

**GUSTAVO RODRIGUES DOS SANTOS**

**Identificação de problemas de qualidade de energia devido à interação com sistemas de iluminação LED e proposta de aplicação de filtros para mitigação de distúrbios**

**Gustavo Rodrigues dos Santos**

**Identificação de problemas de qualidade de energia devido à interação com sistemas de iluminação LED e proposta de aplicação de filtros para mitigação de distúrbios**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Octavio Mattos dos Reis

Coorientador: Prof. Me. Nelson Clodoaldo de Jesus

Guaratinguetá  
2022

|       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| S237i | <p>Santos, Gustavo Rodrigues dos</p> <p>Identificação de problemas de qualidade de energia devido à interação com sistemas de iluminação LED e proposta de aplicação de filtros para mitigação de distúrbios / Gustavo Rodrigues dos Santos – Guaratinguetá, 2022.</p> <p>76 f : il.</p> <p>Bibliografia: f. 75-76</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2022.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Luis Octavio Mattos dos Reis</p> <p>Coorientador: Prof. Me. Nelson Clodoaldo de Jesus</p> <p>1. Sistemas de energia elétrica. 2. Energia elétrica - Distribuição. 3. Diodos emissores de luz. I. Título.</p> <p>CDU 621.316</p> |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

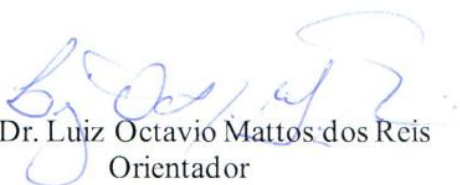
**GUSTAVO RODRIGUES DOS SANTOS**

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE  
DO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE  
“**GRADUADO(A) EM ENGENHARIA ELÉTRICA**”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE  
GRADUAÇÃO EM NOME DO CURSO

  
Prof. Dr. Daniel Julien Barros da Silva Sampaio  
Coordenador

**BANCA EXAMINADORA:**

  
Prof. Dr. Luiz Octavio Mattos dos Reis  
Orientador

  
Prof. Dr. Leonardo Mesquita  
UNESP-FEG

  
Prof. Me. José Marcelo de Assis Wendling Júnior  
UNESP-FEG

Agosto de 2022

## RESUMO

A crescente onda de projetos de eficiência energética, especialmente os relacionados com a difusão de sistemas de iluminação utilizando tecnologia LED, têm se tornado cada vez mais frequentes, bem como as discussões a respeito da influência nos índices de qualidade da energia pela aplicação em larga escala de dispositivos eletrônicos. Nesse contexto, o principal objetivo do trabalho é identificar e solucionar os problemas de qualidade da energia em um sistema elétrico que apresentava altos índices de distorção harmônica advindos de sua interação com equipamentos de iluminação LED. Após uma campanha de substituição dos refletores antigos da área externa de um sistema portuário, foram registrados mau funcionamento e queima de diversos equipamentos sensíveis, como câmeras de monitoramento e antenas de comunicação, que estavam conectados no quadro de distribuição junto a alimentação do sistema de iluminação. Com o intuito de caracterizar e identificar as possíveis causas dos problemas observados, foi realizada uma campanha de medição de qualidade da energia. Uma vez identificados os distúrbios, um modelo de filtro passivo foi desenvolvido para mitigação das distorções harmônicas presentes na alimentação dos equipamentos sensíveis, passando por validações em simulação, utilizando o programa ATPDraw, em laboratório e por meio de uma nova campanha de medição em campo, realizando testes de desempenho com um protótipo do filtro. Ao analisar os resultados da campanha de medição para caracterização do sistema, foram detectados altos índices de distorção harmônicas. Os distúrbios causados por essa condição surgiram da interação entre inter-harmônicos pré-existentes no sistema elétrico e os drivers utilizados nos refletores que compõe o novo sistema de iluminação, causando a amplificação das distorções harmônicas quando os refletores LED entram em operação e afetando o funcionamento dos equipamentos conectados no mesmo ponto de alimentação. Após a segunda campanha de medição, referente à análise operacional do protótipo do filtro, foi constatada uma redução significativa dos níveis de distorção harmônica no ponto de alimentação das cargas sensíveis, mesmo em condição de operação conjunta com os refletores, implicando na mitigação dos distúrbios de qualidade da energia e na validação da solução proposta.

**PALAVRAS-CHAVE:** Qualidade da energia elétrica. Harmônicos. Campanhas de medição. Sistemas de iluminação por LED. Filtros passivos.

## **ABSTRACT**

The growing wave of energy efficiency projects, especially those related to the diffusion of lighting systems using LED technology, have become more and more frequent, as well as the discussions regarding the influence on power quality indices by the large-scale application of electronic devices. In this context, the main objective of this paper is to identify and solve power quality problems in an electrical system that presented high levels of harmonic distortion due to its interaction with LED lighting equipment. After a campaign to replace the old reflectors in the external area of a port system, malfunctions and failures of several sensitive equipment were registered, such as monitoring cameras and communication antennas, which were connected to the distribution board along with the power supply of the lighting system. In order to characterize and identify the possible causes of the observed problems, a power quality measurement campaign was conducted. Once the disturbances were identified, a passive filter model was developed to mitigate the harmonic distortions present in the feeding of the sensitive equipment, going through validation in simulation, using the ATPDraw program, in laboratory and through a new measurement campaign in field, performing performance tests with a prototype of the filter. When analyzing the results of the measurement campaign for system characterization, high harmonic distortion rates were detected. The disturbances caused by this condition arose from the interaction between pre-existing inter-harmonics in the electrical system and the drivers used in the reflectors that compose the new lighting system, causing the amplification of the harmonic distortions when the LED reflectors come into operation and affecting the operation of the equipment connected to the same power supply point. After the second measurement campaign, referring to the operational analysis of the prototype filter, a significant reduction in the levels of harmonic distortion at the feeding point of the sensitive loads was verified, even in joint operation condition with the reflectors, implying the mitigation of power quality disturbances and the validation of the proposed solution.

**KEYWORDS:** Power Quality. Harmonics. Measuring campaigns. LED lighting systems. Passive filters.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Perturbações típicas em sistemas elétricos.....                                                                                             | 16 |
| Figura 2 – Definição de potência fornecida a uma carga .....                                                                                           | 18 |
| Figura 3 – Triângulo de potências para tensões e correntes senoidais .....                                                                             | 20 |
| Figura 4 – Carga indutiva: (a) sem compensação reativa; (b) com compensação reativa....                                                                | 21 |
| Figura 5 – Influência da correção do fator de potência sobre o triângulo de potências .....                                                            | 22 |
| Figura 6 – Decomposição de uma forma de onda distorcida através da série de Fourier ....                                                               | 24 |
| Figura 7 – Espectro harmônico de uma onda com predominância de harmônicos ímpares                                                                      | 25 |
| Figura 8 – Espectro harmônico de uma onda com presença de inter-harmônicos .....                                                                       | 27 |
| Figura 9 – Comparação entre custo e desempenho de algumas técnicas de mitigação de harmônicos .....                                                    | 32 |
| Figura 10 – Topologias comuns de filtros harmônicos passivos do tipo <i>shunt</i> .....                                                                | 33 |
| Figura 11 – Formas de onda de tensão e corrente de um aquecedor elétrico .....                                                                         | 34 |
| Figura 12 – Formas de onda de tensão e corrente de um retificador monofásico .....                                                                     | 35 |
| Figura 13 – Retificador trifásico de seis pulsos aplicado a um drive de velocidade ajustável para motores .....                                        | 36 |
| Figura 14 – Forma de onda da corrente drenada por um retificador trifásico de seis pulsos                                                              | 36 |
| Figura 15 – Espectro harmônico característico para um retificador trifásico de seis pulsos                                                             | 36 |
| Figura 16 – Diagrama de blocos de um driver de LED.....                                                                                                | 37 |
| Figura 17 – Diagrama unifilar simplificado do sistema em análise .....                                                                                 | 41 |
| Figura 18 – Exemplo de Refletores LED utilizados em iluminação externa .....                                                                           | 41 |
| Figura 19 – Medidor de qualidade da energia modelo PX5.....                                                                                            | 44 |
| Figura 20 – Comportamento das distorções das tensões .....                                                                                             | 45 |
| Figura 21 – Comportamento das tensões e correntes de alimentação do nobreak sem a presença da iluminação por LED: (a) instante 1; (b) instante 2 ..... | 45 |
| Figura 22 – Espectros harmônicos das correntes de alimentação do nobreak sem a iluminação por LED: (a) instante 1; (b) instante 2 .....                | 46 |
| Figura 23 – Espectro harmônico completo das tensões sem a iluminação LED.....                                                                          | 46 |
| Figura 24 – Detalhes dos componentes inter-harmônicos nas tensões sem a iluminação LED .....                                                           | 47 |
| Figura 25 – Forma de onda das tensões e correntes durante medições na operação do sistema com iluminação LED.....                                      | 47 |

|                                                                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 26 – Espectros harmônicos das tensões na operação do sistema com iluminação LED .....                       | 48 |
| Figura 27 – Espectros harmônicos das correntes na operação do sistema com iluminação LED .....                     | 48 |
| Figura 28 – Medições das tensões com zero-crossings .....                                                          | 49 |
| Figura 29 – Distorções das tensões no lado de 13,8 kV .....                                                        | 49 |
| Figura 30 – Tensões no lado de 13,8 [kV] com a operação dos sistemas LEDs .....                                    | 50 |
| Figura 31 – Tensões no lado de 13,8 [kV] sem a operação dos sistemas LEDs .....                                    | 50 |
| Figura 32 – Espectro harmônico das tensões em 13,8 kV com a iluminação LED.....                                    | 51 |
| Figura 33 – Espectro harmônico das tensões em 13,8 kV sem a iluminação LED .....                                   | 51 |
| Figura 34 – Correntes eficazes de alimentação no teste dos refletores .....                                        | 52 |
| Figura 35 – Distorção das correntes no teste do sistema dos refletores .....                                       | 52 |
| Figura 36 – Formas de onda das tensões e correntes para operação com três refletores.....                          | 53 |
| Figura 37 – Espectro harmônico das correntes para operação com três refletores.....                                | 53 |
| Figura 38 – Topologia do sistema em análise .....                                                                  | 56 |
| Figura 39 – Análise da resposta em frequência do filtro LC para diferentes valores de capacitância .....           | 57 |
| Figura 40 – Simulação das correntes de operação do filtro LC.....                                                  | 57 |
| Figura 41 – Simulação das tensões na entrada e saída do filtro LC .....                                            | 58 |
| Figura 42 – Comparação entre as simulações dos espectros harmônicos das tensões de entrada e saída do filtro ..... | 58 |
| Figura 43 – Diagrama unifilar do sistema com a implementação do filtro LC .....                                    | 59 |
| Figura 44 – Layout básico proposto para o filtro LC .....                                                          | 59 |
| Figura 45 – Tensões na entrada e saída do filtro LC: medição em laboratório .....                                  | 61 |
| Figura 46 – Comparação entre os espectros harmônicos das tensões de entrada e saída do filtro .....                | 61 |
| Figura 47 – Diagrama unifilar do sistema durante teste de desempenho do filtro LC .....                            | 62 |
| Figura 48 – Carga de iluminação LED utilizada nos testes.....                                                      | 63 |
| Figura 49 – Disposição dos equipamentos durante teste .....                                                        | 63 |
| Figura 50 – Tensões do filtro LC durante manobra de energização.....                                               | 64 |
| Figura 51 – Tensões e correntes do filtro LC durante manobra de desenergização .....                               | 64 |
| Figura 52 – Comportamento dos valores eficazes das tensões do filtro.....                                          | 64 |
| Figura 53 – Forma de onda das tensões do filtro em operação a vazio .....                                          | 65 |
| Figura 54 – Espectro harmônico das tensões do filtro em operação a vazio.....                                      | 65 |

|                                                                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 55 – Distorções médias das tensões de entrada e saída do filtro.....                                                        | 66 |
| Figura 56 – Comportamento do valor eficaz da corrente do filtro em operação a vazio .....                                          | 66 |
| Figura 57 – Formas de onda das tensões do filtro LC com iluminação LED .....                                                       | 67 |
| Figura 58 – Espectros harmônicos das tensões do filtro LC com iluminação LED .....                                                 | 67 |
| Figura 59 – Correntes do filtro LC com a iluminação LED em operação.....                                                           | 68 |
| Figura 60 – Espectro harmônico das correntes de operação do filtro LC .....                                                        | 68 |
| Figura 61 – Distorção harmônica total instantânea das tensões na entrada e saída do filtro                                         | 70 |
| Figura 62 – Distorção harmônica individual da componente de 32a ordem das tensões de entrada e saída do filtro .....               | 70 |
| Figura 63 – Distorção harmônica individual da componente de 36a ordem das tensões de entrada e saída do filtro .....               | 71 |
| Figura 64 – Formas de onda das tensões de entrada e saída do filtro com os sistemas de iluminação LED em plena operação.....       | 72 |
| Figura 65 – Espectros harmônico das tensões de entrada e saída do filtro com os sistemas de iluminação LED em plena operação ..... | 72 |

## LISTA DE QUADROS

|                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------|----|
| Quadro 1 – Definição das componentes harmônicas e inter-harmônicas..... | 27 |
| Quadro 2 – Características do analisador de qualidade da energia .....  | 44 |
| Quadro 3 – Características do filtro LC.....                            | 60 |
| Quadro 4 – Características dos indutores do filtro .....                | 60 |
| Quadro 5 – Características dos capacitores do filtro .....              | 60 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 – Limites da distorção da tensão no PAC: IEEE std 519-2014 .....                                                                         | 29 |
| Tabela 2 – Limites da distorção dos harmônicos de corrente no PAC para sistemas com tensões nominais entre 120 V e 69 kV: IEEE std 519-2014 ..... | 30 |
| Tabela 3 – Limites das distorções harmônicas totais de tensão: Prodist .....                                                                      | 31 |
| Tabela 4 – Limites das distorções harmônicas individuais de tensão: Prodist.....                                                                  | 31 |
| Tabela 5 – Limites das distorções de corrente individuais para equipamentos Classe C.....                                                         | 38 |
| Tabela 6 – Características da luminária LED .....                                                                                                 | 42 |
| Tabela 7 – Características do driver da luminária LED .....                                                                                       | 42 |
| Tabela 8 – Comparação entre a distorção das correntes dos refletores e os limites definidos por norma.....                                        | 54 |
| Tabela 9 – Análise das medições do filtro.....                                                                                                    | 69 |
| Tabela 10 – Comparação entre os principais componentes harmônicos individuais do sistema .....                                                    | 71 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|         |                                                                                |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------|
| ANEEL   | Agência Nacional de Engenharia Elétrica                                        |
| ATP     | <i>Alternative Transients Program</i>                                          |
| DHI     | Distorção Harmônica Individual                                                 |
| DHT     | Distorção Harmônica Total                                                      |
| EMC     | <i>Electromagnetic compatibility</i>                                           |
| EMTP    | <i>Electromagnetic Transients Program</i>                                      |
| IEC     | <i>International Electrotechnical Commission</i>                               |
| IEEE    | <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>                       |
| Inmetro | Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia                       |
| LED     | Light Emitting Diode                                                           |
| NBR     | Norma Brasileira Registrada                                                    |
| ONS     | Operador Nacional do Sistema Elétrico                                          |
| PAC     | Ponto de Acoplamento Comum                                                     |
| p.u     | Por unidade                                                                    |
| PRODIST | Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional |
| RMS     | <i>Root Mean Square</i>                                                        |
| QEE     | Qualidade da Energia Elétrica                                                  |

## SUMÁRIO

|          |                                                                                |           |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                                        | <b>12</b> |
| 1.1      | OBJETIVOS PROPOSTOS .....                                                      | 13        |
| 1.2      | ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....                                                   | 13        |
| <b>2</b> | <b>ASPECTOS CONCEITUAIS.....</b>                                               | <b>15</b> |
| 2.1      | QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA .....                                            | 15        |
| 2.2      | SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA.....                                            | 17        |
| 2.2.1    | Potência ativa, reativa, aparente e fator de potência .....                    | 17        |
| 2.2.2    | Correção de fator de potência .....                                            | 21        |
| 2.3      | HARMÔNICOS .....                                                               | 22        |
| 2.3.1    | Harmônicos em sistemas de potência .....                                       | 23        |
| 2.3.2    | Inter-harmônicos .....                                                         | 27        |
| 2.3.3    | Limites definidos por normas.....                                              | 28        |
| 2.3.4    | Mitigação de harmônicos .....                                                  | 31        |
| 2.3.5    | Caracterização de cargas do sistema elétrico .....                             | 34        |
| 2.4      | SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO POR LED .....                                           | 36        |
| 2.5      | SIMULAÇÃO DE SISTEMAS DE POTÊNCIA POR SOFTWARE .....                           | 38        |
| <b>3</b> | <b>ESTUDO DE CASO: SISTEMA ELÉTRICO PORTUÁRIO .....</b>                        | <b>40</b> |
| 3.1      | DADOS DO SISTEMA ELÉTRICO.....                                                 | 40        |
| 3.2      | CAMPANHA DE MEDIÇÕES DE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA ..                       | 43        |
| 3.2.1    | Sistema de alimentação do nobreak e iluminação LED.....                        | 44        |
| 3.2.2    | Sistema de distribuição em 13,8 kV .....                                       | 49        |
| 3.2.3    | Medições da operação da iluminação LED em outro sistema elétrico .....         | 51        |
| 3.2.4    | Análise do desempenho atual do sistema .....                                   | 54        |
| 3.3      | PROPOSTA DE FILTRO PARA MITIGAÇÃO DAS PERTURBAÇÕES.....                        | 55        |
| 3.3.1    | Modelagem e simulação do filtro .....                                          | 56        |
| 3.3.2    | Características do filtro passa-baixa LC.....                                  | 58        |
| 3.3.3    | Análise comparativa com testes em laboratório .....                            | 60        |
| <b>4</b> | <b>VALIDAÇÃO DO PROTÓTIPO DO FILTRO LC ATRAVÉS DE TESTES<br/>EM CAMPO.....</b> | <b>62</b> |
| 4.1      | MANOBRAS DE CHAVEAMENTOS DO FILTRO E OPERAÇÃO À VAZIO .                        | 63        |
| 4.2      | OPERAÇÃO COM OS SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO LED .....                               | 66        |
| <b>5</b> | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>                                               | <b>73</b> |
|          | <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                                       | <b>75</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

A qualidade da energia elétrica tem se tornado um tema cada vez mais significativo entre os profissionais das áreas de transmissão, de distribuição e dos sistemas elétricos industriais, sendo um ponto de interesse tanto para as concessionárias quanto para seus consumidores. Com o aumento do uso de cargas de comportamento não linear, especialmente em equipamentos que utilizam componentes semicondutores, é fundamental que se entenda as consequências dos distúrbios provocados sobre o sistema elétrico e como solucioná-los.

Uma das grandes questões envolvida nos estudos de qualidade da energia é a dos altos índices de harmônicos. Quando injetados na rede, além de provocarem distorções das formas de onda de tensão e corrente em um sistema de elétrico, tendem também a aumentar as perdas por efeito Joule, modificar a natureza do sistema elétrico em termos das energias envolvidas, aumentar as perdas magnéticas, possibilidade de saturação em transformadores ou ainda gerar interferências em sistemas de telecomunicação. Como consequência direta, estes distúrbios podem acarretar superaquecimento em motores elétricos, transformadores e cabos de energia, estufamento de capacitores utilizados para compensação de potência reativa e falhas indevidas em relés de proteção, bem como afetar a operação de outros equipamentos eletrônicos sensíveis (KUSKO, 2007).

A difusão de sistemas de iluminação utilizando tecnologia LED (diodo emissor de luz) tem se tornado cada vez mais abrangente e atrativa sob o ponto de vista de eficiência energética. Um ponto a ser debatido nesse contexto é a crescente onda de projetos de eficiência energética em sistemas existentes que, geralmente, têm seu foco voltado apenas para a diminuição do consumo de energia, sem que se dê a devida atenção às novas implicações que podem surgir junto a essas soluções. A ampla substituição dos sistemas de iluminação antigos, geralmente compostos por lâmpadas incandescentes ou vapor metálico, pela tecnologia LED pode ser citada como exemplo. Esse tipo de projeto realmente apresenta uma significativa diminuição do consumo de energia, mas implica também no aumento considerável de novas cargas eletrônicas em sistemas antigos, o que pode causar interações indesejáveis e aumento significativo nos níveis de harmônicos.

Uma das formas de contornar problemas relacionados a harmônicos – especialmente quando relacionados a alterações em um sistema elétrico que já esteja em operação – é a utilização de filtros para mitigação dos índices de distorção harmônica. A escolha desse tipo de solução é feita a partir de um estudo criterioso, envolvendo modelagem, simulações

e, se possível, medições de qualidade da energia no sistema em análise, sendo fundamentada em critérios técnicos, normativos e econômicos (KALAIR, 2017).

Este trabalho de graduação propõe o desenvolvimento de um estudo sobre a influência da interação da iluminação LED com sistemas elétricos que apresentam altos índices de distorção harmônica e a avaliação de um filtro passivo para mitigação dos problemas de qualidade da energia elétrica diante das características do sistema em estudo.

## 1.1 OBJETIVOS PROPOSTOS

O principal objetivo do trabalho é identificar e solucionar os problemas relacionados à qualidade da energia em um sistema elétrico portuário com altos índices de distorção harmônica, advindos da interação com equipamentos de iluminação LED. Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Analisar o desempenho do sistema elétrico através de medições de qualidade da energia e identificar possíveis distúrbios;
- Desenvolver um modelo de filtro passivo para mitigar os distúrbios encontrados;
- Validar o modelo desenvolvido através de simulações por meio do software *ATPDraw* e por meio de uma nova campanha de medição em campo;
- Avaliar a implementação do modelo do filtro no sistema em questão, analisando os resultados das medições em campo após o teste com o protótipo desenvolvido.

## 1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho está dividido em cinco capítulos. O primeiro capítulo contém a parte introdutória e os objetivos do trabalho.

No segundo capítulo consta a revisão da literatura sobre o tema proposto, incluindo os aspectos conceituais relacionados à qualidade da energia elétrica, definições sobre sistemas elétricos de potência e harmônicos, além da conceituação básica de sistemas de iluminação LED.

A partir do capítulo três é apresentado o estudo de caso de sistema elétrico portuário, contendo os dados do sistema elétrico em análise, informações sobre a campanha de medição de qualidade da energia realizada para caracterizar os problemas envolvidos, análise de desempenho do sistema e uma proposta de filtro para mitigação das perturbações encontradas.

O capítulo quatro trata sobre a validação, durante testes em campo, do protótipo do filtro desenvolvido, envolvendo a caracterização de seu funcionamento em conjunto com os refletores LED no sistema elétrico portuário e sua análise de desempenho operacional.

Por fim, o capítulo cinco traz as considerações finais do estudo realizado.

## 2 ASPECTOS CONCEITUAIS

### 2.1 QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

Seja em âmbito industrial, comercial ou até mesmo residencial, a qualidade da energia elétrica está se tornando um tema cada vez mais em pauta. A implementação de cargas eletrônicas de potência considerável e o aumento progressivo de conexões com sistemas de geração distribuída, por exemplo, acrescentam certa complexidade aos sistemas elétricos, implicando em condições em que o fluxo de potência deixa de ser apenas em um sentido e no comportamento não senoidal das tensões.

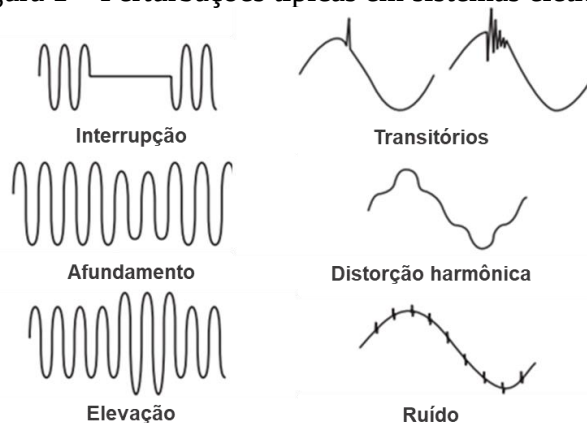
De acordo com Dugan (2002), são quatro as principais razões para o aumento das preocupações sobre qualidade da energia:

- A utilização de equipamentos baseados em microprocessadores e dispositivos eletrônicos de potência que são mais sensíveis às variações da qualidade de energia do que os equipamentos usados no passado;
- A ênfase na eficiência geral dos sistemas de potência, que resultou no crescimento da aplicação de acionamentos de motores de alta eficiência e velocidade ajustável e bancos de capacitores para correção de fator de potência e redução de perdas. Embora o aumento da eficiência seja interessante, surgem também os problemas relacionados ao aumento nos níveis de harmônicos;
- Os consumidores finais estão cada vez mais conscientes sobre os problemas de qualidade da energia e estão se tornando mais bem informados sobre questões como interrupções no fornecimento, afundamentos e problemas relacionados a transitórios, desafiando as concessionárias a melhorar a qualidade da energia fornecida;
- Diversos equipamentos e sistemas estão interconectados em uma rede de distribuição. Assim, falhas e mau funcionamento de qualquer componente conectado à rede têm consequências muito mais severas.

De forma geral, a qualidade da energia elétrica está associada a uma série de fatores que podem afetar ou comprometer os serviços de suprimento de energia. A tensão fornecida deve apresentar uma forma de onda senoidal, com valores de amplitude e frequência garantidos dentro do especificado e os níveis de distorção harmônica também devem ser seguidos. Em sistemas trifásicos, deve também ser levando em conta a defasagem de  $120^\circ$

entre as três tensões de linha fornecidas (KUSKO, 2007). Qualquer perturbação significativa na forma de onda, amplitude ou frequência da tensão caracteriza uma rede elétrica com qualidade comprometida. Com o intuito de ilustrar algumas dessas condições, um conjunto de formas de onda para típicas perturbações em redes elétricas é mostrado na Figura 1. Nessa figura, interrupções, afundamentos e elevações são distúrbios relacionados à amplitude da tensão. No caso de transitórios, distorções harmônicas e ruídos, as perturbações estão mais ligadas ao comprometimento da frequência e da forma de onda.

Figura 1 – Perturbações típicas em sistemas elétricos



Fonte: Adaptado de Kusko (2007).

Existem definições completamente diferentes sobre o que o conceito de qualidade da energia deve representar. Um fabricante de equipamentos elétricos, por exemplo, define como qualidade as características da energia suprida que permite o bom funcionamento de seu equipamento. Por outro lado, esse conceito também pode ser definido pelas concessionárias responsáveis por suprir o fornecimento de energia para determinada região. (DUGAN, 2002). Torna-se necessário, então, que existam certos critérios estabelecidos por normas e orientações, geralmente fornecidas por agentes regulatórios, como a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), no caso do Brasil.

Segundo ANEEL (2021), através do documento de Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no sistema Elétrico Nacional (PRODIST), no Módulo 8, a qualidade da energia elétrica deve ser a combinação entre três fatores:

- Qualidade do produto: baseado em indicadores e valores de referência para a energia fornecida, tratando de fenômenos em regime permanente ou transitório.
- Qualidade do fornecimento: baseado em indicadores de continuidade e nos tempos de atendimento a ocorrências emergenciais, estabelecendo procedimentos relativos

à qualidade do serviço prestado pelas distribuidoras aos consumidores, centrais geradoras e distribuidoras acessantes.

- Qualidade no tratamento de reclamações: baseado na agilidade operacional para atender as expectativas do cliente.

Por fim, o critério que mais interessa quando se fala em qualidade da energia é o valor econômico, já que existem impactos econômicos significativos nas concessionárias, seus clientes e até mesmo em fornecedores de equipamentos (DUGAN, 2022). Nos casos industriais, a contínua substituição de equipamentos antigos por seus equivalentes mais modernos e mais eficientes implica no aumento do número de equipamentos controlados eletronicamente, geralmente mais sensíveis a variações de tensão que seus predecessores eletromecânicos. Há também certas desvantagens nessa substituição, sendo a maior delas o aumento significativo de equipamentos constituídos por estruturas chaveadas a partir de semicondutores, causando altas distorções de corrente e tensão que afetam diretamente o funcionamento dos próprios equipamentos, o sistema elétrico a eles conectado e seus índices de qualidade de energia.

## 2.2 SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Quando se trata de sistemas elétricos de potência, determinados conceitos têm extrema importância na análise dos fenômenos físicos relacionados à energia elétrica. Ao decorrer deste trabalho, diversos termos e equações referentes às potências ativa, reativa e aparente serão utilizados, bem como a teoria básica sobre fator de potência e os métodos para sua correção (compensação reativa). Além disso, também serão estudados os conceitos básicos de chaveamento de componentes capacitivos.

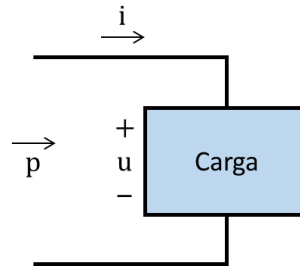
Vale ressaltar que, neste primeiro momento, as análises serão realizadas considerando sistemas elétricos supridos por fontes de tensão senoidais alimentando cargas lineares. Tendo em vista o entendimento dos conceitos em regimes puramente senoidais, uma abordagem levando em conta cargas não-lineares e a presença de harmônicos será realizada posteriormente.

### 2.2.1 Potência ativa, reativa, aparente e fator de potência

Considerando um circuito elétrico composto por uma fonte de tensão senoidal alimentando uma carga, como o ilustrado na Figura 2, será estabelecida uma corrente elétrica no circuito proporcional à diferença de potencial da fonte e à característica da

carga. Nesta figura, a corrente é representada por  $i$ , a tensão na carga por  $u$  e a potência elétrica por  $p$ .

Figura 2 – Definição de potência fornecida a uma carga



Fonte: autor

Para a condição em que essa carga é puramente resistiva, têm-se a tensão representada pela equação (1) e a respectiva corrente pela equação (2). É interessante lembrar que para ondas senoidais a relação entre o valor máximo (de pico) e o valor eficaz (RMS) é igual a  $\sqrt{2}$ .

$$u(t) = U_{MAX} \cdot \text{sen}(\omega t) = \sqrt{2} U_1 \text{sen}(\omega t) \dots\dots\dots (1)$$

$$i(t) = I_{MAX} \cdot \text{sen}(\omega t) = \sqrt{2} I_1 \text{sen}(\omega t) \dots\dots\dots (2)$$

Sendo:

$u(t)$ : Valor instantâneo da tensão no circuito;

$i(t)$ : Valor instantâneo da corrente no circuito;

$U_1$ : Valor da tensão eficaz do circuito na frequência fundamental;

$I_1$ : Valor da corrente eficaz do circuito na frequência fundamental;

$\omega$ : Frequência angular da onda senoidal.

A potência ativa (média, útil ou eficaz) nesse circuito será igual ao valor médio do produto dos valores instantâneos da tensão pela corrente, conforme mostra a equação (3).

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T U_{MAX} \cdot \text{sen}(\omega t) \cdot I_{MAX} \cdot \text{sen}(\omega t) dt \dots\dots\dots (3)$$

No caso específico onde a carga considerada é linear, as tensões e correntes são senoidais e a solução da equação (3) passa a ser a expressão (4), que consiste no produto dos valores eficazes de tensão e correntes na frequência fundamental.

$$P = U_1 \cdot I_1 \dots\dots\dots (4)$$

Já para cargas indutivas ou capacitivas, é necessário considerar também o ângulo de deslocamento existente entre tensão e corrente. Esse ângulo pode ser definido conforme a equação (5).

$$\varphi_1 = \varphi_{u1} - \varphi_{i1} \dots\dots\dots (5)$$

Sendo:

$\varphi_1$ : ângulo de deslocamento da corrente em relação à tensão na frequência fundamental;

$\varphi_{u1}$ : ângulo de fase da tensão na frequência fundamental;

$\varphi_{i1}$ : ângulo de fase da corrente na frequência fundamental.

Assim, a potência ativa na frequência fundamental pode ser escrita em sua forma geral, considerando cargas resistivas, capacitivas ou indutivas, conforme descrito na equação (6). Nessa equação, pode-se observar o acréscimo do termo  $\cos(\varphi_1)$ , também chamado de fator de deslocamento.

$$P = U_1 \cdot I_1 \cdot \cos(\varphi_1) \dots\dots\dots (6)$$

Da equação anterior, nota-se que quanto maior o ângulo de deslocamento, maior deverá ser o valor eficaz da corrente para produzir a mesma potência ativa. Nesse contexto, um parâmetro útil para a descrição e análise desses tipos de circuito é a potência aparente. Essa potência é obtida pelo produto do valor eficaz de tensão pelo valor eficaz da corrente, independentemente de sua forma de onda, e é demonstrada pela equação (7).

$$S = U_{RMS} \cdot I_{RMS} \dots\dots\dots (7)$$

Para quantificar a relação entre as potências ativa e aparente, utiliza-se o fator de potência, dado pela equação (8).

$$FP = \frac{P}{S} \dots\dots\dots (8)$$

Sendo:

FP: Fator de potência

P: Potência ativa

S: Potência aparente

Em condições de tensões e correntes puramente senoidais, o fator de potência é numericamente igual ao fator de deslocamento, como demonstra a equação (9). Nessa condição, pode-se considerar que as tensões e correntes eficazes na frequência fundamental são iguais aos seus respectivos valores eficazes totais, ou seja,  $U_1=U_{RMS}$  e  $I_1 = I_{RMS}$ .

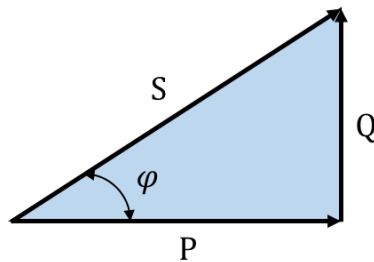
$$FP = \frac{P}{S} = \frac{U_1 \cdot I_1 \cdot \cos(\varphi_1)}{U_{RMS} \cdot I_{RMS}} = \cos(\varphi_1) \dots \dots \dots (9)$$

Já a diferença entre as potências ativa e aparente é denominada como potência reativa. Essa grandeza é definida pela equação (10).

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \dots \dots \dots (10)$$

Essas três potências também podem ser relacionadas no domínio vetorial, obtendo-se o triângulo de potências, como mostra a Figura 3.

Figura 3 – Triângulo de potências para tensões e correntes senoidais



Fonte: autor

As definições anteriores foram realizadas considerando apenas circuitos monofásicos. Entretanto, sabe-se que grande parte dos sistemas elétricos – especialmente os de potências mais elevadas – são trifásicos e, portanto, deve-se adaptar as equações anteriores para sua forma trifásica.

As potências ativa, reativa e aparente, adaptadas para sistemas trifásicos senoidais são dadas pelas equações (11), (12) e (13), respectivamente.

$$P = \sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos(\varphi_1) \dots \dots \dots (11)$$

$$Q = \sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \sin(\varphi_1) \dots \dots \dots (12)$$

$$S = \sqrt{3} \cdot U_{RMS} \cdot I_{RMS} \dots \dots \dots (13)$$

## 2.2.2 Correção de fator de potência

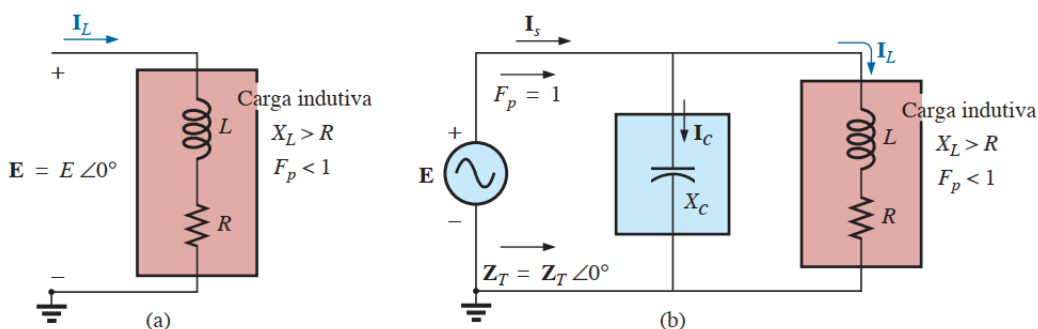
De acordo com Cogo (2018), o crescimento dos centros industriais se processa de maneira cada vez mais acelerada, e na grande maioria das vezes de modo desordenado, acarretando também a necessidade de efetuar o suprimento de energia elétrica para atender as demandas com limites adequados de segurança, confiabilidade e qualidade. O surgimento de novos consumidores caracterizados por diferentes tipos de cargas faz com que os concessionários mantenham certa fiscalização, com o intuito de evitar possíveis efeitos prejudiciais que essas novas cargas possam introduzir nos pontos de acoplamento com o sistema de distribuição. Um dos principais pontos a ser fiscalizado é o fator de potência, que deve ser mantido acima de um valor de referência para evitar perdas excessivas nos alimentadores do concessionário que suprem determinada carga.

Quando o fator de potência de uma instalação não atende ao valor mínimo de referência, multas ou compensação financeira são aplicadas pelos concessionários. Segundo a resolução 414 da ANEEL, o fator de potência de referência mínimo estabelecido é 0,92 indutivo ou capacitivo, dependendo do horário e tensão nominal do suprimento de energia (COGO, 2018).

O processo de introduzir elementos reativos para levar o fator de potência a um valor mais próximo da unidade (ou do valor de referência) é chamado de compensação ou correção do fator de potência. Como geralmente as cargas são indutivas, o processo normalmente envolve a introdução de elementos capacitivos com o objetivo de aumentar o fator de potência.

Embora o fator de potência possa ser melhorado através de diversos processos, a instalação de capacitores em paralelo com a carga é uma forma seguramente econômica e a mais utilizada. A Figura 4 ilustra essa topologia.

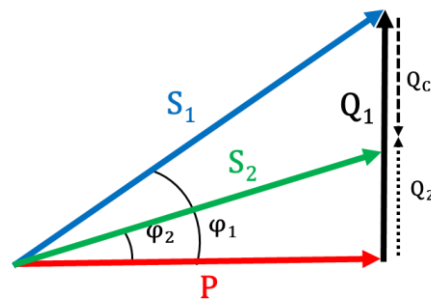
Figura 4 – Carga indutiva: (a) sem compensação reativa; (b) com compensação reativa



Fonte: Boylestad (2013).

Em condições em que as formas de onda de tensão e corrente são puramente senoidais e o sistema elétrico opera de forma equilibrada, pode-se observar a influência da correção do fator de potência sobre o triângulo de potências de um circuito, conforme ilustra a Figura 5. Pode-se observar, nesta figura, a diminuição do valor potência reativa original de um sistema ( $Q_1$ ) para um valor menor ( $Q_2$ ) através da utilização de bancos de capacitores ( $Q_C$ ).

Figura 5 – Influência da correção do fator de potência sobre o triângulo de potências



Fonte: autor

De maneira simplificada, a compensação reativa pode ser dada através da equação (14).

$$Q_C = P \cdot (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) \dots\dots\dots (14)$$

Sendo:

$Q_C$ : Potência reativa necessária;

$P$ : Potência ativa total;

$\varphi_1$ : Ângulo do atual fator de potência;

$\varphi_2$ : Ângulo do fator de potência desejado.

Também é interessante entender a influência dos harmônicos na alteração do fator de potência, fenômeno que será detalhado futuramente nesse trabalho.

## 2.3 HARMÔNICOS

Com o aumento de consumidores com cargas não lineares ligados nas redes de energia elétrica, têm-se tornado cada vez mais necessário levar em consideração a presença de harmônicos de corrente e tensão no planejamento e operação das redes (COGO, 2018). Isso se dá principalmente pela utilização em larga escala de acionamentos de velocidade

variável para motores, fontes chaveadas, fornos a arco, retificadores, sistemas de iluminação, bem como outras cargas não lineares que apresentam considerável influência na qualidade da energia nos sistemas elétricos. Vale ressaltar que essas cargas (ou o conjunto delas) devem apresentar uma elevada distorção de corrente aliada a uma potência significativa em relação à potência de curto-circuito do sistema para que de fato existam distorções que possam prejudicar os índices de qualidade e a operação do sistema em estudo.

Dentre os principais problemas que passam a existir com a operação na presença de harmônicos, Cogo (2018) cita:

- Redução do fator de potência;
- Aumento das quedas de tensão ao longo dos alimentadores;
- Atuação intempestiva de disjuntores, relés e fusíveis;
- Sobreaquecimento de transformadores e motores;
- Estufamento e explosões de capacitores;
- Corrente excessiva nos condutores neutros;
- Sobreensões e sobrecargas devido a ressonâncias;
- Danos e interferências em equipamentos sensíveis.
- Redução de vida útil de equipamentos;
- Erros de medição de grandezas elétricas.

Conforme Antunes (2013), os estudos de harmônicos são realizados para investigar o impacto de dispositivos não lineares, calcular os níveis de distorção harmônica, detectar condições de ressonância e determinar requisitos de filtragem em uma instalação ou sistema elétrico. A seguir, será discutida a influência de harmônicos em sistemas de potência, além de seus limites definidos por normas e algumas técnicas de mitigação.

### **2.3.1 Harmônicos em sistemas de potência**

Harmônicos, por definição, são ondas senoidais que possuem frequências múltiplas da frequência fundamental. Dessa forma, ondas de tensões ou correntes que não possuem formato puramente senoidal podem ser obtidas a partir do somatório de ondas senoidais em diversas frequências. O método normalmente empregado na identificação de componentes harmônicas presentes em uma onda não senoidal que se baseia nesse princípio é a análise da série trigonométrica de Fourier.

De acordo com esse teorema, uma forma de onda periódica qualquer pode ser expressa como a soma de ondas senoidais e cossenoidais de diferentes amplitudes onde a frequência de cada uma delas é um múltiplo da frequência fundamental. Essas senoides, cujas frequências são múltiplos inteiros da frequência fundamental são chamadas de componentes harmônicas da onda original.

Pode-se, então, expressar uma função periódica qualquer em um sistema com a presença de harmônicos através da equação (15) para tensões e da equação (16) para correntes.

$$v(t) = V_0 + V_1 \text{sen}(1\omega t + \varphi_1) + V_2 \text{sen}(2\omega t + \varphi_2) + \dots + V_h \text{sen}(h\omega t + \varphi_h) \dots \dots \dots (15)$$

$$i(t) = I_0 + I_1 \text{sen}(1\omega t + \varphi_1) + I_2 \text{sen}(2\omega t + \varphi_2) + \dots + I_h \text{sen}(h\omega t + \varphi_h) \dots \dots \dots (16)$$

Sendo:

$V_0$  e  $I_0$ : Valores médios de tensão e corrente (componente em corrente contínua)

$V_h$  e  $I_h$ : Amplitude do harmônico de ordem  $h$ ;

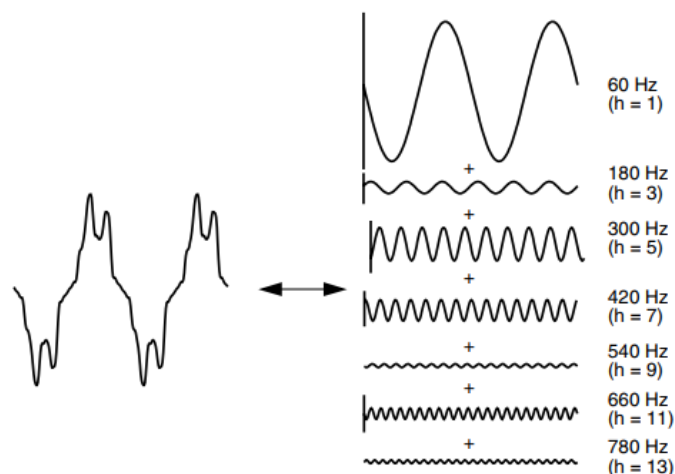
$\varphi_h$ : Ângulo de fase;

$\omega$ : Frequência angular da fundamental;

$h$ : Ordem do harmônico.

Para melhor visualização desse teorema, a Figura 6 ilustra a decomposição da forma de onda de um sinal que apresenta componentes harmônicas.

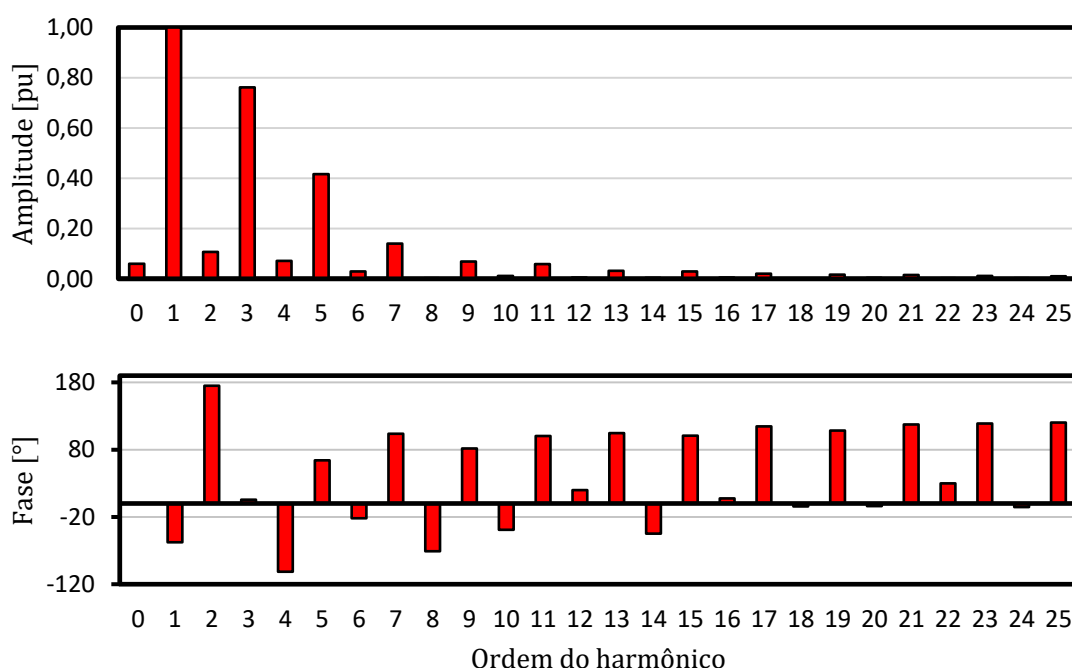
Figura 6 – Decomposição de uma forma de onda distorcida através da série de Fourier



Fonte: Dugan (2002).

Além da visualização das formas de onda que compõe um sinal, também é de interesse identificar o módulo da amplitude e a fase dessas componentes harmônicas de maneira mais intuitiva. Uma lista de frequências (ou ordens), amplitudes e ângulos de fase das componentes harmônicas é denominada “espectro harmônico da onda”. Essa informação é crítica na especificação do projeto de filtros harmônicos. A Figura 7 ilustra o espectro harmônico de uma onda que apresenta predominância de harmônicos ímpares. Os resultados são dados em relação ao valor da amplitude na frequência fundamental.

Figura 7 – Espectro harmônico de uma onda com predominância de harmônicos ímpares



Fonte: autor

Conhecendo os valores de tensões ou correntes harmônicas presentes no sistema, é possível utilizar procedimentos quantitativos para avaliar a influência do conteúdo harmônico em uma forma de onda. Assim, o desvio total de uma onda distorcida em relação à sua componente fundamental pode ser estimado com a ajuda do indicador Distorção Harmônica Total (DHT), um dos índices mais comumente usados para indicar o conteúdo harmônico em um sinal (IEEE, 2014).

A DHT pode ser definida como a medida do grau de distorção de uma onda em relação a uma onda senoidal pura, sendo seu valor nulo quando o sinal não apresenta componentes harmônicas, a qual pode ser empregada tanto para sinais de tensões como de correntes, conforme equações (17) e (18), respectivamente.

$$DHT_V = \frac{\sqrt{\sum_{h>1} V_h^2}}{V_1} \dots\dots\dots (17)$$

$$DHT_I = \frac{\sqrt{\sum_{h>1} I_h^2}}{I_1} \dots\dots\dots (18)$$

Do equacionamento para DHT anterior, pode-se inferir que o valor real das grandezas eficazes de tensão e corrente em regime permanente passam a considerar também os valores das componentes harmônicas. Assim, os valores de tensão e corrente eficazes são determinados através das equações (19) e (20), respectivamente.

$$V_{RMS} = \sqrt{V_1^2 + V_h^2} = V_1 \sqrt{1 + DHT_V^2} \dots\dots\dots (19)$$

$$I_{RMS} = \sqrt{I_1^2 + I_h^2} = I_1 \sqrt{1 + DHT_I^2} \dots\dots\dots (20)$$

Sendo  $V_h$  e  $I_h$  a raiz quadrada da somatória das componentes harmônicas da tensão e corrente, definidos pelas equações (21) e (22).

$$V_h = \sqrt{V_0^2 + \sum_{h \neq 1} V_h^2} \dots\dots\dots (21)$$

$$I_h = \sqrt{I_0^2 + \sum_{h \neq 1} I_h^2} \dots\dots\dots (22)$$

Para quantificar a distorção harmônica individual utiliza-se o chamado DHI, expresso para tensões e correntes nas equações (23) e (24), respectivamente.

$$DHI_V = \frac{V_h}{V_1} \dots\dots\dots (23)$$

$$DHI_I = \frac{I_h}{I_1} \dots\dots\dots (24)$$

O fator de potência também é prejudicado na presença de distorção harmônica, conforme mostra a equação (25).

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{V_1 \cdot I_1 \cdot \cos(\varphi_1)}{V_{RMS} \cdot I_{RMS}} = FDH_V \cdot FDH_I \cdot \cos(\varphi_1) \dots\dots\dots (25)$$

Com isso, o fator de potência real passa a ser função não só do fator de deslocamento entre os ângulos de tensão e corrente, como também há influência dos fatores de distorção de tensão ( $FDH_V$ ) e corrente ( $FDH_I$ ), que são expressos pelas equações (26) e (27).

$$FDH_V = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_V^2}} \dots\dots\dots (26)$$

$$FDH_I = \frac{1}{\sqrt{1+THD_I^2}} \dots \dots \dots (27)$$

### 2.3.2 Inter-harmônicos

Tendo em vista o estudo dos harmônicos em sistemas elétricos, é interessante ressaltar algumas particularidades que começam a surgir quando mais se é aprofundado nesse tema. Uma dessas particularidades, que está presente em diversos sistemas reais, são os inter-harmônicos. Pela definição da norma IEC 61000-3-2:2018 (IEC, 2018), frequências inter-harmônicas são quaisquer frequências múltiplas não inteiras da frequência fundamental. Dessa forma, as componentes harmônicas e inter-harmônicas podem ser definidas de uma forma relativamente simples e efetiva, como mostrado no Quadro 1. Outro termo bastante utilizado, porém, sem definição oficial, são os sub-harmônicos. Sub-harmônicos nada mais são que um caso especial dos inter-harmônicos, compostos por frequências entre zero e a frequência fundamental (MACEDO JÚNIOR, 2009).

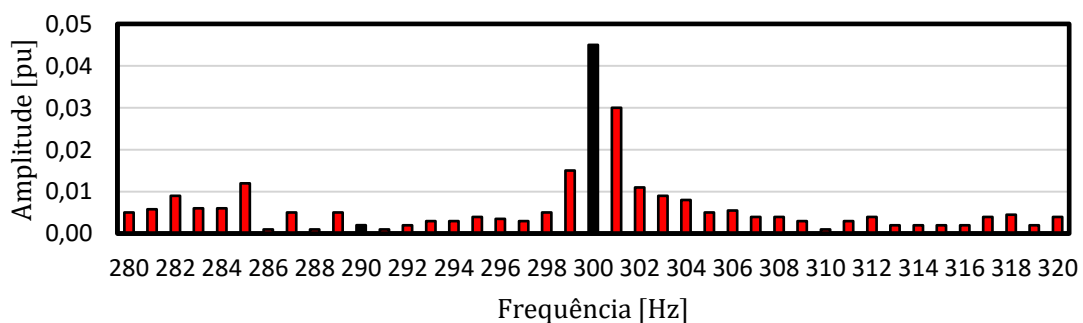
Quadro 1 – Definição das componentes harmônicas e inter-harmônicas

| Componente       | Frequência                     |
|------------------|--------------------------------|
| Harmônicos       | $f_h = h \cdot f_1$            |
| CC               | $f_0 = 0 \text{ Hz}$           |
| Inter-harmônicos | $f_{inter} \neq h \cdot f_1$   |
| Sub-Harmônicos   | $0 \text{ Hz} < f_{sub} < f_1$ |

Fonte: Macedo Júnior (2009).

Em termos práticos, frequências inter-harmônicas são frequências entre duas frequências harmônicas adjacentes. Esse fenômeno pode aparecer tanto na forma de frequências discretas quanto na forma de espectro de bandas (DUGAN, 2002). A Figura 8 ilustra um espectro harmônico de uma onda de corrente que apresenta componentes inter-harmônicas próximas à componente de 5ª ordem (300 Hz).

Figura 8 – Espectro harmônico de uma onda com presença de inter-harmônicos



Fonte: autor

De acordo com Macedo Júnior (2009), as componentes de frequências inter-harmônicas são geradas nos sistemas elétricos através da operação de cargas que possuem, de modo geral, as seguintes características:

- Variação ou flutuação da amplitude da componente fundamental e/ou de componentes harmônicas ao longo do tempo, como, por exemplo, verificado nos fornos a arco elétrico e máquinas de solda;
- Frequência de chaveamento estático, através de elementos de eletrônica de potência, de forma não sincronizada com a frequência fundamental do sistema, como verificado nos cicloconversores e demais equipamentos com topologia de dupla conversão (CA-CC para CC-CA).

As correntes inter-harmônicas geradas, especialmente, podem ocasionar a excitação de ressonâncias severas no sistema de potência à medida que a frequência inter-harmônica coincide com as frequências naturais do sistema. Um de seus efeitos mais simples de se observar são as cintilações visuais em sistemas de iluminação – também chamado de *flicker* – bem como o mau funcionamento de dispositivos eletrônicos sensíveis, como computadores e câmeras de monitoramento. Segundo Macedo Júnior (2009), dentre os principais efeitos relacionados a este fenômeno, cita-se:

- Falhas de sensores e equipamentos de comando elétrico que operam através da identificação da passagem por zero ou de pico dos valores instantâneos da tensão e/ou corrente elétrica;
- Aquecimento adicional em máquinas e condutores devido ao incremento de parcelas de perdas joule;
- Saturação de transformadores de corrente;
- Interferência em sistemas de telecomunicação;
- Flutuação de tensão, com grande probabilidade de geração do fenômeno de cintilação luminosa (*flicker*);
- Erros de medição em equipamentos destinados à monitoração de *flicker*

### 2.3.3 Limites definidos por normas

A fim de especificar os limites de distorção, dois fatos devem ser considerados. Primeiro, o número de fontes de harmônicos está crescendo. Segundo, a proporção de cargas puramente resistivas, que funcionam como elementos de amortecimento, está

diminuindo em relação à carga total (ANTUNES, 2013). Com isso, é de se esperar nos sistemas elétricos de potência níveis crescentes de harmônicos.

Neste aspecto, tanto o concessionário, responsável pela qualidade de suprimento da energia elétrica no ponto de acoplamento comum, ou seja, no ponto do sistema onde qualquer consumidor pode ser conectado, quanto os consumidores responsáveis por fontes poluidoras, devem manter os valores compatíveis com os máximos admitidos em documentos normativos.

A primeira norma que trata de limites de harmônicos a ser discutida neste trabalho é proposta no documento IEEE 519, 2014, *Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*, que apresenta uma abordagem conjunta entre concessionárias e consumidores para limitar o impacto de cargas não lineares, definindo níveis aceitáveis de distorção de tensão e corrente no PAC. Essa norma define as responsabilidades entre os consumidores, responsáveis por limitar a injeção de correntes harmônicas por seus equipamentos na rede, e as concessionárias, responsáveis por limitar a distorção total de tensão em seu sistema de distribuição. A Tabela 1 mostra os limites de distorção da tensão da recomendação do IEEE std 519-2014.

Tabela 1 – Limites da distorção da tensão no PAC: IEEE std 519-2014

| Tensão no PAC                           | Limite da distorção individual da tensão $DH_{I_V}$ (%) | Limite da distorção total da tensão $DHT_V$ (%) |
|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| $V \leq 1.0 \text{ kV}$                 | 5,0                                                     | 8,0                                             |
| $1\text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$    | 3,0                                                     | 5,0                                             |
| $69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$ | 1,5                                                     | 2,5                                             |
| $161 \text{ kV} < V$                    | 1,0                                                     | 1,5                                             |

Fonte: Adaptado de IEEE (2014).

Analogamente, a Tabela 2 mostra os limites de distorção dos harmônicos de corrente para sistemas com tensões nominais entre 120 V e 69 kV. Nessa tabela,  $I_{SC}$  representa o valor máximo de corrente de curto-circuito no PAC e  $I_L$  é a corrente máxima demandada pela carga (componente na frequência fundamental) no PAC sob condições normais de operação. Ressalta-se que os limites de DHI são aplicados somente aos componentes de ordem ímpar. Os componentes harmônicos de ordem par devem ser limitados em 25% dos limites estabelecidos para os componentes de ordem ímpar. Além

disso, distorções que resultam em componentes de corrente contínua, normalmente associadas à componente harmônica de ordem zero ( $I_0$ ), não são permitidas.

Tabela 2 – Limites da distorção dos harmônicos de corrente no PAC para sistemas com tensões nominais entre 120 V e 69 kV: IEEE std 519-2014

| $I_{SC}/I_L$ | Distorção Harmônica Individual de Corrente $DHI_I$ (%) |               |               |               |               | $DHT_I$ (%) |
|--------------|--------------------------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-------------|
|              | $3 < h < 11$                                           | $11 < h < 17$ | $17 < h < 23$ | $27 < h < 35$ | $35 < h < 50$ |             |
| $< 20$       | 4,0                                                    | 2,0           | 1,5           | 0,6           | 0,3           | 5,0         |
| 20 - 50      | 7,0                                                    | 3,5           | 2,5           | 1,0           | 0,5           | 8,0         |
| 50 - 100     | 10,0                                                   | 4,5           | 4,0           | 1,5           | 0,7           | 12,0        |
| 100 - 1000   | 12,0                                                   | 5,5           | 5,0           | 2,0           | 1,0           | 15,0        |
| $> 1000$     | 15,0                                                   | 7,0           | 6,0           | 2,5           | 1,4           | 20,0        |

Fonte: Adaptado de IEEE (2014).

Um ponto a ser observado é o de que, mesmo que os limites de distorção de tensão sejam atendidos no PAC, eles poderão ser excedidos onde a carga está conectada. Isso se deve ao fato de que essa norma não leva em consideração cada consumidor individualmente. Assim, como a distorção de tensão é o resultado das correntes harmônicas através da impedância da instalação, a distorção de tensão será sempre maior a jusante do PAC, onde as correntes harmônicas são geradas e a impedância da instalação é maior. Nota-se, então, que a presença de harmônicos é geralmente mais problemática nas instalações de consumidores do que na rede elétrica.

No cenário nacional, a ANEEL é o órgão responsável pela regulamentação do setor elétrico brasileiro e define um conjunto de regulamentos para o sistema de distribuição por meio dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (Prodist). No módulo 8 do Prodist, que trata sobre qualidade da energia elétrica, são definidos, entre outros, os limites operacionais aceitáveis para distorções harmônicas. Já para sistemas de transmissão, os critérios relacionados a esse tema são especificados nos Procedimentos de Rede do ONS.

As Tabelas 3 e 4, respectivamente, apresentam os valores de referência globais e individuais de tensão, baseando-se nos critérios presentes no Prodist. Esses limites não devem ser excedidos em nenhum ponto do sistema elétrico.

Tabela 3 – Limites das distorções harmônicas totais de tensão: Prodist

| Tensão nominal do barramento             | Distorção Harmônica Total de Tensão DHTv (%) |
|------------------------------------------|----------------------------------------------|
| $V \leq 1.0 \text{ kV}$                  | 10                                           |
| $1 \text{ kV} < V \leq 13,8 \text{ kV}$  | 8                                            |
| $13,8 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$ | 6                                            |
| $69 \text{ kV} < V \leq 138 \text{ kV}$  | 3                                            |

Fonte: Adaptado de ANEEL (2021).

Tabela 4 – Limites das distorções harmônicas individuais de tensão: Prodist

| Ordem                      | Distorção harmônica individual de tensão DHIv (%) |                                         |                                          |                                         |
|----------------------------|---------------------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------|
|                            | $V \leq 1.0 \text{ kV}$                           | $1 \text{ kV} < V \leq 13,8 \text{ kV}$ | $13,8 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$ | $69 \text{ kV} < V \leq 230 \text{ kV}$ |
| Ímpares não múltiplas de 3 |                                                   |                                         |                                          |                                         |
| 5                          | 7,5                                               | 6                                       | 4,5                                      | 2,5                                     |
| 7                          | 6,5                                               | 5                                       | 4                                        | 2                                       |
| 11                         | 4,5                                               | 3,5                                     | 3                                        | 1,5                                     |
| 13                         | 4                                                 | 3                                       | 2,5                                      | 1,5                                     |
| 17                         | 2,5                                               | 2                                       | 1,5                                      | 1                                       |
| 19                         | 2                                                 | 1,5                                     | 1,5                                      | 1                                       |
| 23                         | 2                                                 | 1,5                                     | 1,5                                      | 1                                       |
| 25                         | 2                                                 | 1,5                                     | 1,5                                      | 1                                       |
| >25                        | 1,5                                               | 1                                       | 1                                        | 0,5                                     |
| Ímpares múltiplas de 3     |                                                   |                                         |                                          |                                         |
| 3                          | 6,5                                               | 5                                       | 4                                        | 2                                       |
| 9                          | 2                                                 | 1,5                                     | 1,5                                      | 1                                       |
| 15                         | 1                                                 | 0,5                                     | 0,5                                      | 0,5                                     |
| 21                         | 1                                                 | 0,5                                     | 0,5                                      | 0,5                                     |
| >21                        | 1                                                 | 0,5                                     | 0,5                                      | 0,5                                     |
| Pares                      |                                                   |                                         |                                          |                                         |
| 2                          | 2,5                                               | 2                                       | 1,5                                      | 1                                       |
| 4                          | 1,5                                               | 1                                       | 1                                        | 0,5                                     |
| 6                          | 1                                                 | 0,5                                     | 0,5                                      | 0,5                                     |
| 8                          | 1                                                 | 0,5                                     | 0,5                                      | 0,5                                     |
| 10                         | 1                                                 | 0,5                                     | 0,5                                      | 0,5                                     |
| 12                         | 1                                                 | 0,5                                     | 0,5                                      | 0,5                                     |
| >12                        | 1                                                 | 0,5                                     | 0,5                                      | 0,5                                     |

Fonte: Adaptado de ANEEL (2021).

### 2.3.4 Mitigação de harmônicos

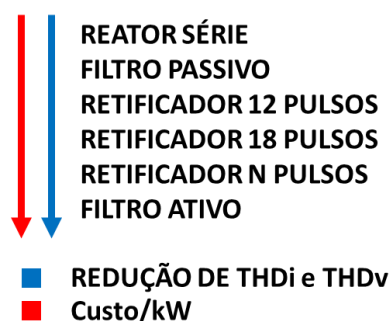
Em sistemas de potência reais, a distorção harmônica sempre estará presente em algum grau. Teoricamente, é necessário controlar os harmônicos apenas quando eles se

tornam um problema (ou quando, na inserção de novas cargas ou equipamentos, problemas são previstos). De modo geral, os princípios básicos para controlar os índices harmônicos são:

- Reduzir as correntes harmônicas produzidas pelas cargas;
- Utilizar filtros para desviar as correntes harmônicas do sistema, normalmente em derivação com a carga;
- Modificar a respostas de frequência do sistema por filtros, indutores e capacitores.

Além desses princípios básicos, Kalair (2017) cita algumas técnicas comuns de mitigação de harmônicos, como o uso de reatores série, transformadores de isolamento, transformadores com fator K maior que 1, filtros harmônicos passivos sintonizados, filtros harmônicos passa baixa, retificadores com elevado número de pulsos, deslocamento de fase em transformadores e filtros harmônicos ativos. A Figura 9 mostra uma comparação entre algumas dessas técnicas, levando em conta o desempenho perante aos níveis de distorção harmônica e o custo relativo por potência.

Figura 9 – Comparação entre custo e desempenho de algumas técnicas de mitigação de harmônicos



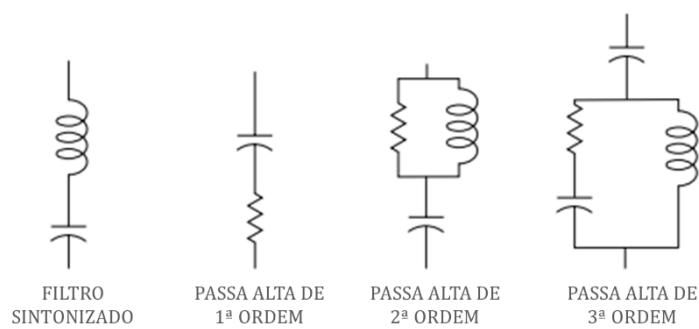
Fonte: autor

Como pode ser observado, o custo de investimento para mitigação de harmônicos aumenta junto com o nível de desempenho desejado e com a ordem de grandeza da potência instalada. Técnicas mais complexas, como filtros ativos, reduzem com maior eficiência os níveis de harmônicos, mas podem acabar inviáveis devido ao alto custo de implementação. Por outro lado, técnicas mais simples, como o uso de reatores série ou filtros passivos, podem ser menos custosos, porém em suas aplicações ocorrem limitações técnicas relacionadas às características do sistema elétrico estudado. Outra opção a ser considerada é o arranjo híbrido de filtros, utilizando a combinação de filtros passivos e ativos.

Nesse contexto, é interessante citar algumas das características da implementação de filtros harmônicos em sistemas de potência, que tem como principal função reduzir as amplitudes dos harmônicos de corrente, reduzindo, portanto, a distorção dos harmônicos de tensão em uma determinada faixa de frequência.

Na prática, a solução mais utilizada devido a sua baixa complexidade e custo são os filtros em derivação (ou *shunt*). Esse tipo de filtro é ligado em paralelo ao sistema, próximo à fonte de distorção, de forma a proporcionar um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas, que são desviadas de seu caminho normal de fluxo na linha através do filtro para a terra. A Figura 10 mostra algumas topologias usadas para esse tipo de aplicação.

Figura 10 – Topologias comuns de filtros harmônicos passivos do tipo *shunt*



Fonte: Adaptado de Dugan (2002).

Depois do reator série, a utilização de filtros passivos é a mais simples e econômica solução para harmônicos. Uma de suas vantagens é a de que, na frequência fundamental, os filtros *shunt* melhoram o fator de potência da instalação. Por outro lado, suas desvantagens incluem a possibilidade de sobrecarga, sensibilidade às condições da rede e interações adversas com a impedância do sistema e frequências de ressonância. Esse tipo de filtro é denominado passivo pois não altera dinamicamente suas características através de um sistema de controle, como é o caso dos filtros ativos.

Filtros ativos, por sua vez, são dispositivos projetados para reduzir a intensidade dos harmônicos nas mais diversas frequências. Seu funcionamento consiste em gerar, eletronicamente, harmônicos de corrente simétricos aos requeridos pelas cargas lineares, fazendo com que o sistema de suprimento de energia forneça apenas a corrente na frequência fundamental. Embora seu custo seja muito maior que a as alternativas baseadas em filtros passivos, apresentam como principal vantagem funcionar independentemente das características de impedância do sistema, evitando problemas relacionados a ressonâncias.

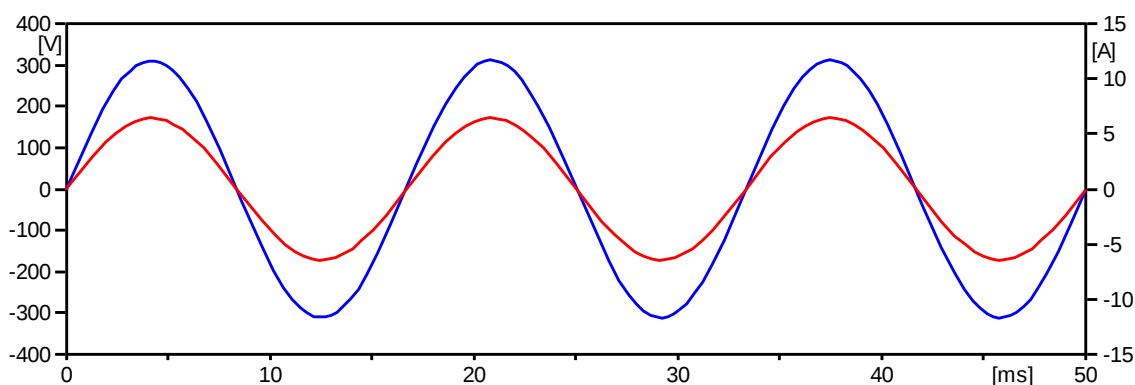
Geralmente sua utilização é empregada em condições críticas onde os filtros passivos não podem operar de maneira eficaz.

### 2.3.5 Caracterização de cargas do sistema elétrico

Para estudar as características dos sistemas elétricos é usual considerá-los como resultado da interligação e interação de diferentes componentes básicos, como fonte de alimentação, componentes de rede e carga elétrica (ANTUNES, 2013). Assim, algumas propriedades da energia elétrica dependem não só das características da energia fornecida pelo concessionário, mas também dos equipamentos nas instalações dos consumidores. Nesse contexto, as cargas elétricas de um sistema elétrico podem ser classificadas em dois tipos: cargas lineares e não lineares.

Segundo Cogo (2018), uma carga é linear quando a corrente que por ela circula é diretamente proporcional à tensão aplicada, ou seja, a corrente drenada apresenta mesma forma de onda da fonte de alimentação. Essas cargas são, em geral, constituídas por resistores, indutores não saturáveis e capacitores de valores fixos. Um exemplo de carga linear é o aquecedor elétrico resistivo que, quando alimentado por uma tensão senoidal, sua corrente é também senoidal, como mostrado na Figura 11.

Figura 11 – Formas de onda de tensão e corrente de um aquecedor elétrico



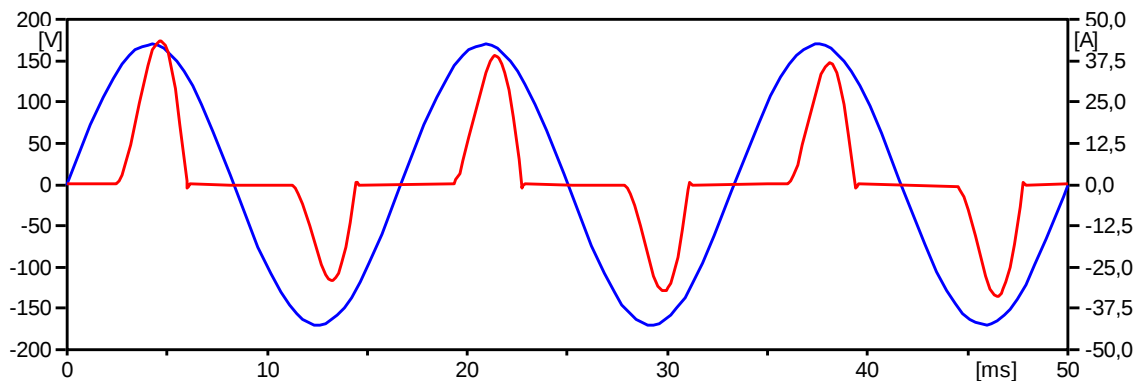
Fonte: Autor

Se a carga apresenta comportamento reativo, embora exista um deslocamento de fase entre a tensão e a corrente, ela também pode ser considerada linear, já que suas formas de onda de corrente e tensão continuam sendo proporcionais.

As cargas não lineares, por sua vez, são cargas nas quais a corrente que por elas circula não é diretamente proporcional à tensão de alimentação, ou seja, a relação não é constante. Logo, qualquer carga que requisite uma corrente não senoidal de uma tensão senoidal é denominada não linear. Exemplos desse tipo de carga são os dispositivos

saturáveis (como transformadores, máquinas elétricas e reatores de núcleo ferromagnético), inversores de frequência, fornos a arco, sistemas de iluminação e retificadores de potência. Um exemplo de carga não-linear é o retificador monofásico que, quando alimentado por uma tensão senoidal, drena uma corrente distorcida, como mostrado na Figura 12.

Figura 12 – Formas de onda de tensão e corrente de um retificador monofásico



Fonte: Autor

Atualmente, as instalações industriais modernas são caracterizadas pela ampla aplicação de cargas não lineares. Essas cargas podem constituir uma parte significativa das cargas totais da instalação e injetar correntes harmônicas no sistema de potência, causando distorções harmônicas de tensão (DUGAN, 2002). Um dos principais grupos de cargas não lineares utilizados amplamente na indústria são os conversores trifásicos de potência. Os conversores trifásicos geram componentes harmônicas características de acordo com a equação (28).

$$h = kq \pm 1 \dots\dots\dots (28)$$

Sendo:

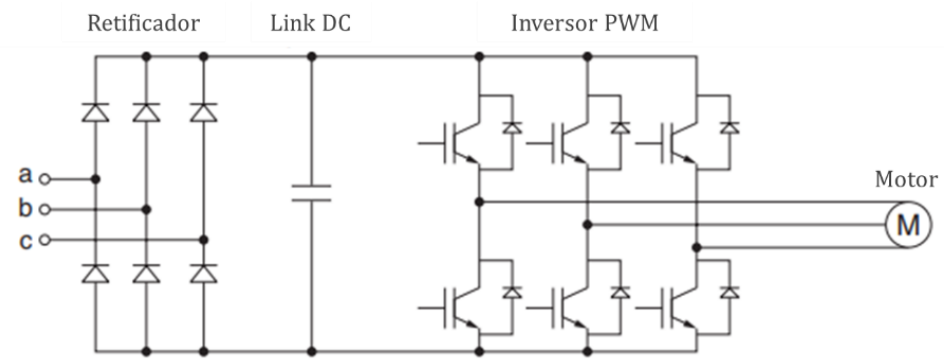
h: ordem do harmônico

q: número de pulsos do conversor;

k: número inteiro {1, 2, 3, ...}.

A Figura 13 mostra uma típica ponte conversora trifásica a diodos aplicada em um sistema de velocidade ajustável para motores de indução trifásicos.

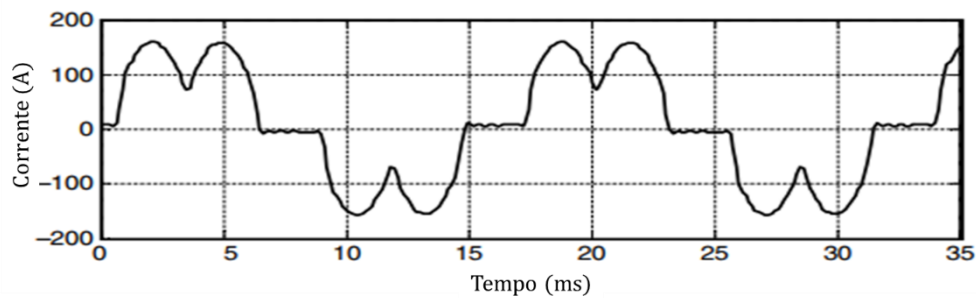
Figura 13 – Retificador trifásico de seis pulsos aplicado a um drive de velocidade ajustável para motores



Fonte: Adaptado de Kusko (2007).

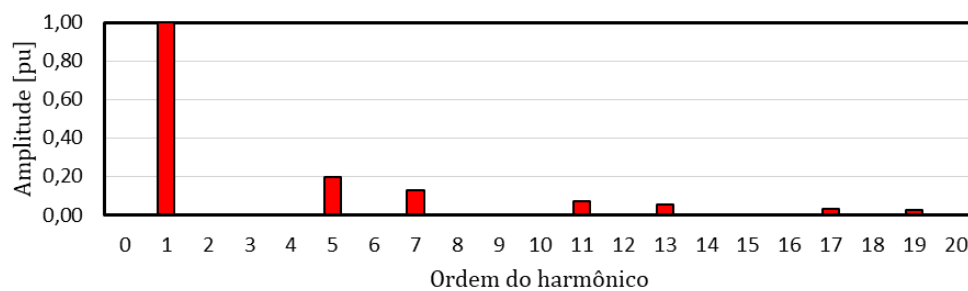
As Figuras 14 e 15 mostram, respectivamente, a forma de onda da corrente drenada por um retificador trifásico de seis pulsos e seu espectro harmônico característico.

Figura 14 – Forma de onda da corrente drenada por um retificador trifásico de seis pulsos



Fonte: Adaptado de Kalair (2017).

Figura 15 – Espectro harmônico característico para um retificador trifásico de seis pulsos



Fonte: Autor

## 2.4 SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO POR LED

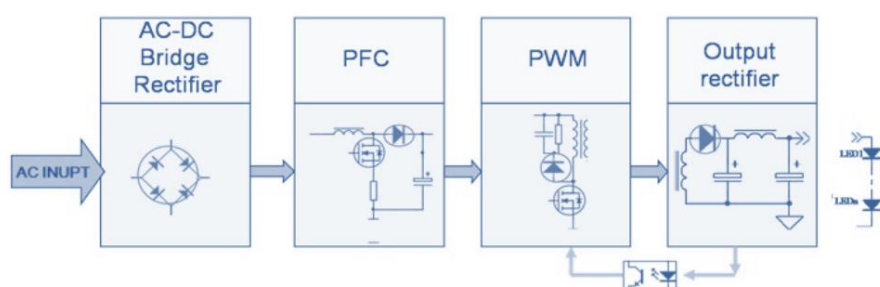
Desde a década de 1970, a tecnologia LED (do inglês, *light-emitting diode*) é muito utilizada em diversas aplicações de baixa potência, como mostradores luminosos e indicadores de *status*. No entanto, a partir das inovações tecnológicas mais recentes, aumento da vida útil e redução dos custos de manufatura, essa tecnologia está sendo cada

vez mais cogitada para aplicações em iluminação, inclusive em sistemas de maiores potências, como na iluminação pública, por exemplo. Nesse contexto, começa-se a observar uma ampla substituição dos sistemas de iluminação antigos, baseados principalmente em lâmpadas incandescentes e de descarga, pela tecnologia LED.

Os LEDs – ou diodos emissores de luz – são dispositivos semicondutores que emitem luz por eletroluminescência, através da passagem de corrente elétrica. Essa característica os difere das fontes de luz tradicionais e oferece vantagens de desempenho quando comparado as demais tecnologias de iluminação. Dentre os principais benefícios se encontram a vida útil, fluxo luminoso, economia de energia, não emissão de calor, raios ultravioleta e infravermelho, não oferece risco de contato direto, tempo de ignição, facilidade de integração e resistência a uso severo. Por outro lado, pode-se citar como desvantagens a dependência de componentes importados, mão de obra especializada, alto investimento inicial, adaptação das luminárias existentes e diversidade de desempenho entre fabricantes (POURARAB, 2015).

Por se tratar de um componente eletrônico, o funcionamento do LED depende de uma fonte de tensão em corrente contínua, necessitando de um circuito de interface entre o sistema elétrico em corrente alternada e o dispositivo de iluminação, denominado *driver*. O *driver* é composto, basicamente, por um retificador ligado à fonte de alimentação e um mecanismo de controle proporcionando, assim, o acionamento dos LEDs em sua saída. O diagrama de blocos básico do *driver* de LED é mostrado na figura 16.

Figura 16 – Diagrama de blocos de um driver de LED



Fonte: Pourarab (2015).

Como esse tipo de aplicação é relativamente recente, principalmente em âmbito nacional, não se conhece todos os impactos de sua operação nos índices de qualidade de energia de sistemas elétricos, ainda mais quando se considera a ampla utilização. Uma

forma de evitar alguns dos possíveis problemas relacionados a esses equipamentos eletrônicos é padronizar os limites sobre suas distorções de corrente.

A norma IEC 61000-3-2:2018 trata sobre os limites para correntes harmônicas de equipamentos conectados a redes de distribuição de baixa tensão. De acordo com esta norma, os equipamentos são classificados em 4 classes, sendo que a classe C é referente a equipamentos de iluminação com potências superiores a 25 W, incluindo dispositivos de controle (dimerização). A Tabela 5 apresenta os limites dos componentes harmônicos das correntes.

Tabela 5 – Limites das distorções de corrente individuais para equipamentos Classe C

| Ordem do harmônico<br>(h) | Máximo valor (porcentagem da fundamental)<br>(%) |
|---------------------------|--------------------------------------------------|
| 2                         | 2                                                |
| 3                         | 30 . FP                                          |
| 5                         | 10                                               |
| 7                         | 7                                                |
| 9                         | 5                                                |
| 11 < H < 39               | 3                                                |

Fonte: Adaptado de (IEC 2018).

## 2.5 SIMULAÇÃO DE SISTEMAS DE POTÊNCIA POR SOFTWARE

Sistemas elétricos diversos podem ser modelados e simulados através de softwares dedicados a esse fim. Assim, a análise de sistemas de maior tamanho e complexidade torna-se mais rápida e prática.

Esse trabalho será desenvolvido com o auxílio do programa ATPDraw, responsável por realizar simulações de fenômenos de transitórios eletromagnéticos em sistemas elétricos. O programa pode ser dividido em duas partes principais: o ATPDraw e o ATP.

O ATPDraw consiste na parte gráfica do programa. O usuário pode construir diversos sistemas elétricos com base em modelos digitais, através da seleção e conexão entre componentes pré-definidos pertencentes à biblioteca do programa. Depois que o sistema é modelado pelo usuário um arquivo é gerado pelo ATPDraw para que possa ser simulado na outra parte do programa, o ATP.

O ATP, por sua vez, é a parte computacional do software, responsável por realizar as simulações dos circuitos desenhados no ATPDraw. O programa consiste na análise de variáveis de interesse em sistemas de potência em função do tempo. A solução das equações diferenciais no domínio do tempo é feita com base na resolução por método de integração trapezoidal. Também são utilizadas condições iniciais que podem ou não serem definidas pelo usuário.

Essa ferramenta de simulação digital ainda possibilita simulações com faltas simétricas e não simétricas, impulsos atmosféricos e vários tipos de manobras de chaveamento. Tipicamente, as aplicações as quais o ATP é empregado são a análise de manobras e de impulso atmosférico, coordenação e modelagem de relés de proteção, estudos harmônicos e de qualidade de energia (PRIKLER, 2020). Os estudos mais típicos são:

- Estudos de sobretensão impulsiva;
- Transitórios de manobras e faltas;
- Estudos de sobretensão estatístico e determinístico;
- Modelagem de máquinas;
- Chaveamentos de transformadores e reatores/capacitores shunt;
- Ferroressonância;
- Aplicações eletrônicas de potência;
- Capacidade de disjuntores (arco voltaico), capacidade de interrupção de corrente;
- Análises harmônicas, ressonâncias de rede;
- Testes de dispositivos de proteção.

### 3 ESTUDO DE CASO: SISTEMA ELÉTRICO PORTUÁRIO

A difusão de sistemas de iluminação utilizando tecnologia LED tem se tornado cada vez mais abrangente e atrativa sob o ponto de vista de eficiência energética. Com isso, a utilização de lâmpadas que consomem mais energia e iluminam menos – como o caso de lâmpadas fluorescentes ou vapor metálico – deixa de se tornar viável e abre espaço para a utilização de sistemas de iluminação baseados no princípio de funcionamento de LEDs. Assim, é frequente que em eventuais manutenções ou atualizações de sistemas de iluminação aconteça a substituição por essa tecnologia mais recente.

O estudo de caso abordado ao longo deste trabalho trata sobre os problemas decorrentes dessa substituição que, em tese, deveria ser muito mais efetiva para quaisquer sistemas elétricos. O sistema em análise está localizado na área externa de uma região portuária, onde a iluminação necessita de potência considerável para funcionamento adequado. Anteriormente, esse sistema era composto basicamente por lâmpadas do tipo vapor metálico que, depois da aplicação de um projeto de eficiência energética, foram substituídas por luminárias LED.

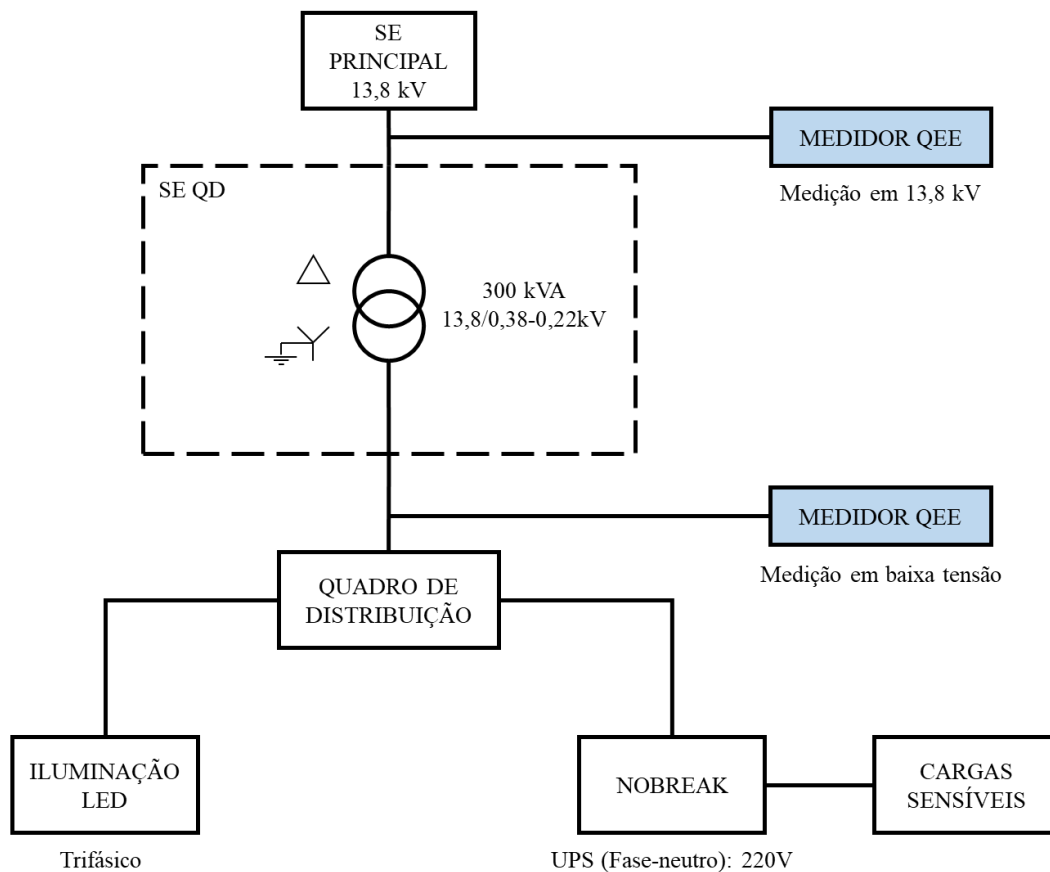
Segundo relatos dos funcionários que trabalham nos ambientes onde ocorreram as trocas, a partir da data de alteração do sistema de iluminação convencional foram verificados problemas e ocorrências de falhas em equipamentos eletrônicos, como os sistemas de alimentação ininterrupta (*nobreaks*) e suas respectivas cargas, constituídas por câmeras de monitoramento e antenas de comunicação, empregadas nos sistemas de supervisão. Com o objetivo de caracterizar essas perturbações, foram realizados testes e medições no sistema de iluminação, na alimentação dos *nobreaks* e no sistema de média tensão da instalação.

#### 3.1 DADOS DO SISTEMA ELÉTRICO

A fim de caracterizar o sistema em análise, a Figura 17 mostra o diagrama unifilar simplificado. O sistema consiste basicamente em uma subestação com um transformador de 300 kVA que recebe em seu lado primário 13,8 kV e disponibiliza 380/220 V em seu lado secundário. A alimentação do sistema de iluminação e do nobreak, em 220V, parte do mesmo ponto de conexão, através de um quadro de distribuição localizado em um dos pontos de alimentação do sistema de iluminação. Nessa mesma figura, está destacado em

azul o local onde foram realizadas as medições durante a investigação dos problemas de qualidade da energia elétrica.

Figura 17 – Diagrama unifilar simplificado do sistema em análise



Fonte: Autor

Na Figura 18, por sua vez, é mostrado um exemplo do tipo de refletor LED utilizado para iluminação das áreas externas do sistema de movimentação de cargas portuárias.

Figura 18 – Exemplo de Refletores LED utilizados em iluminação externa



Fonte: GSI (2018).

O sistema em questão conta com 19 pontos de iluminação espalhados pelo porto, enumerados de 1 a 19, e cada um desses postes apresenta grupos de 16 a 18 unidades de refletores com potência unitária de 350 W. As principais características desses refletores estão apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Características da luminária LED

| Características da luminária | Valor   | Unidade |
|------------------------------|---------|---------|
| Potência nominal             | 350     | W       |
| Tensão de operação           | 202-254 | V       |
| Frequência nominal           | 50/60   | Hz      |
| Fator de potência            | 0,98    | -       |
| Distorção de Corrente        | 10      | %       |
| Fluxo Luminoso do LED        | 50.659  | lm      |
| Eficiência Luminosa do LED   | 133     | lm/W    |
| Fluxo Luminoso da Luminária  | 46.606  | lm      |

Fonte: Jesus (2022).

Os dados de cada *driver* padrão, utilizado na composição dos refletores de iluminação LED de 350 W, estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Características do driver da luminária LED

| Características do <i>driver</i>  | Valor    | Unidade         |
|-----------------------------------|----------|-----------------|
| Potência nominal                  | 100      | W               |
| Tensão de entrada                 | 220-240  | V               |
| Frequência nominal                | 50/60    | Hz              |
| Fator de potência                 | 0,95     | -               |
| Corrente de entrada               | 0,4-0,56 | A               |
| Tensão de saída (circuito aberto) | 170      | V <sub>DC</sub> |
| Tensão de saída (com carga)       | 42-95    | V <sub>DC</sub> |
| Corrente de saída                 | 1,05     | A <sub>DC</sub> |

Fonte: Jesus (2022).

Além da certificação pelo Inmetro, o dispositivo driver utilizado como base no controle e acionamento dos LEDs das respectivas luminárias apresenta certificação em conformidade com os requisitos normalizados pela IEC 61000-3-2, tanto do ponto de vista de emissão de harmônicos, quanto dos demais requisitos de Compatibilidade Eletromagnética (EMC).

### 3.2 CAMPANHA DE MEDIÇÕES DE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

Para caracterizar as perturbações que estavam ocorrendo no sistema elétrico em análise, as medições de qualidade da energia foram, inicialmente, realizadas no ponto de conexão com os nobreaks e os postes de iluminação, em 380/220 V, com 16 luminárias LED de 350 W, conforme ilustra a Figura 17 mostrada anteriormente. Também foram realizadas medições no lado primário do transformador da subestação, em 13,8 kV. Adicionalmente, optou-se por medir o desempenho das luminárias LED em outro sistema elétrico, com o objetivo de avaliar seu funcionamento em um sistema diferente do estudado.

A análise da qualidade de energia realizada indicou uma interação entre o sistema elétrico e os *drivers* das luminárias, resultando na amplificação das correntes harmônicas do sistema de iluminação e forte degradação das tensões de alimentação das cargas, inclusive com valores superiores aos máximos limites recomendados nas normas de referência.

Durante a campanha de medição, utilizou-se o analisador de qualidade da energia Power Xplorer PX5, da fabricante Dranetz. Esse equipamento é um medidor e registrador de grandezas e distúrbios elétricos em tempo real para sistemas elétricos monofásicos, bifásicos e trifásicos em baixa, média ou alta tensão. Possui quatro canais de entrada para sinais de tensão, quatro canais de entrada para sinais de corrente e taxa de amostragem de 1 MHz. O equipamento também armazena os dados na sua memória de massa para que, posteriormente possam ser transferidos, via cartão de dados para o computador e então analisados na forma de gráficos e relatórios através do software da própria fabricante. É possível realizar, através do software, análises ciclo a ciclo (pré e pós-falta), variações de tensão de curta duração (afundamentos, elevações ou interrupções), registros RMS de tensão e corrente, registro das formas de onda, transitórios, harmônicos, inter-harmônicos, *flicker* e desequilíbrios, por exemplo.

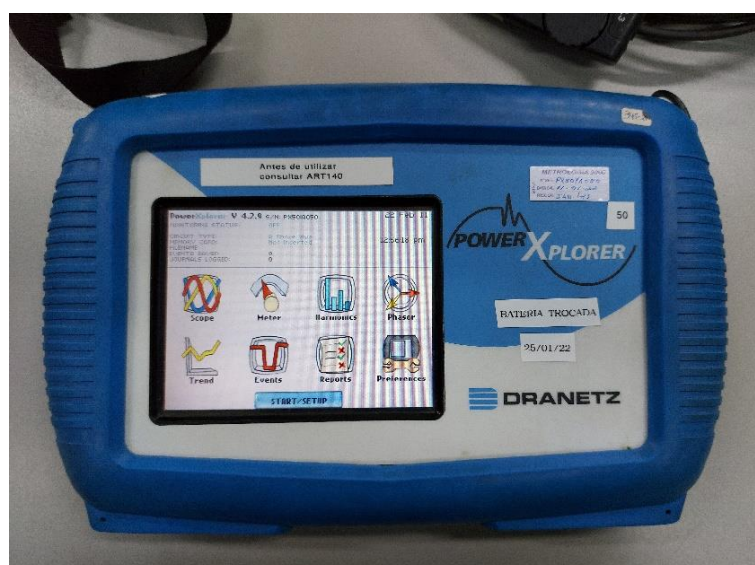
Um resumo das principais características desse equipamento é descrito no Quadro 2. Por fim, a Figura 19 mostra uma foto do medidor PX5 utilizado durante a campanha de medição.

Quadro 2 – Características do analisador de qualidade da energia

| Características do medidor |                                    |
|----------------------------|------------------------------------|
| Fabricante                 | DRANETZ/BMI                        |
| Tipo                       | Analisador de qualidade da energia |
| Modelo                     | Power Xplorer PX5                  |
| Classe (IEC 61000-4-30)    | A                                  |
| Tensão CA                  | 1 a 600 V                          |
| Frequência                 | 15 a 20, 45 a 65 ou 350 a 450 Hz   |

Fonte: GSI (2018).

Figura 19 – Medidor de qualidade da energia modelo PX5

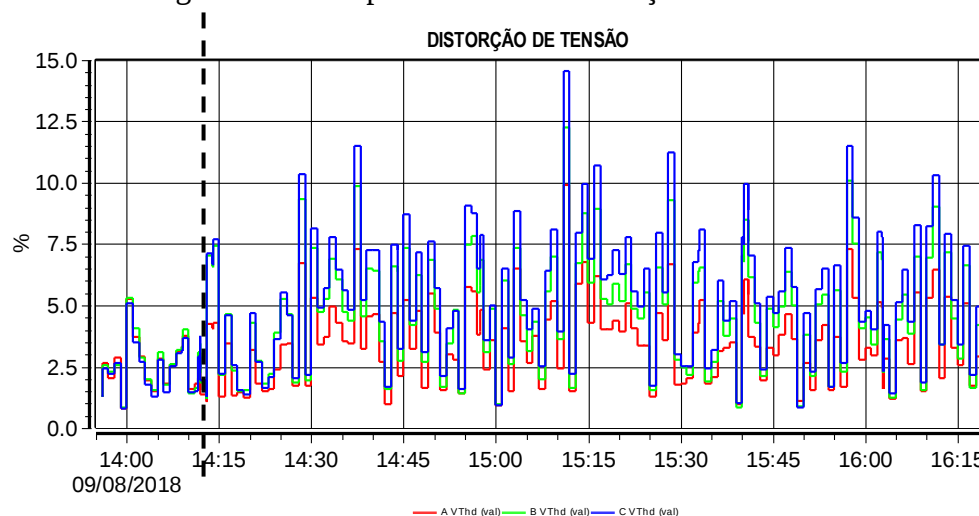


Fonte: Autor

### 3.2.1 Sistema de alimentação do nobreak e iluminação LED

O primeiro local onde as medições foram realizadas foi o ponto comum entre o sistema de iluminação e a alimentação dos nobreaks, em 220 V (fase-terra). A Figura 20 apresenta o comportamento dos valores das distorções de tensão antes e após a energização de todas as 16 luminárias a LED de um determinado poste. Após a energização – demarcada pela linha tracejada – observa-se um aumento considerável nos níveis de distorção das tensões, com valores iniciais próximos a 5%, antes da energização dos refletores, para níveis próximos a 15% após a entrada do sistema de iluminação. Também foram caracterizadas variações intermitentes, elevadas distorções das tensões e a presença de inter-harmônicos.

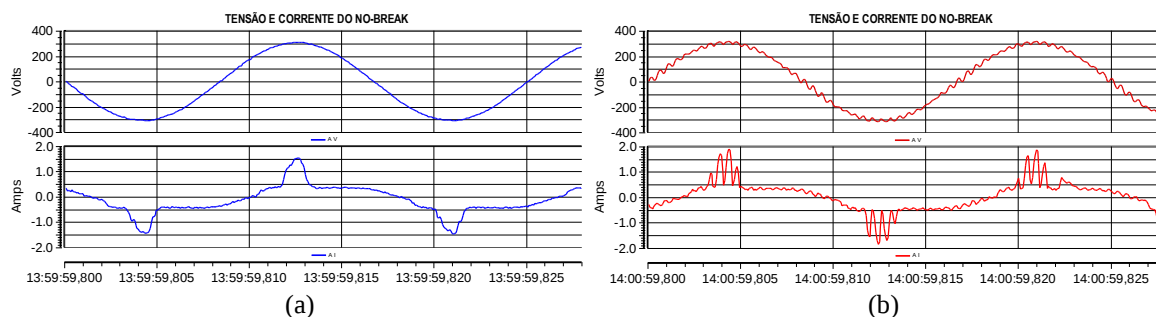
Figura 20 – Comportamento das distorções das tensões



Fonte: GSI (2018).

Ao analisar as medições do ponto de alimentação do *nobreak* sem a iluminação LED conectada ao sistema, notou-se certas variações nas formas de onda, havendo diferenças significativas entre as medições em dois instantes diferentes em um mesmo ponto de medição, condição apresentada na Figura 21. É notável a diferença entre os dois instantes, sendo verificadas elevadas distorções mesmo quando não há a conexão dos sistemas de iluminação, o que caracteriza uma forte influência dos harmônicos já presentes no sistema (*background distortion*).

Figura 21 – Comportamento das tensões e correntes de alimentação do nobreak sem a presença da iluminação por LED: (a) instante 1; (b) instante 2

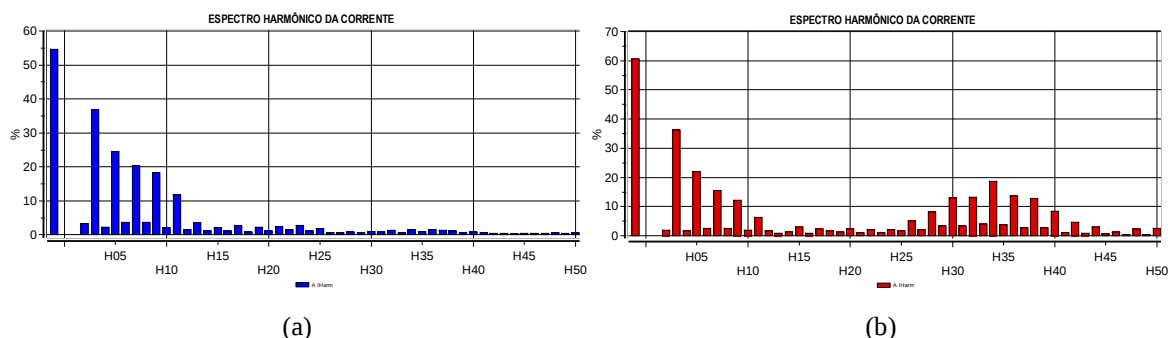


Fonte: GSI (2018).

Destaca-se que não houve alteração nas cargas alimentadas pelo *nobreak* entre os instantes 1 e 2, reforçando as variações de tensão pré-existent no sistema elétrico.

A Figura 22 mostra os comportamentos distintos entre os espectros harmônicos das correntes para as formas de onda mostradas na Figura 21, evidenciando as variações de componentes de altas frequências, mesmo sem quaisquer dispositivos de iluminação conectados ao sistema.

Figura 22 – Espectros harmônicos das correntes de alimentação do nobreak sem a iluminação por LED: (a) instante 1; (b) instante 2

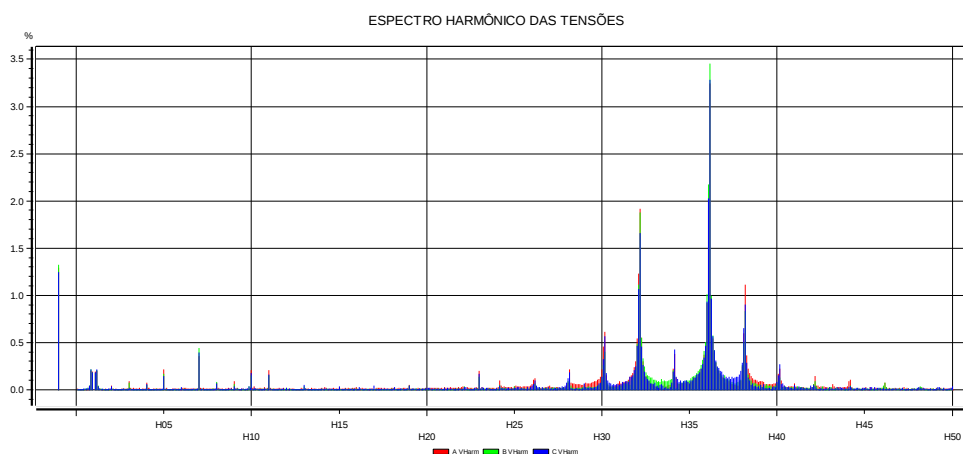


Fonte: GSI (2018).

Nota-se que, mesmo sem qualquer circuito de iluminação LED ligado, houve um aumento das distorções de tensão, especialmente para os componentes próximos aos harmônicos na faixa entre a 30ª e 40ª ordens. É interessante observar que essas distorções variam de comportamento repentinamente, alterando a predominância entre as ordens harmônicas.

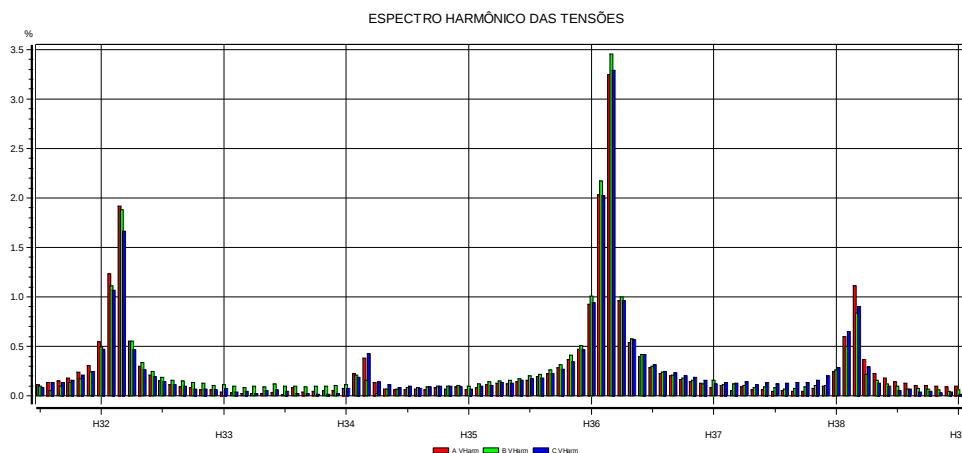
Na Figura 23 é mostrado o espectro harmônico total medido para as tensões em um determinado instante, havendo predominância de componentes de 32ª e 36ª ordens. Já na Figura 24, está contido o detalhamento dos componentes inter-harmônicos próximos a essas ordens.

Figura 23 – Espectro harmônico completo das tensões sem a iluminação LED



Fonte: GSI (2018).

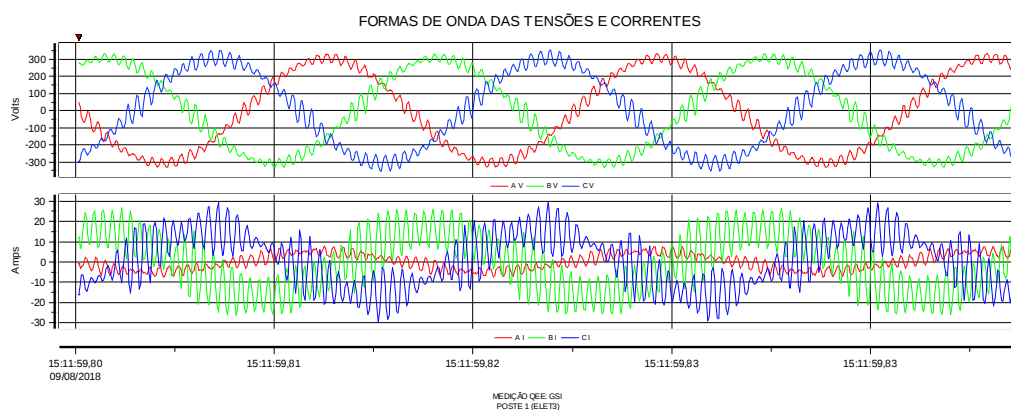
Figura 24 – Detalhes dos componentes inter-harmônicos nas tensões sem a iluminação LED



Fonte: GSI (2018).

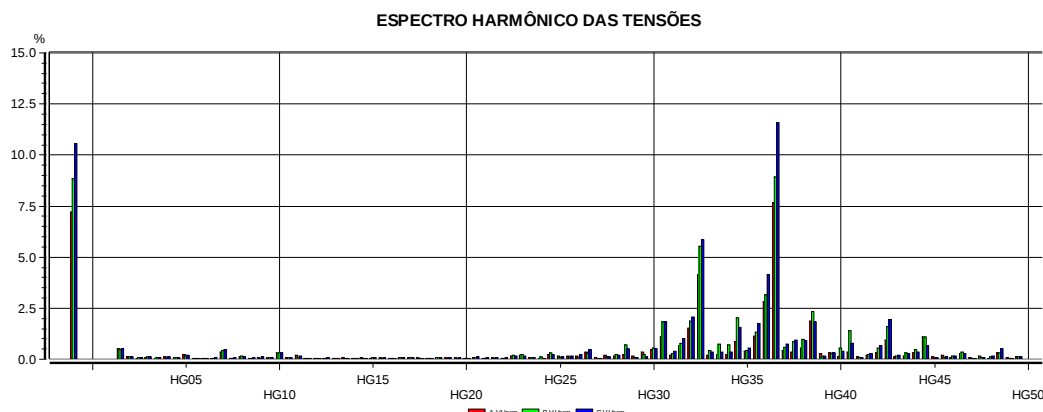
Analisando, agora, o comportamento do sistema com a presença das cargas de iluminação, nota-se um elevado aumento nas componentes harmônicas de 32ª e 36ª ordem, ocasionando altos índices de distorção. A Figura 25 mostra as formas de onda das tensões e correntes para o instante de maior distorção verificada nas medições e seus respectivos espectros harmônicos estão ilustrados nas Figuras 26 e 27.

Figura 25 – Forma de onda das tensões e correntes durante medições na operação do sistema com iluminação LED



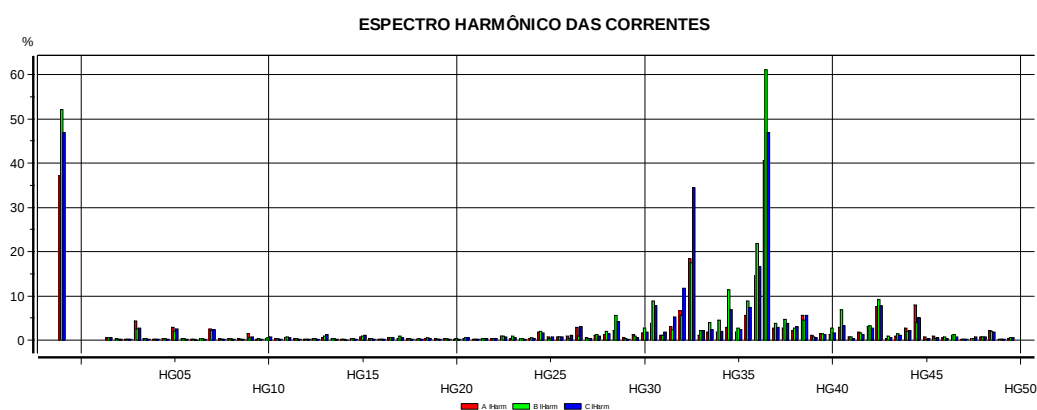
Fonte: GSI (2018).

Figura 26 – Espectros harmônicos das tensões na operação do sistema com iluminação LED



Fonte: GSI (2018).

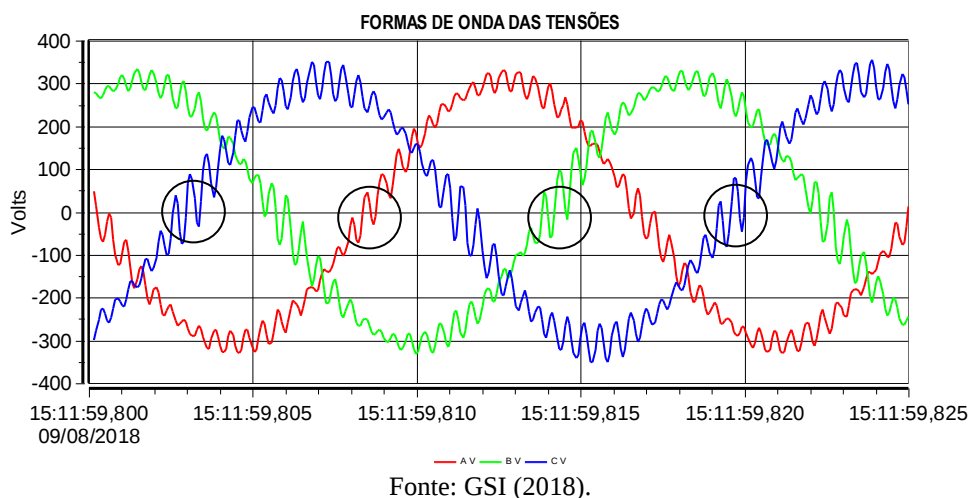
Figura 27 – Espectros harmônicos das correntes na operação do sistema com iluminação LED



Fonte: GSI (2018).

Com a entrada do novo sistema de iluminação composto pelos refletores LED, foram observados chaveamentos intermitentes nos *nobreaks* ligados ao ponto de alimentação dos LEDs. Dessa forma, constatou-se que a origem das falhas dos equipamentos ligados aos nobreaks se deu por conta desses chaveamentos, relacionados a ocorrência do fenômeno denominado *zero-crossing*. A característica principal desse distúrbio se dá pelas múltiplas passagens da onda de tensão pelo zero, durante os registros de aumentos nas distorções das tensões, conforme mostra a Figura 28.

Figura 28 – Medições das tensões com zero-crossings

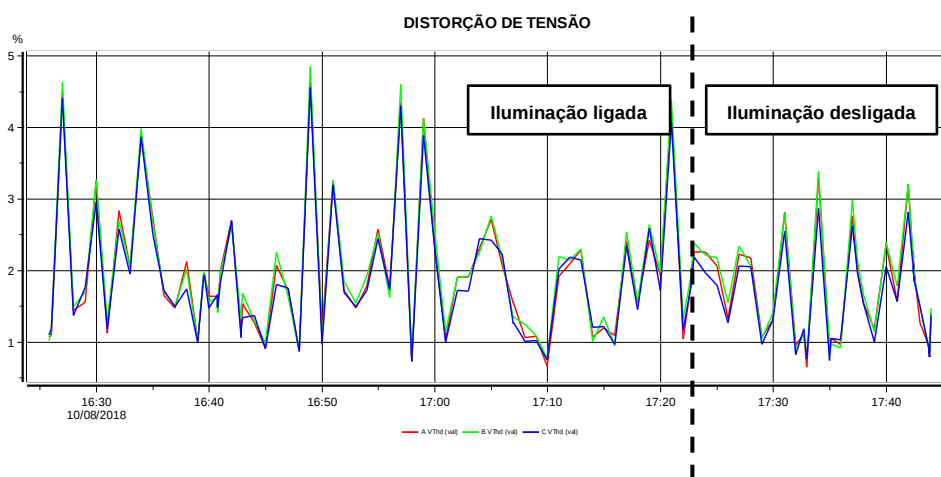


### 3.2.2 Sistema de distribuição em 13,8 kV

O segundo ponto de medição a ser analisado está localizado no sistema de média tensão, a partir da subestação unitária que atende parte das instalações do porto. Foram registradas medições durante o funcionamento de algumas cargas de iluminação ligadas e após seu desligamento, a fim de caracterizar a influência dessas cargas na distorção das tensões em 13,8 kV. A Figura 29 ilustra as distorções das tensões de fase no lado em 13,8 kV, indicando maiores valores no período de operação com os refletores a LED ligados.

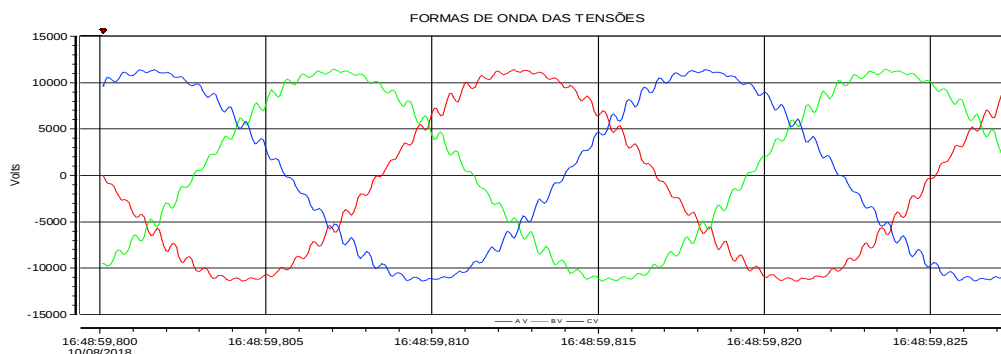
Durante o monitoramento das tensões em 13,8 kV também foram verificadas variações das distorções das tensões, observando-se diferenças de magnitude e oscilações tanto durante a operação dos sistemas de iluminação quanto na ausência dessas cargas. De modo a evidenciar tal interação, as Figuras 30 e 31 apresentam as formas de onda das tensões com e sem o sistema de iluminação conectado, respectivamente.

Figura 29 – Distorções das tensões no lado de 13,8 kV



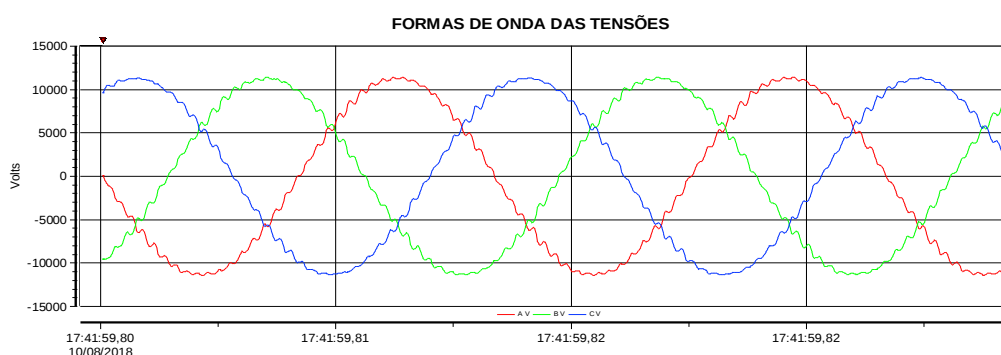
Fonte: GSI (2018).

Figura 30 – Tensões no lado de 13,8 [kV] com a operação dos sistemas LEDs



Fonte: GSI (2018).

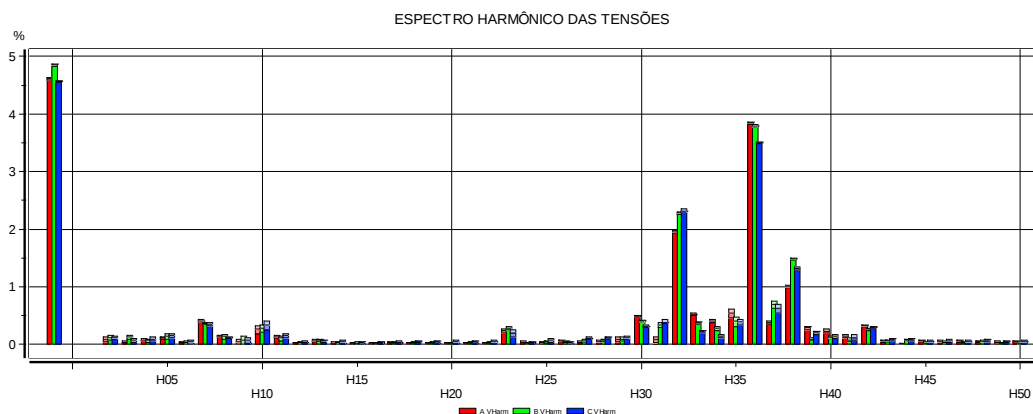
Figura 31 – Tensões no lado de 13,8 [kV] sem a operação dos sistemas LEDs



Fonte: GSI (2018).

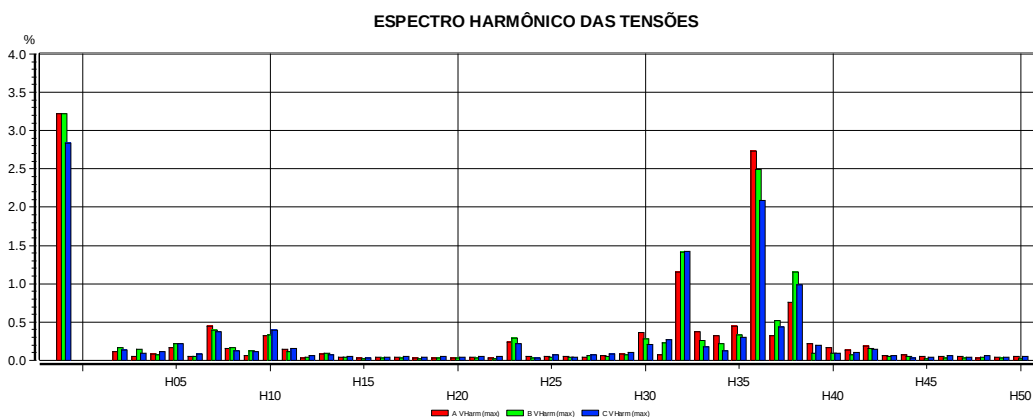
Os espectros harmônicos resultantes em ambas as condições de operação mostram a presença de componentes de altas frequências. Nas Figuras 32 e 33 estão apresentados os espectros harmônicos das tensões para as operações com e sem a iluminação LED, respectivamente. Conforme pode ser observado, ocorrem variações cíclicas nas tensões, assim como no caso das elevadas distorções no lado de baixa tensão. Esta característica, possivelmente relacionada a presença e operação dedicada de acionamentos controlados de motores de grande porte instalados no sistema elétrico do porto, apresenta forte influência de inter-harmônicos próximos às frequências das componentes de 32ª e 36ª ordens, que são amplificados pela interação com as correntes de alimentação dos sistemas LEDs.

Figura 32 – Espectro harmônico das tensões em 13,8 kV com a iluminação LED



Fonte: GSI (2018).

Figura 33 – Espectro harmônico das tensões em 13,8 kV sem a iluminação LED



Fonte: GSI (2018).

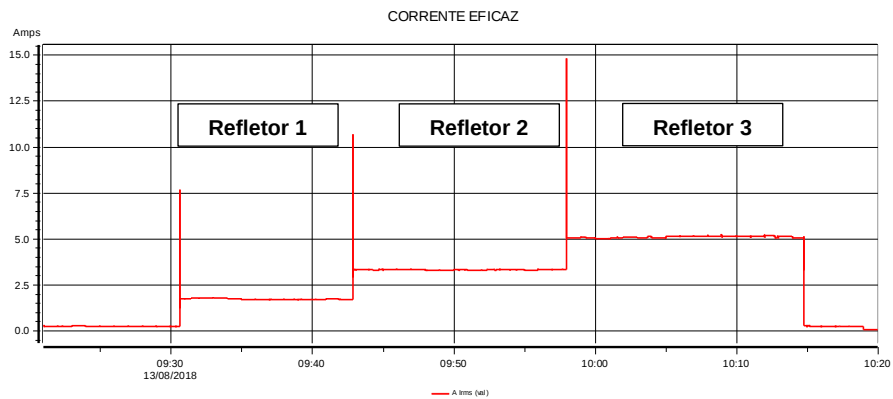
### 3.2.3 Medições da operação da iluminação LED em outro sistema elétrico

Para efeito de análise comparativa, foram realizadas medições do funcionamento dos refletores em outra instalação, a fim de se avaliar o comportamento das tensões e correntes do equipamento em um ambiente externo ao porto. Devido a simplicidade dessa etapa, a medição foi realizada nas instalações de um sistema alimentado diretamente em baixa tensão.

As medições consistiam no monitoramento das tensões e correntes tanto para o momento anterior a entrada de operação das luminárias de 350 W quanto para a entrada de três conjuntos de refletores, ligados um de cada vez com um intervalo de aproximadamente dez minutos. Na execução dos testes, uma tomada comum da bancada em 220 V foi utilizada para alimentação.

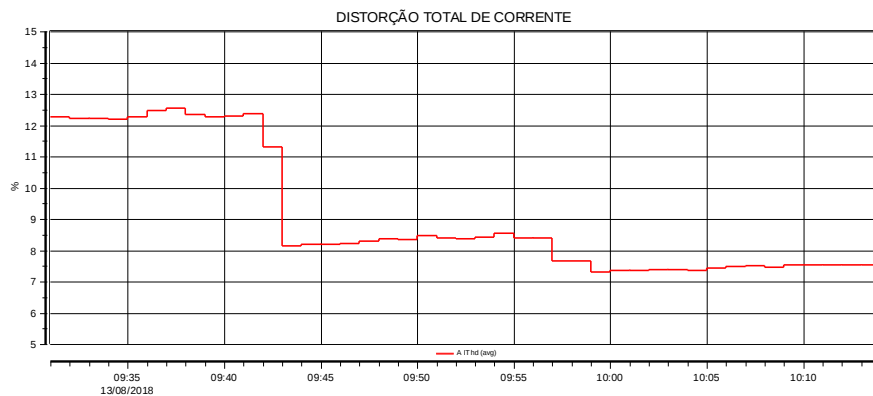
Nas Figuras 34 e 35 estão apresentados os valores eficazes das correntes do sistema de iluminação e suas respectivas distorções.

Figura 34 – Correntes eficazes de alimentação no teste dos refletores



Fonte: GSI (2018).

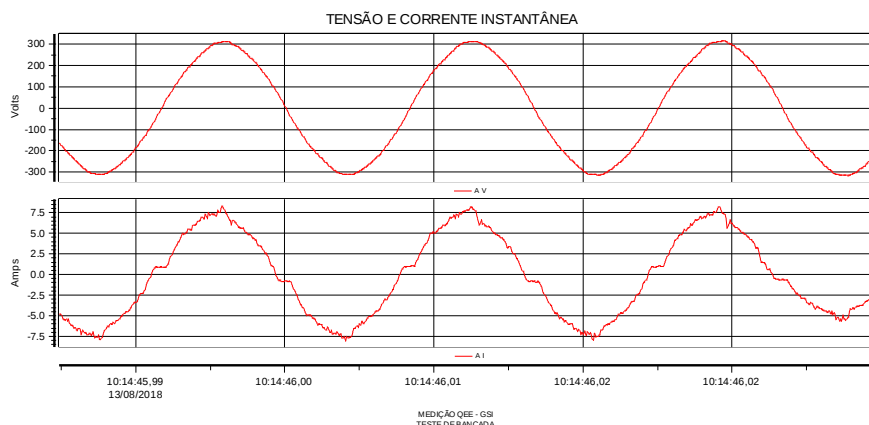
Figura 35 – Distorção das correntes no teste do sistema dos refletores



Fonte: GSI (2018).

A Figura 36 apresenta as formas de onda das tensões e correntes para a condição com os três conjuntos de refletores em operação, resultando em distorção inferior a 10% e componentes harmônicos preponderantes de baixa ordem.

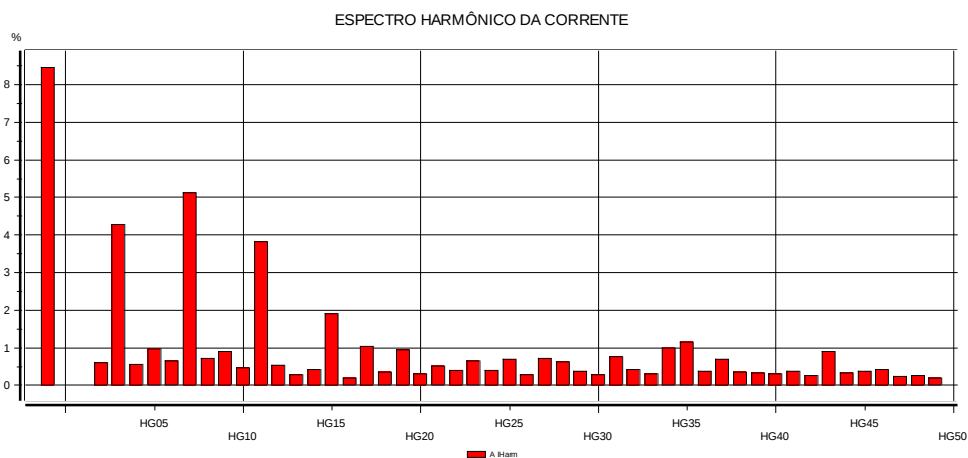
Figura 36 – Formas de onda das tensões e correntes para operação com três refletores



Fonte: GSI (2018).

Como relatado anteriormente e com base na Figura 37, os componentes mais significativos são os de baixa ordem, com preponderância da 3<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup> e 11<sup>a</sup> ordem, conforme espectro harmônico das correntes medidas com as luminárias em operação.

Figura 37 – Espectro harmônico das correntes para operação com três refletores



Fonte: GSI (2018).

A Tabela 8 contém a comparação entre a distorção das correntes medida na operação de um refletor e os limites recomendados pela norma IEC 61000-3-2:2018. Observa-se que os limites são respeitados e, dessa forma, pode-se concluir que o comportamento dos refletores medido em outro sistema é completamente diferente das medições realizadas no porto.

Tabela 8 – Comparação entre a distorção das correntes dos refletores e os limites definidos por norma

| Ordem do harmônico<br>(h) | DHI <sub>I</sub> Máximo<br>(%) | DHI <sub>I</sub> Medido<br>(%) |
|---------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 2                         | 2                              | 0,5                            |
| 3                         | 29,4                           | 4,1                            |
| 5                         | 10                             | 1                              |
| 7                         | 7                              | 5,1                            |
| 9                         | 5                              | 1                              |
| 11 < H < 39               | 3                              | < 2                            |

Fonte: Autor

Em relação ao DHI<sub>I</sub> máximo do harmônico de terceira ordem, utilizou-se como base para o cálculo um fator de potência igual a 0,98, característica fornecida pelo fabricante do equipamento em análise.

### 3.2.4 Análise do desempenho atual do sistema

Com base no monitoramento e análise dos resultados obtidos nas medições realizadas, verificou-se uma interação entre o sistema elétrico de alimentação e os novos sistemas de iluminação a LED, a partir de uma variação periódica nas formas de onda das tensões do próprio sistema elétrico do porto.

Sem o sistema de iluminação em operação, as distorções das tensões são inferiores, mas apresentam oscilações com a presença de inter-harmônicos próximos às frequências de 32ª e 36ª ordens. Quando os postos de iluminação com LEDs foram energizados e entraram em operação, as respostas dinâmicas dos drivers para as flutuações de harmônicos de altas frequências induziram ao aumento das distorções devido à amplificação das correntes absorvidas pelos sistemas de iluminação. Foram constatadas de forma repetitiva, variações com aumentos das distorções das tensões, sendo registradas tensões com várias passagens pelo zero (*zero-crossing*).

Esta condição de operação intermitente e o aumento das distorções no sistema resultaram em problemas na operação dos *nobreaks* instalados junto aos circuitos de iluminação, com chaveamentos em sequências transitórias que propiciam surtos de tensão, sendo a causa provável das falhas dos equipamentos dos sistemas de monitoramento e comunicação.

Portanto, ficou caracterizada a incompatibilidade nas atuais condições de operação do sistema e das cargas instaladas junto aos postos de iluminação com LED, devido à interação entre inter-harmônicos oscilantes do sistema e as respostas dos drivers para tais condições. A alimentação atual dos *nobreaks*, sem a separação dos circuitos, não apresentou uma condição estável e as perturbações geram riscos à segurança operacional e ao funcionamento das cargas críticas instaladas.

Os testes realizados em bancada com a mesma análise do sistema de iluminação de 350 W, em outro ponto de alimentação, comprovaram a operação normal em rede sem variações nas formas de onda das tensões, pois neste caso, as distorções das correntes se mantiveram constantes para uma, duas ou três luminárias em operação, ou seja, distorções de corrente na faixa entre 7 a 12%, comprovando que os problemas de qualidade da energia no porto ocorreram devido à interação de seu sistema elétrico – que já apresentava distúrbios nas formas de onda previamente, as quais foram amplificadas – com o novo sistema de iluminação baseado em refletores a LED.

### 3.3 PROPOSTA DE FILTRO PARA MITIGAÇÃO DAS PERTURBAÇÕES

Devido aos problemas operacionais do sistema, após a constatação dos distúrbios na rede elétrica, o projeto de substituição dos sistemas de iluminação foi parcialmente paralisado. Assim, sua retomada dependeria fundamentalmente dos resultados da proposta de aplicação de filtros para os *nobreaks* e alimentação de suas respectivas cargas sensíveis.

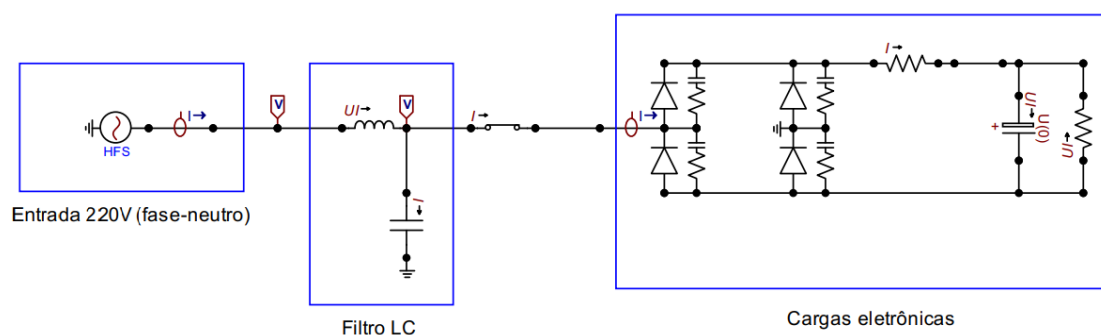
Como forma de mitigar as perturbações causadas pela interação entre o sistema elétrico do porto e o novo sistema de iluminação, algumas configurações de filtros LC foram analisadas para evitar os reincidentes distúrbios na operação das cargas críticas alimentadas pelos *nobreaks*.

Inicialmente, realizou-se a modelagem do sistema e as simulações de desempenho para análise dos filtros por meio do software de transitórios eletromagnéticos *ATPDraw*. Com base nos resultados das simulações, executou-se testes de desempenho de um protótipo em laboratório. Finalmente, após a validação do filtro, foram realizados os testes nas instalações do porto, junto à operação das cargas de iluminação.

### 3.3.1 Modelagem e simulação do filtro

O sistema foi representado de modo equivalente por tensões distorcidas com base nas medições reais, alimentando o circuito equivalente do *nobreak* e respectivas cargas eletrônicas no programa *ATPDraw*. A Figura 38 mostra a topologia do sistema em análise, contendo a fonte de tensão com componentes harmônicas, o filtro LC proposto e um modelo simplificado para as cargas.

Figura 38 – Topologia do sistema em análise

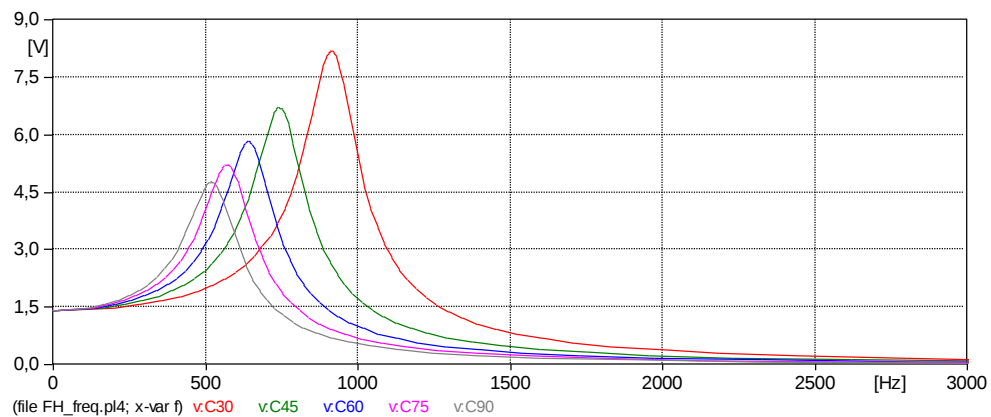


Fonte: Autor

Para a entrada do sistema considerou-se, em relação à amplitude da fundamental, uma distorção individual de tensão de 10% para a componente de 32ª ordem e de 20% para a componente de 36ª ordem. Essa escolha se deu observando os resultados das medições obtidas em campo, sendo a maior distorção encontrada no sistema de 220/380 V. O filtro LC, por sua vez, consiste de um arranjo com reator série e capacitor em derivação. Por fim, a representação das cargas eletrônicas se deu por um retificador monofásico que alimenta uma carga resistiva.

A Figura 39 mostra a simulação das respostas em frequência do filtro LC para diferentes valores de capacitância associados a um indutor de 1 mH. Os valores utilizados para C foram de 30, 45, 60, 75 e 90  $\mu$ F. Nessa simulação, têm-se interesse em verificar qual dos valores de capacitância apresenta o melhor valor para atenuação das frequências de 1920 e 2160 Hz, baseando-se na topologia de filtros do tipo passa baixa (LC).

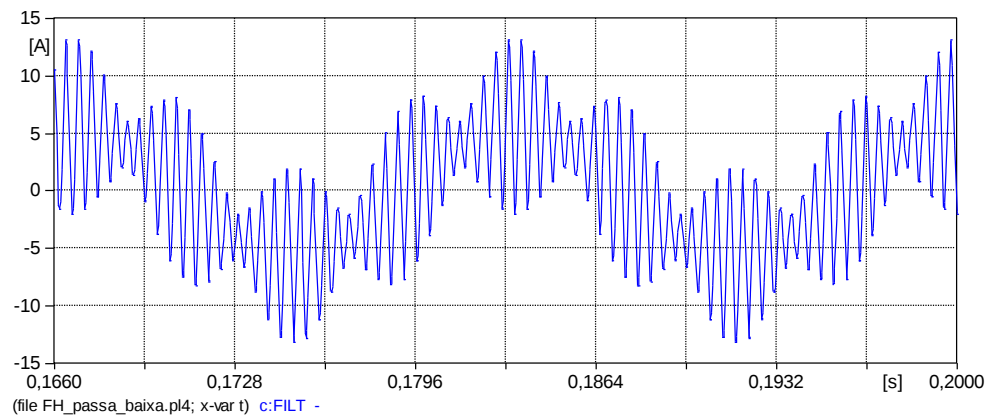
Figura 39 – Análise da resposta em frequência do filtro LC para diferentes valores de capacitância



Fonte: Autor

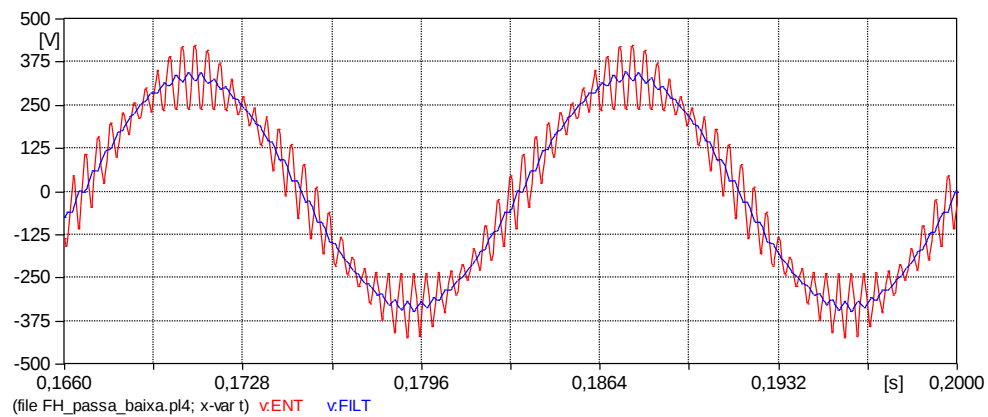
A Figura 40 apresenta a corrente simulada no capacitor do filtro, para um valor escolhido de capacitância igual a 45  $\mu\text{F}$ . Já na Figura 41, é mostrada a comparação entre as tensões na entrada e saída do filtro, sendo possível notar uma melhoria significativa nas formas de onda das tensões, inclusive havendo a eliminação dos eventos de *zero crossings* que ocorriam na alimentação do circuito. A comparação entre os componentes harmônicos das tensões de entrada e saída do filtro é mostrada na Figura 42.

Figura 40 – Simulação das correntes de operação do filtro LC



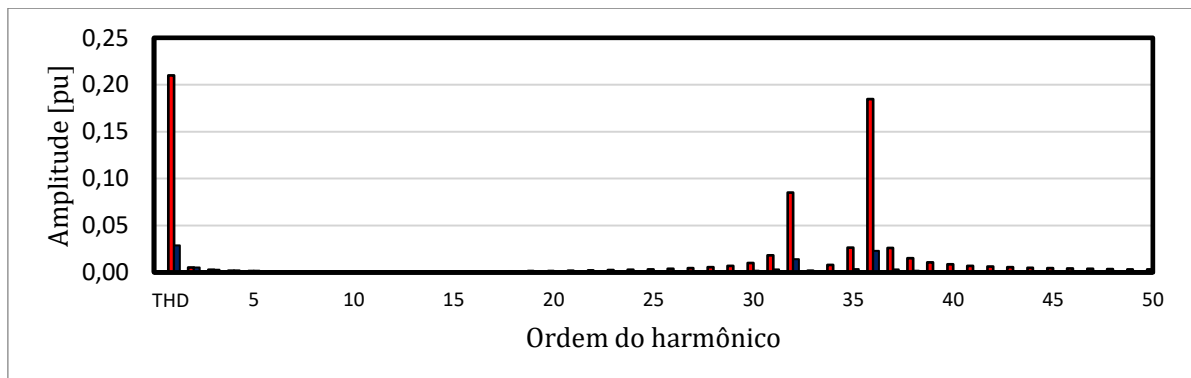
Fonte: Autor

Figura 41 – Simulação das tensões na entrada e saída do filtro LC



Fonte: Autor

Figura 42 – Comparação entre as simulações dos espectros harmônicos das tensões de entrada e saída do filtro

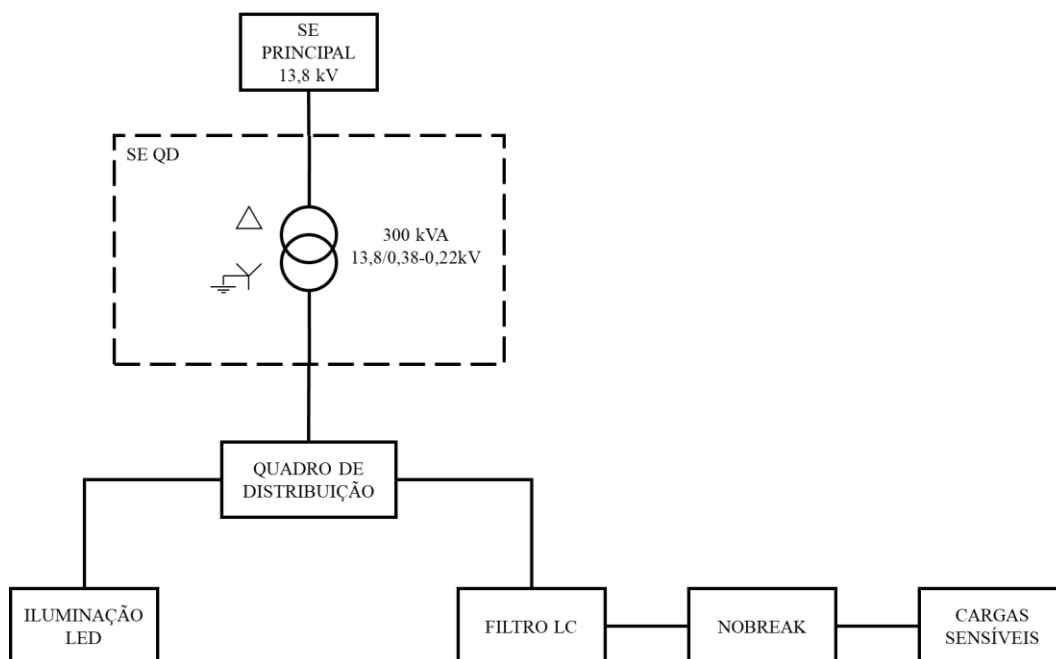


Fonte: Autor

### 3.3.2 Características do filtro passa-baixa LC

Os filtros serão aplicados nas entradas dos *nobreaks*, em 220 V, responsáveis pela alimentação das cargas críticas, conforme indicado na Figura 43.

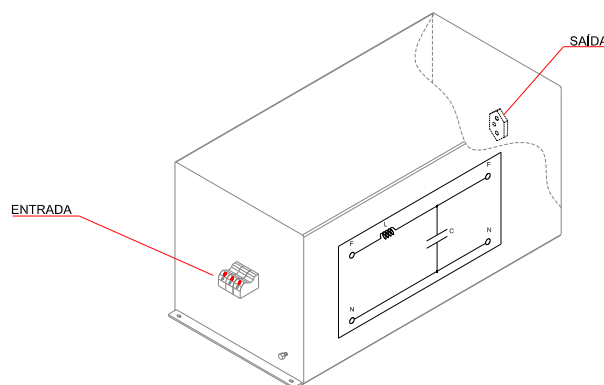
Figura 43 – Diagrama unifilar do sistema com a implementação do filtro LC



Fonte: Autor

O *layout* básico proposto na implantação dos filtros LC está apresentado na Figura 44. Esse layout consiste basicamente na entrada conectada à alimentação 220 V que vem do quadro de distribuição do sistema (fase e neutro) e em sua saída, a conexão com o *nobreak*.

Figura 44 – Layout básico proposto para o filtro LC



Fonte: GSI (2018).

Os dados recomendados no estudo deste caso de caso foram tomados como base na especificação dos componentes dos filtros LC para a aplicação, conforme relacionado nos Quadros 3, 4 e 5.

Quadro 3 – Características do filtro LC

| <b>Características do filtro</b>    |                             |
|-------------------------------------|-----------------------------|
| Quantidade de filtros               | 10                          |
| Tipo                                | Monofásico Passa-Baixa (LC) |
| Frequência de sintonia              | 750 Hz                      |
| Corrente nominal a 60 Hz ( $I_1$ ): | 10 A                        |
| Corrente nominal (RMS)              | 15 A                        |

Fonte: GSI (2018).

Quadro 4 – Características dos indutores do filtro

| <b>Características dos indutores</b>             |                |
|--------------------------------------------------|----------------|
| Tipo construtivo                                 | núcleo de ar   |
| Fator de qualidade mínimo (FQ)                   | 10             |
| Tolerância no valor da indutância:               | $\pm 3\%$      |
| Indutância nominal (L):                          | 1 mH           |
| Reatância indutiva nominal a 60 Hz ( $X_{L1}$ ): | 0,377 $\Omega$ |
| Potência nominal do reator a 60 Hz:              | 1,06 kvar      |

Fonte: GSI (2018).

Quadro 5 – Características dos capacitores do filtro

| <b>Características dos capacitores</b> |                      |
|----------------------------------------|----------------------|
| Tensão nominal mínima dos capacitores  | 380 V                |
| Potência nominal da unidade monofásica | 2,5 kvar             |
| Tolerância da capacitância             | - 5% a + 10%         |
| Capacitância nominal (C)               | 45,92 $\mu\text{F}$  |
| Conexão da unidade capacitiva:         | Fase-Neutro          |
| Resistores de descarga                 | 100 a 300 k $\Omega$ |

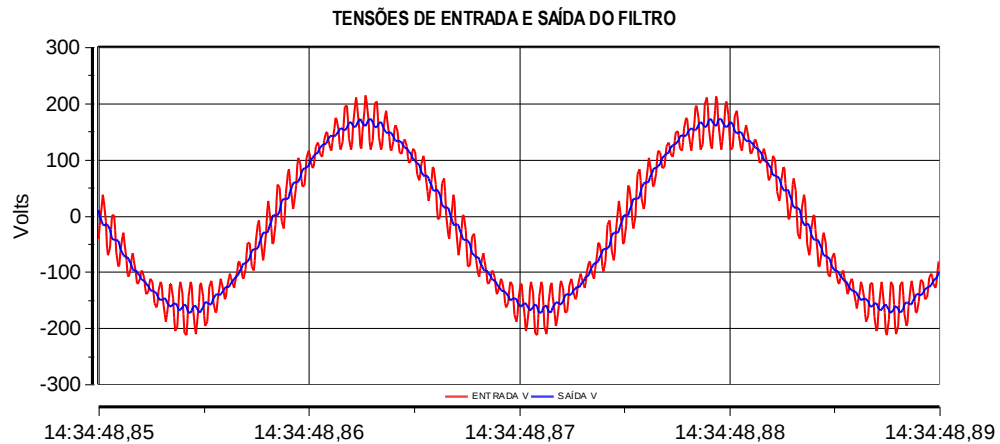
Fonte: GSI (2018).

### 3.3.3 Análise comparativa com testes em laboratório

Antes do teste final de validação em campo foram realizados testes complementares em um protótipo do filtro em laboratório, utilizando uma fonte arbitrária para a geração das tensões de referência, mantendo as distorções de 10 e 20% para as distorções individuais dos componentes de 32ª e 36ª ordens, respectivamente.

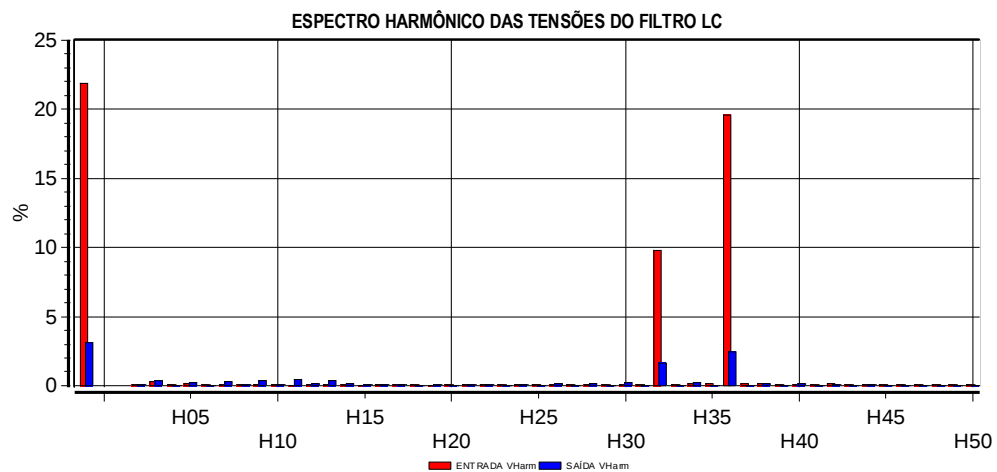
A Figura 45 mostra as formas de onda das tensões de entrada e de saída do filtro, observando que as oscilações e cruzamentos pelos zeros adicionais foram eliminados. Já na Figura 46, é realizada a comparação entre os componentes harmônicos das tensões de entrada e saída do filtro, havendo uma diminuição na distorção total da tensão de 20% na entrada para valores inferiores a 3% na saída do filtro.

Figura 45 – Tensões na entrada e saída do filtro LC: medição em laboratório



Fonte: GSI (2018).

Figura 46 – Comparação entre os espectros harmônicos das tensões de entrada e saída do filtro



Fonte: GSI (2018).

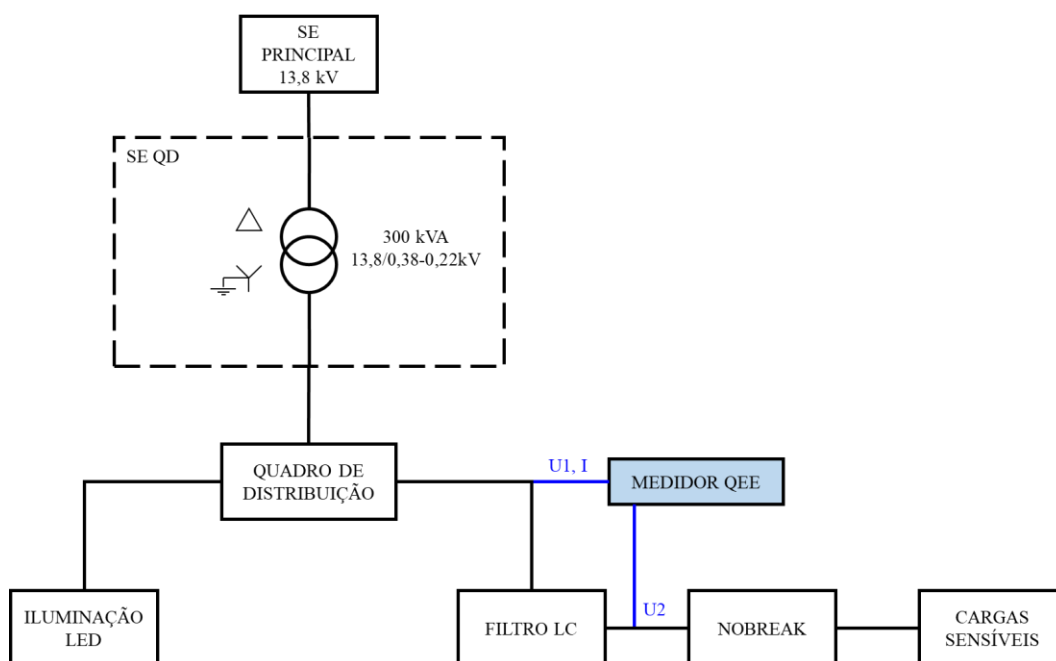
A partir da comparação entre as simulações e os testes em laboratório, verifica-se que as medições do comportamento do protótipo de filtro LC são praticamente idênticas ao observado nas simulações.

#### 4 VALIDAÇÃO DO PROTÓTIPO DO FILTRO LC ATRAVÉS DE TESTES EM CAMPO

Com a validação do funcionamento do filtro através de simulações e após os testes do protótipo em laboratório, uma nova campanha de medições foi realizada nas instalações do sistema elétrico portuário, visando verificar o comportamento da solução desenvolvida.

A Figura 47 mostra o diagrama unifilar simplificado do sistema em análise, destacando a localização do medidor de qualidade de energia durante a operação das cargas sensíveis em conjunto com os sistemas de iluminação LED e a utilização do filtro proposto para mitigação dos problemas operacionais.

Figura 47 – Diagrama unifilar do sistema durante teste de desempenho do filtro LC



Fonte: Autor

O teste consiste na instalação do filtro LC entre o quadro de distribuição e a entrada do *nobreak*. A carga de iluminação LED utilizada – mostrada na Figura 48 – é composta por 21 luminárias de 350 W. A disposição do equipamento de medição e do filtro conectado ao *nobreak* junto ao quadro de distribuição está presente na Figura 49.

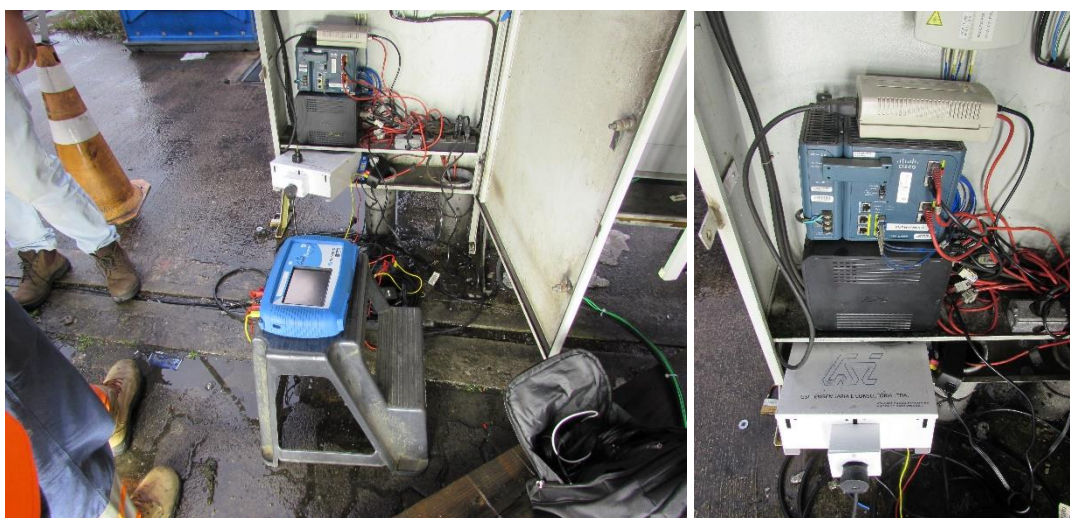
A seguir, serão apresentados os principais resultados obtidos durante o teste final em campo.

Figura 48 – Carga de iluminação LED utilizada nos testes



Fonte: GSI (2018).

Figura 49 – Disposição dos equipamentos durante teste



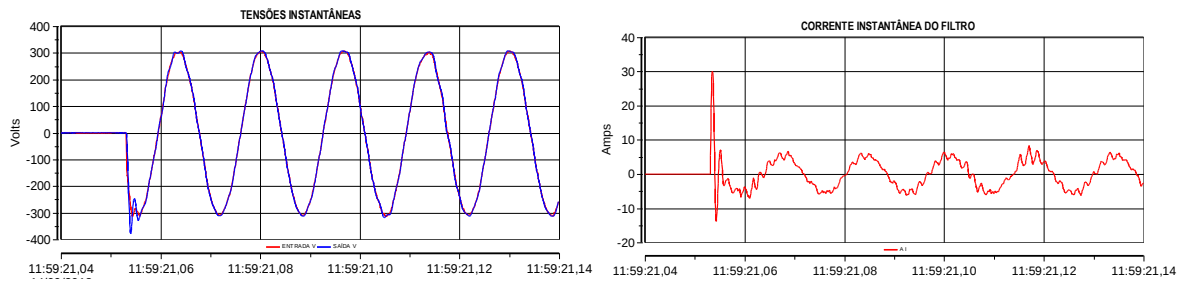
Fonte: GSI (2018).

#### 4.1 MANOBRAS DE CHAVEAMENTOS DO FILTRO E OPERAÇÃO À VAZIO

Em primeiro momento, realizou-se testes com o filtro sem a presença das cargas de iluminação. Os resultados apresentados a seguir foram obtidos através de registros dos eventos de manobras de energização, desenergização e operação do filtro a vazio, inicialmente sem qualquer influência dos sistemas de iluminação.

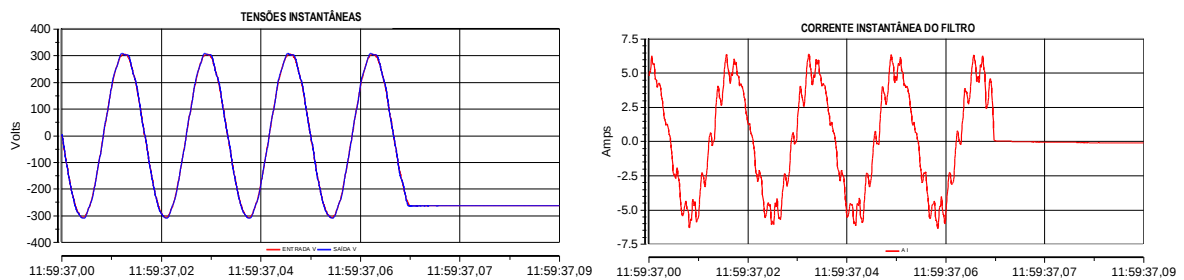
As formas de onda das tensões e correntes na Figura 50 foram registradas durante uma manobra de energização do filtro LC, enquanto a Figura 51 apresenta essas mesmas grandezas durante a desenergização.

Figura 50 – Tensões do filtro LC durante manobra de energização



Fonte: GSI (2018).

Figura 51 – Tensões e correntes do filtro LC durante manobra de desenergização



Fonte: GSI (2018).

A Figura 52 mostra as tensões eficazes medidas na entrada e na saída do filtro. A comparação entre essas grandezas indica uma diferença na ordem 1%, indicando que não houve variações significativas nos níveis de tensão com a aplicação do filtro.

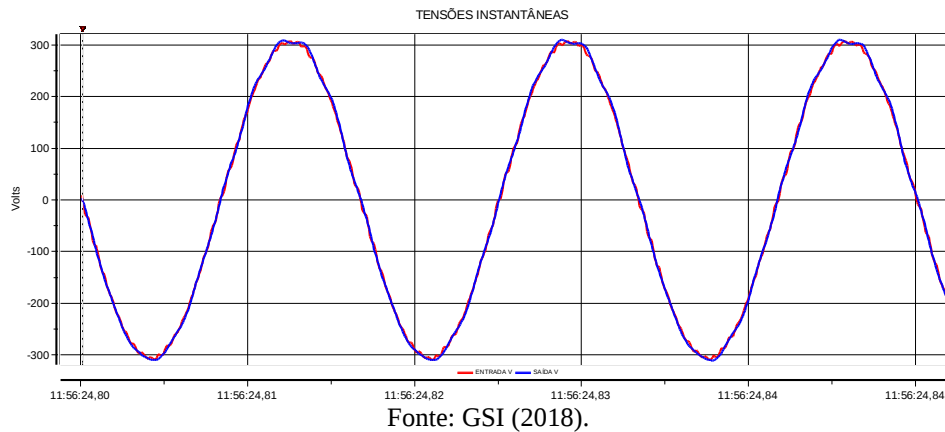
Figura 52 – Comportamento dos valores eficazes das tensões do filtro



Fonte: GSI (2018).

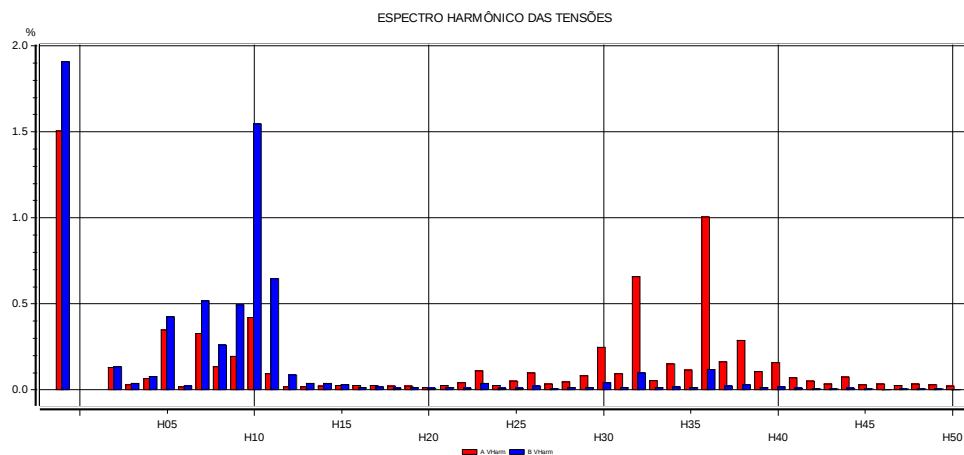
A Figura 53 ilustra, durante a operação do filtro à vazio (sem qualquer influência do sistema de iluminação), as respectivas formas de onda das tensões na entrada e na saída do filtro.

Figura 53 – Forma de onda das tensões do filtro em operação a vazio



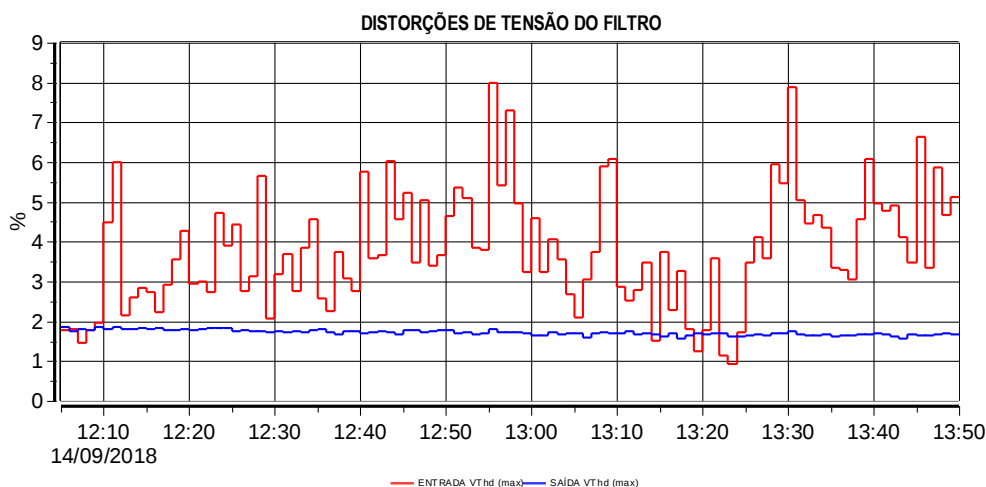
Para este instante específico, ambas distorções das tensões apresentaram valores inferiores a 2%, sendo a 36ª ordem a principal componente na entrada e um notável aumento do componente de 10ª ordem na saída. A Figura 54 mostra os respectivos componentes harmônicos para essa condição.

Figura 54 – Espectro harmônico das tensões do filtro em operação a vazio



As distorções das tensões integralizadas a cada minuto estão apresentadas na Figura 55, sendo notável a redução média das distorções na saída do filtro. As distorções referenciadas à tensão de entrada variaram entre 1 a 8%, enquanto as distorções na saída permaneceram inferiores a 2%, de acordo com os limites recomendados em norma.

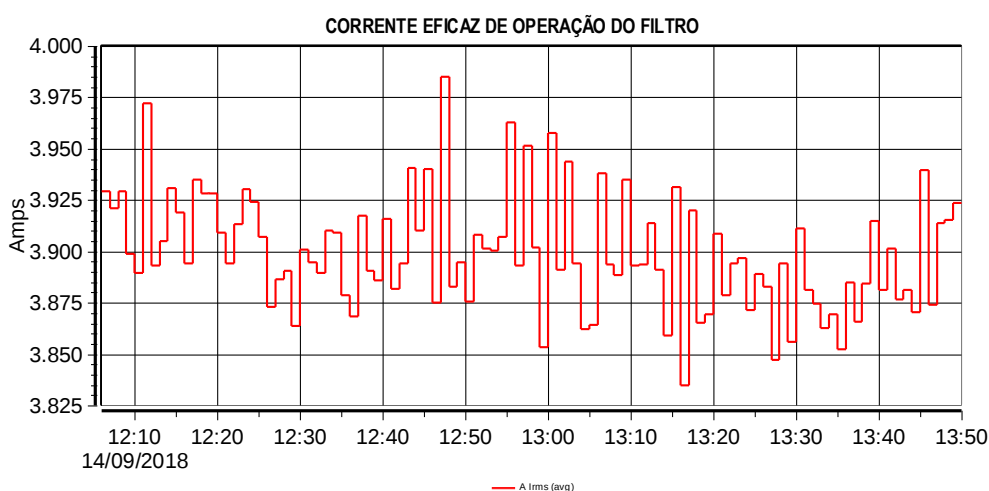
Figura 55 – Distorções médias das tensões de entrada e saída do filtro



Fonte: GSI (2018).

Por fim, o comportamento das correntes eficazes obtidas na entrada do filtro está mostrado na Figura 56, sendo que o máximo valor registrado foi inferior a 4 A durante a operação a vazio.

Figura 56 – Comportamento do valor eficaz da corrente do filtro em operação a vazio



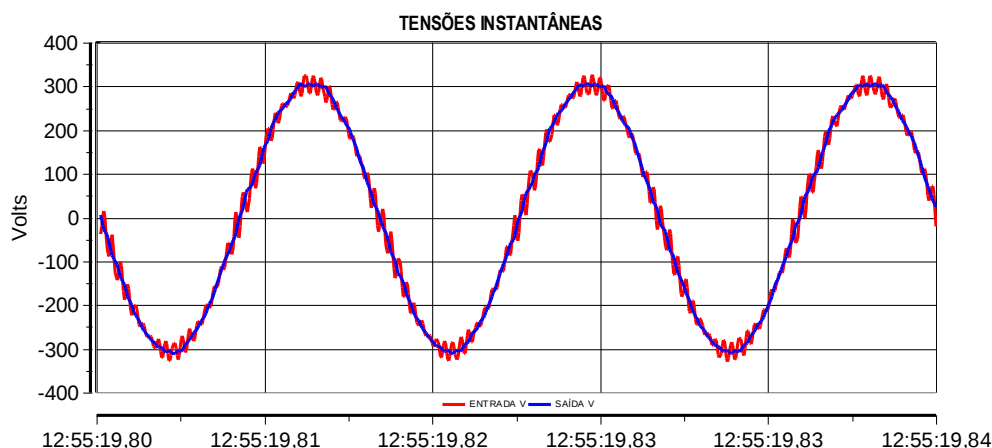
Fonte: GSI (2018).

## 4.2 OPERAÇÃO COM OS SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO LED

A etapa final dos testes de desempenho do protótipo consiste na conexão do *nobreak* na saída do filtro e, logo após, a energização das cargas de iluminação. Para tanto, foram ligadas 21 luminárias LED, potência unitária igual a 350 W, no mesmo circuito e quadro de distribuição do filtro. Desta forma, notou-se que as distorções na entrada do filtro sofreram um aumento significativo.

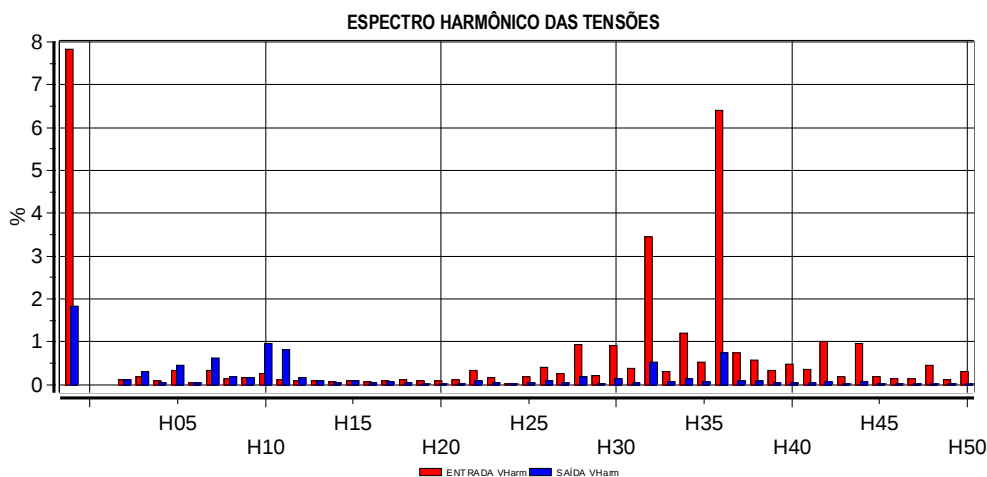
A Figura 57 mostra as formas de onda das tensões de entrada e saída do filtro para esta condição de operação do sistema. Já a Figura 58 apresenta os respectivos componentes harmônicos resultantes, ficando evidente que na saída do filtro LC as oscilações de altas frequências foram reduzidas consideravelmente. Observa-se redução das distorções, próximas a 8% nas tensões de entrada e inferiores a 2% na saída do filtro.

Figura 57 – Formas de onda das tensões do filtro LC com iluminação LED



Fonte: GSI (2018).

Figura 58 – Espectros harmônicos das tensões do filtro LC com iluminação LED



Fonte: GSI (2018).

A forma de onda da corrente de operação do filtro, para condição de carregamento das 21 luminárias, pode ser verificada na Figura 59 enquanto que na Figura 60, é mostrado seu respectivo espectro harmônico. A corrente eficaz da componente fundamental registrada pelo medidor foi de 3,78 A e a corrente eficaz total obtida, considerando os harmônicos, foi de 4,05 A, com distorção percentual total, ligeiramente inferior a 40%.

Figura 59 – Correntes do filtro LC com a iluminação LED em operação

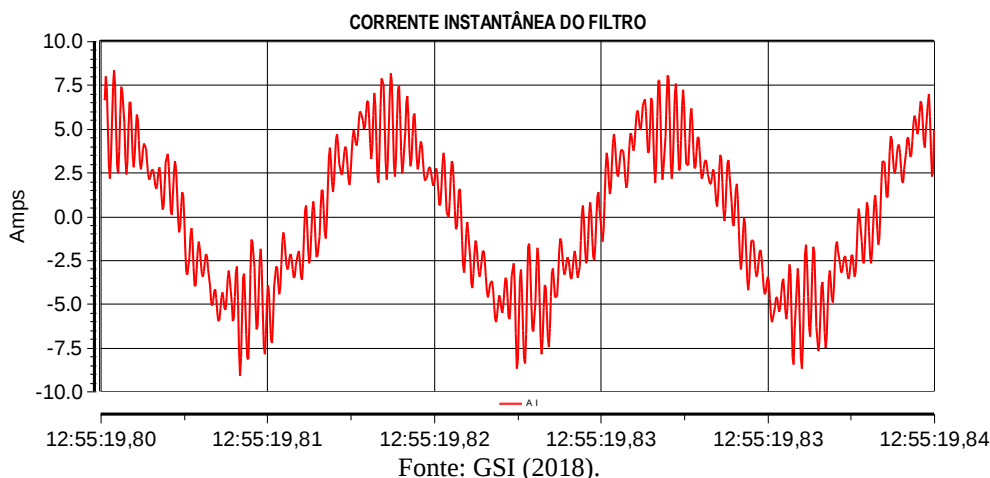
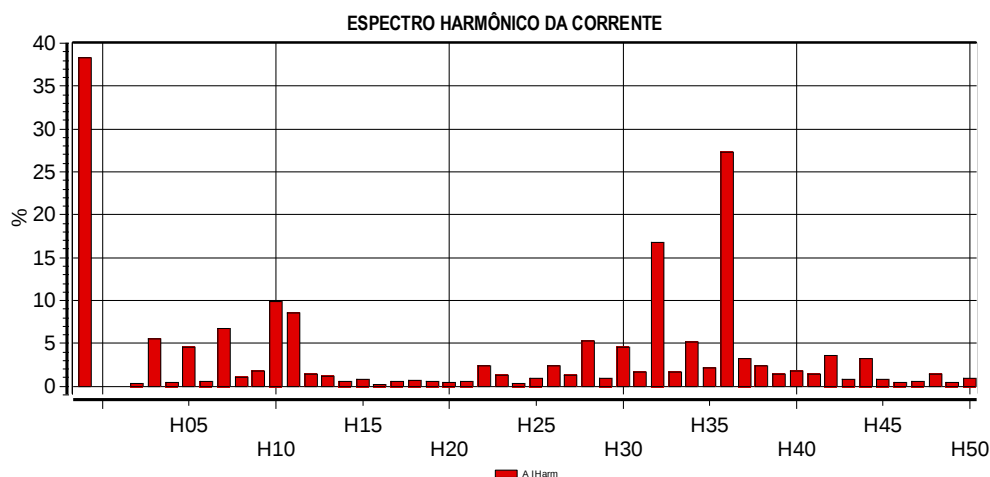


Figura 60 – Espectro harmônico das correntes de operação do filtro LC



Através dessa medição, observa-se que as componentes harmônicas preponderantes foram as de 32ª e 36ª ordens, componentes estas impostas pelo próprio sistema e que causavam as perturbações e distúrbios nas tensões de entrada do *nobreak*.

#### 4.3 ANÁLISE DO DESEMPENHO OPERACIONAL DO FILTRO

Este item apresenta uma análise comparativa entre os principais resultados obtidos nas medições, conforme monitoramento do desempenho do protótipo do filtro LC.

A Tabela 9 mostra um resumo dos valores – integralizados a cada minuto – das medições das tensões e correntes na entrada e saída do filtro. Destaca-se a redução dos máximos valores de DHTv, de aproximadamente 8,0% na entrada para 1,8% na saída. Os níveis de tensão antes e depois do filtro também não sofreram alterações relevantes, como esperado.

Tabela 9 – Análise das medições do filtro

| Indicador            | Local   | Mínimo | Médio | Máximo |
|----------------------|---------|--------|-------|--------|
| $U_{RMS}$ (V)        | Entrada | 0,977  | 0,984 | 0,991  |
|                      | Saída   | 0,983  | 0,990 | 1,000  |
| DHT <sub>V</sub> (%) | Entrada | 0,932  | 4,014 | 7,979  |
|                      | Saída   | 1,578  | 1,680 | 1,838  |
| $I_{RMS}$ (A)        | Entrada | 3,80   | 3,90  | 4,00   |
| DHT <sub>I</sub> (%) | Entrada | 17,56  | 25,05 | 38,50  |

Fonte: autor

Fica, então, caracterizada a eficácia do desempenho do filtro proposto, com reduções significativas das distorções das tensões.

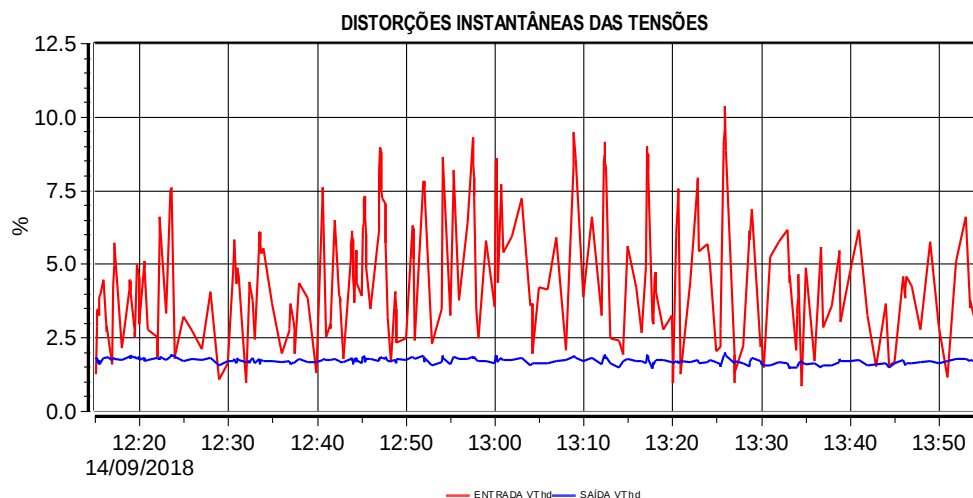
Os níveis máximos de DHT<sub>V</sub> medidos na entrada do filtro, próximos a 7,9%, não superaram os limites definidos em norma, tanto pela IEEE 519 (8%) quanto para o módulo 8 do Prodist (10%), para sistemas com tensão nominal inferior a 1 kV. É interessante notar que mesmo sem a superação dos limites globais definidos por norma, o sistema apresentou problemas devido aos níveis harmônicos.

A seguir, serão apresentadas as comparações entre as distorções individuais para as componentes harmônicas de frequências mais altas, que estavam relacionadas diretamente aos problemas encontrados na análise do sistema.

De forma a demonstrar a real atenuação do filtro proposto, além dos resultados apresentados anteriormente, são apresentados na Figura 61 os valores instantâneos obtidos nas medições das distorções harmônicas totais associadas às tensões de entrada e saída do filtro.

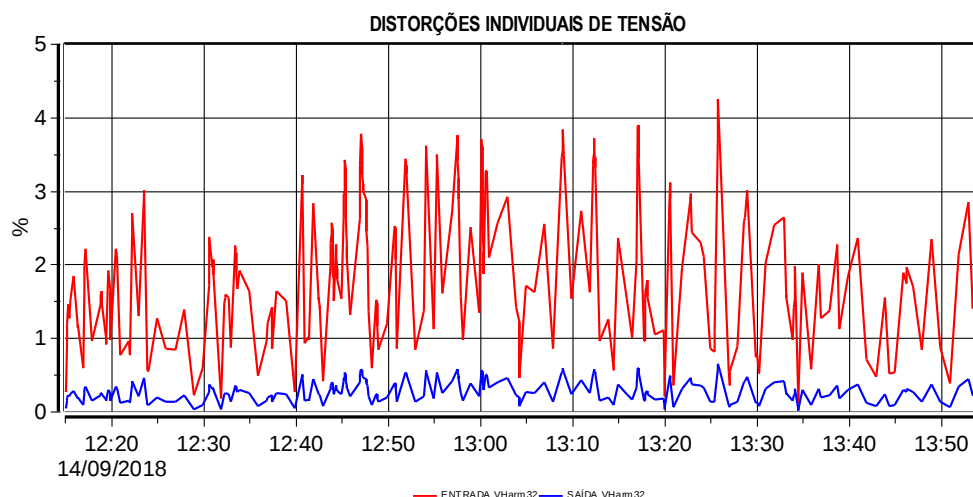
A Figura 62 mostra a comparação entre a DHT da componente de 32<sup>a</sup> ordem medida na entrada e saída do filtro. São observadas reduções de valores próximos a 3,5%, na entrada, para valores inferiores a 0,5%, na saída.

Figura 61 – Distorção harmônica total instantânea das tensões na entrada e saída do filtro



Fonte: GSI (2018).

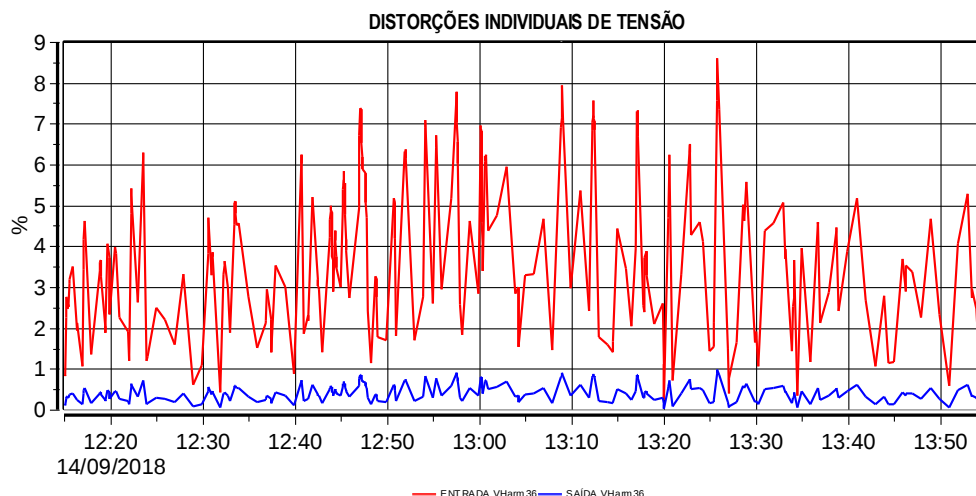
Figura 62 – Distorção harmônica individual da componente de 32ª ordem das tensões de entrada e saída do filtro



Fonte: GSI (2018).

Considerando, agora, a componente de 36ª ordem, observa-se reduções ainda mais significativas. A distorção individual – apresentada na Figura 63 – para essa componente na entrada do filtro, que ficava próxima a 7%, foi reduzida a valores inferiores a 0,8% na saída.

Figura 63 – Distorção harmônica individual da componente de 36a ordem das tensões de entrada e saída do filtro



Fonte: GSI (2018).

A Tabela 10 mostra uma análise comparativa entre as distorções individuais dos componentes de 32ª e 36ª ordens, considerando as medições na entrada e saída do filtro. Os resultados obtidos na saída do filtro, para alimentação dos *nobreaks* e respectivas cargas críticas, são satisfatórios.

Tabela 10 – Comparação entre os principais componentes harmônicos individuais do sistema

| Indicador                      | Local   | Mínimo | Médio | Máximo | Limite (Prodlist) |
|--------------------------------|---------|--------|-------|--------|-------------------|
| DHI <sub>V</sub> (%)<br>n = 32 | Entrada | 0,092  | 1,701 | 3,746  | 1,000             |
|                                | Saída   | 0,007  | 0,264 | 0,562  |                   |
| DHI <sub>V</sub> (%)<br>n = 36 | Entrada | 0,156  | 3,425 | 6,926  | 1,000             |
|                                | Saída   | 0,016  | 0,398 | 0,802  |                   |

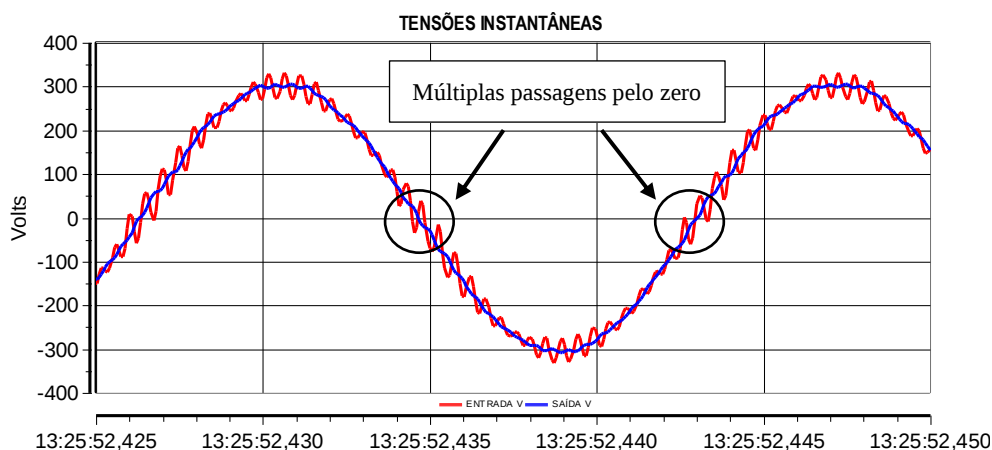
Fonte: autor

Em relação aos limites de DHI<sub>V</sub> definidos no Prodlist, levando em conta a ordem harmônica e o nível de tensão do sistema, nota-se que antes do filtro os valores máximos de distorção para as 32ª e 36ª ordens estavam muito acima do recomendado. Já na saída do filtro, observou-se uma redução significativa.

A Figura 64 ilustra a comparação efetiva entre as formas de onda das tensões de entrada e saída do filtro. São comprovados os resultados desta análise durante as maiores distorções registradas nos testes em campo, destacando-se que o principal efeito causado pelas altas distorções de tensão do sistema elétrico estava relacionado aos múltiplos cruzamentos adicionais pelo zero. Com a instalação do filtro, essas perturbações foram

eliminadas, já que em sua saída são observadas somente passagens pelo zero natural das formas de onda das tensões.

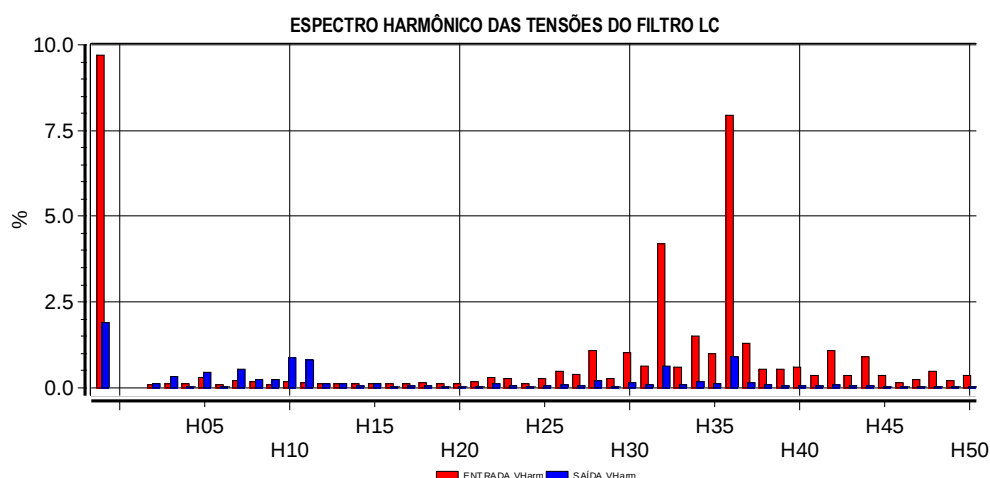
Figura 64 – Formas de onda das tensões de entrada e saída do filtro com os sistemas de iluminação LED em plena operação.



Fonte: GSI (2018).

Na Figura 65, tem-se a comparação entre o espectro harmônico das tensões antes e depois do filtro. A distorção harmônica total, na entrada, de 10% foi reduzida para 2%, na saída do filtro. Dessa forma, as tensões de alimentação para o sistema do *nobreak* apresentam distorções reduzidas e comportamento adequado para a operação das cargas sensíveis, mesmo com a forte influência da interação do sistema elétrico e das amplificações das correntes dos *drivers* de controle utilizados nos sistemas de iluminação por LEDs.

Figura 65 – Espectros harmônico das tensões de entrada e saída do filtro com os sistemas de iluminação LED em plena operação



Fonte: GSI (2018).

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou um estudo de caso envolvendo problemas de qualidade da energia elétrica relacionados a aplicação de um projeto de eficiência energética baseado em iluminação LED. Com a implementação desse projeto, o sistema de iluminação instalado na área externa de um sistema portuário foi atualizado, havendo a ampla substituição das lâmpadas de vapor metálico, que faziam parte da iluminação antiga, por refletores a LED. Após a substituição, foram constatadas diversas falhas de equipamentos críticos, como câmeras de monitoramento e antenas de comunicação, empregados em sistemas de supervisão.

Diante dos resultados obtidos na campanha de medição para caracterizar o sistema, foram detectados altos índices de distorção harmônica, com valores superiores aos recomendados em norma. Os distúrbios causados por essa condição surgiram da interação entre inter-harmônicos pré-existentes no sistema elétrico em análise e os *drivers* utilizados nos refletores que compõe o novo sistema de iluminação. Dessa forma, a operação dos dispositivos de iluminação LED causou a amplificação das distorções, tanto das tensões quanto das correntes, que já existiam no sistema, afetando os equipamentos conectados no mesmo ponto de alimentação.

Como consequência operacional devido aos transtornos relacionados à queima dos equipamentos de monitoramento, chegou-se na decisão administrativa de retornar à utilização das lâmpadas convencionais a vapor metálico, já que estas não apresentavam esse tipo de problema no sistema.

Através de testes realizados em outro sistema elétrico, os componentes harmônicos das correntes injetadas pelos *drivers* de controle dos refletores apresentaram comportamento esperado, estando em conformidade com os valores limites normalizados e implicando que os distúrbios eram inerentes ao sistema elétrico portuário.

Devido à necessidade de fundamentar a aplicação do projeto de eficiência energética com o novo sistema de iluminação, foi proposta a aplicação de filtros passivos para mitigação dos problemas relatados. Após a identificação da causa raiz dos problemas, a topologia escolhida foi a de filtros do tipo passa-baixa LC. A validação do filtro escolhido foi realizada por meio de modelagem e simulações no *software ATPDraw* e testes e medições de um protótipo com fontes programáveis em laboratório.

Diante dos resultados obtidos nas medições em campo – realizadas nas próprias instalações do sistema portuário – durante os testes finais com o protótipo, concluiu-se que a configuração do filtro LC se mostrou plenamente adequada ao objetivo de diminuir os níveis de distorção harmônica no ponto de alimentação dos *nobreaks*, mesmo em condição de operação conjunta com os sistemas de iluminação LED, validando a solução proposta. Constata-se, então, que os resultados obtidos foram categóricos e comprovaram as reduções significativas nas distorções de tensão e a eliminação de eventos de *zero crossing* na alimentação dos *nobreaks*.

Cabe destacar que as distorções de tensão devido à interação com os drivers dos LEDs continuarão presentes no sistema, uma vez que a instalação dos filtros LC foi uma medida de caráter a mitigar um problema causado pela alta incidência de harmônicos na operação dos *nobreaks* e de suas respectivas cargas críticas. Neste sentido, foi recomendada uma avaliação através de medições de qualidade da energia e um estudo detalhado do fluxo harmônico para análise global do sistema.

Após a comprovação do funcionamento do protótipo desenvolvido, foram instalados dez filtros LC ao longo dos pontos de alimentação conjunta dos sistemas de iluminação e dos *nobreaks*, culminando na finalização do projeto de eficiência energética, com a reinstalação de todos os refletores LED.

Como trabalho futuro sugere-se o desenvolvimento de um estudo a respeito de inter-harmônicos em sistemas elétricos, envolvendo a identificação dos mecanismos relacionados à sua geração e suas principais consequências no contexto da qualidade da energia elétrica.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional: módulo 8 – qualidade da energia elétrica**, revisão 12, vigente a partir de 01/01/2021. Brasília: Aneel, 2021.

ANTUNES, Fernando; LEÃO, Ruth; SAMPAIO, Raimundo. **Harmônicos em sistemas elétricos**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.

BOYLESTAD, Robert L. **Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos**. 11. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2013.

COGO, João Roberto; SOQUEIRA FILHO, José Batista. **Capacitores de potência e filtros de harmônicos**. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna, 2018.

DRANETZ. **PowerXplorer PX5 user's guide**. New Jersey: Edison, 2005.

DUGAN, Roger C; MCGRANAGHAN, Mark F; SANTOSO, Surya; BEATY, H. Wayne. **Electrical power systems quality**. 2.ed. New York, US: McGrawHill, 2002.

GSI. **RT1194-18: análise da qualidade da energia: falhas de equipamentos e operação dos sistemas de iluminação por LED**. Taubaté, 2018.

GSI. **RT1196-18: adequação da operação do sistema de alimentação de no-breaks - especificação básica de filtros**. Taubaté, 2018.

IEC. **Electromagnetic compatibility (EMC): part 3-2: limits - limits for harmonic current emissions (equipment input current  $\leq 16$  A per phase)**: IEC 61000-3-2:2018. 2018.

IEEE. **Recommended practice and requirements for harmonic control in electric power systems**: IEEE Std 519-2014. IEEE Power and Energy Society, jun. 2014.

JESUS, Nelson C; SANTOS, Gustavo R.; DUARTE, Luiz M.; FRANCO, Thiago P.; JESUS, Willian S. Identificação de problemas de qualidade de energia e proposta de solução devido à interação com sistemas de iluminação a LED e ocorrências de múltiplas passagens pelo zero das tensões. *In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA*, 26., 2022, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro, 2022.

KALAIR Anam R.; ABAS, Naeem; KALAIR, A. Raza.; SALEEM, Zahid; KHAN, Nasrullah. Review of harmonic analysis, modeling and mitigation techniques. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 78, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032117306226?via%3Dihub>. Acesso em: 31 ago. 2022.

KUSKO, Alexander; THOMPSON, Marc T. **Power quality in electrical systems**. New York: McGraw-Hill, 2007.

MACEDO JÚNIOR, José Rubens. **Uma contribuição à análise das componentes inter-harmônicas e seus efeitos nos indicadores de flutuação de tensão.** 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2009.

POURARAB, Morteza H., NAKHODCHI, Naser., MONFARED, Mohammad. **Harmonic Analysis of LED Street Lighting According to IEC61000-3-2: a case study.** *In*: 23rd INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICITY DISTRIBUTION, 2015, Lyon.

PRIKLER, László; HØIDALEN, Hans Kristian; PEÑALOZA, Francisco. **Users' manual ATPDRAW version 7.2 for Windows.** Noruega, 2020. Disponível em: <https://www.atpdraw.net/index.php>. Acesso em: 31 ago. 2022.