – Pontos de análise das ordens harmônicas Igreja Matriz de Igreja Matriz de São Benedito . . . . .	147
Figura 145 – Harmônicos de Tensão – Fase A – Igreja Matriz de São Benedito . . . .	148
Figura 146 – Harmônicos de Corrente – Fase A – Igreja Matriz de São Benedito . . .	148
Figura 147 – Harmônicos de Tensão – Fase B – Igreja Matriz de São Benedito . . . .	149
Figura 148 – Harmônicos de Corrente – Fase B – Igreja Matriz de São Benedito . . .	149
Figura 149 – Harmônicos de Tensão – Fase C – Igreja Matriz de São Benedito . . . .	150
Figura 150 – Harmônicos de Corrente – Fase C – Igreja Matriz de São Benedito . . .	150
Figura 151 – Tensão Eficaz Santuário Nossa Senhora da Agonia . . . . .	151
Figura 152 – Corrente Santuário Nossa Senhora da Agonia . . . . .	152
Figura 153 – Potência Ativa Santuário Nossa Senhora da Agonia . . . . .	152
Figura 154 – Potência Reativa Santuário Nossa Senhora da Agonia . . . . .	153
Figura 155 – Fator de potência Santuário Nossa Senhora da Agonia . . . . .	153
Figura 156 – Flutuação de Tensão Santuário Nossa Senhora da Agonia . . . . .	154
Figura 157 – Frequência Santuário Nossa Senhora da Agonia . . . . .	154
Figura 158 – Tensão e Corrente de Neutro Santuário Nossa Senhora da Agonia . . .	155
Figura 159 – Percentis 5%, 95% e 99% do desequilíbrio de tensão Santuário Nossa Senhora da Agonia . . . . .	155
Figura 160 – Distorção Harmônica Total de Tensão Santuário Nossa Senhora Agonia	156
Figura 161 – Distorção Harmônica Total de Corrente Santuário Nossa Senhora Agonia	156
Figura 162 – Percentis da Distorção Harmônica Total de Tensão Santuário Nossa Senhora Agonia . . . . .	157
Figura 163 – Percentis da Distorção Harmônica Total de Corrente Santuário Nossa Senhora Agonia . . . . .	157
Figura 164 – Pontos de análise das ordens harmônicas Santuário Nossa Senhora Agonia	158
Figura 165 – Harmônicos de Tensão – Fase A – Santuário Nossa Senhora Agonia . .	159
Figura 166 – Harmônicos de Corrente – Fase A – Santuário Nossa Senhora Agonia .	159
Figura 167 – Harmônicos de Tensão – Fase B – Santuário Nossa Senhora Agonia . .	159
Figura 168 – Harmônicos de Corrente – Fase B – Santuário Nossa Senhora Agonia .	160

Figura 169 – Harmônicos de Tensão – Fase C – Santuário Nossa Senhora Agonia . . .	160
Figura 170 – Harmônicos de Corrente – Fase C – Santuário Nossa Senhora Agonia . . .	161
Figura 171 – Esquema de Alimentação das Cargas do Poste 1 . . . . .	164
Figura 172 – Corrente Eficaz no Poste 1 . . . . .	165
Figura 173 – Potência Ativa no Poste 1 . . . . .	165
Figura 174 – Distorção Harmônica Total das Tensões do Poste 1 . . . . .	166
Figura 175 – Distorção Harmônica Total das correntes do Poste 1 . . . . .	166
Figura 176 – Pontos de Análise de Harmônicos no Poste 1 . . . . .	167
Figura 177 – Forma de Onda de Tensão e Corrente – Ponto 1 . . . . .	168
Figura 178 – Espectro Harmônico das Tensões – Ponto 1 . . . . .	168
Figura 179 – Espectro Harmônico das Correntes – Ponto 1 . . . . .	168
Figura 180 – Forma de Onda de Tensão e Corrente – Ponto 2 . . . . .	169
Figura 181 – Espectro Harmônico das Tensões – Ponto 2 . . . . .	169
Figura 182 – Espectro Harmônico das Correntes – Ponto 2 . . . . .	169
Figura 183 – Presença de inter-harmônicos nas tensões – Ponto 2 . . . . .	170
Figura 184 – Forma de Onda de Tensão e Corrente – Ponto 3 . . . . .	170
Figura 185 – Espectro Harmônico das Tensões – Ponto 3 . . . . .	171
Figura 186 – Espectro Harmônico das Correntes – Ponto 3 . . . . .	171
Figura 187 – Forma de Onda de Tensão e Corrente – Ponto 4 . . . . .	172
Figura 188 – Espectro Harmônico das Tensões – Ponto 4 . . . . .	172
Figura 189 – Espectro Harmônico das Correntes – Ponto 4 . . . . .	172
Figura 190 – Forma de Onda de Tensão e Corrente – Ponto 5 . . . . .	173
Figura 191 – Forma de Onda de Tensão e Corrente – Ponto 6 . . . . .	173
Figura 192 – Forma de Onda de Tensão e Corrente – Ponto 7 . . . . .	174
Figura 193 – Detalhe da Forma de Onda de Tensão – Ponto 8 . . . . .	174
Figura 194 – Espectro Harmônico das Tensões – Ponto 8 . . . . .	174
Figura 195 – Espectro Harmônico das Correntes – Ponto 8 . . . . .	175

# Lista de tabelas

Tabela 2 – Faixas de Variação de Tensão para Tensão Nominal igual ou inferior a 1kV (220/127) . . . . .	29
Tabela 3 – Resumo dos limites para harmônico de tensão . . . . .	33
Tabela 4 – Valores variáveis para harmônicos da Norma IEC . . . . .	33
Tabela 5 – Limites para os Harmônicos de Corrente . . . . .	34
Tabela 6 – Limites de Desequilíbrio de Tensão . . . . .	35
Tabela 7 – Limites de Flutuação de Tensão . . . . .	36
Tabela 8 – Limites de Variação de Frequência . . . . .	37
Tabela 9 – Características nominais das lâmpadas LED . . . . .	46
Tabela 10 – Testes realizados para Lâmpadas Residenciais . . . . .	50
Tabela 11 – Distorção Harmônica de Tensão Total Aplicadas . . . . .	54
Tabela 12 – Tensão Eficaz para Tensões Harmônicas Aplicadas . . . . .	56
Tabela 13 – Grandezas Elétricas LED1 . . . . .	65
Tabela 14 – Componentes Harmônicas de corrente LED1 em percentual . . . . .	66
Tabela 15 – Grandezas Elétricas LED2 . . . . .	66
Tabela 16 – Componentes Harmônicas de corrente LED2 em percentual . . . . .	67
Tabela 17 – Grandezas Elétricas LED3 . . . . .	68
Tabela 18 – Componentes Harmônicas de corrente LED3 em percentual . . . . .	68
Tabela 19 – Grandezas Elétricas LED4 . . . . .	69
Tabela 20 – Componentes Harmônicas de corrente LED4 em percentual . . . . .	69
Tabela 21 – Grandezas Elétricas LED5 . . . . .	70
Tabela 22 – Componentes Harmônicas de corrente LED5 em percentual . . . . .	70
Tabela 23 – Grandezas Elétricas LED6 . . . . .	71
Tabela 24 – Componentes Harmônicas de corrente LED6 em percentual . . . . .	71
Tabela 25 – Grandezas Elétricas LED7 . . . . .	72
Tabela 26 – Componentes Harmônicas de corrente LED7 em percentual . . . . .	72
Tabela 27 – Grandezas Elétricas LED8 . . . . .	73
Tabela 28 – Componentes Harmônicas de corrente LED8 em percentual . . . . .	74
Tabela 29 – Comparativo de Suportabilidades a Subtensão . . . . .	80
Tabela 30 – Características Nominiais Refletor LED Industrial . . . . .	83
Tabela 31 – Características Nominiais Refletor LED Pública . . . . .	84
Tabela 32 – Características Nominiais Lâmpada Vapor de Sódio . . . . .	85
Tabela 33 – Características Nominiais Lâmpada Mista . . . . .	86
Tabela 34 – Componentes Harmônicas para ondas IEC e PRODIST . . . . .	96
Tabela 35 – Grandezas Elétricas para ondas IEC e PRODIST . . . . .	96
Tabela 36 – Comparativo de Suportabilidades a Subtensão . . . . .	102

Tabela 37 – Dados do Sistema de Distribuição da Igreja Matriz de Santo Antônio . . . . .	106
Tabela 38 – Dados do Sistema de Distribuição da Igreja Matriz Nossa Senhora da Soledade . . . . .	108
Tabela 39 – Dados do Sistema de Distribuição da Igreja Matriz de São Benedito . . . . .	111
Tabela 40 – Dados do Sistema de Distribuição do Santuário Nossa Senhora da Agonia	113
Tabela 41 – Atividades na Igreja Matriz de Santo Antônio . . . . .	115
Tabela 42 – PST95% na Igreja Matriz de Santo Antônio . . . . .	118
Tabela 43 – Atividades da Igreja Matriz Nossa Senhora da Soledade . . . . .	127
Tabela 44 – PST95% na Igreja Matriz Nossa Senhora da Soledade . . . . .	130
Tabela 45 – Atividades Igreja Matriz de São Benedito . . . . .	139
Tabela 46 – PST95% Igreja Matriz de São Benedito . . . . .	142
Tabela 47 – Atividades Santuário Nossa Senhora da Agonia . . . . .	151
Tabela 48 – PST95% Santuário Nossa Senhora da Agonia . . . . .	154
Tabela 49 – Características Nominais Refletor LED Público Porto . . . . .	164

# Lista de abreviaturas e siglas

Aneel	<i>Agência Nacional de Energia Elétrica</i>	27
CBA	<i>Congresso Brasileiro de Automática</i>	47
D	<i>Potência de Distorção</i>	30
DHT	<i>Distorção Harmônica Total</i>	24
DRC	<i>Duração relativa da transgressão de tensão crítica</i>	29
DRP	<i>Duração relativa da transgressão de tensão precária</i>	29
EN	<i>European standard</i>	28
ENCE	<i>Etiqueta Nacional de Conservação de Energia</i>	46
FD	<i>Fator de Desequilíbrio</i>	34
Idht	<i>Corrente harmônica total</i>	89
IEC	<i>Comissão Eletrotécnica Internacional</i>	28
IEEE	<i>Instituto de Engenheiros Eletrotécnicos e Eletrônicos</i>	28
Inmetro	<i>Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia</i>	40
LED	<i>Diodo Emissor de Luz</i>	22
LFC	<i>Lâmpada Fluorescente Compacta</i>	24
ONS	<i>Operador Nacional do Sistema Elétrico</i>	28
PRODIST	<i>Procedimentos de Distribuição</i>	28
PST	<i>Nível de severidade de cintilação de curta duração</i>	36
QMAP	<i>Centro de Estudos em Qualidade da Energia e Proteção Elétrica</i>	82
Unifei	<i>Universidade Federal de Itajubá</i>	104
Vdht	<i>Tensão harmônica total</i>	120
Vrms	<i>Tensão de Eficaz</i>	115
VTCD	<i>Varição de Tensão de Curta Duração</i>	37

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>21</b>
1.1	Relevância do Tema	21
1.2	Estado da Arte	24
1.3	Objetivos e Contribuições	25
1.4	Estrutura do Documento	25
<b>2</b>	<b>QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA</b>	<b>27</b>
2.1	Considerações Iniciais	27
2.2	Tensão de Regime Permanente	29
2.3	Fator de Potência	29
2.4	Harmônicos	30
2.5	Desequilíbrio de Tensão	34
2.6	Flutuação de Tensão	35
2.7	Variação de Frequência	37
2.8	Variação de Tensão de Curta Duração	37
2.9	Considerações Finais	37
<b>3</b>	<b>TIPOS DE LÂMPADAS</b>	<b>38</b>
3.1	Considerações Iniciais	38
3.2	Lâmpadas Residenciais	38
3.2.1	Lâmpadas Incandescentes	38
3.2.2	Lâmpadas Fluorescentes Compactas	38
3.2.3	Lâmpadas LED	40
3.3	Lâmpadas Industriais e Públicas	41
3.3.1	Lâmpada Vapor de Sódio	41
3.3.2	Lâmpada Mista	43
3.3.3	Refletor LED	44
3.4	Considerações Finais	45
<b>4</b>	<b>ANÁLISE QUALITATIVA DAS LÂMPADAS LED RESIDENCIAIS</b>	<b>46</b>
4.1	Considerações Iniciais	46
4.2	Lâmpadas Utilizadas	46
4.3	Estrutura de Testes	47
4.4	Testes Realizados	49
4.4.1	Tensão de Regime Permanente	50
4.4.2	Flutuação de Tensão	51

4.4.3	Harmônicos . . . . .	52
4.4.4	Suportabilidade a Subtensão . . . . .	56
<b>4.5</b>	<b>Resultados . . . . .</b>	<b>56</b>
4.5.1	Tensão de Regime Permanente . . . . .	57
4.5.2	Flutuação de tensão . . . . .	60
4.5.3	Harmônico . . . . .	62
4.5.4	Suportabilidade a Subtensão . . . . .	74
<b>4.6</b>	<b>Considerações finais . . . . .</b>	<b>80</b>
<b>5</b>	<b>ANÁLISE QUALITATIVA DAS LÂMPADAS LED INDUSTRIAIS E PÚBLICAS . . . . .</b>	<b>82</b>
<b>5.1</b>	<b>Considerações Iniciais . . . . .</b>	<b>82</b>
<b>5.2</b>	<b>Lâmpadas Utilizadas . . . . .</b>	<b>82</b>
<b>5.3</b>	<b>Estrutura de Testes . . . . .</b>	<b>86</b>
<b>5.4</b>	<b>Resultados . . . . .</b>	<b>86</b>
5.4.1	Estabilização . . . . .	86
5.4.2	Tensão de Regime Permanente . . . . .	88
5.4.3	Flutuação de tensão . . . . .	91
5.4.4	Harmônico . . . . .	94
5.4.5	Suportabilidade a Subtensão . . . . .	98
<b>5.5</b>	<b>Considerações finais . . . . .</b>	<b>102</b>
<b>6</b>	<b>ANÁLISE DO IMPACTO DAS LÂMPADAS RESIDENCIAIS SOBRE O SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO . . . . .</b>	<b>104</b>
<b>6.1</b>	<b>Localidades e seus Sistema de Distribuição . . . . .</b>	<b>104</b>
6.1.1	Igreja Matriz de Santo Antônio . . . . .	104
6.1.2	Igreja Matriz Nossa Senhora da Soledade . . . . .	107
6.1.3	Igreja Matriz de São Benedito . . . . .	110
6.1.4	Santuário Nossa Senhora da Agonia . . . . .	112
<b>6.2</b>	<b>Metodologia . . . . .</b>	<b>114</b>
<b>6.3</b>	<b>Resultados . . . . .</b>	<b>115</b>
6.3.1	Igreja Matriz de Santo Antônio . . . . .	115
6.3.2	Igreja Matriz Nossa Senhora da Soledade . . . . .	127
6.3.3	Igreja Matriz de São Benedito . . . . .	139
6.3.4	Santuário Nossa Senhora da Agonia . . . . .	151
<b>6.4</b>	<b>Considerações finais . . . . .</b>	<b>161</b>
<b>7</b>	<b>ANÁLISE DAS LÂMPADAS PÚBLICAS NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO . . . . .</b>	<b>163</b>
<b>7.1</b>	<b>Considerações Iniciais . . . . .</b>	<b>163</b>

7.2	Resultados . . . . .	165
7.3	Considerações finais . . . . .	175
8	CONCLUSÕES . . . . .	177
8.1	Trabalhos futuros . . . . .	178
8.2	Trabalhos originados desta dissertação . . . . .	178
	REFERÊNCIAS . . . . .	179

# 1 Introdução

## 1.1 Relevância do Tema

A iluminação é um fator que sempre impulsionou a sociedade. Possibilitou um aumento das horas úteis na produção industrial e na vida noturna, pois as vias públicas iluminadas inibem a violência, evitam acidentes e aumentam a socialização de uma comunidade.

Porém, manter essa iluminação, se tornou cada vez mais desafiador, a demanda aumentou, as cidades se tornaram maiores e mais desenvolvidas, aumentando também a área industrial. Junto a isso, o custo da energia se torna cada vez mais alto e é cada vez mais desafiador manter o fornecimento de energia.

Em 2001, o Brasil viveu uma crise energética que provocou um racionamento de energia emergencial determinado pelo governo. Naquele período, houve mudanças significativas nos investimentos em geração e transmissão de energia, além de uma forte estiagem, causando impacto direto no fornecimento de energia no país. Para evitar o “apagão”, termo utilizado para fazer referência a falta de abastecimento de energia, o governo e a população buscaram formas de reduzir o consumo e aumentar a eficiência energética dos equipamentos elétricos.

A busca pela redução no consumo de energia não foi algo momentâneo e localizado apenas no Brasil. A matriz de geração elétrica mundial é altamente dependente de fontes não-renováveis de energia, como visto na Figura 1[1], que além de serem finitas, são caras e prejudiciais ao meio ambiente. Por isso, um dos objetivos da “Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável” das Nações Unidas é dobrar a taxa Global de eficiência energética até 2030 [2].

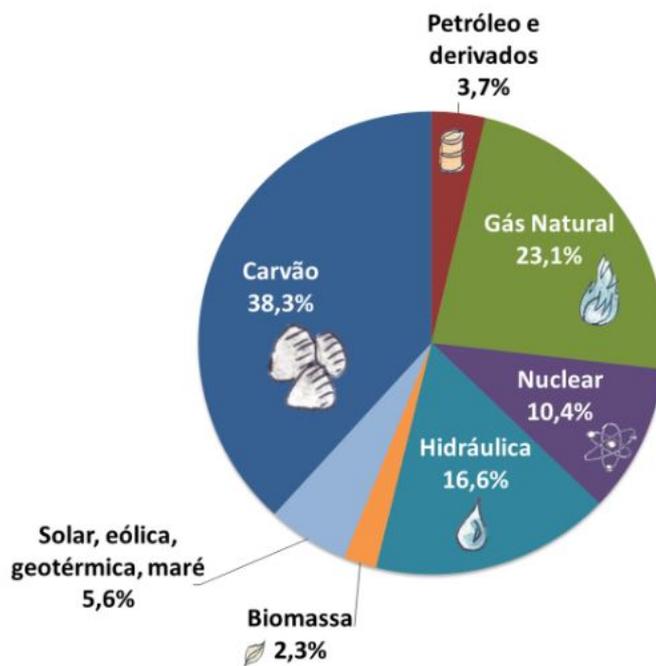


Figura 1 – Matriz Energética Mundial

Mundialmente, uma das soluções encontradas para redução do consumo de energia elétrica foi a substituição das lâmpadas incandescentes por tecnologias mais eficientes como as lâmpadas fluorescentes compactas e **LED** (*Diodo Emissor de Luz*). O Brasil iniciou, em 2012, o processo de proibição de venda de lâmpadas incandescentes, iniciando pelas potências mais altas até proibir totalmente em 30/06/2016. Se todas as lâmpadas incandescentes fossem substituídas, haveria uma redução de cerca de 10% no consumo de energia elétrica, segundo a Abilux [3].

Essa proibição aumentou a demanda de mercado das lâmpadas **LED**, que superaram as fluorescentes compactas como a sucessora mais utilizada para as lâmpadas incandescentes, já que são mais econômicas, possuem maior durabilidade e são melhores para o meio ambiente por não conterem metais pesados. Uma pesquisa realizada pela revista “O Setor Elétrico”, em 2013, já apontava a lâmpada **LED** como a mais citada por fabricantes e distribuidores, pouco à frente das Fluorescentes Tubulares, Vapor Metálico e Fluorescentes Compactas, como observado na Figura 2 [4]. A mesma pesquisa foi realizada novamente em 2018, que demonstrou um despontamento das lâmpadas **LED** no mercado, sendo citada por 70% dos fabricantes e comerciantes, aproximadamente o dobro de vezes das lâmpadas de vapor metálico e fluorescentes, visto na Figura 3 [5].

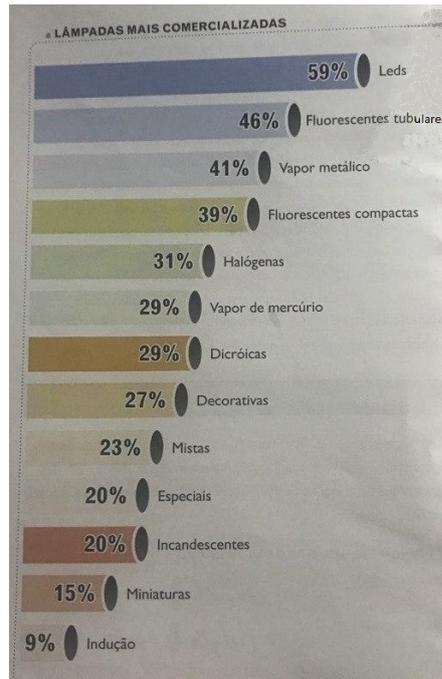


Figura 2 – Pesquisa Mercado de Iluminação 2013

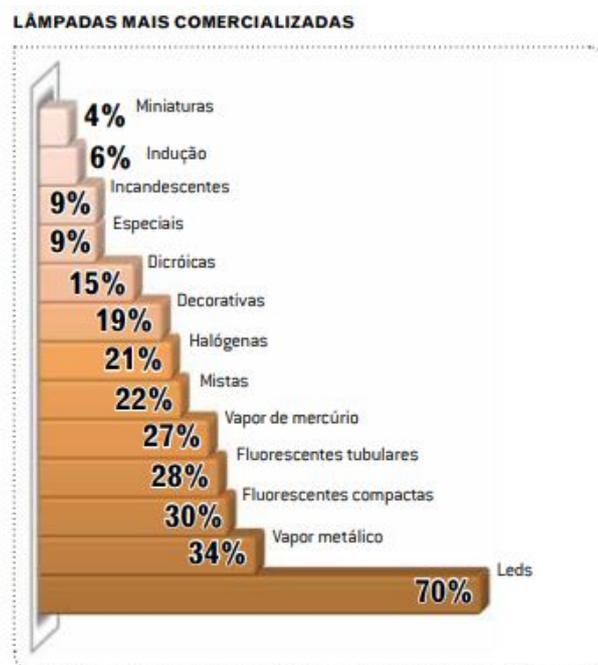


Figura 3 – Pesquisa Mercado de Iluminação 2018

Este cenário é muito promissor no aspecto da eficiência energética, porém gera preocupação quando considera-se a qualidade da energia elétrica. Diferentemente das lâmpadas incandescentes, que são cargas puramente resistivas, as lâmpadas **LED** são cargas não-lineares. Isto é, a corrente que ela absorve não tem a mesma forma da tensão

que a alimenta. Isso ocorre devido a sua tecnologia eletrônica, que pode gerar distúrbios na qualidade da energia elétrica, como baixo fator de potência e distorções harmônicas. E também podem causar: distorção da tensão da rede de corrente alternada, redução da potência útil, mau funcionamento de equipamentos eletrônicos sensíveis, queima de motores, aumento das perdas em condutores, aquecimento excessivo e redução do tempo de vida útil em equipamentos [6].

## 1.2 Estado da Arte

Devido a preocupação com o efeito da inserção da tecnologia LED em nosso cotidiano, pesquisadores de todo o mundo têm dedicado os seus estudos a este tema. Bravo e Abed testaram 8 lâmpadas LED disponíveis no mercado americano e levantaram que há uma grande variação dos níveis harmônicos com DHT (*Distorção Harmônica Total*) de corrente variando de 4,89% a 185,4%. Concluíram apresentando preocupação com a injeção desse conteúdo harmônico na rede. [7]

Já Ananwahaporn e Ngaopitakjul testaram 3 marcas de lâmpadas LED vendidas na Tailândia. Primeiramente analisaram 1 lâmpada de cada marca separadamente e depois 9 lâmpadas de cada funcionando em conjunto, obtendo um DHT de corrente que varia de 56% a 174,6%. Eles concluem que há a necessidade de uma regulamentação dos níveis harmônicos aplicados pelas lâmpadas LED [8].

Testes realizados por diversos pesquisadores na Universidade Federal Fluminense, compara a substituição de 10 LFC (*Lâmpada Fluorescente Compacta*) por 10 LED. Eles concluem que a lâmpada LED, apesar de ainda exceder limites de qualidade da energia elétrica, é menos prejudicial ao sistema que as LFC e salienta a necessidade de uma análise mais profunda sobre o impacto do fator de diversidade nesse estudo [9].

Os pesquisadores chineses Lin, Huang e Zhu modelaram através de medições laboratoriais as lâmpadas incandescentes, fluorescentes compactas e LED. Com esses dados, simularam um sistema com 800 lâmpadas incandescentes, LFC e LED no sistema de distribuição, afim de distinguir o seu comportamento e concluíram que o desempenho das lâmpadas LED é superior ao das LFC. Eles demonstram preocupação com a injeção de ordens harmônicas mais altas no sistema de distribuição, mas concluem que, na simulação, as perdas com potências harmônicas são pequenas [10].

Neste cenário, há entre os pesquisadores a dúvida: até que nível o sistema elétrico é capaz de absorver de poluição por cargas não-lineares, sem mitigação de seus efeitos e sem comprometimento da qualidade?

### 1.3 Objetivos e Contribuições

Neste cenário de pesquisa mundial, identificou-se a necessidade de um estudo que tratasse tanto do efeito dos distúrbios de Qualidade de Energia Elétrica nas lâmpadas de tecnologia **LED**, quanto nos efeitos das tecnologias LED, sendo cargas não lineares, no sistema de distribuição. Esse fluxo de pesquisa é representado na Figura 4.

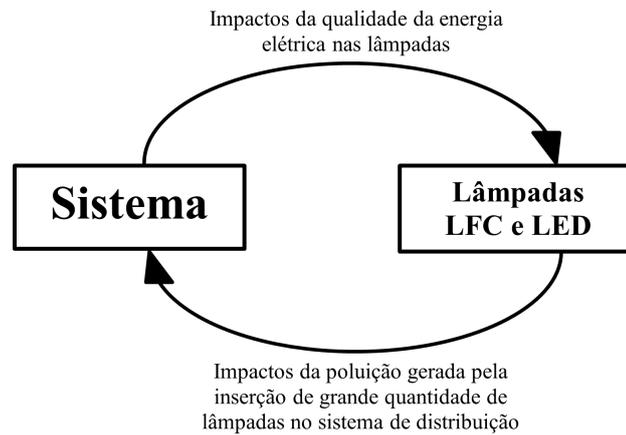


Figura 4 – Representação da Relação Sistema Lâmpada

Com isso, o objetivo desta dissertação é determinar o impacto da substituição das atuais tecnologias de iluminação pela tecnologia **LED** no sistema de distribuição e o impacto do sistema nas lâmpadas. Para isso, serão realizados testes em ambiente laboratorial, onde será possível avaliar os efeitos de alguns distúrbios de qualidade da energia elétrica sobre as lâmpadas.

Além disso, serão realizadas medições em campo, para avaliar as lâmpadas quando submetidas as condições reais de operação do sistema. Este estudo será realizado primeiramente num ambiente residencial, isto é, utilizando lâmpadas de baixa potência. Posteriormente em um ambiente industrial e público, isto é, com lâmpadas de maior potência. Podendo, assim, determinar as relações entre o impacto do sistema de distribuição nas lâmpadas e das lâmpadas no sistema.

### 1.4 Estrutura do Documento

Para apresentar esse estudo, essa dissertação foi dividida em 8 capítulos. O primeiro introduz o tema e a sua relevância. O segundo capítulo apresentará a qualidade da energia elétrica, seus distúrbios e normas que os regem, tanto nacionais quanto internacionais.

O terceiro capítulo abordará mais profundamente os tipos de lâmpadas consideradas nesse estudo. Suas características, similaridades e diferenças, aspectos construtivos e parâmetros característicos, como eficiência luminosa, vida útil e acionamento.

O quarto capítulo expõe a análise qualitativa das lâmpadas residenciais utilizadas. Apresentando suas características de fábrica, metodologia utilizada para testá-las, resultados e conclusões obtidas. O mesmo será abordado no quinto capítulo para as lâmpadas industriais e públicas analisadas.

No sexto capítulo serão apresentadas as medições de campo para lâmpadas residenciais a fim de determinar o impacto das diferentes tecnologias de iluminação no sistema de distribuição. Assim como será feito no sétimo capítulo, que apresentará uma medição de campo realizada com refletores LED utilizados em áreas industriais e/ou em vias públicas.

O oitavo capítulo explorará as conclusões desse estudo, os principais tópicos a serem estudados para a continuidade desta pesquisa. E o nono e último capítulo apresentará as referências utilizadas para o desenvolvimento da dissertação.

## 2 Qualidade da Energia Elétrica

### 2.1 Considerações Iniciais

A qualidade da energia elétrica é o ramo de estudo voltado a garantia da conformidade da energia entregue aos consumidores. Ela é dividida em duas áreas: a qualidade do serviço e do produto.

O enfoque deste trabalho será a qualidade do produto, que, segundo a [Aneel \(Agência Nacional de Energia Elétrica\)](#), está relacionada à conformidade da tensão em regime permanente e à ausência de perturbações na forma de onda. Do ponto de vista ideal, seria a disponibilidade de energia elétrica com tensões senoidais, equilibradas e com amplitude e frequência constantes [11].

Segundo [12], estabelecer um método de avaliação para a qualidade do produto “energia elétrica” é complexo, pois o sistema possui aspectos aleatórios, fatores que não são possíveis de serem evitados, diversas fontes de distúrbio e diferentes níveis de sensibilidade ao longo do sistema, além de possuir uma grande área de sensibilidade.

Para quantificar e qualificar a qualidade da energia elétrica, a qualidade do produto é subdividida em critérios de análise, sendo eles: tensão de regime permanente, fator de potência, harmônicos, desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão, variação de tensão de curta duração e variação de frequência, entre outros, como ilustra a Figura 5 [13].

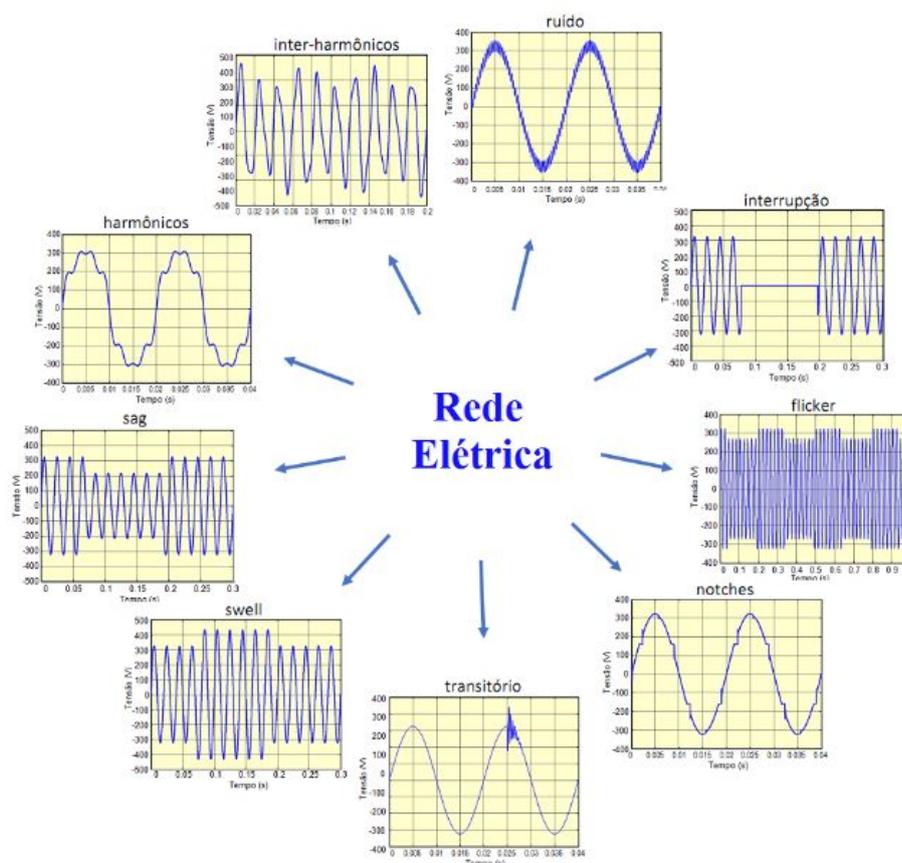


Figura 5 – Distúrbios que afetam a qualidade da energia elétrica

Porém não há uma definição única de como esses indicadores devem ser calculados e os seus limites, cada país e/ou instituição regulamentadores tem as suas normas. As principais normas no Brasil e no mundo são:

- **ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico)** - Submódulo 2.8, em âmbito nacional, que trata do gerenciamento dos indicadores de desempenho da rede básica e de seus componentes;
- **PRODIST (Procedimentos de Distribuição)** - Módulo 8, nacionalmente abordando os aspectos da qualidade da energia elétrica;
- **IEC (Comissão Eletrotécnica Internacional) 61000**, internacionalmente adotada para distúrbios na qualidade da energia elétrica;
- **IEEE (Instituto de Engenheiros Eletrotécnicos e Eletrônicos) 519**, recomendações americana de qualidade da energia elétrica;
- **EN (European standard) 50160**, a qual estabelece os procedimentos comuns a serem empregados no contexto europeu [14];

Nos próximos subitens, serão abordados detalhadamente os distúrbios que serão

considerados neste trabalho.

## 2.2 Tensão de Regime Permanente

Para avaliar a tensão de regime permanente define-se limites onde os valores eficazes de tensão devem permanecer para que a qualidade da energia elétrica seja mantida. Esses limites são definidos de acordo com a tensão de referência do sistema.

O **PRODIST** divide a tensão de regime permanente em 3 faixas, adequada, precária e crítica, que deverão ser apurados, realizando 1008 leituras válidas, coletadas a cada 10 minutos. Os valores definidos para as tensões abordadas neste trabalho estão dispostos na Tabela 2 [15].

Tabela 2 – Faixas de Variação de Tensão para Tensão Nominal igual ou inferior a 1kV (220/127)

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura em Relação à Tensão Nominal (Volts)
Adequada	(201 <TL <231) / (116 <TL <133)
Precária	(189 <TL <201 ou 231 <TL <233) / (109 <TL <116 ou 133 <TL <140)
Crítica	(TL <189 ou TL >233) / (TL <109 ou TL >140)

Para analisar os dados coletados são utilizados os indicadores, **DRP** (*Duração relativa da transgressão de tensão precária*), para tensão precária e **DRC** (*Duração relativa da transgressão de tensão crítica*) para tensão crítica. Estes são calculados através das equações 2.1 e 2.2, onde *nlp* e *nlc* representam valores entre as fases do número de leituras situadas nas faixas precária e crítica, respectivamente. Esses indicadores apresentam os limites de 3% para **DRP** e 0,5% para o **DRC** [15].

$$DRP = \frac{nlp}{1008} * 100[\%] \quad (2.1)$$

$$DRC = \frac{nlc}{1008} * 100[\%] \quad (2.2)$$

## 2.3 Fator de Potência

O fator de potência (FP) é uma relação entre potência ativa e potência aparente. Pode ser interpretado com uma medida de quanto da potência elétrica consumida está de fato sendo convertido em trabalho útil. Ele indica a eficiência com a qual a energia está sendo usada.

Pelo Prodist, o valor do fator de potência é calculado pelas equações 2.3 ou 2.4, que relacionam as potências ativas (P) e reativas (Q) e as energias ativas (EA) e reativas (ER), respectivamente [15].

$$fp = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (2.3)$$

$$fp = \frac{EA}{\sqrt{EA^2 + ER^2}} \quad (2.4)$$

Porém, o cálculo mais preciso deve considerar *D (Potência de Distorção)*, que está presente no sistema devido a presença de componentes harmônicas, que serão abordadas mais detalhadamente no item 2.4.

Segundo o **PRODIST**, para unidade consumidora com tensão inferior a 230 kV, o fator de potência no ponto de conexão deve estar compreendido entre 0,92 indutivo e 1,00 ou 1,00 e 0,92 capacitivo. [15]

Quanto maior a presença de componentes harmônicas no sistema, maior a potência de distorção. O que causa a diminuição do fator de potência, conseqüentemente, diminui a eficiência do sistema. Isto é, uma menor porcentagem da energia está sendo convertida em trabalho.

## 2.4 Harmônicos

Harmônicos são ondas senoidais de frequências múltiplas inteiras de uma frequência fundamental. No caso do sistema elétrico brasileiro, a fundamental é 60 Hz, tendo como 2º harmônico uma onda senoidal de 120 Hz, 3º harmônico uma onda senoidal de 180 Hz e assim por diante. A presença destas componentes faz com que o sinal resultante perca a forma senoidal perfeita. A análise de sinais de tensão e correntes distorcidas é feita através da decomposição da onda utilizando a série de Fourier, como visto na Figura 6[16].

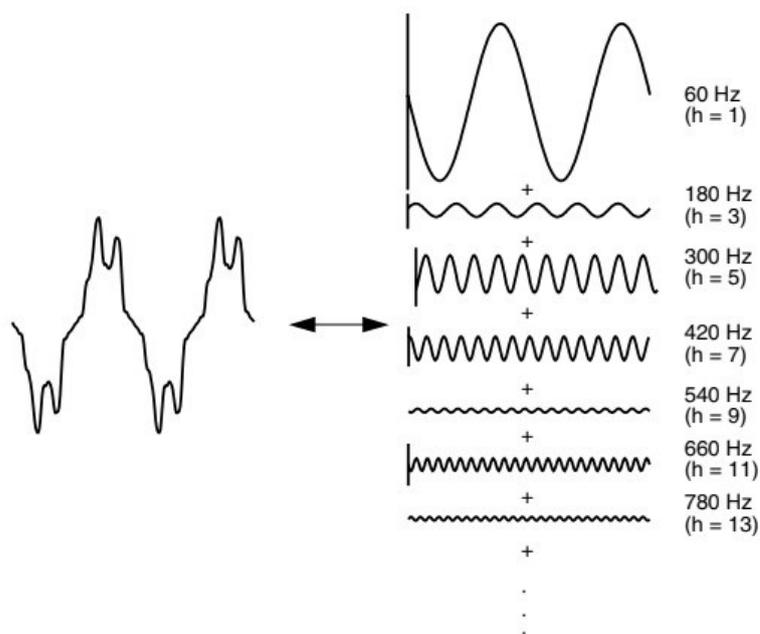


Figura 6 – Decomposição em Harmônicos de uma Onda Distorcida

A distorção de corrente é resultado da característica não-linear da carga. Já a distorção harmônica de tensão é um resultado da interação de correntes distorcidas com a impedância do sistema, como visto na Figura 7[16].

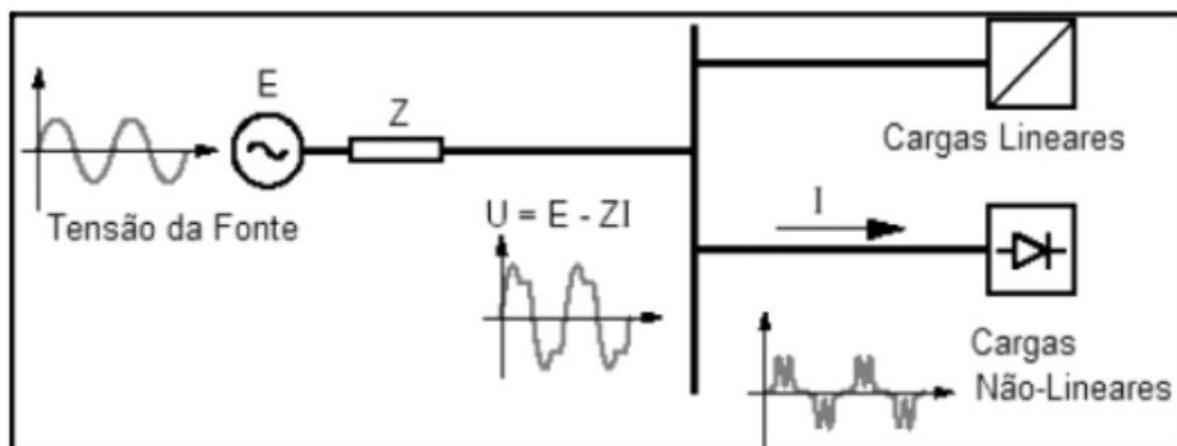


Figura 7 – Decomposição em Harmônicos de uma Onda Distorcida

A presença de harmônicos no sistema introduz um novo elemento a potência aparente, denominado  $D$ , como visto na Figura 8[17].

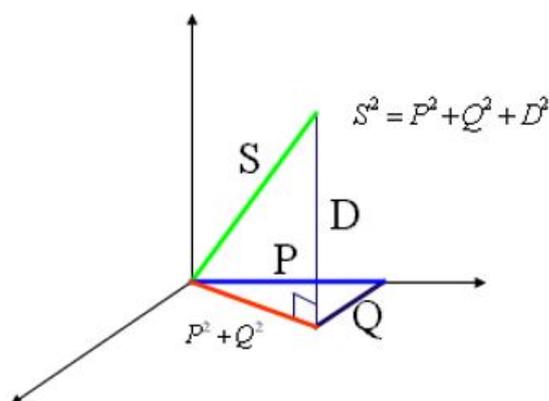


Figura 8 – Potência de Distorção

Qualquer sinal de tensão ou corrente, cuja forma de onda não seja senoidal, pode provocar danos em componentes do sistema elétrico ou aparelhos a eles conectados. Cargas muito susceptíveis a harmônicos são aquelas que seus projetos assumem a forma de onda de alimentação como sendo perfeitamente senoidal. Os equipamentos que frequentemente se encaixam nesta categoria são processadores de dados e dispositivos de comunicação [18].

Outras consequências são:

- Aumento das perdas Joules nos cabos, aumentando a sua temperatura;
- Redução da Vida Útil de transformadores, podendo gerar a necessidade de redimensionamento;
- Stress térmico em bancos de capacitores, causando diminuição da vida útil;
- Para motores, aumentos de temperatura no estator e no rotor, podendo causar redução de eficiência e vida útil do motor. [18]

Conhecendo os possíveis efeitos que as distorções harmônicas de tensão e corrente podem causar aos componentes do sistema ou a equipamentos a ele conectados, faz-se necessário o estabelecimento de parâmetros de análise, considerando cada ordem harmônica de forma individual ou conjunta.

•A distorção harmônica individual de tensão de ordem  $h$  pode ser calculada pela Equação 2.5.

$$DTI_h\% = \frac{V_h}{V_1} \times 100 \quad (2.5)$$

- A distorção total de tensão pode ser calculada pela Equação 2.6.

$$DHT\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hmax} V_h^2}}{V_1} \times 100 \tag{2.6}$$

Onde:

V<sub>h</sub> - módulo da tensão na frequência da ordem harmônica h;

V<sub>1</sub> - módulo da tensão na frequência fundamental;

h - ordem harmônica;

h<sub>max</sub> - último harmônico considerado;

Os limites para as distorções harmônicas individuais e totais para as normas abordadas neste trabalho estão disponíveis na Tabela 3 [19] e a Tabela 4 [19], que apresentam os valores com asterisco na tabela anterior, pois os valores alteram de acordo com sua ordem harmônica. O PRODIST define seus limites através do percentil 95%, isto é, valor do indicador que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas.

Tabela 3 – Resumo dos limites para harmônico de tensão

Harmônicos de Tensão	Recomendações/Normas														
	IEEE 519				EN 50160				IEC		ONS		PRODIST*		
	<1 kV	1 kV a 69 kV	69 kV a 161 kV	>161 kV	V <35 kV	V <1 kV	1 kV <V <35 kV	35 kV <V <230 kV	V <69 kV	V >69 kV	V <sub>n</sub> <1 kV	1 kV <V <sub>n</sub> <69 kV	69 kV <V <sub>n</sub> <230 kV		
Ímpares não-Múltiplos de 3	5				6	6	5	2	5	2					
	7				5	5	4	2	5	2					
	11				3,5	3,5	3	1,5	3	1,5					
	13				3	3	2,5	1,5	3	1,5					
	17				2	2	1,7	1,2	2	1	7,5	6	4		
	19				1,5	1,8	1,5	1,4	2	1					
	23				1,5	1,4	1,2	0,9	2	1					
	25				1,5	1,3	1,1	0,8	2	1					
	>25				-	-	1,1	**	1	0,5					
	3				5	5	4	2	5	2					
Ímpares Múltiplos de 3	9	5	3	1,5	1,5	1,5	1,2	1	3	1,5	6,5	5	3		
	15				0,5	0,4	0,3	0,3	2	1					
	21				0,5	0,3	0,2	0,2	2	1					
	>21				-	0,2	0,2	0,2	-	-					
	2				2	2	1,8	1,4	2	1	2,5	2	1		
Pares	4				1	1	1	0,8	2	1	2,5	2	1		
	6				0,5	0,5	0,5	0,4	2	1	6,5	5	3		
	8				0,5	0,5	0,5	0,4	1	0,5	2,5	2	1		
	10				0,5	0,5	0,5	0,4	1	0,5	2,5	2	1		
	12				0,5	0,2	0,4	0,3	1	0,5	6,5	5	3		
	>12				0,5	-	-	-	1	0,5	2,5	2	1		
	Total	8	5	2,5	1,5	8	8	6,5	3	6	3	10	8	5	

Tabela 4 – Valores variáveis para harmônicos da Norma IEC

Níveis de Tensão Harmônica Individual - Norma IEC			
Harmônicos Pares			
h	Harmônico de Tensão %		
	BT	MT	AT/EAT
>12	$0,25 * \frac{10}{h} + 0,25$	$(0,25 * \frac{10}{h}) + 0,22$	$0,19 * \frac{10}{h} + 0,16$
Harmônicos Ímpares Não Múltiplos de 3			
>25	$2,27 * \frac{17}{h} - 0,27$	$1,9 * \frac{17}{h} - 0,2$	$1,2 * \frac{17}{h}$

De modo geral, as normas definem apenas os limites das distorções harmônicas de tensão na rede. Adicionalmente, a IEC 61000-3-2 define os limites de injeção de distorções harmônicas de corrente para quatro classes de equipamentos.

Para a Classe A, os limites são definidos para os equipamentos trifásicos balanceados, eletrodomésticos exceto os Classe D, ferramentas exceto as portáteis, lâmpadas com dimmers, equipamentos de som e todos os equipamentos que não estão incluídos nas demais categorias.

Na Classe B estão incluídos as ferramentas portáteis e equipamento de solda a arco. Para a Classe C, os equipamentos de iluminação e a D contempla os computadores e monitores pessoais e televisões, de potência de 75 W a 600W. [20]

Os limites para os harmônicos de corrente para cada classe são dados pela Tabela 5 [20]. O foco deste trabalho será a Classe C, por englobarem as tecnologias de iluminação.

Tabela 5 – Limites para os Harmônicos de Corrente

Harmônicos [n]	Classe A [A]	Classe B [A]	Classe C [% da fundamental]	Classe D [mA/W]
Harmônicos Impares				
3	2,30	3,45	30 x $\lambda$	3,4
5	1,14	1,71	10	1,9
7	0,77	1,155	7	1,0
9	0,40	0,60	5	0,5
11	0,33	0,495	3	0,35
13	0,21	0,315	3	3,85/n
$15 \leq n \leq 39$	$0,15 \times 15/n$	$0,225 \times 15/n$	3	3,85/n
Harmônicos Pares				
2	1,08	1,62	2	-
4	0,43	0,645	-	-
6	0,30	0,45	-	-
$8 \leq n \leq 40$	$0,23 \times 8/n$	$0,345 \times 8/n$	-	-

Como salientado no tópico de Fator de Potência, a distorção na forma de onda afeta o fator de potência, que deve ser calculado pela Equação 2.7, onde  $DHT$  é o valor da distorção harmônica total de corrente e  $\phi_1$  é o ângulo entre a potência ativa e a potência aparente

$$FP = \frac{\cos \phi_1}{\sqrt{1 + DHT^2}} \quad (2.7)$$

## 2.5 Desequilíbrio de Tensão

Segundo o [PRODIST](#), o desequilíbrio de tensão é o fenômeno onde as três fases apresentam diferentes módulos de tensão e/ou defasagem angular entre fases diferentes de 120° elétricos. Essa grandeza é mensurada através do [FD](#) (*Fator de Desequilíbrio*) e pode ser calculada por dois métodos. O primeiro considera os valores de tensão de sequência positiva e negativa, dado pela Equação 2.8, o segundo considera as tensões eficazes de

linha, dado pelas Equações 2.9 e 2.10. Os limites determinados pelo PRODIST estão apresentados na Tabela 6 [15].

$$FD\% = \frac{V_-}{V_+} 100 \quad (2.8)$$

$$FD\% = 100 \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \quad (2.9)$$

Sendo:

$$\beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2} \quad (2.10)$$

Onde:

$V_-$  = Magnitude da Tensão Eficaz de Sequência Negativa - Frequência Fundamental

$V_+$  = Magnitude da Tensão Eficaz de Sequência Positiva - Frequência Fundamental

$V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}$  = Magnitude das Tensões Eficazes de Linha - Frequência Fundamental

$FD95\%$  = Valor do Indicador  $FD\%$  que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas.

Tabela 6 – Limites de Desequilíbrio de Tensão

Indicador	Tensão Nominal	
	$V_n \leq 1,0kV$	$1kV < V_n < 230kV$
$FD95\%$	3,0 %	2,0 %

## 2.6 Flutuação de Tensão

A flutuação de tensão corresponde a variações no valor eficaz da tensão de baixa intensidade, podendo ser de caráter aleatório, repetitivo ou esporádico. Ocorrem, normalmente, devido a operação de cargas de elevada potência no sistema, como fornos a arco, máquinas de solda, laminadores, elevadores e partidas de grandes motores. Essas cargas são peculiares, por consumirem uma grande potência e de característica variável, causando o distúrbio de flutuação de tensão no sistema.

Seu controle é importante, pois, a ocorrência de flutuação de tensão no sistema pode causar incômodo visual e até alterações neurológicas devido ao fenômeno de cintilação luminosa ou efeito *Flicker*. Além desse efeito, segundo [21], outros problemas podem ocorrer devido a presença de flutuação na rede, como: oscilações de potência e torque de

motores elétricos, interferência na instrumentação eletrônica, equipamentos de processamento de dados e de controle de processos industriais, redução da velocidade de fusão e da produtividade de fornos a arco e falhas ou comprometimento do processo de soldagem.

A severidade da flutuação de tensão de curta duração na rede é calculada através de um indicador chamado **PST** (*Nível de severidade de cintilação de curta duração*), exposto na Equação 2.11, onde  $P_i$ , chamado Percentil  $i$ , indica o nível de flutuação de tensão que foi ultrapassado durante  $i\%$  do tempo. Esses índices derivam da análise estatística dos dados, montando uma função distribuição acumulada, como mostra a Figura 9[15]. O indicador de longa duração é calculado pela Equação 2.12, porém ele não é mais utilizado para avaliar os níveis de flutuação de tensão no sistema de distribuição.

$$P_{st} = \sqrt{0,314P_{0,1} + 0,0525P_1 + 0,0657P_3 + 0,28P_{10} + 0,08P_{50}} \quad (2.11)$$

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} (P_{st_i})^3} \quad (2.12)$$

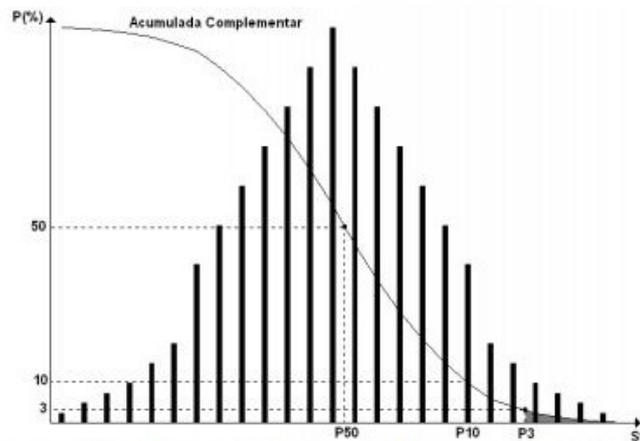


Figura 9 – Distribuição Acumulada Complementar da Sensação de Cintilação

Os limites estabelecidos pelo **PRODIST** para o **PST** são apresentados na Tabela 7 [15].

Tabela 7 – Limites de Flutuação de Tensão

Indicador	Tensão Nominal		
	$V_n \leq 1,0 \text{ kV}$	$1 \text{ kV} < V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
$P_{st95\%}$	1,0 pu	1,5 pu	2,0 pu

## 2.7 Variação de Frequência

A frequência do sistema de distribuição deve atender os valores delimitados pela Tabela 8. Caso fique fora dos limites, podem ocorrer falhas em motores e mal funcionamento ou danificação de equipamentos.

Tabela 8 – Limites de Variação de Frequência

Intervalo de Tempo	Limite Inferior [Hz]	Limite Superior [Hz]
Tensão de Regime Permanente		
—	59,9	60,1
Em caso de distúrbios		
< 30s	59,5	60,5
Em caso de corte de geração ou carga		
Condições Externas	56,5	66
< 30s	—	62
< 10s	58,5	63,5
< 5s	57,5	—

## 2.8 Variação de Tensão de Curta Duração

Segundo o [PRODIST](#), [VTCD](#) (*Variação de Tensão de Curta Duração*) são desvios significativos na amplitude do valor eficaz da tensão durante um intervalo de tempo inferior a três minutos. [15]

Esse distúrbio não é o foco desta dissertação. Porém, o conceito de [VTCD](#) é importante para que seja determinado que um intervalo de tempo superior a 3 minutos é considerado tensão de regime permanente.

O mesmo conceito é definido pela [IEC](#) considerando um intervalo de tempo de 1 minuto. [22].

## 2.9 Considerações Finais

A qualidade da energia elétrica apresentada neste capítulo será o norte para avaliarmos os impactos das lâmpadas no sistema de distribuição e do impactos do sistema nas lâmpadas, principalmente para compararmos os efeitos dos limites apresentados pelas diferentes normas.

## 3 Tipos de Lâmpadas

### 3.1 Considerações Iniciais

Para poder analisar os aspectos da qualidade da energia elétrica nas lâmpadas é necessário entender o seu princípio de funcionamento. Nesse estudo, serão utilizadas lâmpadas residenciais, isto é, de menor potência e tamanho e também lâmpadas industriais e públicas, de maior potência.

As lâmpadas residenciais que serão comparadas neste trabalho são as incandescentes, fluorescentes compactas e LED. Já as industriais e públicas serão duas lâmpadas de descarga, onde o fluxo luminoso é gerado direta e indiretamente pela passagem da corrente elétrica através de um gás ou mistura de gases, e duas lâmpadas de LED, que utilizam diodos emissores de luz de alta potência.

### 3.2 Lâmpadas Residenciais

#### 3.2.1 Lâmpadas Incandescentes

As lâmpadas incandescentes, vista na Figura 10, foram as primeiras lâmpadas a serem comercializadas em larga escala. Baseiam-se em um material que quando percorrido por uma corrente elétrica, aquecem tanto que emitem luz. Thomas Edson foi o responsável por descobrir um material capaz de produzir esse fenômeno por um tempo adequado. Esse material é o Tungstênio e suporta temperaturas de até 3400 C, porém esse processo deve acontecer dentro de um ambiente livre de oxigênio, sendo utilizado o vácuo ou gases apropriados, como visto na Figura 11 [23] [6] [24].

Essa lâmpada possui as vantagens de ser barata, possuir uma luz amarelada que agrada aos consumidores, além de se tratar de uma carga linear, composta apenas por resistência. Porém, é uma lâmpada de baixa eficiência, cerca de 10 a 20 Lm/W, sendo que apenas 5% da energia consumida é convertida em luz. E possui ainda uma curta vida útil, até 1000 h. [25]

#### 3.2.2 Lâmpadas Fluorescentes Compactas

As LFC, vista na Figura 12, funcionam pela ionização de gases de baixa pressão, através de um movimento de elétrons entre o cátodo e o ânodo. Essa colisão atômica causa a emissão de radiação ultravioleta, que quando incide sobre o revestimento de fósforo ou



Figura 10 – Lâmpada Incandescente

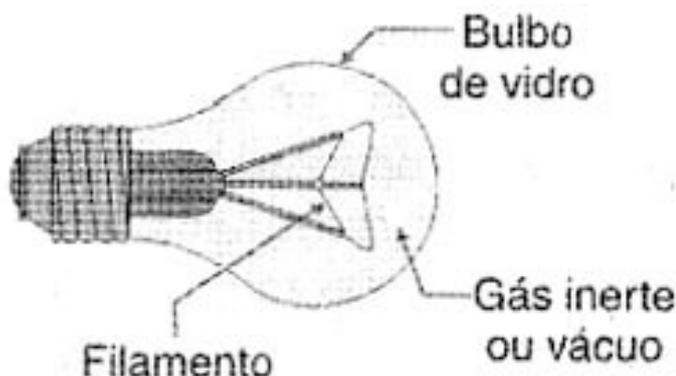


Figura 11 – Esboço da Lâmpada Incandescente

outros materiais aplicados sobre a superfície de vidro externa da lâmpada causa a emissão de luz.

O acionamento das [LFC](#) é realizado através de dispositivos de partida ou starters e de reatores. Durante a partida, é necessário uma alta tensão e corrente para realizar a ignição e o aquecimento, para iniciar o movimento de elétrons. Portanto, a tensão se eleva até atingir o ponto de partida e a lâmpada ligar, que aos poucos retornam ao seu valor de referência. [6] [26]

A lâmpada fluorescente compacta, se comparada a lâmpada incandescente, é muito mais eficiente, aproximadamente 55 lm/W, possui uma maior vida útil, em torno de 8000 h e baixas perdas por calor. Porém uma de suas maiores desvantagens é a presença de mercúrio em sua composição, elemento tóxico e poluente. Além de se tratar de uma carga não linear, devido ao seu acionamento eletrônico, com potencial de poluir o sistema de distribuição. [27]



Figura 12 – Lâmpada Fluorescente Compacta

### 3.2.3 Lâmpadas LED

O **LED** é um tipo de diodo, elemento eletrônico quando polarizado permite a passagem de corrente somente em um dos sentidos. Este elemento emite luz quando submetido a passagem de corrente, por isso é uma lâmpada chamada de estado sólido. Portanto, uma lâmpada **LED**, como o próprio nome diz, é constituída por um conjunto de **LED** que pode gerar luminosidade equivalente à das lâmpadas fluorescentes compactas e incandescentes, com um consumo menor de potência. [28]

Os **LED**, vista na Figura 13, operam em corrente contínua, por isso necessitam de um sistema de acionamento chamado drive para ser conectado à rede alternada. Segundo [6], os drives são circuitos eletrônicos impressos em placas e colocados no soquete das lâmpadas **LED**, que possuem um filtro para altas frequências, um retificador e em alguns casos conversores, como visto na Figura 14[7]. Há vários drives no mercado que fazem esse papel, como: buck, boost, flyback ou conversor DC-DC ressonante, o drive escolhido pode alterar as características elétricas das lâmpadas, como fator de potência e emissão de harmônicos. [26]

Diferentemente das lâmpadas incandescentes, nas lâmpadas **LED** não há a presença de filamentos que precisam ser aquecidos, permitindo que ela tenha um tempo de vida útil muito maior, cerca de 25000 h. Segundo o **Inmetro** (*Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia*), podendo durar 25 vezes mais que as lâmpadas incandescentes e 4 vezes mais do que as fluorescentes compactas. Além disso, seu consumo é aproximadamente 90% menor que o das lâmpadas incandescentes de luminosidade equivalente, tendo uma eficiência de 100 lm/W. [29] [30]

Outras vantagens da lâmpada **LED** são:



Figura 13 – Lâmpada LED

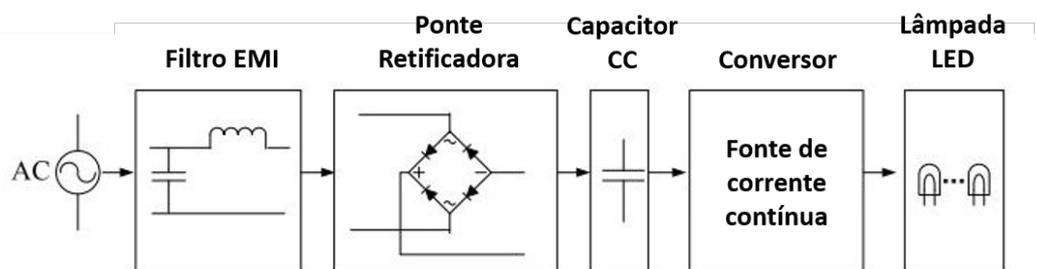


Figura 14 – Diagrama de Blocos Típico de uma lâmpada LED

- maior resistência física, por não possuir filamentos frágeis e vidro;
- acionamento instantâneo, pois não depende de aquecimento e resfriamento para o seu acionamento;
- não possui mercúrio em sua composição, é constituída principalmente por materiais reciclados, reduzindo possíveis danos a saúde e ao meio ambiente;
- não emite raios ultravioletas e infravermelhos;
- acionamentos sucessivos não prejudicam sua vida útil;
- baixa geração de calor.

### 3.3 Lâmpadas Industriais e Públicas

#### 3.3.1 Lâmpada Vapor de Sódio

Este modelo de lâmpada funciona em um sistema de alta pressão. Uma alta descarga elétrica entre os eletrodos leva o gás interno do bulbo a se ionizar. Através da

passagem de corrente elétrica por esse gás ionizado acontece a emissão de luz.

Esse modelo de lâmpada possui os aspectos construtivos apresentados na Figura 15[31]. Esta difere, principalmente, pelo fato do arco circular em uma atmosfera com nível de pressão mais elevado. Com a elevação da pressão da atmosfera gasosa, composta principalmente de vapor de sódio, obtém-se um fluxo luminoso de espectro contínuo com cor dourada, característica esta que, limita a sua utilização. Por outro lado, melhora a sua eficiência na emissão de luz.

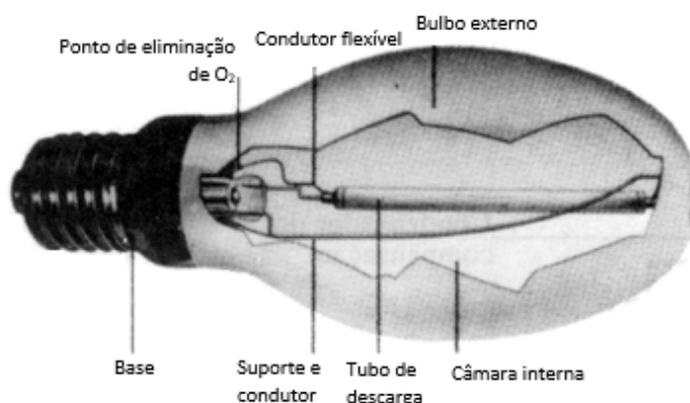


Figura 15 – Composição básica das lâmpadas vapor de sódio a alta pressão

Em condições de operação normal, a temperatura do tubo de descarga pode atingir níveis de 1000°C. Em face da presença do vapor de sódio, material altamente abrasivo, não é possível a utilização do vidro duro ou do quartzo na fabricação do tubo de descarga. Portanto, este tubo é feito de óxido de alumínio sinterizado. Este óxido cerâmico possui ponto de fusão em torno de 2050°C, além de possuir a característica de ser translúcido (transmitância de 90%), com a capacidade de suportar a agressividade gerada pela atmosfera abrasiva do vapor de sódio em condições de temperatura e pressão elevadas. Portanto, o óxido de alumínio sinterizado é utilizado na fabricação do tubo de descarga das lâmpadas vapor de sódio a alta pressão. [31]

O tubo de descarga também é envolvido por um bulbo de vidro recoberto internamente por fósforo, que, quando excitado com radiação ultravioleta gerada pela ionização dos gases, produz luz visível. O vácuo existente entre o bulbo e o tubo de descarga tem por objetivo diminuir a perda de calor para o meio ambiente, gerando o aumento da pressão no tubo de descarga. Nas extremidades do tubo de descarga estão instalados os eletrodos responsáveis pela emissão eletrônica que constitui o arco. A atmosfera na qual o arco circula é constituída principalmente de vapor de sódio.

Quando se energiza o circuito, um transitório eletromagnético é produzido. Este transitório é responsável pelo alto nível de força eletromotriz de auto-indução no reator. O processo de ignição da lâmpada vapor de sódio é semelhante à fluorescente convencional,

a principal diferença neste processo é de o *starter* ser substituído por um ignitor. O surto de tensão, gerado no processo de ignição, ioniza o gás xenônio e facilita a emissão de elétrons entre os eletrodos. A partir deste instante o reator passa a funcionar como um estabilizador da corrente e o ignitor é desativado. O arco inicial eleva a temperatura no interior do tubo de descarga vaporizando o mercúrio. A vaporização do mercúrio e sua subsequente ionização aumenta a intensidade da corrente do arco, elevando a temperatura da atmosfera do bulbo interno a níveis de vaporização do sódio metálico, aumentando assim, a pressão no tubo de descarga e a quantidade de emissão de luz. O processo de acendimento dura em torno de 2 a 15 min.

As principais aplicações das lâmpadas vapor de sódio a alta pressão são também na iluminação de áreas abertas, ruas, avenidas, indústrias e galpões. Outra aplicação mais generalizada destas lâmpadas é em locais onde se necessita de elevados índices de iluminância.

Normalmente, na substituição das lâmpadas vapor de mercúrio é realizada em locais onde a reprodução de cores não é um fator relevante, já que a vapor de mercúrio possui emissão de luz branca-dourada, não tendo a mesma eficiência de reprodução de cor da lâmpada de vapor de sódio, que emite luz branco-azulada. Mas essa substituição foi largamente adotada pela diferença de rendimento, mantendo o mesmo tempo de durabilidade dessas lâmpadas. A vapor de sódio possui uma eficiência de até 130 lm/W com uma durabilidade média de 16000 horas, superando a lâmpada de vapor de mercúrio, que possui uma eficiência de até 55 lm/W e durabilidade média de 18000 horas. [32]

Para o seu bom desempenho depende da qualidade do reator e ignitor, não devendo ser utilizado em circuitos capacitivos, pois essa característica prejudica o funcionamento adequado do reator.

### 3.3.2 Lâmpada Mista

A lâmpada mista possui esse nome devido ao seu aspecto construtivo, que combina aspectos da lâmpada incandescente com aspectos das lâmpadas de vapor de mercúrio. Essa consiste em um bulbo preenchido com gás, revestido na parede interna com fósforo, contendo um tubo de descarga ligado em série com um filamento de tungstênio. O filamento tem duas funções nessa lâmpada, além de produzir luminosidade direta, assume o papel do reator em lâmpadas de descarga, limitando a corrente. O que possibilita que essa lâmpada seja ligada diretamente a rede em uma tensão de 220V, pois uma tensão menor impossibilita a ionização do mercúrio.

Essa lâmpada emite três tipos de luminosidade diferentes, a primeira incandescente oriunda do filamento, a segunda branco-azulada emitida pelo tubo de descarga e a terceira, avermelhada, emitida pelo contato da radiação ultravioleta invisível com a

camada fluorescente do bulbo, como visto na Figura 16[33].

Essa lâmpada apesar do seu aspecto prático devido a independência do reator, não é uma boa opção quando se trata de rendimento e tempo de vida útil, possuindo cerca de 25 lm/W e 8000 horas, respectivamente. Bem abaixo das lâmpadas de vapor metálico.

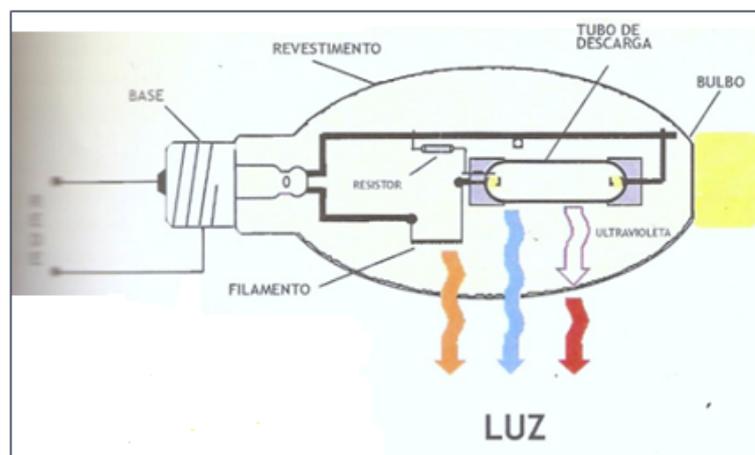


Figura 16 – Funcionamento da Lâmpada Mista

### 3.3.3 Refletor LED

Para esse tipo de lâmpada, o princípio básico de emissão de luz muda. Nos modelos anteriores a luz é gerada através do aquecimento de filamento até sua incandescência, descarga elétrica através de gases. Já no caso das lâmpadas LED, seus componentes convertem corrente elétrica diretamente em luminosidade (luz) através do efeito da eletroluminescência. [34]

Ao contrário das demais lâmpadas, os refletores LED não possuem um bocal. São alimentados através de fios de fases e neutro. O componente mais importante de um LED é o *chip* semicondutor responsável pela geração de luz. Cada refletor é composto por vários pequenos *chips*.

Esse tipo de iluminação não depende de uma estrutura externa de proteção para que seja utilizado em ambientes externos e que exijam robustez, pois os *chips* já são dispostos dentro de uma estrutura metálica pensada para resistir a sol, chuva, poeira e outras intempéries. Além disso, possui aletas dissipadora de calor, que se fazem necessárias apesar da luminosidade LED ser considerada fria, já que os *chips* LED possuem perdas em forma de calor.

A geração de luminosidade proveniente de pequenos *chips* funcionando em conjunto dá a esse modelo uma grande diversidade de formato, potência e luminosidade emitida. Porém, para que haja compatibilidade entre a tensão da rede e a tensão de trabalho do LED, é necessário haver uma conversão de corrente alternada para contínua,

adequando assim, a sua tensão de funcionamento. Isto é novamente realizado por um dispositivo chamado drive, que corrige a corrente e a tensão para que elas trabalhem em condições ótimas de operação, realizando também a proteção dos LED, que são cargas sensíveis a surtos.

Os refletores LED possuem uma eficiência superior a 120 lm/W com uma durabilidade média de 100000 horas. Tendo um rendimento similar a lâmpada de vapor de sódio, porém são mais eficientes, pois concentram a luminosidade no ponto de interesse e ainda possui uma durabilidade seis vezes maior.

São válidas as mesmas preocupações relacionadas as lâmpadas LED residenciais, porém com mais intensidade devido a sua maior potência. Aumentando o possível impacto das poluições emitidas pelos refletores LED.

### 3.4 Considerações Finais

Como apresentado neste capítulo, as lâmpadas consideradas nesta dissertação possuem diferentes formatos, características elétricas e, principalmente, tipos construtivos. O que proporciona a cada uma um comportamento singular quando submetido a distintas alimentações de tensão. Conhecer essas peculiaridades é essencial para compreender os resultados dos testes realizados neste estudo, as características elétricas e luminotécnicas das lâmpadas utilizadas serão apresentadas nos capítulos seguintes.

## 4 Análise Qualitativa das Lâmpadas LED Residenciais

### 4.1 Considerações Iniciais

Conhecendo as vantagens e desvantagens teóricas de cada lâmpada, é necessário realizar um estudo prático em ambiente laboratorial para analisar os aspectos mais profundos da substituição das lâmpadas residenciais por tecnologia **LED**. As lâmpadas serão submetidas a testes de tensão de regime permanente, flutuação de tensão, injeção de harmônicos e suportabilidade a subtensão.

### 4.2 Lâmpadas Utilizadas

Para esses testes foram escolhidas oito lâmpadas **LED** de três fabricantes diferentes, com diferentes potências. As características nominais informadas pelos fabricantes estão dispostas na Tabela 9.

Tabela 9 – Características nominais das lâmpadas LED

Lâmpadas	Potência	Tensão	Fabricante	Certificado Inmetro	Fluxo Luminoso	Eficiência Luminosa	Vida Útil	FP	Corrente
LED1	7W	Bivolt	A	Não	—	—	15000 h	—	—
LED2	9W	Bivolt	A	Sim	860 lm	—	25000 h	> 0,7	101 mA (127V) 58mA (220V)
LED3	12W	Bivolt	A	Sim	1200 lm	—	25000 h	> 0,7	89 mA (127V) 55 mA (220V)
LED4	5W	Bivolt	B	Não	450 lm	—	25000 h	—	0,068 ~0,1 A
LED5	10W	Bivolt	B	Não	806 lm	—	30000 h	—	0,111 A
LED6	8W	Bivolt	B	Sim	803 lm	100 lm/W	25000 h	> 0,7	0,057 A (127V) 0,036 A (220V)
LED7	10W	Bivolt	B	Sim	1018 lm	101 lm/W	25000 h	> 0,7	0,074 A (127V) 0,046 A (220V)
LED8	9W	Bivolt	C	Sim	810 lm	90 lm/W	25000 h	> 0,7	0,079 A (127V) 0,052 A (220V)

A Portaria do **Inmetro** nº 144, de 13 de março de 2015 estabelece os critérios para o programa de avaliação da conformidade para lâmpadas **LED** com dispositivo integrado à base por meio da **ENCE** (*Etiqueta Nacional de Conservação de Energia*). Essa portaria indica ao consumidor final, produtos que foram testados e atendem a critérios de qualidade estipulados pelo **Inmetro**.

O descritivo técnico dos critérios da portaria acima são abordados na Portaria do **Inmetro** nº 389, de 25 de agosto de 2014, que aprova o Regulamento Técnico da Qualidade para essas lâmpadas, são base para análise de conformidade com padrões específicos de segurança, desempenho e qualidade estipulados. [35] [36]

Como pode ser observado na quinta coluna da Tabela 9, foi salientado se a lâmpada possui ou não a certificação do [Inmetro](#). Essa informação é importante para que durante a avaliação dos resultados desse estudo, seja possível avaliar se as medidas de regulamentação da qualidade das lâmpadas disponibilizadas no mercado nacional já são suficientes para eliminar e/ou reduzir os impactos das lâmpadas no sistema de distribuição e sua suportabilidade aos distúrbios presentes na rede elétrica.

Durante o desenvolvimento dessa dissertação, essas mesmas lâmpadas foram testadas nos padrões do [Inmetro](#), para avaliar o impacto da regulamentação na qualidade das lâmpadas LED. Esse estudo completo foi publicado no [CBA \(Congresso Brasileiro de Automática\)](#) em 2018 com o título “Avaliação do Impacto da Portaria Nº 144 do [Inmetro](#) na Qualidade das Lâmpadas [LED](#)” [37].

Os principais parâmetros exigidos pela portaria são:

- A potência consumida pela lâmpada [LED](#) não pode exceder 110% da potência declarada pelo fabricante;
- O fator de potência tem que ser maior ou igual a 0,7 para lâmpadas de 5W a 25W, 0,92 para lâmpadas maiores que 25W e não é exigido para lâmpadas de menor potência;
- Os limites para correntes harmônicas devem ser obedecidos para lâmpadas com potência acima de 25W, adotando os critérios da Classe C da [IEC 61000-3-2](#); [22]
- O fluxo luminoso inicial medido em uma lâmpada [LED](#) não pode ser inferior a 90% do fluxo nominal declarado.

O estudo concluiu que há uma clara melhora na qualidade das lâmpadas, especialmente nos quesitos fator de potência, que foi adequado em todas as lâmpadas novas testadas, e correntes harmônicas, que apesar de não ser um critério exigido pela portaria para as lâmpadas com potência menor que 25W, já foi melhorado. Esses resultados impactam diretamente na qualidade da energia elétrica.

Observa-se que ainda há oportunidades de melhoria, tanto nas correntes harmônicas, quanto na luminosidade do fabricante B. No entanto, o ponto mais crítico é a potência das lâmpadas, já que um dos principais motivadores desta mudança de tecnologia é a redução do gasto energético. É fato que, quando comparada a lâmpada incandescente, já houve uma substancial melhora na eficiência energética das lâmpadas [LED](#), porém, deve-se adequar a potência declarada a que realmente é consumida.

### 4.3 Estrutura de Testes

Para testar essas lâmpadas em laboratório foi utilizada uma fonte trifásica programável California Instruments (6000L-PT), onde foi possível gerar os distúrbios encon-

trados no sistema de distribuição e controlar a tensão aplicada, bem como a frequência desta variação, através do *software Cigui*. [38]

Para captar a luminosidade das lâmpadas, um sensor de luminosidade usado foi o ISL 29020, pois fornece uma resposta muito próxima à resposta do olho humano, como demonstra a Figura 17 [39], onde a curva verde corresponde à resposta do olho humano que tem características semelhantes da resposta do sensor para luz ambiente, apresentada na curva vermelha.

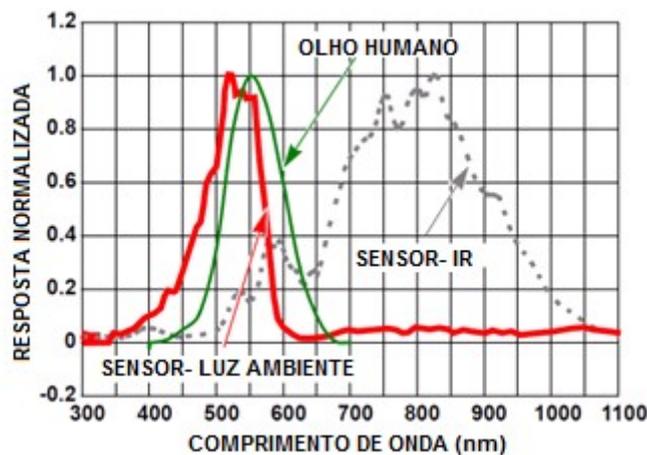


Figura 17 – Resposta Espectral para Detecção de Luz Ambiente e no Sensor

A resposta do sensor depende de parametrizações feitas através de um código binário. Este código inserido em uma placa chamada Arduino Uno, apresentada na Figura 18, controla o sensor permitindo a aquisição de dados para o computador. Com as parametrizações do sensor obtêm-se os valores de fluxo luminoso contínuo, captando a luz ambiente sob uma taxa de 117 medidas por minuto em um fundo de escala de 64.000 lux. [40]

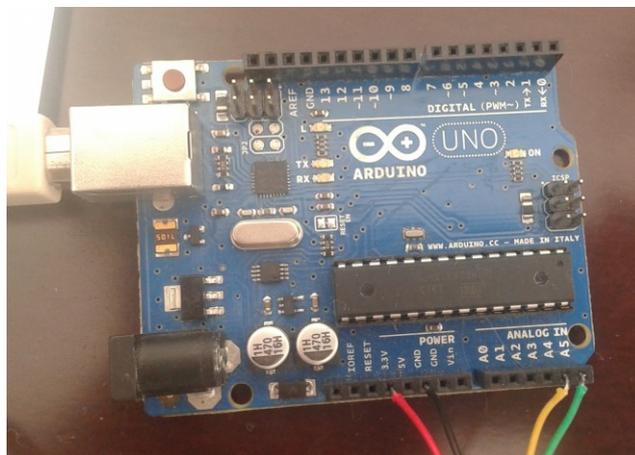


Figura 18 – Placa Arduino Uno

Para determinar as grandezas elétricas foi utilizado o qualímetro PowerGuide 4400, da Dranetz, que faz a aquisição de tensão e corrente. Os testes foram realizados em uma câmara escura para reproduzir um ambiente controlado e sem interferência de luminosidade externa. O esquema de ligação é apresentado na Figura 19 e na Figura 20, apresenta uma visão geral do experimento. [41]

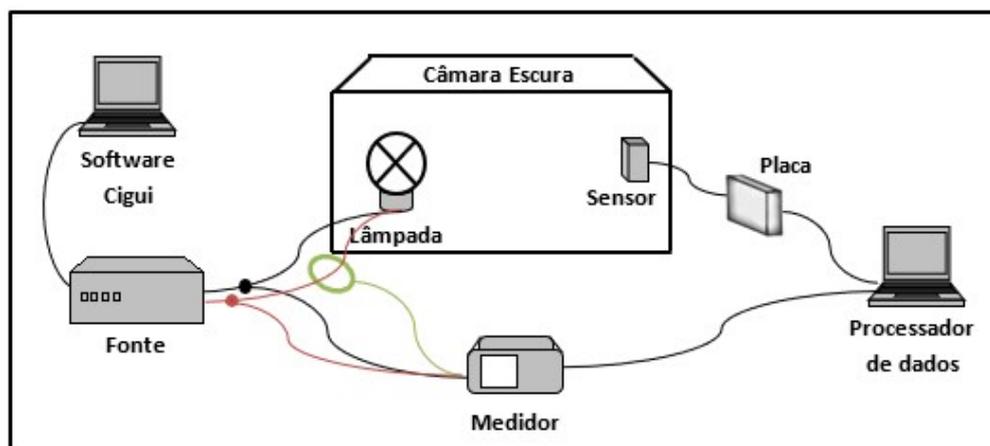


Figura 19 – Esquema de Conexão dos Equipamentos Utilizados no Experimento



Figura 20 – Ligação Real dos Equipamentos Utilizados no Experimento

Antes de aplicar os testes, foi realizado o aquecimento das lâmpadas durante 20 minutos, para que elas atingissem o estado de tensão de regime permanente.

#### 4.4 Testes Realizados

A seguir serão apresentados os testes realizados para analisar a resposta das lâmpadas aos principais distúrbios da qualidade da energia elétrica, como mostra a Tabela 10.

Tabela 10 – Testes realizados para Lâmpadas Residenciais

	Tensão	Referência Normativa
Tensão de Regime Permanente	127V/220V	PRODIST
Flutuação de Tensão	127V/220V	IEC 61000-4-14
Harmônicos	127V/220V	IEEE Std. 519
		EN 50160
		IEC 61000-3-2
		ONS
PRODIST		
Suportabilidade a Subtensão	127V	—

#### 4.4.1 Tensão de Regime Permanente

O primeiro teste foi o de tensão de regime permanente, onde cada lâmpada foi submetida a tensão nominal de 127V e 220V durante 10 minutos. Para que pudesse ser avaliado o seu comportamento em situação ideal, sem nenhuma composição harmônica, como comprova a Figura 21.

A Figura 22 apresenta as tensões harmônicas durante o teste de tensão de regime permanente, evidenciando que não há nenhuma contribuição harmônica advinda do sistema de alimentação.

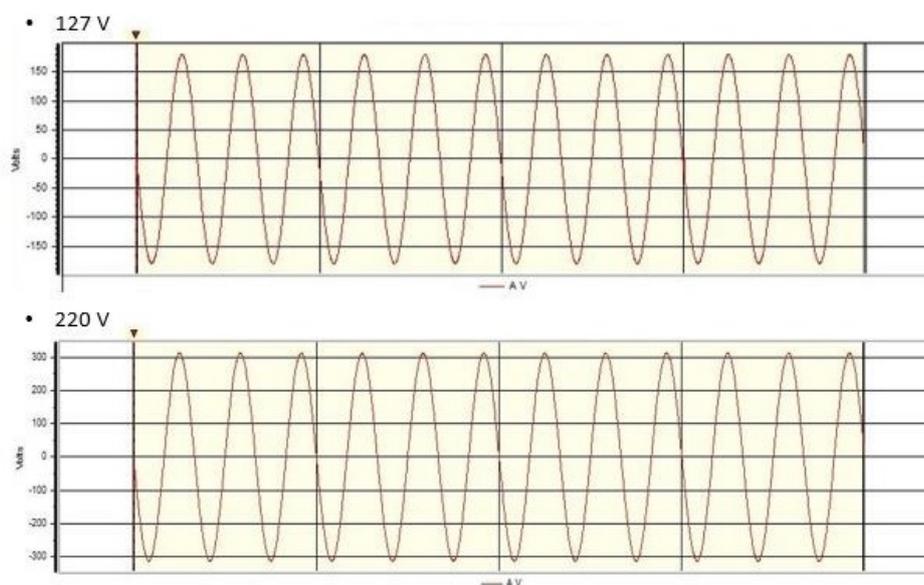


Figura 21 – Forma de Onda de Tensão em tensão de regime permanente

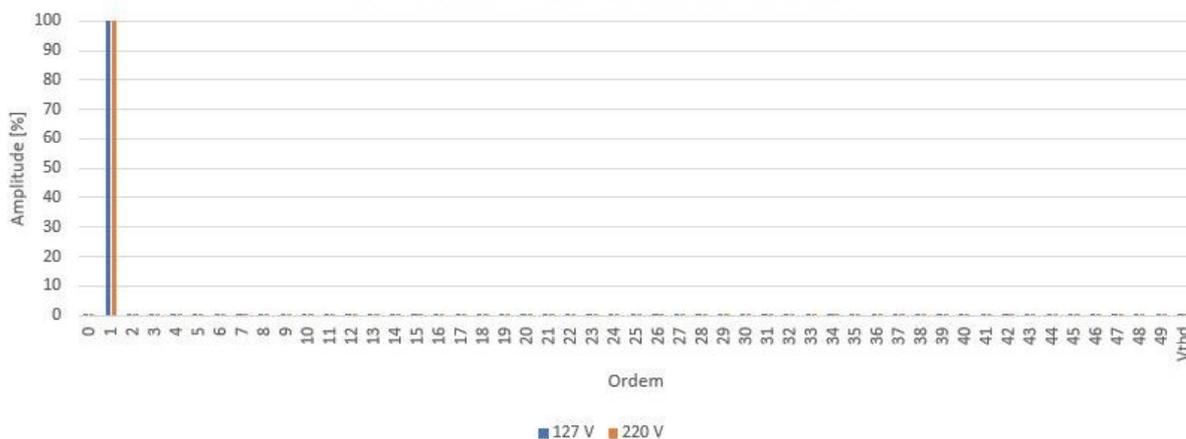


Figura 22 – Tensão Harmônica em tensão de regime permanente

#### 4.4.2 Flutuação de Tensão

O teste de flutuação de tensão foi aplicado de acordo com a norma IEC 61000-4-14. Assim, as flutuações de tensão foram retangulares, como mostra a Figura 23 [22].

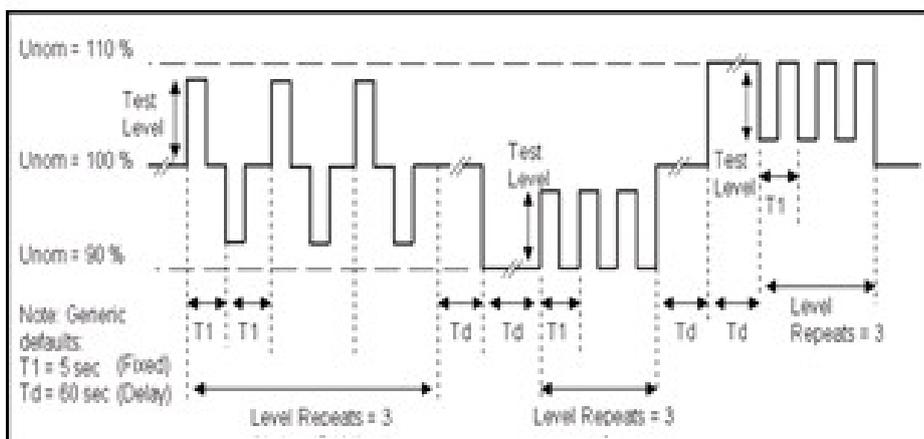


Figura 23 – Variação da Tensão Aplicada pela Fonte na Lâmpada

A Figura 24 comprova que a forma de onda de tensão especificada pela norma supracitada foi realmente aplicada nas lâmpadas para os dois níveis de tensão, 127V e 220V. [22]

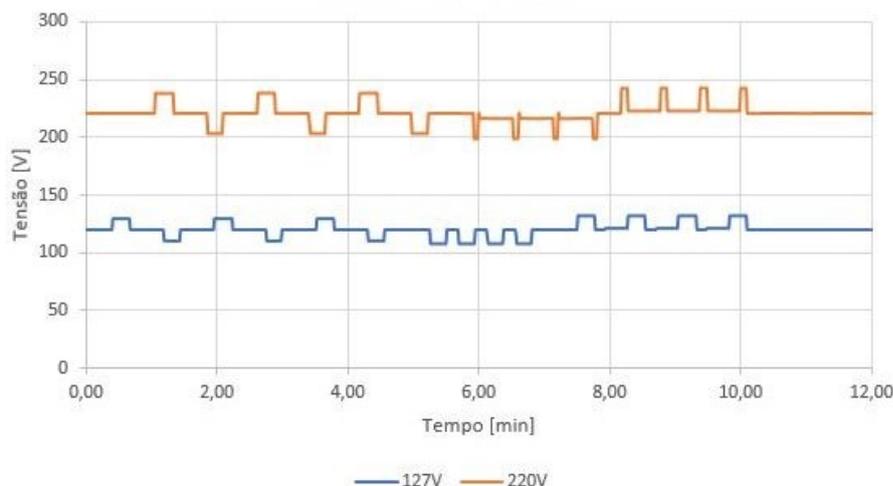


Figura 24 – Tensões Aplicadas durante o ensaio de Flutuação de Tensão

#### 4.4.3 Harmônicos

Para determinar quais os níveis de distorção harmônica de tensão a serem aplicados nas lâmpadas, utilizou-se os limites das principais normas para as distorções harmônicas de tensão individuais, nacionais e internacionais. Sabe-se que é praticamente impossível obter esses níveis de distorção no sistema de distribuição real, e que, quando considera-se o limite individual de todas as ordens harmônicas, a distorção harmônica de tensão total ultrapassará os valores determinados pelas respectivas normas, porém decidiu-se testar os piores cenários que as lâmpadas deveriam suportar. As normas nacionais utilizadas são: módulo 8 do [PRODIST](#) e o submódulo 2.8 dos Procedimentos de Rede ([ONS](#)). E as internacionais: [IEEE Std. 519](#), a norma Europeia [EN50160](#) e a [IEC 61000-3-2](#). [15] [42] [43] [44]

A tensão harmônica individual aplicadas de acordo com cada norma é apresentada na Figura 25. Observa-se que diferentes níveis harmônicos são aplicados em cada ordem harmônica, que, conseqüentemente, altera o [DHT](#) de tensão. Na figura em questão são apresentadas as componentes aplicados em 127V, que é exatamente a mesma aplicada em 220V. O que causa o mesmo nível de distorção harmônica nos dois níveis de tensão, como observado na Tabela 11. A presença harmônica causa uma distorção no formato senoidal da tensão aplicada, deixando clara as diferentes formas de onda resultantes de cada norma. Elas são apresentadas nas Figuras 26, 27, 28, 29 e 30, respectivamente para a [IEC](#), o [PRODIST](#), a [EN](#), o [ONS](#) e o [IEEE](#). Essa distorção altera também o valor eficaz obtido, como visto na Tabela 12, o que pode causar problemas não só pela distorção harmônica, mas também pelo nível de tensão ficar abaixo do limite de funcionamento estabelecido pelos fabricantes, mas optou-se por não corrigir esse nível de tensão. [22] [15] [44] [42] [43]

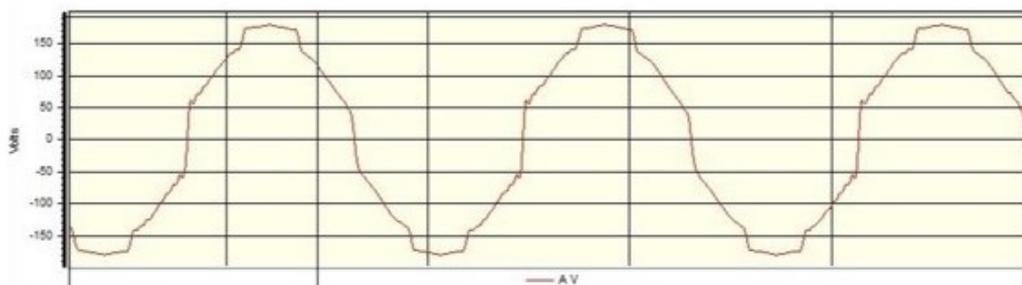


Figura 25 – Distribuição Harmônica das Tensões Aplicadas 127V

Tabela 11 – Distorção Harmônica de Tensão Total Aplicadas

Tensão Base	IEC	PRODIST	EN	ONS	IEEE
127V	11,52%	26,78%	11,35%	12,74%	24,63%
220V	11,55%	26,75%	11,35%	12,78%	24,65%

• 127 V



• 220 V

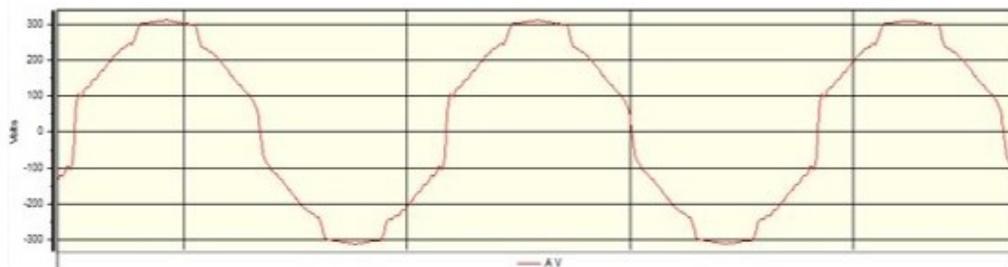
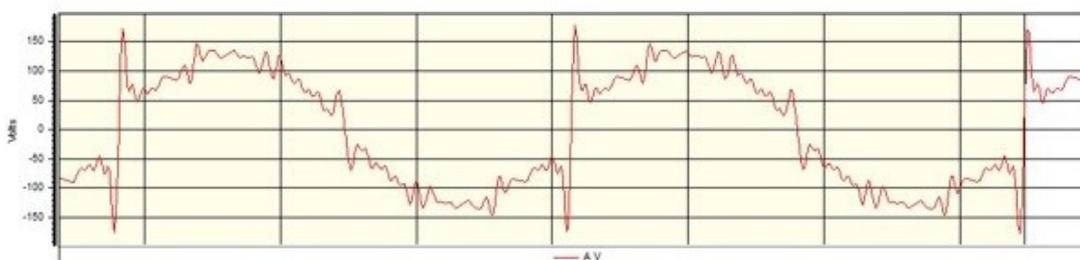


Figura 26 – Forma de Onda de Tensão IEC

• 127 V

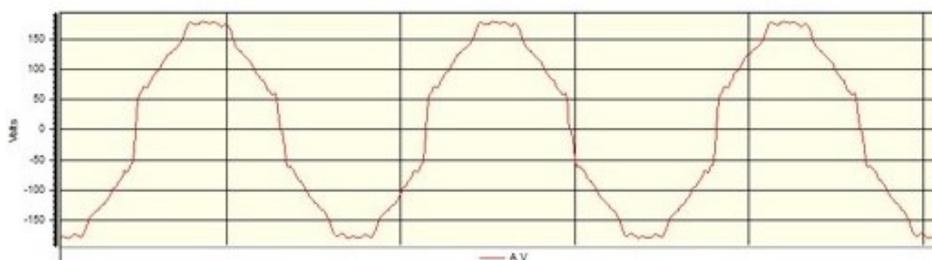


• 220 V



Figura 27 – Forma de Onda de Tensão PRODIST

- 127 V



- 220 V

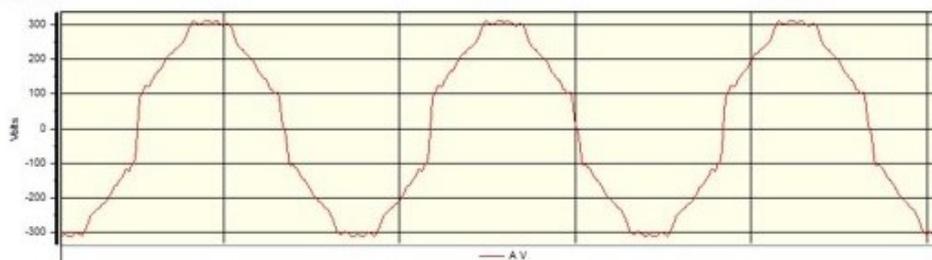
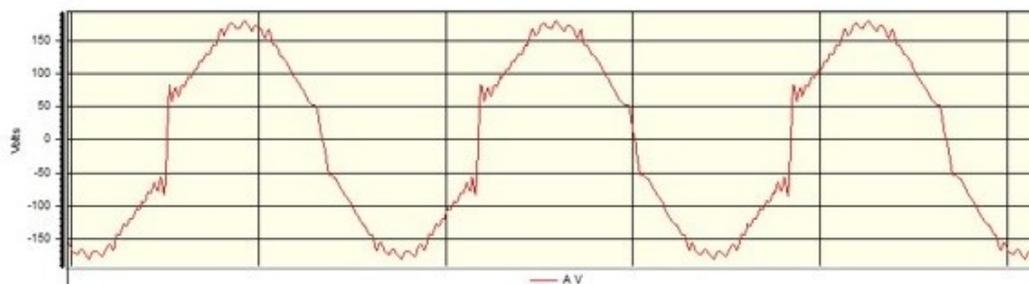


Figura 28 – Forma de Onda de Tensão EN

- 127 V



- 220 V

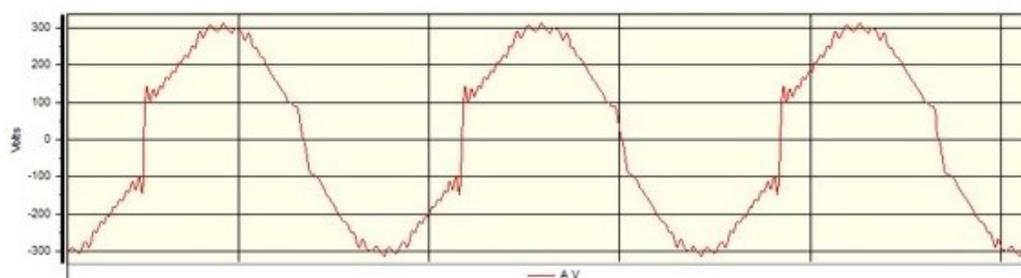


Figura 29 – Forma de Onda de Tensão ONS

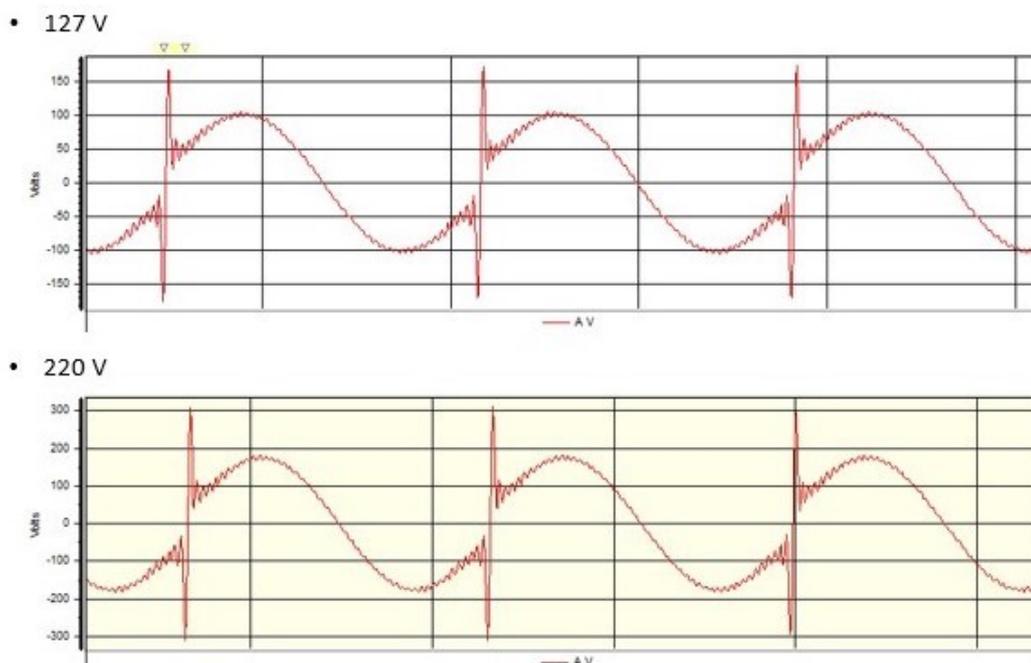


Figura 30 – Forma de Onda de Tensão IEEE

Tabela 12 – Tensão Eficaz para Tensões Harmônicas Aplicadas

Tensão Base	IEC	PRODIST	EN	ONS	IEEE
127V	131,7V	98,9V	131,4V	128V	78V
220V	228,3V	171,2V	227,7V	221,7V	135,7V

#### 4.4.4 Suportabilidade a Subtensão

Com esse experimento deseja-se determinar em qual nível de tensão a lâmpada desliga e o comportamento da luminosidade até zerar. Para isso, foram realizados sucessivos decréscimos no nível de tensão, espaçados de 1 minuto entre eles, já que esse é considerado o tempo para tensão de regime permanente pela [IEC](#). Não foi utilizado o tempo de regime permanente do [PRODIST](#) (3 minutos) para reduzir o risco de danos permanentes as lâmpadas. As nove primeiras reduções foram de 1%, as demais de 5% até o desligamento.

## 4.5 Resultados

A seguir serão apresentados os principais resultados obtidos para as oito lâmpadas [LED](#) testadas, utilizando a nomenclatura LED1 a LED8, como foi apresentado na seção anterior. Todos os gráficos obtidos nessa análise estão disponíveis para consulta no Apêndice A.

### 4.5.1 Tensão de Regime Permanente

Para os testes em tensão de regime permanente, após o aquecimento, as lâmpadas foram submetidas as tensões senoidais de 127V e 220V. Foram analisadas as grandezas: luminosidade, potência, tensão, corrente, fator de potência e componentes harmônicas de corrente individuais e a distorção total de corrente.

Como resultado dos ensaios em tensão de regime permanente, a luminosidade permaneceu constante em todas as lâmpadas, mesmo com a potência tenha oscilado em torno da potência nominal informada pelo fabricante. Observa-se, na Figura 31, que a corrente apresenta o mesmo comportamento oscilatório. Portanto, essa variação surge devido a atuação do drive de conversão de tensão, baseado no chaveamento de componentes eletrônicos.

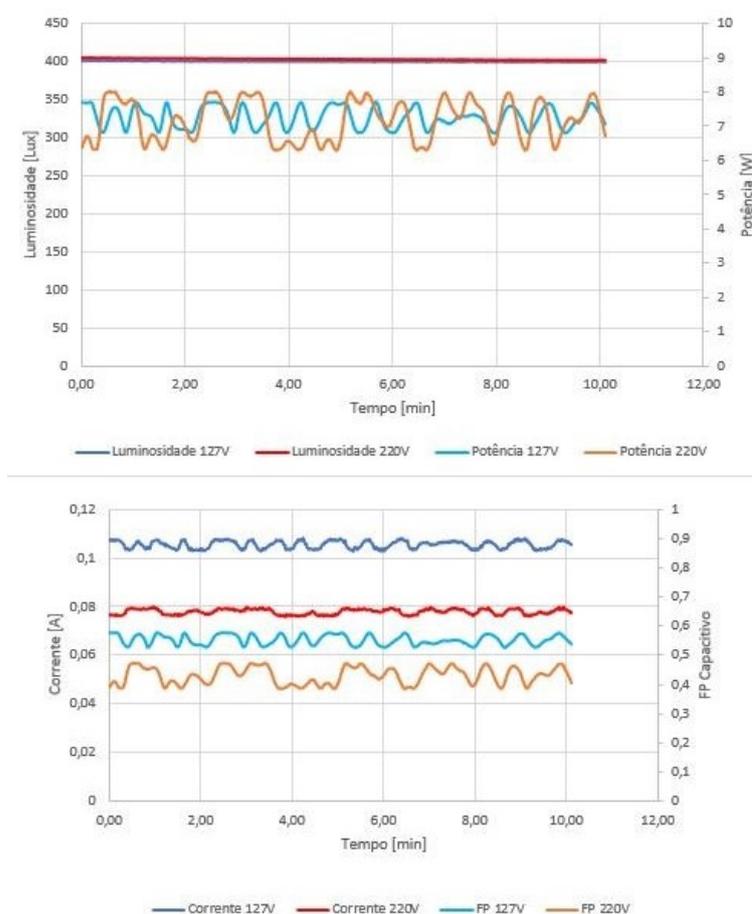


Figura 31 – Tensão de Regime Permanente LED1

O fator de potência fica abaixo do recomendado para a LED1. O mesmo já não acontece para a LED 2, como observa-se na Figura 32, onde o fator de potência permanece acima do recomendado. As demais lâmpadas, as que não possuem selo [Inmetro](#), apresentam o fator de potência abaixo do recomendado.

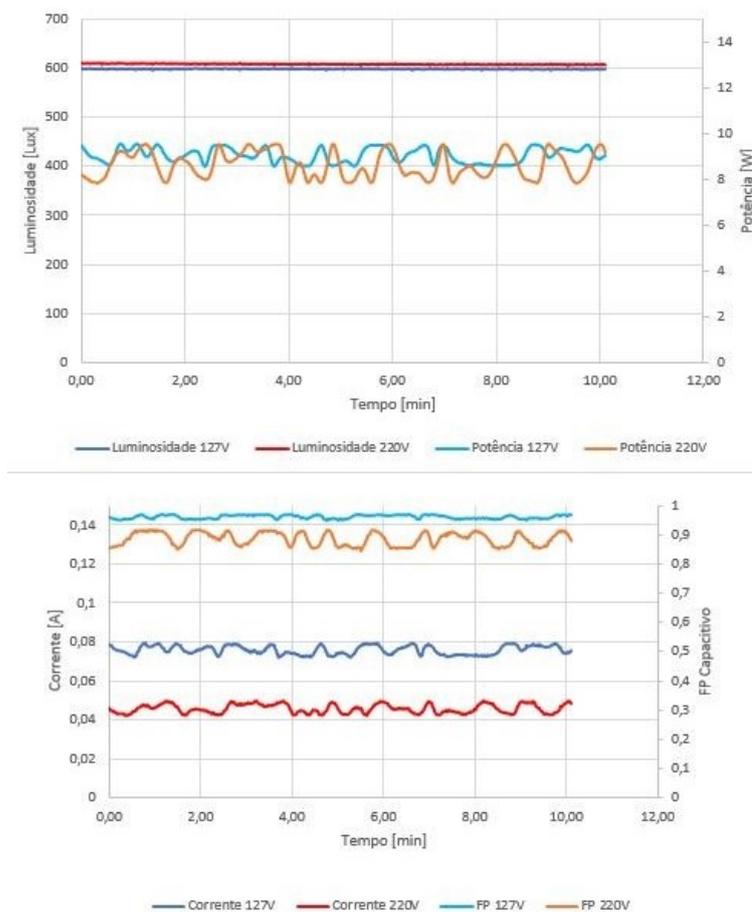


Figura 32 – Tensão de Regime Permanente LED2

A mesma relação, entre as lâmpadas com e sem certificação do [Inmetro](#), se estabelece para a composição harmônica. As lâmpadas, que possuem o selo de qualidade, apresentam as componentes harmônicas próximas aos limites estipulados pela norma [IEC 61000-3-2](#), conforme [Figura 33](#), que determina limites para as lâmpadas acima de 25W. Esses valores serão utilizados como referência para análise das distorções harmônicas. Essa composição harmônica resulta na forma de onda mostrada na [Figura 34](#).

Já a distorção harmônica para as lâmpadas sem selo do [Inmetro](#) ultrapassam consideravelmente o limite estipulado. Como observado na [Figura 35](#), ao decompor as componentes harmônicas, há a presença mais significativa das primeiras ordens harmônicas ímpares, 3<sup>a</sup> a 15<sup>a</sup> ordem. Essa alta distorção harmônica pode ser percebida na forma de onda da corrente apresentada na [Figura 36](#).

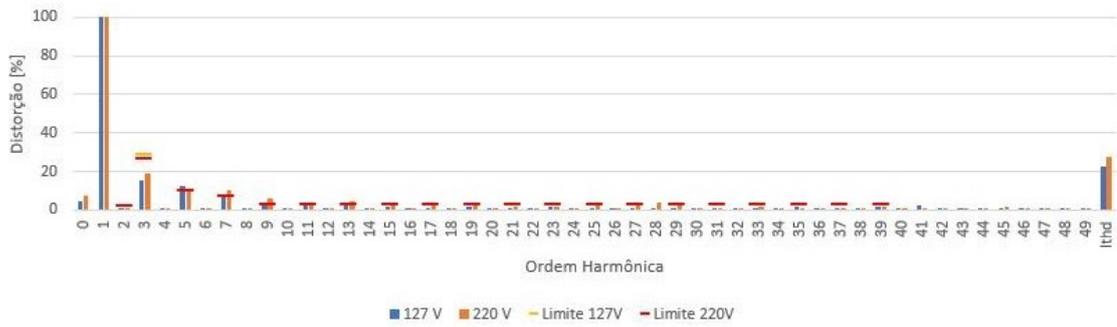
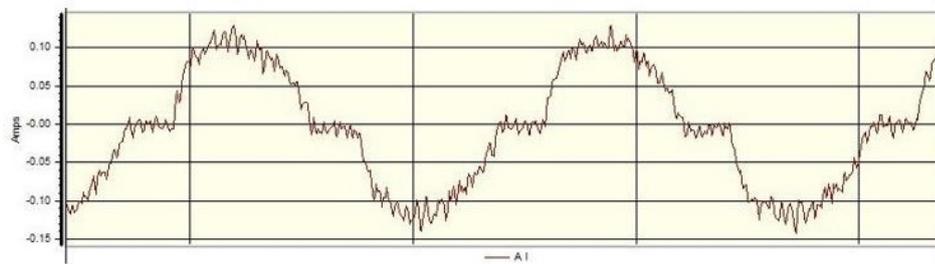


Figura 33 – Harmônicos de Corrente para LED2

- 127 V



- 220 V

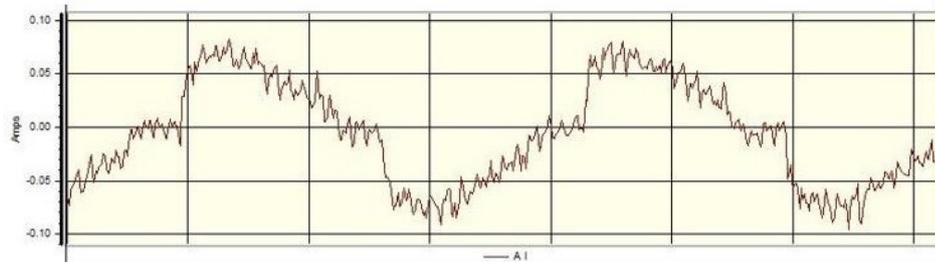


Figura 34 – Forma de Onda da Corrente para LED2

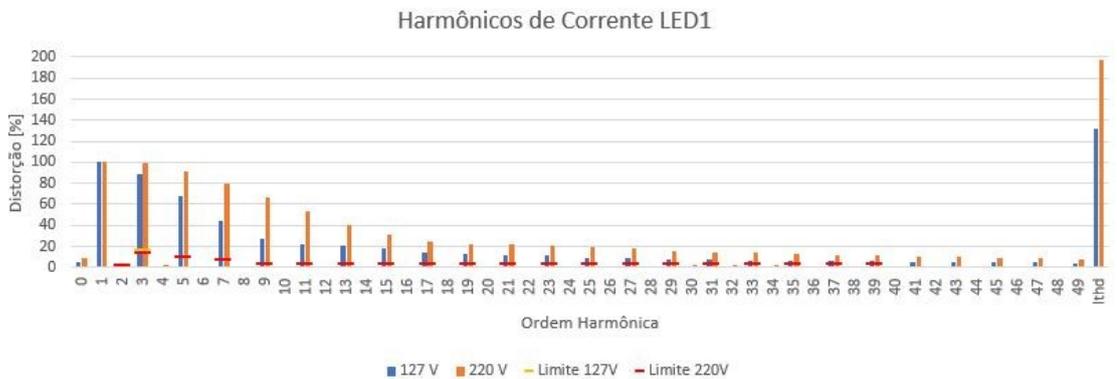
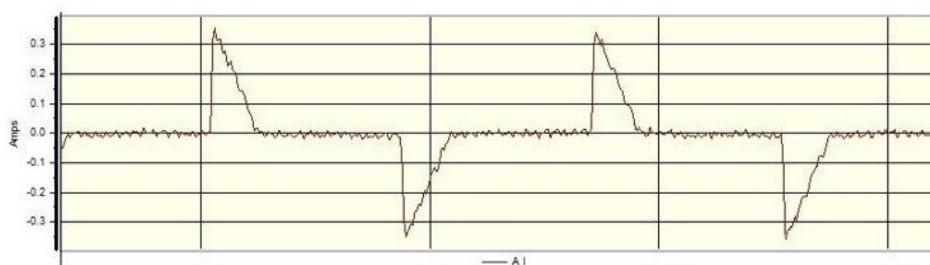


Figura 35 – Harmônicos de Corrente para LED1

## • 127 V



## • 220 V

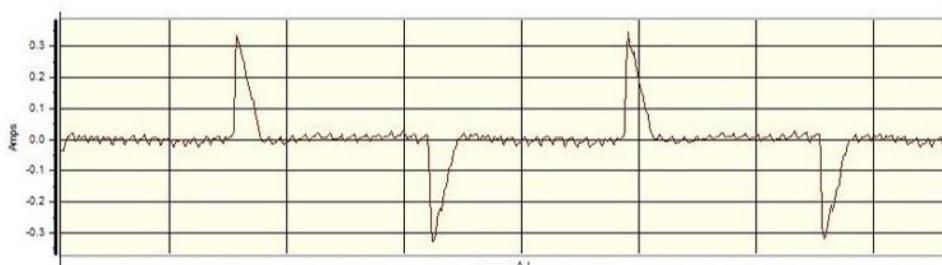


Figura 36 – Forma de Onda da Corrente para LED1

#### 4.5.2 Flutuação de tensão

Para analisar os efeitos das flutuações de tensão nas lâmpadas foi aplicado a forma de onda descrita pela norma IEC 61000-4-14.

Para todas as lâmpadas a luminosidade permanece constante e no mesmo módulo que quando submetida ao tensão de regime permanente, apesar da flutuação de tensão, como exemplifica a resposta da LED1, mostrado na Figura 37. Observa-se que potência e a corrente variam com a variação da tensão, mas não de forma aleatória. A cada degrau de variação na tensão provoca um pico de corrente, que faz com que a potência oscile também. Mas mesmo assim o drive consegue manter a luminosidade constante, como comprova o histograma presente na Figura 38, utilizando novamente a LED1 como exemplo.

A única exceção de comportamento de luminosidade constante é verificada na LED8. Em 127V, a luminosidade oscila na mesma forma de onda da tensão, como ocorre com as lâmpadas incandescentes e fluorescentes compactas, como mostra a Figura 39. Isso pode ser visto também na Figura 40, onde o histograma demonstra a dispersão dos valores. Esse comportamento não é uma característica esperada para a lâmpada LED conforme demonstrado em [37].

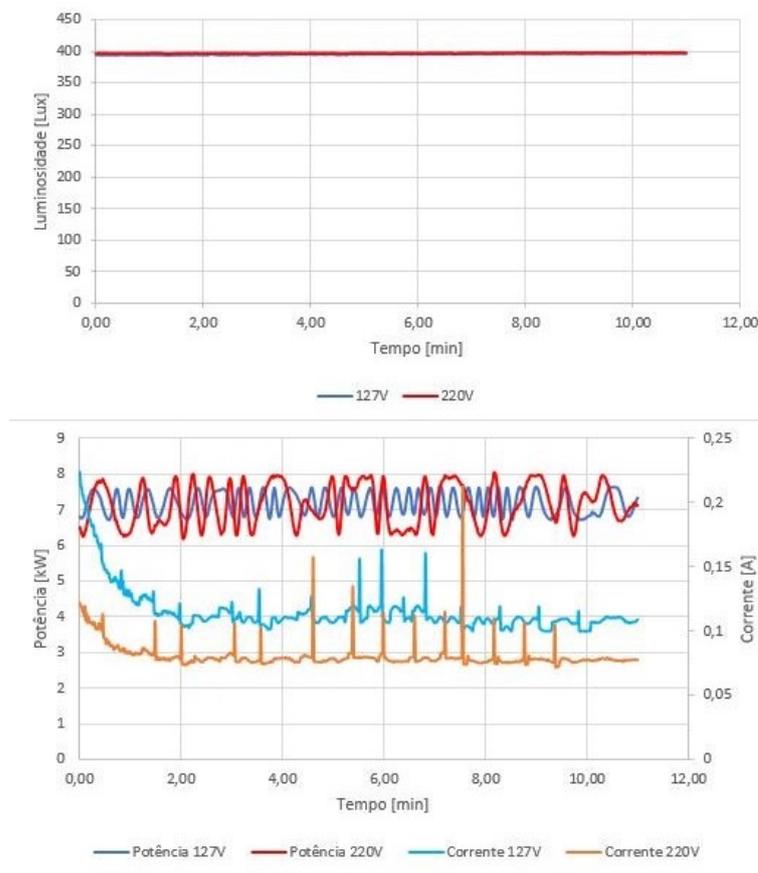


Figura 37 – Flutuação de Tensão LED1

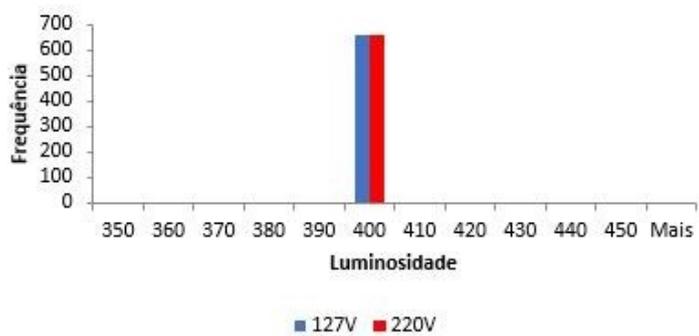


Figura 38 – Histograma Luminosidade durante Flutuação de Tensão LED1

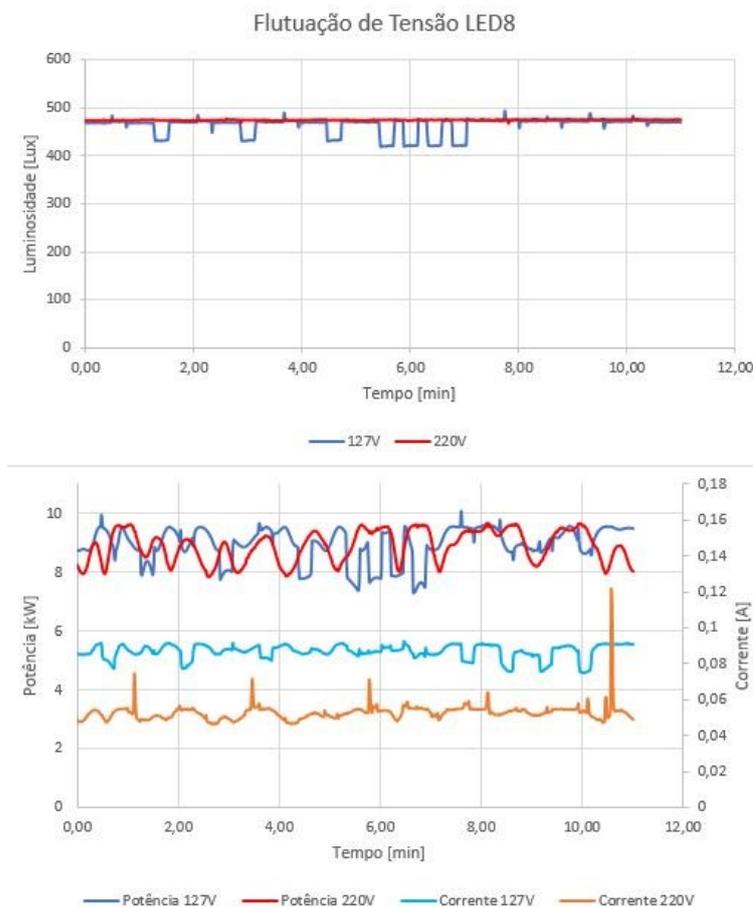


Figura 39 – Flutuação de Tensão LED8

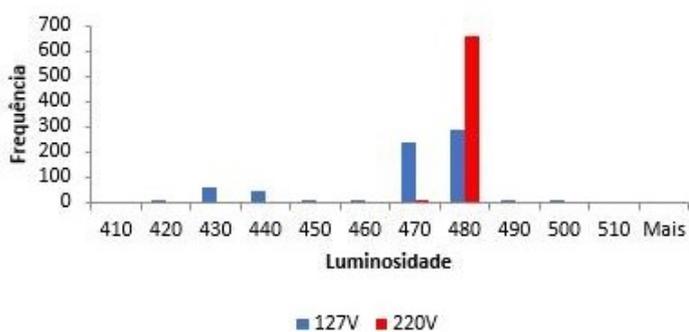


Figura 40 – Histograma Luminosidade durante Flutuação de Tensão LED8

### 4.5.3 Harmônico

As lâmpadas foram submetidas a uma tensão com as componentes harmônicas determinadas pelos limites das normas: IEC 61000, PRODIST - Módulo 8, EN 50160, ONS - Submódulo 2.8 e IEEE 519.

Nas Figuras 41 e 42, que apresentam a distorção harmônica total de corrente para 127V e 220V, respectivamente, é possível comparar o efeito das diferentes formas de onda em cada lâmpada. Além de identificar o efeito de uma mesma forma de onda nas diversas lâmpadas.

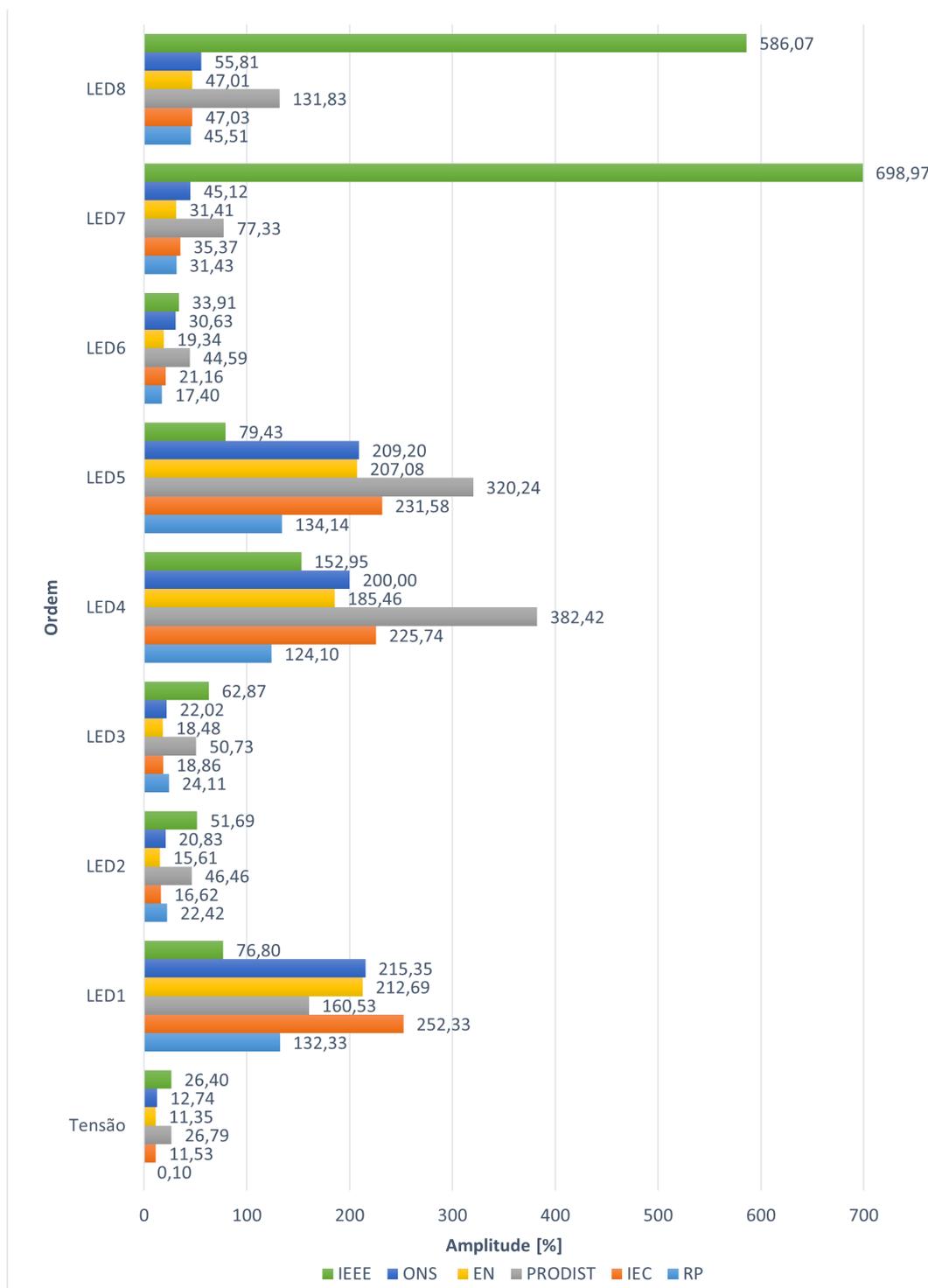


Figura 41 – Distribuição Harmônica Total 127V

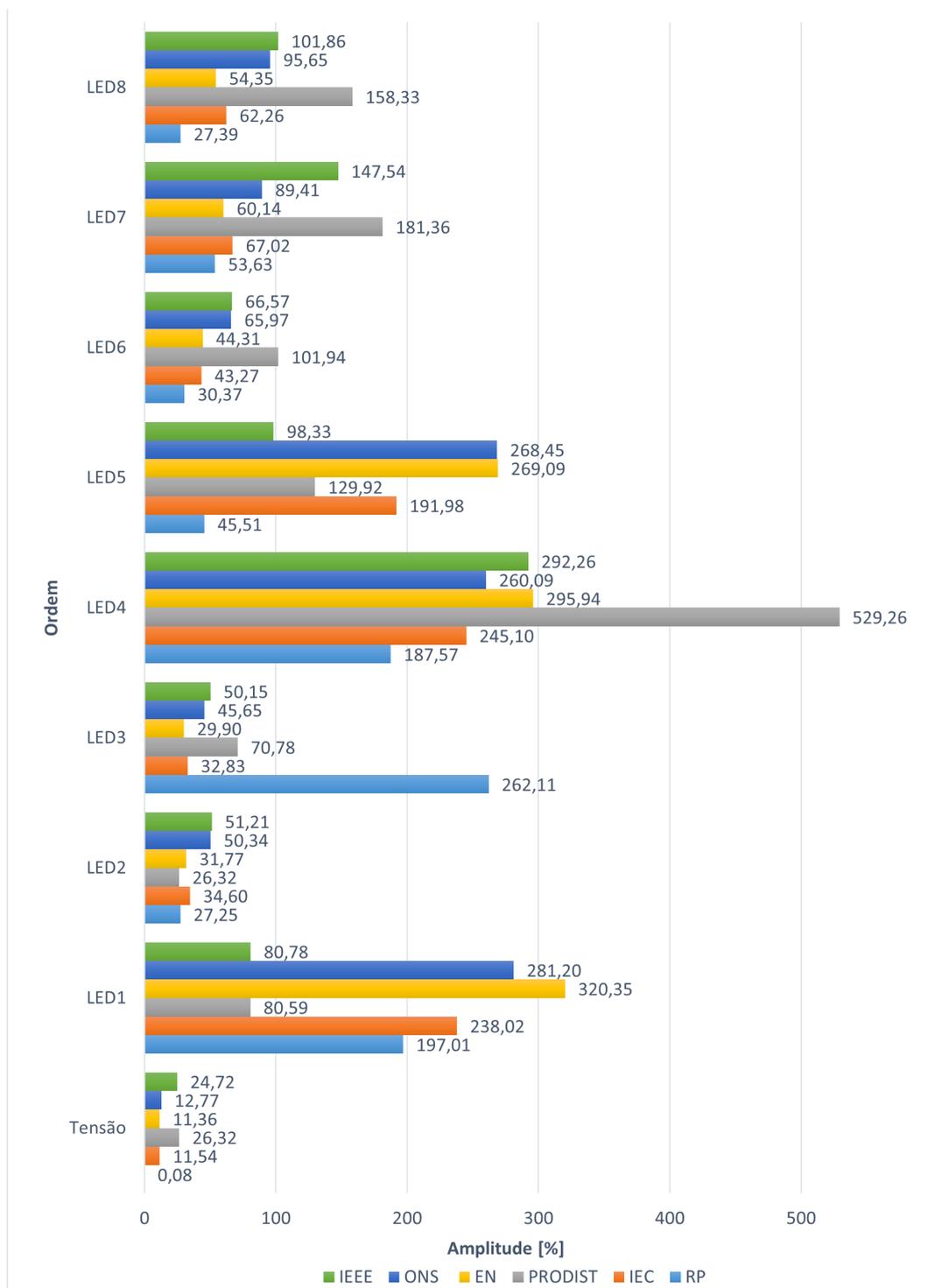


Figura 42 – Distribuição Harmônica Total 220V

É possível identificar a maior influência das componentes harmônicas nas lâmpadas sem selo do [Inmetro](#), tanto em 127V, quanto em 220V. A lâmpadas fabricadas antes da regulamentação são mais susceptíveis a poluição harmônica.

Além disso, apesar de terem sido aplicados os mesmos níveis harmônicos em ambas as tensões, a influência das componentes harmônicas na tensão 220V é mais severa.

Como exceções de elevação de distorção harmônica de corrente acima de 550%, para tensão de 127V, nas lâmpadas LED7 e LED8, quando submetidas aos limites de distorções individuais estabelecidos pelo [IEEE](#).

Para análise mais detalhada das grandezas elétricas e das componentes harmônicas, a seguir, será apresentado o resultado por lâmpada. Para a lâmpada LED1, as grandezas elétricas são apresentadas na Tabela 13, para 127V e 220V. A luminosidade permaneceu constante. A tensão e a corrente variaram conforme a onda aplicada. A potência se manteve em torno do valor nominal da lâmpada de 7W, exceto quando injetando [PRODIST](#) 220V e [IEEE](#) 127 e 220V. Nesse caso a lâmpada consumiu menos potência devido a severa queda na tensão. Outro efeito foi o aumento no fator de potência, devido a redução do [DHT](#) de corrente para essas formas de onda (Tabela 14), já que essas grandezas são inversamente proporcionais.

A Tabela 14 destaca as componentes harmônicas em suas principais frequências, onde é possível perceber a aleatoriedade da influência da poluição harmônica, salientando a redução nas componentes causada pela injeção da forma de onda da [IEEE](#).

Tabela 13 – Grandezas Elétricas LED1

LED1	Reg. Perm.	IEC	PRODIST	EN	ONS	IEEE
127V						
Luminosidade	400,51 lux	398,86 lux	397,3 lux	397,39 lux	397,91 lux	395,25 lux
Tensão	127,2 V	131,73 V	98,86 V	131,39 V	127,96 V	78,22 V
Corrente	0,105 A	0,174 A	0,320 A	0,144 A	0,160 A	0,903 A
Potência	7,25 W	7,41 W	7,14 W	7,27 W	7,33 V	5,12 W
Fator de Potência	0,55 capac.	0,33 capac.	0,25 capac.	0,38 capac.	0,36 capac.	0,75 capac.
220V						
Luminosidade	402,76 lux	399,80 lux	397,86 lux	397,83 lux	398,50 lux	397,06 lux
Tensão	220,4 V	228,26 V	171,19 V	227,66 V	221,72 V	135,74 V
Corrente	0,0778 A	0,099 A	0,436 A	0,113 A	0,107 A	0,519 A
Potência	7,17 W	7,01 W	4,37 W	6,97 W	7,14 W	4,30 W
Fator de Potência	0,42 capac.	0,32 capac	0,64 capac	0,27 capac.	0,30 capac.	0,69 capac.

Tabela 14 – Componentes Harmônicas de corrente LED1 em percentual

LED1	Reg. Perm.	IEC	PRODIST	EN	ONS	IEEE
127V						
DC (0 Hz)	5,17	5,17	33,65	5,45	5,59	16,61
3 <sup>a</sup> (180 Hz)	88,92	90,73	10,32	86,26	85,96	30,08
5 <sup>a</sup> (300 Hz)	67,35	75,73	20,14	70,48	62,21	21,27
7 <sup>a</sup> (420 Hz)	43,9	63,09	41,83	64,49	42,62	13,51
9 <sup>a</sup> (540 Hz)	26,8	58,89	22,12	61,81	39,03	10,99
34 <sup>a</sup> a 39 <sup>a</sup> (2040 Hz a 2340 Hz)*	6,39	37,1	28,03	14,83	41,61	2,2
Idht	132,33	252,33	160,53	212,69	215,35	76,8
220V						
DC (0 Hz)	9,43	10	12,56	11,33	35,38	10,15
3 <sup>a</sup> (180 Hz)	99,35	95,4	33,78	96,21	37,27	33,82
5 <sup>a</sup> (300 Hz)	91,15	75,57	20,51	78,89	36,69	20,69
7 <sup>a</sup> (420 Hz)	79,95	51,74	14,9	63,8	37,55	15,11
9 <sup>a</sup> (540 Hz)	66,89	33	11,73	57,33	37,14	11,98
34 <sup>a</sup> a 39 <sup>a</sup> (2040 Hz a 2340 Hz)*	12,26	42,84	2,51	48,14	26,01	2,37
Idht	197,01	238,02	80,59	320,35	281,2	80,78

Para a lâmpada LED2, as grandezas elétricas são apresentadas na Tabela 15, para 127V e 220V. A luminosidade permaneceu constante, exceto para o cenário IEEE 127V, que sofreu uma redução de 10% na luminosidade. A tensão e a corrente variaram conforme a onda aplicada. A potência se manteve em torno do valor nominal da lâmpada de 9W. O fator de potência se manteve acima do nível exigido por norma, apesar de ter sofrido uma redução para as ondas PRODIST 220V, ONS 220V e IEEE 127V e 220V, devido ao aumento do DHT de corrente conforme resultados apresentados na Tabela 16.

Tabela 15 – Grandezas Elétricas LED2

LED2	Reg. Perm.	IEC	PRODIST	EN	ONS	IEEE
127V						
Luminosidade	598,41 lux	601,53 lux	586,6 lux	600,89 lux	600,91 lux	533,97 lux
Tensão	127,2 V	131,75 V	98,81 V	131,39 V	127,95 V	78,16V
Corrente	0,076 A	0,072 A	0,119 A	0,073 A	0,075 A	0,177 A
Potência	9,07 W	8,94 W	9,18 W	9,06 W	9,09 W	8,24 W
Fator de Potência	0,96 capac.	0,96 capac.	0,86 capac.	0,96 capac.	0,95 capac.	0,73 capac.
220V						
Luminosidade	609,16 lux	612,28 lux	612,82 lux	610,85 lux	606,25 lux	601,78 lux
Tensão	220,42 V	228,2 V	171,29 V	227,65 V	221,70 V	135,65V
Corrente	0,045 A	0,045 A	0,086 A	0,045 A	0,050 A	0,137A
Potência	8,67 W	8,71 W	8,91 W	8,84 W	8,76 W	8,72W
Fator de Potência	0,88 capac.	0,87 capac.	0,70 capac.	0,88 capac.	0,80 capac.	0,73 capac.

Tabela 16 – Componentes Harmônicas de corrente LED2 em percentual

LED2	Reg. Perm.	IEC	PRODIST	EN	ONS	IEEE
127V						
DC (0 Hz)	4,45	3,77	3,32	4,44	4,35	3,08
3 <sup>a</sup> (180 Hz)	15,19	8,99	26,49	8,98	10	44,61
5 <sup>a</sup> (300 Hz)	12,59	5,04	9,52	4,92	7,36	5,37
7 <sup>a</sup> (420 Hz)	7,13	4,58	3,77	6,14	3,65	8,08
9 <sup>a</sup> (540 Hz)	2,24	6,1	6,5	6,14	2,13	5,83
34 <sup>a</sup> a 39 <sup>a</sup> (2040 Hz a 2340 Hz)*	1,31	2,27	7,04	0,83	3,17	3,27
Idht	22,41	16,61	46,46	15,61	20,82	51,59
220V						
DC (0 Hz)	7,62	7,84	6,89	8,41	8,03	5,56
3 <sup>a</sup> (180 Hz)	18,61	19,14	8,47	19,05	19,79	15,95
5 <sup>a</sup> (300 Hz)	10,99	6,59	8,82	6,56	8,27	11,04
7 <sup>a</sup> (420 Hz)	10,47	4,04	7,9	4,04	3,5	5,01
9 <sup>a</sup> (540 Hz)	6,19	9,22	7,13	8,75	4,5	6,68
34 <sup>a</sup> a 39 <sup>a</sup> (2040 Hz a 2340 Hz)*	1,64	3,99	12,43	2,5	9,61	5,85
Idht	27,24	34,6	74,66	31,77	50,34	51,2

Para a lâmpada LED3, as grandezas elétricas são apresentadas na Tabela 17, para 127V e 220V. A luminosidade permaneceu constante, exceto para o caso IEEE 127V, que sofreu uma redução de 13% na luminosidade. A tensão e a corrente variaram conforme a onda aplicada. A potência se manteve em torno do valor nominal da lâmpada de 12W, exceto para a IEEE 127V, que caiu para 10,41W, o que condiz com a queda de luminosidade. O fator de potência se manteve acima do nível exigido por norma, apesar de ter sofrido uma redução significativa para a onda IEEE 127V, o que realmente se destaca foi a queda brusca do fator de potência, que ocorreu para o caso PRODIST 220V, devido ao aumento do DHT de corrente, atingindo 529,26%, conforme resultados apresentados na Tabela 18.

O principal ponto de destaque dessa lâmpada é a discrepância dos níveis harmônicos para os dois níveis de tensão. Em 220V, a LED3 se torna muito mais susceptível a poluição harmônica presente no sistema.

Tabela 17 – Grandezas Elétricas LED3

LED3	Reg. Perm.	IEC	PRODIST	EN	ONS	IEEE
127V						
Luminosidade	840,15 lux	837,75 lux	818,86 lux	836,20 lux	835,88 lux	731,34 lux
Tensão	127,2 V	131,73 V	98,83 V	131,39 V	127,96 V	78,21 V
Corrente	0,097 A	0,093 A	0,153 A	0,093 A	0,096 A	0,215 A
Potência	11,74 W	11,65 W	11,77 W	11,60 W	11,62 W	10,41 W
Fator de Potência	0,96 capac.	0,96 capac.	0,86 capac.	0,96 capac.	0,94 capac.	0,72 capac.
220V						
Luminosidade	852,69 lux	853,40 lux	854,12 lux	851,51 lux	851,11 lux	847,06 lux
Tensão	220,41 V	228,27 V	171,29 V	227,66 V	221,70 V	135,46
Corrente	0,057 A	0,056 A	0,106 A	0,058 A	0,063 A	0,144 A
Potência	11,19 W	11,07 W	11,39 W	11,25 W	11,34 W	11,13W
Fator de Potência	0,90 capac.	0,88 capac.	0,53 capac.	0,88 capac.	0,82 capac.	0,79 capac.

Tabela 18 – Componentes Harmônicas de corrente LED3 em percentual

LED3	Reg. Perm.	IEC	PRODIST	EN	ONS	IEEE
127V						
DC (0 Hz)	3,23	2,89	2,46	3,23	3,26	2,55
3 <sup>a</sup> (180 Hz)	17,54	11,40	31,17	11,77	12,94	53,05
5 <sup>a</sup> (300 Hz)	14,01	7,98	5,59	8,14	9,86	12,24
7 <sup>a</sup> (420 Hz)	5,79	5,72	5,61	5,79	4,46	10,75
9 <sup>a</sup> (540 Hz)	1,97	5,32	6,21	5,29	1,67	3,01
34 <sup>a</sup> a 39 <sup>a</sup> (2040 Hz a 2340 Hz)*	0,51	2,15	6,81	1,17	3,49	3,76
Idht	24,11	18,86	50,73	18,48	22,02	62,87
220V						
DC (0 Hz)	15,45	17,56	18,63	16,49	17,63	81,66
3 <sup>a</sup> (180 Hz)	98,69	94,93	79,84	94,43	96,57	60,68
5 <sup>a</sup> (300 Hz)	89,19	75,80	97,76	76,80	75,44	55,49
7 <sup>a</sup> (420 Hz)	76,61	53,53	99,29	62,75	49,74	53,28
9 <sup>a</sup> (540 Hz)	62,17	38,30	79,58	57,43	24,81	51,55
34 <sup>a</sup> a 39 <sup>a</sup> (2040 Hz a 2340 Hz)*	11,19	42,48	68,65	41,67	45,74	33,46
Idht	187,57	245,10	529,26	295,94	260,09	292,25

Para a lâmpada LED4, as grandezas elétricas são apresentadas na Tabela 19, para 127V e 220V. A luminosidade permaneceu constante. A tensão e a corrente variaram com conforme a onda aplicada. A potência se manteve em torno do valor nominal da lâmpada de 5W, exceto para a IEEE 127V e 220V, que caiu para 3,29 W e 2,05W, respectivamente, porém o drive foi capaz manter a luminosidade, apesar da queda de tensão. O fator de potência se manteve consideravelmente abaixo do nível exigido por norma, tendo sofrido uma redução ainda maior, ficando abaixo de 0,2, para as ondas PRODIST 220V e IEEE 127V e 220V, devido ao aumento do DHT de corrente observado na Tabela 20.

Como já observado anteriormente, o efeito da poluição harmônica nesta lâmpada é severo, principalmente quando se observa as componentes de ordem mais alta.

Tabela 19 – Grandezas Elétricas LED4

LED4	Reg. Perm.	IEC	PRODIST	EN	ONS	IEEE
127V						
Luminosidade	135,75 lux	135,58 lux	135,43 lux	135,09 lux	134,95 lux	135,49 lux
Tensão	127,2 V	131,74 V	98,85 V	131,40 V	127,97 V	78,26 V
Corrente	0,069 A	0,102 A	0,199 A	0,089 A	0,098 A	0,33 A
Potência	4,77 W	4,66 W	5,08 W	4,87 W	4,81 W	3,29 W
Fator de Potência	0,56 capac.	0,35 capac.	0,28 capac.	0,42 capac.	0,38 capac.	0,15 capac.
220V						
Luminosidade	135,9 lux	135,7 lux	134,76 lux	133,87 lux	133,82 lux	133,99 lux
Tensão	220,43 V	228,29 V	171,36 V	227,68 V	221,74 V	135,20 V
Corrente	0,051 A	0,068 A	0,232 A	0,072 A	0,068 A	0,323 A
Potência	4,74 W	4,78 W	4,77 W	4,70 W	4,52 W	2,05 W
Fator de Potência	0,44 capac.	0,32 capac.	0,15 capac.	0,29 capac.	0,31 capac.	0,08 capac

Tabela 20 – Componentes Harmônicas de corrente LED4 em percentual

LED4	Reg. Perm.	IEC	PRODIST	EN	ONS	IEEE
127V						
DC (0 Hz)	7,41	7,28	11,15	7,46	7,49	67
3 <sup>a</sup> (180 Hz)	86,21	91,35	90,23	83,42	85,42	14,88
5 <sup>a</sup> (300 Hz)	62,44	75,16	83,59	67,36	60,52	39,82
7 <sup>a</sup> (420 Hz)	38,11	62,8	30,85	61,8	42,48	33,27
9 <sup>a</sup> (540 Hz)	23,41	57,17	81,96	57,82	39,6	18,97
34 <sup>a</sup> a 39 <sup>a</sup> (2040 Hz a 2340 Hz)*	5,94	30,92	52,84	7,29	44,37	16,99
Idht	124,1	225,74	382,42	185,46	200	152,95
220V						
DC (0 Hz)	15,45	17,56	18,63	16,49	17,63	81,66
3 <sup>a</sup> (180 Hz)	98,69	94,93	79,84	94,43	96,57	60,68
5 <sup>a</sup> (300 Hz)	89,19	75,8	97,76	76,8	75,44	55,49
7 <sup>a</sup> (420 Hz)	76,61	53,53	99,29	62,75	49,74	53,28
9 <sup>a</sup> (540 Hz)	62,17	38,3	79,58	57,43	24,81	51,55
34 <sup>a</sup> a 39 <sup>a</sup> (2040 Hz a 2340 Hz)*	11,19	42,48	68,65	41,67	45,74	33,46
Idht	187,57	245,1	529,26	295,94	260,09	292,25

Para a lâmpada LED5, as grandezas elétricas são apresentadas na Tabela 21, para 127V e 220V. A luminosidade permaneceu constante. A tensão e a corrente variaram conforme a onda aplicada. A potência para essa lâmpada ficou abaixo de 10W declarada na embalagem. Exceto para a IEEE 127V e 220V, que triplicou a potência consumida para manter a luminosidade constante. O fator de potência se manteve abaixo do nível exigido por norma, por não se tratar de uma lâmpada certificada pelo Inmetro. Esta lâmpada produz altos níveis de DHT de corrente como visto na Tabela 22. Essa lâmpada apresenta o mesmo comportamento de injeção harmônica observado na lâmpada LED4, isto é, elevação da corrente harmônica.

Tabela 21 – Grandezas Elétricas LED5

LED5	Reg. Perm.	IEC	PRODIST	EN	ONS	IEEE
127V						
Luminosidade	239,90 lux	238,97 lux	238,26 lux	238,12 lux	238,11 lux	237,50 lux
Tensão	127,2 V	131,76 V	98,86 V	131,42 V	127,98 V	78,28 V
Corrente	0,11 A	0,172 A	0,323 A	0,155 A	0,162 A	0,592 A
Potência	7,89 W	8,13 W	7,21 W	8,04 W	8,06 W	28,96 W
Fator de Potência	0,55 capac.	0,36 capac.	0,26 capac.	0,40 capac.	0,39 capac.	0,67 capac.
220V						
Luminosidade	234,24 lux	233,49 lux	233,86 lux	233,94 lux	233,97 lux	233,43 lux
Tensão	220,4 V	228,25 V	171,2 V	227,64 V	221,67 V	135,56 V
Corrente	0,083 A	0,087 A	0,315 A	0,108 A	0,110 A	0,423 A
Potência	7,89 W	7,9 W	13,6 W	8,05 W	7,88 W	25,46 W
Fator de Potência	0,44 capac.	0,40 capac.	0,30 capac.	0,33 capac.	0,33 capac.	0,54 capac

Tabela 22 – Componentes Harmônicas de corrente LED5 em percentual

LED5	Reg. Perm.	IEC	PRODIST	EN	ONS	IEEE
127V						
DC (0 Hz)	4,68	4,81	21,95	4,89	5,14	14,69
3 <sup>a</sup> (180 Hz)	89,85	91,47	51,87	86,7	86,89	25,6
5 <sup>a</sup> (300 Hz)	69,73	76,03	44,27	70,12	63,7	23,43
7 <sup>a</sup> (420 Hz)	46,94	62,1	52,9	61,71	43,11	17,7
9 <sup>a</sup> (540 Hz)	28,52	56,45	59,27	58,12	35,64	11,47
34 <sup>a</sup> a 39 <sup>a</sup> (2040 Hz a 2340 Hz)*	4,81	29,81	56,28	12,46	37,19	3,85
Idht	134,14	231,58	320,24	207,08	209,19	79,43
220V						
DC (0 Hz)	4,93	10,31	34,613	10,25	10,59	17,12
3 <sup>a</sup> (180 Hz)	38,32	93,43	43,71	92,27	95,41	36,72
5 <sup>a</sup> (300 Hz)	14,71	74,5	28,19	73,17	79,66	25,25
7 <sup>a</sup> (420 Hz)	17,53	51,24	30,27	55,38	59,48	20,58
9 <sup>a</sup> (540 Hz)	1,97	30,74	28,77	45,89	36,91	17,8
34 <sup>a</sup> a 39 <sup>a</sup> (2040 Hz a 2340 Hz)*	0,87	26,42	6,65	33,12	28,11	4,48
Idht	45,51	191,98	129,92	269,09	268,45	98,33

Para a lâmpada LED6, as grandezas elétricas são apresentadas na Tabela 23, para 127V e 220V. A luminosidade também permaneceu constante. A tensão e a corrente variaram conforme a onda aplicada. A potência para essa lâmpada ficou em torno de 8W, a potência declarada na embalagem. O fator de potência se manteve acima do nível exigido por norma, por se tratar de uma lâmpada regulamentada pelo Inmetro. Exceto para a onda PRODIST 220V, que leva o DHT para 101,94, um nível baixo, quando comparado as lâmpadas não regulamentadas, mas para a LED6 esse nível é alto, como visto na Tabela 24, o que gera uma queda do fator de potência para 0,10.

A lâmpada LED6 apresenta o comportamento mais uniforme entre todas as amostras, sua resposta é constante exceto quando aplicado a onda do PRODIST em 220V.

A distorção harmônica de corrente chega a 101,94%, não sendo um valor alto quando comparado as demais lâmpadas.

Tabela 23 – Grandezas Elétricas LED6

LED6	Reg. Perm.	IEC	PRODIST	EN	ONS	IEEE
127V						
Luminosidade	488, 34 lux	489,27 lux	489,20 lux	488,86 lux	488,71 lux	484,93 lux
Tensão	127,2 V	131,75 V	98,81 V	131,40 V	127,96 V	78,08 V
Corrente	0,064 A	0,062 A	0,106 A	0,062 A	0,066 A	0,130 A
Potência	7,76 W	7,70 W	7,87 W	7,67 W	7,74 W	8,06 W
Fator de Potência	0,96 capac.	0,95 capac.	0,74 capac.	0,96 capac.	0,93 capac.	0,84 capac.
220V						
Luminosidade	488,79 lux	488,77 lux	489,21 lux	487,97 lux	487,96 lux	485,49 lux
Tensão	220,4 V	228,26 V	171,27 V	227,66 V	221,72 V	135,59 V
Corrente	0,044 A	0,042 A	0,084 A	0,043 A	0,048 A	0,094 A
Potência	7,75 W	7,58 W	7,74 W	7,53 W	7,46 W	7,78 W
Fator de Potência	0,83 capac.	0,79 capac.	0,10 capac.	0,79 capac	0,72 capac.	0,72 capac

Tabela 24 – Componentes Harmônicas de corrente LED6 em percentual

LED6	Reg. Perm.	IEC	PRODIST	EN	ONS	IEEE
127V						
DC (0 Hz)	5,42	5,77	8,62	5,57	5,37	3,28
3 <sup>a</sup> (180 Hz)	8,42	12,95	32,85	12,85	12,05	14,26
5 <sup>a</sup> (300 Hz)	8,69	3,97	21,61	4,03	3,98	7,2
7 <sup>a</sup> (420 Hz)	8,08	1,66	12,94	1,95	4,5	2,06
9 <sup>a</sup> (540 Hz)	5,61	4,7	12,68	4,18	2,35	5,77
34 <sup>a</sup> a 39 <sup>a</sup> (2040 Hz a 2340 Hz)*	2,19	3,43	15,13	2,57	5,22	3,8
Idht	17,4	21,16	44,19	19,34	30,63	33,91
220V						
DC (0 Hz)	9,72	9,76	8,62	9,63	10,44	7,47
3 <sup>a</sup> (180 Hz)	22,32	23,98	32,85	25,07	26,29	22,13
5 <sup>a</sup> (300 Hz)	13,11	10,45	21,61	10,57	13,04	13,46
7 <sup>a</sup> (420 Hz)	9,28	7,24	12,94	6,67	5,86	8,00
9 <sup>a</sup> (540 Hz)	6,47	11,01	12,68	11,68	5,82	6,36
34 <sup>a</sup> a 39 <sup>a</sup> (2040 Hz a 2340 Hz)*	1,59	5,44	15,13	4,49	13,7	7,74
Idht	30,37	43,27	101,94	44,31	65,96	66,57

Para a lâmpada LED7, as grandezas elétricas são apresentadas na Tabela 25, para 127V e 220V. A luminosidade permaneceu constante. Exceto para a IEEE 127V, neste caso a lâmpada não acendeu por completo, ficou piscando com uma luminosidade muito baixa, como comprova a Figura 43, devido ao severo nível harmônico provocado por essa forma de onda. A tensão e a corrente variaram conforme a onda aplicada. A potência para essa lâmpada ficou em torno de 10W, a potência declarada na embalagem, com exceção da IEEE 127V, que praticamente não consumiu potência. O fator de potência se manteve acima do nível exigido por norma, por se tratar de uma lâmpada regulamentada pelo

**Inmetro.** Exceto para a onda **PRODIST** 220V e **IEEE** 220V, que por terem gerado um nível de DHT elevado, tiveram o fator de potência reduzido para níveis abaixo de 0,5 como visto na Tabela 26.

Tabela 25 – Grandezas Elétricas LED7

LED7	Reg. Perm.	IEC	PRODIST	EN	ONS	IEEE
127V						
Luminosidade	538,1 lux	535,87 lux	534,33 lux	533,89 lux	533,92 lux	23,26 lux
Tensão	127,2 V	131,75 V	98,81 V	131,41 V	127,97 V	78,26 V
Corrente	0,086 A	0,085 A	0,166 A	0,084 A	0,091 A	0,151
Potência	9,93 W	9,92 W	10,14 W	9,81 W	9,93 W	0,38 W
Fator de Potência	0,92 capac.	0,89 capac.	0,71 capac.	0,90 capac.	0,87 capac.	0,51 capac.
220V						
Luminosidade	536,94 lux	534,79 lux	528,00 lux	533,25 lux	533,04 lux	526,86 lux
Tensão	220,42 V	228,28 V	171,21 V	227,68 V	221,72 V	135,13 V
Corrente	0,062 A	0,064 A	0,173 A	0,063 A	0,075 A	0,278 A
Potência	9,76 W	9,89 W	9,67 W	9,85 W	9,98 W	9,77 W
Fator de Potência	0,72 capac.	0,68 capac.	0,35 capac.	0,69 capac.	0,61 capac.	0,44 capac.

Tabela 26 – Componentes Harmônicas de corrente LED7 em percentual

LED7	Reg. Perm.	IEC	PRODIST	EN	ONS	IEEE
127V						
DC (0 Hz)	4,17	4,41	3,52	4,19	3,97	345,18
3 <sup>a</sup> (180 Hz)	25,49	21,1	31,43	21,23	21,28	74,09
5 <sup>a</sup> (300 Hz)	15,21	10,34	7,01	10,22	12,26	84,51
7 <sup>a</sup> (420 Hz)	4,76	4,12	9,55	4,11	3,52	86,63
9 <sup>a</sup> (540 Hz)	4,71	7,67	9,8	7,76	1,89	99,26
34 <sup>a</sup> a 39 <sup>a</sup> (2040 Hz a 2340 Hz)*	1,9	6,14	13,77	1,03	11,22	93,87
Idht	31,43	35,37	77,33	31,41	45,12	698,97
220V						
DC (0 Hz)	7,21	6,42	95,62	7,07	7,16	196,94
3 <sup>a</sup> (180 Hz)	44,67	36,65	32	37,07	34,85	45,39
5 <sup>a</sup> (300 Hz)	17,88	15,78	49,37	14,94	18,24	22,87
7 <sup>a</sup> (420 Hz)	12,37	5	39,72	4,58	1,14	18,24
9 <sup>a</sup> (540 Hz)	10,07	17,53	34,46	19,12	7,18	24,78
34 <sup>a</sup> a 39 <sup>a</sup> (2040 Hz a 2340 Hz)*	2,49	10,6	26,72	2,81	17,71	21,43
Idht	53,63	67,02	181,35	60,13	89,41	147,53

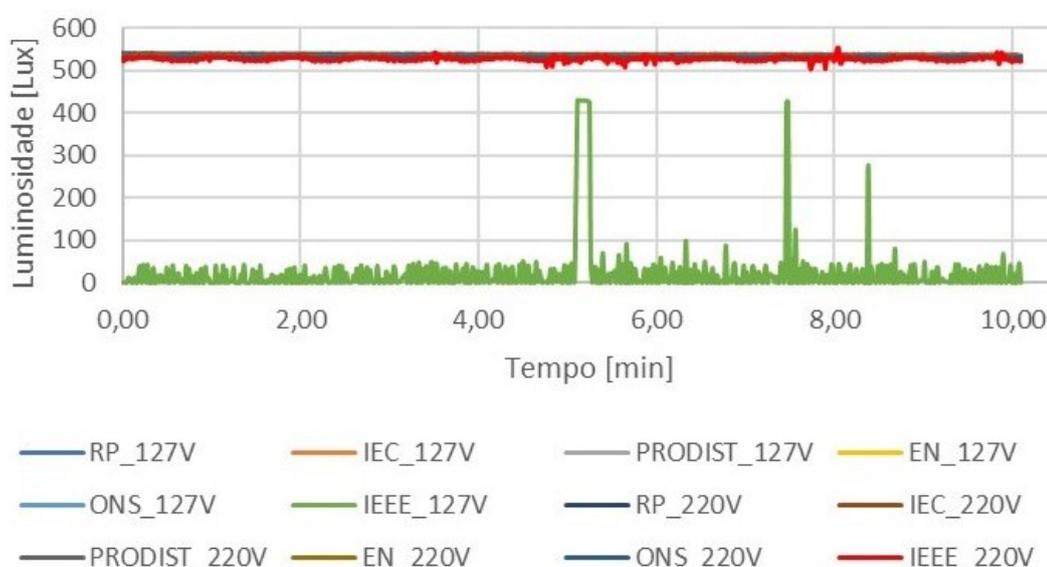


Figura 43 – Luminosidade LED7

Para a lâmpada LED8, as grandezas elétricas são apresentadas na Tabela 27, para 127V e 220V. A luminosidade permaneceu constante e em mesmo patamar que em tensão de regime permanente. Exceto para a **PRODIST** 127V, que sofreu uma redução de quase 40% na luminosidade. E para **IEEE** 127V, neste caso a lâmpada não ascendeu por completo, ficou piscando com uma luminosidade muito baixa, como comprova a Figura 44. A tensão e a corrente variaram conforme a onda aplicada. A potência para essa lâmpada ficou em torno de 9W, a potência declarada na embalagem, novamente com exceção da **PRODIST** 127V que consumiu 4W e da **IEEE** 127V, que praticamente não consumiu potência. O fator de potência oscilou bastante, mostrando a susceptibilidade dessa lâmpada as variações harmônicas, como visto na Tabela 28.

Tabela 27 – Grandezas Elétricas LED8

LED8	Reg. Perm.	IEC	PRODIST	EN	ONS	IEEE
127V						
Luminosidade	472,93 lux	470,91 lux	290,11 lux	480,23 lux	471,22 lux	18,69 lux
Tensão	127,2 V	131,78 V	98,85 V	131,43 V	127,99 V	78,25 V
Corrente	0,082 A	0,082 A	0,091 A	0,083 A	0,088 A	0,074 A
Potência	9,11 W	9,06 W	4,10 W	9,21 W	9,20 W	0,25 W
Fator de Potência	0,88 capac.	0,85 capac.	0,51 capac.	0,85 capac.	0,82 capac.	0,06 capac.
220V						
Luminosidade	482,95 lux	480,49 lux	475,90 lux	477,02 lux	477,97 lux	471,76
Tensão	220,34 V	228,21 V	171,28 V	227,63 V	221,68 V	135,53 V
Corrente	0,052 A	0,059 A	0,144 A	0,057 A	0,069 A	0,147 A
Potência	8,74 W	8,87 W	9,10 W	8,74 W	8,94 W	9,12 W
Fator de Potência	0,78 capac.	0,66 capac.	0,41 capac.	0,69 capac.	0,59 capac.	0,52 capac.

Tabela 28 – Componentes Harmônicas de corrente LED8 em percentual

LED8	Reg. Perm.	IEC	PRODIST	EN	ONS	IEEE
127V						
DC (0 Hz)	4,93	5,12	8,86	5,2	4,73	78,52
3 <sup>a</sup> (180 Hz)	38,32	34,43	58,82	37,66	37,75	17,31
5 <sup>a</sup> (300 Hz)	14,71	14,02	22,28	10,25	13,45	31,61
7 <sup>a</sup> (420 Hz)	17,53	17,13	12,15	17,52	19,57	34,85
9 <sup>a</sup> (540 Hz)	1,97	2,83	12,08	1,7	4,1	50,75
34 <sup>a</sup> a 39 <sup>a</sup> (2040 Hz a 2340 Hz)*	0,87	5,53	24,61	3,13	6,7	101,93
Idht	45,51	47,03	131,82	47,01	55,81	586,06
220V						
DC (0 Hz)	8,07	7,48	9,36	8,43	8,23	6,06
3 <sup>a</sup> (180 Hz)	23,01	14,58	26,55	14,8	15,2	41,55
5 <sup>a</sup> (300 Hz)	10,4	7,75	5,32	7,23	5,67	3,27
7 <sup>a</sup> (420 Hz)	5,05	11,47	13,72	11,71	11,98	13,97
9 <sup>a</sup> (540 Hz)	3,67	4,81	17,54	4,51	8,19	5,82
34 <sup>a</sup> a 39 <sup>a</sup> (2040 Hz a 2340 Hz)*	2,51	13,11	36,52	6,92	17,74	17,69
Idht	27,39	62,26	158,33	54,35	95,65	101,86

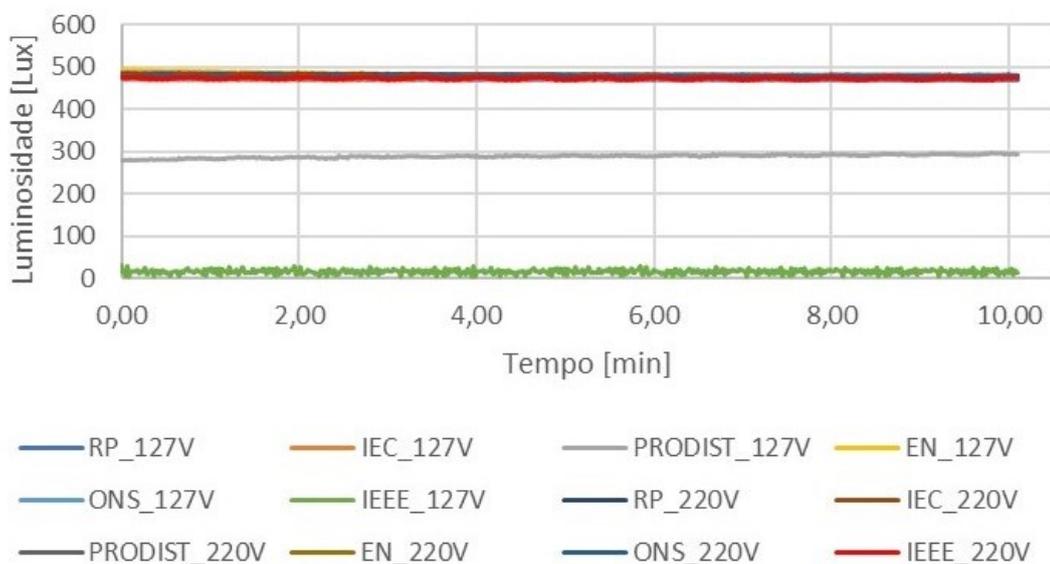


Figura 44 – Luminosidade LED8

#### 4.5.4 Suportabilidade a Subtensão

Neste teste foram aplicados sucessivos decréscimos de tensão, com objetivo de determinar os limites de suportabilidade das lâmpadas testadas. Para a lâmpada LED1, a luminosidade se mantém inalterada até 62% da tensão nominal, desligando totalmente a 51% da tensão nominal, visto na Figura 45. Observa-se que a potência espelha a variação de luminosidade, pois há a correção da corrente de acordo com a variação da tensão,

causado pelos ajustes dos componentes eletrônicos do drive de acionamento. A corrente atinge um limite e começa a decair caminhando para o desligamento da lâmpada.

Para a lâmpada LED2, a luminosidade se mantém inalterada até 75% da tensão nominal, desligando totalmente a 35% da tensão nominal, visto na Figura 46. Observe-se que, a corrente apresenta um comportamento mais severo no momento do início do decaimento de luminosidade e a corrente decai mais rapidamente após esse instante.

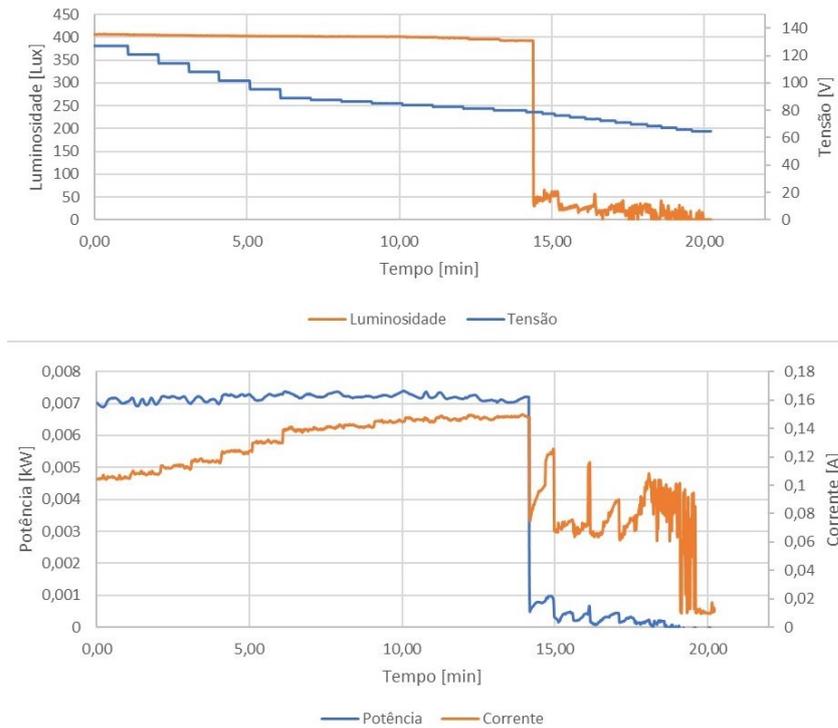


Figura 45 – Suportabilidade a Subtensão de LED1

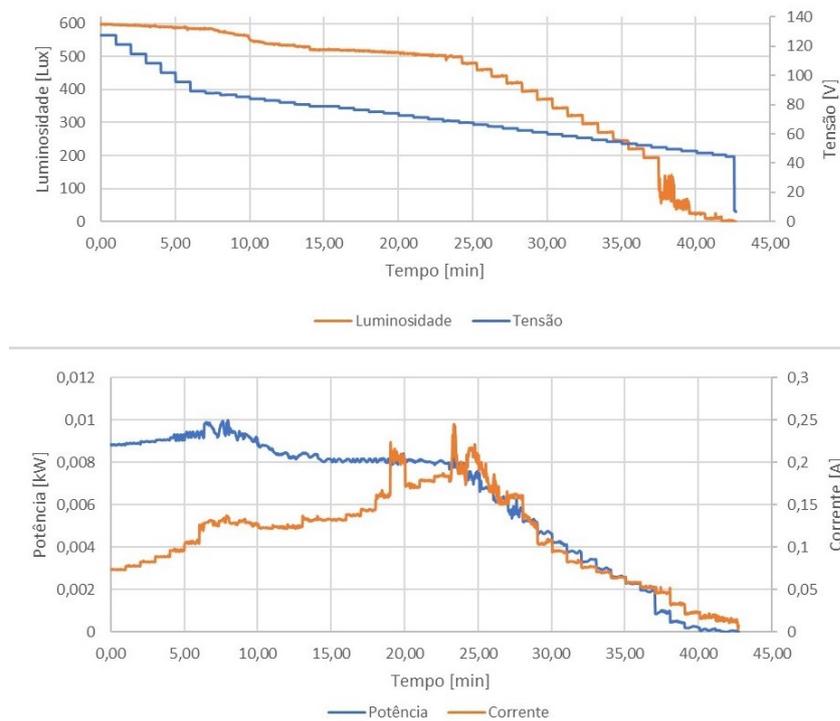


Figura 46 – Suportabilidade a Subtensão de LED2

Para a lâmpada LED3, a luminosidade se mantém inalterada até 68% da tensão nominal, desligando totalmente a 41% da tensão nominal, visto na Figura 47. Observa-se que o comportamento é semelhante ao das lâmpadas anteriores.

Para a lâmpada LED4, a luminosidade se mantém inalterada até 90% da tensão nominal, desligando totalmente a 55% da tensão nominal, visto na Figura 48. Essa lâmpada se comporta de maneira diferente das anteriores, a luminosidade começa a cair rapidamente. Observa-se que a potência sobe em uma tentativa de manter o nível de luminosidade, porém sem sucesso. A correção da corrente aumenta junto com a potência, atingindo o limite, onde a lâmpada desliga.

Para a lâmpada LED5, a luminosidade se mantém inalterada até 67% da tensão nominal, desligando totalmente a 57% da tensão nominal, visto na Figura 49. Observa-se que a potência espelha a variação de luminosidade. A corrente atinge um limite e se mantém constante mesmo quando a luminosidade já não consegue se manter estável, caindo somente próximo ao desligamento da lâmpada.

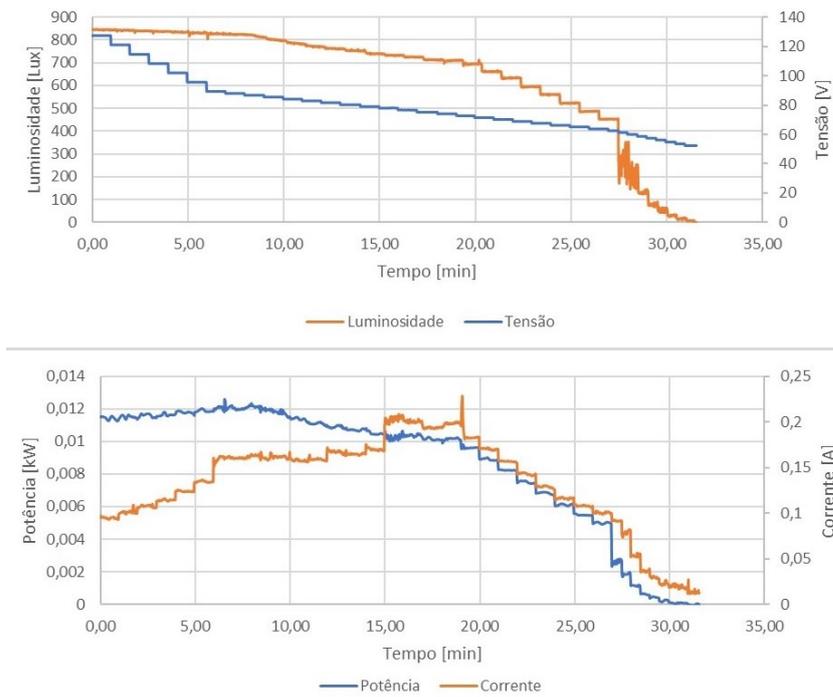


Figura 47 – Suportabilidade a Subtensão de LED3

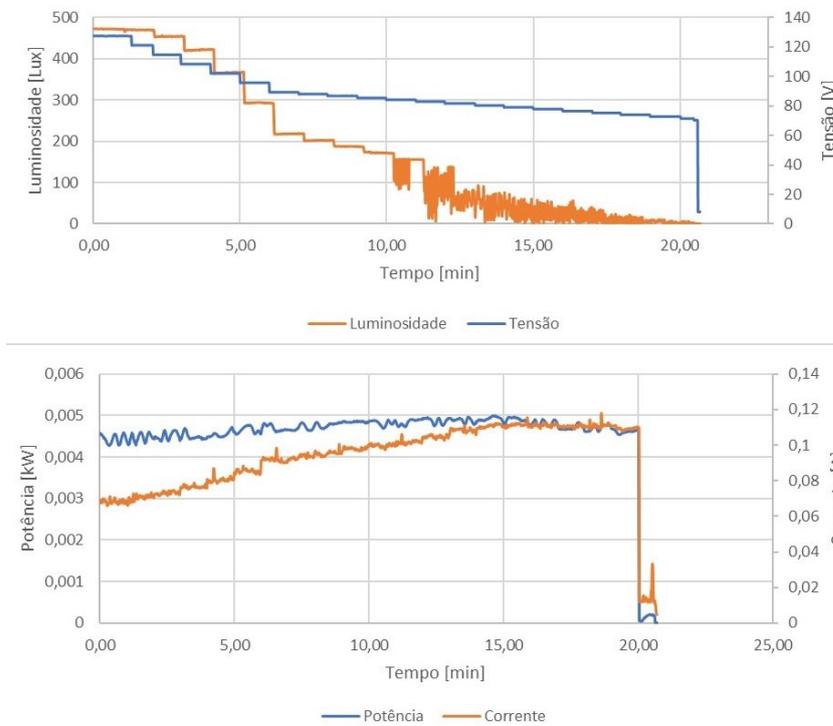


Figura 48 – Suportabilidade a Subtensão de LED4

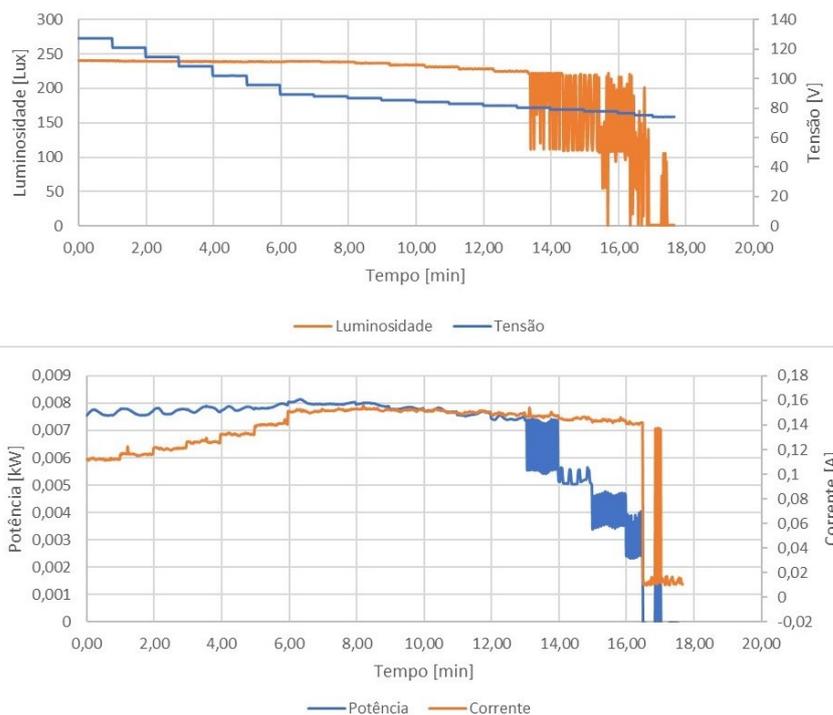


Figura 49 – Suportabilidade a Subtensão de LED5

Para a lâmpada LED6, a luminosidade se mantém inalterada até 49% da tensão nominal, desligando totalmente a 24% da tensão nominal, visto na Figura 50. A corrente atinge um limite e começa a decair caminhando para o desligamento da lâmpada.

Para a lâmpada LED7, a luminosidade se mantém inalterada até 67% da tensão nominal, desligando totalmente a 40% da tensão nominal, visto na Figura 51. Observa-se que essa lâmpada apresenta o comportamento similar as demais.

Enfim para a lâmpada LED8, a luminosidade se mantém inalterada até 95% da tensão nominal, desligando totalmente a 56% da tensão nominal, visto na Figura 52. Observa-se que a potência espelha a variação de luminosidade, pois há uma correção da corrente, quando ocorrem transições de tensão. Porém, as variações de corrente desta lâmpada ocorrem de forma mais abruptas, diferentemente do comportamento suave observado nas demais lâmpadas.

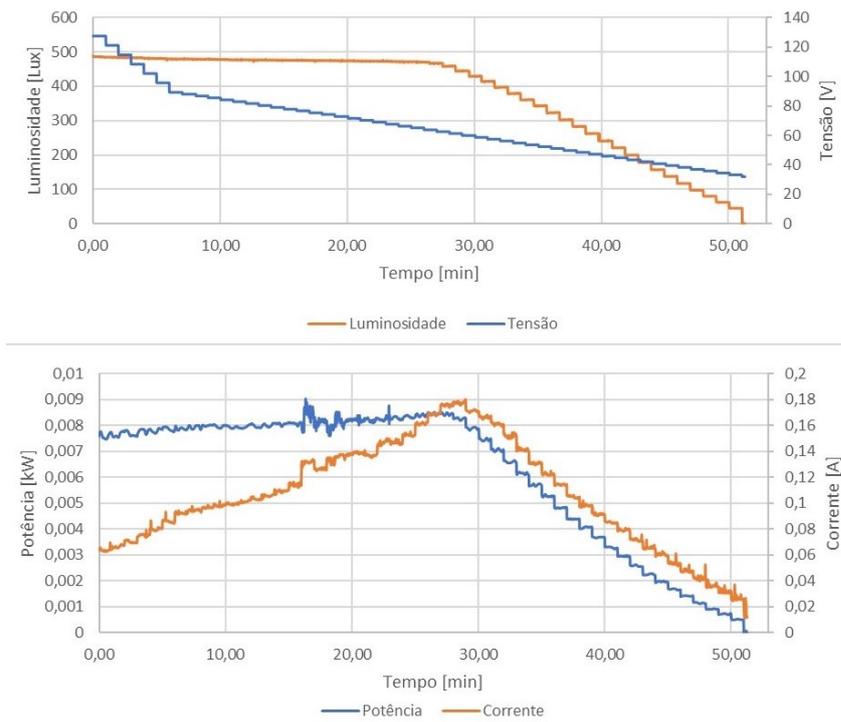


Figura 50 – Suportabilidade a Subtensão de LED6

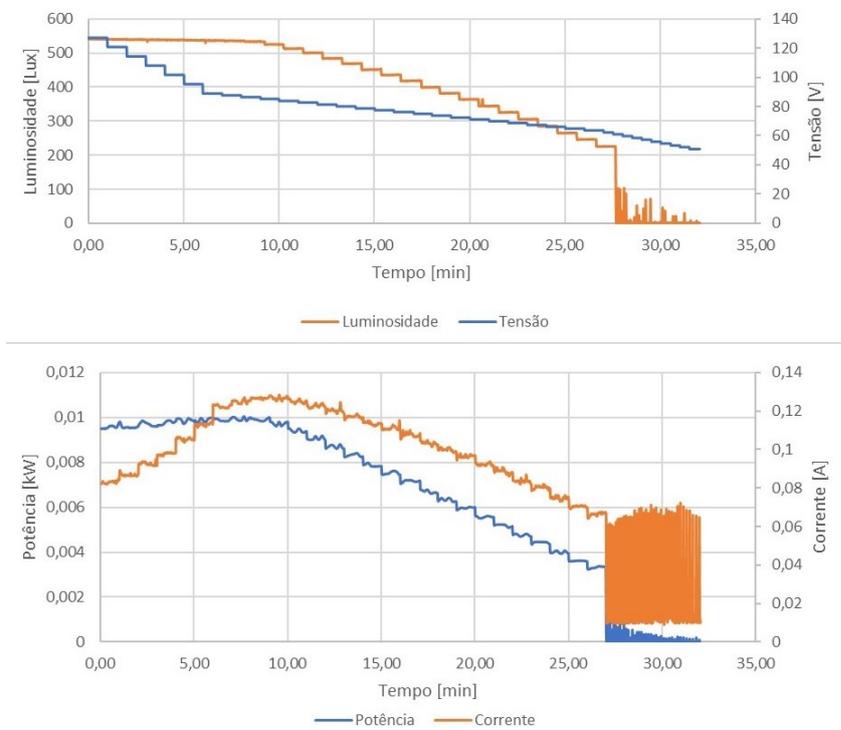


Figura 51 – Suportabilidade a Subtensão de LED7

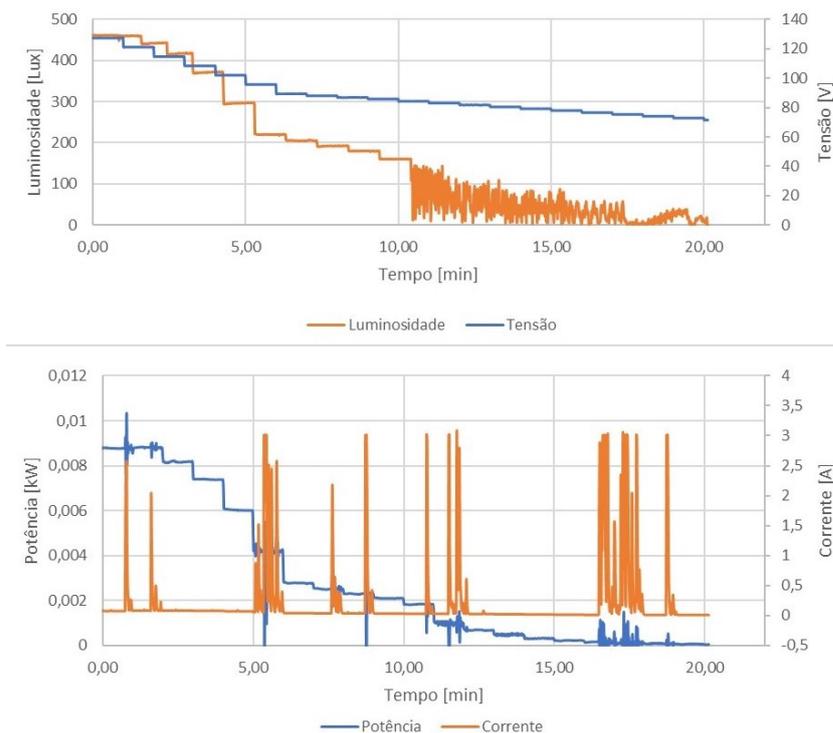


Figura 52 – Suportabilidade a Subtensão de LED8

A Tabela 29 resume a análise da suportabilidade a subtensão, onde observa-se que os piores desempenhos são da LED4 e da LED8. Sua luminosidade sofre os efeitos do decaimento de tensão em valores bem mais elevados quando comprados com as demais.

Tabela 29 – Comparativo de Suportabilidades a Subtensão

Suportabilidade de Tensão	LED1	LED2	LED3	LED4	LED5	LED6	LED7	LED8
Luminosidade >95% Nominal	79 V	87 V	85 V	114 V	83 V	62 V	83 V	114 V
	62,2%	68,5%	66,9%	89,8%	65,3%	48,8%	65,3%	89,8%
Luminosidade em 70% Nominal	-	62 V	67 V	95 V	-	52 V	72 V	101 V
	-	48,8%	52,7%	74,8%	-	40,9%	56,7%	79,5%
Desligamento	65 V	45 V	52 V	71 V	75 V	33 V	61 V	71 V
	51,2%	35,4%	40,9%	55,9%	59,0%	26,0%	48,0%	55,9%

## 4.6 Considerações finais

Após a avaliação dos diferentes aspectos da qualidade da energia elétrica, tem-se que: para o tensão de regime permanente as lâmpadas LED1, LED4 e LED5, tiveram um resultado abaixo do esperado, apresentando baixo fator de potência e altos índices harmônicos, principalmente nas primeiras ordens harmônicas.

Quando aplicada a forma de onda com flutuação de tensão, a luminosidade permaneceu constante apesar da variação de tensão, exceto pela LED8 em 127V, que varia a luminosidade com a mesma forma de onda da tensão aplicada, mas em menor módulo.

Já a corrente sofre picos nos momentos de alteração de tensão para as lâmpadas LED1, LED4, LED5 e LED8, oscilando devido a oscilação da tensão nos demais casos.

Aplicando harmônicos de tensão nas lâmpadas de acordo com as normas, obteve-se para a forma de onda da **IEC**, altos níveis de harmônicos para as lâmpadas LED1, LED4 e LED5. Para a do **PRODIST**, observou-se uma discrepância no comportamento das lâmpadas nas duas tensões. Para 127V destacou-se os altos de níveis harmônicos LED1, LED4, LED5 e LED8. Já para 220V, a LED4 sofreu efeitos severos, chegando a um **DHT** de corrente de mais de 500%. No caso da EN, destaque para a elevação das primeiras ordens harmônicas das LED1, LED4 e LED5. Para a **ONS**, neste caso o destaque é a elevação das componentes de maiores ordens harmônicas, isto é, acima da 17ª ordem, para as lâmpadas LED1, LED4 e LED5. Por fim, a **IEEE** injeta praticamente os mesmos níveis harmônicos em todas as ordens harmônicas, causando níveis harmônicos elevados para as lâmpadas LED7 e LED8, em 127V e para LED4, em 220V.

Observa-se que, mesmo com os efeitos causados pelas componentes harmônicas aplicadas, a luminosidade permanece constante e com mesmo valor observado na condição de tensão de regime permanente. Exceto quando sofre uma redução na **IEEE** 127V nas lâmpadas LED2 e LED3 e na **PRODIST** 127V para a lâmpada LED8. E piscando praticamente sem gerar luminosidade para a **IEEE** 127V nas LED7 e LED8.

Ao fazer o teste de suportabilidade a subtensão, observa-se que a maioria das lâmpadas conseguiram manter sua luminosidade por pelo menos 10 minutos, exceto para as lâmpadas LED4 e LED8, que perdem luminosidade desde de o início.

Após a análise de todos os testes, é possível identificar claramente a importância de se utilizar lâmpadas certificadas pelo **Inmetro**. As lâmpadas LED1, LED4 e LED5 não são certificadas, que sofrem os maiores impactos e geram os maiores níveis harmônicos. Destaque-se também que o Fabricante C obteve um desempenho inferior aos demais, mesmo tendo o selo do **Inmetro**.

## 5 Análise Qualitativa das Lâmpadas LED Industriais e Públicas

### 5.1 Considerações Iniciais

Os mesmos testes realizados para as lâmpadas residenciais, descritos no capítulo anterior, foram realizados para lâmpadas utilizadas para indústrias e iluminação pública. Porém, neste caso, além dos refletores LED, foram utilizadas também duas opções lâmpadas de descarga, vapor de sódio e mista.

### 5.2 Lâmpadas Utilizadas

Para obtenção de refletores LED, o QMAP (*Centro de Estudos em Qualidade da Energia e Proteção Elétrica*) firmou uma parceria com a SX Lighting, fabricante de tecnologia de iluminação LED de alta qualidade. Para esse estudo o fabricante forneceu dois de seus modelos para teste, um voltado para iluminação industrial, visto na Figura 53 [45], e outro voltado para iluminação pública, visto na Figura 54 [46]. Suas características nominais são apresentadas nas Tabelas 30 [45] e 31 [46], respectivamente.



Figura 53 – Refletor LED Industrial



Figura 54 – Refletor LED Pública

Tabela 30 – Características Nominais Refletor LED Industrial

Elétricas	
Potência	145 W
Tensão de Operação	120~277 Vac/202~254 Vac
Frequência	50~60 Hz
Fator de Potência	> 0,98
Harmônica	< 10%
Proteção Anti-surto	Incluso
Fotométricas	
Fluxo Luminoso do LED	23323 lm
Eficiência Luminosa do LED	140 lm/W
Fluxo Luminoso da Luminária	20436,95 lm
Temperatura da Cor	4000 – 5000 K
IRC	> 70
Gerais	
Temperatura de Operação	-40 a 55° C
Vida Útil	100000 horas

Tabela 31 – Características Nominais Refletor LED Pública

Elétricas	
Potência	159 W
Tensão de Operação	120~277 Vac/202~254 Vac
Frequência	50~60 Hz
Fator de Potência	> 0,98
Harmônica	< 10%
Proteção Anti-surto	10 kV / 12 kA
Fotométricas	
Fluxo Luminoso do LED	23655 lm
Eficiência Luminosa do LED	120 lm/W
Fluxo Luminoso da Luminária	18924 lm
Temperatura da Cor	4000 – 5000 K
IRC	> 70
Gerais	
Temperatura de Operação	-40 a 55° C
Vida Útil	100000 horas

Para efeitos de comparação foram adquiridas uma lâmpada de vapor de sódio, Figura 55 e outra mista, Figura 56. Como não há parceria com os fabricantes destas lâmpadas, suas marcas serão preservadas. A Tabela 32 e 33 apresentam, respectivamente, as características elétricas dessas lâmpadas.



Figura 55 – Lâmpada de Vapor de Sódio



Figura 56 – Lâmpada Mista

Tabela 32 – Características Nominais Lâmpada Vapor de Sódio

Elétricas	
Potência	250 W
Fotométricas	
Fluxo Luminoso	26000 lm
Eficiência Luminosa do LED	104 lm/W
Temperatura da Cor	2000 K
IRC	20%
Gerais	
Vida Útil	24000 horas
Reator	
Tensão	220 V
Corrente	1,35 A
Frequência	60 Hz
Pico de Tensão	2,3 a 4,5 kV
Ignitor	
Tensão	220~250 V
Frequência	50~60 Hz
Carga Máxima	200pF
Pulso	2,8 a 4,5 kV

Tabela 33 – Características Nominais Lâmpada Mista

Elétricas	
Potência	500 W
Tensão de Operação	220 Vac
Fotométricas	
Fluxo Luminoso	32000 lm
Temperatura da Cor	4000 K
Gerais	
Vida Útil	9000 horas

### 5.3 Estrutura de Testes

Os mesmos testes realizados para as lâmpadas residenciais foram repetidos para as lâmpadas industriais e públicas. As únicas diferenças foram o monitoramento da fase de estabilização e a redução dos testes harmônicos para duas normas: módulo 8 do [PRODIST](#) e a [IEC 61000-3-2](#).

### 5.4 Resultados

A seguir serão apresentados os resultados obtidos em cada ensaio, realizados nas quatro lâmpadas: [LED Industrial](#), [LED Pública](#), Mista e Vapor de Sódio.

#### 5.4.1 Estabilização

A fase de estabilização das lâmpadas também foi monitorada, a fim de determinar as características de partida de cada lâmpada. Na Figura 57, observa-se o resultado para a lâmpada [LED Industrial](#), que tem um impulso na partida, que já proporciona praticamente os valores de tensão de regime permanente. Observa-se no gráfico que há uma queda de potência e luminosidade de menos de 4% durante a estabilização. O mesmo acontece com a [LED Pública](#), como visto na Figura 58. Isto se deve aos seus sistemas de acionamento por *drive* eletrônico, não dependendo do aquecimento dos seus componentes. Proporcionando uma iluminação ótima desde o seu acionamento.

Já para a lâmpada Mista, a sua partida consome uma potência inicial de 67% maior para o seu acionamento, assumindo o seu valor nominal cerca de 3 minutos depois de sua partida. Esse excesso de potência durante a partida faz com que esta lâmpada tenha um brilho mais intenso durante o acionamento, como visto na Figura 59. Isso se deve ao fato da necessidade de realizar a incandescência do filamento de tungstênio.

Por fim a lâmpada de Vapor de Sódio que, como visto na Figura 60, consome 60% de sua potência nominal no instante do seu acionamento e vai aumentando gradativamente

até 8 minutos após a partida. Característica que condiz com seu aspecto construtivo, já que tem que haver a ação do reator para que aconteça a ionização dos gases presente no interior da lâmpada. Isso faz com que essa lâmpada não emita luminosidade logo que é acionada, levando cerca de 1,5 minutos para começar a acender, 3,5 minutos para atingir 50% de sua luminosidade e 6,5 minutos para atingir a faixa de luminosidade nominal.

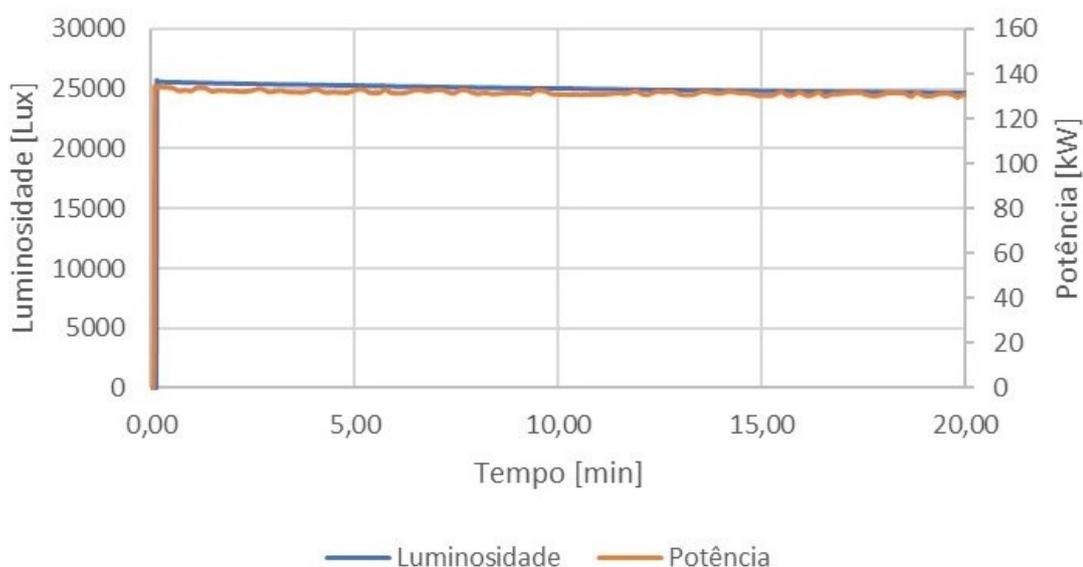


Figura 57 – Estabilização do Refletor LED Industrial

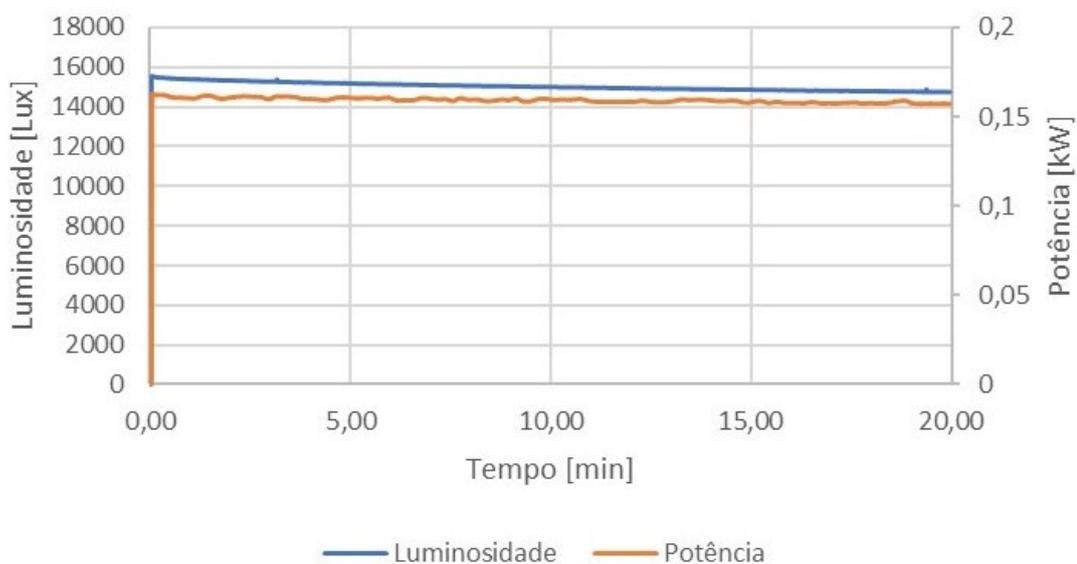


Figura 58 – Estabilização do Refletor LED Pública

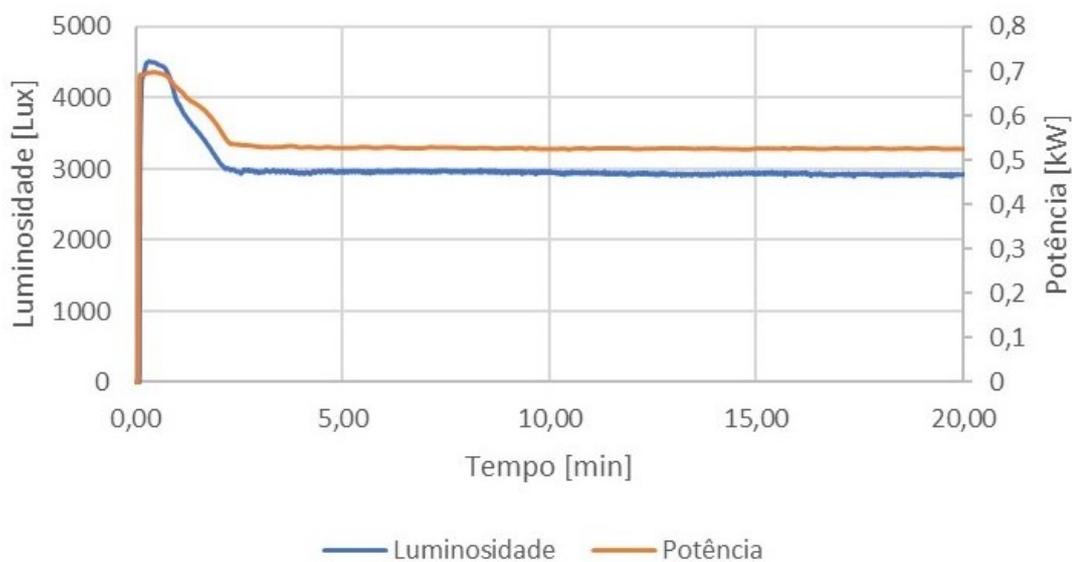


Figura 59 – Estabilização do Mista

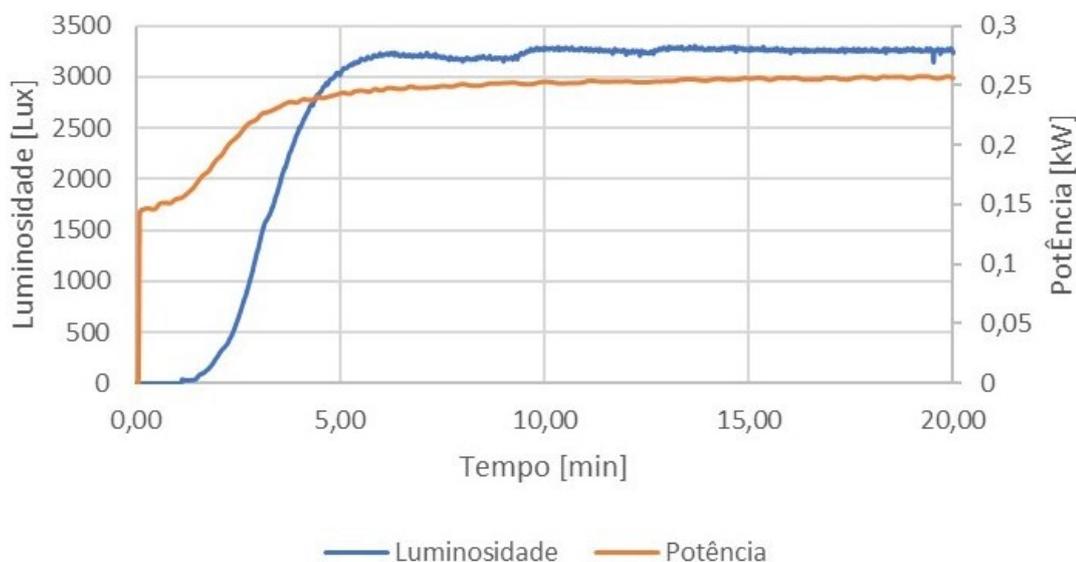


Figura 60 – Estabilização do Vapor de Sódio

#### 5.4.2 Tensão de Regime Permanente

Para os testes em Tensão de Regime Permanente, após a estabilização, as lâmpadas foram submetidas a uma tensão senoidal de 220V. Foram analisadas as grandezas: luminosidade, potência, tensão, corrente, fator de potência e componentes harmônicas de corrente individuais e a distorção total de corrente.

A luminosidade de todas as lâmpadas permaneceu constante durante o teste, assim como a potência, conforme pode ser comprovado na Figura 61. É notória a diferença de luminosidade produzida em cada tecnologia, sendo as lâmpadas LED muito mais eficientes. Produzem um fluxo luminoso 500% maior que as antigas tecnologias, consumindo menos potência.

A potência consumida pelo refletor LED Industrial, que é de 130W aproximadamente, é menor que a declarada pelo fabricante (145W). Já a lâmpada mista consome 25W a mais do que o declarado na embalagem (500W).

Os refletores LED mantêm, como informado pelo fabricante, o fator de potência maior que 0,98, ficando praticamente em 1, o que ajuda a reduzir as perdas no sistema de distribuição. Não há informações sobre fator de potência na lâmpada Mista, mas ele também mantém-se próximo a 1, com 0,96. Já a lâmpada de vapor de sódio, apresenta um fator de potência de 0,4. O que aumenta a demanda de energia reativa no sistema, gera um aumento das perdas e da queda de tensão. Dependendo da quantidade de lâmpadas instaladas pode afetar o sistema de distribuição.

A distorção harmônica total de corrente das lâmpadas é apresentada na Figura 62, onde observa-se que os níveis harmônicos são baixos em todas as lâmpadas. Predominando principalmente a 3ª e 5ª harmônica para a lâmpada mista, o que influencia no valor elevado da distorção total de corrente  $Id_{ht}$  (*Corrente harmônica total*) igual a 24,67%. O mais alto quando comparado a 11,42% para a lâmpada de vapor de sódio, 6,32% e 5,60% para os refletores Industrial e Público, respectivamente. Este ficam abaixo de 10% como informado pelo fabricante.

Esse baixo nível harmônico é comprovado pela Figura 63, onde é possível verificar que o formato senoidal não é muito comprometido.

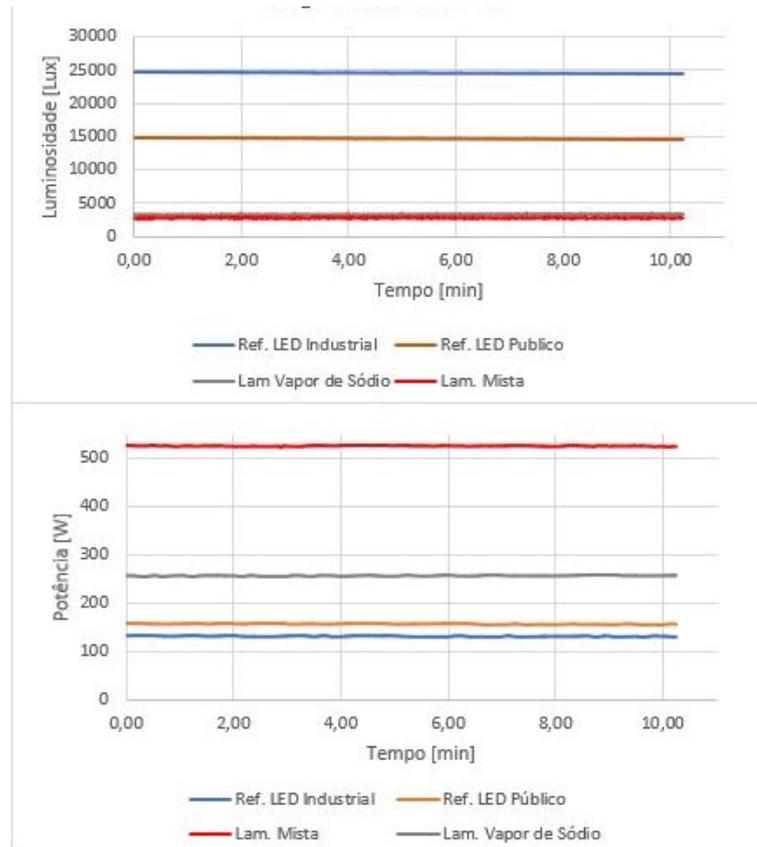


Figura 61 – Tensão de Regime Permanente para lâmpadas de alta potência

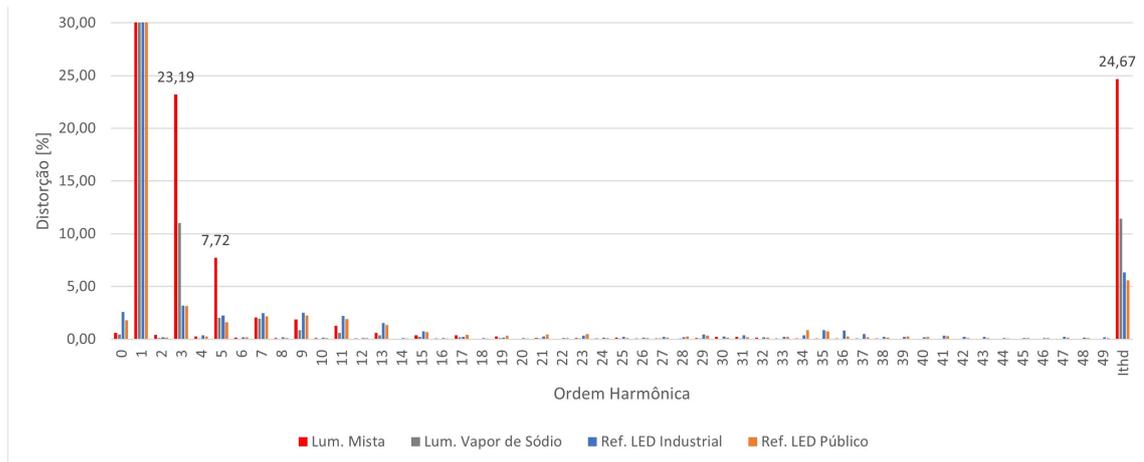


Figura 62 – Componentes Harmônicas para Tensão de Regime Permanente

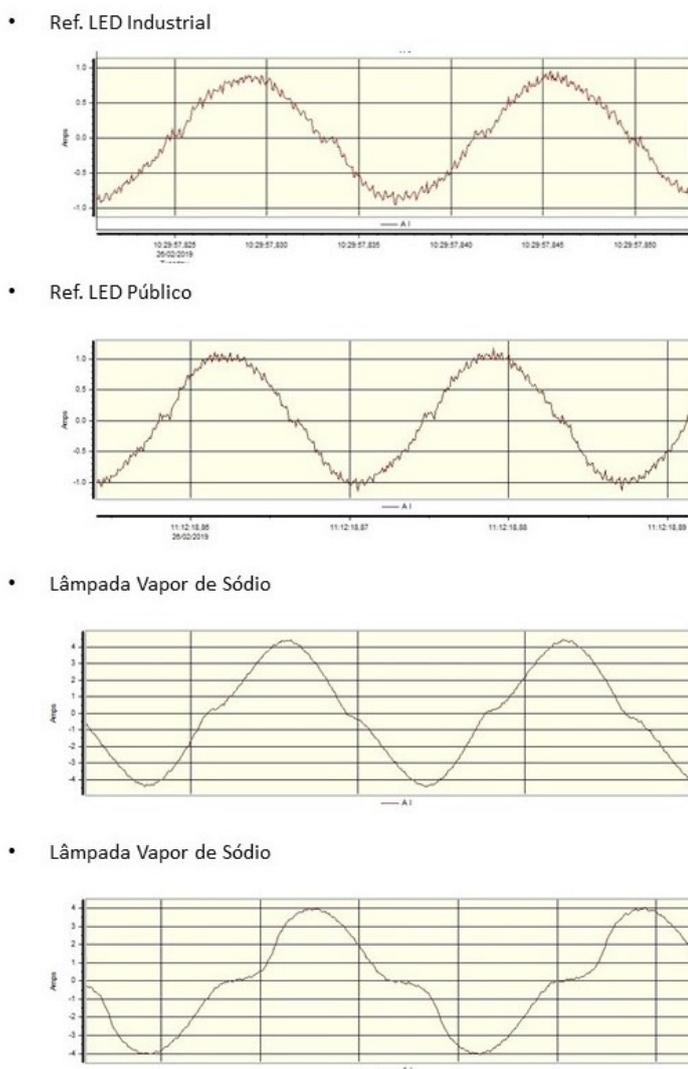


Figura 63 – Forma de onda das Correntes em Tensão de Regime Permanente

### 5.4.3 Flutuação de tensão

Para analisar os efeitos das flutuações de tensão nas lâmpadas foi aplicada a forma de onda descrita pela norma IEC 61000-4-14. Os resultados são apresentados na Figura 64. Para os refletores, a luminosidade permanece constante e no mesmo valor quando submetida a tensão de regime permanente, apesar da flutuação de tensão. Isso se deve ao fato da sua alimentação ser realizada por drive eletrônico. Essa característica faz com que a potência tenha uma tendência linear.

Já para a lâmpada de vapor de sódio, a luminosidade varia exatamente como a forma de onda da tensão aplicada. E a corrente e a potência também seguem o comportamento da tensão. Isto ocorre devido às características construtivas dessas lâmpadas: quanto maior a tensão, maior a ionização dos gases, maior a luminosidade. A premissa oposta também é verdadeira.

Por fim, os resultados para a lâmpadas Mista são similares a da de Vapor de Sódio. Porém a cada elevação da tensão há um pequeno pico na corrente, já que neste modelo, o filamento incandescente, que deveria fazer a função do drive e eliminar esses picos, não atenua adequadamente. Deixando passar os picos de corrente, mas sem consequências maiores ao funcionamento da lâmpada.

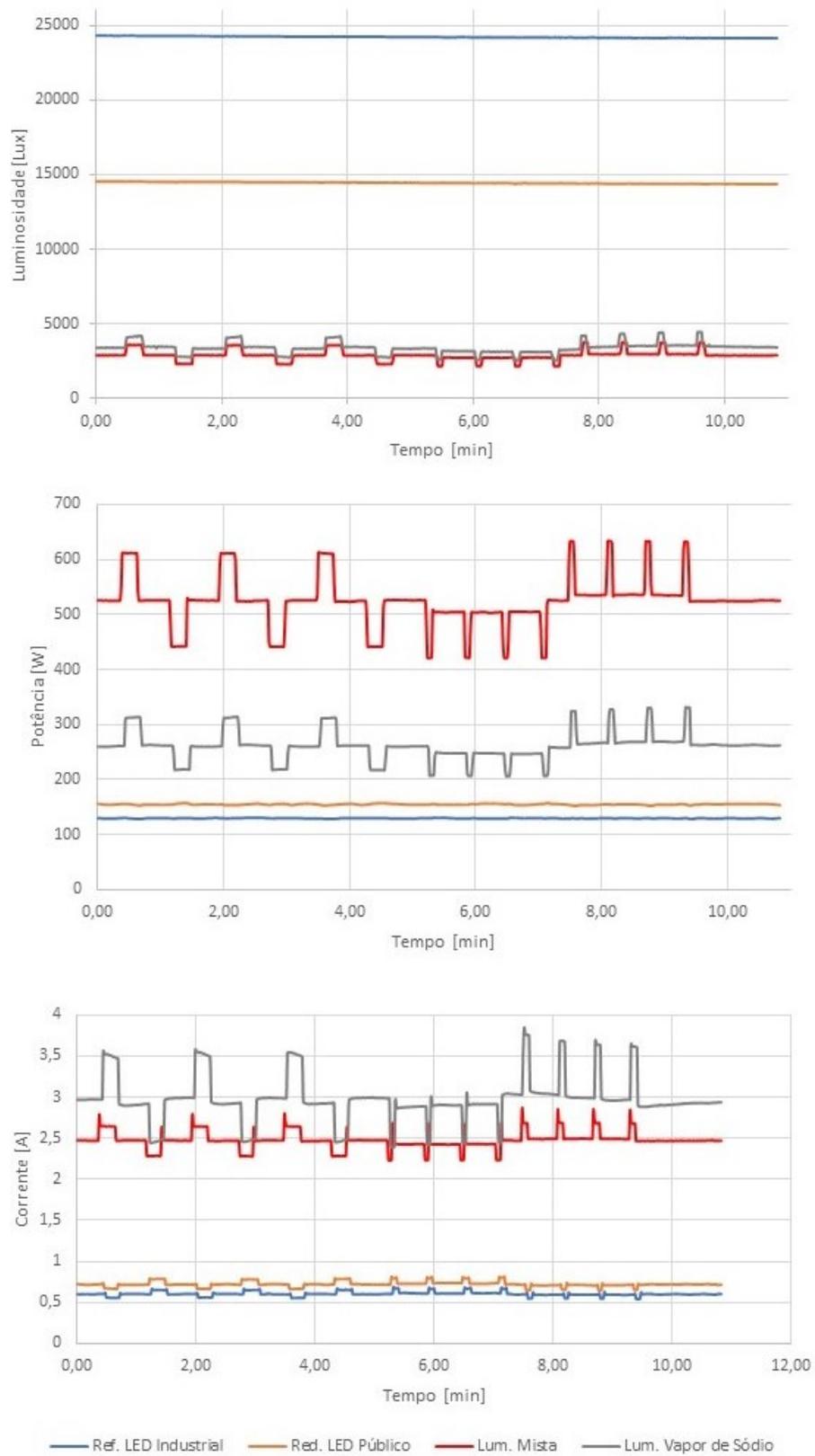


Figura 64 – Flutuação de Tensão

#### 5.4.4 Harmônico

As lâmpadas foram submetidas a uma tensão com as componentes harmônicas determinadas pelos limites das normas: módulo 8 do **PRODIST** e **IEC 61000-2-2**.

As tensões harmônicas individuais aplicadas segundo os limites estabelecidos pela norma IEC resultam nas correntes harmônicas mostradas na Figura 65, onde observa-se que as lâmpadas de tecnologia LED se comportam de maneira semelhantes. O mesmo ocorre com as lâmpadas de gás ionizado. Destaca-se a forte influência sofrida pelas lâmpadas de vapor de sódio e mista na presença da componente de 3º harmônico e o impacto maior sofrido pelos refletores LED nas harmônicas de maior frequência.

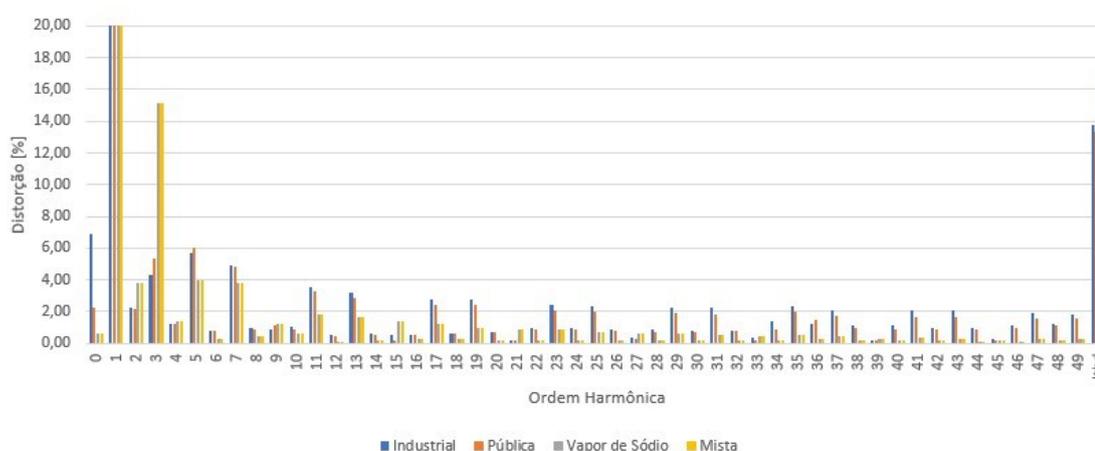


Figura 65 – Distribuição Harmônica de Correntes para a IEC

O segundo experimento foi injetar a tensão com as componentes harmônicas determinadas pelo **PRODIST**. Essa norma é mais severa tanto no aspecto de distorção harmônica total, quanto nas componentes individuais, inclusive quanto se trata das harmônicas pares. Essas componentes harmônicas fazem com que a tensão eficaz abaixe para uma média de 158 V, para uma tensão base de 220V, devido a intensa distorção da forma de onda senoidal. Porém esse nível de tensão não é suficiente para ionizar os gases da lâmpada de vapor de sódio. Por isso, nesses casos foi utilizado uma tensão base de 270V. Isso não modifica a forma de onda, nem as componentes harmônicas. Apenas aumenta o valor da tensão eficaz para 210 V.

A tensão harmônica, determinada pelo **PRODIST**, causa a circulação das correntes harmônicas mostrada na Figura 66, onde observa-se uma similaridade maior no comportamento das lâmpadas de **LED** e de Gás. Destaca-se apenas as disparidades na 2ª e 3ª harmônicas, onde as lâmpadas de Vapor de Sódio e Mista sofrem uma influência maior e as lâmpadas **LED** que se destacam para as ordens ímpares de maior frequência, 35ª, 37ª, 41ª e 42ª.

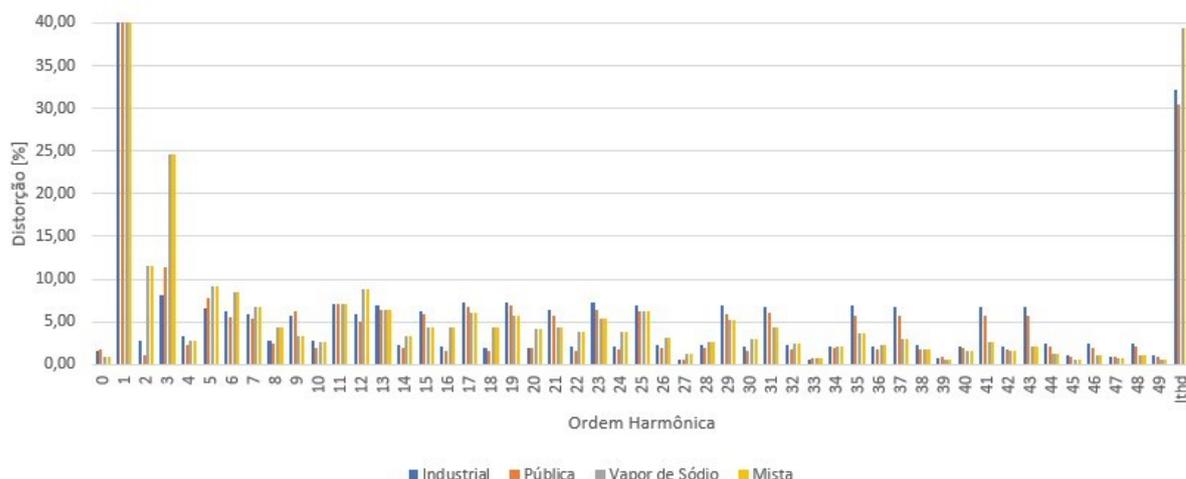


Figura 66 – Distribuição Harmônica de Correntes para o PRODIST

Para uma análise mais detalhada, a Tabela 34 apresenta as comparações das grandezas elétricas para cada lâmpada e para cada norma IEC e o PRODIST. Na comparação para o refletor LED Industrial, observa-se que apesar de em nenhum dos casos haver a injeção de componente contínua, a presença das demais componentes harmônicas causam a oscilação no valor da componente DC, principalmente na IEC. As harmônicas ímpares de baixa frequência tendem a aumentar com a injeção de harmônica de tensão na mesma frequência, com exceção na 9ª harmônica da norma IEC. O destaque para esse ensaio foi a resposta dessas lâmpadas para frequências mais altas, já que não são frequências comuns no sistema elétrico, seus níveis subiram consideravelmente. Consequentemente, o nível de distorção de corrente harmônica total se elevou com o aumento das tensões DC.

O refletor LED Público apresenta um comportamento mais suave com relação a componente DC, quando comparado ao Industrial. No mais apresenta comportamento semelhante ao Refletor LED Industrial. Destaca-se apenas o elevado nível de componente de 3º harmônico gerado pela tensão aplicada de acordo com o PRODIST.

A lâmpada de Vapor de Sódio apresenta uma maior suportabilidade a variação dos níveis de tensão harmônica aplicados. Não tendo sofrido grandes variações em seus níveis de correntes harmônicas. Isto se deve ao fato de não possuir controle por componentes eletrônicos, que geram e são mais vulneráveis as distorções harmônicas, além de ter a presença do *drive* que ajuda na estabilização da tensão. O mesmo não ocorre para a lâmpada mista, que apresenta um comportamento mais esporádico.

Tabela 34 – Componentes Harmônicas para ondas IEC e PRODIST

Componentes Harmônicas		Ref. LED Industrial	Ref. LED Público	Lum. Mista	Lum. Vapor de Sódio
DC (0 Hz)	IEC	6,86	2,26	0,65	0,61
	PRODIST	1,66	1,7	0,71	0,86
3ª (180 Hz)	IEC	4,31	5,36	15,17	13,97
	PRODIST	8,18	11,39	24,66	13,00
5ª (300 Hz)	IEC	5,71	6,03	3,99	3,52
	PRODIST	6,60	7,71	9,06	3,71
7ª (420 Hz)	IEC	4,89	4,86	3,83	1,18
	PRODIST	5,90	5,52	6,68	1,19
9ª (540 Hz)	IEC	0,86	1,17	1,18	1,53
	PRODIST	5,72	6,14	3,30	2,24
34ª a 39ª (2040 a 2340 Hz)*	IEC	<3	<2	<0,5	<0,3
	PRODIST	<7	<6	<4	<0,2
Idht	IEC	13,78	13,33	17,18	14,8
	PRODIST	32,21	30,39	39,46	14,32

\*máximo

Um segundo ponto importante quando se compara os diferentes regimes de tensão harmônica é verificar o impacto que essa variação trouxe para a luminosidade e para as grandezas elétricas, conforme apresenta a Tabela 35. Para o refletor Industrial, observa-se que as grandezas se mantêm constante, há apenas uma alteração na corrente quando o refletor é alimentado pelo PRODIST, pois há uma redução da tensão eficaz e que faz com que o drive de acionamento aumente a corrente para manter a potência constante.

Apenas a análise dos valores eficazes faz parecer que a mudança da composição harmônica para essa lâmpada não impacta nas grandezas elétricas. Mas quando analisa-se a forma de onda da corrente, disponível na Figura 67, observa-se que há uma mudança significativa, devido a a presença da harmônicos de alta frequência. O drive de acionamento não permite que essa variação impacte na potência e conseqüentemente na luminosidade. O comportamento do Refletor LED Público é o mesmo do apresentado pelo Industrial, como visto na Figura 68.

Tabela 35 – Grandezas Elétricas para ondas IEC e PRODIST

Grandezas Elétricas		Ref. LED Industrial	Ref. LED Público	Lum. Mista	Lum. Vapor de Sódio
Luminosidade	IEC	23500 lux	14980 lux	3219 lux	3804 lux
	PRODIST	23360 lux	14500 lux	1482 lux	2150 lux
Tensão	IEC	228 V	228 V	228 V	228 V
	PRODIST	158 V	158 V	171 V	210 V
Corrente	IEC	0,6 A	0,7 A	2,51 A	3 A
	PRODIST	0,9 A	1 A	1,90 A	2,64 A
Potência	IEC	130 W	157 W	556 W	277 W
	PRODIST	131 W	157 W	300 W	200 W
Fator de Potência	IEC	0,98	0,98	0,97	0,4
	PRODIST	0,98	0,95	0,94	0,36

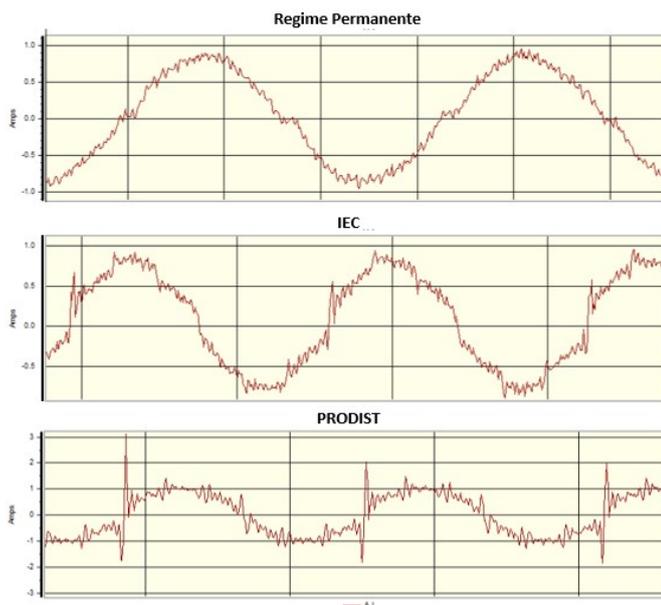


Figura 67 – Comparativo de forma de onda para Refletor LED Industrial

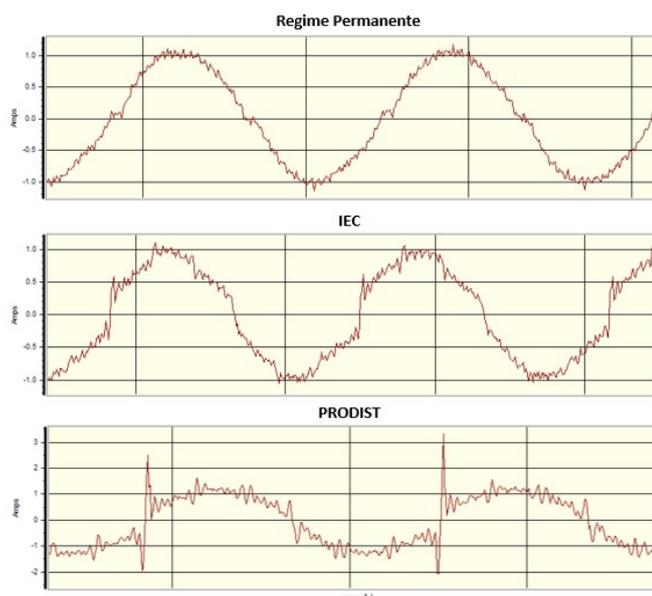


Figura 68 – Comparativo de forma de onda para Refletor LED Público

Para a lâmpada de Vapor de Sódio observa-se um comportamento diferente das com tecnologia LED, visto que praticamente não há alteração no valor eficaz e na forma de onda da corrente, como visto na Figura 69. Isso causa a variação da potência devido a alteração da tensão, conseqüentemente a alteração da luminosidade. Isso se deve ao aspecto construtivo da lâmpada de sódio não ser capaz de regular a corrente. O mesmo ocorre para a lâmpada Mista. Os resultados para o PRODIST foram mais discrepantes

para a Mista do que para a de Vapor de Sódio, devido ao valor base de tensão não ter sido alterado para esse modelo, continuando em 220V, como visto na Figura 70.

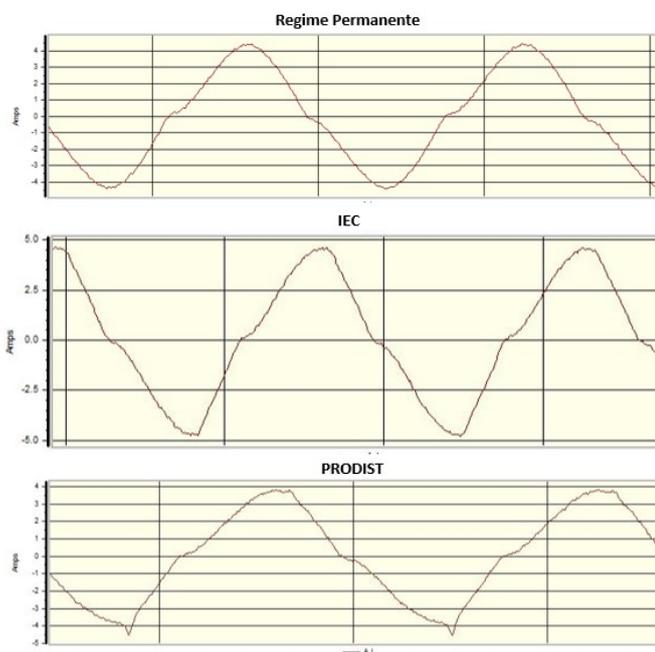


Figura 69 – Comparativo de forma de onda para Lâmpada de Vapor de Sódio

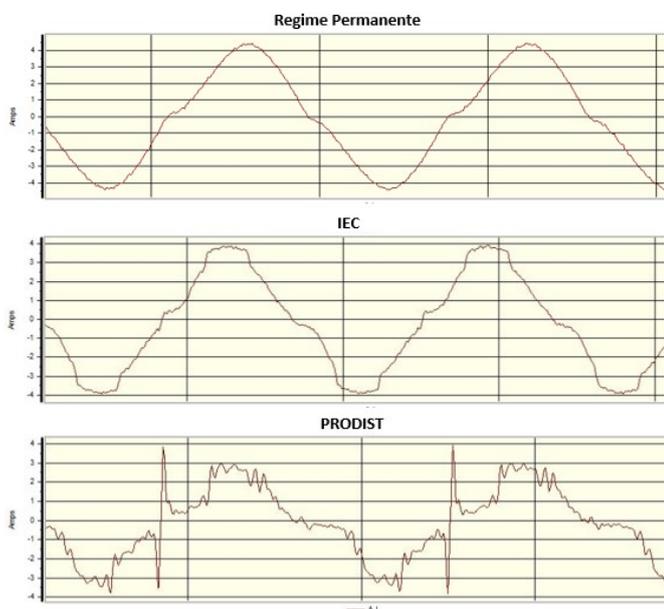


Figura 70 – Comparativo de forma de onda para Lâmpada de Mista

#### 5.4.5 Suportabilidade a Subtensão

Neste teste foram aplicados sucessivos decréscimos de tensão, com objetivo de determinar os limites de suportabilidade das lâmpadas testadas. Para o refletor LED

Industrial, a luminosidade se mantém inalterada até 58% da tensão nominal, desligando totalmente a 28% da tensão nominal, visto na Figura 71. Observa-se que a potência espelha a variação de luminosidade, pois há a correção da corrente, o que gera pequenos picos no momento de transição de tensão, causado pelos ajustes dos componentes eletrônicos do drive de acionamento.

O Refletor LED Público apresenta comportamento semelhante ao anterior, mantendo a luminosidade até 68% da tensão nominal, desligando em 29%. Esta, porém, apresenta uma transição mais suave entre níveis de tensão, como visto na Figura 72.

Para a Vapor de Sódio, a luminosidade reduz desde a primeira queda de tensão e continua caindo proporcionalmente. A luminosidade se mantém apenas até 98% da tensão nominal, mas esta lâmpada se mantém ligada até 38% da tensão nominal com luminosidade muito reduzida, como apresentado na Figura 73. Isso se deve ao fato dela não elevar a corrente para manter a potência constante. Até há alguns picos no início das reduções de tensão, que indica uma tentativa de corrigir a corrente, porém sem sucesso.

Como comprovado pela Figura 74, novamente, a lâmpada Mista apresenta o mesmo comportamento da lâmpada de vapor de sódio, porém tem uma redução de luminosidade mais lenta, mas desliga mais rapidamente. Mantém a sua luminosidade até 98% da tensão nominal e desliga ao atingir 73%.

De acordo com a Tabela 36, os refletores LED Industrial e público mantêm 70% da sua luminosidade até 43% e 48% da tensão nominal, respectivamente. Contra 92% da Vapor de Sódio e 83% Mista. Portanto, quando compara-se as quatro lâmpadas há uma discrepância grande entre a suportabilidade das de tecnologia LED para as de ionização gasosa.

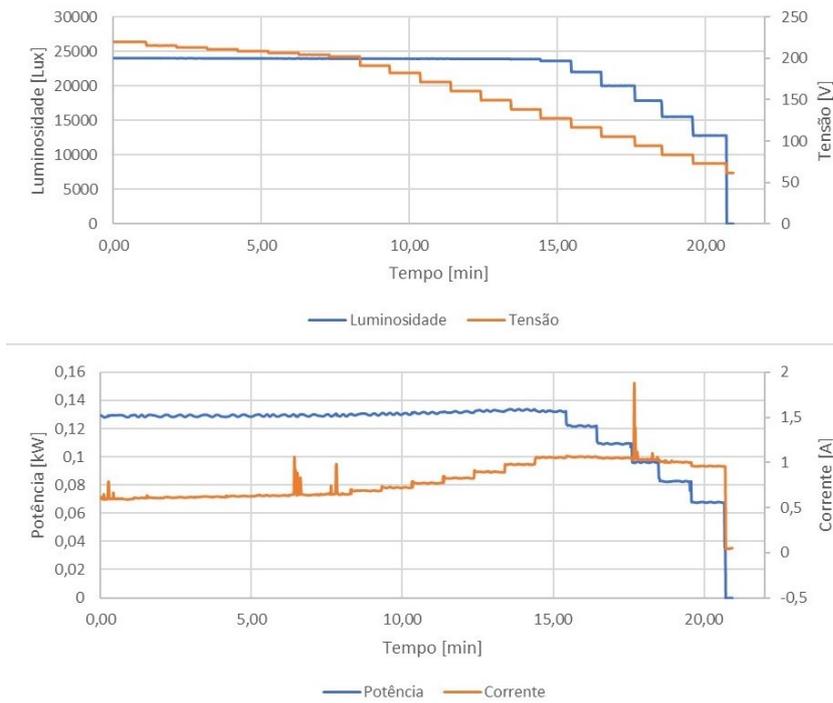


Figura 71 – Suportabilidade a Subtensão Refletor LED Industrial

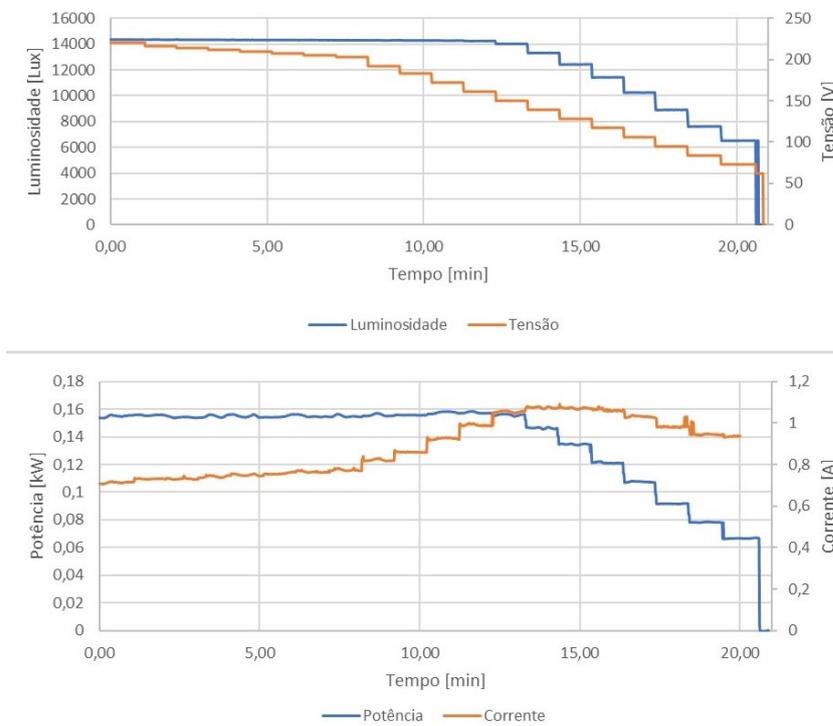


Figura 72 – Suportabilidade a Subtensão Refletor LED Publico

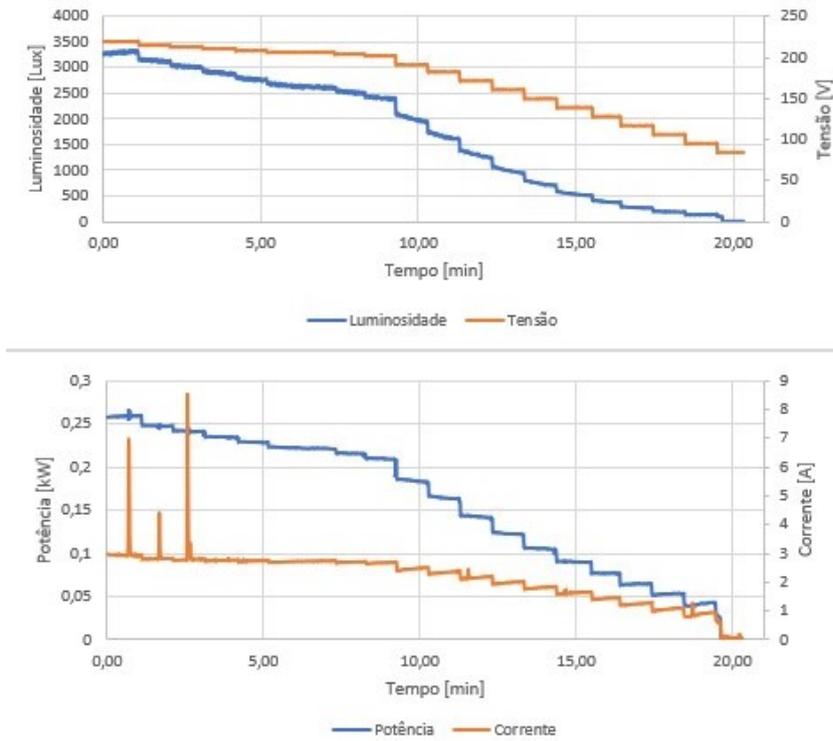


Figura 73 – Suportabilidade a Subtensão Vapor de Sódio

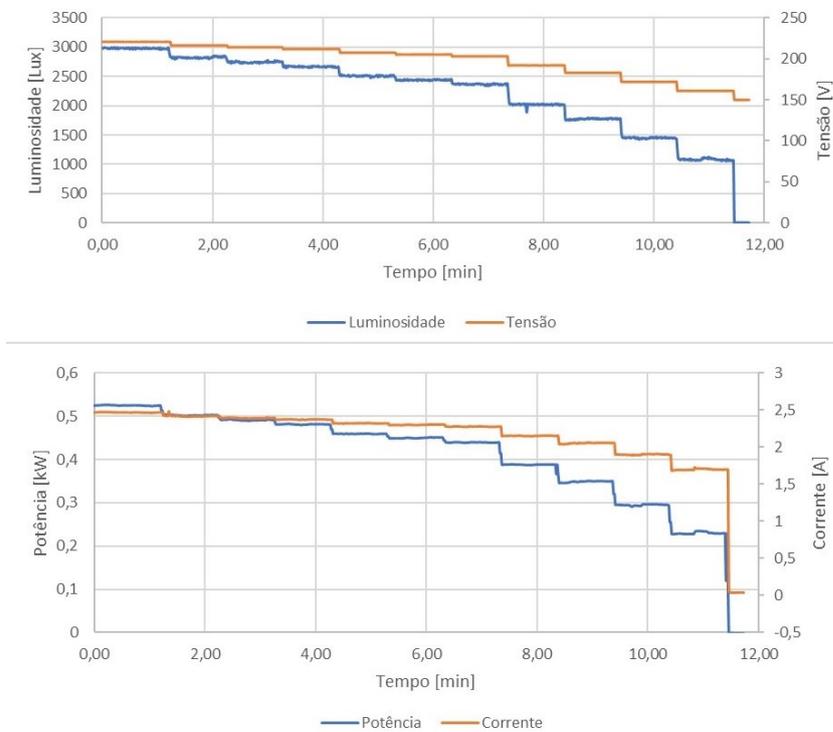


Figura 74 – Suportabilidade a Subtensão Mista

Tabela 36 – Comparativo de Suportabilidades a Subtensão

Suportabilidade de Tensão	Industrial	Pública	Vapor de Sódio	Mista
Luminosidade >95% Nominal	127,8V	149,8 V	215,7 V	215,8 V
	58,1%	68,1%	98,0%	98,1%
Luminosidade em 70% Nominal	94,8 V	105,9 V	202,6 V	182,8 V
	43,1%	48,1%	92,1%	83,1%
Desligamento	61,8 V	63,6 V	83,8 V	160,8 V
	28,1%	28,9%	38,1%	73,1%

## 5.5 Considerações finais

Após a avaliação dos diferentes aspectos da qualidade da energia elétrica, é possível afirmar que, inegavelmente a utilização de tecnologia LED é um notório avanço para o sistema de iluminação, pois a mesma apresentou resposta superior em todos os testes aplicados.

No aquecimento, sua resposta é praticamente imediata nas condições nominais, enquanto as de tecnologia de ionização gasosa levam no mínimo 10 minutos para estabilizar. Vale lembrar também que, quando desligada, as lâmpadas de LED podem ser religadas no mesmo instante. Já as lâmpadas de ionização gasosa precisam resfriar para novo acionamento. O que faz com que a tecnologia LED seja mais vantajosa no aspecto de praticidade e segurança, pois caso haja uma falta de energia, a iluminação voltará ao normal logo que a energia voltar. Quesito importante quando trata-se iluminação pública, parques, indústrias, quadra de esportes, entre outros.

Em Tensão de Regime Permanente, o aspecto mais notório é comprovado: a tecnologia LED realmente gera uma luminosidade muito maior com uma potência menor. Seu fator de potência fica acima do normalizado no Brasil, que é de 0,92, sendo muito próximo de 1. Ao contrário do esperado para uma tecnologia de iluminação eletrônica, seus níveis de distorções harmônicas totais são consideravelmente inferiores às lâmpadas de ionização gasosa.

Quando alimentadas com flutuações de tensão, os refletores LED se provam novamente superiores, pois não apresentaram variação de luminosidade. O mesmo ocorre sob tensões ricas em distorção harmônica, não há grandes variações de luminosidade e consumo de potência. Bastando-se atentar para quando sua instalação for realizada em sistemas que sejam sensíveis a harmônicas de alta frequência, pois já foi comprovado em outros estudos que, em conjunto, os refletores LED podem causar elevação das harmônicas entre a 33ª e a 39ª componente. Um dos problemas pode ser a ocorrência de um fenômeno de sucessivos Zero-Crossings, que é a passagem da tensão mais de uma vez pelo zero dentro de um mesmo ciclo. Isso pode causar o mal funcionamento de outros

equipamentos eletrônicos sensíveis.

A iluminação com LED também apresenta suportabilidade a subtensão maior que as lâmpadas de Vapor de Sódio e Mista. Portanto, podem ser utilizadas em áreas da rede de distribuição onde haja esse problema, não como uma solução, mas sim como medida paliativa até que seja possível a regularização da tensão da rede. A mesma conclusão é válida para locais sujeitos a flutuação de tensão.

É importante ressaltar que, os refletores LED utilizados neste experimento são de alta qualidade. Para garantia de mesmo resultado é necessário utilizar refletores LED que atestem a sua qualidade, possuam um bom drive e preferencialmente possuam proteção anti-surto, já que está é mais suscetível e sujeito a esse problema.

## 6 Análise das Lâmpadas Residenciais no Sistema de Distribuição

Após a análise individual das lâmpadas **LED** residenciais realizada em laboratório, há agora a necessidade de estudar o impacto das diferentes tecnologias de lâmpadas residenciais no sistema de distribuição. Isto é, determinar o impacto da poluição gerada pela inserção de grande quantidade de lâmpadas no sistema de distribuição.

Para realizar essa análise das lâmpadas, de forma a intensificar o efeito provocado pelo seu funcionamento sobre os parâmetros de qualidade de energia da rede de distribuição, seria necessário obter várias lâmpadas funcionando simultaneamente. Porém, adquirir a quantidade de lâmpadas necessárias, assim como, os acessórios para a sua instalação seria economicamente inviável e, além disso, elas seriam conectadas dentro do campus da **Unifei (Universidade Federal de Itajubá)**, um sistema de distribuição atípico com subestação própria. Neste cenário, surgiu a ideia de realizar medições em unidades consumidoras conectadas ao sistema de distribuição, onde existam um grande número de lâmpadas funcionando simultaneamente e que essas fossem as cargas prioritárias do local. Portanto, foram realizadas medições seguindo o protocolo determinado pelo **PRODIST**, em igrejas, que se enquadram perfeitamente nos requisitos apresentados, além de trazer dados reais a essa pesquisa.

Foram escolhidas 4 igrejas localizadas em Itajubá, Minas Gerais. Elas foram selecionadas pelas distintas tecnologias de iluminação utilizadas e por estarem situadas em diferentes pontos do sistema de distribuição, que retratam realidades e características diversas. Todas elas são atendidas em baixa tensão, grupo B3, carga convencional, comercial trifásico, na categoria templos religiosos.

### 6.1 Localidades e seus Sistema de Distribuição

#### 6.1.1 Igreja Matriz de Santo Antônio

A primeira é a Igreja Matriz de Santo Antônio, vista na Figura 75, situada no bairro residencial homônimo da periferia da cidade. A iluminação da igreja é feita através de doze lustres com cinco lâmpadas fluorescente compactas cada, mais dois lustres no altar com três lâmpadas cada, como observado na Figura 76. Totalizando 66 lâmpadas fluorescentes compactas, com potência média de 15W cada, com diferentes temperaturas de cor, marca e modelo. As demais lâmpadas que iluminam, a sacristia, o santíssimo e a sala da administração serão consideradas junto às demais cargas do sistema, como o

sistema de multimídia e ventiladores.



Figura 75 – Igreja Matriz de Santo Antônio



Figura 76 – Vista interna da Igreja Matriz de Santo Antônio

Segundo a concessionária, esta igreja é atendida por um transformador de 75 kVA cujos dados estão disponíveis na Tabela 37. Esse transformador alimenta 15 postes, sendo 99 clientes atendidos por esse sistema, como mostra a Figura 77, tendo a curva da carga apresentada na Figura 78. A Igreja Matriz de Santo Antônio é atendida através do poste 9, em conjunto com mais 6 clientes residenciais. [47]

Tabela 37 – Dados do Sistema de Distribuição da Igreja Matriz de Santo Antônio

Sistema de Distribuição da Igreja Matriz de Santo Antônio	
Potência	75 kVA
Tipo	Trifásico
Carregamento	75%
Tensão	13,8 kV - 220 V
Nº Clientes Residenciais	94
Nº Clientes Comerciais	5
Demanda Total Máxima	56,24 kVA
Demanda Fase A	18,4 kVA
Demanda Fase B	22,07 kVA
Demanda Fase C	15,78 kVA

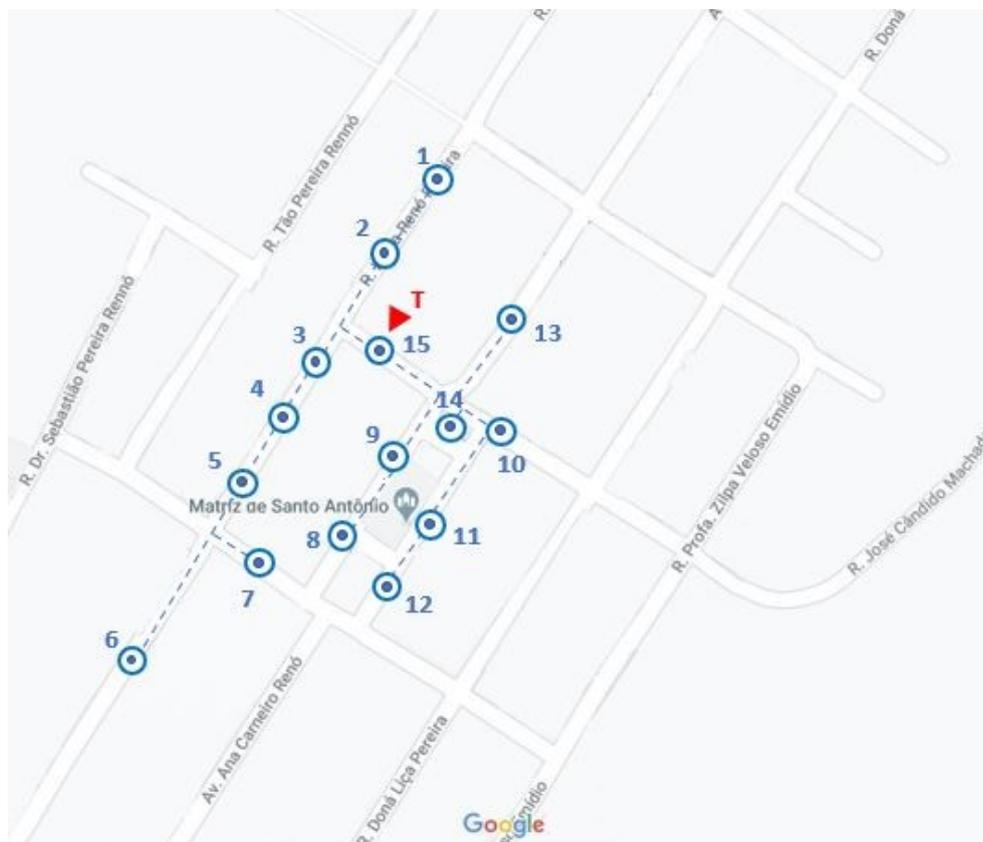


Figura 77 – Sistema de Distribuição da Igreja Matriz de Santo Antônio

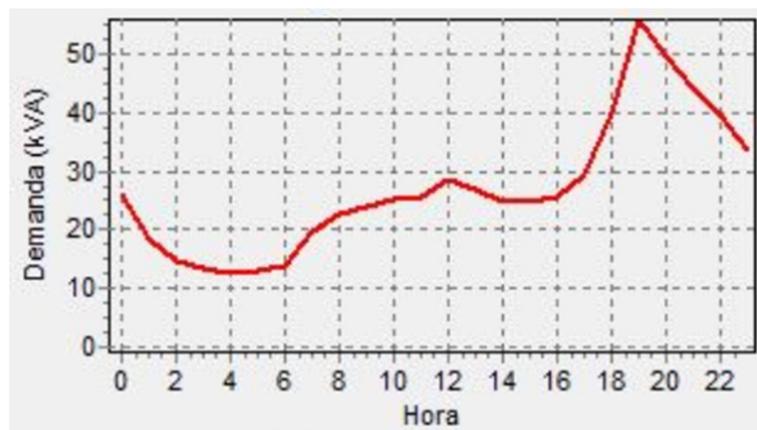


Figura 78 – Curva de Carga do Transformador da Igreja Matriz de Santo Antônio

### 6.1.2 Igreja Matriz Nossa Senhora da Soledade

A segunda é a Igreja Matriz Nossa Senhora da Soledade, vista na Figura 79, situada no Centro de Itajubá, bairro com grande concentração tanto residencial quanto comercial. A iluminação da igreja é feita através de 320 lâmpadas LED tipo Vela, de aproximadamente 5W, além de 26 refletores LED de 30W, como observado na Figura 80. As demais lâmpadas que iluminam a sacristia, o santíssimo e a sala da administração serão consideradas junto as demais cargas do sistema, como o sistema de multimídia e os 14 ventiladores.



Figura 79 – Igreja Matriz Nossa Senhora da Soledade

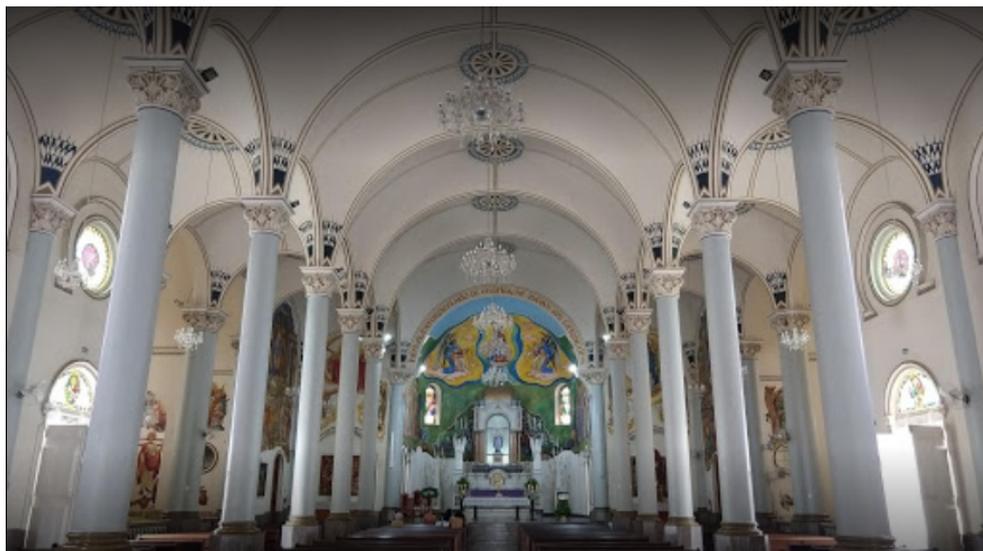


Figura 80 – Vista interna da Igreja Matriz Nossa Senhora da Soledade

Segundo a concessionária, esta igreja é atendida por um transformador de 30 kVA, cujos dados estão disponíveis na Tabela 38. Esse transformador alimenta, 15 postes e 17 clientes, como mostra a Figura 81, e tendo a curva da carga apresentada na Figura 82. A Matriz de Soledade é atendida através do poste 10. [47]

Tabela 38 – Dados do Sistema de Distribuição da Igreja Matriz Nossa Senhora da Soledade

Sistema de Distribuição da Igreja Matriz Nossa Senhora da Soledade	
Potência	30 kVA
Tipo	Trifásico
Carregamento	82%
Tensão	13,8 kV - 220 V
Nº Clientes Residenciais	8
Nº Clientes Comerciais	9
Demanda Total Máxima	24,65 kVA
Demanda Fase A	5,66 kVA
Demanda Fase B	8,19 kVA
Demanda Fase C	10,79 kVA

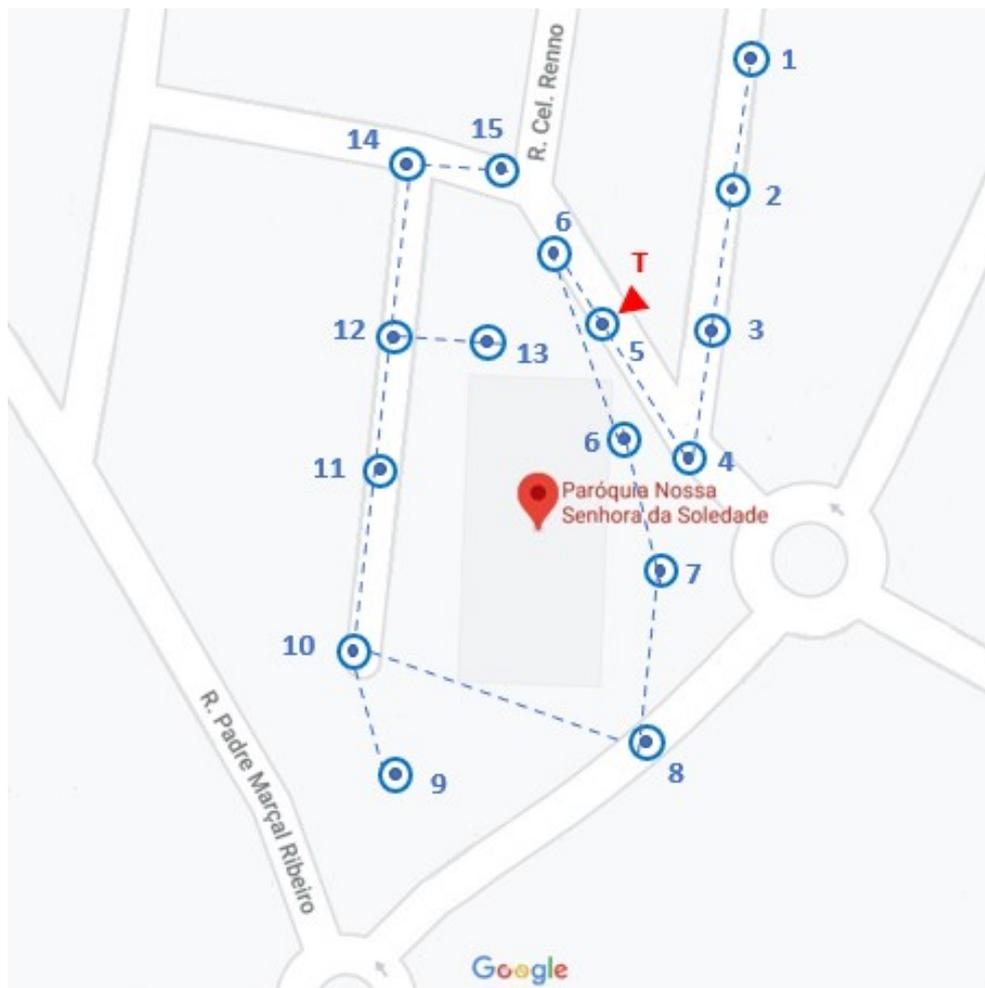


Figura 81 – Sistema de Distribuição da Igreja Matriz Nossa Senhora da Soledade

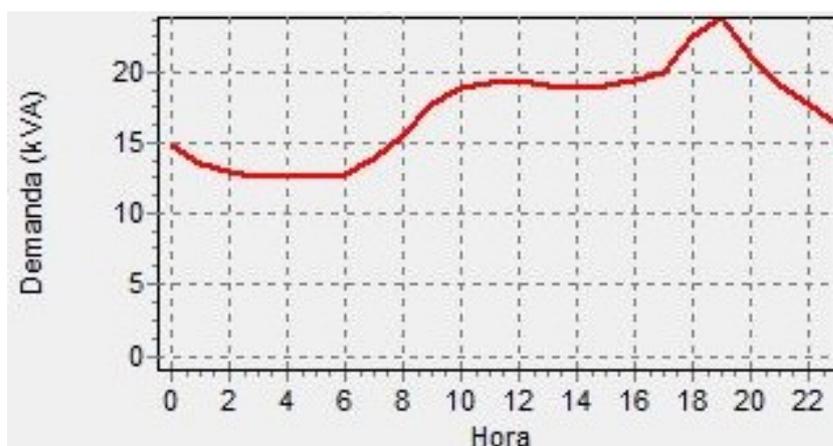


Figura 82 – Curva de Carga do Transformador da Igreja Matriz Nossa Senhora da Soledade

### 6.1.3 Igreja Matriz de São Benedito

A terceira é a Igreja Matriz de São Benedito, vista na Figura 83, situada no bairro Varginha em Itajubá. A iluminação da igreja é feita através de 88 lâmpadas LED de 7W, do Fabricante C, que já foi testada no capítulo 4, como observado na Figura 84. As demais lâmpadas que iluminam, a sacristia, o santíssimo e a sala da administração e as sancas serão consideradas junto as demais cargas do sistema, como o sistema de multimídia e os ventiladores.



Figura 83 – Igreja Matriz de São Benedito



Figura 84 – Vista interna da Igreja Matriz de São Benedito

Segundo a concessionária, esta igreja é atendida por um transformador de 112 kVA, cujo os dados estão disponíveis na Tabela 39. Esse transformador alimenta, 14 postes e 139 clientes, como mostra a Figura 85, e tendo a curva da carga apresentada na Figura 86. A Igreja Matriz de São Benedito é atendida através do poste 13. [47]

Tabela 39 – Dados do Sistema de Distribuição da Igreja Matriz de São Benedito

Sistema de Distribuição da Igreja Matriz de São Benedito	
Potência	112 kVA
Tipo	Trifásico
Carregamento	67%
Tensão	13,8 kV - 220 V
Nº Clientes Residenciais	117
Nº Clientes Comerciais	21
Demanda Total Máxima	75,33 kVA
Demanda Fase A	25,89 kVA
Demanda Fase B	26,18 kVA
Demanda Fase C	23,26 kVA



Figura 85 – Sistema de Distribuição da Igreja Matriz de São Benedito



Figura 86 – Curva de Carga do Transformador da Igreja Matriz de São Benedito

#### 6.1.4 Santuário Nossa Senhora da Agonia

A última é o Santuário Nossa Senhora da Agonia, vista na Figura 87, situada em bairro Rural, entre os bairros Pinheirinho e Estiva, em Itajubá. A iluminação da igreja é feita através de 114 refletores LED de 40W, como observado na Figura 88. As demais lâmpadas que iluminam, a sacristia, o santíssimo e o mezanino serão consideradas junto as demais cargas do sistema, como o sistema de multimídia e os ventiladores.



Figura 87 – Santuário Nossa Senhora da Agonia

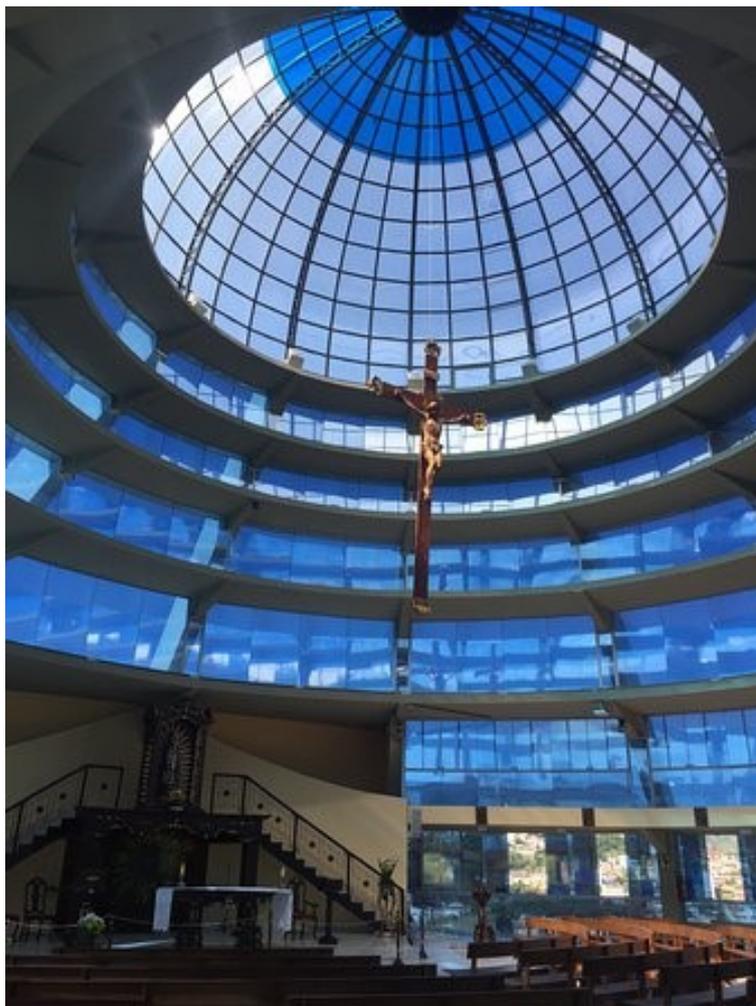


Figura 88 – Vista interna do Santuário Nossa Senhora da Agonia

Segundo a concessionária, esta igreja é atendida por um transformador de 45 kVA, cujos dados estão disponíveis na Tabela 40. Esse transformador alimenta, 2 postes e 1 cliente, como mostra a Figura 89, e tendo a curva da carga apresentada na Figura 90. O Santuário Nossa Senhora da Agonia é atendido através do poste 2. [47]

Tabela 40 – Dados do Sistema de Distribuição do Santuário Nossa Senhora da Agonia

Sistema de Distribuição do Santuário Nossa Senhora da Agonia	
Potência	45 kVA
Tipo	Trifásico
Carregamento	9%
Tensão	13,8 kV - 220 V
Nº Clientes Residenciais	0
Nº Clientes Comerciais	1
Demanda Total Máxima	4,39 kVA
Demanda Fase A	1,49 kVA
Demanda Fase B	1,49 kVA
Demanda Fase C	1,41 kVA

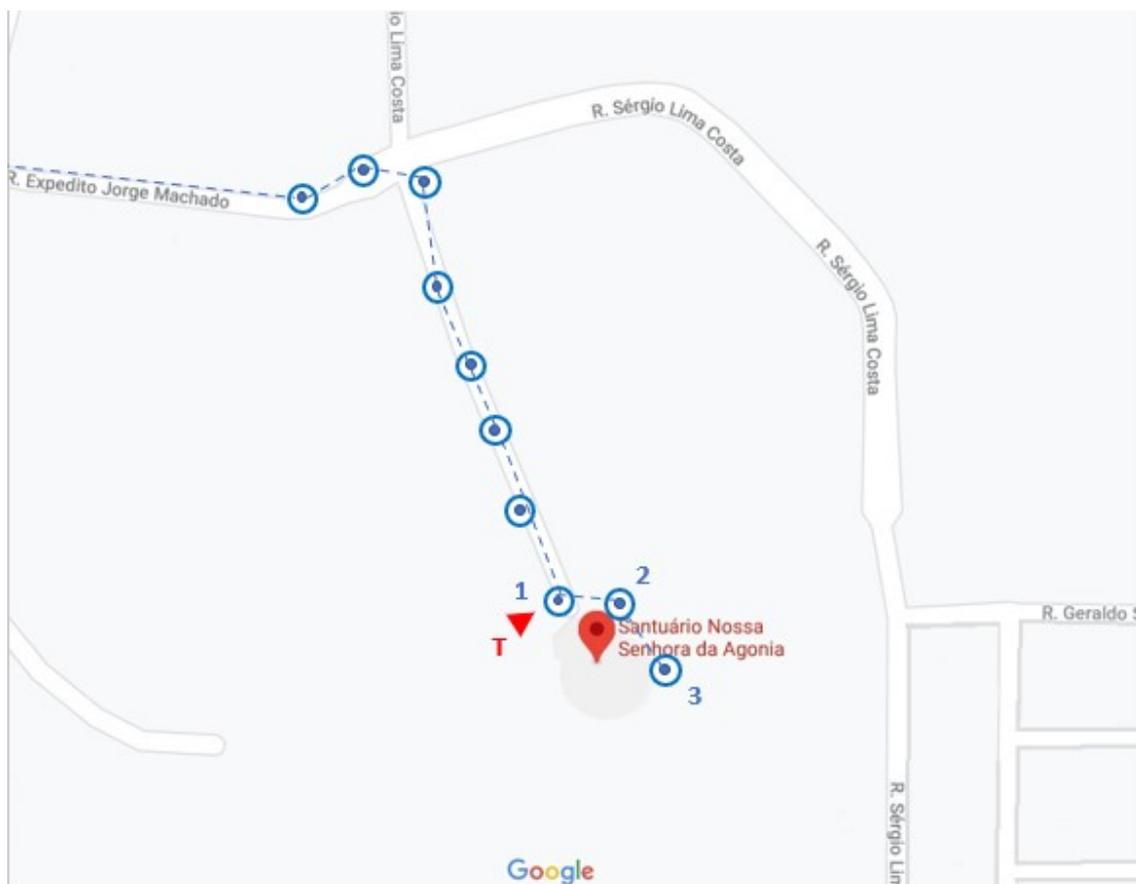


Figura 89 – Sistema de Distribuição do Santuário Nossa Senhora da Agonia



Figura 90 – Curva de Carga do Transformador do Santuário Nossa Senhora da Agonia

## 6.2 Metodologia

Para realizar as medições foi utilizada a metodologia definida pelo [PRODIST](#), isto é, com duração de 1 semana, com amostras coletadas a cada 10 minutos, a fim de obter as 1008 leituras de tensão e corrente trifásicas válidas necessárias para a análise dos distúrbios de qualidade de energia elétrica. [15]

Para realização dessas medições foi utilizado o qualímetro PowerGuide 4400, da *Dranetz*. Ele realiza leituras em sinal contínuo e alternado, coletando 256 amostras por ciclo com precisão de 0,1%, possui uma faixa de tensão 1-600 *Vrms* (*Tensão de Eficaz*), e uma faixa de corrente de 1-6000 Amperes. Este é o mesmo equipamento utilizado nas medições laboratoriais. [41]

O medidor foi conectado ao quadro de distribuição das igrejas, conectando os cabos de tensão das fases A, B, C e Neutro nos barramentos através de garras jacaré. E os *clamps* de corrente envolvendo os cabos de alimentação das fases A, B, C e Neutro. Após a conexão os painéis foram fechados, dentro do possível, a fim de manter a segurança das pessoas que circulavam pelo ambiente. O medidor ficou trancado durante toda medição, novamente por segurança e para preservação do medidor e da medição.

## 6.3 Resultados

### 6.3.1 Igreja Matriz de Santo Antônio

Para analisar as medições realizadas na Igreja Matriz de Santo Antônio deve-se conhecer a rotina da igreja durante as medições. A Tabela 41 apresenta os horários de funcionamento da igreja. Durante o dia não há energização de carga na igreja e ao longo da madrugada, há apenas o circuito de segurança.

Tabela 41 – Atividades na Igreja Matriz de Santo Antônio

Horário de Funcionamento Igreja Matriz de Santo Antônio	
Terça-feira	19:00 as 21:30
Quarta-feira	19:00 as 21:30
Quinta-feira	19:00 as 21:30
Sexta-feira	19:00 as 20:30
Sábado	—
Domingo	10:00 as 11:30
	19:00 as 21:00
Segunda-feira	19:30 as 22:00

O nível de tensão eficaz nas fases A, B e C está disponível na Figura 91, onde também se destacam os limites presentes na imagem, concluindo que não há infração dos limites precários e críticos determinados pelo Módulo 8 do *PRODIST*. Portanto, *DRP* e *DRC* são nulos.

No gráfico de corrente presente na Figura 92, há picos nos momentos de acionamento das cargas. O pico é maior no domingo, devido a utilização de equipamentos de áudio visual e os instrumentos da equipe de canto.

Na Figura 93, é vista a Potência Ativa consumida, que retrata os mesmo picos presentes na corrente. A Figura 94 apresenta a potência reativa, onde observa-se a natureza capacitiva da carga durante os acionamentos durante a semana, porém no domingo cargas de natureza indutiva são conectadas principalmente a fase B, causado pelo acionamento dos ventiladores. E durante a noite, a fase B aparenta uma natureza levemente indutiva, devido a pequena carga eletrônica do sistema de segurança.

Quanto ao fator de potência, apresentado na Figura 95, o valor fica praticamente o tempo todo abaixo da norma, para as fases A e C indutivo quando o sistema está a vazio, apresentando sinais das cargas capacitivas que são acionadas. Já a fase B, apresenta um circuito com muito mais oscilação, mesma característica apresentada no gráfico da potência reativa.

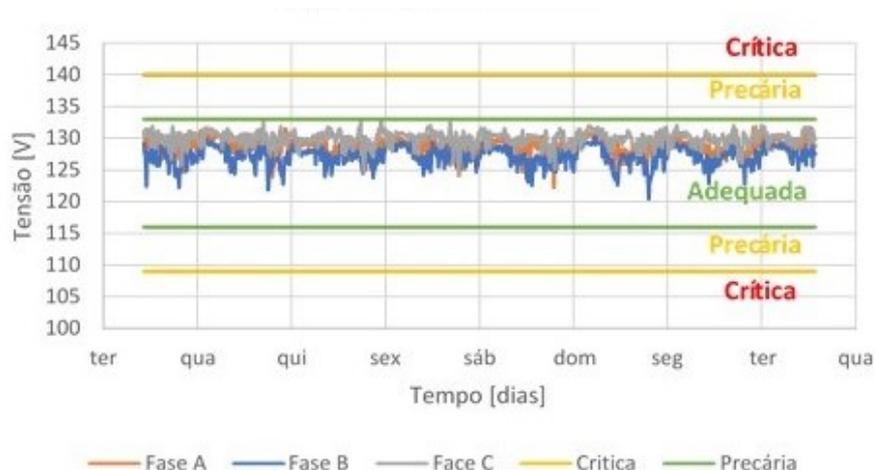


Figura 91 – Tensão Eficaz na Igreja Matriz de Santo Antônio

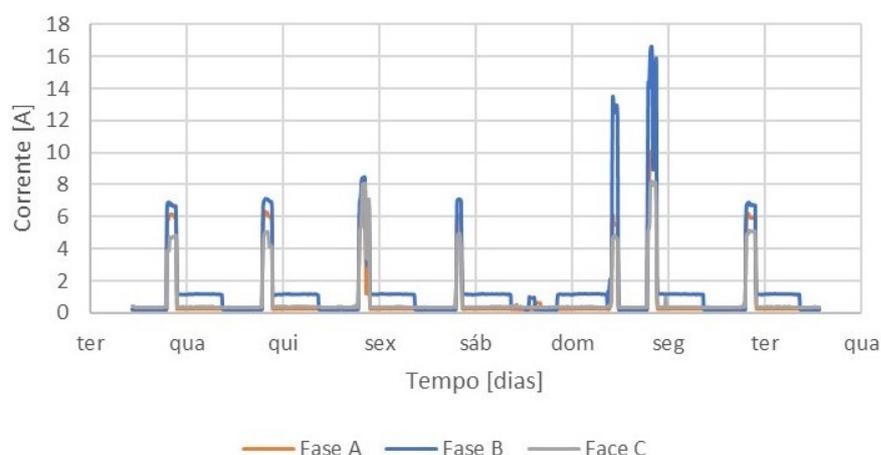


Figura 92 – Corrente na Igreja Matriz de Santo Antônio

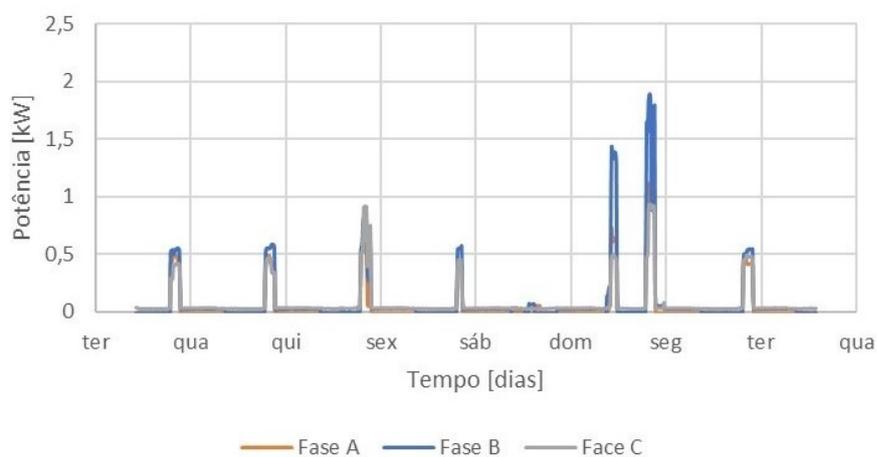


Figura 93 – Potência Ativa na Igreja Matriz de Santo Antônio

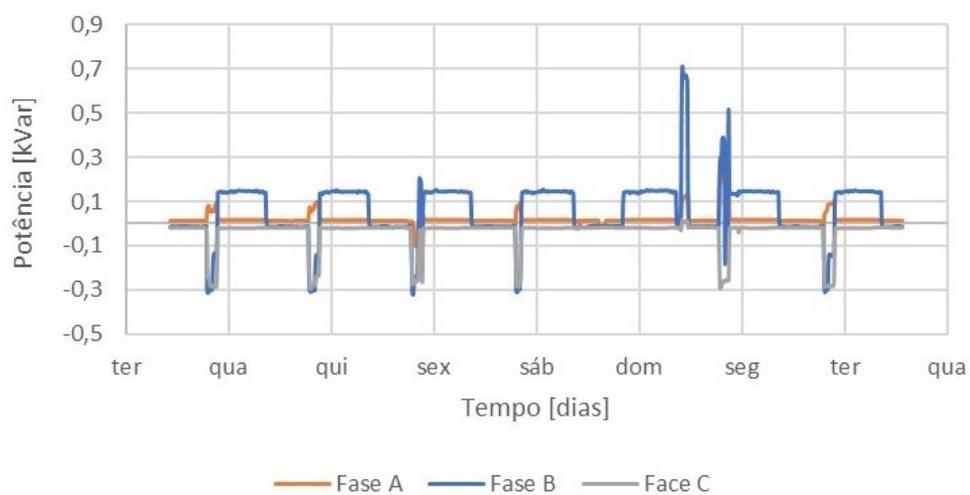


Figura 94 – Potência Reativa na Igreja Matriz de Santo Antônio

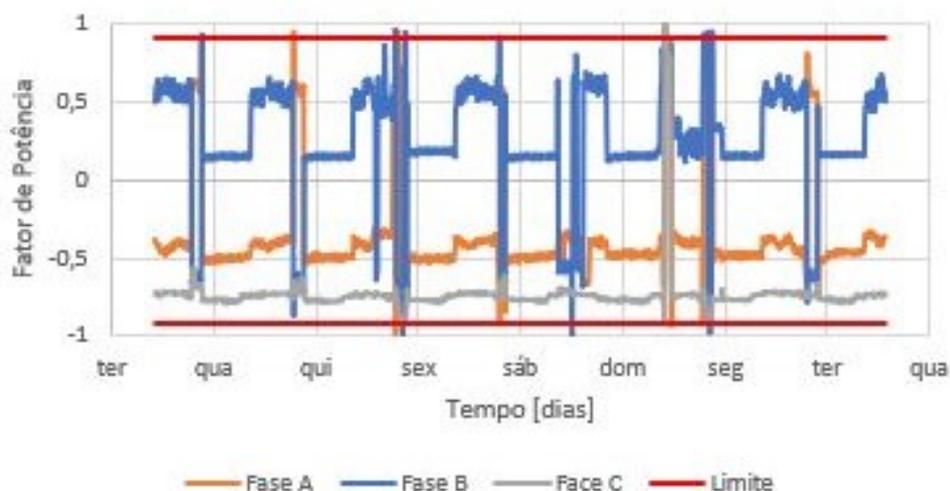


Figura 95 – Fator de potência na Igreja Matriz de Santo Antônio

O comportamento do indicador da flutuação de tensão (PST) é apresentado na Figura 96. Durante o período em que o sistema está a vazio, o PST permanece menor que 1. A Fase B é a única a infringir o limite de 1 pu para PST95%, como visto na Tabela 42.

Tabela 42 – PST95% na Igreja Matriz de Santo Antônio

PST		
A	B	C
0,605	<b>1,09</b>	0,630

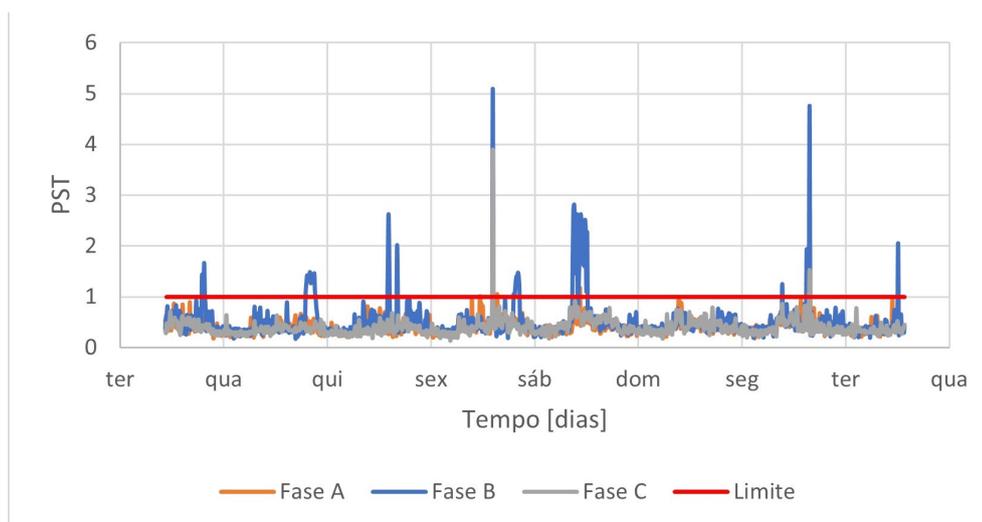


Figura 96 – Flutuação de Tensão na Igreja Matriz de Santo Antônio

A frequência é apresentada na Figura 97, onde observa-se que não há infração aos limites, em vermelho.

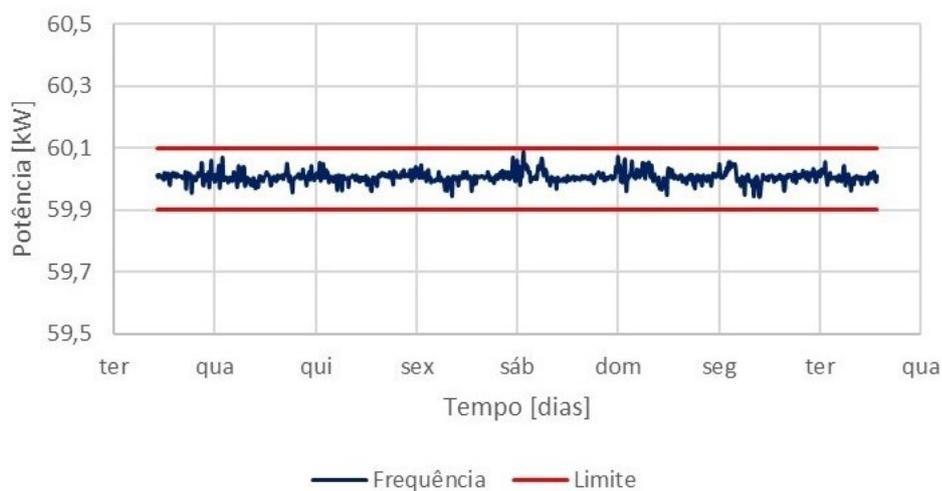


Figura 97 – Frequência na Igreja Matriz de Santo Antônio

A tensão e corrente no neutro apresentadas na Figura 98, indicam que há um desequilíbrio no sistema. Porém, o gráfico na Figura 99, que apresenta os percentis 5%, 95% e 99%, mostra que o limite estabelecido pelo PRODIST para 95% não é ultrapassado. A tensão e a corrente no neutro também podem ocorrer devido a circulação de harmônicos de sequência zero. Porém, não é esse o caso, como será visto no estudo das componentes harmônicas na próxima seção.

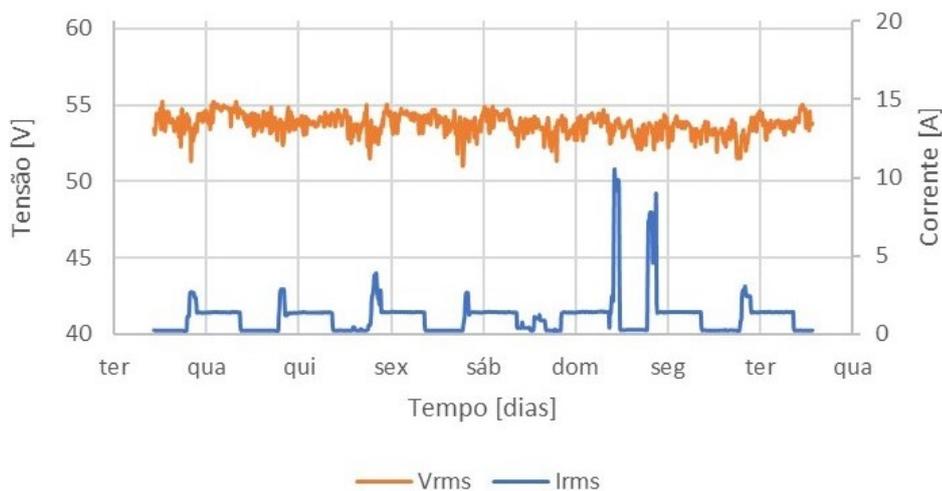


Figura 98 – Tensão e Corrente de Neutro na Igreja Matriz de Santo Antônio

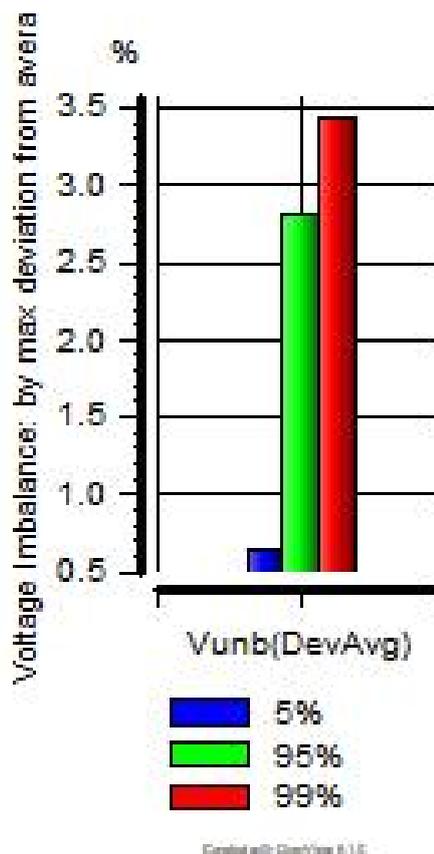


Figura 99 – Percentis 5%, 95% e 99% do desequilíbrio de tensão na Igreja Matriz de Santo Antônio

Os harmônicos são um dos aspectos mais importantes para esse trabalho. Portanto, ele será abordado, de forma mais detalhada que os demais distúrbios de qualidade. As Figuras 100 e 101 apresentam as distorções harmônicas totais de tensão e corrente, respectivamente, ao longo da semana. Mesmo com elevadas distorções harmônicas nas correntes nas três fases, as tensões permanecem com distorções abaixo de 4% praticamente o tempo todo. As Figuras 102 e 103 apresentam os percentis 5%, 95% e 99% das distorções harmônicas totais de tensão e corrente, respectivamente. Segundo o PRODIST, o percentil 95% não deve ultrapassar 10% para sistemas com nível de tensão menor que 1kV. Portanto, o  $V_{dht}$  (*Tensão harmônica total*) não ultrapassa os limites da norma. Já o percentil 95% do  $I_{dht}$ , apesar de não ser regulamentado, atinge níveis elevados em todas as fases, ultrapassando os 100% nas Fases A e B. Durante a semana os níveis de distorção harmônica de corrente sofrem picos que quase atingem 200%.

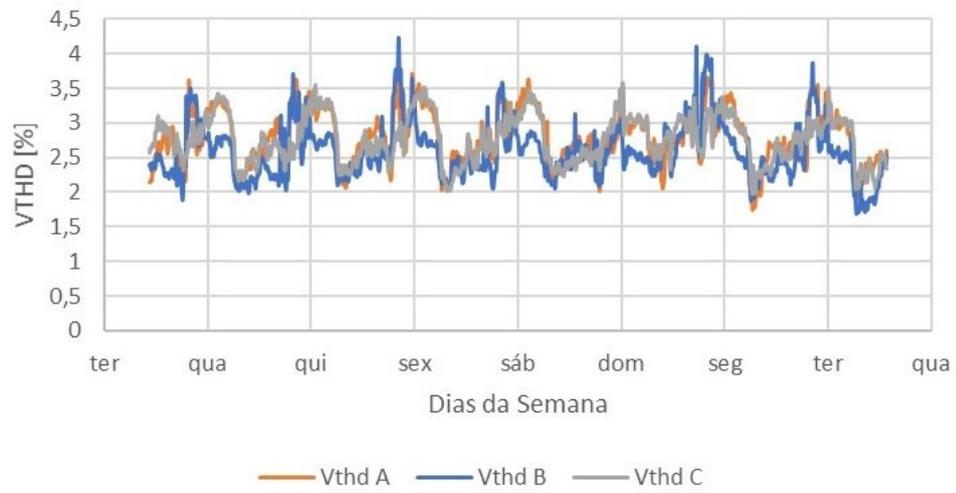


Figura 100 – Distorção Harmônica Total de Tensão na igreja Matriz de Santo Antônio

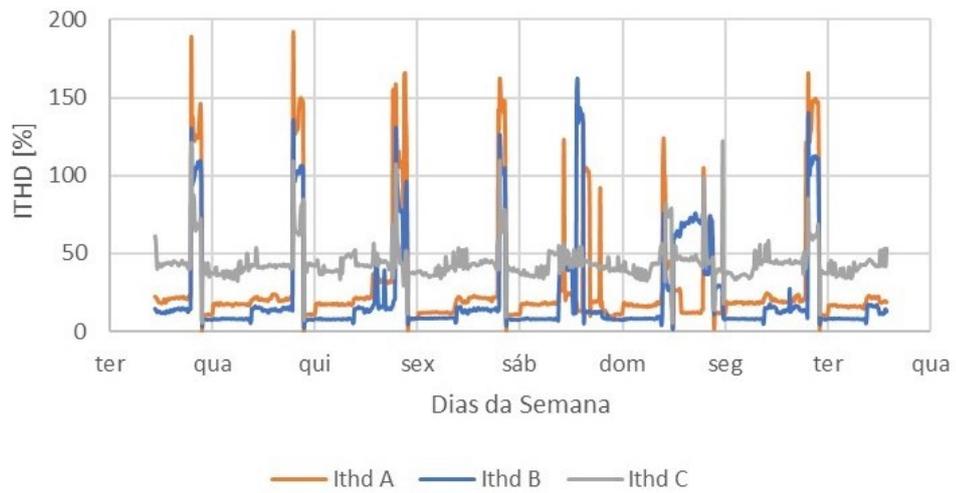


Figura 101 – Distorção Harmônica Total de Corrente na igreja Matriz de Santo Antônio

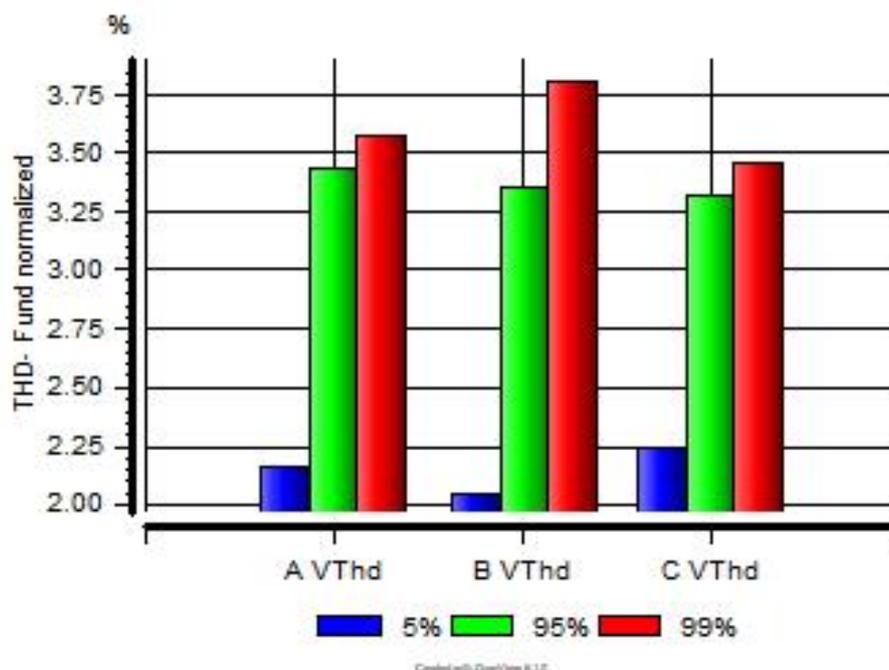


Figura 102 – Percentis da Distorção Harmônica Total de Tensão na Igreja Matriz de Santo Antônio

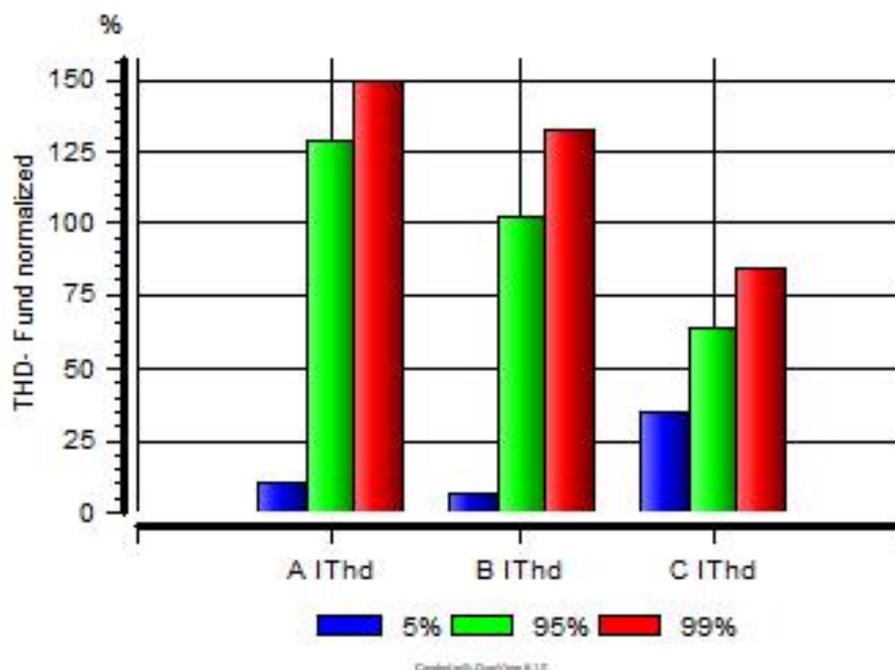


Figura 103 – Percentis da Distorção Harmônica Total de Corrente na Igreja Matriz de Santo Antônio

Para analisar o comportamento das ordens harmônicas na distorção de tensão e corrente, foram escolhidos 4 pontos relevantes no gráfico de potência ativa da Igreja Matriz

de Santo Antônio. Pontos estes que se destacam por representarem as principais atividades ou falta delas na semana. Para cada fase, foram analisadas as ordens harmônicas de tensão e corrente nos pontos que estão marcados na Figura 104.

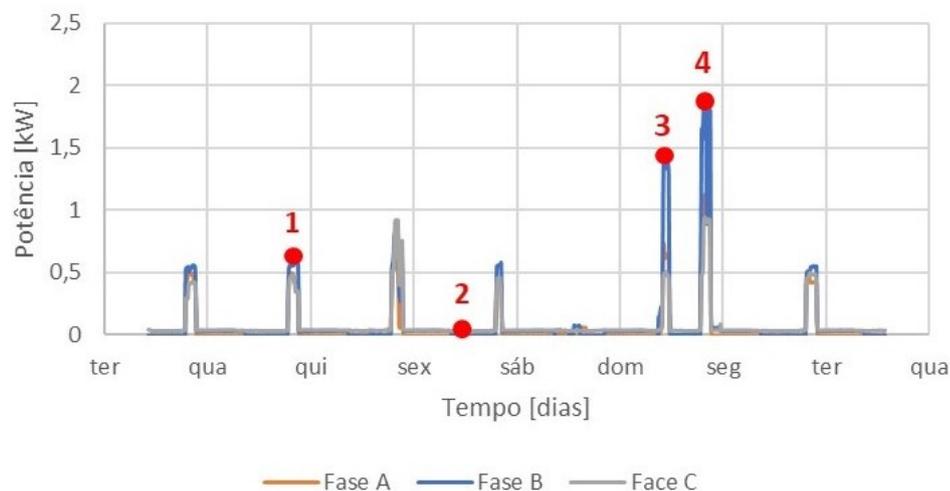


Figura 104 – Pontos de análise das ordens harmônicas na Igreja Matriz de Santo Antônio

As Figuras 105 e 106 apresentam a composição harmônica da Fase A, as Figuras 107 e 108 apresentam a composição harmônica da Fase B e as Figuras 109 e 110 da Fase C. Observa-se que não há infração dos níveis de distorção harmônica de tensão para nenhuma das Fases, em nenhum dos pontos críticos do sistema, com a média ficando abaixo de 2%.

A distorção de corrente não é muito elevada, ficando abaixo de 100%, apesar de superar os limites da IEC para a Classe C. Essa norma é utilizada apenas como referência nesse caso, pois ela determina limites para emissão individual de um aparelho. Nas fases A e B, o harmônico do Ponto 1 se destaca. Já a Fase C é caracterizada pela uniformidade entre os harmônicos em todos os pontos, exceto pela componente contínua do ponto 2. A parcela DC se destaca em todas as fases, principalmente na Fase A, onde supera os 200%. Efeito causado pela ausência de carga conectada ao circuito.

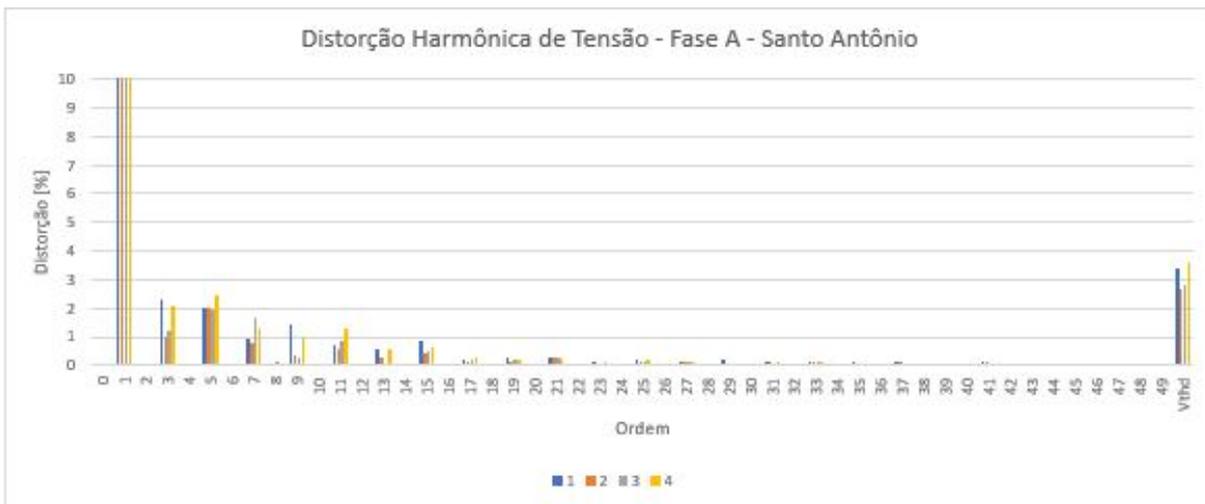


Figura 105 – Harmônicos de Tensão – Fase A – Igreja Matriz de Santo Antônio

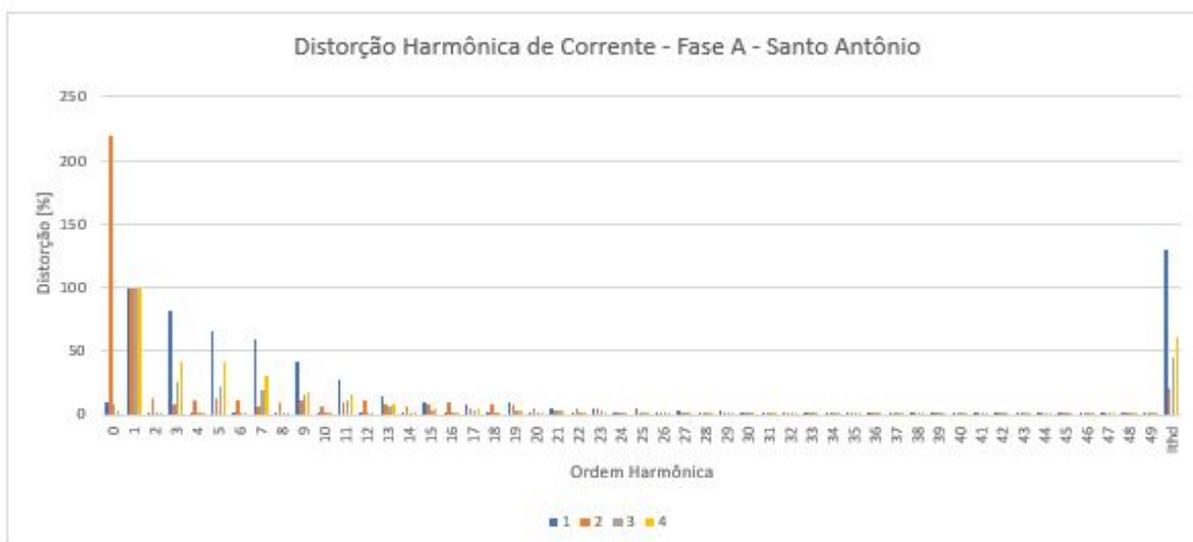


Figura 106 – Harmônicos de Corrente – Fase A – Igreja Matriz de Santo Antônio

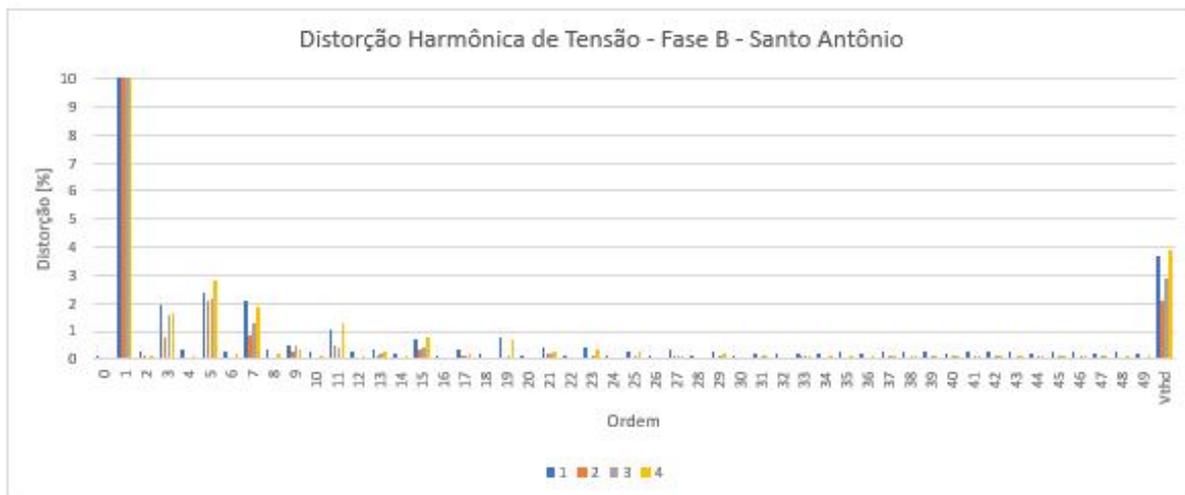


Figura 107 – Harmônicos de Tensão – Fase B – Igreja Matriz de Santo Antônio

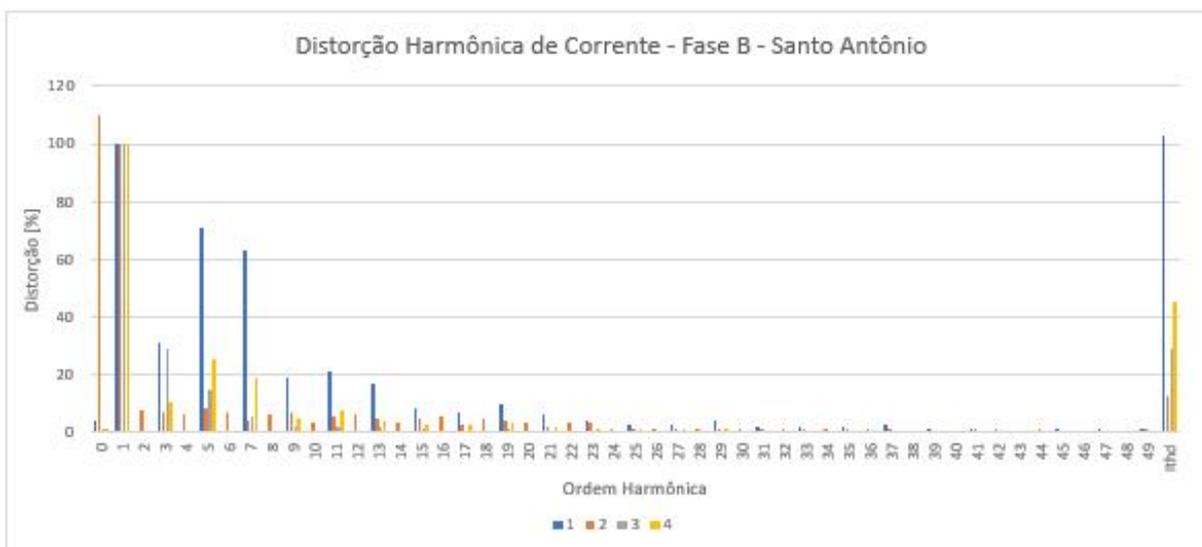


Figura 108 – Harmônicos de Corrente – Fase B – Igreja Matriz de Santo Antônio

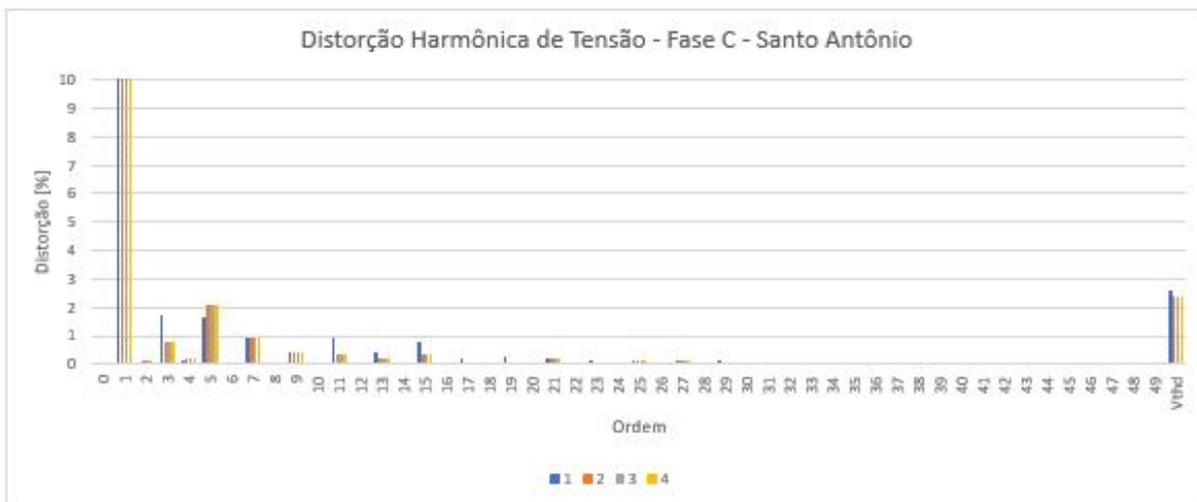


Figura 109 – Harmônicos de Tensão – Fase C – Igreja Matriz de Santo Antônio

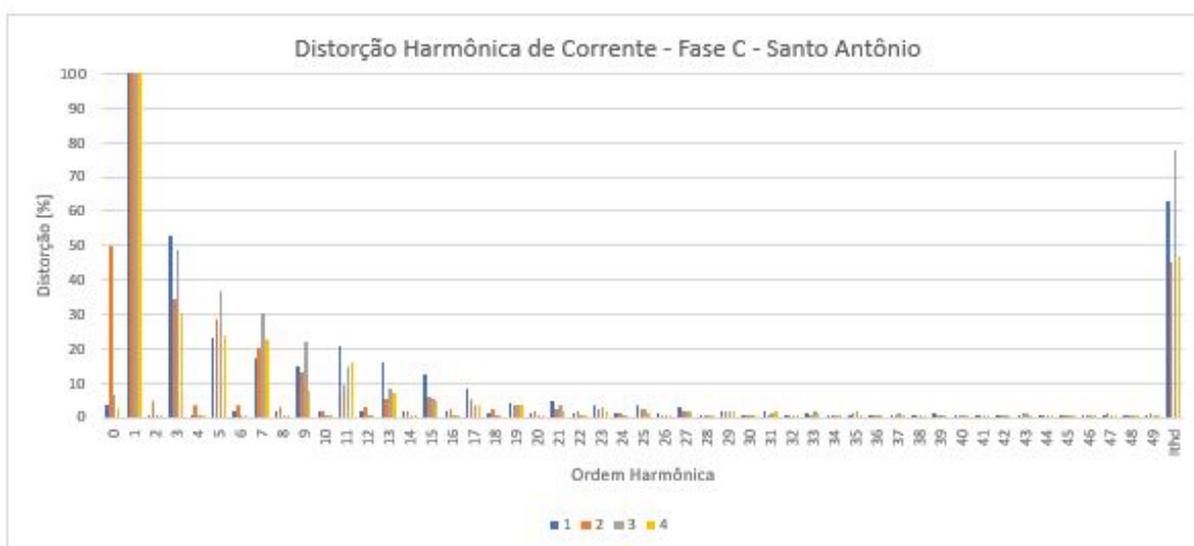


Figura 110 – Harmônicos de Corrente – Fase C – Igreja Matriz de Santo Antônio

Portanto, na Igreja Matriz de Santo Antônio, onde o sistema de iluminação é composto por lâmpadas fluorescentes compactas, não há infrações dos limites para tensão eficaz, a flutuação de tensão permanece dentro do estipulado pela norma na maior parte do tempo, mesmo apresentando alterações em seus níveis durante o acionamento das cargas, não causando impacto significativo no sistema.

O fator de potência é influenciado pelos acionamentos e desligamentos da carga de iluminação. Mas, como esse consumidor não é penalizado por infrações dos limites de fator de potência, essas oscilações não serão um problema para o consumidor.

A influência sobre os níveis harmônicos é ainda mais visível. A entrada do sis-

tema de iluminação, pontos 3 e 4, provoca picos devido ao aumento da utilização das cargas durante as missas, tanto na distorção harmônica de corrente, quanto na de tensão. Apesar dos elevados níveis de corrente harmônica, principalmente nas primeiras ordens harmônicas, os limites de distorção harmônica de tensão não são infringidos, portanto não causando impactos significativos no sistema de distribuição.

### 6.3.2 Igreja Matriz Nossa Senhora da Soledade

A Tabela 43 apresenta os horários de funcionamento da Igreja Matriz Nossa Senhora da Soledade. Além desses horários, há atividades com carga reduzida na igreja durante os dias de semana, principalmente de segunda a quinta. As cargas da Fase C são acionadas durante os eventos da Tabela 43, já na Fase B, ocorrem picos de utilização durante o dia, e também durante as atividades marcadas. Na Fase A, há cargas de menor potência atingindo no máximo 35W, que são acionadas durante a utilização da igreja e cargas ainda menores que são acionadas de madrugada, cerca de 12W, sendo responsáveis pelo monitoramento e segurança do local.

Tabela 43 – Atividades da Igreja Matriz Nossa Senhora da Soledade

Horário de Funcionamento da Igreja Matriz Nossa Senhora da Soledade	
Terça-feira	06:30 as 08:00 19:00 as 21:30
Quarta-feira	06:30 as 08:00 19:00 as 21:30
Quinta-feira	06:30 as 08:00 19:00 as 21:30
Sexta-feira	06:30 as 08:00 19:00 as 21:30
Sábado	11:30 as 13:00 18:30 as 21:00
Domingo	06:30 as 13:00 15:30 as 21:00
Segunda-feira	06:30 as 08:00 19:00 as 21:30

O comportamento da tensão eficaz nas fases A, B e C está disponível na Figura 111, onde também se destacam os limites presentes na imagem, concluindo que não há infração dos limites precários e críticos determinados pelo Módulo 8 do **PRODIST**. Portanto, **DRP** e **DRC** são nulos.

No gráfico de corrente presente na Figura 112, há picos nos momentos de acionamento das cargas. O pico é maior no período noturno, devido a necessidade de utilização de todo o sistema de iluminação e ventilação.

Na Figura 113, é vista a Potência Ativa consumida, que retrata os mesmos picos vistos na corrente, a potência ativa consumida pela Fase A é bem menor que as demais, alimentando apenas iluminação noturna e um pequeno sistema de segurança. Já a Figura 114, apresenta a potência reativa, onde observa-se a natureza capacitiva das cargas nas fases A e B, causada pelo sistema de iluminação. E para a fase C apresenta natureza indutiva durante o acionamento dos ventiladores, deixando sobressair a natureza capacitiva do sistema de iluminação apenas quando os ventiladores estão desligados.

Quanto ao fator de potência, na Fase A, ele oscila abaixo de 0,5. Para a Fase B, a média fica acima de 0,5. Apesar da grande oscilação presente na Face C, ela apresenta muitos picos acima de 0,92, como comprova a Figura 115.

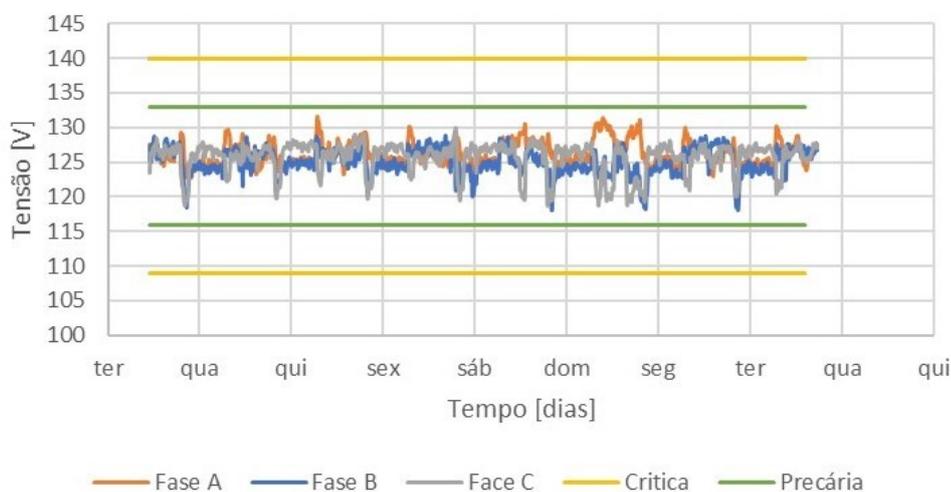


Figura 111 – Tensão Eficaz na Igreja Matriz Nossa Senhora da Soledade

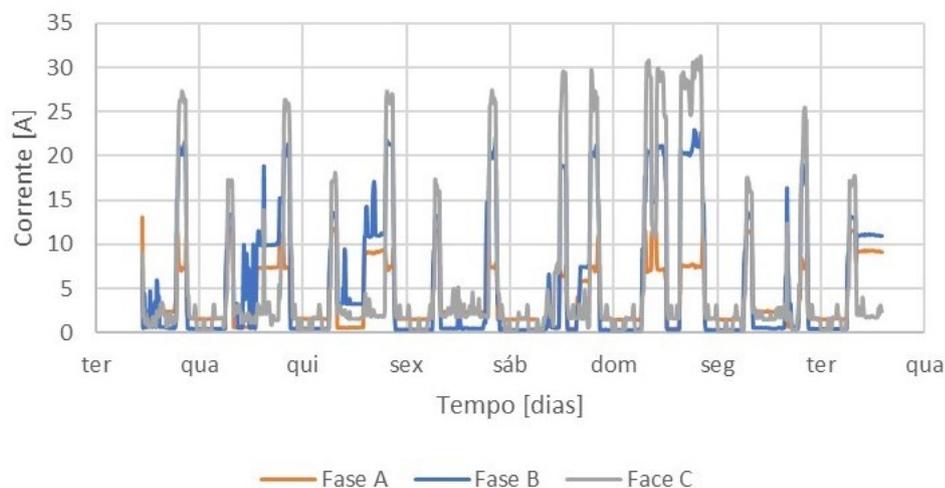


Figura 112 – Corrente na Igreja Matriz Nossa Senhora da Soledade

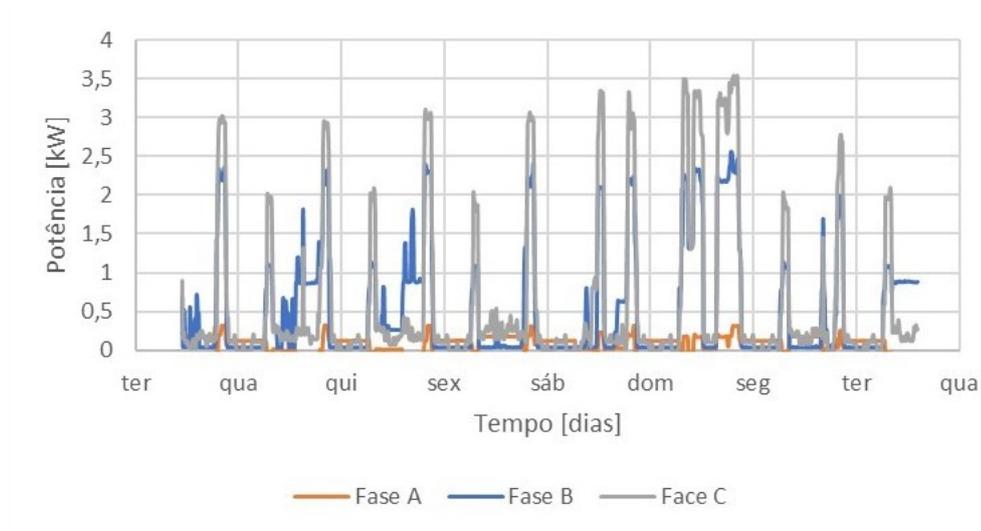


Figura 113 – Potência Ativa na Igreja Matriz Nossa Senhora da Soledade

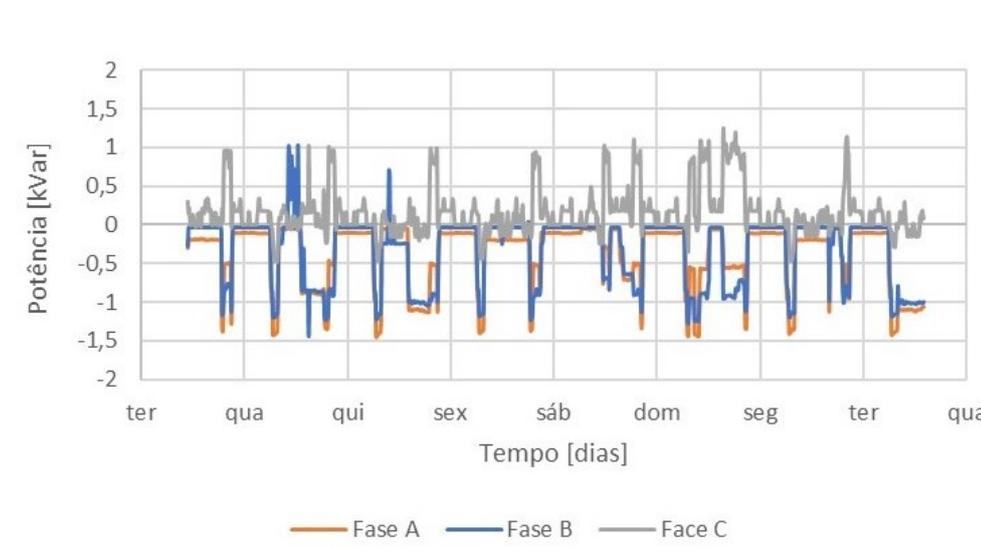


Figura 114 – Potência Reativa na Igreja Matriz Nossa Senhora da Soledade

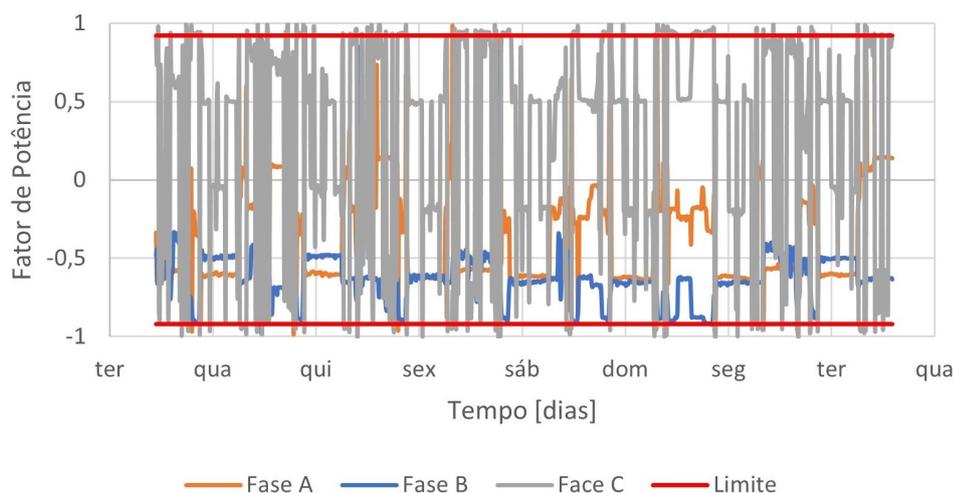


Figura 115 – Fator de potência na Igreja Matriz Nossa Senhora da Soledade

O comportamento do indicador da flutuação de tensão (PST) é apresentado na Figura 116. A Fase B é a mais crítica quanto a flutuação de tensão. Isso é retratado no PST95%, onde a Fase B é a única a infringir o limite de 1 pu, como visto na Tabela 44.

Tabela 44 – PST95% na Igreja Matriz Nossa Senhora da Soledade

PST		
A	B	C
0,929	<b>1,239</b>	0,819

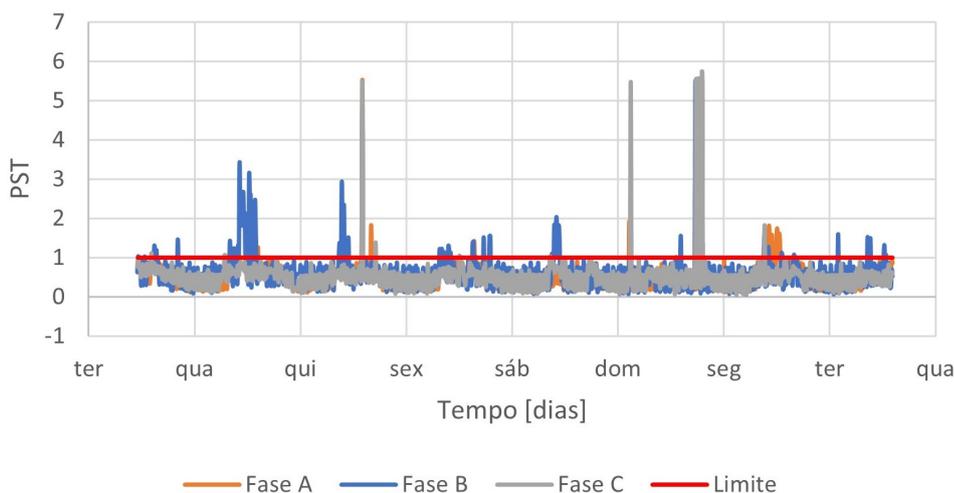


Figura 116 – Flutuação de Tensão na Igreja Matriz Nossa Senhora da Soledade

A frequência é apresentada na Figura 117, onde observa-se que não há infração aos limites, em vermelho, com menos oscilação do que o sistema da Igreja Matriz de Santo

Antônio.

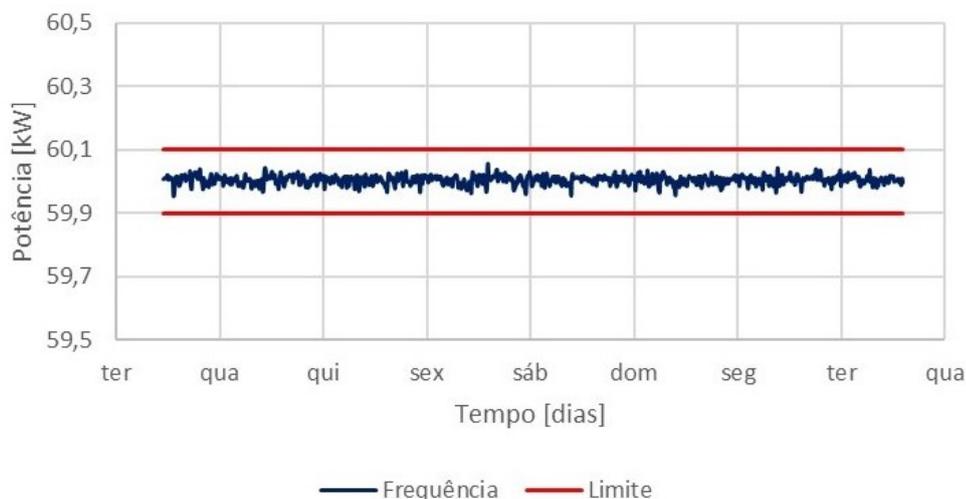


Figura 117 – Frequência na Igreja Matriz Nossa Senhora da Soledade

A tensão e corrente no neutro apresentadas na Figura 118, indicam que há um desequilíbrio no sistema. Nota-se que houve um problema técnico com a bobina de corrente do neutro, mas a falha não altera a análise realizada, pois o comportamento da tensão e corrente na fase em questão é consistente durante toda a semana. E o gráfico na Figura 119, que apresenta o percentil 5%, 95%, 99% comprova esse resultado, baseada nas leituras das Fases A, B e C, que não apresentaram problemas. Observa-se que os limites são ultrapassados, isto é,  $FD_{95\%}$  é maior que 3%. Mas, como já citado, o comportamento do desequilíbrio de tensão é constante durante toda a semana, portando não sendo uma influência do sistema de iluminação, e sim, uma característica do sistema de distribuição neste ponto.

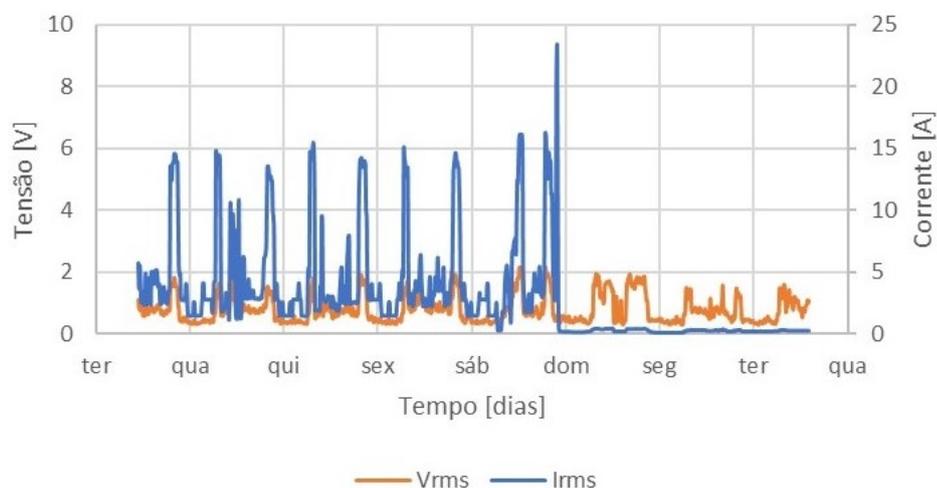


Figura 118 – Tensão e Corrente de Neutro na Igreja Matriz Nossa Senhora da Soledade

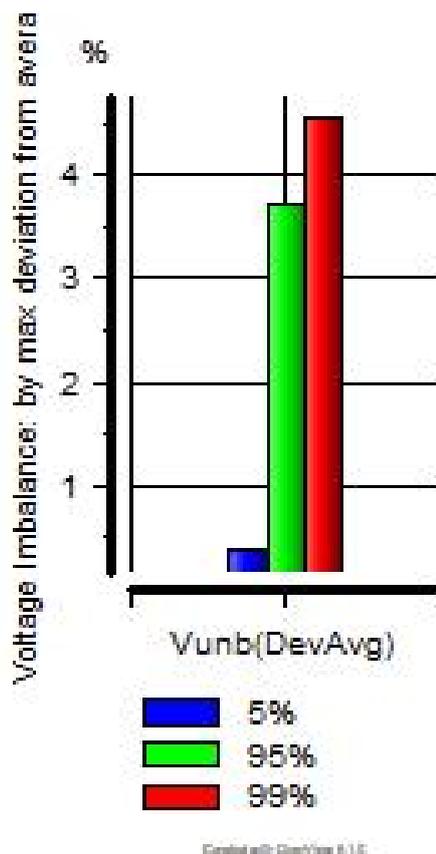


Figura 119 – Percentis 5%, 95% e 99% do desequilíbrio de tensão na Igreja Matriz Nossa Senhora da Soledade

As distorções harmônicas totais de tensão e corrente são apresentadas nas Figuras 120 e 121, respectivamente. As Figuras 122 e 123 apresentam os percentis 5%, 95% e 99% das distorções harmônicas totais de tensão e corrente, na devida ordem. Mesmo com elevadas distorções harmônicas nas correntes nas três fases, as tensões permanecem com distorções abaixo de 6% praticamente o tempo todo. E segundo o **PRODIST**, o percentil 95% não deve ultrapassar 10% para sistemas com nível de tensão menor que 1kV. Portanto, o **Vdht** não ultrapassa os limites da norma. Já o percentil 95% do **Idht**, apesar de não ser regulamentado, atinge níveis elevados, principalmente na Fase C. Durante a semana, a distorção harmônica de corrente para a Fase A varia até 200%, da Fase B até 100%. Já na Fase C, os níveis de distorção harmônica de corrente sofrem picos que atingem até 600%.

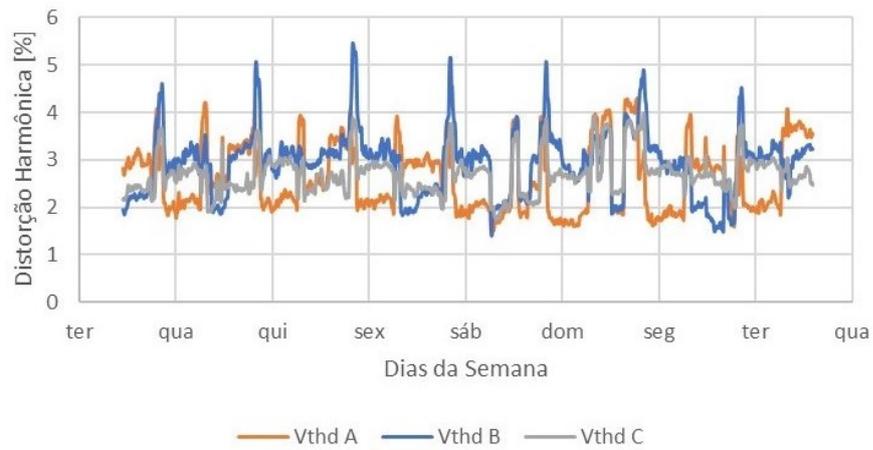


Figura 120 – Distorção Harmônica Total de Tensão na Igreja Matriz Nossa Senhora da Soledade

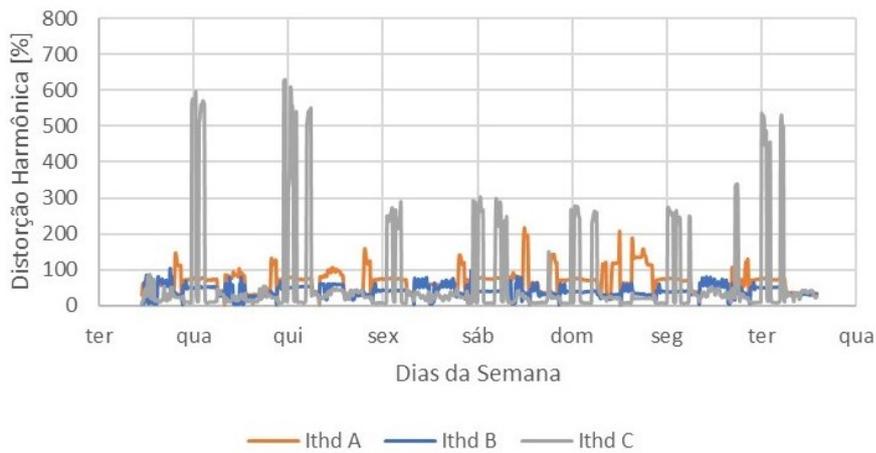


Figura 121 – Distorção Harmônica Total de Corrente na Igreja Matriz Nossa Senhora da Soledade

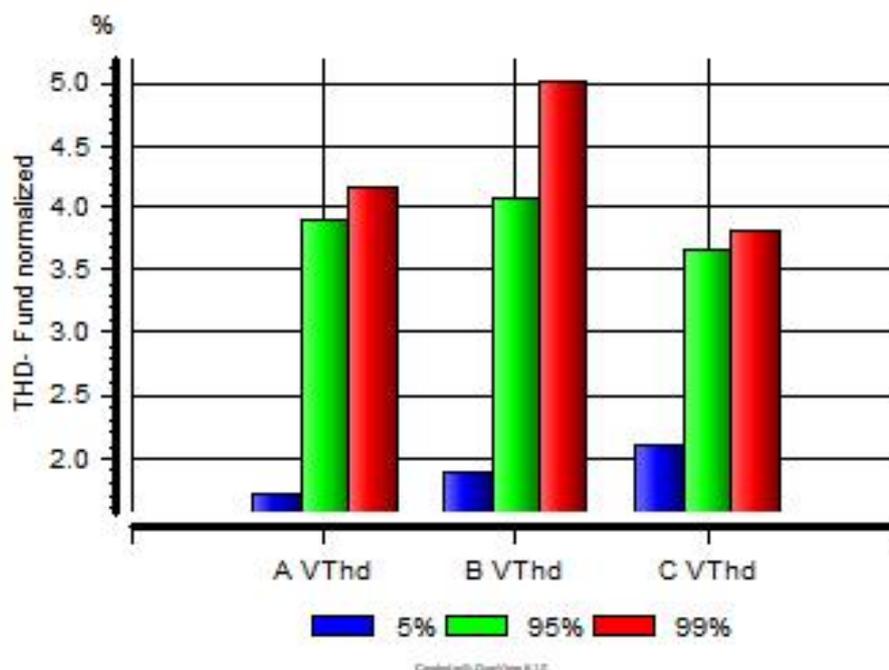


Figura 122 – Percentis da Distorção Harmônica Total de Tensão na Igreja Matriz Nossa Senhora da Soledade

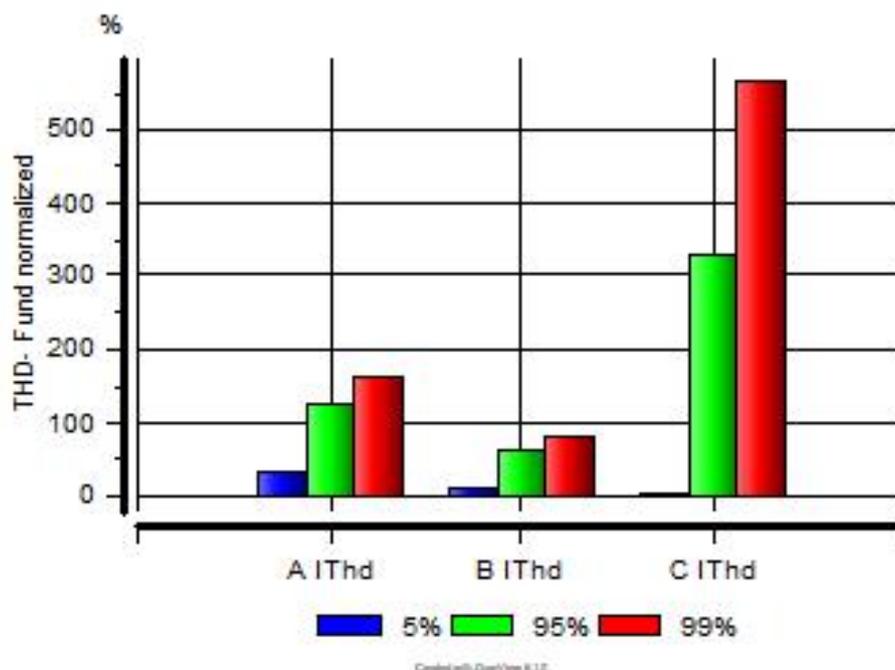


Figura 123 – Percentis da Distorção Harmônica Total de Corrente na Igreja Matriz Nossa Senhora da Soledade

Para analisar o comportamento das ordens harmônicas na distorção de tensão e corrente, foram escolhidos 4 pontos relevantes no gráfico de potência ativa da Igreja Matriz

Nossa Senhora da Soledade, pois são pontos que retratam diferentes momentos das cargas no sistema. Para cada fase, foram analisadas as ordens harmônicas de tensão e corrente nos pontos que estão marcados na Figura 124.

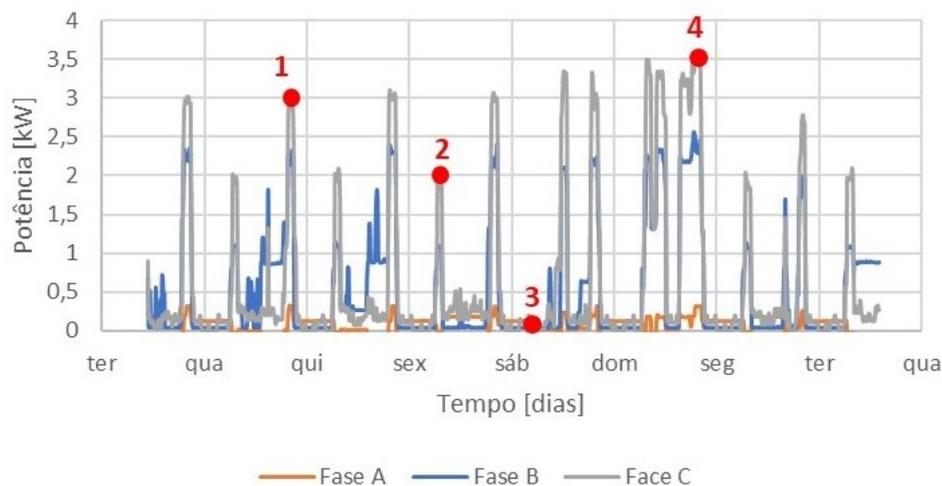


Figura 124 – Pontos de análise das ordens harmônicas na Igreja Matriz Nossa Senhora da Soledade

As Figuras 125 e 126 apresentam a composição harmônica da Fase A, as Figuras 127 e 128 apresentam a composição harmônica da Fase B e as Figuras 129 e 130 da Fase C. Observa-se que não há infração dos níveis de distorção harmônica de tensão para nenhuma das Fases, em nenhum dos pontos críticos do sistema, com a média ficando abaixo de 3%.

A distorção de corrente fica abaixo de 100%, apesar de superar os limites da IEC para a Classe C. Essa norma é utilizada apenas como referência nesse caso, pois ela determina limites para emissão individual de um aparelho. Na Fase A, o harmônico do Ponto 4 se destaca, por seu nível na 3ª harmônica e no  $I_{dht}$ . Para a Fase B, destaca-se a uniformidade dos níveis harmônicos nas primeiras ordens harmônicas, a diferença no  $I_{dht}$  do Ponto 1 é devida a presença de distorção nas ordens harmônicas mais altas. Já a Fase C é caracterizada pelo baixo nível harmônico durante a operação de carga. A discrepância acontece quando o sistema está a vazio (Ponto 3), principalmente na componente contínua, o que gera os picos de 600% de distorção apresentado previamente nesta seção.

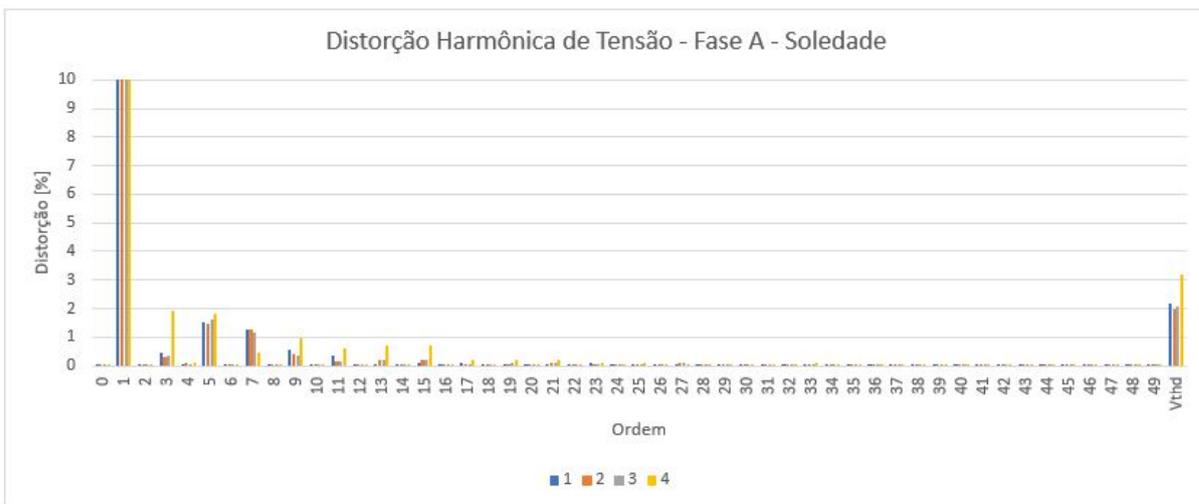


Figura 125 – Harmônicos de Tensão – Fase A – Igreja Matriz Nossa Senhora da Soledade

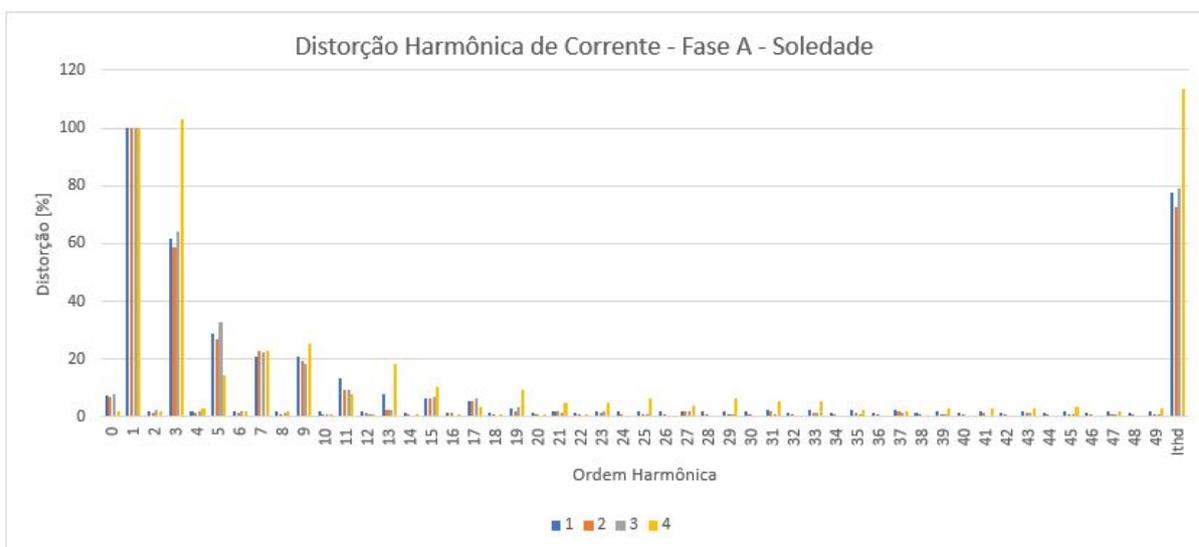


Figura 126 – Harmônicos de Corrente – Fase A – Igreja Matriz Nossa Senhora da Soledade

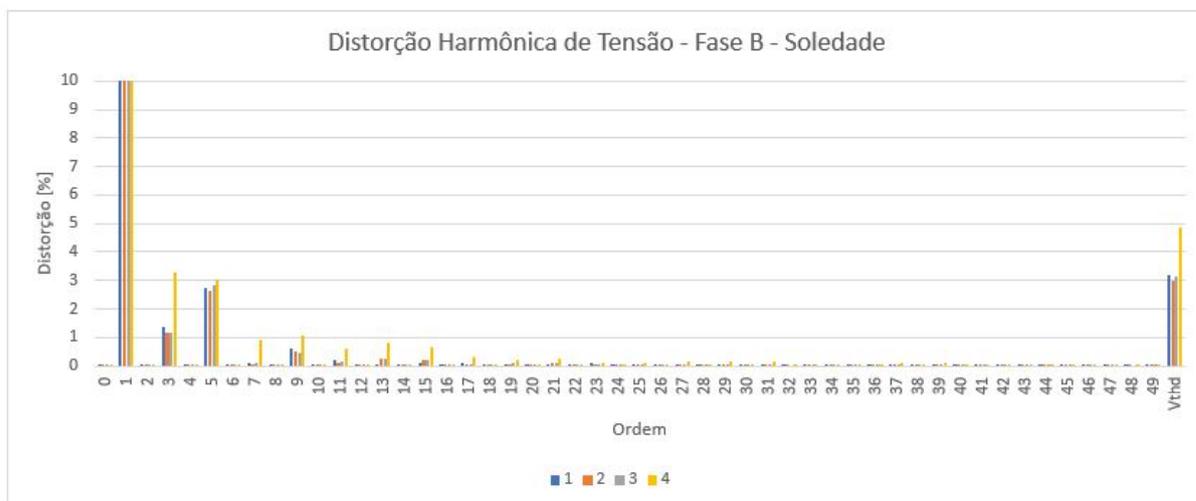


Figura 127 – Harmônicos de Tensão – Fase B – Igreja Matriz Nossa Senhora da Soledade

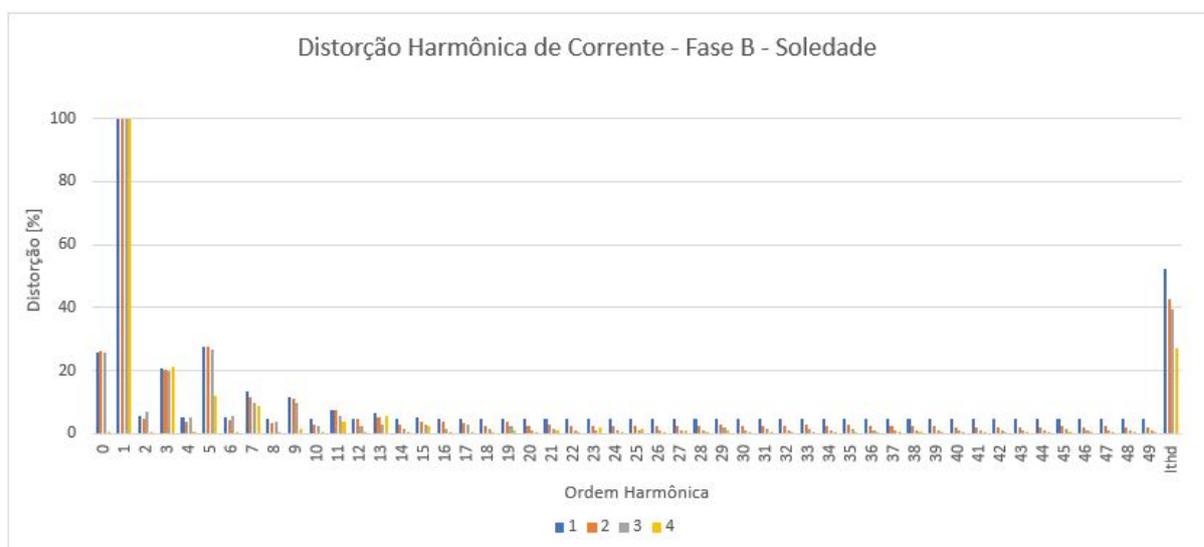


Figura 128 – Harmônicos de Corrente – Fase B – Igreja Matriz Nossa Senhora da Soledade

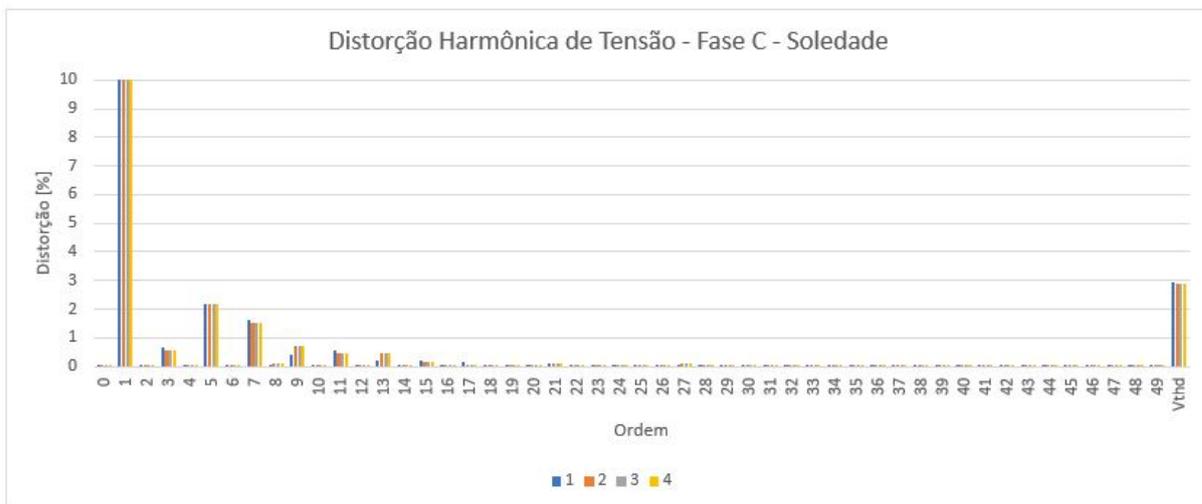


Figura 129 – Harmônicos de Tensão – Fase C – Igreja Matriz Nossa Senhora da Soledade

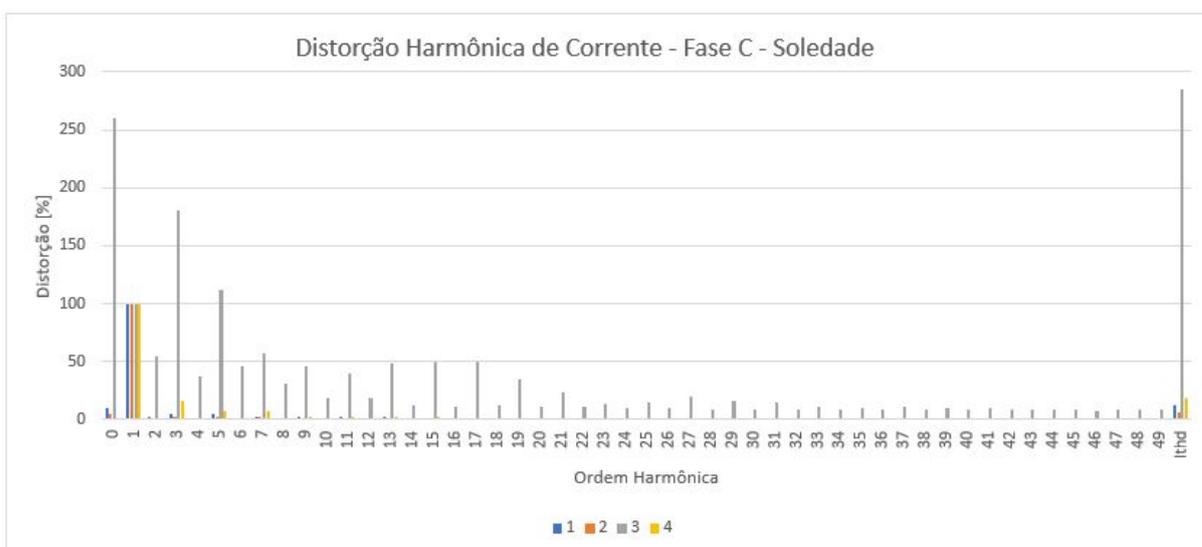


Figura 130 – Harmônicos de Corrente – Fase C – Igreja Matriz Nossa Senhora da Soledade

Portando, na Igreja Matriz Nossa Senhora da Soledade, onde o sistema de iluminação é composto por lâmpadas LED tipo Vela e refletores LED, não há infrações dos limites para tensão eficaz. A flutuação de tensão permanece dentro do estipulado para as fases A e C e sofre infração na Fase B, efeito causado pela operação de carga na unidade consumidora, portanto sendo influenciado pelo sistema de iluminação.

Os níveis harmônicos de corrente ficam muito abaixo de 50%, na maior parte do tempo, o que mantém a distorção de tensão abaixo de 3%, os limites de distorção harmônica de tensão não são infringidos, portanto não causando impactos significativos no sistema de distribuição. Mesmo assim, é possível perceber a influência do acionamento das cargas nos níveis de distorção harmônica de tensão. Durante o qual os valores são

elevados em aproximadamente 2%, o que é uma possível fonte de problemas em sistemas com mais concentração de potência advinda de cargas **LED**.

### 6.3.3 Igreja Matriz de São Benedito

A Tabela 45 apresenta os horários de funcionamento da Igreja Matriz de São Benedito. Além desses horários, há uma atividade constante conectada a Fase A, responsável pelo sistema de segurança, iluminação noturna e sino.

Tabela 45 – Atividades Igreja Matriz de São Benedito

Horário de Funcionamento Igreja Matriz de São Benedito	
Terça-feira	06:00 as 08:00
Quarta-feira	18:00 as 20:30
Quinta-feira	06:00 as 08:30 15:00 as 20:30
Sexta-feira	18:00 as 21:30
Sábado	08:00 as 12:00 17:00 as 21:00
Domingo	06:30 as 10:00 17:00 as 21:00
Segunda-feira	18:00 as 20:30

O nível de tensão eficaz nas fases A, B e C está disponível na Figura 131, onde também se destacam os limites presentes na imagem, concluindo que não há infração dos limites precários e críticos determinados pelo Módulo 8 do **PRODIST**. Portanto, **DRP** e **DRC** são nulos.

No gráfico de corrente presente na Figura 132, há picos nos momentos de acionamento das cargas. O pico é maior no período noturno, devido a necessidade de utilização de todo o sistema de iluminação e ventilação.

Na Figura 133, é vista a Potência Ativa consumida, que retrata os mesmos picos vistos na corrente. A potência ativa consumida pela Fase A é bem menor que as demais, alimentando apenas iluminação noturna e um pequeno sistema de segurança. A Figura 134 apresenta a potência reativa, onde observa-se a natureza capacitiva das cargas nas fases A e B, causada pelo sistema de iluminação. E para a fase C apresenta natureza indutiva durante o acionamento dos ventiladores, deixando sobressair a natureza capacitiva do sistema de iluminação apenas quando os ventiladores estão desligados.

Quanto ao fator de potência, na Fase A, ele oscila abaixo de 0,5. Para a Fase B, a média fica acima de 0,5. Apesar da grande oscilação presentes na Face C, ela apresenta muitos picos acima de 0,92, como comprova a Figura 135.

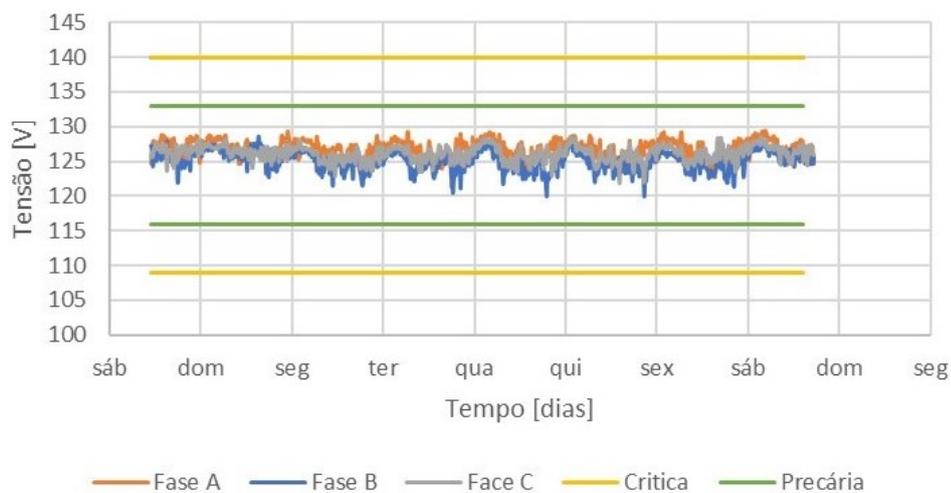


Figura 131 – Tensão Eficaz Igreja Matriz de São Benedito

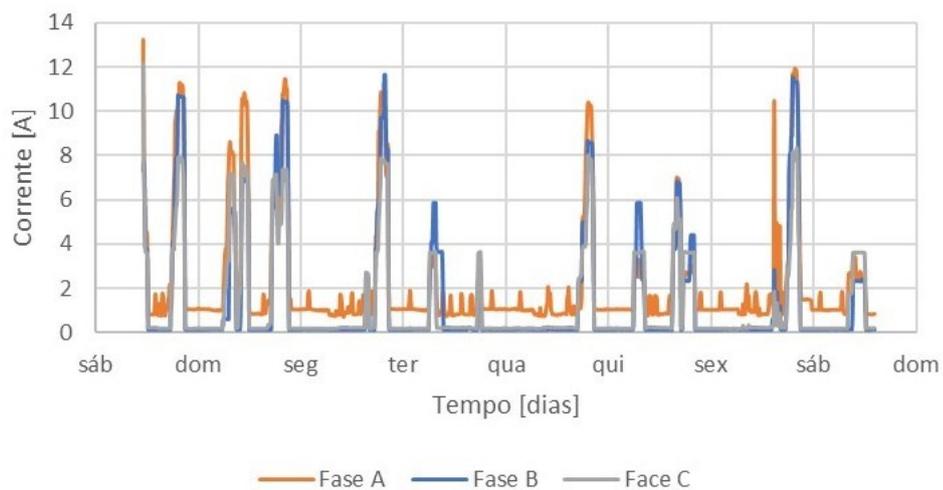


Figura 132 – Corrente Igreja Matriz de São Benedito

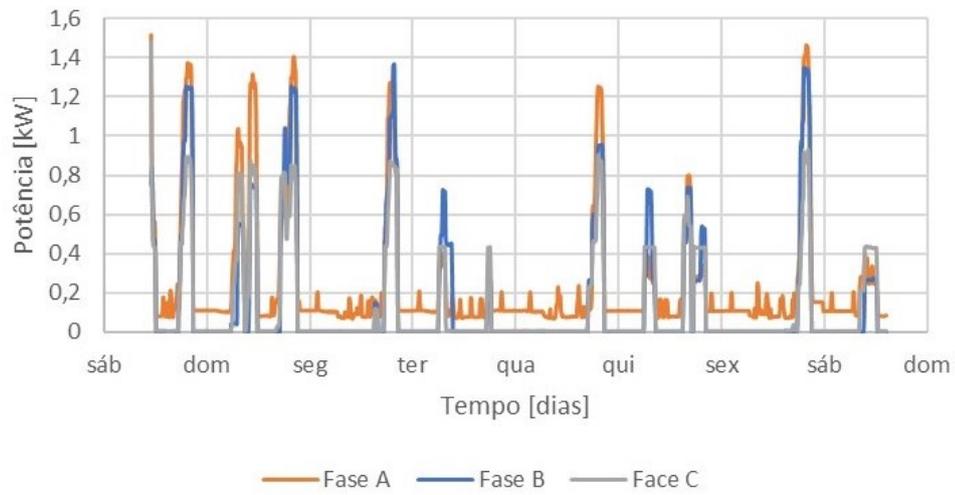


Figura 133 – Potência Ativa Igreja Matriz de São Benedito

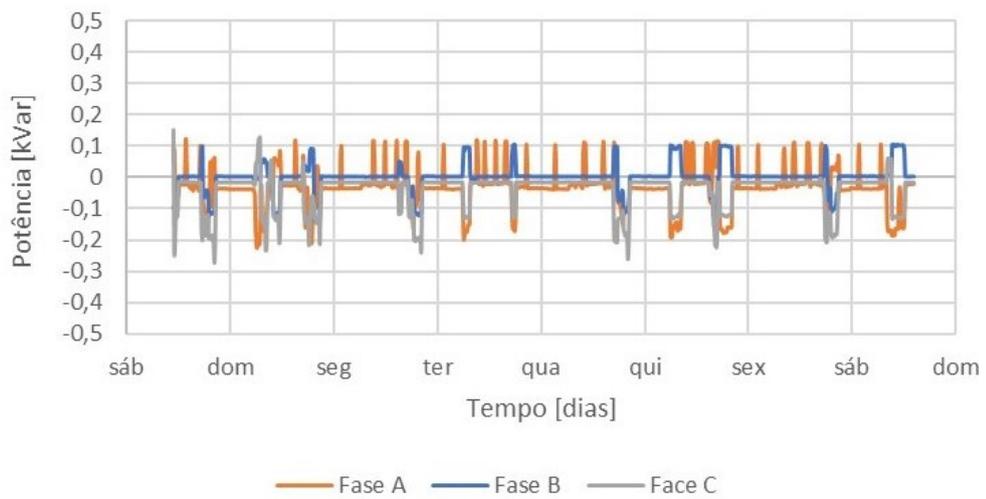


Figura 134 – Potência Reativa Igreja Matriz de São Benedito

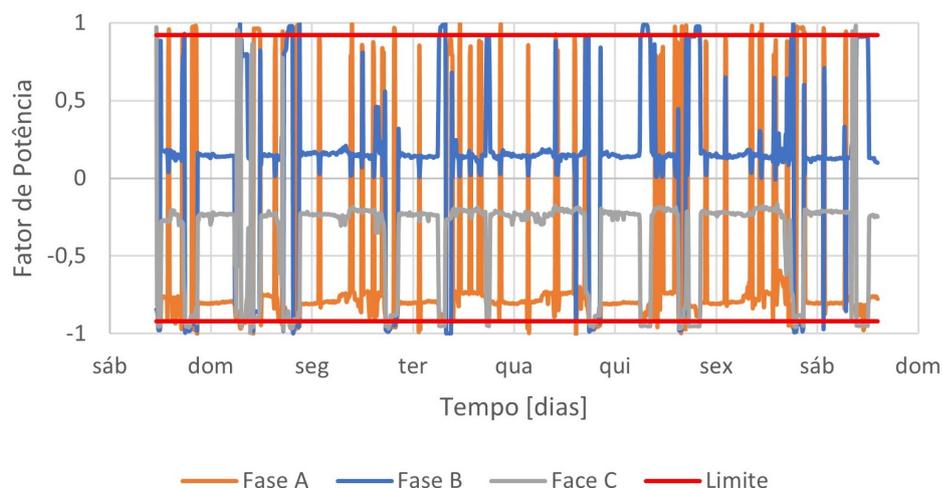


Figura 135 – Fator de potência Igreja Matriz de São Benedito

O comportamento do indicador **PST** é apresentado na Figura 136. Observa-se que a maioria das medidas fica abaixo do limite. Isso é retratado no PST95%, onde nenhuma fase violou o limite de 1 pu, como visto na Tabela 46.

Tabela 46 – PST95% Igreja Matriz de São Benedito

PST		
A	B	C
0,578	0,552	0,739

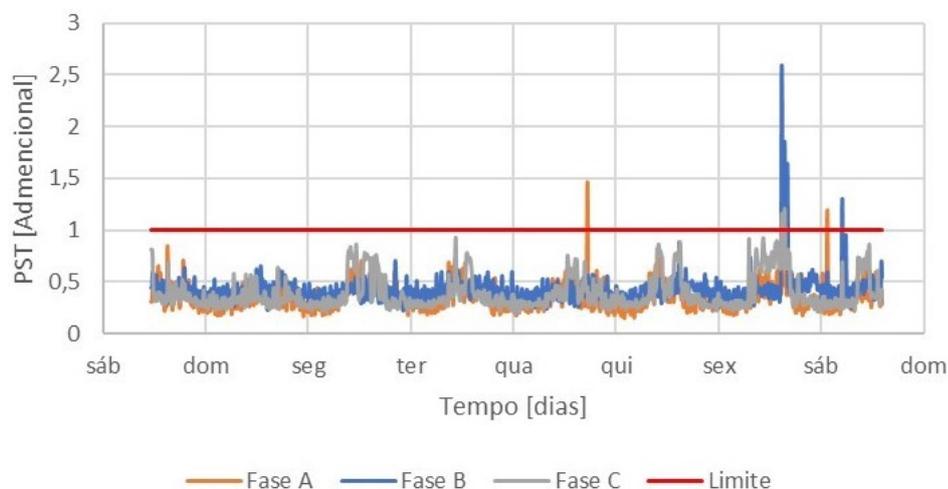


Figura 136 – Flutuação de Tensão Igreja Matriz de São Benedito

A frequência é apresentada na Figura 137, onde observa-se que não há infração aos limites, em vermelho.

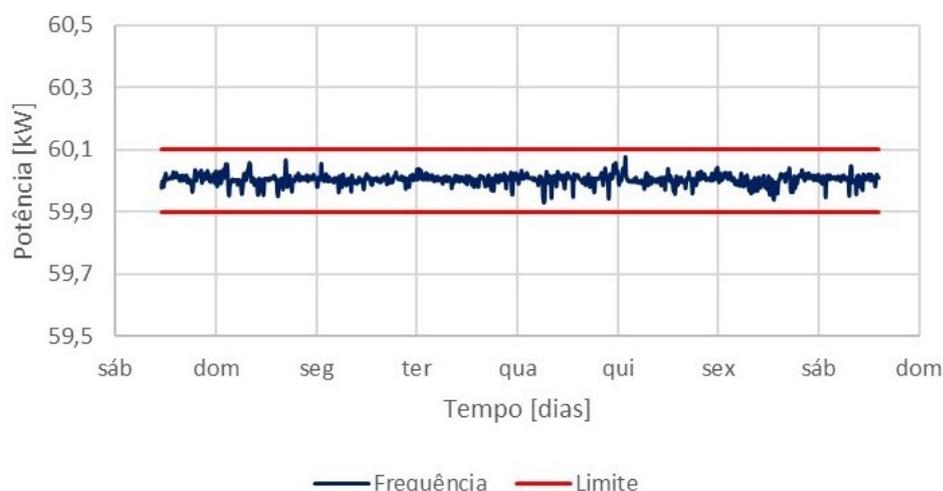


Figura 137 – Frequência Igreja Matriz de São Benedito

A tensão e corrente no neutro apresentadas na Figura 138, indicam que há um desequilíbrio no sistema, mas que ele é menor que o das últimas duas unidades consumidoras apresentadas. O gráfico na Figura 139, que apresentam os percentis 5%, 95% e 99%, comprova esse resultado, com percentil 95% igual a 2%, que não infringe o limite estabelecido pelo PRODIST.

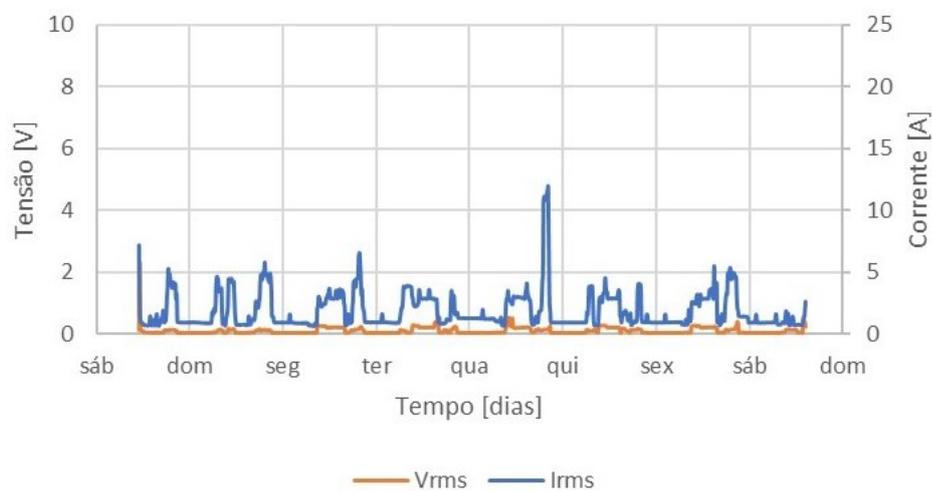


Figura 138 – Tensão e Corrente de Neutro Igreja Matriz de São Benedito

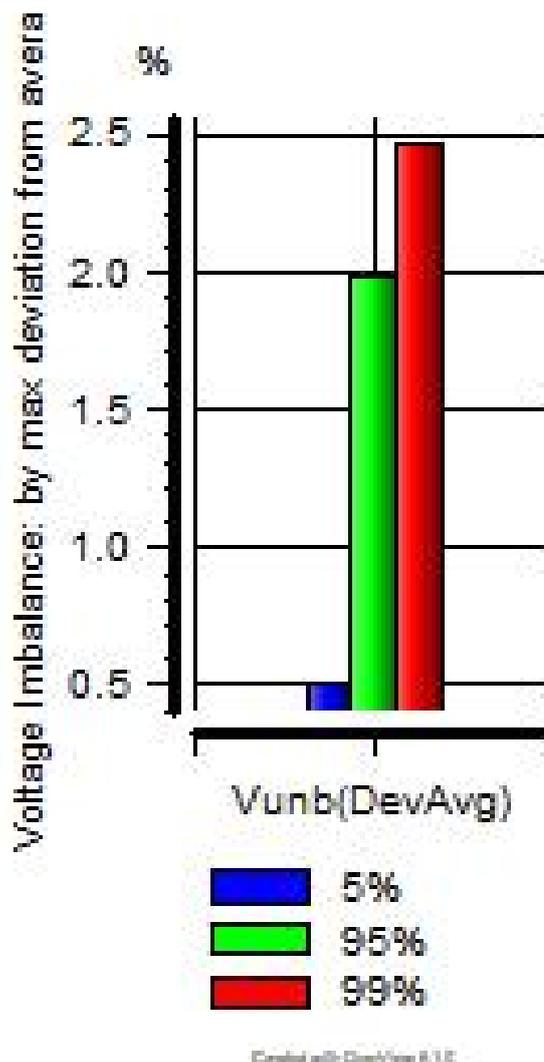


Figura 139 – Percentis 5%, 95% e 99% do desequilíbrio de tensão Igreja Matriz de São Benedito

As distorções harmônicas totais de tensão e corrente são apresentadas nas Figuras 140 e 141, respectivamente. Mesmo com elevadas distorções harmônicas nas correntes nas três fases, as tensões permanecem com distorções abaixo de 4% praticamente o tempo todo. As Figuras 142 e 143 apresentam os percentis 5%, 95% e 99% das distorções harmônicas totais de tensão e corrente, na devida ordem. Segundo o **PRODIST**, o percentil 95% não deve ultrapassar 10% para sistemas com nível de tensão menor que 1kV, portanto, o **Vdht** não ultrapassa os limites da norma. Já o percentil 95% do **Idht**, apesar de não ser regulamentado, atinge níveis elevados na Fase B, que tem uma média de **Idht** durante a semana em torno de 400%, essa é a fase que aciona principalmente o sistema de iluminação. Porém, essa elevação é ocasionada pela ausência de carga conectadas ao sistema, o que faz a corrente ser baixa e o percentual da distorção harmônica de corrente se eleve.

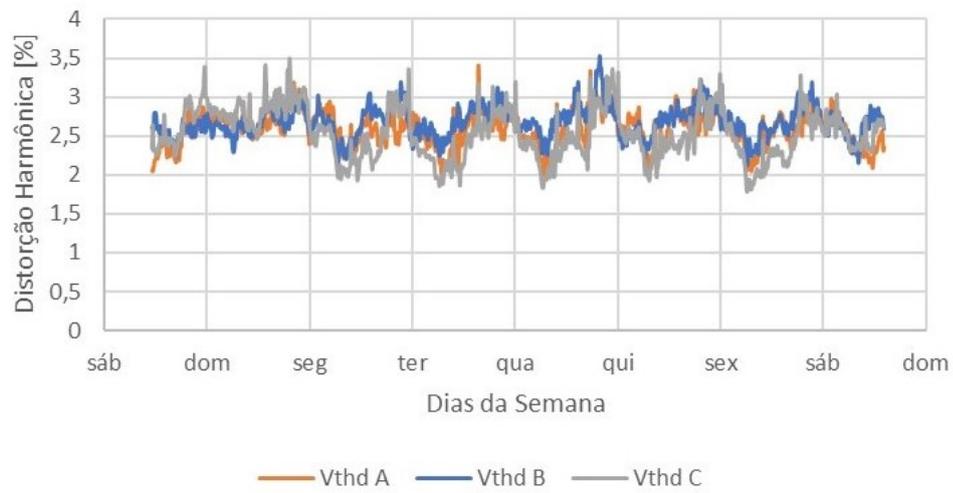


Figura 140 – Distorção Harmônica Total de Tensão na Igreja Matriz de São Benedito

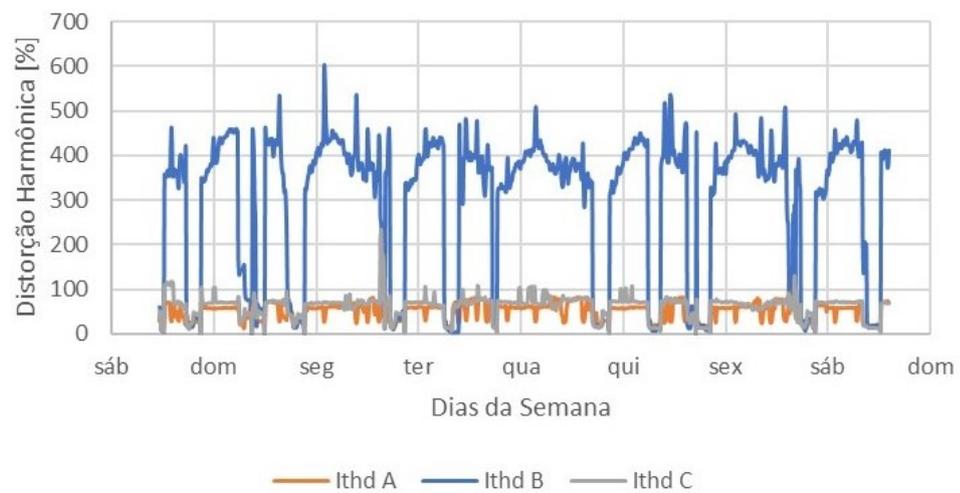


Figura 141 – Distorção Harmônica Total de Corrente na Igreja Matriz de São Benedito

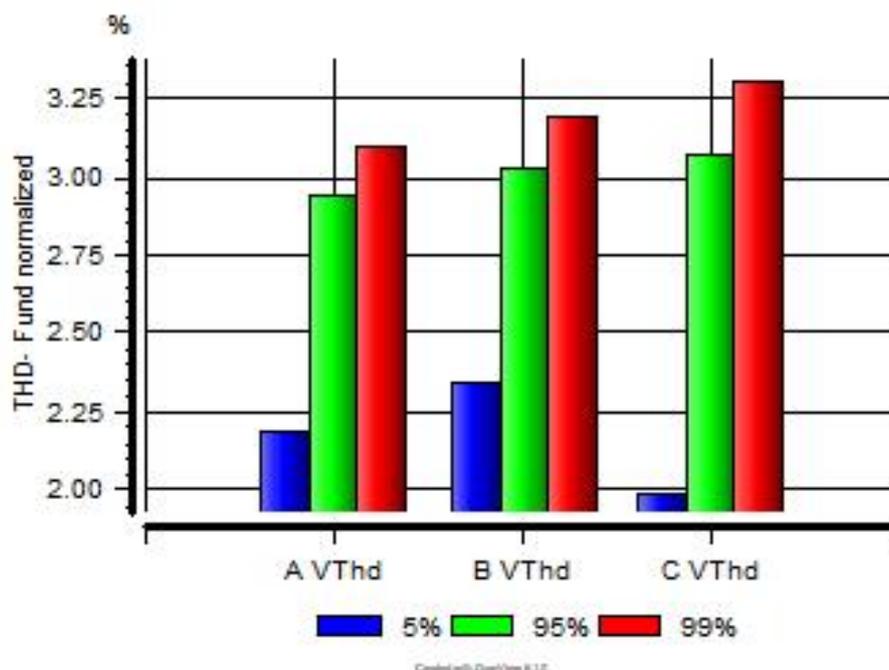


Figura 142 – Percentis da Distorção Harmônica Total de Tensão Igreja Matriz de São Benedito

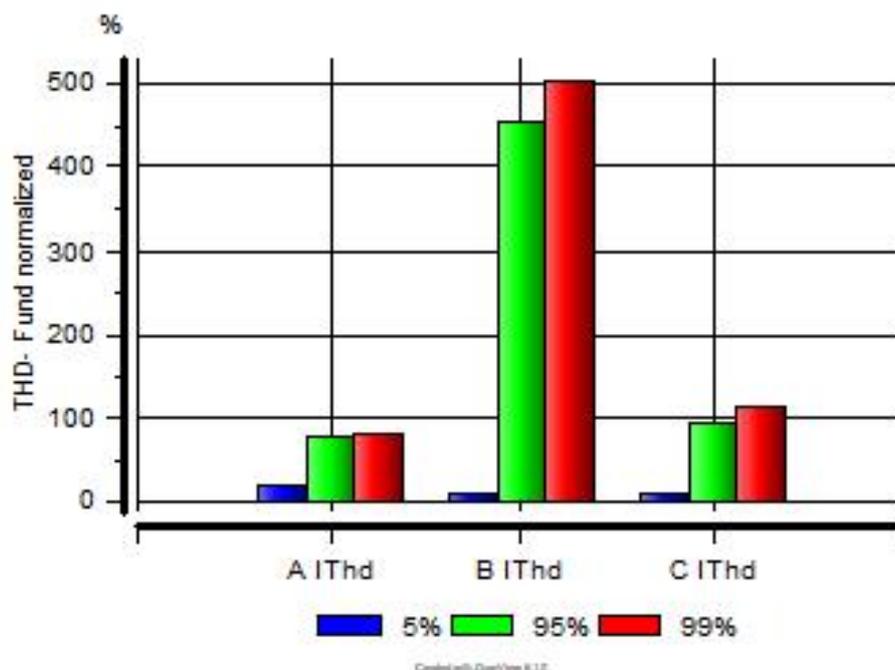


Figura 143 – Percentis da Distorção Harmônica Total de Corrente Igreja Matriz de São Benedito

Para analisar o comportamento das ordens harmônicas na distorção de tensão e corrente, foram escolhidos 4 pontos relevantes no gráfico de potência ativa da Igreja Matriz

de São Benedito. Pontos estes que se destacam por representarem as principais ocorrência da semana. Para cada fase, foram analisadas as ordens harmônicas de tensão e corrente nos pontos estão marcados na Figura 144.

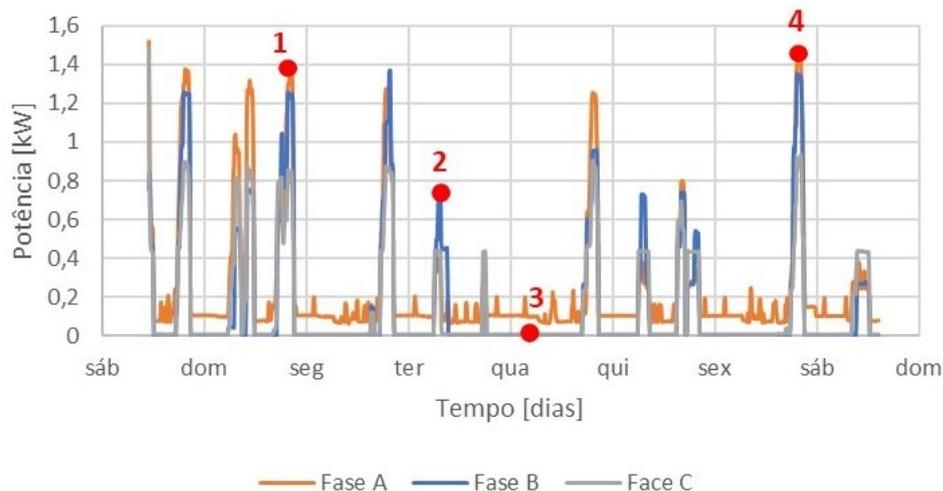


Figura 144 – Pontos de análise das ordens harmônicas Igreja Matriz de Igreja Matriz de São Benedito

As Figuras 145 e 146 apresentam a composição harmônica da Fase A, as Figuras 147 e 148 apresentam a composição harmônica da Fase B e as Figuras 149 e 150 da Fase C. Observa-se que não há infração dos níveis de distorção harmônica de tensão para nenhuma das Fases, em nenhum dos pontos críticos do sistema, com a média ficando abaixo de 2%.

A distorção de corrente não é muito elevada, ficando abaixo de 30%. Para todas as fases o destaque é o Ponto 3, onde a ausência de carga no sistema provoca um aumento da distorção harmônica de corrente no sistema, incluindo a componente contínua. Principalmente na Fase B, que atinge mais de 250% na terceira ordem harmônica.

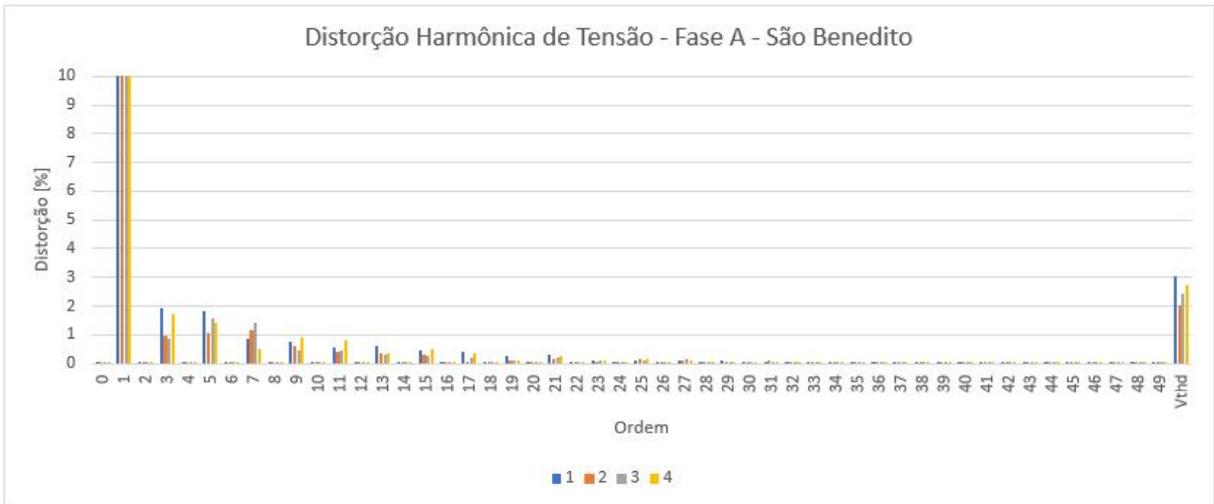


Figura 145 – Harmônicos de Tensão – Fase A – Igreja Matriz de São Benedito

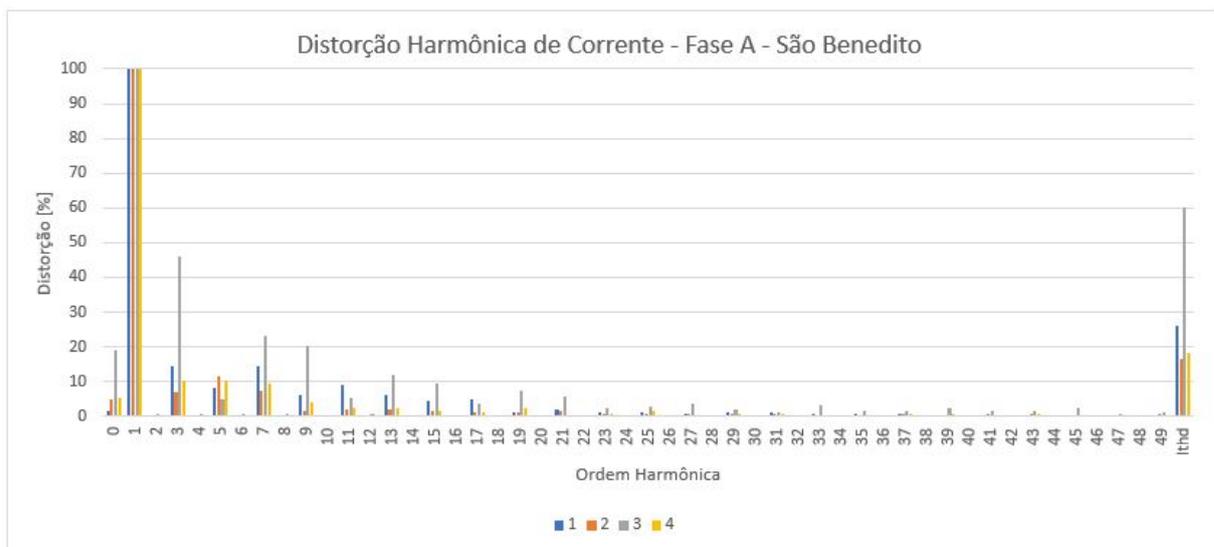


Figura 146 – Harmônicos de Corrente – Fase A – Igreja Matriz de São Benedito

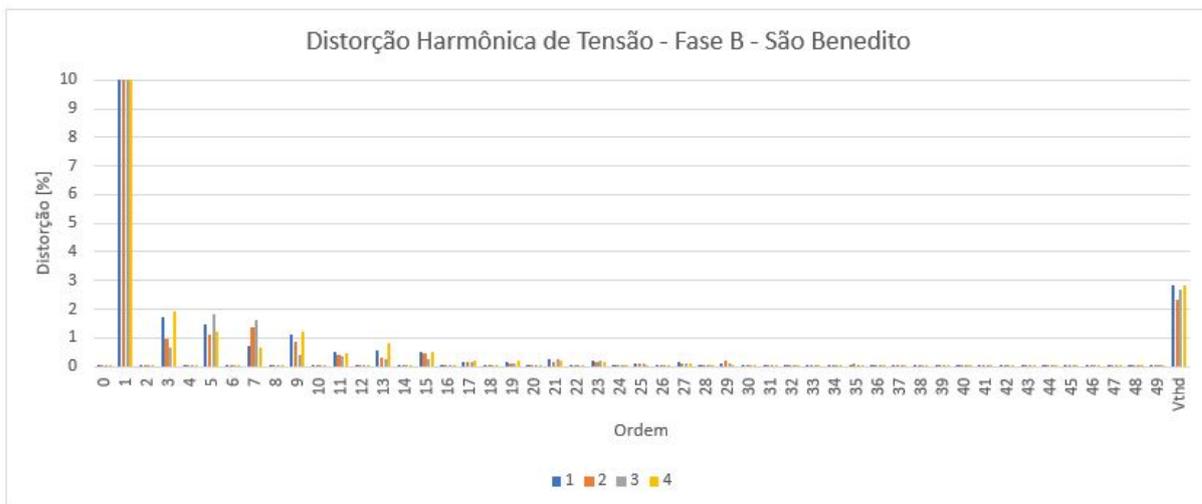


Figura 147 – Harmônicos de Tensão – Fase B – Igreja Matriz de São Benedito

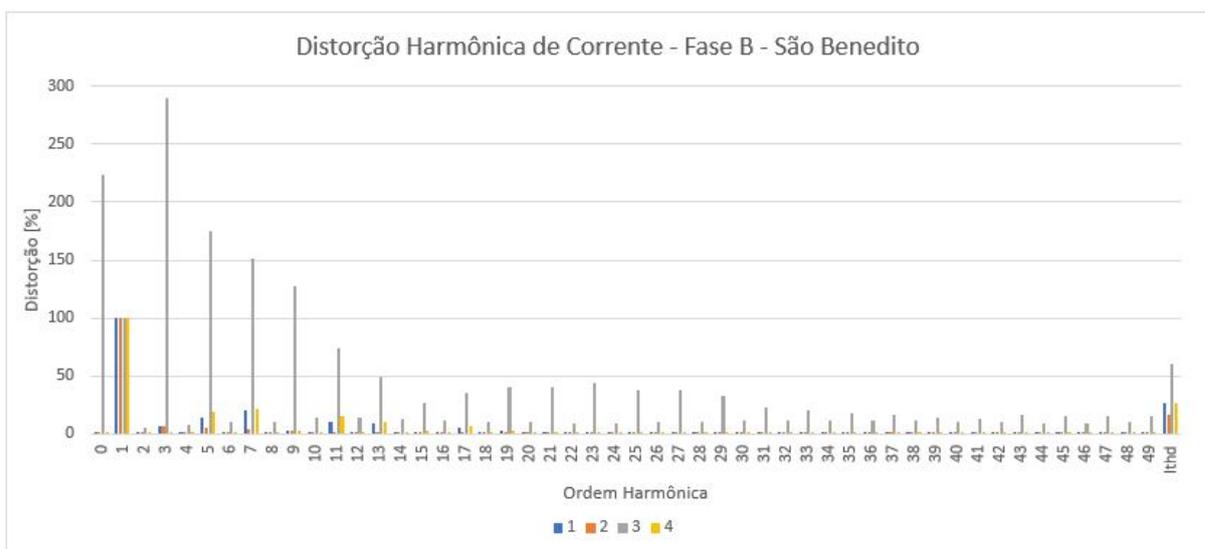


Figura 148 – Harmônicos de Corrente – Fase B – Igreja Matriz de São Benedito

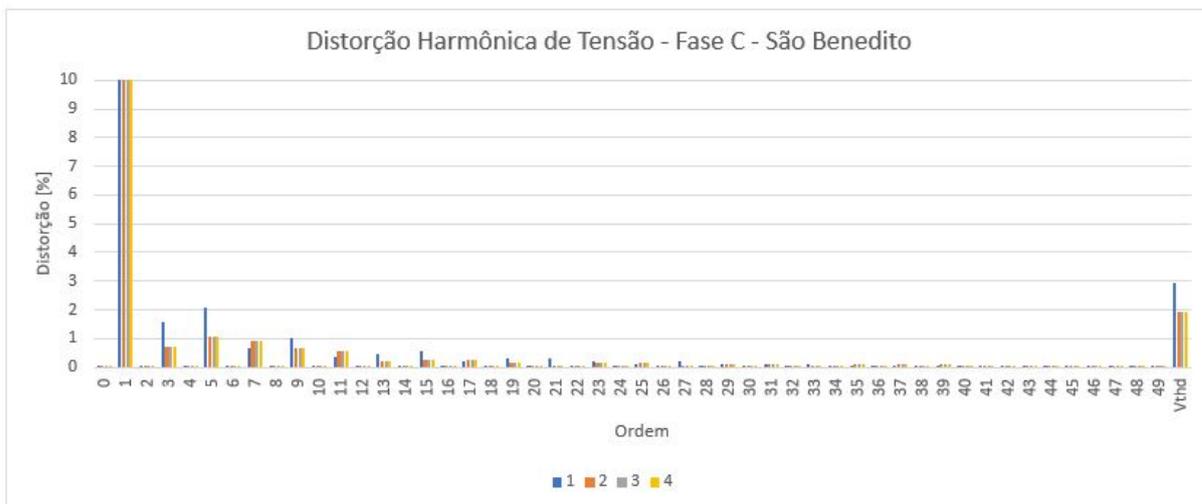


Figura 149 – Harmônicos de Tensão – Fase C – Igreja Matriz de São Benedito

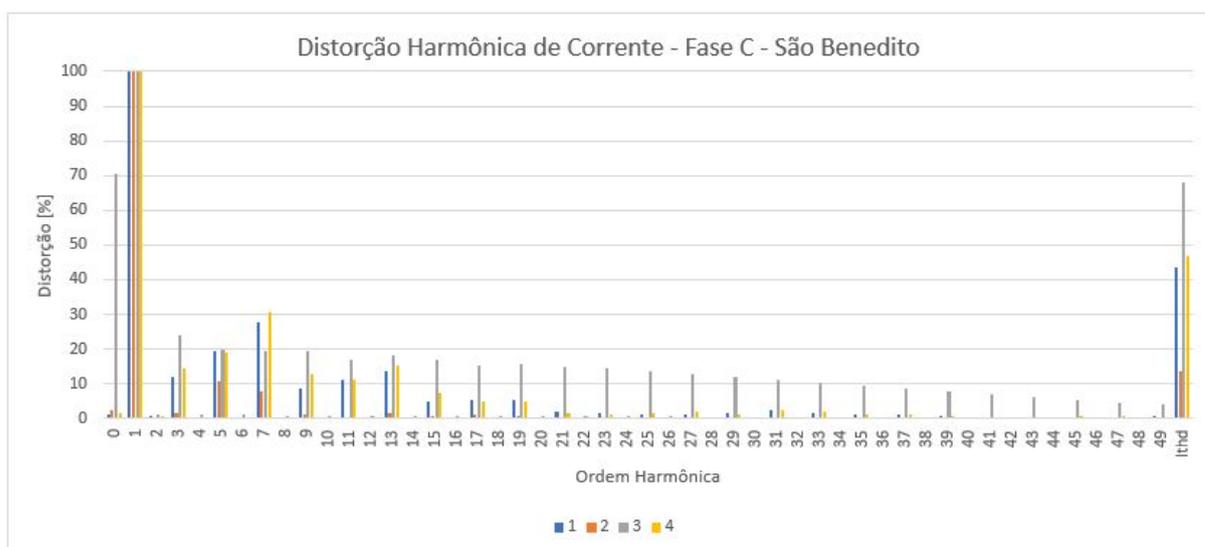


Figura 150 – Harmônicos de Corrente – Fase C – Igreja Matriz de São Benedito

Portanto, na Igreja Matriz de São Benedito, onde o sistema de iluminação é composto por lâmpadas LED tipo Bulbo, não há infrações dos limites para tensão eficaz. A flutuação de tensão permanece dentro do estipulado para as fases A e C e sofre infração na Fase B.

Os níveis harmônicos de corrente ficam muito abaixo de 50%, na maior parte do tempo, o que mantém a distorção de tensão abaixo de 3%, os limites de distorção harmônica de tensão não são infringidos, portanto não causando impactos significativos no sistema de distribuição.

### 6.3.4 Santuário Nossa Senhora da Agonia

A Tabela 47 apresenta os horários de funcionamento do Santuário Nossa Senhora da Agonia. Além desses horários, a iluminação da cúpula fica ligada do final das atividades noturnas até 1h30.

Tabela 47 – Atividades Santuário Nossa Senhora da Agonia

Horário de Funcionamento Santuário Nossa Senhora da Agonia	
Terça-feira	19:00 as 21:30
Quarta-feira	19:00 as 21:30
Quinta-feira	19:00 as 21:30
Sexta-feira	19:00 as 21:30
Sábado	19:00 as 21:30
Domingo	19:00 as 21:30
Segunda-feira	20:00 as 22:00

O nível de tensão eficaz nas fases A, B e C está disponível na Figura 151, onde também se destacam os limites presentes na imagem, não há infração dos limites precários e críticos determinados pelo Módulo 8 do PRODIST. Portanto, DRP e DRC são nulos. No gráfico de corrente presente na Figura 152, há picos nos momentos de acionamento das cargas.

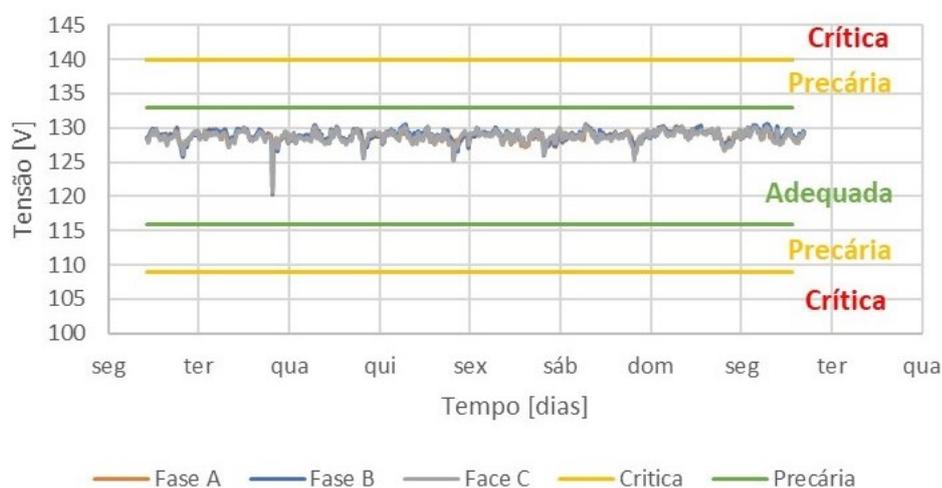


Figura 151 – Tensão Eficaz Santuário Nossa Senhora da Agonia

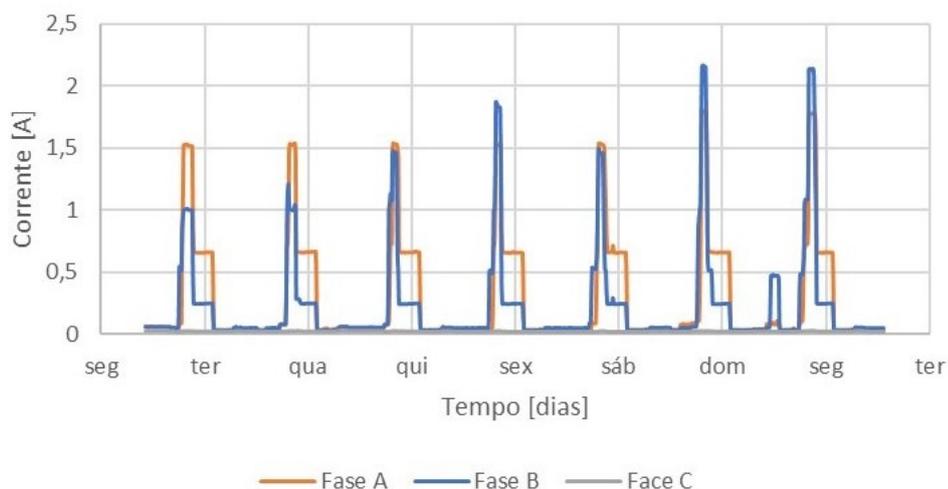


Figura 152 – Corrente Santuário Nossa Senhora da Agonia

Na Figura 153, é vista a Potência Ativa consumida, que retrata os mesmos picos vistos na corrente. Observa-se que, praticamente, toda a carga está ligada na Fase A. Na Fase B é conectada uma carga de cerca de 8W, que é acionada, praticamente só no período noturno. Não há carga conectada a Fase C. Já na Figura 154, que apresenta a potência reativa, observa-se que a natureza da carga acionada pela Fase A é capacitiva, por se tratar em sua maioria dos refletores LED. Na Fase B, a carga é capacitiva.

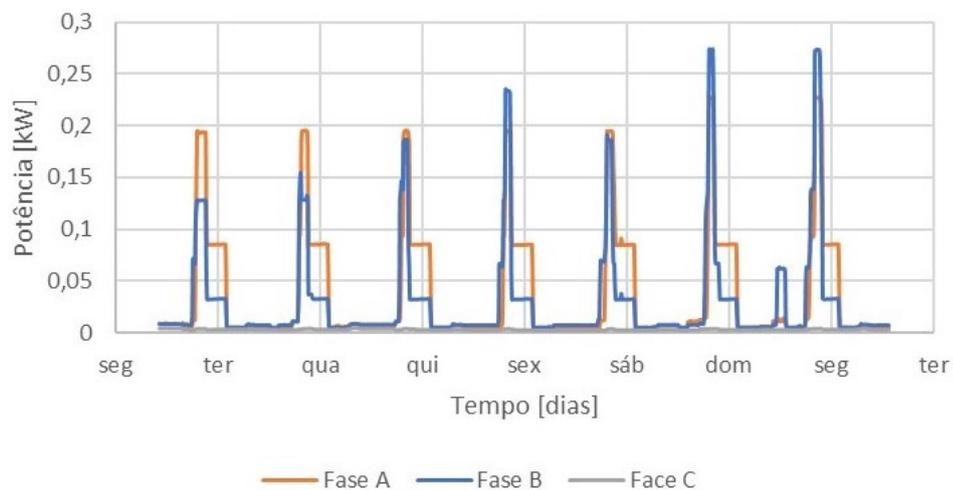


Figura 153 – Potência Ativa Santuário Nossa Senhora da Agonia

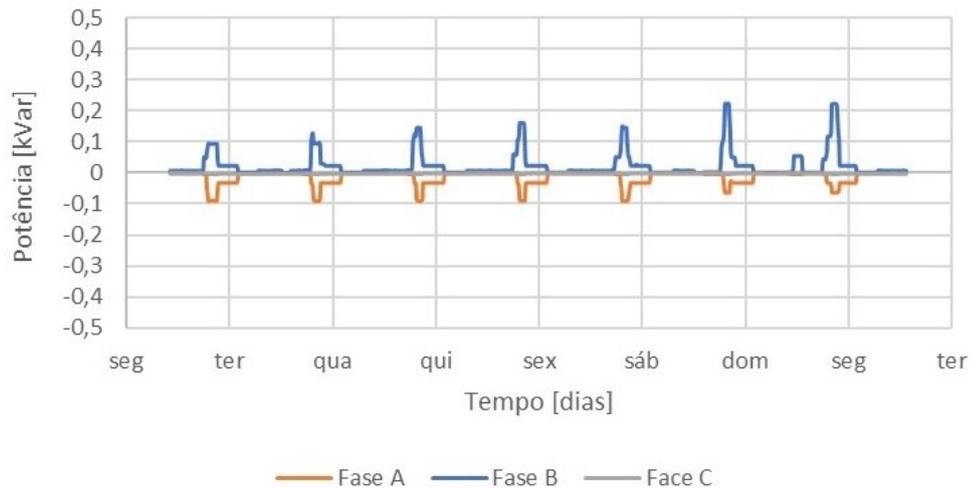


Figura 154 – Potência Reativa Santuário Nossa Senhora da Agonia

Quanto ao fator de potência, observa-se que se assemelha ao da Fase A, quando a carga está desligada. A fase B oscila entre valores capacitivos e indutivos, com média em 0,2 indutivo, como comprova a Figura 155.

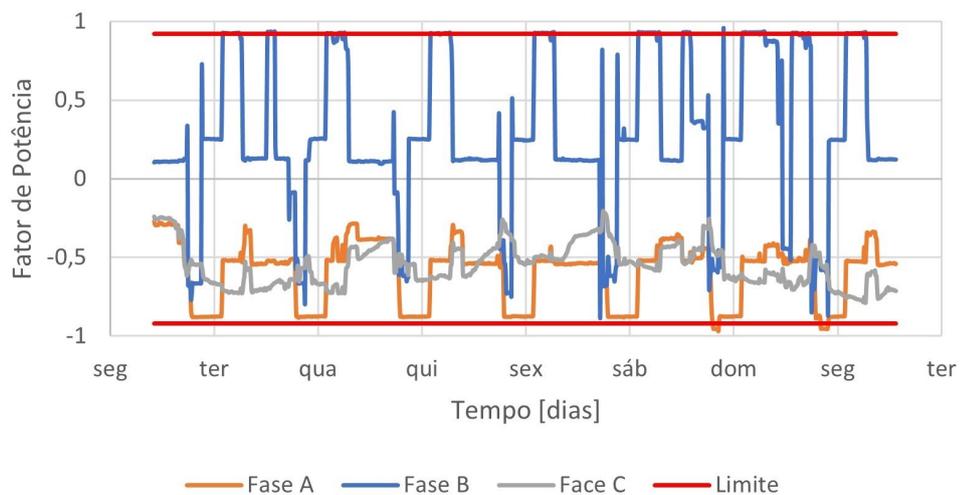


Figura 155 – Fator de potência Santuário Nossa Senhora da Agonia

A variação do indicador é apresentada na Figura 156. Observa-se que a medida da Fase A apresenta valores maiores que as demais, o que é natural devido à falta de carga nas demais fases. Mesmo concentrando toda a carga do sistema, a Fase A não infringe o limite do PRODIST, como visto na Tabela 48.

Tabela 48 – PST95% Santuário Nossa Senhora da Agonia

PST		
A	B	C
0,824	0,293	0,356

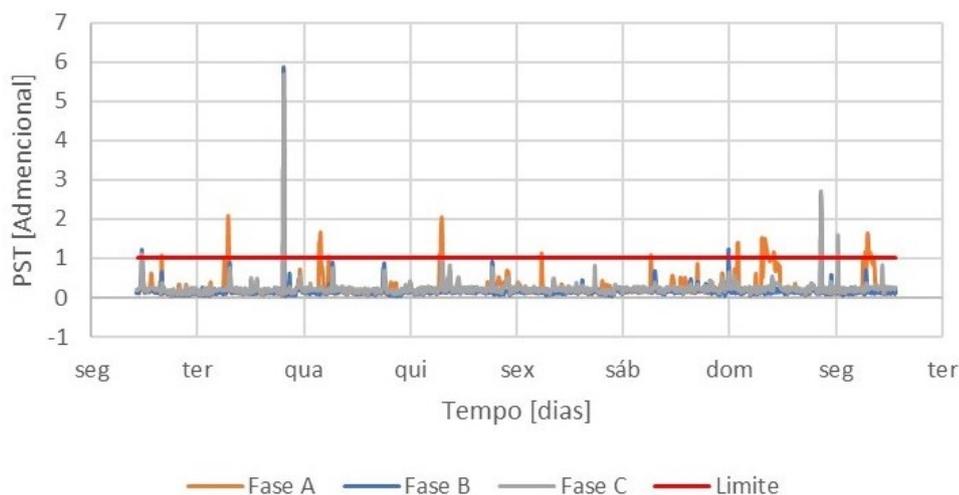


Figura 156 – Flutuação de Tensão Santuário Nossa Senhora da Agonia

A frequência é apresentada na Figura 157, onde observa-se que não há infração aos limites, em vermelho.

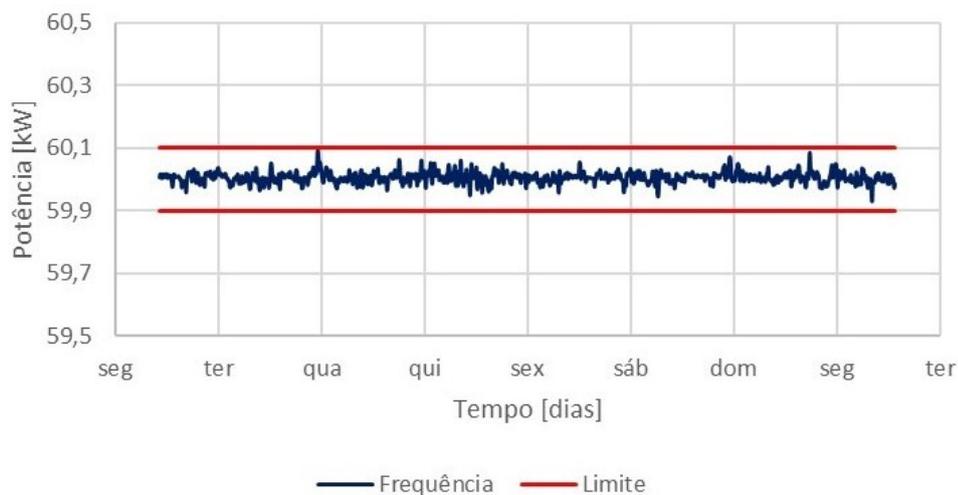


Figura 157 – Frequência Santuário Nossa Senhora da Agonia

A tensão e corrente no neutro apresentadas na Figura 158, indicam que praticamente não há desequilíbrio de tensão entre as fases do sistema. O gráfico na Figura 159,

que apresenta o percentil 5%, 95% e 99% comprova esse resultado, com percentil 95% abaixo de 0,4%, como determina o [PRODIST](#).

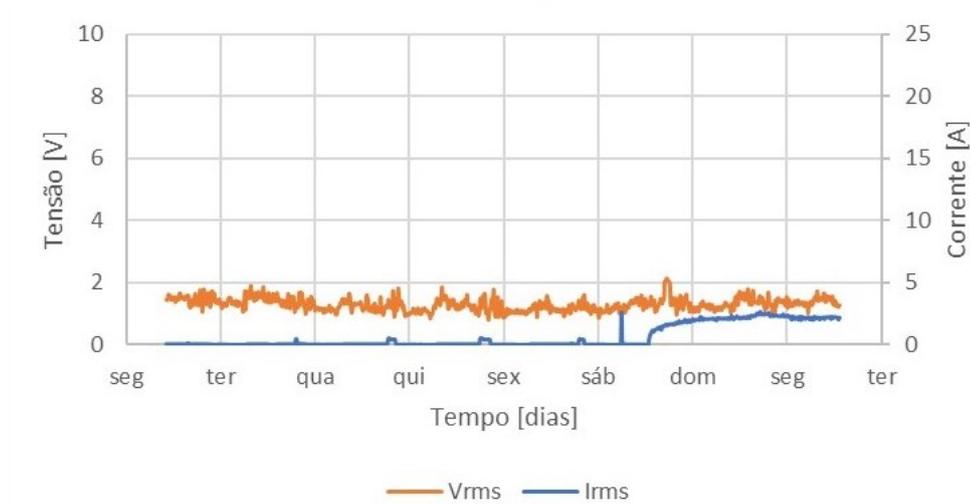


Figura 158 – Tensão e Corrente de Neutro Santuário Nossa Senhora da Agonia

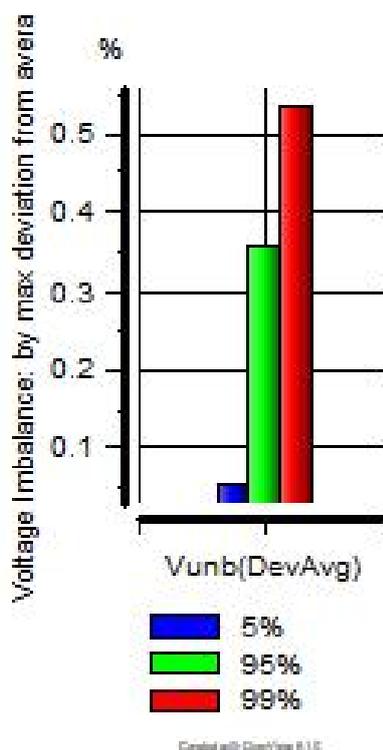


Figura 159 – Percentis 5%, 95% e 99% do desequilíbrio de tensão Santuário Nossa Senhora da Agonia

As distorções harmônicas totais de tensão e corrente são apresentadas nas Figuras 160 e 160, respectivamente. As Figuras 162 e 163 apresentam os percentis 5%, 95% e 99% das distorções harmônicas totais de tensão e corrente, na devida ordem. Segundo o

PRODIST, o percentil 95% não deve ultrapassar 10% para sistemas com nível de tensão menor que 1kV, portanto, o  $V_{dht}$  não ultrapassa os limites da norma. Já o percentil 95% do  $I_{dht}$ , apesar de não ser regulamentado, atinge níveis entre 50% e 100%, baixos quando comparados as demais igrejas.

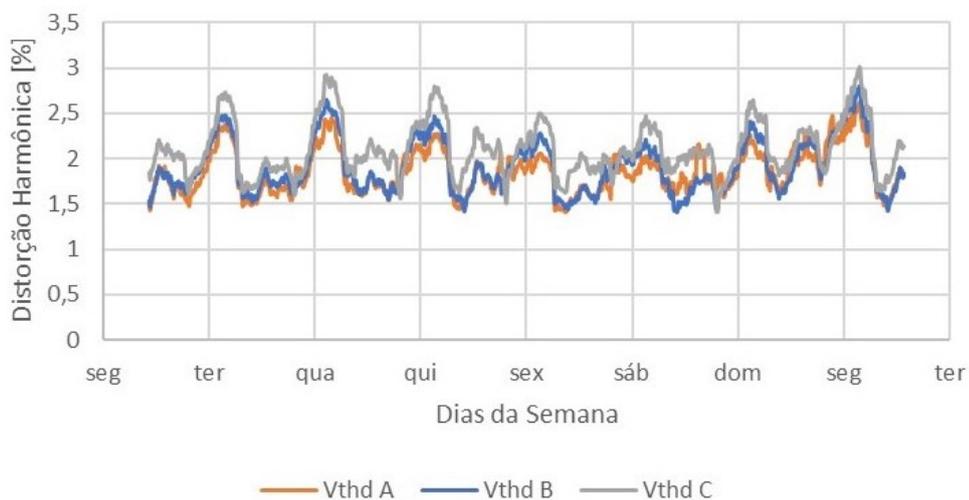


Figura 160 – Distorção Harmônica Total de Tensão Santuário Nossa Senhora Agonia

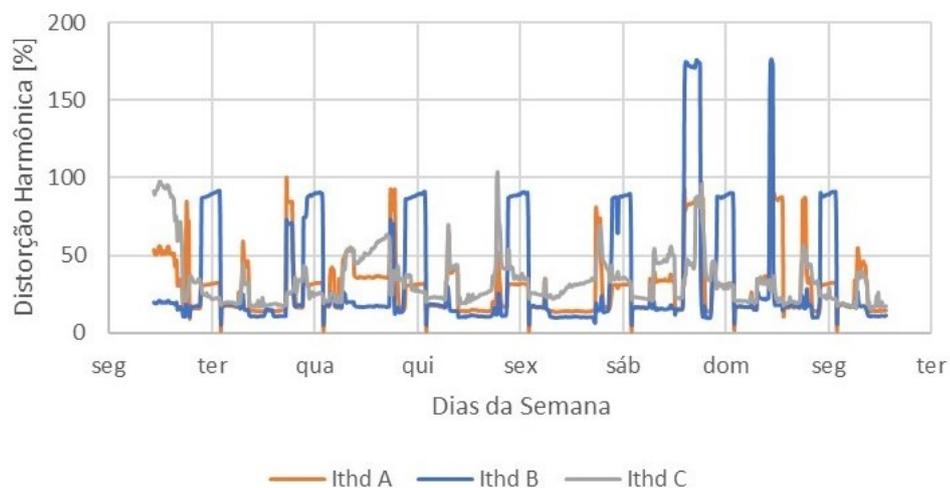


Figura 161 – Distorção Harmônica Total de Corrente Santuário Nossa Senhora Agonia

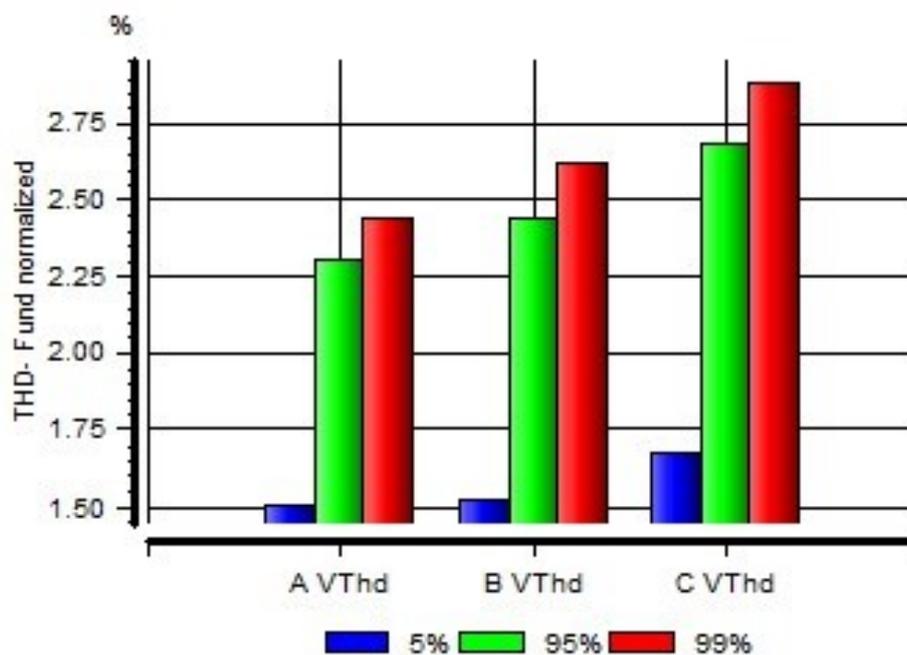


Figura 162 – Percentis da Distorção Harmônica Total de Tensão Santuário Nossa Senhora Agonia

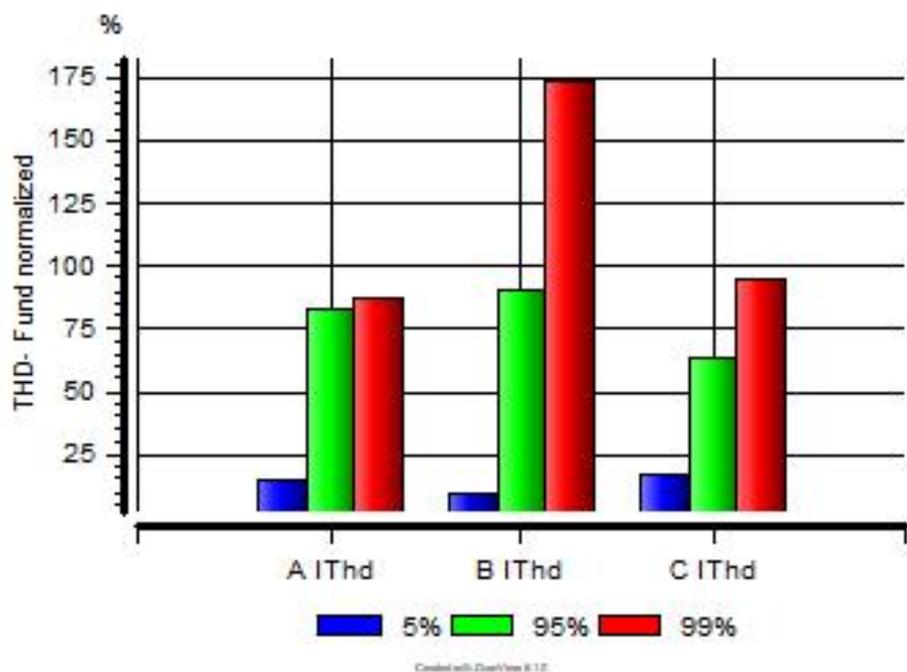


Figura 163 – Percentis da Distorção Harmônica Total de Corrente Santuário Nossa Senhora Agonia

Para analisar o comportamento das ordens harmônicas na distorção de tensão e corrente, foram escolhidos 4 pontos relevantes no gráfico de potência ativa do Santuário

Nossa Senhora da Agonia, pois são pontos que retratam diferentes momentos das cargas no sistema. Para cada fase, foram analisadas as ordens harmônicas de tensão e corrente nos pontos que estão marcados na Figura 164.

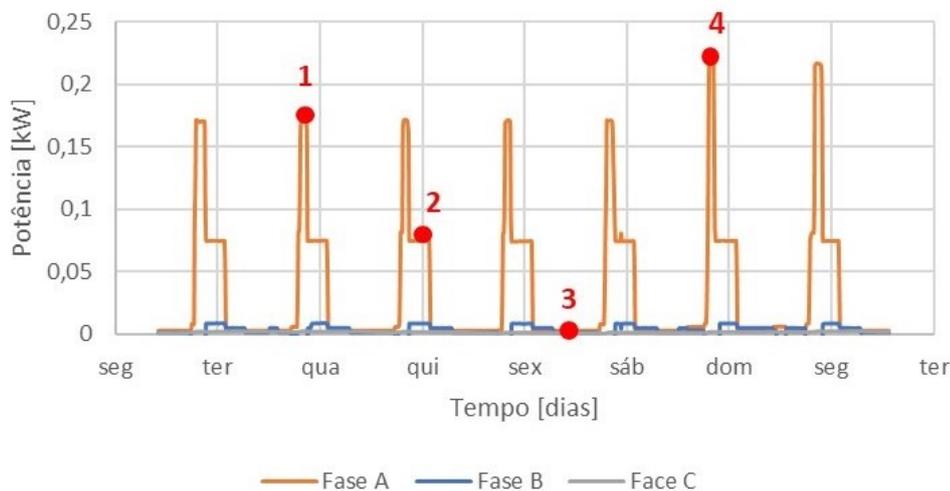


Figura 164 – Pontos de análise das ordens harmônicas Santuário Nossa Senhora Agonia

As Figuras 165 e 166 apresentam a composição harmônica da Fase A, as Figuras 167 e 168 apresentam a composição harmônica da Fase B e as Figuras 169 e 170 da Fase C. Observa-se que não há infração dos níveis de distorção harmônica de tensão para nenhuma das Fases, em nenhum dos pontos críticos do sistema, com a média ficando abaixo de 2%.

A distorção de corrente não é muito elevada. Para a Fase A, destaca-se a presença das harmônicas ímpares de 5<sup>a</sup> a 11<sup>a</sup>, além da componente contínua no Ponto3, atingindo níveis baixos de distorção, de 10% a 20%. Na Fase B, o Ponto 2 se destaca, com distorção harmônica variando de 10% a 50% nas ordens harmônicas ímpares da 3<sup>a</sup> a 13<sup>a</sup>, o que eleva o Idht a mais de 90%. Para a fase C, os níveis harmônicos são praticamente constantes em todos os pontos, pois essa fase está sempre sem carga. Exceto pela componente contínua do Ponto 3, que atingiu 230% de distorção.

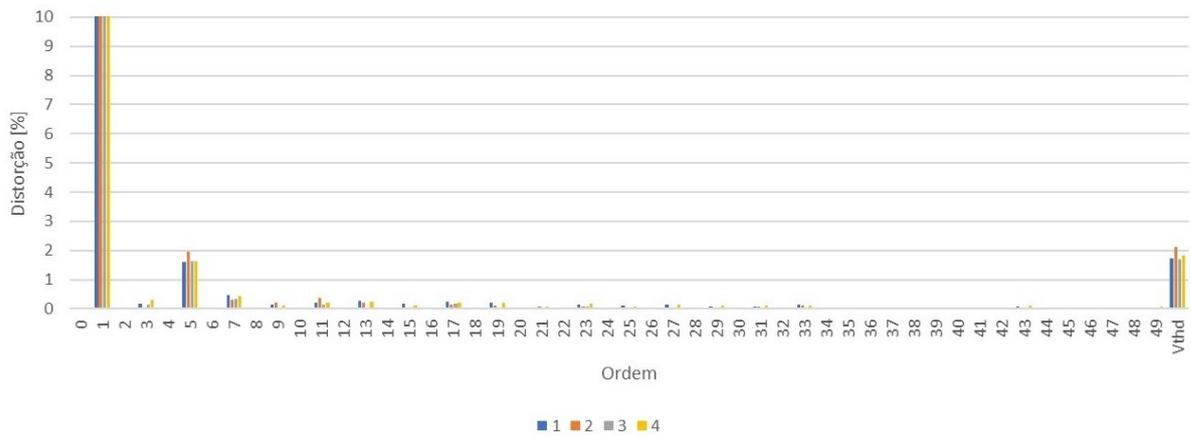


Figura 165 – Harmônicos de Tensão – Fase A – Santuário Nossa Senhora Agonia

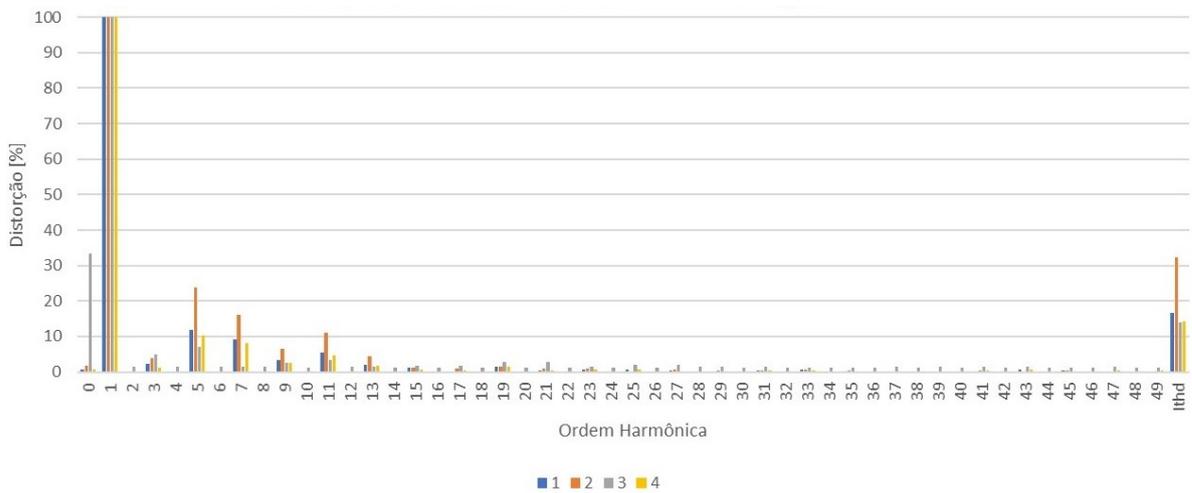


Figura 166 – Harmônicos de Corrente – Fase A – Santuário Nossa Senhora Agonia



Figura 167 – Harmônicos de Tensão – Fase B – Santuário Nossa Senhora Agonia

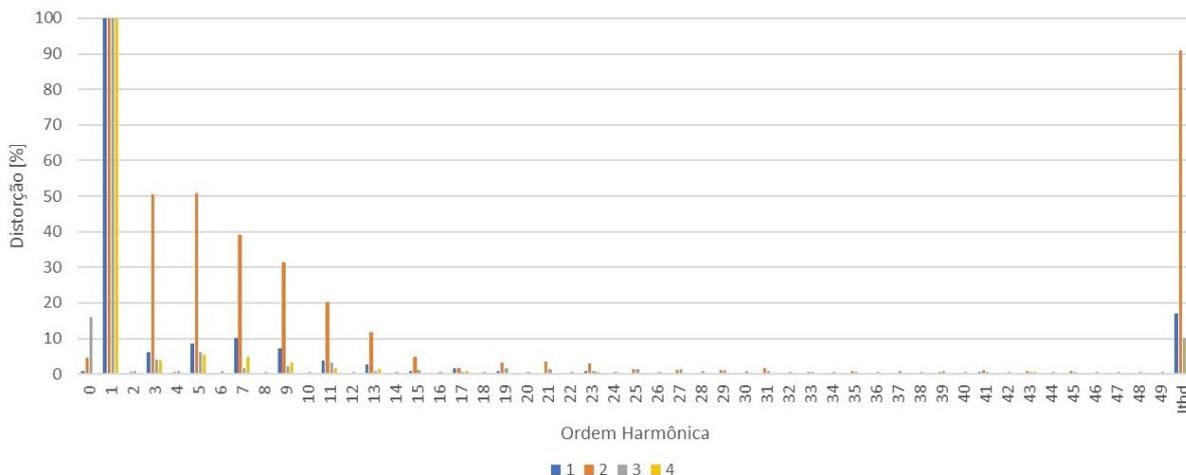


Figura 168 – Harmônicos de Corrente – Fase B – Santuário Nossa Senhora Agonia



Figura 169 – Harmônicos de Tensão – Fase C – Santuário Nossa Senhora Agonia

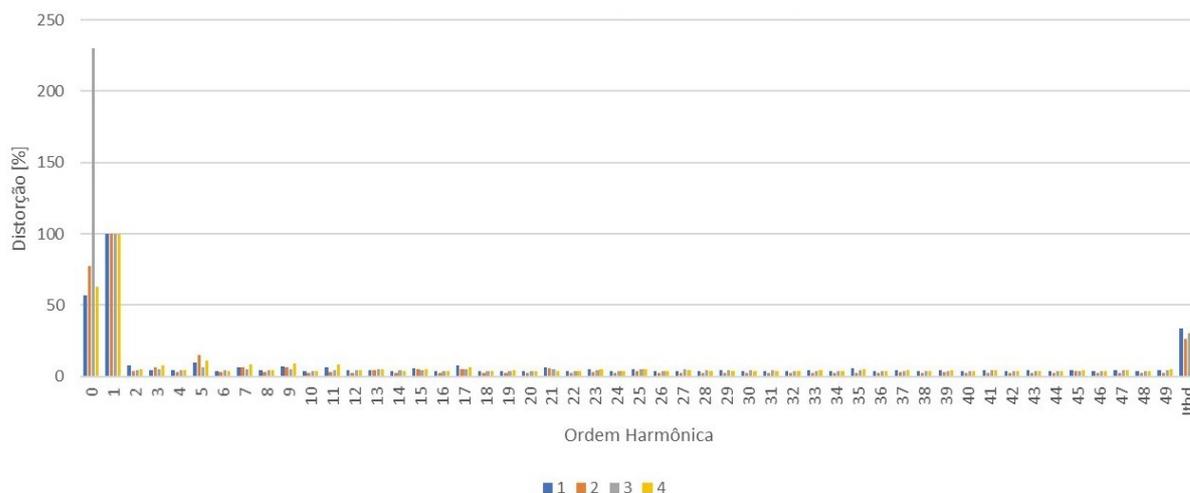


Figura 170 – Harmônicos de Corrente – Fase C – Santuário Nossa Senhora Agonia

Portanto, no Santuário Nossa Senhora Agonia, onde o sistema de iluminação é composto por refletores LED, não há infrações dos limites para tensão eficaz. A flutuação de tensão permanece abaixo do estipulado pelo PRODIST.

Os níveis harmônicos de corrente ficam muito abaixo de 100%, na maior parte do tempo, o que mantém a distorção de tensão abaixo de 3%, os limites de distorção harmônica de tensão não são infringidos, portanto não causando impactos significativos no sistema de distribuição.

## 6.4 Considerações finais

Após analisar as medições realizadas na Igreja Matriz de Santo Antônio, Igreja Matriz de Nossa Senhora da Soledade, Igreja Matriz de São Benedito e no Santuário Nossa Senhora da Agonia, foi possível entender melhor o comportamento das lâmpada fluorescente compactas, velas LED, bulbos LED e refletores LED, quando inseridas respectivamente no sistema de distribuição.

Apesar das diferentes localidades e características do sistema de distribuição escolhidos, em nenhum destes foram violados os limites de tensão eficaz, nem de frequência. Portanto, os requisitos mais básicos do fornecimento de energia foram respeitados pela concessionária. Em todas as igrejas a natureza capacitiva das lâmpadas LED foram confirmadas.

A flutuação de tensão é maior nas fases que alimentam as lâmpadas. Para a Igreja Matriz de Santo Antônio, a Fase B infringe ao limite e a influência da carga é comprovada pelos picos no gráfico de flutuação de tensão no tempo. O mesmo ocorre na Soledade, a Fase B, que aciona a iluminação infringe o limite. Para a Igreja Matriz de São Benedito,

os picos de flutuação praticamente não ultrapassam o limite.

O Santuário Nossa Senhora da Agonia comprova que a disposição da carga aumenta os níveis de flutuação de tensão, que por se tratar de uma carga isolada com um nível de carregamento do sistema baixo, 9%, não é suficiente para que a flutuação supere o limite.

A única igreja em que o desequilíbrio de tensão infringe o **PRODIST** é a Soledade. As cargas estão distribuídas da mesma maneira que o desequilíbrio de tensão informados pela concessionária. Para as demais igrejas, o resultado também foi condizente com o informado. A pior é a Soledade, seguido por Santo Antônio, São Benedito e Agonia, que praticamente não apresenta desequilíbrio.

Quanto à distorção harmônica, a Igreja Matriz de Santo Antônio sofre picos de distorção harmônica de corrente durante o acionamento das cargas, superiores a 150%. Piores durante o período de ponta, principalmente durante a semana.

No caso da Soledade, os picos harmônicos são grandes com o sistema a vazio. O mesmo ocorre para a Igreja Matriz de São Benedito, onde a distorção harmônica é severa quando não há utilização de carga, principalmente na Fase B, atingindo média de 400%.

A distorção harmônica de tensão e corrente no Santuário Nossa Senhora da Agonia sofrem picos durante o acionamento de carga. Porém, com médias menores do que 100%. Portanto, conclui-se que em sistema mais livres de poluição harmônica a vazio, os harmônicos gerados pela carga se destacam.

Após analisar todos os dados, é possível observar que a substituição da tecnologia de iluminação de baixa potência, aqui chamada de residencial, não causa efeitos prejudiciais as demais cargas conectadas ao sistema e nem ao sistema de distribuição.

## 7 Análise das lâmpadas públicas no sistema de distribuição

### 7.1 Considerações Iniciais

Após a análise do desempenho das lâmpadas [LED](#) residenciais quando aplicadas ao sistema de distribuição, neste capítulo será apresentado um estudo de caso realizado nas instalações da *DP World Santos*, empresa responsável pela operação de um dos maiores terminais portuários privados do Brasil, na margem esquerda do Porto de Santos (SP). Ela substituiu o sistema de iluminação por luminárias [LED](#), mas essa substituição causou problemas no funcionamento de outras cargas do sistema. A fabricante das lâmpadas, *SX Lighting*, foi acionada para descobrir a razão dos problemas e contratou uma empresa de engenharia para realizar testes e apresentar uma solução para o comportamento anormal. A GSI – Engenharia e Consultoria Ltda realizou medições nas instalações do porto e firmou uma parceria com o [QMAP](#) da [Unifei](#), para testar soluções para o problema encontrado.[48] [49]

O sistema de iluminação era anteriormente baseado em lâmpadas de vapor metálico, que foram substituídas por luminárias com tecnologia [LED](#), com as características mostradas na Tabela 49 [46]. Essa luminária é alimentada conforme diagrama apresentado na Figura 171, através do QD Poste 1. Após a eficiência do sistema de iluminação, observou-se o mau funcionamento de equipamentos eletrônicos, como câmeras de monitoramento e antenas de comunicação, que são alimentadas através de “No-Breaks”, que são conectadas ao mesmo quadro de distribuição [49]

Tabela 49 – Características Nominais Refletor LED Público Porto

Elétricas	
Potência	350 W
Tensão de Operação	202~254 Vac
Frequência	50~60 Hz
Fator de Potência	> 0,98
Harmônica	< 10%
Proteção Anti-surto	Incluso
Fotométricas	
Fluxo Luminoso do LED	50659 lm
Eficiência Luminosa do LED	133 lm/W
Fluxo Luminoso da Luminária	466065 lm
Temperatura da Cor	4000 – 5000 K
IRC	> 70
Gerais	
Temperatura de Operação	-40 a 55° C
Vida Útil	100000 horas

A medição foi realizada com um medidor semelhante ao que foi utilizado neste trabalho, mudando apenas o modelo de *Power Guide 4400* para *Power Xplorer PX5*, também da *Dranetz*. O medidor foi instalado no quadro de distribuição do Poste 1. Na Figura 171 [46] é possível observar as características do sistema e o posicionamento da conexão das cargas. [41]

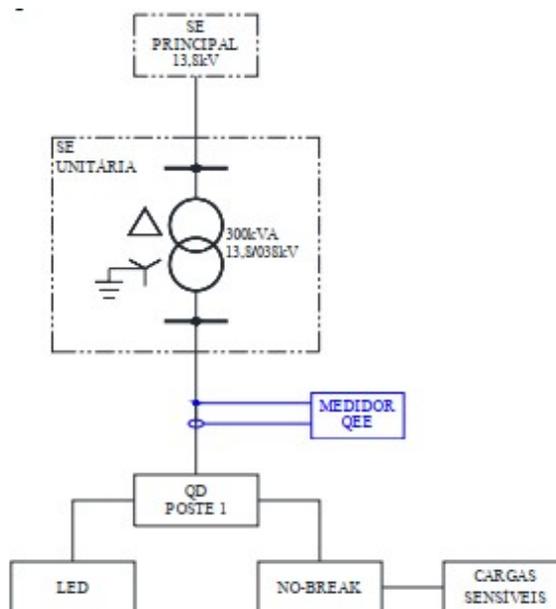


Figura 171 – Esquema de Alimentação das Cargas do Poste 1

## 7.2 Resultados

Para realizar esses estudos, as medições foram iniciadas sem o acionamento das cargas da iluminação, restando apenas os *No-breaks* e as cargas a ele conectadas. As cargas de iluminação foram acionadas às 14h12min. Como visto na Figura 172, a energização das 21 lâmpadas LED causa um pico de corrente de mais de 70A. A Figura 173 apresenta a Potência Ativa, onde é possível observar o desequilíbrio de cargas, com a fase A somando 0,8 kW e as fases B e C consumindo 2,5 kW cada.

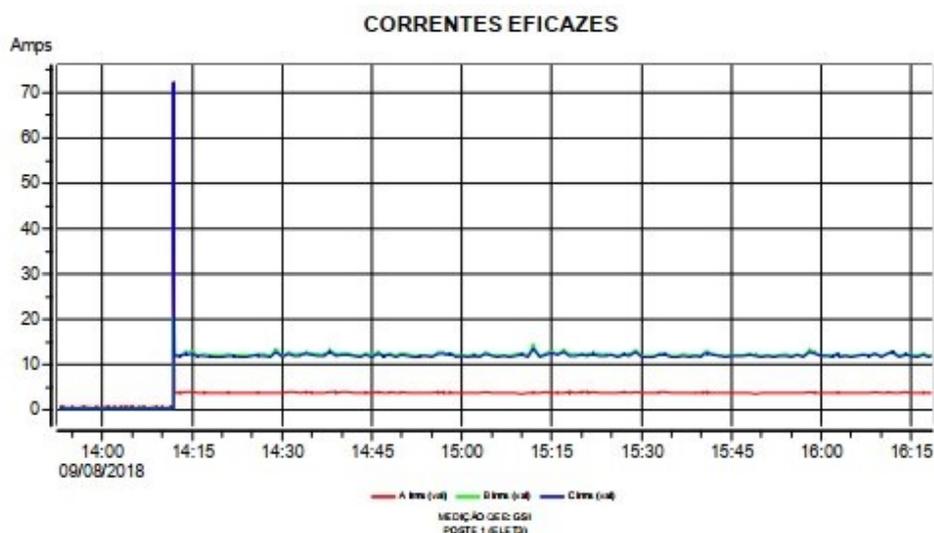


Figura 172 – Corrente Eficaz no Poste 1

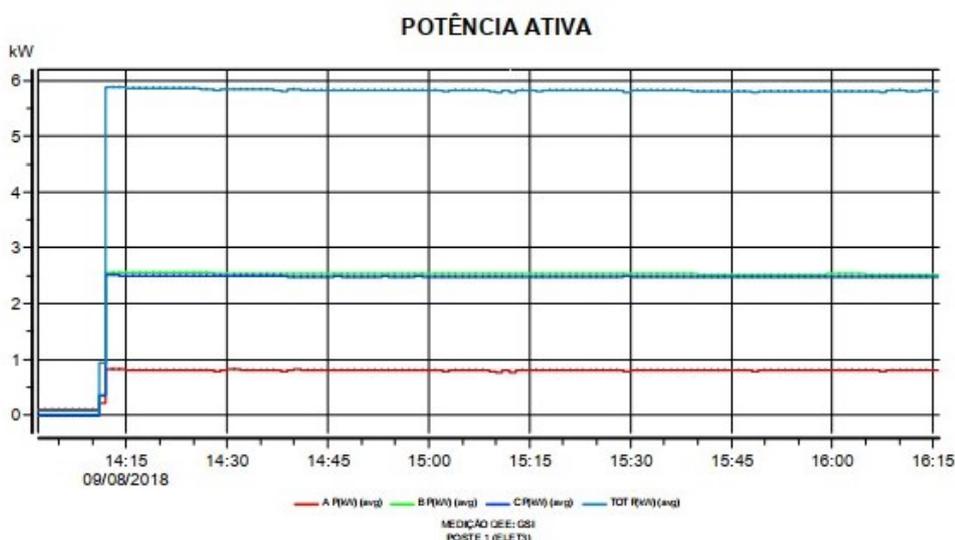


Figura 173 – Potência Ativa no Poste 1

A Figura 174 apresenta a distorção harmônica total de tensão, onde observa-se que após a entrada da carga de iluminação a distorção aumenta consideravelmente. Mesmo

com tal aumento, a média não ultrapassa os 10% previstos no PRODIST. Já a Figura 175 mostra a distorção harmônica total de corrente, onde se observa que distorção de corrente diminuiu com o acionamento da carga.

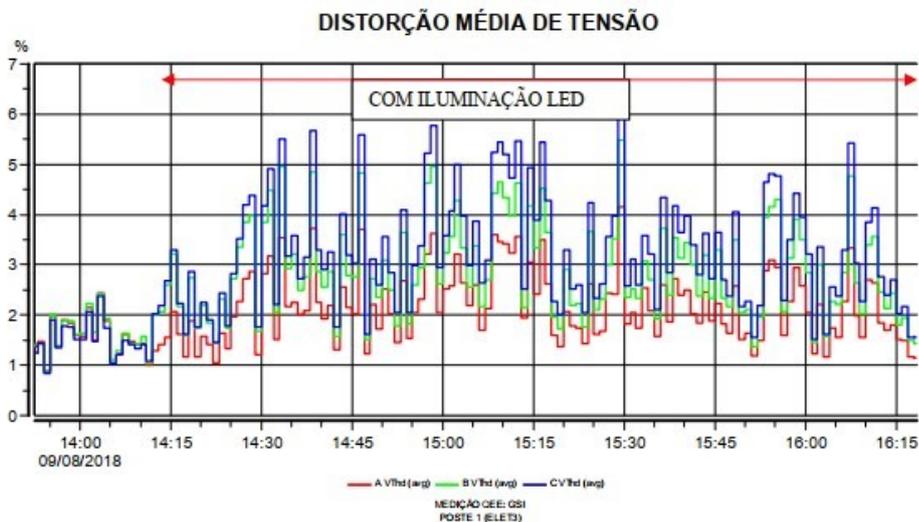


Figura 174 – Distorção Harmônica Total das Tensões do Poste 1

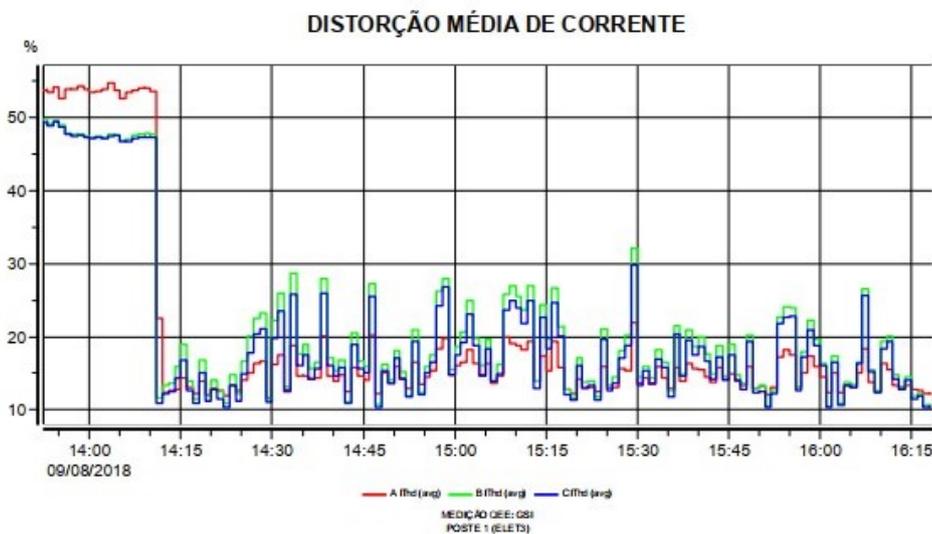


Figura 175 – Distorção Harmônica Total das correntes do Poste 1

Para analisar as distorções harmônicas em instantes específicos de funcionamento do sistema, serão apresentadas as formas de onda de tensão e corrente e os respectivos espectros harmônicos para os oito pontos que estão apresentados na Figura 176. Os pontos foram agrupados para demonstrar a variação observada no sistema.

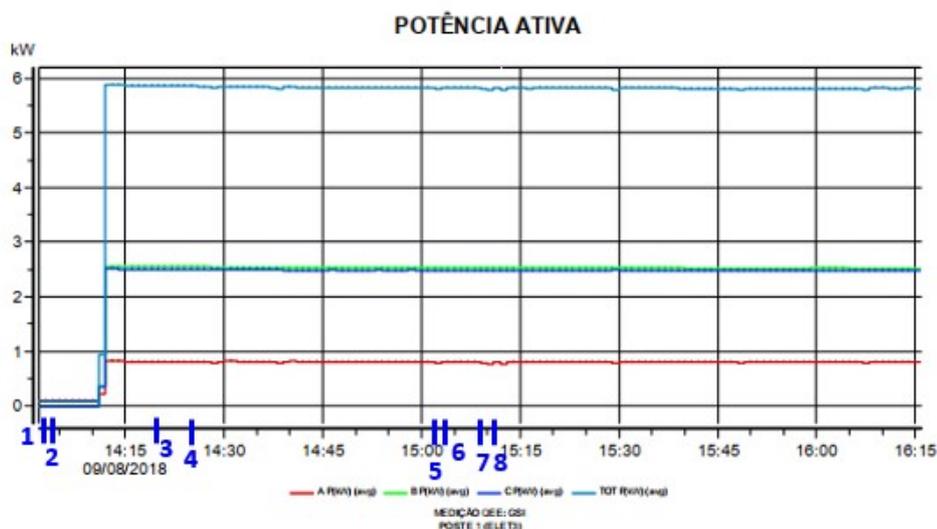


Figura 176 – Pontos de Análise de Harmônicos no Poste 1

A Figura 177 apresenta a forma de onda da tensão e corrente no início das medições (Ponto 1), observa-se que nesse momento a distorção harmônica de tensão não é perceptível visualmente. Como comprova a Figura 178, a distorção harmônica total de tensão é menor que 1%. Já para a corrente, o formato senoidal é deformado. Isso ocorre devido a presença de harmônicos, principalmente na 3<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup> e 9<sup>a</sup> ordem, visto na Figura 179.

Para o Ponto 2, com apenas um minuto de diferença para o ponto anterior, observa-se, na Figura 180, uma significativa alteração no comportamento da tensão e da corrente, já que a forma de onda muda, mas sem alteração no módulo da corrente, pois não foi realizada nenhuma alteração de carga no sistema. O que indica a instabilidade do sistema. Agora já é possível verificar maior distorção de tensão na forma de onda, como pode-se verificar na Figura 181, que apresenta  $V_{dht}$  maior que 5%. E a forma de onda de corrente se distorce ainda mais, isso se deve ao aumento das componentes de ordens mais alta, de 30 a 39, observado na Figura 182. Dando destaque a esse intervalo de ordens harmônicas, na Figura 183, é possível verificar a presença de inter-harmônicos.

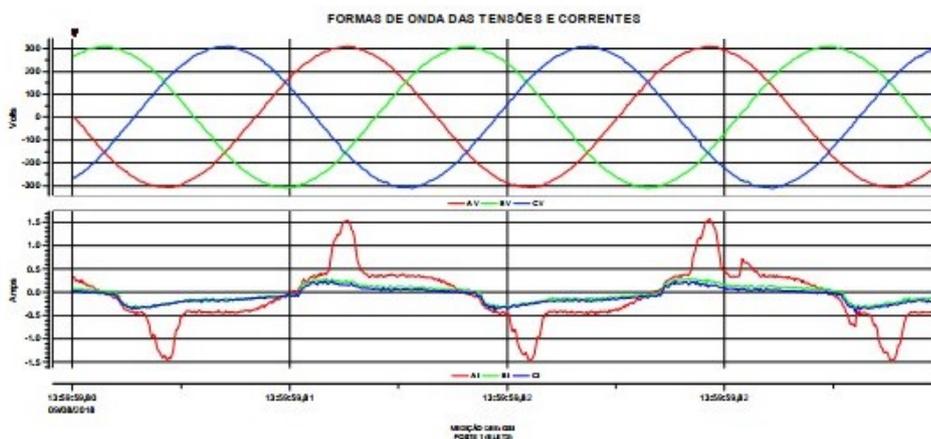


Figura 177 – Forma de Onda de Tensão e Corrente – Ponto 1

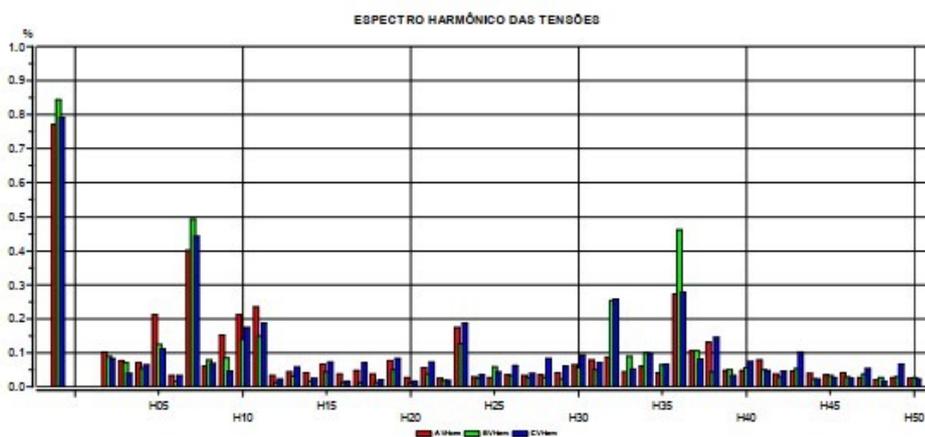


Figura 178 – Espectro Harmônico das Tensões – Ponto 1

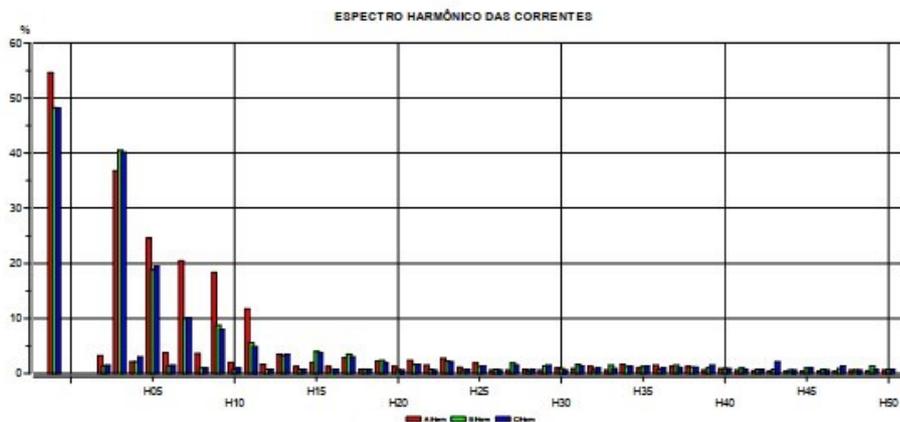


Figura 179 – Espectro Harmônico das Correntes – Ponto 1

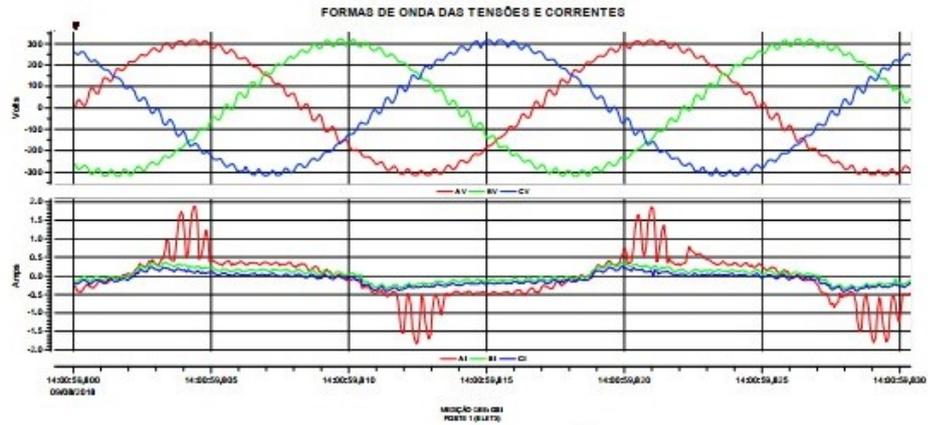


Figura 180 – Forma de Onda de Tensão e Corrente – Ponto 2

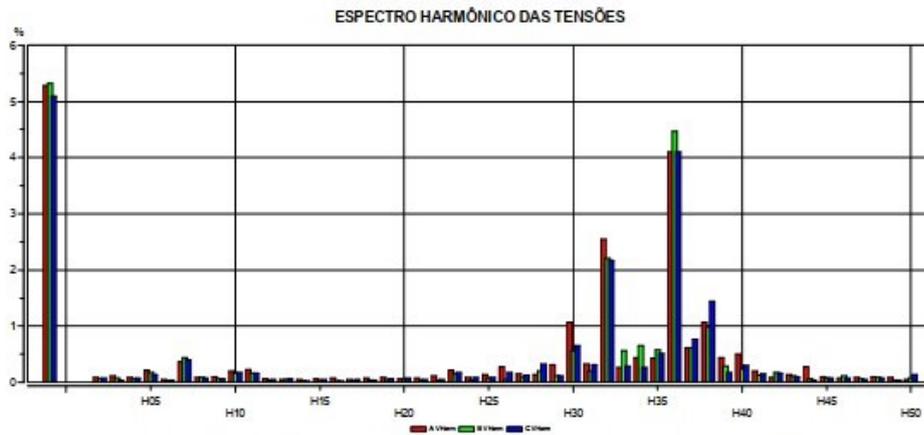


Figura 181 – Espectro Harmônico das Tensões – Ponto 2

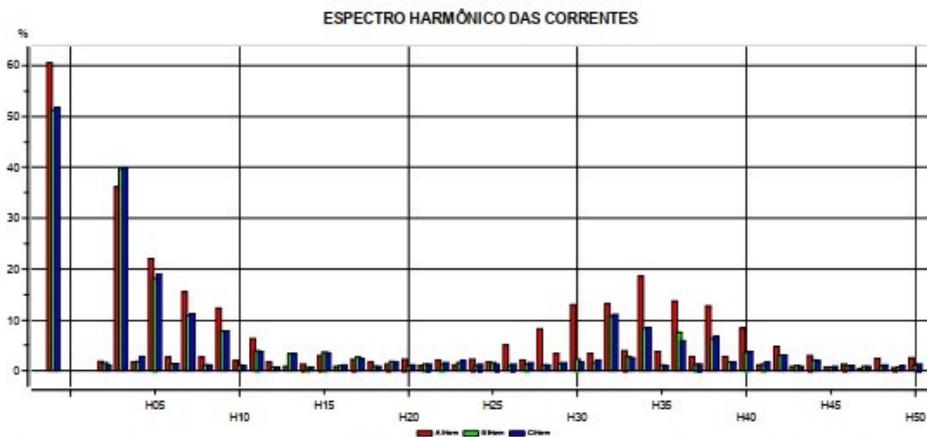


Figura 182 – Espectro Harmônico das Correntes – Ponto 2

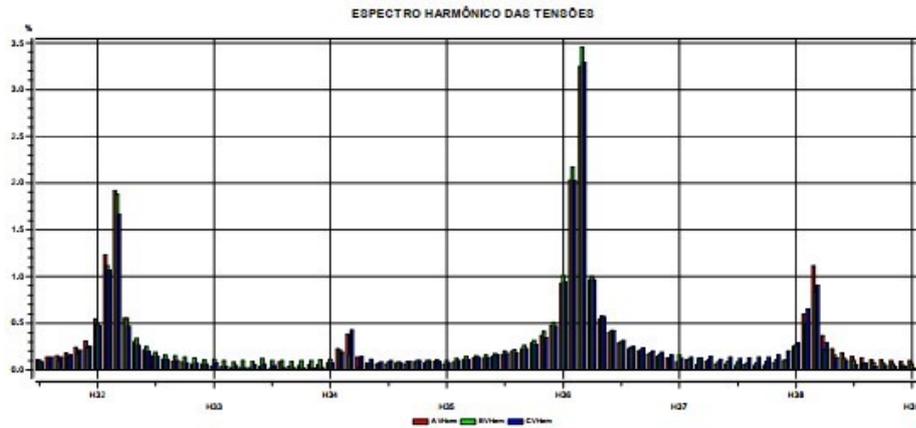


Figura 183 – Presença de inter-harmônicos nas tensões – Ponto 2

A Figura 184 apresenta as formas de onda de tensão e corrente para o Ponto 3, onde já há a presença da carga de iluminação conectada ao sistema. Porém, observa-se que as distorções são reduzidas, retomando o formato praticamente senoidal. Nas Figuras 185 e 186, observa-se, os níveis de distorção harmônica menores que, 1% para tensão e 12,5% para corrente.

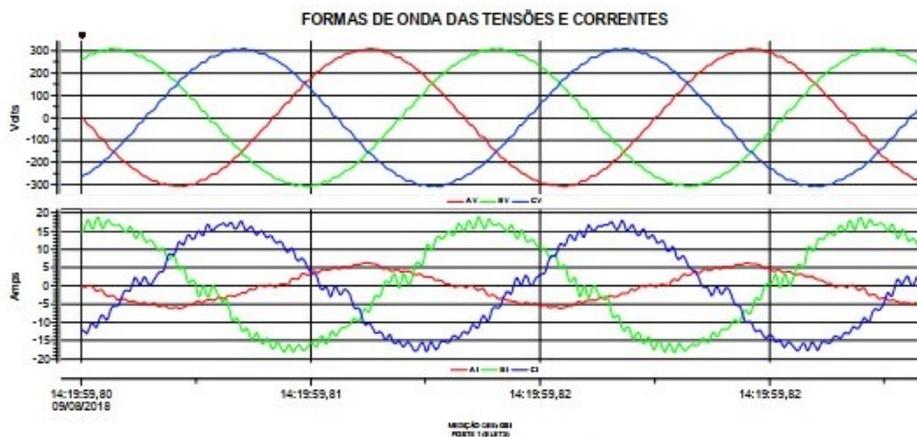


Figura 184 – Forma de Onda de Tensão e Corrente – Ponto 3

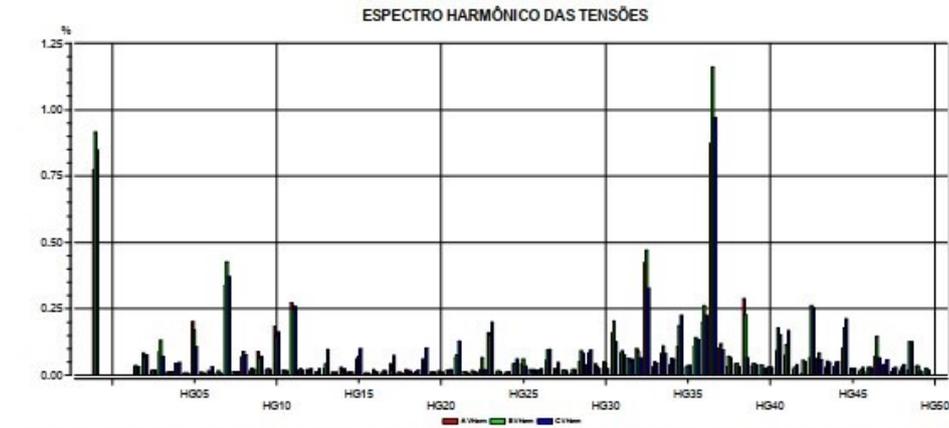


Figura 185 – Espectro Harmônico das Tensões – Ponto 3

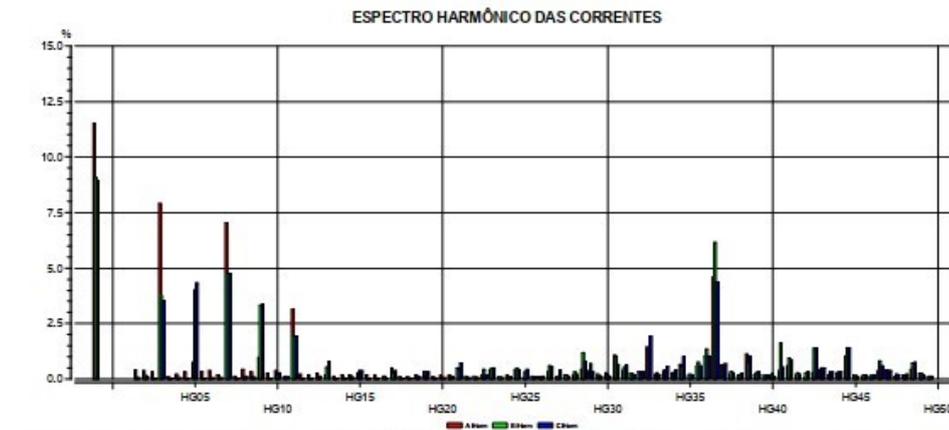


Figura 186 – Espectro Harmônico das Correntes – Ponto 3

Para o ponto 4, o nível de distorção volta a aumentar, como pode ser visto na Figura 187. Os níveis de distorção harmônicas sobem para mais de 4% e 20%, para tensão e corrente respectivamente, como apresenta as Figuras 188 e 189. Novamente, o motivo é o aumento do nível das ordens harmônicas mais altas.



Figura 187 – Forma de Onda de Tensão e Corrente – Ponto 4

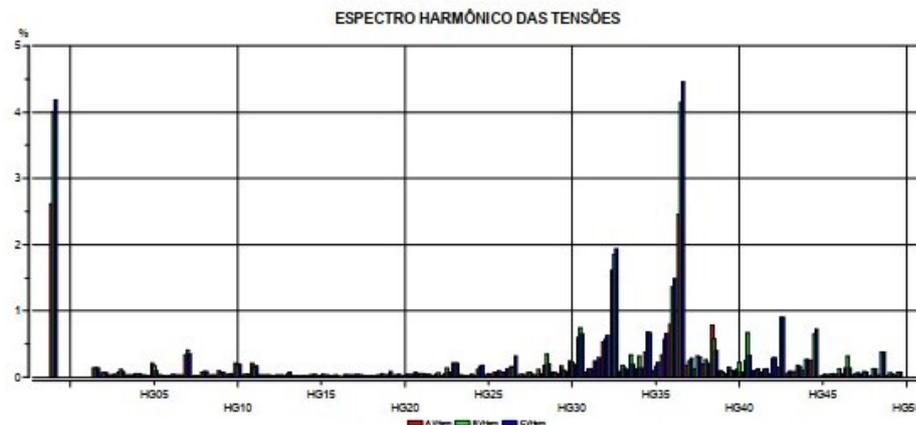


Figura 188 – Espectro Harmônico das Tensões – Ponto 4

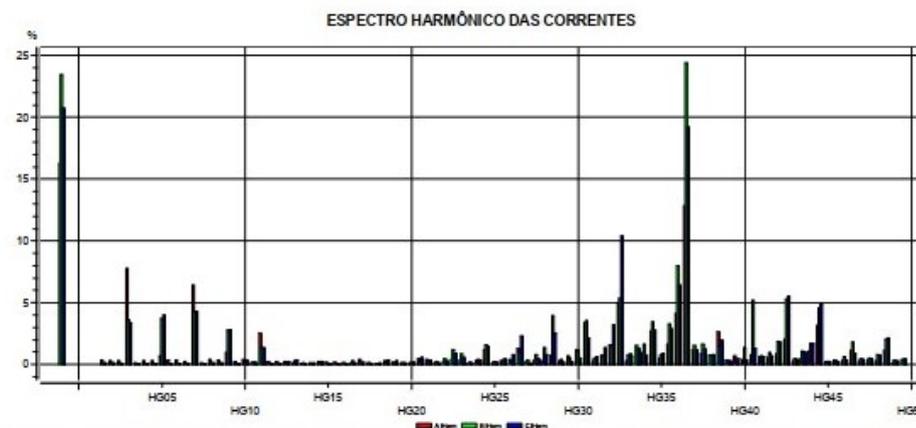


Figura 189 – Espectro Harmônico das Correntes – Ponto 4

Foram escolhidos mais 4 pontos, para analisar as formas de onda em um intervalo de 15 minutos, afim de determinar um comportamento padrão. A Figura 190 apresenta o

resultado do Ponto 5, onde as distorções são menores. Já a Figura 191 apresenta um nível harmônico maior para o ponto 6. O nível harmônico reduz novamente para o ponto 7, como visto na Figura 192. O ponto 8, apresenta as piores distorções harmônicas ocorridas durante as medições, como ilustra a Figura 193. Ao dar um zoom neste ponto, é possível observar a ocorrência de um fenômeno chamado “Zero-Crossing”, isto é, a ocorrência de múltiplas e seguidas passagens pelo zero tanto para tensões quanto para as correntes. Este fenômeno causa problemas em cargas que utilizam a passagem de zero como referência de controle. Este fenômeno é causado pelo alto nível de ordens harmônicas mais elevadas, de 30<sup>a</sup> a 46<sup>a</sup> ordem, salientando que os piores níveis estão presentes na 32<sup>a</sup> e 36<sup>a</sup>. Aumentando as distorções harmônicas totais de tensão e corrente para 10% (Figura 194) e 60% (Figura 195), respectivamente.

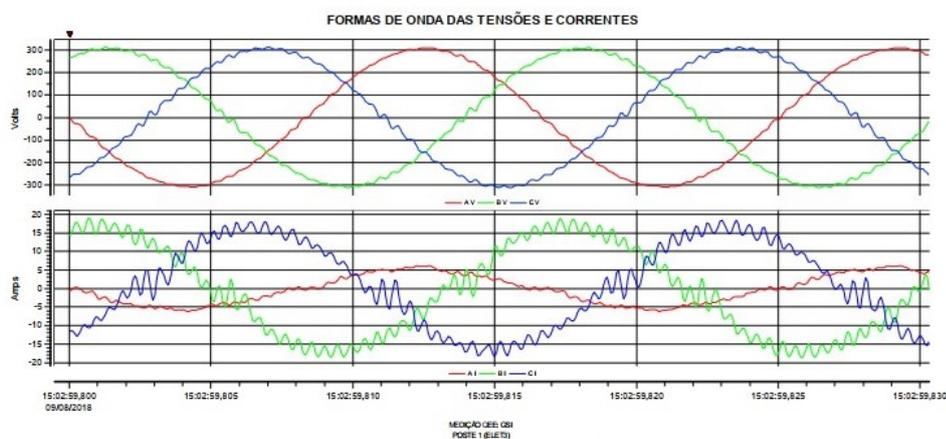


Figura 190 – Forma de Onda de Tensão e Corrente – Ponto 5

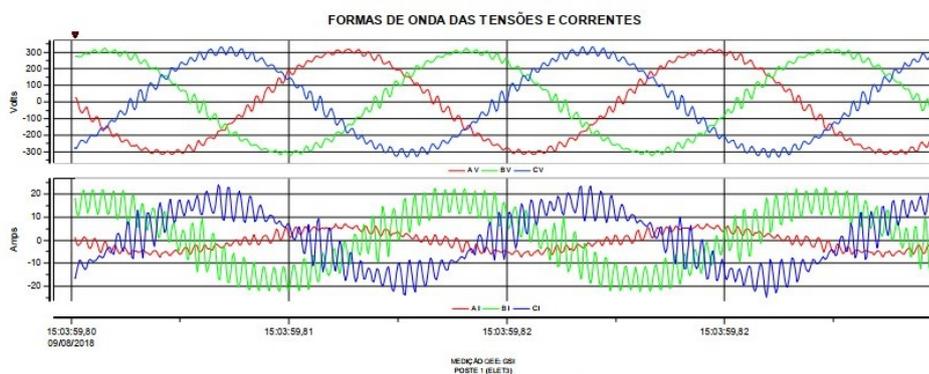


Figura 191 – Forma de Onda de Tensão e Corrente – Ponto 6

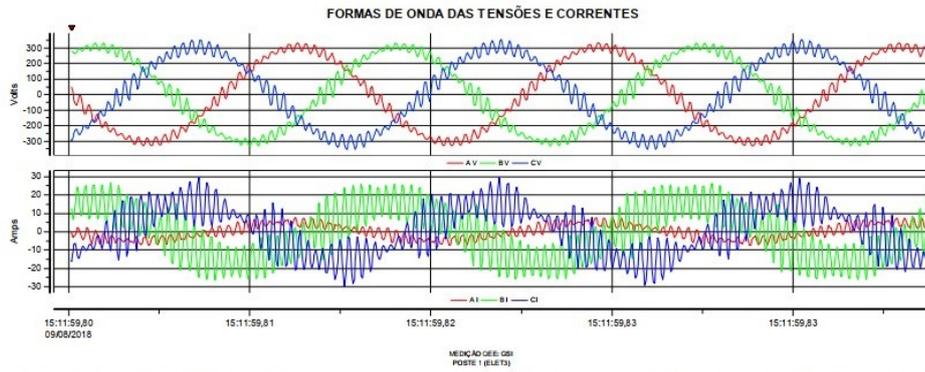


Figura 192 – Forma de Onda de Tensão e Corrente – Ponto 7

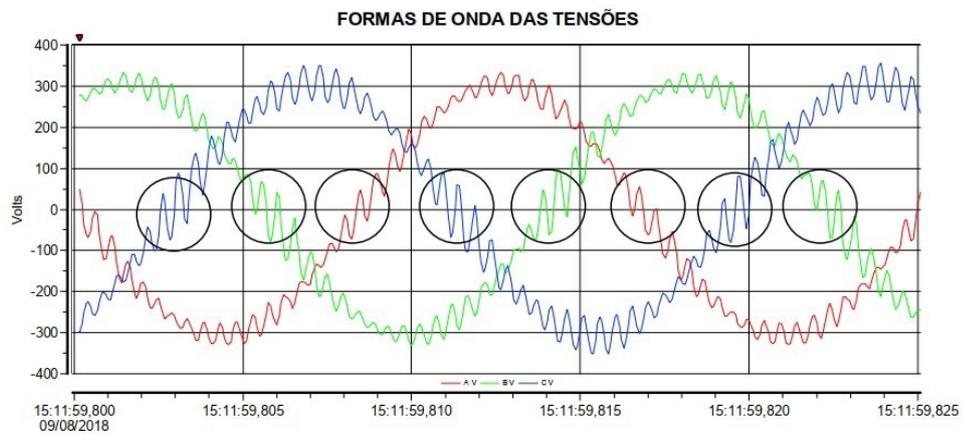


Figura 193 – Detalhe da Forma de Onda de Tensão – Ponto 8

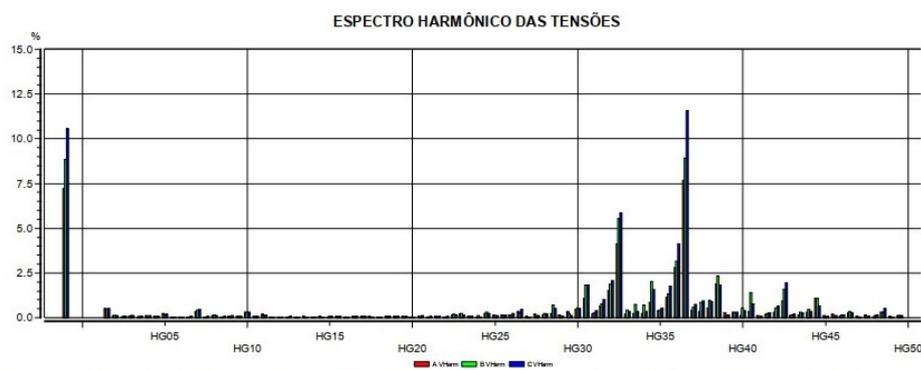


Figura 194 – Espectro Harmônico das Tensões – Ponto 8

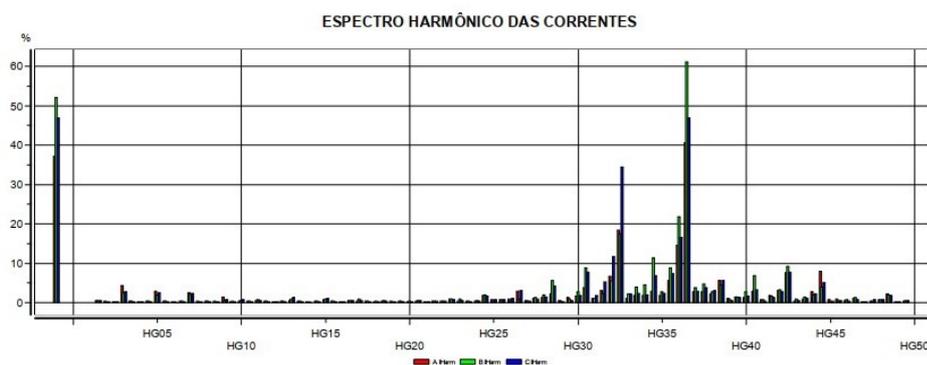


Figura 195 – Espectro Harmônico das Correntes – Ponto 8

### 7.3 Considerações finais

Após a análise dos resultados das medições realizadas no Porto de Santos, os níveis de harmônicos e inter-harmônicos de altas ordens foram apontadas como a causa do mau funcionamento dos *No-Breaks* e das cargas a eles conectadas. Os refletores da *SX Lighting* foram testados previamente neste trabalho, em nenhum dos casos os níveis harmônicos apresentaram o problema que ocorre nas instalações portuárias em estudo.

Como observado nesta análise, o comportamento harmônico do sistema sofre oscilações em seus níveis, aparentemente por influência de algum fenômeno externo desconhecido. A substituição do sistema de iluminação gerou uma amplificação das componentes harmônicas presentes no sistema, o que casou os efeitos nas cargas sensíveis.

A sugestão proposta para solução do problema identificado foi a separação dos circuitos de iluminação dos demais. Uma alternativa para atenuar os efeitos das componentes harmônicas é de uma solução baseada em filtros que atenuem os efeitos dos harmônicos no sistema. Os protótipos foram testados previamente nos laboratórios do QMAP e 10 unidades dos protótipos foram instalados nas instalações da *DP World Santos*. Isso permitiu a utilização do sistema de iluminação LED que havia temporariamente voltado a ser baseado em lâmpadas de vapor metálico até que o problema fosse resolvido. Vale ressaltar que o filtro não elimina as altas distorções do sistema, mas atenua o seu efeito, permitindo o correto funcionamento das cargas adjacentes.

Os resultados desse estudo foram apresentados na Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica de 2019, com o título “Aplicação de Filtros Passa-Baixa para Redução das Distorções das Tensões e Eliminação de Ocorrências de *Zero-Crossings* - O Caso do Porto de Santos”. [50]

Ressalta-se que a ocorrência deste evento em um ambiente privado e controlável favoreceu a análise e a solução do impacto causado pelas lâmpadas LED no sistema

de distribuição. A preocupação se mantém para sistemas maiores, principalmente para sistemas de iluminação pública, onde as luminárias apresentam maior potência. Portanto, mantém-se a necessidade de atenção a substituição das lâmpadas por tecnologias **LED**, pois os efeitos podem causar mau funcionamento de outras cargas conectadas ao sistema de distribuição.

## 8 Conclusões

Essa dissertação buscou determinar o impacto da substituição das atuais tecnologias de iluminação pela tecnologia **LED** no sistema de distribuição e o impacto dos possíveis distúrbios presentes na rede elétrica nas lâmpadas **LED**, considerando lâmpadas residenciais, industriais e públicas em ambiente laboratorial e em medições reais.

Após analisar todos os dados laboratoriais e medições das igrejas, é possível observar que a substituição da tecnologia de iluminação de baixa potência, aqui chamada de residencial, não causa efeitos prejudiciais as demais cargas conectadas ao sistema e nem ao sistema de distribuição. Mas vale ressaltar a importância da regulamentação das novas tecnologias de iluminação, contemplando também o aspecto harmônico que ainda não é regulamentado para lâmpadas residenciais. [37]

As medições nas igrejas em Itajubá sanaram alguns questionamentos discutidos nessa dissertação, porém suscitaram outros. Por exemplo, observou-se um aumento dos níveis de flutuação de tensão de acordo com o acionamento das cargas de iluminação. Neste aspecto, cabe uma pesquisa mais profunda, a fim de delimitar se esse comportamento é influenciado somente pela carga ou também pelas características do sistema, como por exemplo: potência do transformador de distribuição, carregamento do transformador e quais são as outras cargas que compartilham o mesmo sistema de distribuição de baixa tensão.

Os estudos realizados em laboratório tanto para as lâmpadas residenciais quanto para as lâmpadas industriais e públicas, e ainda as medições realizadas em campo para as lâmpadas residenciais reforçam os benefícios da substituição das demais tecnologias por **LED**. As lâmpadas, luminárias e refletores **LED** possuem mais rapidez de acionamento, não precisam esfriar para religar, tem uma durabilidade muito superior e são livres de substâncias tóxicas. Além destes efeitos, talvez o mais significativo ainda seja a redução no consumo de energia, aumentando a eficiência energética.

Porém, as medições realizadas com os refletores **LED** no Porto sinalizam a necessidade de atenção ao fazer o *retrofit* no sistema de iluminação. O comportamento das demais cargas conectadas ao sistema deve ser acompanhado. Sempre que possível cargas sensíveis, normalmente eletrônicas, como computadores, *No-Breaks*, câmeras de monitoramento, entre outras, devem ser alimentadas por intermédio de circuitos separados dos de iluminação **LED** a fim de evitar que sejam afetadas pelos harmônicos de alta frequência gerados pelas lâmpadas **LED**.

## 8.1 Trabalhos futuros

Para dar continuidade na linha de pesquisa dessa dissertação, sugere-se para investigações futuras:

- Desenvolver pesquisa junto com o *retrofit* de indústrias e sistemas de iluminação pública para verificar os efeitos e influências das substituições de lâmpadas de descarga por tecnologia **LED**, a fim de se mapear as condições de problemas, como ocorreu na DP *World Santos*, realizar um estudo da qualidade da energia no sistema e identificar padrões. Desenvolvendo, assim, possíveis soluções tecnológicas que mitiguem essas ocorrências de forma mais genérica e ampla.

- Considerar o fator de diversidade de tecnologias para reduzir os níveis harmônicos no sistema de distribuição. Pesquisas prévias indicam que equipamentos com emissões harmônicas distintas quando combinados em um mesmo circuito pode causar a diminuição da distorção harmônica total no sistema. Se esse padrão for determinado, seria possível projetar um retrofit que reduza a poluição harmônica no sistema. [51]

## 8.2 Trabalhos originados desta dissertação

Durante o mestrado, que se conclui com esta dissertação, foram publicados artigos em revista e congressos. Estes foram essenciais para o desenvolvimento do pensamento crítico e científico para o desenvolvimento deste estudo. Além de aumentar a contribuição para o cenário acadêmico nacional. São eles:

- “Efeitos das Flutuações de Tensão em Lâmpadas LED e Fluorescentes Compactas” apresentado na Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica em 2017 e posteriormente publicado na revista *Eletricidade Moderna*. [52]

- “Avaliação do Impacto da Portaria Nº 144 do Inmetro na Qualidade das Lâmpadas LED” apresentado no Congresso Brasileiro de Automática em 2018. [37]

## Referências

- 1 EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Matriz Energética e Elétrica*. 2018. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso: 15 ago. 2019. 21
- 2 UNIC, C. de Informação das Nações Unidas para o B. *Transformando Nosso Mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável*. 2015. Disponível em: <[http://www.itamaraty.gov.br/images/ed\\_desenvsust/Agenda2030-completo-site.pdf](http://www.itamaraty.gov.br/images/ed_desenvsust/Agenda2030-completo-site.pdf)>. Acesso: 15 Mar. 2018. 21
- 3 CRAIDE, S. *Lâmpadas incandescentes não poderão ser vendidas no Brasil a partir do dia 30*. 2016. Disponível em: <<http://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2016-06/lampadas-incandescentes-nao-poderao-ser-vendidas-no-brasil-partir-do-dia-30>>. Acesso: 15 ago. 2019. 22
- 4 ELÉTRICO, O. S. Mercado de iluminação em desenvolvimento. *O Setor Elétrico*, Ano 8, n. Edição 93, 2013. 22
- 5 ELÉTRICO, O. S. Lâmpadas leds superam expectativa na comercialização, aponta pesquisa. *O Setor Elétrico*, Ano13, n. Edição151, p. PaginaInicial–PaginaFinal, 2018. 22
- 6 BRAGA, F. S. et al. Análise comparativa da eficiência energética e qualidade de energia em lâmpadas incandescentes fluorescentes e led's. *Seminário Estudantil de Produção Acadêmica*, v. 13, 2014. 24, 38, 39, 40
- 7 UDDIN, S. et al. Investigation of harmonic generation from low wattage led lamps. *Journal of Applied Sciences Research*, INSInet Publications, v. 8, n. 8, p. 4215–4221, 2012. 24, 40
- 8 ANANWATTANAPORN, S.; NGAOPITAKKUL, A. Power quality analysis in light emitting diode lamps. In: IEEE. *2016 17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*. [S.l.], 2016. p. 1–6. 24
- 9 FRAGOSO, O. F. C. T.; QUEIROZ. Qualidade de energia e comportamento térmico na substituição de lfc's por leds. *Eletricidade Moderna*, Ano46, n. 534, p. 34–39, 2017. 24
- 10 LIN, S.; HUANG, N.; ZHU, M. The study of the power quality emission characteristics of different types of lamps and their impacts on distribution systems. In: IEEE. *2016 IEEE 11th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*. [S.l.], 2016. p. 613–618. 24
- 11 ANEEL. *Qualidade na Distribuição*. 2016. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/qualidade-na-distribuicao>>. Acesso: 15 Mar. 2018. 27
- 12 PAULILO, G. Conceitos gerais sobre qualidade da energia. *O Setor Elétrico*, n. 84, p. 28–35, 2013. 27
- 13 MEDEIROS, E. L.; COSTA, E. G. da; LIRA, G. R. de. Simulação e medição de distúrbios na qualidade da energia elétrica. 27

- 14 UBERLÂNDIA, U. F. de. *Regulamentação e normas nacionais e internacionais e as principais pesquisas já realizadas no Brasil e no exterior*. [S.l.], 2014. 28
- 15 PRODIST, P. de Distribuição de Energia Elétrica no S. E. N. Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. 10. ed. [S.l.], 2018. 29, 30, 35, 36, 37, 52, 114
- 16 DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN, M. F.; BEATY, H. W. *Electrical power systems quality*. New York, NY: McGraw-Hill, 1996. 30, 31
- 17 FLANDOLI, F. *Medição de Harmônicas*. 2017. Disponível em: <<http://www.eletricistaconsciente.com.br/pontue/fasciculos/6-qualidade-da-energia-eletrica/medicao-de-harmonicas/>>, Acesso: 20 ago. 2019. 31
- 18 PIRES, I. A. *Caracterização de harmônicos causados por equipamentos eletroeletrônicos residenciais e comerciais no sistema de distribuição de energia elétrica*. Universidade Federal de Minas Gerais, 2006. 32
- 19 MOTA et al. *Diagnóstico da Qualidade da Energia Elétrica*. 2017. 33
- 20 ABIDIN, M. N. Z. *IEC 61000-3-2 Harmonics Standards Overview*. 2006. Disponível em: <[https://www.emcfastpass.com/wp-content/uploads/2017/04/Class\\_definitions.pdf](https://www.emcfastpass.com/wp-content/uploads/2017/04/Class_definitions.pdf)>, Acesso: 20 ago. 2019. 34
- 21 PAULILLO, G.; TEIXEIRA, M. Flutuações de tensão. *O Setor Elétrico*, n. 90, p. 38–47, 2013. 35
- 22 IEC, I. E. C. *Electromagnetic compatibility (EMC)*. 37, 47, 51, 52
- 23 BRAGA, N. *Como funcionam os LEDs (ART553)*. Disponível em: <<https://www.newtonbraga.com.br/index.php/como-funciona/4076-art553>>. Acesso: 17 set. 2019. 38
- 24 ELÉTRICA, M. da. *Como funcionam as lâmpadas LED*. 2006. Disponível em: <<https://www.mundodaeletrica.com.br/como-funcionam-as-lampadas-led/>>, Acesso: 02 jun. 2019. 38
- 25 SANTOS, T. S. dos et al. *Análise da eficiência energética, ambiental e econômica entre lâmpadas de LED e convencionais*. 2015. Disponível em: <[https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1413-41522015000400595](https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522015000400595)>, Acesso: 17 set. 2019. 38
- 26 USMAN, M. et al. Technical comparison of the domestic leds and cfls available on the australian market. In: IEEE. *2017 North American Power Symposium (NAPS)*. [S.l.], 2017. p. 1–6. 39, 40
- 27 ELETRÔNICA, N. *Como funciona a lâmpada fluorescente?* Disponível em: <<http://blog.novaeletronica.com.br/como-funciona-a-lampada-fluorescente/>>. Acesso: 17 set. 2019. 39
- 28 UNICAMP, L. de Iluminação. *LED - O que é, e como funciona*. Disponível em: <<https://hosting.iar.unicamp.br/lab/luz/dicasemail/led/dica36.htm>>. Acesso: 17 set. 2019. 40
- 29 ENERGIA HOWPUBLISHED = Disponível em: <<https://portaldaenergia.com/lampadas-de-led/>>, n. . A. Portal da. *Lâmpadas de Led: Saiba Tudo Sobre*. 40

- 30 INMETRO. *Lâmpadas LED*. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes/cartilhas/lampada-led/lampadaled.pdf>>. Acesso: 23 set. 2019. 40
- 31 OLIVEIRA, L. da V. G. *Materiais Elétricos*. Disponível em: <[http://www.geocities.ws/dranoel\\_2/vs.doc](http://www.geocities.ws/dranoel_2/vs.doc)>, Acesso: 02 jun. 2019. 42
- 32 SANTOS et al. Avaliação da vida Útil das lâmpadas a vapor de sódio de 70 w. In: *Revista Brasileira de Energia*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 71–87. 43
- 33 BORZANI, J. M. *Tipos de Lâmpadas Paisagismo*. 2013. Disponível em: <<http://joanamariaborzani.blogspot.com/2013/05/tipos-de-lampadas-paisagismo.html>>. Acesso: 28 set. 2019. 44
- 34 LED, M. *Como funciona uma lâmpada LED*. 2019. Disponível em: <<https://grupomegaled.com/2019/10/20/como-funciona-uma-lampada-led/>>. Acesso: 03 out. 2019. 44
- 35 INMETRO. *Inmetro nº 144, Requisitos de Avaliação da Conformidade para Lâmpadas LED com Dispositivo Integrado à Base*. [S.l.], 2015. 46
- 36 INMETRO. *Inmetro nº 389, Regulamento Técnico da Qualidade para Lâmpadas LED com Dispositivo de Controle Integrado à Base*. [S.l.], 2014. 46
- 37 BATISTA et al. Avaliação do impacto da portaria nº 144 do inmetro na qualidade das lâmpadas led. Congresso Brasileiro de Automática - CBA, 2018. 47, 60, 177, 178
- 38 INSTRUMENTS, C. *CIgui32 Help "IEC 61000-4-14 Voltage Fluctuations, 2006"*. [S.l.]. 48
- 39 CORPORATION, I. *Milpitas, CA- Datasheet*. [S.l.], 2009. 48
- 40 ARDUINO. *Manual Arduino Uno*. [S.l.]. 48
- 41 DRANETZ. *PowerGuide® 4400, USER'S GUIDE*. [S.l.], 2005. 49, 115, 164
- 42 ONS. *Submódulo 2.8 - Gerenciamento dos indicadores de desempenho da rede básica e de seus componentes*. [S.l.], 2008. 52
- 43 IEEE, I. de Engenheiros Eletricistas e E. *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*. [S.l.], 2014. 52
- 44 STD., E. *EN 50160 on "Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Public Distribution Systems"*. [S.l.], 2010. 52
- 45 SX, L. *Luminária/Refletor High Bay Iluminação Industrial e Comercial*. Disponível em: <<https://sxlighting.com.br/wp-content/uploads/2020/02/Ficha-T%C3%A9cnica-SX-LIH-Lumin%C3%A1ria-Refletor-Industrial-High-Bay.pdf>>. Acesso: 12 nov. 2019. 82
- 46 SX, L. *Luminária Pública Fortika Iluminação Pública*. Disponível em: <<https://sxlighting.com.br/wp-content/uploads/2020/02/Ficha-Tecnica-SX-INLPI-Luminaria-P%C3%BAblica-Fortika.pdf>>. Acesso: 12 nov. 2019. 82, 163, 164
- 47 CEMIG. 2019. 106, 108, 111, 113

- 
- 48 SANTOS, D. W. *DP World Santos*. Disponível em: <<http://www.dpworldsantos.com/dp-world-santos/quem-somos/>>. 163
- 49 GSI. *RT1194-18 - Análise da Qualidade da Energia: Falhas de Equipamentos e Operação dos Sistemas de Iluminação por LED*. 2018. 163
- 50 JESUS et al. Aplicação de filtros passa-baixa para redução das distorções das tensões e eliminação de ocorrências de “zero-crossings” - o caso do porto de santos”. In: SBQEE. *Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica - CBQEE*. [S.l.], 2019. 175
- 51 UDDIN, S. et al. Harmonics and thermal characteristics of low wattage led lamps. *Przeegląd Elektrotechniczny*, v. 88, n. 11a, p. 266–271, 2012. 178
- 52 BATISTA, A. L. d. A.; LOPES, B. R. Efeitos das flutuações de tensão em lâmpadas led e fluorescentes compactas. 2015. 178