



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS (UFG)
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO (EMC)
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
COMPUTAÇÃO (PPGEEC)

LUCAS LOURES ROSA

Aspectos Luminotécnicos e da Qualidade da Energia de Lâmpadas com Tecnologia LED, Fluorescente e Vapor de Mercúrio

Goiânia
2021



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES
E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

☒ Dissertação ☐ Tese

2. Nome completo do autor

Lucas Loures Rosa

3. Título do trabalho

“Aspectos Luminotécnicos e da Qualidade da Energia de Lâmpadas com Tecnologia LED, Fluorescente e Vapor de Mercúrio”

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento ☒ SIM ☐ NÃO

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

- a) consulta ao(a) autor(a) e ao(a) orientador(a);
- b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.

O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por Bernardo Pinheiro De Alvarenga, Professor do Magistério Superior, em 04/01/2022, às 08:56, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por LUCAS LOURES ROSA, Discente, em 04/01/2022, às 19:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador 2608924 e o código CRC 5D4EE124.

LUCAS LOURES ROSA

Aspectos Luminotécnicos e da Qualidade da Energia de Lâmpadas com Tecnologia LED, Fluorescente e Vapor de Mercúrio

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da Universidade Federal de Goiás, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Engenharia Elétrica.
Orientador: Prof. Dr. Bernardo Pinheiro de Alvarenga

Coorientador: Prof. Dr. Euler Bueno dos Santos

Goiânia
2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Rosa, Lucas Loures

Aspectos Luminotécnicos e da Qualidade da Energia de Lâmpadas
com Tecnologia LED, Fluorescente e Vapor de Mercúrio [manuscrito]
/ Lucas Loures Rosa. - 2021.

90 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Bernardo Pinheiro de Alvarenga; co
orientador Dr. Euler Bueno dos Santos.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola
de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Goiânia,
2021.

Bibliografia. Apêndice.

Inclui siglas, fotografias, abreviaturas, símbolos, gráfico, tabelas,
lista de figuras, lista de tabelas.

1. Harmônicas. 2. cargas não lineares. 3. lâmpada fluorescente. 4.
lâmpada a vapor de mercúrio. 5. lâmpada de LED. I. Alvarenga,
Bernardo Pinheiro de, orient. II. Título.

CDU 621.3



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Ata nº 09 da sessão de Defesa de Dissertação de Lucas Loures Rosa, que confere o título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Computação, na área de concentração em Engenharia Elétrica.

Aos vinte e dois dias do mês de outubro de dois mil e vinte e um, a partir das 14h00min., realizou-se a sessão pública de Defesa de Dissertação intitulada "Aspectos Luminotécnicos e da Qualidade da Energia de Lâmpadas com Tecnologia LED, Fluorescente e Vapor de Mercúrio". Os trabalhos foram instalados pelo Orientador, Professor Doutor Bernardo Pinheiro de Alvarenga (EMC/UFG) com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professor Doutor Euler Bueno dos Santos (EMC/UFG), membro titular interno; Professor Doutor Fernando Nunes Belchior - (FCT/UFG), membro titular externo; cujas participações ocorreram através de videoconferência. Durante a arguição os membros da banca não fizeram sugestão de alteração do título do trabalho. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Dissertação, tendo sido o candidato aprovado pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo Professor Doutor, Bernardo Pinheiro de Alvarenga Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, aos vinte e dois dias do mês de outubro de dois mil e vinte e um.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA



Documento assinado eletronicamente por Bernardo Pinheiro De Alvarenga, Professor do Magistério Superior, em 22/10/2021, às 16:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por Euler Bueno dos Santos, Usuário Externo, em 22/10/2021, às 16:08, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por Fernando Nunes Belchior, Professor do Magistério Superior, em 22/10/2021, às 16:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por LUCAS LOURES ROSA, Discente, em 26/10/2021, às 20:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador 2426335 e o código CRC 7D669920.

Lucas Loures Rosa

Graduou-se em Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Goiás (UFG). Após sua graduação, desenvolveu trabalhos relacionados a iluminação e eficiência energética em um projeto de P&D entre UFG e CELG Distribuição. Durante o Mestrado, na UFG, desenvolveu trabalhos com base em fundamentação teórica e dados de ensaios em laboratório e na indústria, relacionados a qualidade da energia e luminotécnica. Participou como apresentador da Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica (XIV CBQEE 2021).

Dedico este trabalho aos meus pais Jahudehir e Luzia, minha irmã Ludmila e seu esposo Luciano e minha esposa Ana Carolina, com admiração e gratidão pelo apoio, carinho e presença ao longo do período de elaboração deste trabalho.

Agradecimentos

Em primeiro lugar agradecer a Deus por toda sabedoria que me permitiu seguir em frente com este trabalho.

A meus pais e minha irmã, que sempre estiveram ao meu lado apoiando e incentivando a ter persistência nos meus objetivos.

A minha esposa, Ana Carolina, que através de sua compreensão e conselhos me fortaleceu nos momentos complexos da pesquisa.

Ao Prof. Dr. Euler Bueno dos Santos pelas valiosas sugestões, pela confiança, orientação, suporte e reuniões até em finais de semana e feriados, enfim por todo apoio na realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Bernardo Pinheiro de Alvarenga pelas orientações e diretrizes estratégicas para desenvolvimento e conclusão deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Thyago Carvalho Marques pelas orientações e incentivo para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao assistente da coordenação do curso de mestrado João Antônio dos Reis, professores e demais funcionários da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da UFG, por todo suporte e esclarecimento de dúvidas.

Aos meus colegas da empresa que sempre me apoiaram nessa difícil jornada de conciliação entre o mestrado e o trabalho.

“Aprenda com o ontem. Viva o hoje.
Tenha esperança para o amanhã”

Albert Einsten.

Resumo

Loures Rosa, Lucas. Aspectos luminotécnicos e da qualidade da energia de lâmpadas com tecnologia LED, Fluorescente e Vapor de Mercúrio. Goiânia, 2021. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação, Universidade Federal de Goiás.

O avanço da tecnologia e da eletrônica de potência permitiu um forte avanço nas produções em grande escala de dispositivos eletrônicos, os quais são incorporados aos sistemas elétricos já existentes, na maioria das vezes, logo nota-se um cenário de modificação no tipo de carga interligada ao sistema de distribuição de energia elétrica. Entretanto, estes dispositivos podem provocar alteração no comportamento de componentes do sistema, causadas pelas harmônicas que podem resultar em danos diversos a equipamentos elétricos.

Estes dispositivos são atrativos aos consumidores, pois oferecem a oportunidade de menor consumo de energia elétrica, como no caso de lâmpadas com potência ativa menor que as convencionais em mais de 50%. Deve-se conhecer melhor as características elétricas destes dispositivos de forma que se possa dimensionar corretamente os circuitos alimentadores, bem como, elaborar estratégias para solucionar possíveis problemas oriundos de efeitos indesejados. Neste contexto este trabalho constitui uma análise, realizando confrontações entre dados obtidos de dispositivos tradicionais e de outros mais modernos (“eficientes”), em sistema de iluminação no setor industrial. Entre os dispositivos tradicionais, esta pesquisa aborda as lâmpadas fluorescentes e à vapor de mercúrio e no caso das lâmpadas modernas as de LED. Neste sentido, são apresentados estudos de caso, com diferentes tipos de tecnologias, que permitem a obtenção de indicadores da qualidade da energia elétrica, com satisfatória precisão e confiabilidade. É importante salientar que os dados referentes à parte experimental foram coletados em ambiente industrial, com a finalidade de propiciar uma análise quali-quantitativa, com a melhor fidelidade possível.

Palavras-chave

Harmônicas, cargas não lineares, lâmpada fluorescente, lâmpada a vapor de mercúrio, lâmpada de LED

Abstract

Loures Rosa, Lucas. Lighting and power quality aspects of lamps with LED, Fluorescent and Mercury Vapor technology. Goiânia, 2021. Masters dissertation. School of Electrical Engineering and Computing, Federal University of Goiás.

The advancement of technology and power electronics has allowed a strong advance in large-scale production of electronic devices, which are incorporated into existing electrical systems, in most cases, so there is a change scenario in the type of interconnected load to the electricity distribution system. However, these devices can cause changes in the behavior of system components, caused by harmonics that can result in various damages to electrical equipment. These devices are attractive to consumers, as they offer the opportunity to consume less electricity, as in the case of lamps with active power less than conventional by more than 50%. The electrical characteristics of these devices must be better known so that the feeder circuits can be correctly dimensioned, as well as strategies to solve possible problems arising from unwanted effects. In this context, this work constitutes an analysis, performing confrontations between data obtained from traditional and more modern (“efficient”) devices, in a lighting system in the industrial sector. Among traditional devices, this research addresses fluorescent and mercury vapor lamps and, in the case of modern lamps, LED. In this sense, case studies are presented, with different types of technologies, which allow obtaining indicators of the power quality, with satisfactory precision and reliability. It is important to point out that the data referring to the experimental part were collected in an industrial environment, with the purpose of providing a qualitative and quantitative analysis, with the best possible fidelity.

Keywords

Harmonics, non-linear loads, fluorescent lamp, mercury vapor lamp, LED lamp

Lista de Figuras

Figura 1.1 Matriz Elétrica Brasileira 2020.	17
Figura 1.2 Anuário EPE 2020 – Novas ligações 2019.	17
Figura 1.3 Nível reservatório Serra da Mesa.	18
Figura 2.1 Lâmpada Incandescente.	25
Figura 2.2 Esquemático da Lâmpada Fluorescente.	26
Figura 2.3 Lâmpada a vapor de mercúrio.	27
Figura 2.4 Tipos de LED.	28
Figura 2.5 Eficiência Energética e Vida Útil.	28
Figura 2.6 Forma de onda distorcida e componentes harmônicas.	30
Figura 2.7 Exemplo de distribuição de níveis de harmônicas em uma instalação no sistema de distribuição corrente alternada.	34
Figura 3.8 Esquema unifilar parcial da indústria.	37
Figura 3.9 Fluxograma do programa computacional monofásico.	41
Figura 3.10 Esquema unifilar parcial da Indústria.	47
Figura 3.11 Analisador conectado na condição trifásica.	48
Figura 3.12 Luxímetro digital.	48
Figura 3.13 Gabarito com altura de 720 mm.	49
Figura 3.14 Malha de pontos para medição.	50
Figura 3.15 Ambiente com os pontos da faixa marginal.	51
Figura 3.16 Fluxograma do programa computacional trifásico.	52
Figura 4.1 Comportamento da tensão em circuitos com lâmpadas de LED.	54
Figura 4.2 Comportamento da tensão em circuitos com lâmpadas a vapor de mercúrio.	55
Figura 4.3 Comportamento da corrente em circuitos com lâmpadas de LED.	56
Figura 4.4 Comportamento da corrente em circuitos com lâmpadas a vapor de mercúrio.	57
Figura 4.5 THDi em circuitos com lâmpadas de LED.	57
Figura 4.6 THDi em circuitos com lâmpadas a vapor de mercúrio.	58
Figura 4.7 Distorção individual de corrente em circuitos com lâmpadas de LED.	59
Figura 4.8 Distorção individual de corrente em circuitos com lâmpadas a vapor de mercúrio.	59

Figura 4.9 IHDI na fase A, em circuitos com lâmpadas de LED.	60
Figura 4.10 IHDI na fase B, em circuitos com lâmpadas de LED.	60
Figura 4.11 IHDI na fase C, em circuitos com lâmpadas de LED.	61
Figura 4.12 IHDI da componente contínua, em circuitos com lâmpadas de LED.	61
Figura 4.13 IHDI na fase A, em circuitos com lâmpadas a vapor de mercúrio.	62
Figura 4.14 IHDI na fase B, em circuitos com lâmpadas a vapor de mercúrio.	62
Figura 4.15 IHDI na fase C, em circuitos com lâmpadas a vapor de mercúrio.	63
Figura 4.16 IHDI da componente contínua, em circuitos com lâmpadas a vapor de mercúrio.	63
Figura 4.17 Comportamento da potência aparente para circuitos com lâmpadas de LED.	65
Figura 4.18 Comportamento da potência ativa para circuitos com lâmpadas de LED.	66
Figura 4.19 Comportamento da potência não ativa para circuitos com lâmpadas de LED.	66
Figura 4.20 Comportamento da potência aparente para circuitos com lâmpadas a vapor de mercúrio.	67
Figura 4.21 Comportamento da potência ativa para circuitos com lâmpadas a vapor de mercúrio.	68
Figura 4.22 Comportamento da potência não ativa para circuitos com lâmpadas a vapor de mercúrio.	68
Figura 4.23 Iluminância em lux, ao nível do plano de trabalho, para refletores com lâmpadas de LED.	69
Figura 4.24 Iluminância em lux, com o sensor ao nível do piso, para refletores com lâmpadas de LED.	70
Figura 4.25 Iluminância em lux, ao nível do plano de trabalho, para refletores com lâmpadas de LED.	71
Figura 4.26 Iluminância em lux, na faixa marginal ao nível do piso, para refletores com lâmpadas de LED.	72
Figura 4.27 Iluminância em lux, ao nível do plano de trabalho, para refletores com lâmpadas a vapor de Mercúrio.	73
Figura 4.28 Iluminância em lux, ao nível do solo, para refletores com lâmpadas a vapor de mercúrio.	74
Figura 4.29 Iluminância em lux, ao nível do plano de trabalho para refletores com lâmpadas a vapor de mercúrio.	75
Figura 4.30 Iluminância em lux, na faixa marginal ao nível do solo, para refletores com lâmpadas a vapor de mercúrio.	76

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Valores de referência globais das distorções harmônicas totais de tensão.....	32
Tabela 2.2 - Limites de distorção de tensão.	33
Tabela 2.3 - Limites de distorção de corrente Classe C > 25W.	35
Tabela 3.1 - Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 1 kV (380/220)	54
Tabela 4.2 –Potências de refletores com lâmpadas a vapor de mercúrio e com lâmpadas de LED.	64
Tabela 4.3 – Fator de Potência	65

Sumário

Capítulo 1.....	17
Introdução	17
1.1 Considerações Iniciais.....	17
1.2 Situações Climáticas	17
1.3 Medidas de Uso Racional	19
1.4 Sistemas de Iluminação e Qualidade de Dispositivos.....	19
1.5 Objetivos e Justificativas.....	22
1.6 Organização do texto.....	23
Capítulo 2.....	24
Tópicos de Luminotécnica e Harmônicas	24
2.1 Considerações Iniciais.....	24
2.2 Luminotécnica	24
2.2.1 História e Desenvolvimento das Lâmpadas	25
2.2.2 Normas e Regulamentações de Luminotécnica	29
2.3 Harmônicas.....	29
2.3.1 Cargas Lineares e Não Lineares	31
2.3.2 Distorções Harmônicas	31
2.3.3 Normas e Regulamentações de Qualidade da Energia	32
Capítulo 3.....	36
Materiais e Métodos	36
3.1 Considerações Iniciais.....	36
3.2 Método com Alimentação Monofásica	36
3.2.1 Equacionamento para Condição Monofásica	38
3.2.2 Programa Computacional para Condição Monofásica	40
3.3 Método com Alimentação Trifásica.....	42
3.3.1 Equacionamento para Condição Trifásica.....	42
3.3.2 Programa Computacional para condição Trifásica	51

Capítulo 4.....	53
Resultados e Discussão	53
4.1 Considerações Iniciais.....	53
4.2 Sistema na Condição Trifásica	53
4.2.1 Indicadores de Qualidade da Energia	54
4.2.2 Resultados de Potências	64
4.2.3 Indicadores de Luminotécnica	69
Capítulo 5.....	77
Conclusão.....	77
Referências Bibliográficas.....	79
Apêndice A.....	82
Artigos	82
A1 - Aspectos Luminotécnicos e de Qualidade da Energia de Lâmpadas Tubulares com Tecnologia LED e Fluorescentes na Indústria – Um estudo de Caso	83
A2 - Qualidade da Energia em Instalações Industriais Devido Refletores Contendo Lâmpadas a Vapor de Mercúrio e Lâmpadas LED – Um Estudo de Caso	90

Capítulo 1

Introdução

1.1 Considerações Iniciais

O presente capítulo apresenta uma abordagem sobre a matriz elétrica brasileira correlacionando com alterações climáticas e o aumento da demanda de energia elétrica. Como consequência deste cenário surge a necessidade do uso racional e de medidas de eficiência energética, como a utilização de novas tecnologias de iluminação e novas regulamentações.

A utilização destas novas tecnologias com menor consumo de energia elétrica é uma medida efetiva, desde que os dispositivos implementados não causem efeitos que possam tornar inoperante as instalações elétricas existentes. Logo, a investigação sobre o comportamento de indicadores de qualidade da energia devido a estes dispositivos torna-se necessária.

1.2 Situações Climáticas

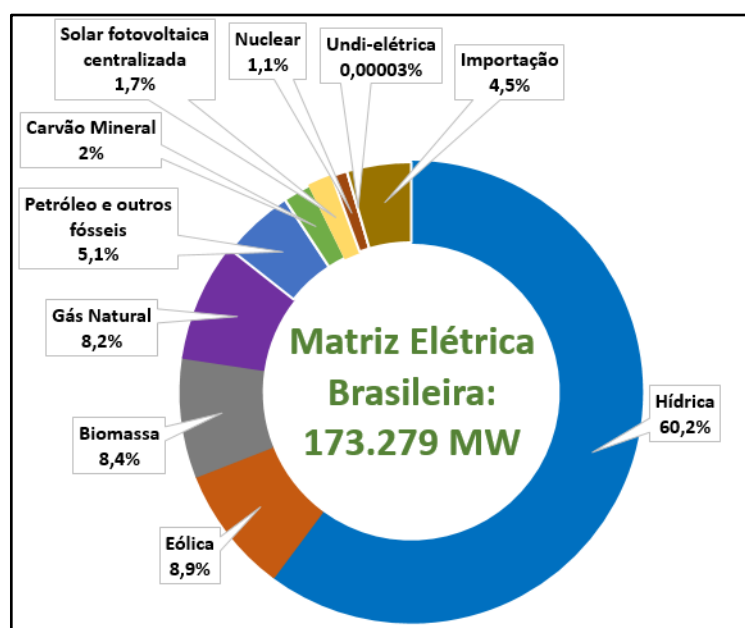
O território brasileiro, em virtude da sua localização e grande extensão, apresenta diferentes tipos de clima. Os principais climas do Brasil são: equatorial, tropical, semiárido, tropical de altitude, tropical atlântico e subtropical [1]. Há muitos anos o tema alterações climáticas é muito discutido e estudado por especialistas devido às grandes variações climáticas causadas pela interferência das ações do homem no meio ambiente.

Atualmente no Brasil, um tema preocupante é a escassez de chuva e os níveis de água dos reservatórios das hidrelétricas, sendo este o principal recurso adotado no país para geração de energia elétrica. A matriz elétrica brasileira, conforme Figura 1.1, é composta por diversas

fontes de geração de energia, como hidrelétrica, eólica, solar, biomassa, óleo, gás natural e outros.

As hidrelétricas correspondem 60,2% de toda geração de energia elétrica do Brasil [2], portanto nossa principal fonte de produção de energia, logo os níveis de reservatórios e a escassez de água tornam-se temas importantes.

Figura 1.1 Matriz Elétrica Brasileira 2020.



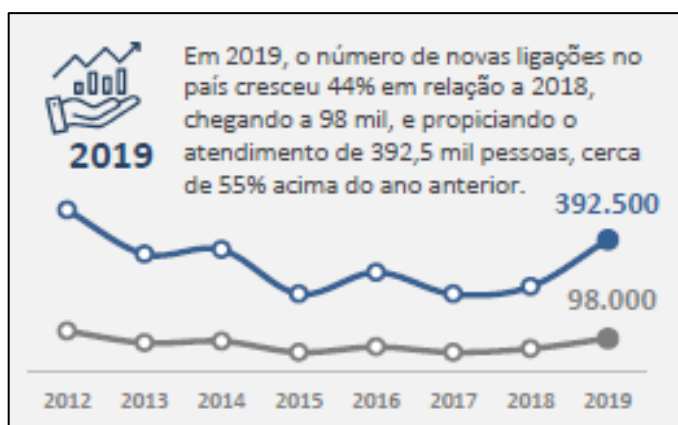
Fonte: ANEEL 2020.

Além das informações da ANEEL, outras informações relevantes são os dados do anuário estatístico de energia elétrica produzido pelo EPE (Empresa de Pesquisa Energética). Para o contexto atual, buscou-se referência no Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2020 (ano base 2019) que tem por objetivo trazer as principais informações relativas ao panorama nacional da cadeia de energia elétrica do Brasil, com destaque para o consumo de eletricidade, onde são apresentadas estatísticas das classes de consumo por subsistema, região e unidades federativas.

O EPE informa dados voltados para o consumo de energia elétrica, em forma de estratificação por tipo de fonte geradora de energia elétrica, por região e por classe (residencial, comercial, industrial, iluminação pública, rural entre outros).

A tendência no Brasil é de crescimento de demanda, já que a estimativa é crescer 3,6% ao ano até 2029, significando um acréscimo de 2.900 megawatts médios anualmente [3]. Vale observar que somente de 2018 para 2019, houve um aumento de 44% no número de novas ligações, conforme Figura 1.2, evidenciando assim um crescimento da demanda.

Figura 1.2 Anuário EPE 2020 – Novas ligações 2019.

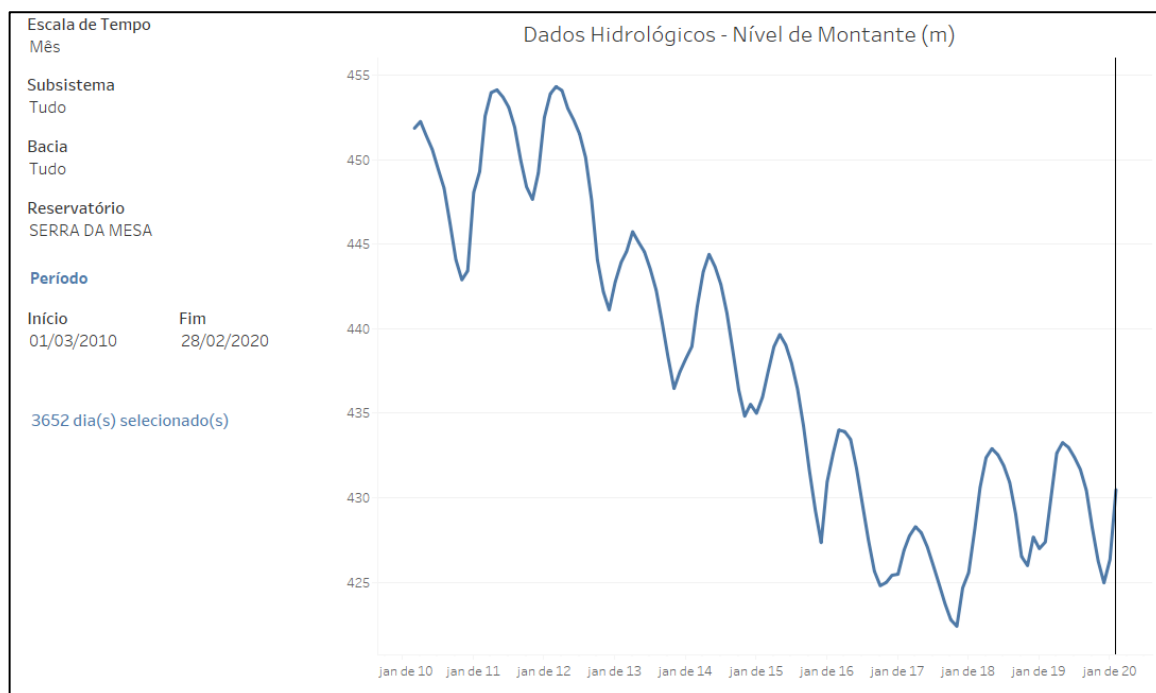


Fonte: EPE

Esta situação remete a uma necessidade de maior geração de energia elétrica, como a matriz elétrica brasileira depende do sistema hídrico, torna-se importante o monitoramento dos níveis dos reservatórios.

Em relação ao centro-oeste, percebe-se uma queda geral na capacidade de armazenamento do reservatório de Serra da Mesa, o maior da região. A Figura 1.3 apresenta o histórico de 2010 até 2020 com base no monitoramento da ONS [4], revelando uma situação de queda contínua, ano após ano, exceto entre 2018 e 2020 quando apresentou uma certa estabilidade.

Figura 1.3 Nível reservatório Serra da Mesa.



Fonte: ONS

Em valores percentuais, a redução do nível do reservatório é de cerca de 4% no período apresentado na Figura 1.3.

A situação é preocupante visto que o subsistema sudeste/centro-oeste, o qual é responsável por 70% da geração de energia hidrelétrica do Brasil, agora em agosto de 2021 está com capacidade máxima de armazenamento em 25,37% [4], ou seja, o sistema opera próximo do limite mínimo.

Com a redução nos níveis dos reservatórios o impacto na geração de energia elétrica é imediato, de modo que com o *start-up* de termelétricas o consumidor começa a pagar um preço mais elevado com o modelo de bandeiras tarifárias. Nesta temática, surge a necessidade do uso racional de energia elétrica e ações de eficiência energética.

1.3 Medidas de Uso Racional

Usar a energia de forma racional resulta em diversos benefícios, na perspectiva ambiental, reduz a necessidade de fazer obras para acompanhar o aumento da demanda por energia, como construção de usinas, de subestações e de linhas de transmissão e distribuição, que são empreendimentos que provocam um impacto ambiental significativo.

O governo brasileiro através da ANEEL tem diversas campanhas para promover o uso racional da energia elétrica, entretanto cada usuário deve ter o cuidado e atenção para evitar desperdícios de energia elétrica.

Em geral, os sistemas de iluminação são projetados para a pior situação, ou seja, normalmente para períodos noturnos. Por outro lado, durante o dia (quando há iluminação natural) acabam por permanecer ligados por falta de aberturas com o exterior ou por descuido dos usuários. O aproveitamento da iluminação natural em uma edificação influencia na qualidade da luz, comunicação com o exterior, economia de energia, entre outros benefícios.

Com o avanço tecnológico, dispositivos eletrônicos foram introduzidos no mercado de iluminação e os projetos luminotécnicos puderam evoluir para melhor atender aos requisitos de iluminação de um ambiente e redução do consumo de energia elétrica. Portanto, estudos sobre a qualidade dos dispositivos de iluminação são importantes para contribuir com o uso eficiente e com a qualidade da energia elétrica do sistema de distribuição.

1.4 Sistemas de Iluminação e Qualidade de Dispositivos

A iluminação de um ambiente é de extrema importância, sendo que cada aplicação exige um tipo e modelo de dispositivo específico, dependendo da atividade que será realizada no local. Observa-se que não existe uma regra geral para o sistema de iluminação ideal.

Ultimamente, o consumidor tem sido intensamente incentivado a realizar a substituição de sistemas de iluminação tradicional por sistemas mais modernos e econômicos, como por exemplo por lâmpadas de LED. Isso acontece para consumidores: residenciais, industriais, comerciais, organizações públicas, hospitais, escolas, aeroportos e para a iluminação pública [5].

Além do baixo consumo de energia, é preciso observar a qualidade da iluminação proporcionada pelo tipo de lâmpada e outras características técnicas como o fator de potência e a distorção harmônica, que tem impacto direto no sistema de distribuição de energia elétrica.

A forma mais simples de se obter essas informações é observar nas próprias embalagens ou manuais dos produtos, porém nem sempre essas informações são fornecidas de maneira clara e confiável para o consumidor. Assim sendo, ensaios em laboratório e estudos tornam-se muito importantes para verificação de dados técnicos [6].

Com a disponibilidade de uma nova tecnologia, o PROCEL (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica) tornou-se um grande incentivador da substituição por equipamentos mais eficientes que utilizam energia elétrica. Os seguintes dispositivos tiveram seu uso recomendado pelo PROCEL no decorrer do tempo:

- Lâmpadas fluorescentes compactas (LFCs);
- *Dimmers* para controle do nível de iluminação;
- Lâmpadas e televisores com LEDs.

As cargas acima relacionadas são todas não lineares, o que resulta em injeção de correntes harmônicas dentro das unidades consumidoras e na rede de distribuição. Esta situação será observada em estudos de casos oriundos desta pesquisa.

Estudos relacionados a lâmpadas fluorescentes [6], [7] recomendam atenção com os indicadores luminotécnicos e da qualidade da energia. Há referências que sugerem que à aplicação massiva de LFCs devem ser reavaliadas. Em especial, referente ao tópico, há estudos de caso que concluem que quanto maior o número de lâmpadas LFCs instaladas, maior será a distorção harmônica total de corrente e pior será o fator de potência [8].

O INMETRO, que é o órgão governamental responsável pela regulamentação de produtos comercializados no Brasil, produziu uma série de documentos, especificando os diversos parâmetros técnicos, os quais as lâmpadas de LED precisam satisfazer para garantir que não provoquem um impacto negativo no sistema de distribuição de energia elétrica. Assim sendo, é oportuno relatar uma cronologia de algumas recomendações e portarias:

Em agosto de 2014 foi publicada a Portaria de número 389 [9], que pode ser considerada como o principal documento do órgão sobre o tema lâmpadas de LED. Esta expõe o regulamento sobre as características que deverão ser consideradas, os requisitos de segurança, requisitos técnicos de eficiência energética e seus padrões de ensaio.

Em março de 2015 foram publicadas as portarias de número 143 e 144. A portaria 143 provoca modificações na portaria 389 [10]. Além de alterar alguns parágrafos, ela acrescenta alguns itens que orienta sobre marcações no produto e na embalagem. Em relação à Portaria nº 389 de 25 de agosto de 2014 é apresentada as datas limites para adequação de fabricantes e comerciantes. Já a portaria 144, aborda conformidade compulsória, certificação através de ensaio de tipo/lote e sobre etiquetagem [11].

As portarias mais atuais, são nº 76/fev. 2016 [12], a qual considera temas como industrialização e importação e nº 221/mai. 2016 [13], a qual define tempo de ensaio para determinação de vida nominal, considerações sobre programa de avaliação de conformidade e regras para comercialização por atacadistas e varejistas.

Portanto, é contemporâneo os estudos e normas relacionados a iluminação, especificamente a qualidade e certificação dos dispositivos. Logo, torna-se relevante estudos e desenvolvimento de métodos para avaliar os impactos destes dispositivos nos sistemas elétricos de distribuição.

1.5 Objetivos e Justificativas

Com o objetivo de verificar qualitativamente e quantitativamente alguns indicadores relevantes da qualidade da energia elétrica, contribuindo para soluções mais adequadas de eventuais problemas, estudos de casos para diferentes tecnologias de dispositivos de iluminação foram realizados. Para a concretização destes estudos foram feitas medições em consumidores industriais (em campo), especificamente no setor industrial alimentício.

Diante do contexto apresentado, tem-se o objetivo da verificação do comportamento, do ponto de vista luminotécnico e da qualidade da energia elétrica, da tecnologia LED e de outras tecnologias, inclusive com confrontações de resultados.

Esta análise se faz necessária, visto que atualmente as indústrias estão investindo em projetos de eficiência energética e sustentabilidade, além dos objetivos de rentabilidade. Portanto, existe a necessidade de conhecimento, sobre o comportamento, de novas tecnologias de iluminação que podem ser utilizadas no contexto do uso eficiente da energia elétrica.

As ocasiões que possibilitaram as medições em diversas situações serão relatadas à medida que as mesmas forem apresentadas. Vale salientar que neste ambiente industrial alguns problemas expostos não se enquadram nos objetivos deste trabalho. Assim sendo, os resultados das investigações dos mencionados problemas, como, por exemplo, continuidade de fornecimento, consumo de energia elétrica e valores de fatura não serão aqui relatados.

Aliado a tudo isto, existe a necessidade de atualizações nas metodologias de verificação de indicadores, em especial de luminotécnica, já que a modernização e o uso da tecnologia na indústria exigem ambientes de trabalho com qualidade suficiente para atividades de extrema precisão.

1.6 Organização do texto

Essa dissertação de mestrado está organizada de acordo com a seguinte estrutura:

No capítulo 2 são expostos os aspectos construtivos e princípios de funcionamento de dispositivos de iluminação, assim como suas evoluções tecnológicas. São apresentadas as regulamentações técnicas elaboradas para garantir o cumprimento de requisitos mínimos de eficiência, segurança e compatibilidade com sistema elétrico existente. Na sequência, é descrito sobre a teoria de harmônicas e os indicadores de qualidade da energia, bem como suas referências normativas nacionais e internacionais.

O capítulo 3 é orientado para o equacionamento de grandezas elétricas, nas quais as frequências harmônicas se fazem presentes, contemplando situações quando a carga está em uma condição monofásica ou trifásica. São apresentados os métodos propostos para estudos de casos e os fluxogramas dos programas computacionais elaborados.

O capítulo 4 é dirigido para a exposição dos estudos de casos realizados, com o intuito de diagnosticar a presença de harmônicas de cada caso, e quantificar os indicadores de qualidade da energia elétrica. Posteriormente, apresentam-se os resultados obtidos na investigação sobre indicadores de luminotécnica.

O capítulo 5 é destinado a apresentar as conclusões extraídas deste trabalho quando a condição é trifásica, bem como sugerir propostas para elaboração de trabalhos futuros.

O Apêndice A é composto por dois artigos publicados e apresentados na XIV Conferência Brasileira de Qualidade da Energia Elétrica 2021 (XIV CBQEE 2021) no dia 30 de agosto de 2021, nos quais estão os resultados, discussão e conclusões dos estudos de caso na condição monofásica.

Capítulo 2

Tópicos de Luminotécnica e Harmônicas

2.1 Considerações Iniciais

Um sistema na condição senoidal é muito bem exposto em [14]. A presença de harmônicas nos sistemas elétricos gera a necessidade de uma abordagem mais ampla.

O modelo de Budeanu (1927) é muito utilizado. Este modelo decompõe a potência aparente tridimensionalmente, onde além das potências ativa e reativa, existe uma componente em quadratura com estas, denominada de potência de distorção [15] e [16].

A iluminação é responsável por cerca de 17% de toda energia consumida no Brasil. Os recintos industriais devem ser suficientemente iluminados para se obter o melhor rendimento possível nas tarefas a executar. O nível de detalhamento das tarefas exige um iluminamento adequado para se ter uma percepção visual apurada [17].

2.2 Luminotécnica

Um sistema de iluminação eficiente e bem planejado requer um estudo aprimorado, tanto nos aspectos de qualidade dos equipamentos de iluminação utilizados quanto na forma que são aplicados [18].

Analisando o fator economia de energia foram desenvolvidas as lâmpadas fluorescentes, as quais possuem em sua composição mercúrio que é um problema no momento do descarte, uma vez que não se pode descartar em lixo comum, aterros sanitários, entre outros, podendo poluir ar, solo, lençóis freáticos e etc.

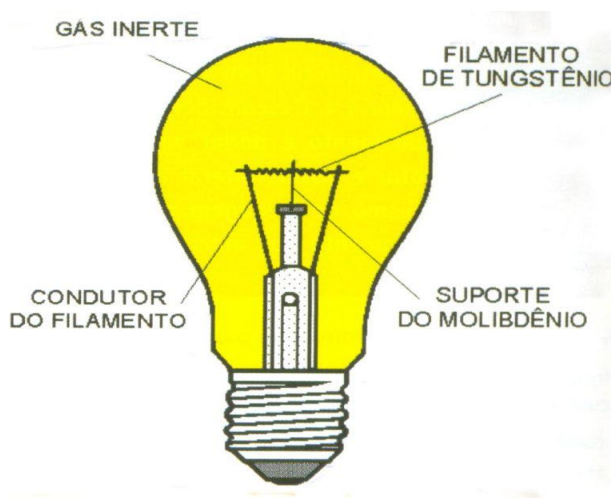
Quando comparadas a lâmpada de LED, as fluorescentes compactas apresentam um desempenho inferior. As lâmpadas de LED são mais eficientes, produzem idêntica quantidade de fluxo luminoso utilizando menos energia.

2.2.1 História e Desenvolvimento das Lâmpadas

- Lâmpadas Incandescentes

Os primeiros passos para a invenção da lâmpada incandescente foram dados em 1801 pelo britânico Humphry Davy, ao fazer passar a corrente elétrica por um fio de platina. Em 1879, Thomas Alva Edison foi o primeiro a comercializar uma lâmpada incandescente com um filamento de carbono. Na virada para o século XX, a empresa húngara Tungsram introduziu o filamento de tungstênio, que tem sido usado, desde então, nas lâmpadas incandescentes [19]. A lâmpada incandescente e suas partes podem ser vistas na Figura 2.1 [20].

Figura 2.1 Lâmpada Incandescente.

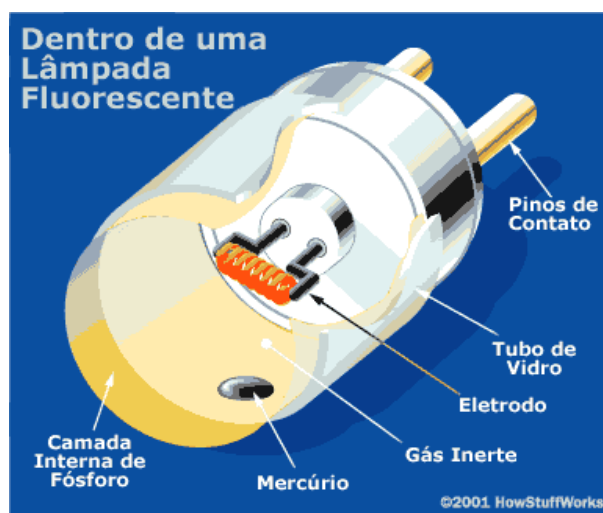


Fonte: <http://qualidadeonline.wordpress.com/lâmpadas-incandescentes>

- Lâmpadas Fluorescentes

O elemento principal de uma lâmpada fluorescente é o tubo selado de vidro. Este tubo contém uma pequena porção de mercúrio e um gás inerte, tipicamente o argônio, mantidos sob pressão muito baixa. O tubo também contém um revestimento de pó de fósforo na parte interna do vidro e dois eletrodos, um em cada extremidade [18]. O esquemático da lâmpada fluorescente se encontra na Figura 2.2.

Figura 2.2 Esquemático da Lâmpada Fluorescente.



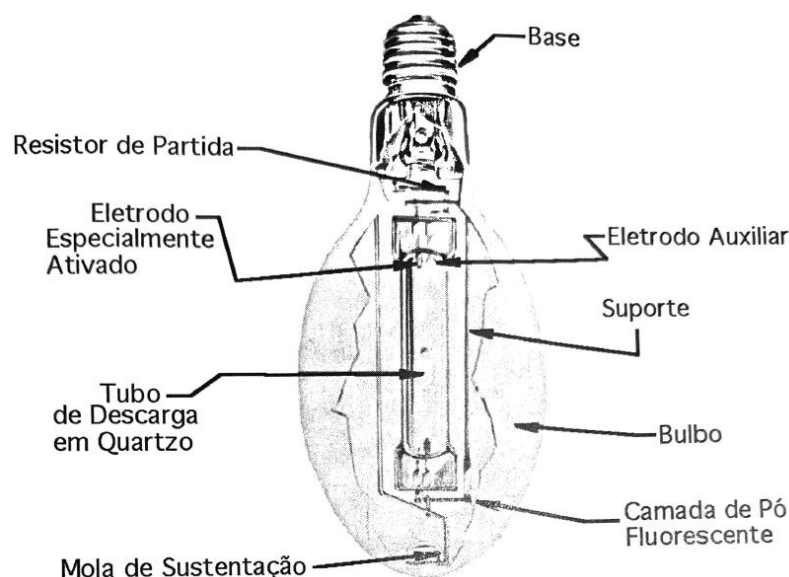
Fonte: <http://ciencia.hsw.uol.com.br/lampadas-fluorescentes2.htm>.

- Lâmpadas a Vapor de Mercúrio

São lâmpadas constituídas de um pequeno tubo de quartzo, onde são instalados nas extremidades, em geral, dois eletrodos principais e um eletrodo auxiliar ligados em série com uma resistência de valor elevado. Dentro do tubo são colocadas algumas gotas de mercúrio, juntamente com um gás inerte, como argônio, cuja finalidade é facilitar a formação de uma descarga inicial. Por outro lado, o mercúrio é vaporizado durante o período de preaquecimento da lâmpada. O tubo de quartzo é colocado dentro de um invólucro de vidro contendo uma certa quantidade de azoto, cuja função é uniformizar a distribuição de temperatura [17].

Ao aplicar a tensão nos terminais da lâmpada, cria-se um campo elétrico entre os eletrodos auxiliar e o principal mais próximo, provocando a formação de um arco elétrico entre os mesmos, aquecendo as substâncias emissoras de luz, o que resulta na ionização do gás e na consequente formação de vapor de mercúrio. A Figura 2.3 apresenta os componentes de uma lâmpada de vapor de mercúrio.

Figura 2.3 Lâmpada a vapor de mercúrio.



Fonte: Mamede Filho, João, Instalações Elétricas Industriais.

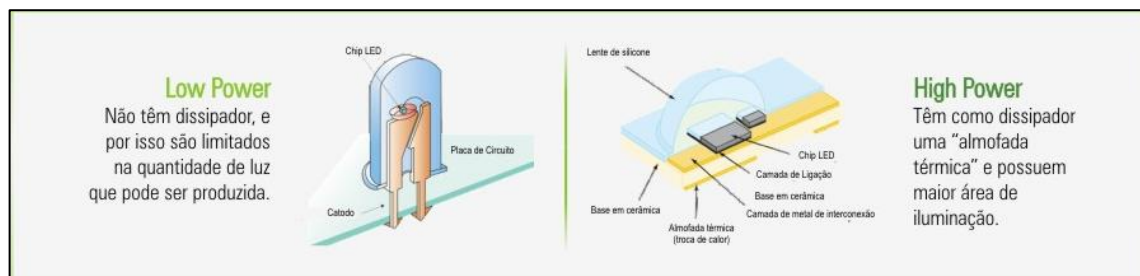
- Lâmpadas de LED

O LED – do inglês *Light Emitting Diode* (Diodo Emissor de Luz) – é um semicondutor que emite luz quando percorrido por uma corrente elétrica. A cor da luz emitida pode ser branca, branco comercial, amarela ou qualquer cor do espectro de cores. Suas aplicações são as mais variadas, podendo ser utilizados em lâmpadas que substituam lâmpadas convencionais, em semáforos de trânsito, circuitos eletrônicos e iluminações diversas [21].

As lâmpadas de LED são mais eficientes, mais duráveis e não poluem o meio ambiente. Esta tecnologia chegou ao mercado com o objetivo de substituir os atuais sistemas de iluminação.

Há dois tipos de LED: *Low Power* e *High Power*, de baixa e alta potência respectivamente. As características podem ser vistas na Figura 2.4.

Figura 2.4 Tipos de LED.



Fonte: LEDOBRASIL, tecnologia LED.

A LED *High Power*, possui maior eficiência, maior fluxo luminoso e maior potência. Dessa forma, as lâmpadas apresentam desempenho máximo, maior performance, grande robustez e permitem uma maior variedade de produtos, agregando valor ao ambiente iluminado.

Em termos de capacidade e qualidade de iluminação, as luzes de LED são similares às incandescentes. Porém, utilizam 10 vezes menos energia para isso. Com a sua utilização, a economia na conta de energia elétrica pode chegar a 70% quando comparada com a lâmpada incandescente. Uma lâmpada de LED de 7W ilumina igualmente a uma fluorescente compacta de 15W, ou uma incandescente de 60W [21].

As lâmpadas de LED também se destacam por sua durabilidade. Sua vida útil média é de 50.000 horas. Isso significa que durante toda a sua vida útil, pode-se economizar, em substituição de lâmpadas queimadas, a compra de 50 lâmpadas incandescentes, 15 lâmpadas halógenas e 5 lâmpadas compactas fluorescentes, como ser visto na Figura 2.5 [21].

Figura 2.5 Eficiência Energética e Vida Útil.



Fonte: LEDOBRASIL, tecnologia LED.

2.2.2 Normas e Regulamentações de Luminotécnica

Atualmente, a norma vigente para a temática iluminação [22] especifica os níveis de iluminância para locais de trabalho internos e os requisitos para que as pessoas desempenhem tarefas visuais de maneira eficiente, com conforto e segurança durante todo o período de trabalho.

A referida norma apresenta todas as referências de iluminância para cada tipo de ambiente de trabalho, seja comercial ou industrial. Além disto, apresenta instruções de como se deve fazer as verificações. Aborda também as tolerâncias admitidas de acordo com o ambiente, considerando uniformidade, ofuscamento, direcionalidade, assim como aspectos e aparência de cor.

Sendo assim, neste estudo conceitos importantes serão considerados para a elaboração das metodologias e para a definição de quais os parâmetros que serão verificados e confrontados de acordo com cada tecnologia, tomando-se como referência valores especificados em norma. Os parâmetros utilizados foram: Iluminâncias recomendadas da área da tarefa e uniformidade.

2.3 Harmônicas

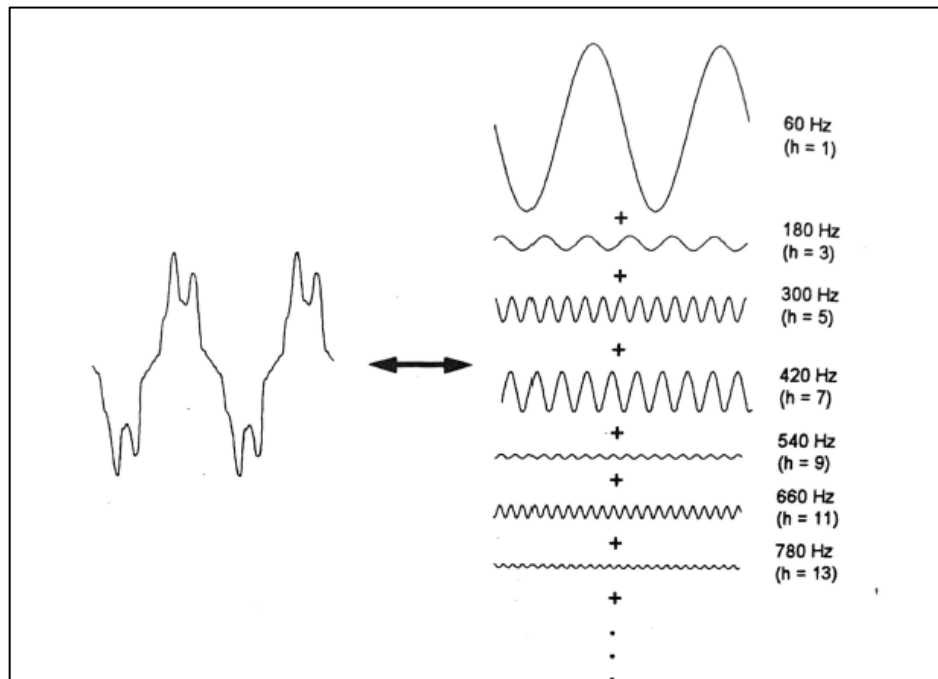
A palavra “harmônico” foi originalmente definida em acústica, significando a vibração de um fio ou uma coluna de ar, com frequência múltipla e diferente da fundamental, provocando uma distorção na qualidade do som resultante. Fenômenos semelhantes a este ocorrem na Engenharia Elétrica, onde deformações das tensões e correntes elétricas também tem sido registrada. Neste caso, os fundamentos físicos e matemáticos utilizados naquela área da física podem ser imediatamente aplicados às questões elétricas.

Dentro dos objetivos a serem alcançados por uma concessionária de energia, destaca-se a qualidade de fornecimento de energia aos consumidores industriais. Em condições ideais esta energia deve ser fornecida com uma tensão puramente senoidal, com frequência e amplitude constantes. Entretanto, constata-se na prática desvios daquilo que seria o ideal. Esta distorção do padrão de tensão tem sido registrada durante anos e têm sido atribuídas aos diversos componentes elétricos com características não lineares comumente conectados à rede elétrica.

Uma ferramenta matemática utilizada no cálculo das amplitudes e ângulos de fase das harmônicas é denominada de FFT (*Fast Fourier Transformer*) ou Transformada Rápida de Fourier. Outra ferramenta matemática utilizada no estudo de harmônicas presentes nos sinais distorcidos, é a Transformada Wavelett [15].

Visando entender melhor a decomposição de uma forma de onda distorcida, em função da existência de cargas não lineares no sistema, apresenta-se a Figura 2.6.

Figura 2.6 Forma de onda distorcida e componentes harmônicas.



Fonte: DUGAN, R. C.; McGranaghan, M. F. BEATY, H. W. Electrical Power Systems Quality.

2.3.1 Cargas Lineares e Não Lineares

Em decorrência da crescente utilização de cargas não lineares, as harmônicas encontram-se presentes nos sinais de corrente e tensão em diversos pontos dos sistemas elétricos. Assim sendo, é necessário conhecer a natureza deste problema devido aos efeitos indesejáveis que ocorrem em diversos componentes dos sistemas de potência.

Diferentes cargas elétricas apresentam diferentes relações tensão elétrica e corrente elétrica. Em cargas puramente resistivas, esta relação é linear, sendo o gráfico tensão x corrente uma reta que passa pela origem e tem inclinação igual à resistência ôhmica da carga.

A maioria dos equipamentos eletrônicos não é composta apenas de resistências ôhmicas, indutâncias e capacitâncias, possuindo semicondutores como diodos e transístores, ou ainda chaves manuais, estes equipamentos apresentaram características não lineares.

A dificuldade de modelagem de cargas não lineares reside na complexidade da corrente que apresentam, em resposta às tensões impostas. Estas correntes frequentemente têm formas muito diferentes da forma da tensão aplicada, o que não ocorre com cargas lineares. Por exemplo, em resposta a tensões senoidais ocorrem correntes compostas por diversas harmônicas. Além disso, estas harmônicas podem causar ruídos na rede elétrica fazendo com que a tensão deixe de ser senoidal e promova falha em equipamentos.

2.3.2 Distorções Harmônicas

O tratamento matemático dado a uma forma de onda distorcida visa decompô-la em componentes senoidais, cujas frequências se relacionam com a da fundamental. Esta relação é um número inteiro múltiplo da frequência fundamental do sistema (60 Hz – sistema elétrico brasileiro), sendo estes números inteiros chamados de ordem harmônica. Assim sendo, as harmônicas de terceira ordem possuem frequência três vezes a fundamental (180 Hz), as de quinta ordem cinco vezes a fundamental (300 Hz) e assim sucessivamente. É válido salientar que a componente fundamental é também conhecida como “primeira ordem” [16].

A série trigonométrica de Fourier permite identificar cada componente harmônica existente em uma onda distorcida [23]. Qualquer onda periódica não senoidal seja de tensão ou de corrente pode ser representada como a soma de uma componente contínua com uma série de funções senoidais.

2.3.3 Normas e Regulamentações de Qualidade da Energia

Existem diversas normas nacionais e internacionais com a regulamentação em relação aos limites dos indicadores de qualidade da energia para as companhias geradoras, distribuidoras e consumidores. O enfoque deste estudo é o impacto do tipo da carga no sistema, não sendo o objetivo analisar o ponto de conexão comum (PCC) afim de verificar o atendimento ou não à legislação vigente.

O ponto de partida é definir o barramento de medição e na sequência observar o comportamento da tensão, harmônicas, fator de potência e outros indicadores da qualidade da energia. Desta forma, fica possível a realização de comparação, mesmo sabendo que os ensaios não serão realizados no mesmo intervalo de tempo devido a limitação de equipamentos de medição.

A ANEEL através do PRODIST (Modulo 8 – Qualidade da Energia elétrica) tem como objetivo estabelecer os procedimentos relativos à qualidade da energia elétrica, abordando a qualidade do produto e a qualidade do serviço prestado pelas companhias de distribuição de energia elétrica. A abrangência desses procedimentos também se aplica a outros órgãos e aos consumidores, logo o enfoque é na qualidade do produto e na instalação do consumidor.

Para analisar se a qualidade do produto está de acordo com os padrões estabelecidos pela PRODIST (Modulo 8 – Qualidade da Energia elétrica) da ANEEL o valor a ser mensurado é o THD (*total harmonic distortion*). Os valores de referência para as distorções harmônicas totais de tensão estão indicados na Tabela 2.1 [24].

Tabela 2.1 - Valores de referência globais das distorções harmônicas totais de tensão.

Tensão nominal do barramento	Distorção Harmônica Total de Tensão (THDv) [%]
$V_n \leq 1\text{kV}$	10
$1\text{kV} < V_n \leq 13,8\text{kV}$	8
$13,8\text{kV} < V_n \leq 69\text{kV}$	6
$69\text{kV} < V_n \leq 230\text{kV}$	3

Fonte: PRODIST (Modulo 8 – Qualidade da Energia elétrica) da ANEEL revisão 12 – 2021

A instalação deste estudo enquadra-se na tensão abaixo de 1kV no barramento. A fim de correlacionar os limites da ANEEL com indicadores internacionais foi considerado também a norma IEEE 519-2014 *Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*, na qual é possível encontrar os limites recomendados para distorções harmônicas totais de tensão e distorções individuais de tensão. Tais limites são apresentados na Tabela 2.2 conforme [25].

Tabela 2.2 - Limites de distorção de tensão.

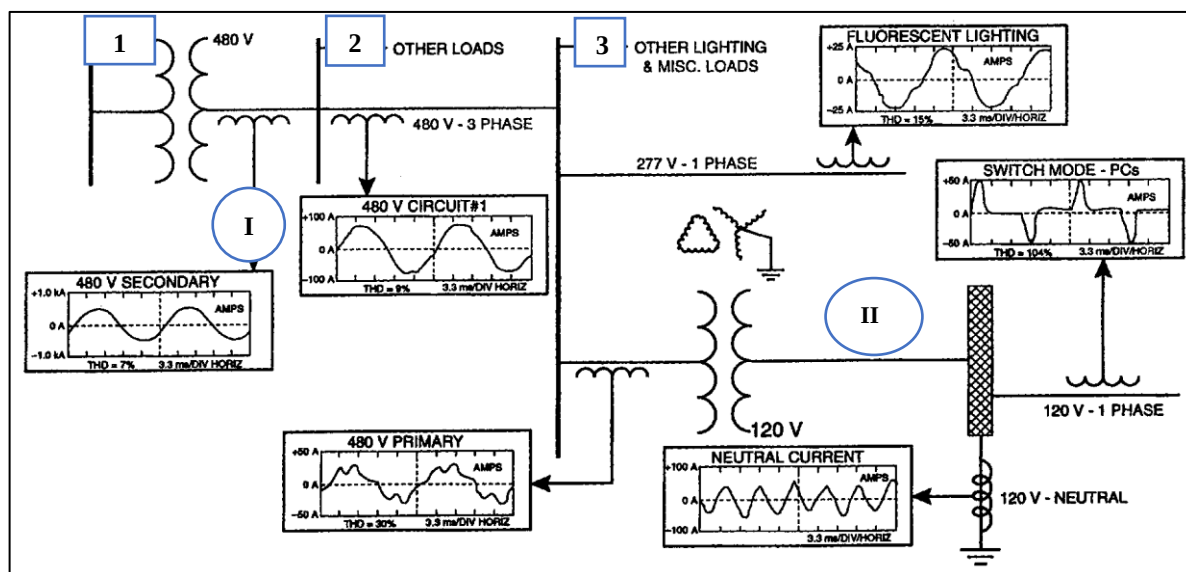
Tensão nominal do barramento	Distorção Harmônica Total de Tensão (THDv) [%]
$V_n \leq 1\text{kV}$	8,0
$1\text{kV} < V_n \leq 69\text{kV}$	5,0
$69\text{kV} < V_n \leq 161\text{kV}$	2,5
$161\text{kV} < V_n$	1,5

Fonte: Modificado de IEEE 519-2014 Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems

A referência [26] facilita entender que diferentes níveis de harmônicas e tipos de carga afetam o sistema de formas diferentes.

A Figura 2.7 mostra um exemplo de propagação de harmônicas em um sistema elétrico de distribuição. Observa-se que a onda de corrente das lâmpadas fluorescentes apresenta uma distorção harmônica total de corrente (THDi) de 15% e está conectada ao barramento 3 que recebe outras cargas, incluindo iluminação. A onda de corrente relativa aos computadores, possui nos terminais da carga uma THDi de 104%. O transformador II exibe uma forma de onda com distorção menos acentuada e com THDi de 30%, certamente o delta do transformador filtrou alguns harmônicos, mas ainda assim há uma contribuição harmônica no barramento 3 desta carga. No barramento 2 apresenta-se uma forma de onda menos deformada que nos casos anteriores, mas ainda com uma THDi de 9%. Devido a presença de outras cargas no barramento 2, nota-se a forma de onda menos deformada e com THDi de 7% no secundário do transformador I. Portanto, há presença de harmônicas em cada barramento e transformador do sistema.

Figura 2.7 Exemplo de distribuição de níveis de harmônicas em uma instalação no sistema de distribuição corrente alternada.



Fonte: Modificado de IEEE 1100 – 2005 - Powering and Grounding Electronic Equipment

Diante disto, faz-se necessário observar as orientações normativas para os limites de harmônicas de corrente relacionados aos equipamentos.

A referência [27] trata da limitação de correntes harmônicas injetadas no circuito de alimentação. Ela especifica os limites das componentes harmônicas da corrente que podem ser produzidos por equipamentos testados sob condições especificadas. É aplicável a equipamentos elétricos e eletrônicos com uma corrente nominal de até 16 A por fase e destinados a serem conectados a sistemas de distribuição de baixa tensão. Logo, nos casos desse trabalho os circuitos de iluminação se enquadram no requisito de corrente abaixo de 16 A por fase.

Esta norma faz uma classificação de equipamentos, onde:

- Classe A: equipamento trifásico balanceado (correntes de linha rms. diferindo menos de 20%) e todos os outros equipamentos, exceto aqueles nas seguintes classes;
- Classe B: ferramentas portáteis;
- Classe C: equipamentos de iluminação, incluindo dispositivos de dimerização com potência de entrada ativa acima de 25 W;
- Classe D: equipamento tendo uma corrente de entrada com uma “forma de onda especial” e uma entrada ativa fundamental potência entre 75 e 600 W. Qualquer que seja a

forma de onda de sua corrente de entrada, Classe B, Classe C e equipamentos movidos a motor provisoriamente.

Os dispositivos de iluminação relativos a lâmpadas à Vapor de Mercúrio e LED deste trabalho são classificados como classe C, a qual aplica-se a equipamentos com potência acima de 25W, conforme Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Limites de distorção de corrente Classe C > 25W.

Ordem harmônica n	Valor máximo % corrente fundamental das luminárias
2	2
3	30 λ^*
5	10
7	7
9	5
11=<n<=39	3

λ^* é o fator de potência

Fonte: IEC 61000-3-2: 2018

É apresentado na referência [28] uma abordagem sobre as definições padrões para a medição de energia elétrica sob condições senoidais, não senoidais, equilibradas ou desequilibradas. No âmbito nacional existe uma norma importante que trata de harmônicas de corrente, a qual orienta que “na seleção dos componentes, devem ser levados em consideração os efeitos danosos ou indesejados que o componente possa apresentar sobre outros componentes ou na rede de alimentação” [29].

A norma nacional apresenta uma preocupação importante com o condutor neutro, orientando que quando em um circuito trifásico com neutro, a taxa de terceira harmônica e seus múltiplos for superior a 15%, a seção do condutor neutro não deve ser inferior à dos condutores de fase, podendo ser igual à dos condutores de fase se essa taxa não for superior a 33% [29]. A norma ainda apresenta uma ênfase que tais níveis de correntes harmônicas são encontrados, por exemplo, em circuitos que alimentam luminárias com lâmpadas de descarga, incluindo as fluorescentes.

Capítulo 3

Materiais e Métodos

3.1 Considerações Iniciais

O presente capítulo apresenta uma metodologia baseada em estudos teóricos e experimentais, na área da luminotécnica e aspectos da qualidade da energia, considerando diferentes tecnologias de iluminação. Além disto, serão consideradas também situações para o sistema operando na condição monofásica e na condição trifásica.

Tais metodologias visam a obtenção de indicadores de luminotécnica, além de avaliar simultaneamente alguns indicadores da qualidade da energia elétrica para dispositivos de iluminação. Utilizou-se ferramenta computacional para obter determinados indicadores de qualidade da energia a partir de alguns dados coletados através de medição.

3.2 Método com Alimentação Monofásica

Os ensaios experimentais foram realizados em uma indústria localizada em Goiânia, a qual possui uma subestação 138 kV/13,8 kV e distribui com rede própria através de dois ramais aéreos para outras sete subestações internas que realizam o rebaixamento da tensão para 380/220V. Neste cenário, ao planejar o estudo de caso foi identificado os alimentadores do quadro de distribuição terminal, de forma a explorar e definir ambientes que fosse possível o desligamento de cargas do mesmo alimentador, garantindo assim um estudo dedicado as cargas de iluminação que são o foco desta pesquisa. Sendo assim, é apresentado na Figura 3.1, o esquema unifilar de toda a rede que faz a alimentação do quadro de distribuição no qual foram conectados os acessórios do equipamento.

Outras informações relevantes, e utilizadas neste trabalho, relacionadas a materiais e métodos associadas a situação monofásica encontram-se em artigos publicados e expostos nos apêndices A1 e A2.

3.2.1 Equacionamento para Condição Monofásica

Sejam a forma de onda da tensão $v = v(t)$ e forma de onda da corrente $i = i(t)$, periódicas de período $T = 1/f$ podendo ser senoidais ou não senoidais, onde t é a variável temporal (em segundos) e f é a frequência do sistema de potência (em Hertz).

Para a situação em que o t_0 é o instante do início da medição e considerando o intervalo de tempo de t_0 a $t_0 + nT$ sendo “n” um número inteiro e diferente de zero, os valores eficazes da tensão (V em Volts) e da corrente (I em Âmpères) podem ser determinadas pelas equações (3.1) e (3.2):

$$V = \left[\frac{1}{nT} \int_{t_0}^{t_0+nT} v^2 dt \right]^{1/2} \quad (3.1)$$

$$I = \left[\frac{1}{nT} \int_{t_0}^{t_0+nT} i^2 dt \right]^{1/2} \quad (3.2)$$

A potência Instantânea $p = p(t)$ é dada pela equação (3.3):

$$p = vi \quad (3.3)$$

A potência ativa (P em Watts) é o valor médio da potência instantânea que no intervalo de tempo considerado pode ser obtida pela equação (3.4)

$$P = \frac{1}{nT} \int_{t_0}^{t_0+nT} p dt \quad (3.4)$$

Observa-se que nT nas expressões (3.1), (3.2) e (3.4) é o intervalo de tempo de medição que permite obter corretamente a potência ativa e os valores eficazes da tensão e da corrente.

Considerando o sistema monofásico suprimindo cargas não lineares e que as formas de onda da tensão e de corrente presentes estejam na condição de regime permanente não senoidal,

verifica-se que tanto a tensão quanto a corrente, instantâneas e periódicas, podem ser decompostas com a utilização da série de Fourier, resultando nas equações (3.5) e (3.6):

$$v = V_0 + \sqrt{2} \sum_{h=1} V_h \sin(h\omega t - \alpha_h) \quad (3.5)$$

$$i = I_0 + \sqrt{2} \sum_{h=1} I_h \sin(h\omega t - \beta_h) \quad (3.6)$$

Onde:

$\omega = 2\pi f$ - Frequência angular;

V_0, I_0 - Componente contínua da tensão e corrente respectivamente;

h_1 - Ordem harmônica;

V_h, I_h - Valor eficaz das h-ésimas, harmônicas da tensão e da corrente respectivamente;

α_h, β_h - ângulos de fase da h-ésima harmônica de tensão e corrente respectivamente.

As equações (3.5) e (3.6) podem ser reescritas com (3.7) e (3.8):

$$v = v_1 + v_h \quad (3.7)$$

$$i = i_1 + i_h \quad (3.8)$$

Sendo:

$$v_1 = \sqrt{2} V_1 \sin(\omega t - \alpha_1) \quad (3.9)$$

$$i_1 = \sqrt{2} I_1 \sin(\omega t - \beta_1) \quad (3.10)$$

$$V_h = V_0 + \sqrt{2} \sum_{h=2} V_h \sin(h\omega t - \alpha_h) \quad (3.11)$$

$$I_h = I_0 + \sqrt{2} \sum_{h=2} I_h \sin(h\omega t - \beta_h) \quad (3.12)$$

Onde:

V_1, I_1 - Valor eficaz das componentes fundamentais da tensão e corrente respectivamente;

α_1, β_1 - ângulos de fase das componentes fundamentais de tensão e corrente respectivamente;

Partindo-se de (V_1) e (I_1) obtém-se a potência ativa fundamental (P_1) conforme equação (3.13):

$$P_1 = V_1 I_1 \cos \theta_1 \quad (3.13)$$

Onde $\theta_1 (= \beta_1 - \alpha_1)$ é o ângulo de fase entre os fasores de tensão e corrente fundamentais.

O fator de potência da fundamental ou fator de deslocamento (FP_1) é dado por (3.14):

$$FP_1 = \cos \theta_1 \quad (3.14)$$

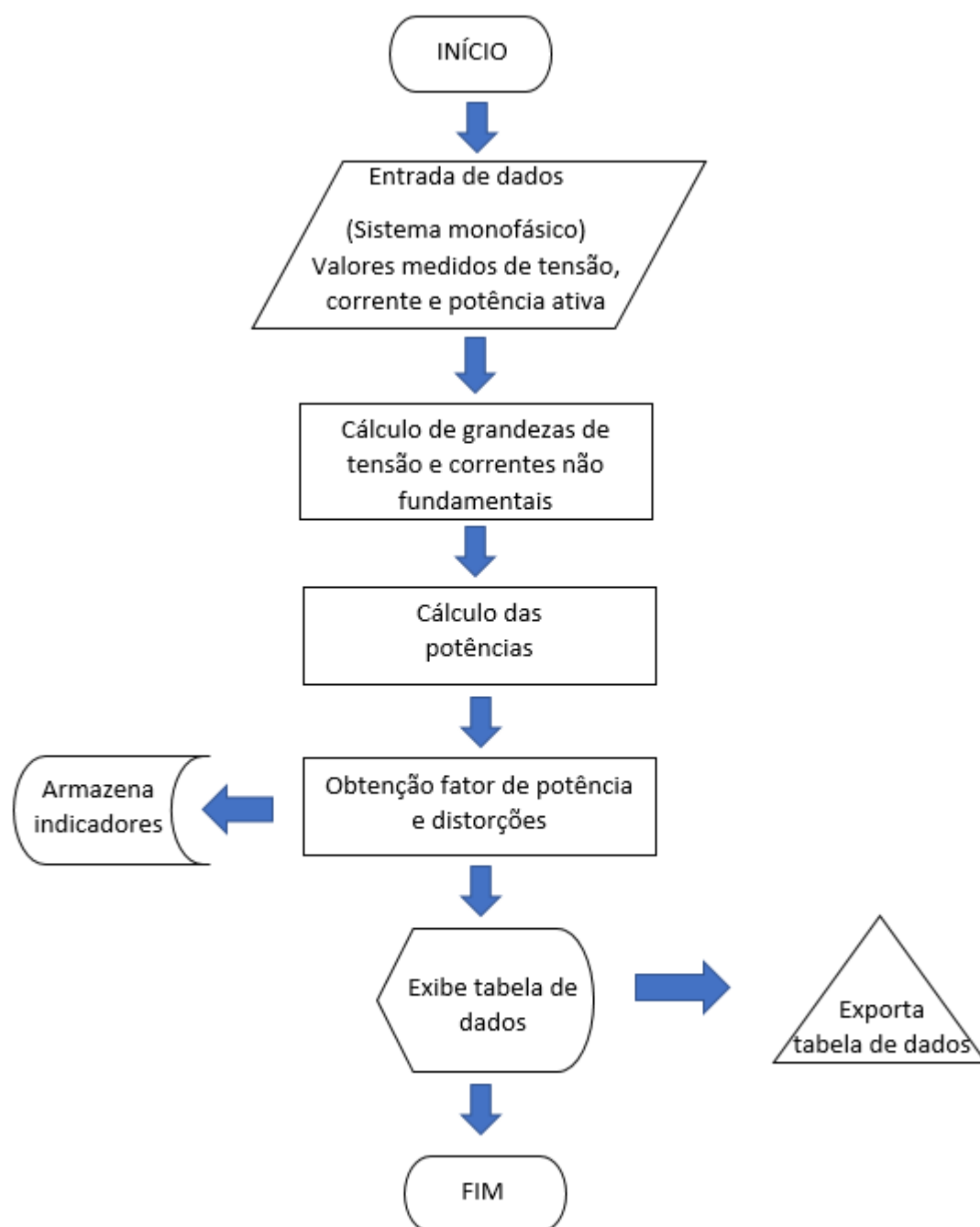
Outras informações relevantes, e utilizadas neste trabalho, relativas ao equacionamento associado a situação monofásica encontram-se no artigo publicado e exposto no Apêndice A2.

3.2.2 Programa Computacional para Condição Monofásica

O programa computacional desenvolvido, através da ferramenta Matlab, apresenta uma etapa de entrada de dados. Com as grandezas de tensão, corrente e potência ativa inseridas no programa é possível obter os resultados de alguns indicadores de qualidade da energia elétrica, e das potências aparente, ativa, não ativa e outras.

Outra funcionalidade do programa é a possibilidade de exportar os resultados para uma planilha de Excel. Uma visão geral do processamento dos dados utilizando o programa, está no fluxograma da Figura 3.2.

Figura 3.2 Fluxograma do programa computacional monofásico



3.3 Método com Alimentação Trifásica

Para o circuito trifásico, comum na indústria, a análise de determinados parâmetros de qualidade da energia e iluminância é feita através do método que será exposto neste tópico.

Nesta condição utilizou-se um ambiente composto por refletores contendo lâmpadas à vapor de mercúrio com 400W de potência, e refletores com lâmpadas de LED com 200W de potência, de modo que cada fase tinha um total de 4 refletores, totalizando uma amostragem com 12 dispositivos de iluminação. O ambiente de ensaio possui uma área total de 114,24m² e um pé direito de 4,76m.

Quando se analisa uma carga trifásica balanceada operando sob condições senoidais, a modelagem é mais simples, porém será feita uma abordagem do caso mais abrangente, que consiste no sistema trifásico desbalanceado sob condições não senoidais.

3.3.1 Equacionamento para Condição Trifásica

Nesta oportunidade serão consideradas:

- Condição de regime permanente com tensões e correntes periódicas;
- Sistema trifásico desbalanceado a quatro condutores (3 fases e neutro);
- Tensões e correntes não senoidais.

O equacionamento que será apresentado utiliza valores de grandezas elétricas obtidas de medição, sendo que, o equipamento utilizado neste trabalho disponibiliza, para cada instante ao longo do tempo de observação, os seguintes dados:

- Valores eficazes das tensões entre fase e neutro (V_a, V_b, V_c), e entre neutro e terra;
- Valores eficazes das tensões entre fases (V_{ab}, V_{bc}, V_{ca});
- Valores eficazes das componentes fundamentais das tensões entre fase e neutro (V_{a1}, V_{b1}, V_{c1});
- Valores eficazes das correntes de fases (I_a, I_b, I_c) e neutro (I_n);
- Valores eficazes das componentes fundamentais das correntes nas fases (I_{a1}, I_{b1}, I_{c1}) e neutro (I_{n1});

- Ângulos de fase das componentes fundamentais das tensões entre fases e neutro ($\alpha_{a1}, \alpha_{b1}, \alpha_{c1}$) ;

Sendo conhecidos os valores eficazes das componentes fundamentais das tensões entre fase e neutro (V_{a1}, V_{b1}, V_{c1}) e os respectivos ângulos de fase ($\alpha_{a1}, \alpha_{b1}, \alpha_{c1}$) obtêm-se os fasores correspondentes através das expressões (3.15), (3.16) e (3.17).

$$\hat{V}_{a1} = V_{a1} \angle \alpha_{a1} \quad (3.15)$$

$$\hat{V}_{b1} = V_{b1} \angle \alpha_{b1} \quad (3.16)$$

$$\hat{V}_{c1} = V_{c1} \angle \alpha_{c1} \quad (3.17)$$

De posse dos valores obtidos através de (3.15), (3.16) e (3.17) é possível determinar os fasores relativos as componentes fundamentais das tensões entre fases ($\hat{V}_{ab1}, \hat{V}_{bc1}, \hat{V}_{ca1}$) utilizando as expressões (3.18), (3.19) e (3.20).

$$\hat{V}_{ab1} = \hat{V}_{a1} - \hat{V}_{b1} \quad (3.18)$$

$$\hat{V}_{bc1} = \hat{V}_{b1} - \hat{V}_{c1} \quad (3.19)$$

$$\hat{V}_{ca1} = \hat{V}_{c1} - \hat{V}_{a1} \quad (3.20)$$

Assim sendo, as expressões (4.21), (4.22) e (4.23) podem ser reescritas como:

$$\hat{V}_{ab1} = V_{ab1} \angle \alpha_{ab1} \quad (3.21)$$

$$\hat{V}_{bc1} = V_{bc1} \angle \alpha_{bc1} \quad (3.22)$$

$$\hat{V}_{ca1} = V_{ca1} \angle \alpha_{ca1} \quad (3.23)$$

Onde:

V_{ab1}, V_{bc1} e V_{ca1} são os valores eficazes das componentes fundamentais das tensões entre fases, e $\alpha_{ab1}, \alpha_{bc1}$ e α_{ca1} são os ângulos de fase das mencionadas tensões.

A potência ativa total (P) pode ser determinada utilizando a potência ativa por fase (P_a, P_b, P_c), conforme equação (3.24):

$$P = P_a + P_b + P_c \quad (3.24)$$

A potência ativa de cada fase pode ser escrita em termos da parcela fundamental de cada fase (P_{a1}, P_{b1}, P_{c1}) e da parcela não fundamental (P_{aH}, P_{bH}, P_{cH}) como a expressão (3.25);

$$P = (P_{a1} + P_{b1} + P_{c1}) + (P_{aH} + P_{bH} + P_{cH}) \quad (3.25)$$

Sendo que:

$$P_{a1} = V_{a1} I_{a1} \cos \theta_{a1} \quad (3.26)$$

$$P_{b1} = V_{b1} I_{b1} \cos \theta_{b1} \quad (3.27)$$

$$P_{c1} = V_{c1} I_{c1} \cos \theta_{c1} \quad (3.28)$$

Onde: θ_{a1}, θ_{b1} e θ_{c1} são ângulos de fase entre os fasores relativos às componentes fundamentais das tensões entre fase e neutro e as componentes fundamentais das correntes de linha. Explicações sobre as parcelas não fundamentais da potência ativa estão expostas no Apêndice A2 deste trabalho.

Utilizando as definições de corrente efetiva (I_e) e tensão efetiva (V_e) e com base em [28], as expressões (3.29), (3.30) e (3.31) podem ser escritas:

$$I_e = \left\{ \frac{1}{3} (I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 + I_n^2) \right\}^{1/2} \quad (3.29)$$

$$I_{e1} = \left\{ \frac{1}{3} (I_{a1}^2 + I_{b1}^2 + I_{c1}^2 + I_{n1}^2) \right\}^{1/2} \quad (3.30)$$

$$I_{eH} = (I_e^2 - I_{e1}^2)^{1/2} \quad (3.31)$$

Onde:

I_{e1} - É a componente fundamental da corrente efetiva;

I_{eH} - É a componente não fundamental da corrente efetiva.

Do mesmo modo, que no caso das correntes as expressões (3.32), (3.33) e (3.34) podem ser utilizadas para as tensões:

$$V_e = \left\{ \frac{1}{18} [3(V_a^2 + V_b^2 + V_c^2) + V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2] \right\}^{1/2} \quad (3.32)$$

$$V_{e1} = \left\{ \frac{1}{18} [3(V_{a1}^2 + V_{b1}^2 + V_{c1}^2) + V_{ab1}^2 + V_{bc1}^2 + V_{ca1}^2] \right\}^{1/2} \quad (3.33)$$

$$V_{eH} = (V_e^2 - V_{e1}^2)^{1/2} \quad (3.34)$$

Onde:

V_{e1} - Componente fundamental da tensão efetiva;

V_{eH} - Componente não fundamental da tensão efetiva.

A potência aparente efetiva (S_e), a potência aparente efetiva fundamental (S_{e1}), e a não fundamental (S_{eN}), podem ser escritas como (3.35), (3.36) e (3.37):

$$S_e = 3V_e I_e \quad (3.35)$$

$$S_{e1} = 3V_{e1} I_{e1} \quad (3.36)$$

$$S_{eN} = [S_e^2 - S_{e1}^2]^{1/2} \quad (3.37)$$

A potência aparente efetiva não fundamental ainda pode ser escrita utilizando a potência de distorção de corrente (D_{eI}), a potência da distorção de tensão e (D_{eV}), e potência aparente harmônica (S_{eH}) conforme a expressão (3.38):

$$S_{eN} = (D_{eI}^2 + D_{eV}^2 + S_{eH}^2)^{1/2} \quad (3.38)$$

Sendo:

$$D_{eI} = 3V_{e1} I_{eH} \quad (3.39)$$

$$D_{eV} = 3V_{eH} I_{e1} \quad (3.40)$$

$$S_{eH} = 3V_{eH} I_{eH} \quad (3.41)$$

As distorções harmônicas totais equivalentes da tensão (THD_{eV}), e da corrente (THD_{eI}), podem ser obtidas usando (3.42) e (3.43):

$$THD_{eV} = \frac{V_{eH}}{V_{e1}} \quad (3.42)$$

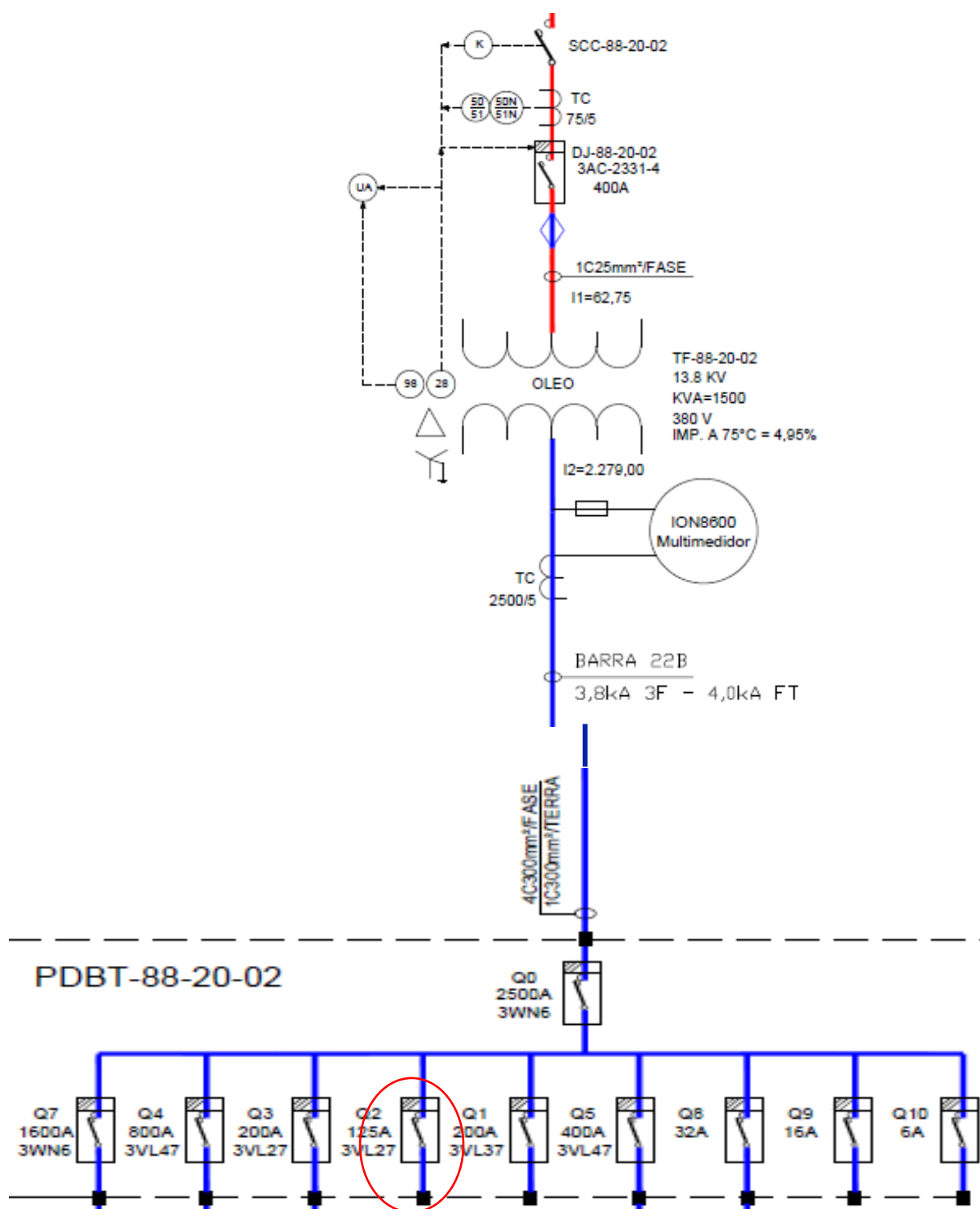
$$THD_{eI} = \frac{I_{eH}}{I_{e1}} \quad (3.43)$$

A poluição harmônica (PH_e), pode ser determinada através de (3.44):

$$PH_e = \frac{S_{eN}}{S_{e1}} \quad (3.44)$$

Como ponto de partida das tarefas de medição, observa-se o esquema unifilar parcial da indústria desde a alimentação principal até o quadro de distribuição terminal, conforme Figura 3.3.

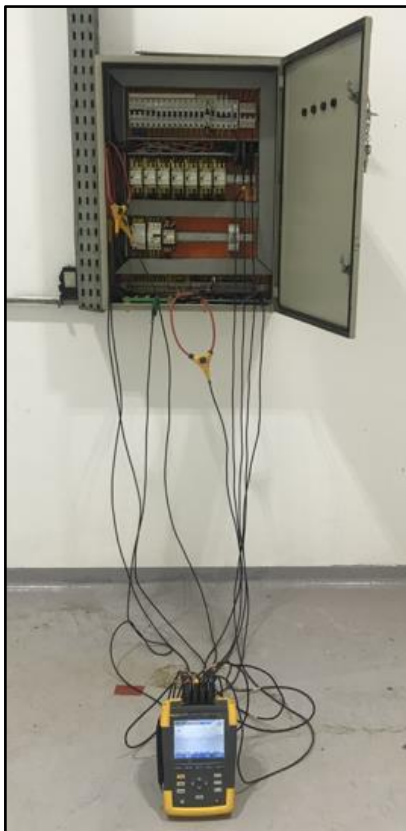
Figura 3.3 Esquema unifilar parcial da Indústria.



Disjuntor de alimentação do quadro de distribuição terminal onde foram conectados os acessórios analisador de qualidade da energia.

Para medição de tensão, corrente, potência ativa, harmônicas e outros indicadores, foi utilizado o analisador de qualidade da energia Fluke 435 série II, apresentado na Figura 3.4, conectado ao quadro de distribuição terminal configurado para condição trifásica.

Figura 3.4 Analisador conectado na condição trifásica.



Além da coleta de dados de indicadores de qualidade de energia, para a condição sistema trifásico a quatro condutores, não senoidal e desbalanceado foi verificado a iluminância do ambiente com cada tecnologia observada. Para este ensaio foi utilizado o luxímetro representado na Figura 3.5, com o qual verificou-se a iluminância do ambiente em diversos pontos

Figura 3.5 Luxímetro digital.



Foi elaborado um suporte, aqui denominado “gabarito” para coleta de medições de iluminância simulando a altura do plano de trabalho, 720 mm, obedecendo o que recomenda a referência [30]. A Figura 3.6 apresenta o gabarito desenvolvido.

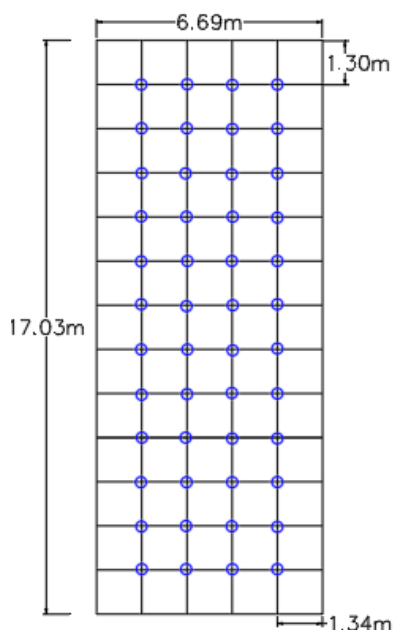
Figura 3.6 Gabarito com altura de 720 mm



Com o padrão definido, foi elaborado com a utilização do *software* Autocad uma malha de medição de iluminância, conforme recomendação [22]. Portanto, essa condição permitiu a obtenção de 48 valores de iluminância no plano de trabalho.

Ainda sem valores medidos, segue na Figura 3.7 a malha de pontos implementada, de modo que todos os pontos foram identificados com adesivo no piso do ambiente para garantir que o “gabarito” e o sensor do luxímetro estaria na posição adequada, independentemente de qual tecnologia fosse utilizada. Esta metodologia possibilitou a comparação dos valores medidos de iluminância.

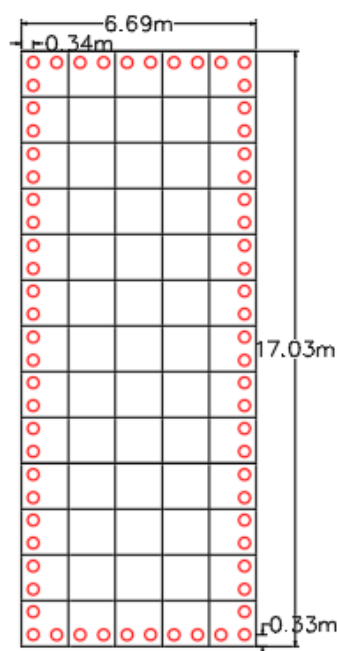
Figura 3.7 Malha de pontos para medição.



A primeira medição realizada foi com os refletores contendo as lâmpadas de LED, com a utilização do acessório “gabarito”. Esta medição foi realizada no dia 16/07/2021 enquanto eram coletados os dados de qualidade da energia. Os resultados dessas medições serão apresentados no capítulo 4.

Através do *software* Autocad foi desenvolvido o desenho do ambiente com a faixa marginal, conforme Figura 3.8, uma vez que a necessidade atual exige uma iluminação para atividades de alta precisão.

Figura 3.8 Ambiente com os pontos da faixa marginal.



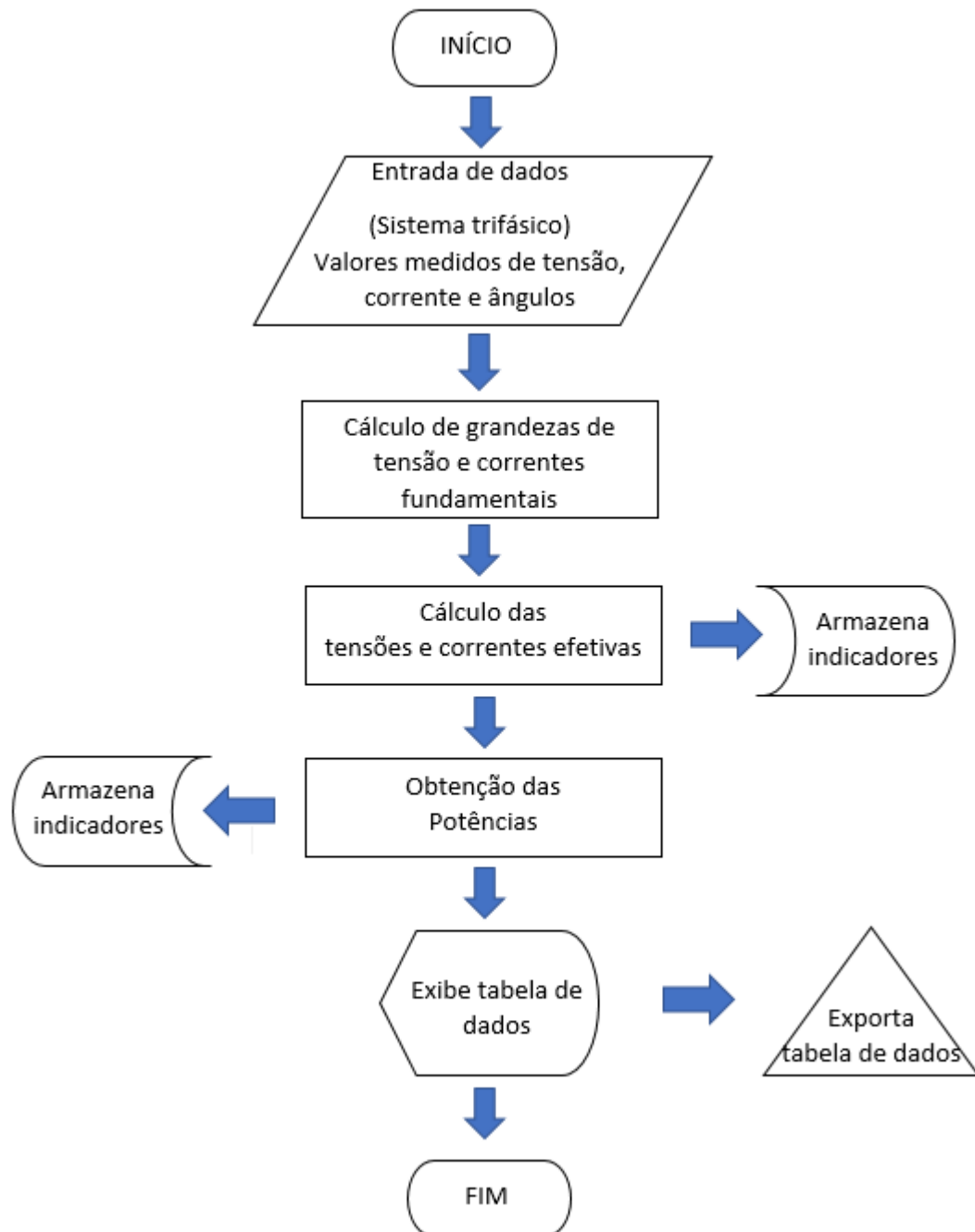
Da mesma forma que foi feito com os pontos de medição da malha desenvolvida da Figura 3.8, para este caso também foram identificados, com adesivos no piso, os pontos exatos para a captura de valores com o luxímetro. Os resultados destas medições na faixa marginal serão apresentados no capítulo de resultados e discussão deste trabalho.

3.3.2 Programa Computacional para condição Trifásica

O programa computacional desenvolvido, para condição trifásica, através da ferramenta Matlab, apresenta uma etapa de entrada de dados. Com estas grandezas inseridas no programa é possível obter os resultados de alguns indicadores de qualidade da energia elétrica, além das potências aparente, ativa e não ativa.

Outra funcionalidade do programa é a possibilidade de exportar os resultados para uma planilha de Excel. Uma visão geral das tarefas realizadas pelo programa, é exposta através do fluxograma, da Figura 3.9.

Figura 3.9 Fluxograma do programa computacional trifásico.



Capítulo 4

Resultados e Discussão

4.1 Considerações Iniciais

Os resultados e discussões deste trabalho, na condição monofásica, estão apresentadas no Apêndice A1 e A2, em formato de artigos, sendo as análises quantitativas e qualitativas e realizadas para o ambiente industrial com intuito de mostrar o comportamento dos dispositivos através de estudos de caso diretamente na aplicação industrial. Entretanto, vale ressaltar que não é objetivo deste estudo verificar a conformidade das instalações elétricas e possíveis interrupções de fornecimento da concessionária.

Serão apresentados neste capítulo os resultados e discussão para os ensaios realizados na condição trifásica quando a carga composta por refletores com tecnologia LED e, na sequência, para a carga composta por refletores contendo lâmpadas a vapor de mercúrio.

4.2 Sistema na Condição Trifásica

Na tarefa de medição iniciou-se pela tecnologia LED, pois os refletores com esta tecnologia já estavam instalados no ambiente de medição. Porém, a fim de possibilitar as confrontações foram retirados estes refletores e instalados, temporariamente, refletores com lâmpadas a vapor de mercúrio. Vale ressaltar que os perfilados, cabos e demais acessórios de conexão foram mantidos.

4.2.1 Indicadores de Qualidade da Energia

É importante a verificação do comportamento da tensão, sendo que de acordo com [24] às variações da tensão são classificadas conforme a Tabela 3.1.

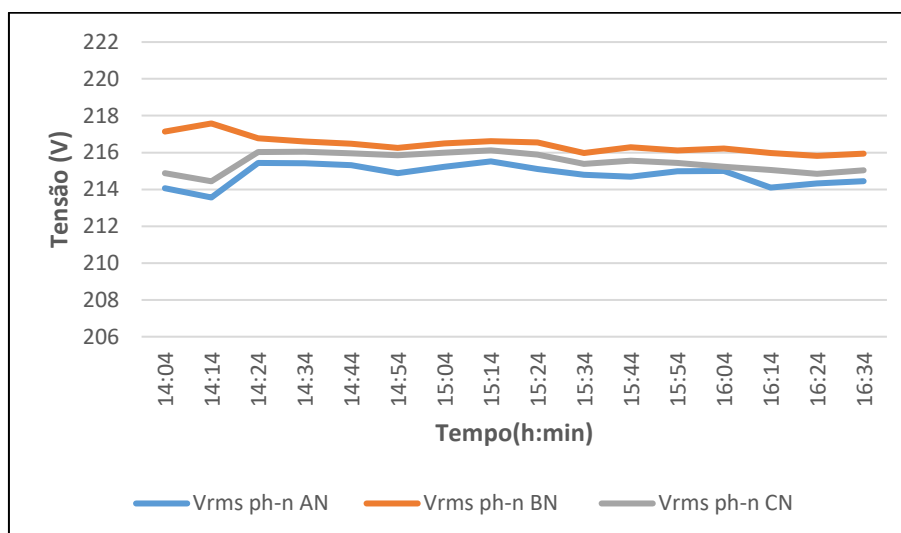
Tabela 3.1 - Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 1 kV (380/220)

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (Volts)
Adequada	$(350 \leq TL \leq 399) / (202 \leq TL \leq 231)$
Precária	$(331 \leq TL < 350 \text{ ou } 399 < TL \leq 403) / (191 \leq TL < 202 \text{ ou } 231 < TL \leq 233)$
Crítica	$(TL < 331 \text{ ou } TL > 403) / (TL < 191 \text{ ou } TL > 233)$

Fonte: PRODIST (Modulo 8 – Qualidade da Energia elétrica) da ANEEL revisão 12 – 2021

De início, observa-se os valores eficazes das tensões entre fase e neutro nas três fases do circuito alimentador terminal, no intervalo de tempo entre 14h04min até 16h34min no dia 16/07/2021, que mostrou o comportamento conforme o gráfico apresentado na Figura 4.1. Nesta ocasião a carga era composta por quatro refletores com lâmpadas de LED em cada fase.

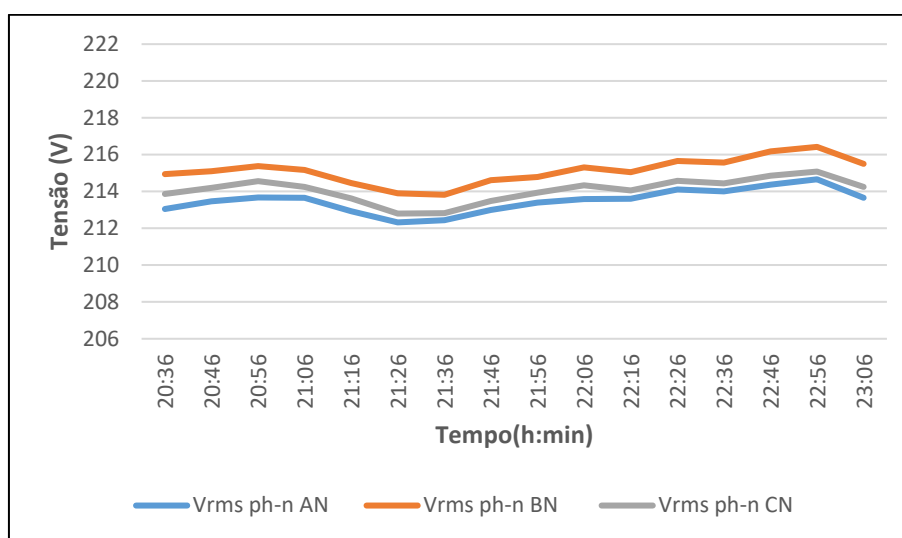
Figura 4.1 Comportamento da tensão em circuitos com lâmpadas de LED.



Na ocasião a tensão na fase BN apresentou um valor eficaz maior que os coletados para as fases AN e CN durante todo o intervalo de medição. O maior valor eficaz de tensão obtido foi de aproximadamente 218V na fase BN e o menor valor ficou próximo de 214V na fase AN.

Após a troca dos refletores com lâmpadas de LED por refletores com lâmpadas a vapor de mercúrio, observa-se os valores eficazes das tensões entre fase e neutro do circuito alimentador terminal, no intervalo de tempo entre 20h36min até 23h06min no dia 28/07/2021, conforme o gráfico apresentado na Figura 4.2.

Figura 4.2 Comportamento da tensão em circuitos com lâmpadas a vapor de mercúrio.

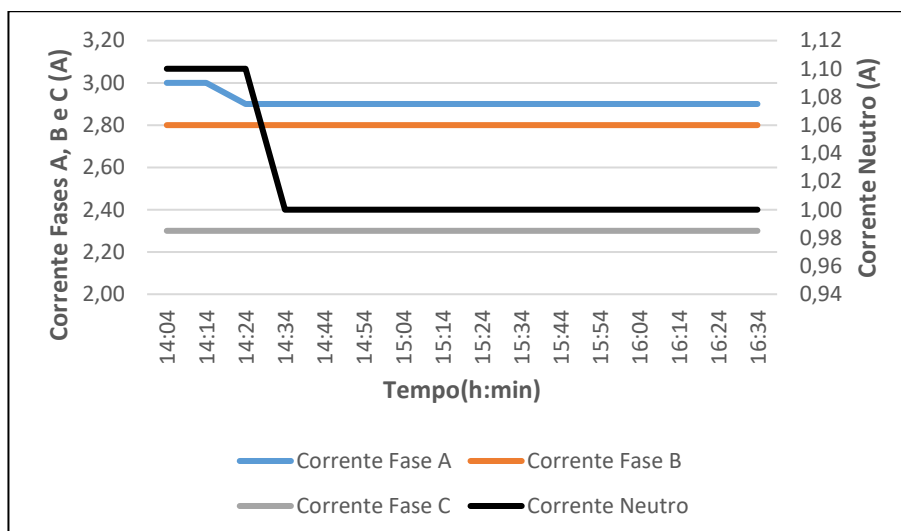


Neste cenário, a tensão na fase BN apresentou um valor eficaz maior que os coletados para as fases AN e CN durante todo o intervalo de medição. O maior valor eficaz de tensão obtido foi de aproximadamente 217V na fase BN e o menor valor ficou próximo de 213V na fase AN.

Devido medições em dias diferentes, a coleta de dados da tensão nas fases AN, BN e CN foi uma preocupação para possibilitar a confrontação de indicadores de qualidade da energia com ênfase na corrente e suas distorções.

Nestes intervalos de tempo, o comportamento da corrente em cada fase e no neutro, estão mostrados na Figura 4.3 para carga composta por lâmpadas de LED.

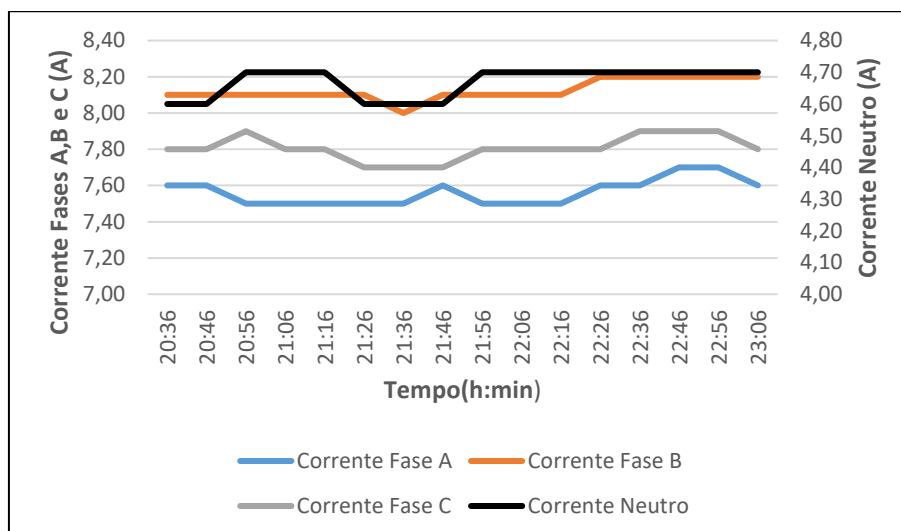
Figura 4.3 Comportamento da corrente em circuitos com lâmpadas de LED.



Percebe-se, na Figura 4.3 uma variação no valor eficaz da corrente na fase A e no neutro, diferente do que acontece nas fases B e C, nas quais a corrente apresenta-se em torno de 2,8A e 2,3A respectivamente. A fase C mostra um valor eficaz de corrente menor que os valores coletados nas fases A e B.

No caso em que a carga era composta por lâmpadas a vapor de mercúrio, o valor eficaz da corrente se comportou conforme Figura 4.4. Para esta ocasião, o valor eficaz da corrente é maior na fase B em relação as fases A e C. Em relação ao neutro, o valor eficaz da corrente permanece próximo de 4,7A durante o intervalo observado.

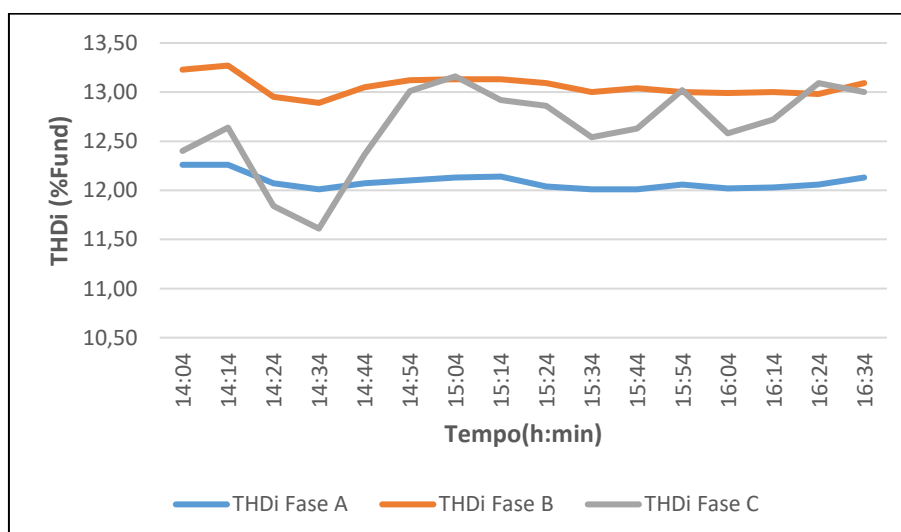
Figura 4.4 Comportamento da corrente em circuitos com lâmpadas a vapor de mercúrio.



Os gráficos a seguir vão apresentar a distorções harmônicas totais de corrente, em cada fase, já permitindo uma observação sobre o comportamento de cada tipo de tecnologia aplicada, considerando um intervalo de 170 minutos, com medições que foram realizadas a cada 10 minutos.

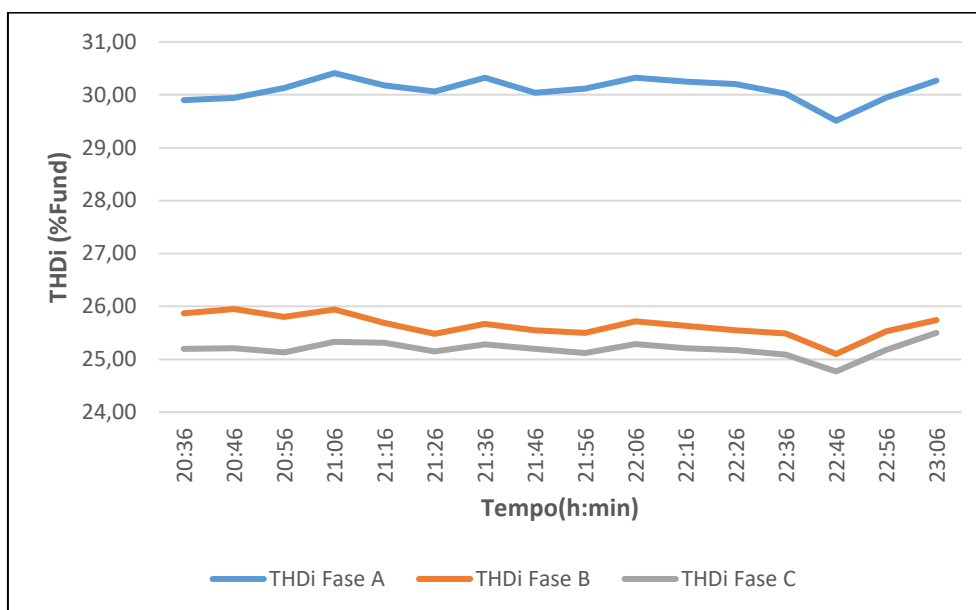
Na Figura 4.5 nota-se a THD_i na fase B em torno de 13% em relação a componente fundamental para o caso quando a carga é composta por refletores com lâmpadas de LED, enquanto a THD_i em um patamar próximo de 12% na fase A. Outra percepção ao observar a Figura 4.5 é que no intervalo medido de 170 minutos a THD_i na fase C apresenta variação entre 11,5% e 13,2%.

Figura 4.5 THDi em circuitos com lâmpadas de LED.



Na Figura 4.6 nota-se a THD_i na fase A em torno de 30% em relação a componente fundamental para o caso quando a carga é composta por refletores com lâmpadas a vapor de mercúrio, enquanto a THD_i em um patamar próximo de 26% na fase B. Outra percepção ao observar a Figura 4.6 é que no intervalo medido de 170 minutos a THD_i na fase C é a de menor valor, em torno de 25%.

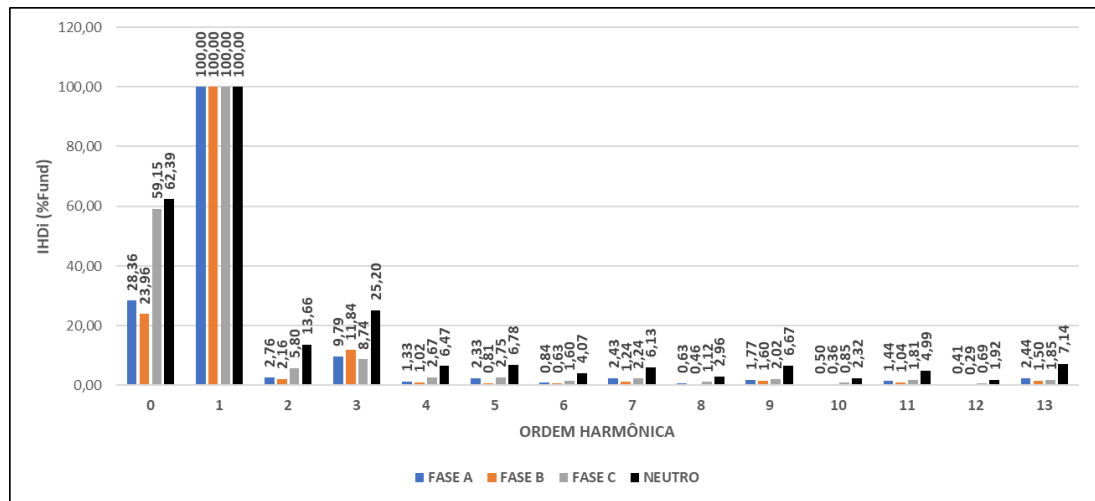
Figura 4.6 THD_i em circuitos com lâmpadas a vapor de mercúrio.



Ainda sobre harmônicas serão apresentadas as distorções individuais de corrente para cada tipo de tecnologia ensaiada.

Tratando-se de distorção harmônica individual, no intervalo apresentado e especificamente no dia 16/07 e no instante 16h34min, quando o valor eficaz da corrente era 2,9A na fase A, 2,8A na fase B, 2,3A na fase C e 1A no neutro, obteve-se as distorções harmônicas individuais de corrente (IHD_i) até a 50° ordem. Entretanto, será apresentado nos gráficos somente até a 13° ordem, pois além de ser contribuições mais relevantes é possível uma melhor visualização gráfica, conforme apresentado na Figura 4.7.

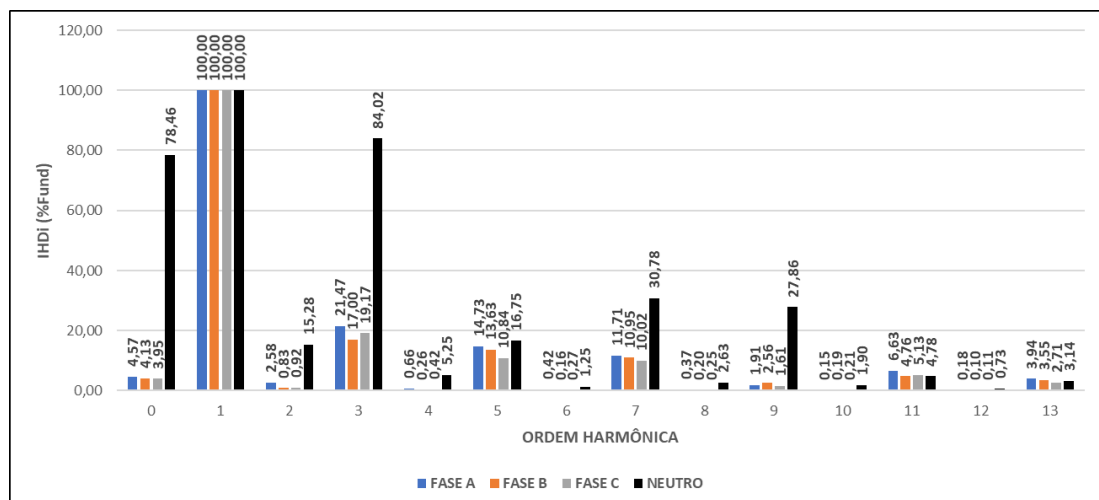
Figura 4.7 Distorção individual de corrente em circuitos com lâmpadas de LED.



Neste caso da Figura 4.7, excetuando a componente fundamental, os maiores valores de IHD_i são os da componente contínua e da harmônica de ordem 3. Nota-se para as mesmas ordens harmônicas uma contribuição significativa de distorções harmônicas no neutro em relação à fundamental.

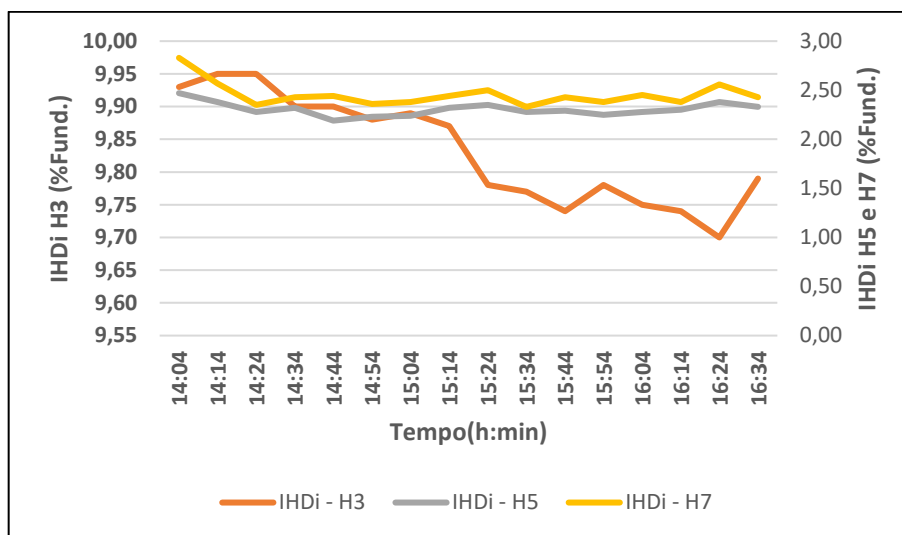
No caso com lâmpadas a vapor de mercúrio, no dia 28/07 e no instante 22h36min, quando a corrente eficaz era 7,6A na fase A, 8,2A na fase B, 7,9A na fase C e 4,7A no neutro, os maiores valores de IHD_i são os das componentes ímpares de ordem 3, 5 e 7 conforme Figura 4.8. Nota-se uma contribuição de distorções harmônicas no neutro que devem ser consideradas.

Figura 4.8 Distorção individual de corrente em circuitos com lâmpadas a vapor de mercúrio.



Sabendo que a componente contínua e as componentes ímpares de ordem 3, 5 e 7 são as mais representativas, percebe-se a necessidade de observação destas, por fase. Verifica-se que na tecnologia LED o comportamento da IHD_i , na fase A, mostra que a componente de ordem 3 é o de maior valor que as componentes de ordem 5 e 7, conforme Figura 4.9.

Figura 4.9 IHD_i na fase A, em circuitos com lâmpadas de LED.



Para as verificações nas fases B e C, quando a tecnologia era lâmpadas de LED, os resultados apresentaram o comportamento conforme figuras 4.10 e 4.11, respectivamente.

Figura 4.10 IHD_i na fase B, em circuitos com lâmpadas de LED.

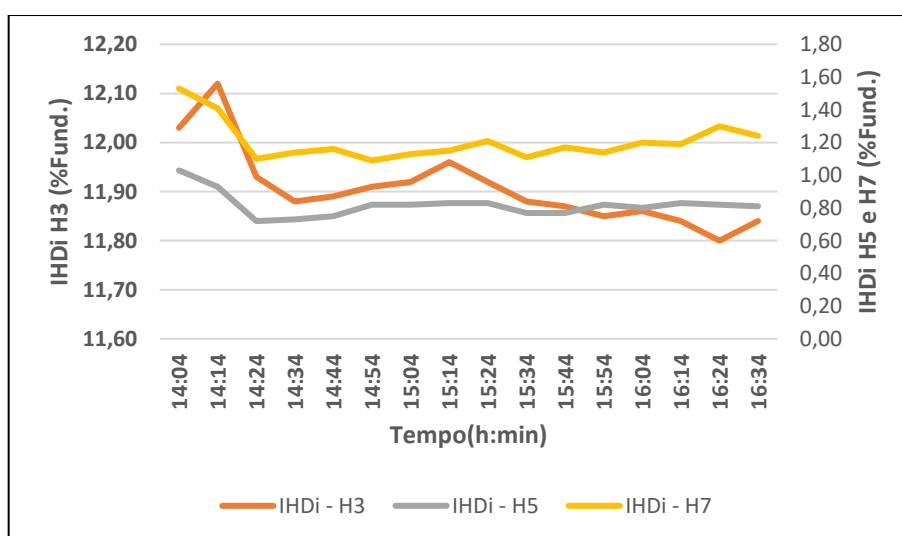
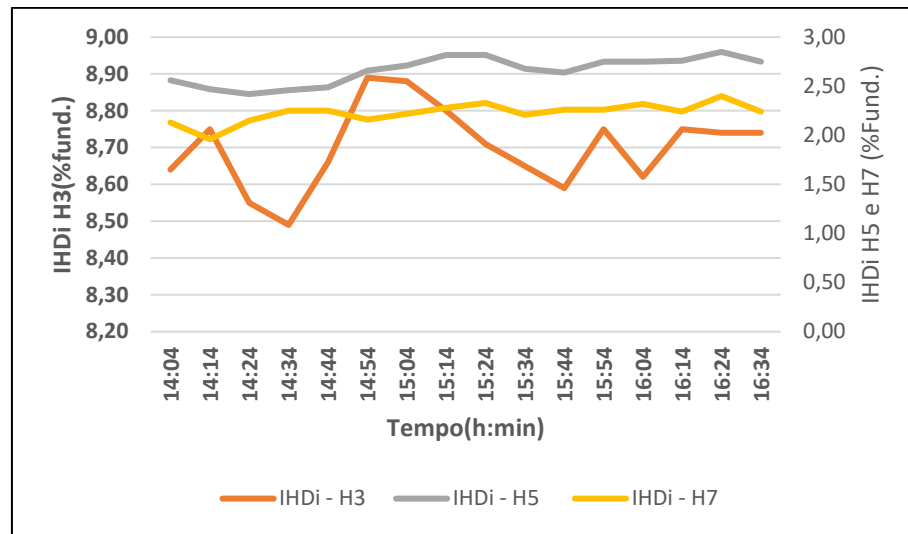
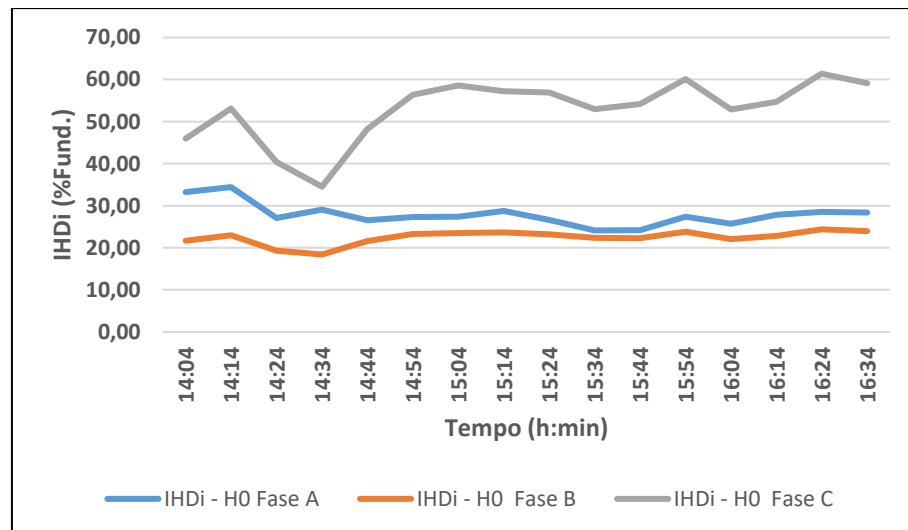


Figura 4.11 IHD_i na fase C, em circuitos com lâmpadas de LED.



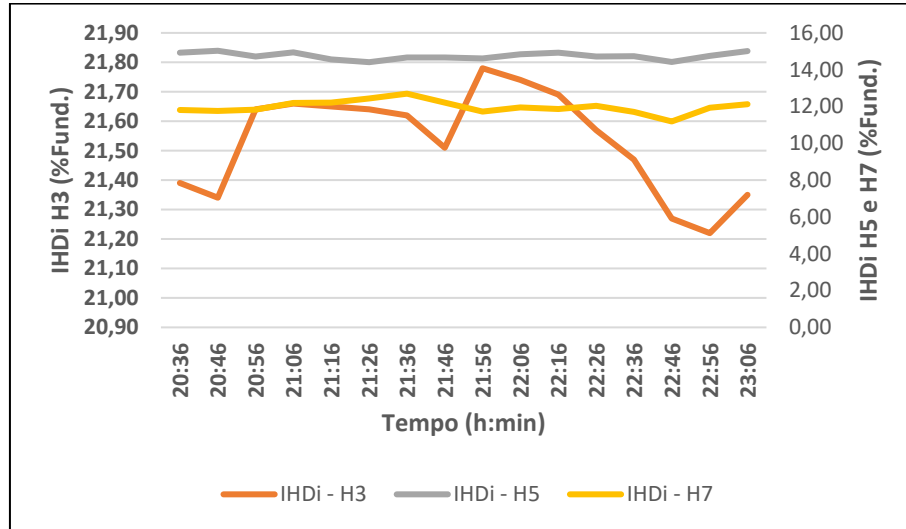
Nota-se que a componente contínua foi a de maior valor em todas as fases quando comparada com as componentes de ordem 3, 5 e 7 apresentadas nas figuras 4.9, 4.10 e 4.11, Em relação as fases, na fase C, a IHD_i foi mais acentuada, conforme Figura 4.12.

Figura 4.12 IHD_i da componente contínua, em circuitos com lâmpadas de LED.



Quando a carga era composta por lâmpadas a vapor de mercúrio, foi monitorado o comportamento da IHD_i , nesta situação a contribuição da componente de ordem 3 é o de maior valor, seguido das componentes de ordem 5 e 7, conforme Figura 4.13.

Figura 4.13 IHD_i na fase A, em circuitos com lâmpadas a vapor de mercúrio.



As verificações nas fases B e C, quando a carga era composta por lâmpadas a vapor de mercúrio, estão apresentadas conforme figuras 4.14 e 4.15, respectivamente.

Figura 4.14 IHD_i na fase B, em circuitos com lâmpadas a vapor de mercúrio.

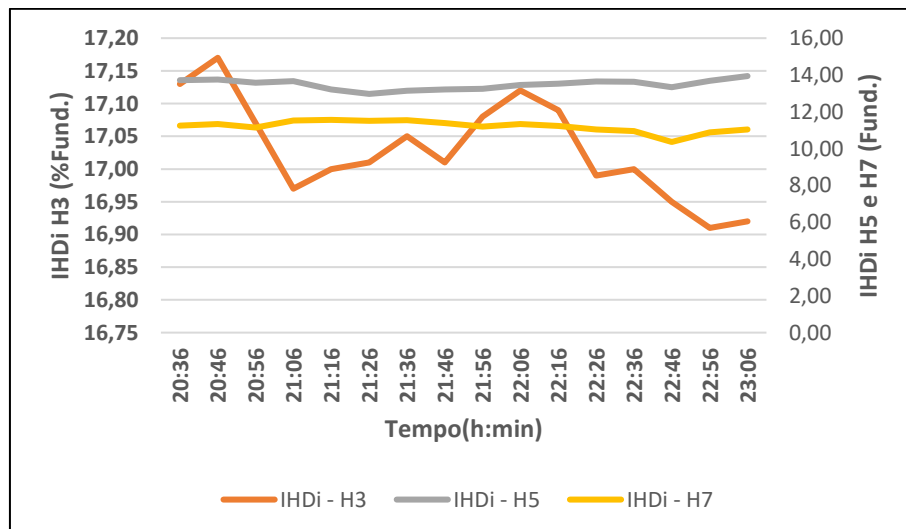
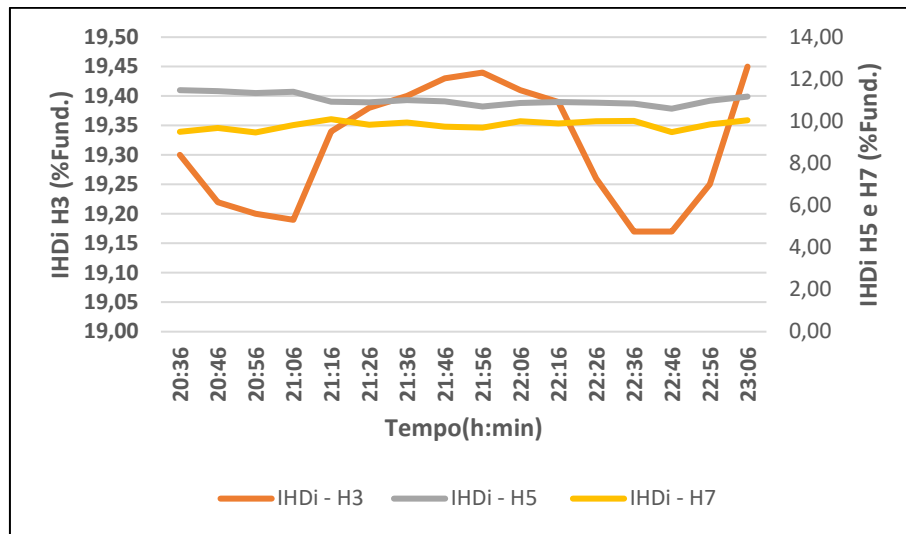
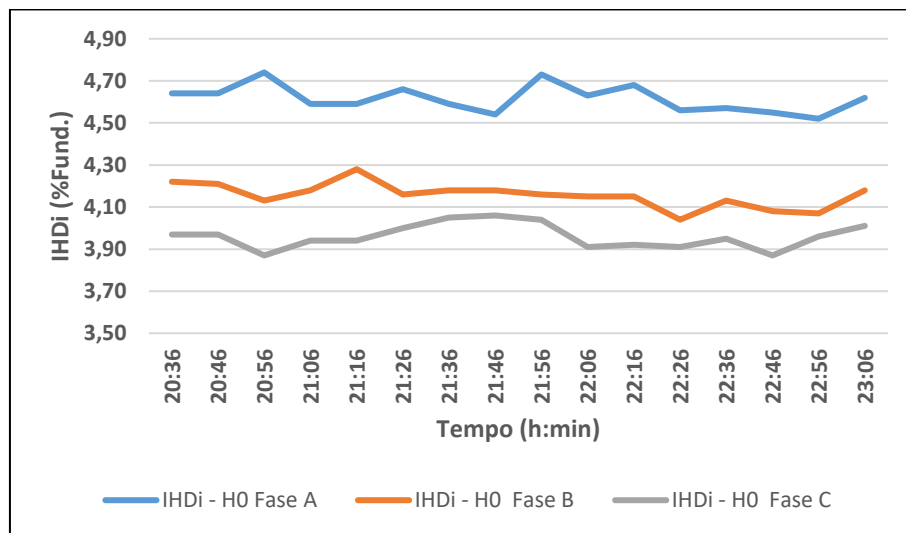


Figura 4.15 IHD_i na fase C, em circuitos com lâmpadas a vapor de mercúrio.



No caso das Figuras 4.14 e 4.15, observa-se que a contribuição harmônica da ordem 3 foi a de maior valor, na sequência se apresentam as contribuições da componente de ordem 5 e 7. A menor contribuição mostrada é a da componente contínua, conforme Figura 4.16.

Figura 4.16 IHD_i da componente contínua, em circuitos com lâmpadas a vapor de mercúrio.



4.2.2 Resultados de Potências

Para o instante 15h34min, no dia 16/07/2021, com o sistema de iluminação funcionando com refletores contendo lâmpadas de LED e utilizando o equacionamento para condição trifásica apresentado, obteve-se os resultados da Tabela 4.1.

Na Tabela 4.1, consta também os resultados no instante 22h36min, do dia 28/07/2021, momento no qual a carga era composta por refletores contendo lâmpadas a vapor de mercúrio. Nota-se na Tabela 4.1 uma grande redução nas potências, destacado pela diferença percentual (Dif%), quando a carga é composta por refletores com lâmpadas de LED, e consequentemente resultará em um consumo menor de energia elétrica.

Tabela 4.2 –Potências de refletores com lâmpadas a vapor de mercúrio e com lâmpadas de LED.

Potência	Indicador	Vapor de Mercúrio (I)	LED (II)	(Dif %) II e I
Aparente (VA)	S_e	5380,24	1771,14	-67,1%
	S_{e1}	4941,96	1645,36	-66,7%
	S_{eN}	2126,97	655,54	-69,2%
	S_{eH}	130,16	33,68	-74,1%
Ativa (W)	P	4640,00	1640,00	-64,7%
	P_1	4618,33	1638,80	-64,5%
	P_H	21,67	1,20	-94,5%
Não ativa (var)	D_{eI}	2100,79	649,08	-69,1%
	D_{eV}	306,18	85,38	-72,1%

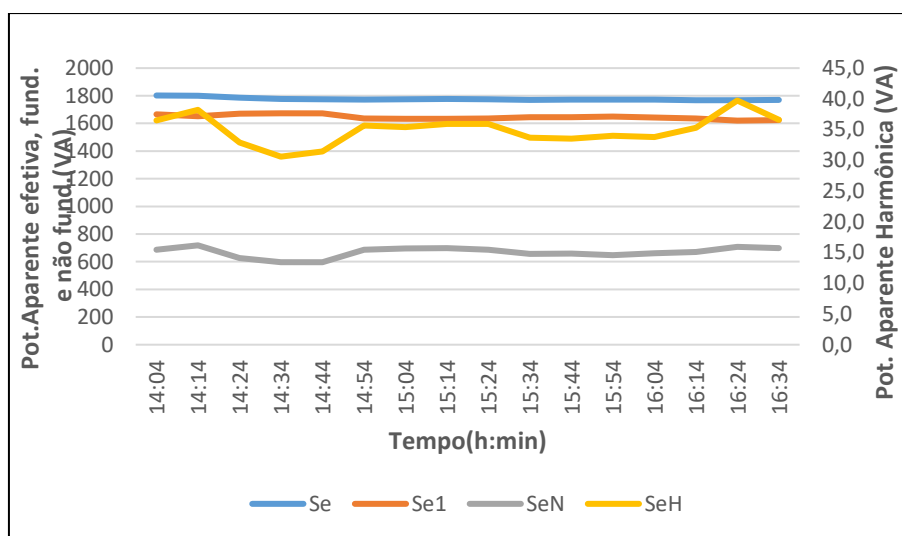
A Tabela 4.3 apresenta os valores para o fator de potência determinado para cada tipo de tecnologia ensaiada nos instantes da Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Fator de Potência

Descrição	Refletor com lâmpadas a Vapor de Mercúrio	Refletor com lâmpadas de LED
Fator Potência obtido	0,86	0,93
Valor Referência ANEEL	>0,92	>0,92
Diferença percentual em relação a especificação da ANEEL	-6,3%	0,8%

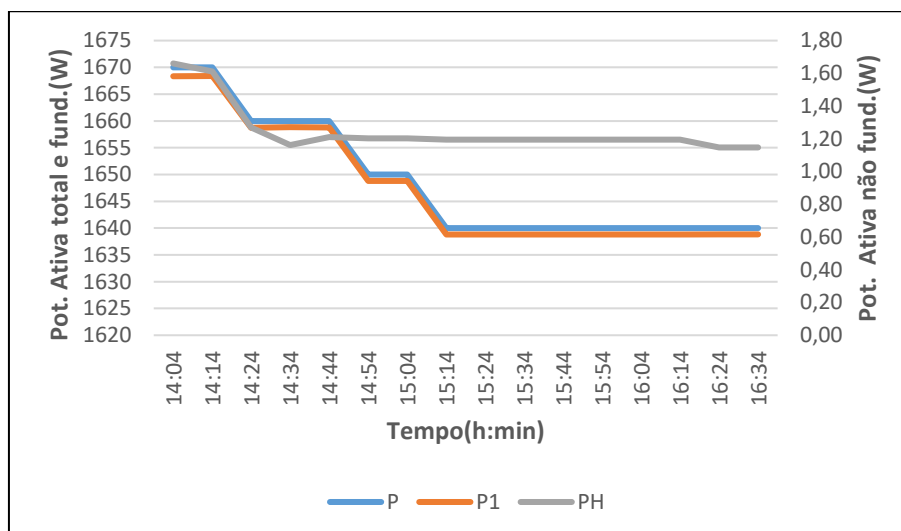
Além destes instantes, com a utilização da ferramenta computacional, foi possível obter estes indicadores de potências, a cada 10 minutos, no intervalo de tempo entre 14h04min até 16h34min no dia 16/07/2021, para o caso com refletores contendo lâmpadas de LED o comportamento das potências, aparente, ativa e não ativa que estão apresentados, respectivamente nas Figuras 4.17, 4.18 e 4.19.

Figura 4.17 Comportamento da potência aparente para circuitos com lâmpadas de LED.



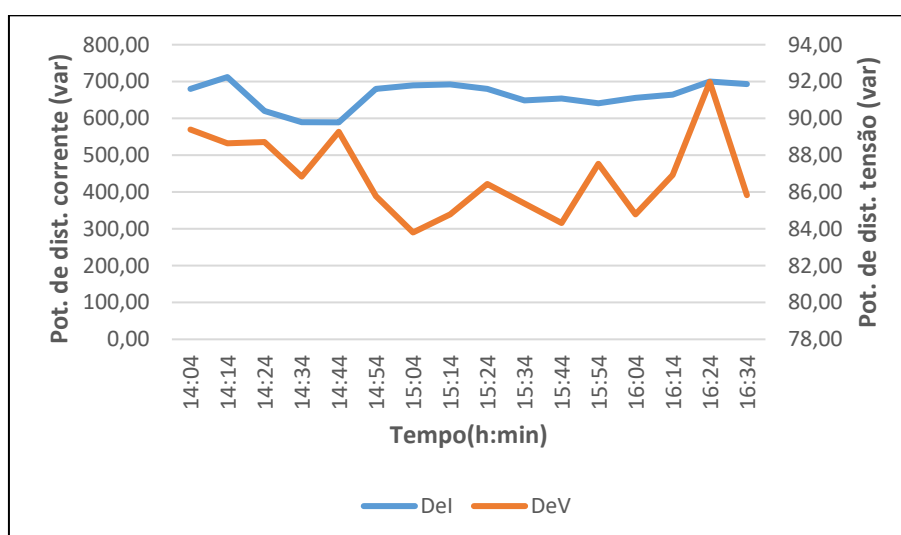
Para a Figura 4.17 a potência aparente efetiva (Se) apresentou valores em torno de 1800VA e a aparente efetiva fundamental (Se1) ficou em torno de 1600VA durante o intervalo observado. No caso da potência aparente efetiva não fundamental (SeN) observa-se uma variação entre 600 e 800VA. Por fim, nota-se a potência aparente harmônica (SeH) variando entre 30 e 40VA.

Figura 4.18 Comportamento da potência ativa para circuitos com lâmpadas de LED.



No caso da Figura 4.18, a potência ativa total (P) e a potência ativa fundamental (P1) estão próximas 1670W no início do monitoramento e depois apresentaram um valor estável em torno de 1640W, esta variação ocorre devido a alterações na tensão e corrente. No caso da potência ativa não fundamental (PH), os valores obtidos ficaram abaixo de 1,8W durante o intervalo observado.

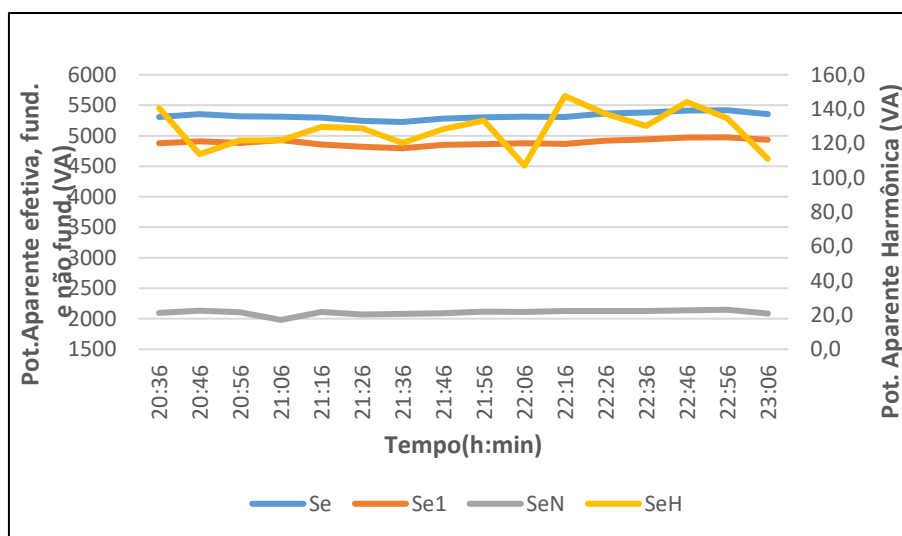
Figura 4.19 Comportamento da potência não ativa para circuitos com lâmpadas de LED.



No caso da Figura 4.19 a potência de distorção de corrente (DeI) ficou entre 600 e 700var e a potência de distorção de tensão (DeV) variou entre 84 e 92var.

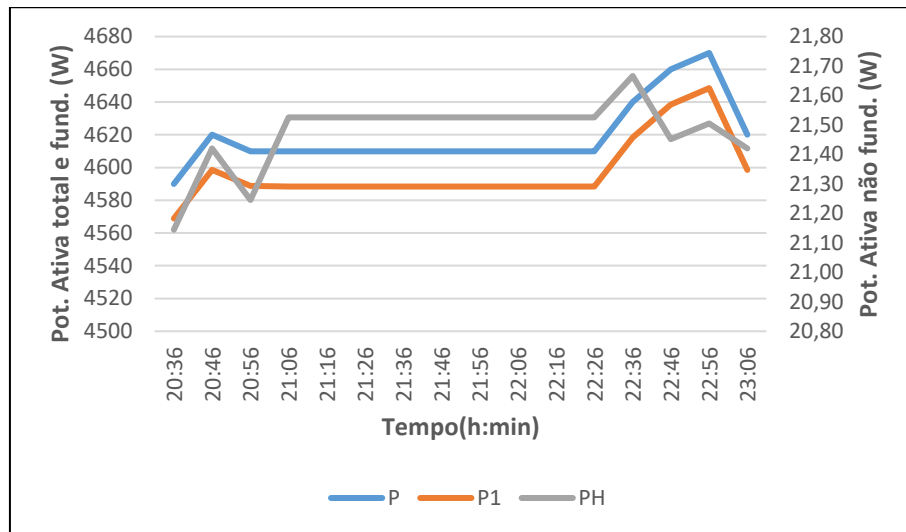
De forma análoga, com a utilização da ferramenta computacional, foi possível obter estes indicadores de potências, a cada 10 minutos, no intervalo de tempo entre 20h36min até 23h06min no dia 28/07/2021, para o caso com refletores contendo lâmpadas a vapor de mercúrio o comportamento das potências, aparente, ativa e não ativa estão apresentados, respectivamente nas figuras 4.20, 4.21 e 4.22.

Figura 4.20 Comportamento da potência aparente para circuitos com lâmpadas a vapor de mercúrio.



Para a Figura 4.20 a potência aparente efetiva apresentou um comportamento próximo de 5500VA e a aparente efetiva fundamental ficou em torno de 5000VA durante o intervalo observado. No caso da potência aparente não fundamental observa-se um comportamento próximo de 2000VA. Por fim, nota-se a potência aparente harmônica variando entre 100 e 150VA.

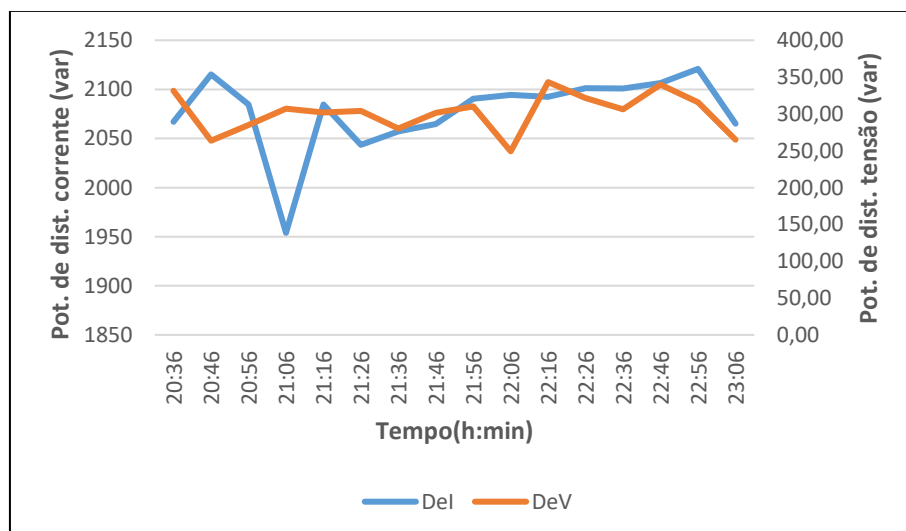
Figura 4.21 Comportamento da potência ativa para circuitos com lâmpadas a vapor de mercúrio.



Neste caso da figura 4.21, a potência ativa total variou entre 4580W a 4670W e a potência ativa fundamental variou entre 4560W e 4650W durante o intervalo observado, esta variação ocorre devido a alterações na tensão e corrente. No caso da potência ativa não fundamental, os valores obtidos ficaram abaixo de 22W.

No caso da Figura 4.22 a potência de distorção de corrente ficou entre 1950 e 2120var e a potência de distorção de tensão variou entre 250 e 350var.

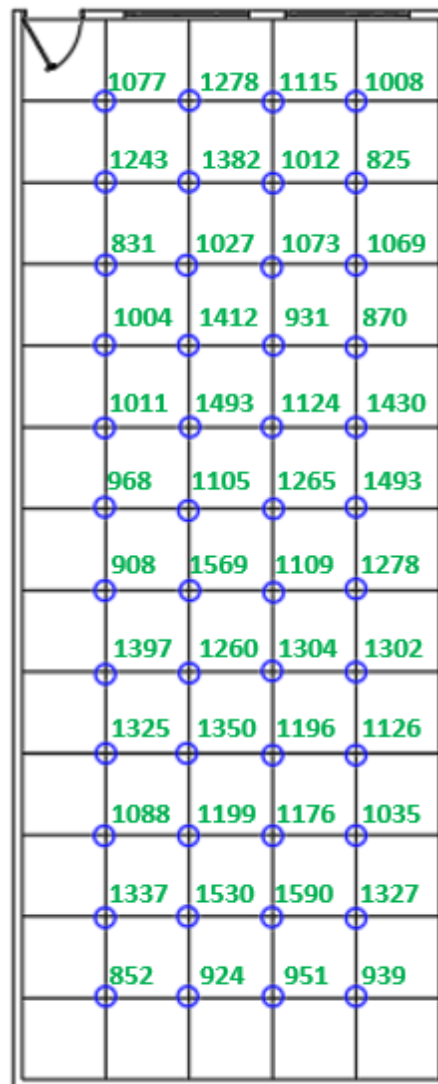
Figura 4.22 Comportamento da potência não ativa para circuitos com lâmpadas a vapor de mercúrio.



4.2.3 Indicadores de Luminotécnica

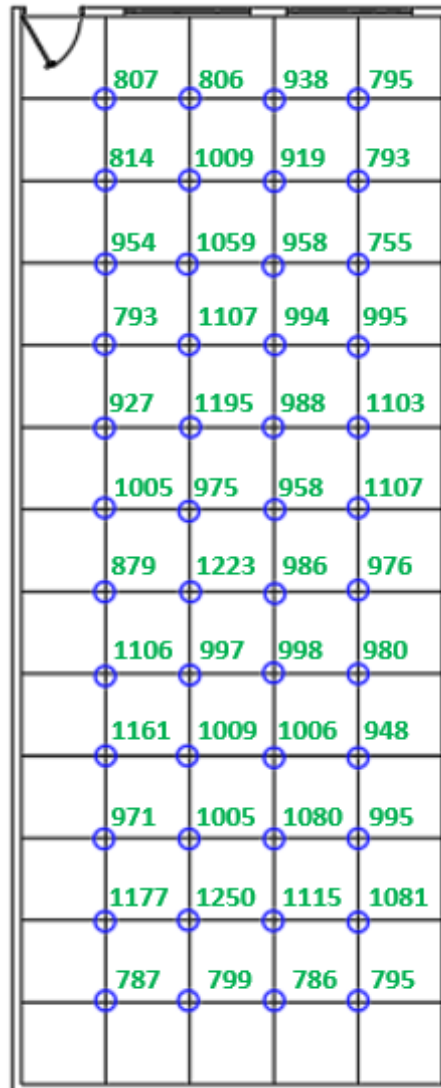
Em relação aos indicadores de luminotécnica, o valor esperado é de 500 lux, pois para a indústria de alimentos esse é o limite mínimo indicado pela norma vigente [22]. A Figura 4.23 apresenta o resultado das medições e valores encontrados de cada ponto do plano de trabalho, com destaque em verde porque estão de acordo com a norma.

Figura 4.23 Iluminância em lux, ao nível do plano de trabalho, para refletores com lâmpadas de LED.



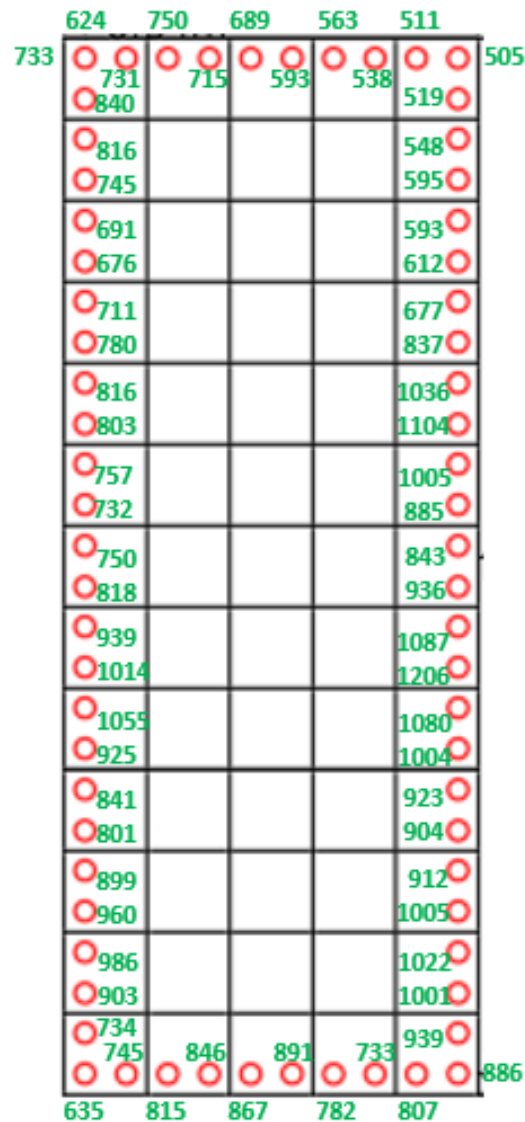
Com intuito de verificar os pontos não só na altura do plano de trabalho, foi efetuada uma medição com o sensor do instrumento posicionado sobre o piso. Vale ressaltar que a posição do sensor foi nos pontos já identificados com os adesivos. A Figura 4.24 apresenta os valores medidos, com destaque em verde porque estão de acordo com a norma.

Figura 4.24 Iluminância em lux, com o sensor ao nível do piso, para refletores com lâmpadas de LED.



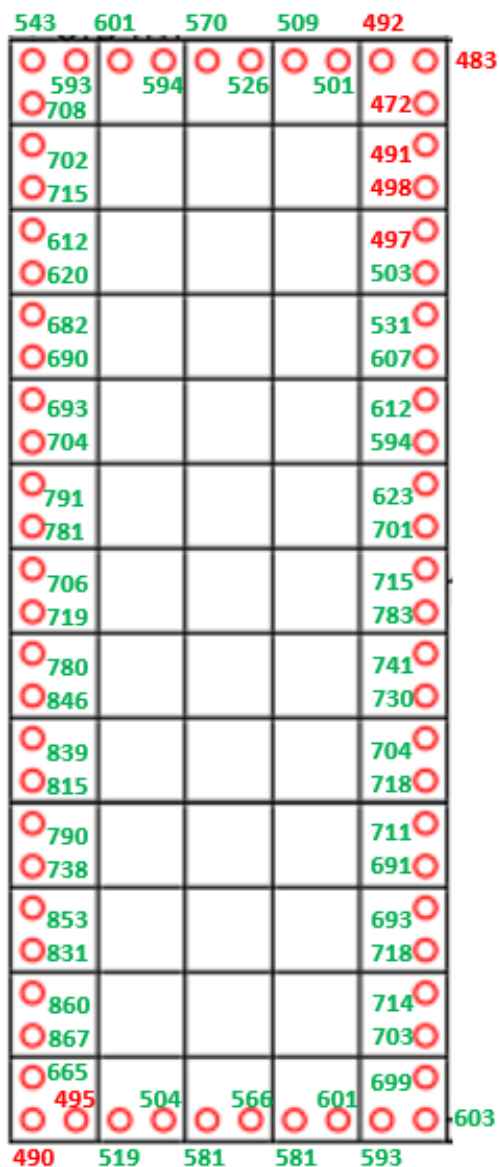
A Figura 4.25 apresenta o desenho com os pontos da faixa marginal com os valores das medições coletadas. Os valores medidos destacados em verde estão de acordo com a norma.

Figura 4.25 Iluminância em lux, ao nível do plano de trabalho, para refletores com lâmpadas de LED.



Neste caso, também foi monitorado os pontos ao nível do solo, ou seja, sem a utilização do “gabarito”. Os dados estão representados na Figura 4.26. Os valores medidos destacados em verde estão de acordo com a norma e os destacados em vermelho não atingiram o limite mínimo recomendado.

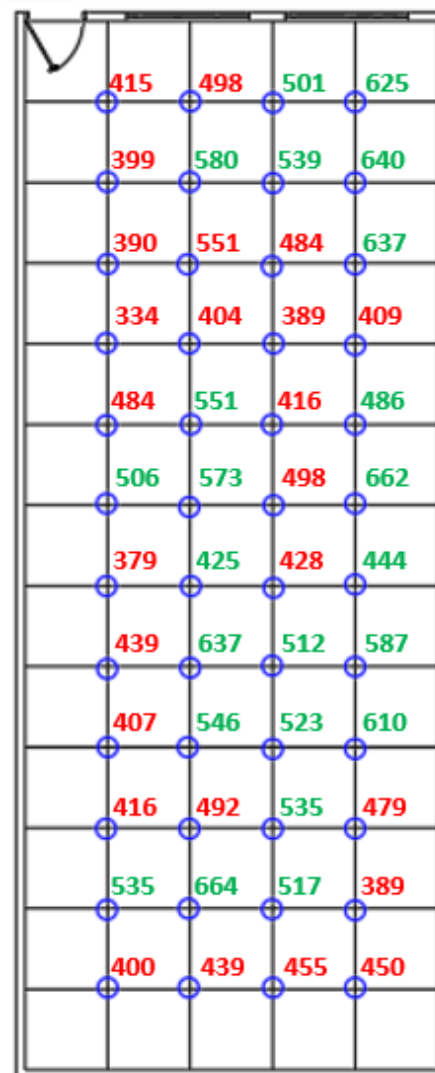
Figura 4.26 Iluminância em lux, na faixa marginal ao nível do piso, para refletores com lâmpadas de LED.



Após todas as verificações apresentadas, foi feito a troca dos refletores, lembrando que nesta condição a metodologia para medição de iluminância é idêntica.

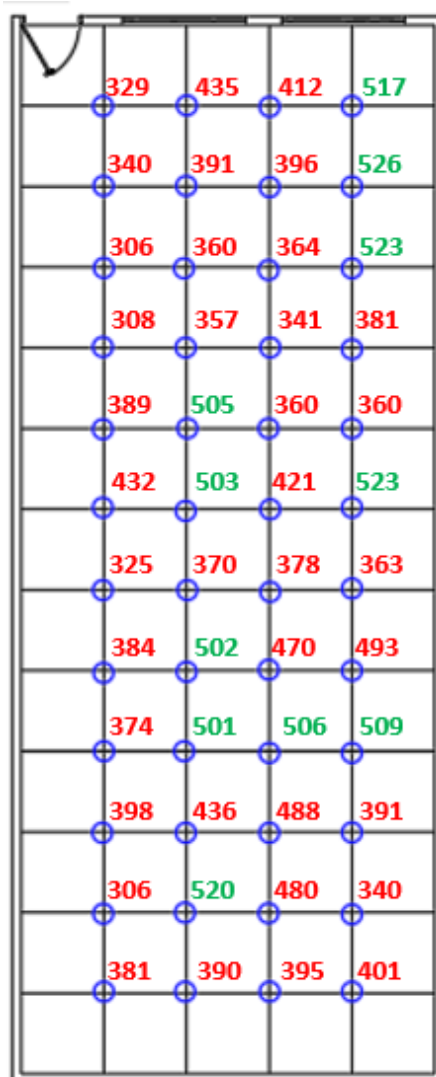
No dia 28/07/2021 foi realizada a medição quando a carga era composta por refletores contendo lâmpadas a vapor de mercúrio enquanto, simultaneamente, eram coletados os dados de qualidade da energia já apresentados neste capítulo. A Figura 4.27 apresenta os valores obtidos em cada ponto do plano de trabalho, com destaque em verde para aqueles que estão de acordo com a norma e em vermelho para os que estão abaixo do limite mínimo.

Figura 4.27 Iluminância em lux, ao nível do plano de trabalho, para refletores com lâmpadas a vapor de Mercúrio.



Percebe-se uma grande quantidade de pontos que não conseguiram atingir o limite mínimo recomendado pela norma vigente. A Figura 4.28 apresenta os resultados da medição ao nível do solo.

Figura 4.28 Iluminância em lux, ao nível do solo, para refletores com lâmpadas a vapor de mercúrio.



Neste caso, novamente uma grande quantidade de pontos estão destacados em vermelho porque ficaram abaixo do limite mínimo determinado pela norma vigente.

As Figuras 4.29 e 4.30 respectivamente, apresentam as medições na faixa marginal, no nível do plano de trabalho e no nível do solo.

Figura 4.29 Iluminância em lux, ao nível do plano de trabalho para refletores com lâmpadas a vapor de mercúrio.

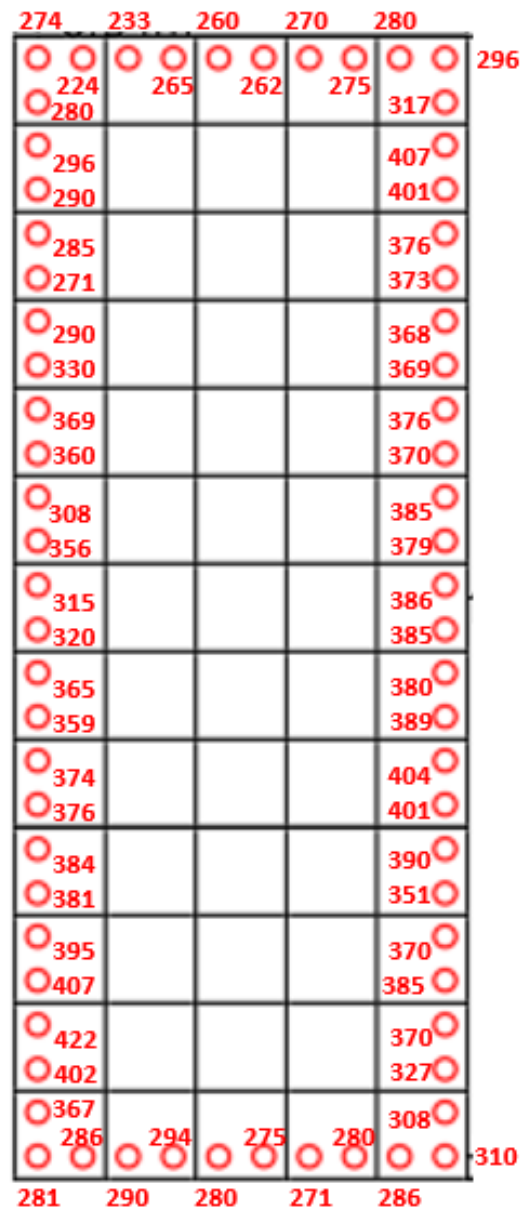
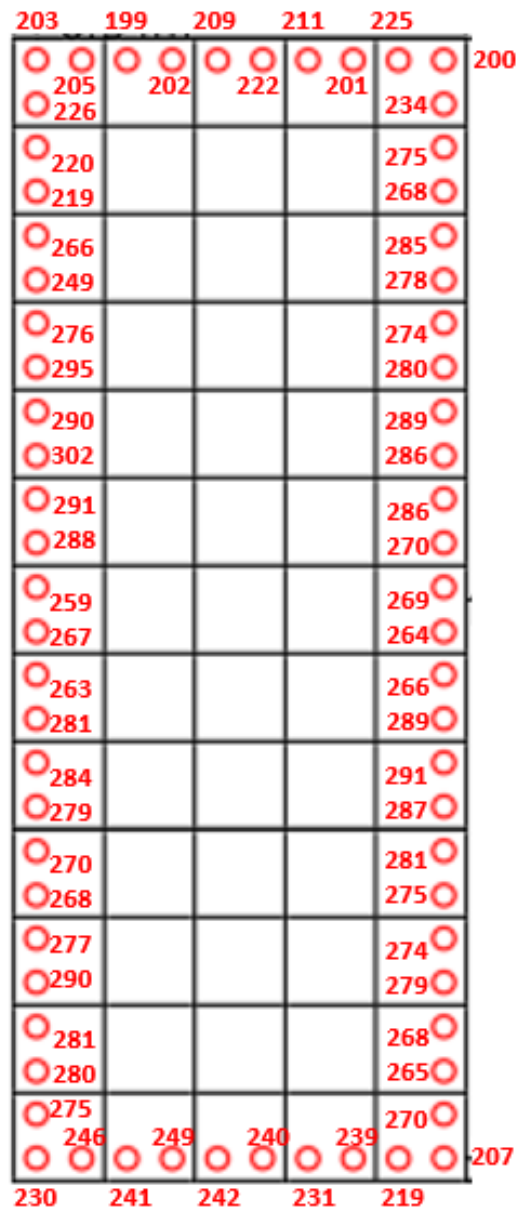


Figura 4.30 Iluminância em lux, na faixa marginal ao nível do solo, para refletores com lâmpadas a vapor de mercúrio.



Observa-se que tanto na situação da Figura 4.29 como na Figura 4.30 os valores da iluminância ficaram bem abaixo do mínimo recomendado pela norma vigente.

Capítulo 5

Conclusão

As conclusões deste trabalho, na condição monofásica, estão apresentadas no Apêndice A, em formato de artigos, os quais apresentam um tópico dedicado as conclusões obtidas a partir dos estudos de casos realizados.

Na condição de configuração trifásica conclui-se que a distorção harmônica total de corrente, para os refletores com lâmpadas de LED são menos acentuadas quando comparado aos refletores contendo lâmpadas à vapor de mercúrio, nas condições observadas.

Em relação a distorção harmônica individual de corrente, os dispositivos de iluminação de ambas tecnologias ficaram com valores conforme o recomendado pela norma IEC 61000-3-2: 2018/AMD 1: 2020. Ficou evidenciado também que as contribuições harmônicas no neutro apresentaram maior amplitude que as fases A, B e C. Outro aspecto encontrado foi a presença acentuada da componente contínua em diversas ocasiões.

Quanto a eficiência energética, percebe-se que os refletores com lâmpadas de LED apresentam potências ativa inferiores às encontradas para os refletores com lâmpadas a vapor de mercúrio, influenciando o consumo da energia elétrica. Isto representa um avanço tecnológico que contribui para a redução no consumo de energia elétrica. Os programas elaborados, permitiram a obtenção de resultados que demonstram que as potências fundamentais e as não fundamentais são maiores nas lâmpadas com tecnologia a vapor de mercúrio, quando comparada com refletores com lâmpadas de LED.

Com relação ao fator de potência das cargas, é mais vantajoso os dispositivos de LED quando comparados com os refletores com lâmpadas a vapor de mercúrio, inclusive estes últimos apresentaram valores abaixo das especificações estabelecidas pela ANEEL.

Em relação a iluminação do ambiente de trabalho e ao aspecto normativo, ficou evidenciado que os refletores com lâmpadas de LED apresentaram valores acima dos especificados pela norma ABNT vigente, enquanto os refletores com lâmpadas à vapor de mercúrio não atingiram os níveis mínimos de iluminância recomendados.

Em relação a metodologia desenvolvida para a medição na faixa marginal, as medições permitiram concluir que os refletores com lâmpadas de LED forneceram uma iluminância conforme o recomendado pela norma vigente, tanto ao nível do solo como ao nível do plano de trabalho. Em contrapartida, para a verificação na faixa marginal os refletores com lâmpadas à vapor de mercúrio não apresentaram níveis de iluminância satisfatórios.

Para futuras investigações sobre os temas deste trabalho, apresenta-se a sugestão de uma abordagem sobre a iluminação pública e comercial, uma vez que os tipos de dispositivos e suas instalações não apresentam as mesmas características e particularidades do ambiente industrial.

Referências Bibliográficas

- [1] MARENGO, J. Vulnerabilidade, impactos e adaptação à mudança do clima no semi-árido do Brasil. *Parcerias Estratégicas*, v.27, p.149-75, 2008.
- [2] ANEEL disponível em <https://ciclovivo.com.br/planeta/desenvolvimento/infografico-mostra-dados-sobre-energia-eolica-no-brasil/>.
- [3] EPE - Empresa de pesquisa energética - Anuário estatístico de energia elétrica 2020, ano base 2019
- [4] ONS - Operador Nacional do Sistema disponível em: http://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/dados_hidrologicos_niveis.aspx
- [5] Revista Hâbitat Sustentable Vol. 5, N°. 2. ISSN 0719 - 0700 / Págs. 20-31
- [6] SANTOS, E.B; AZEREDO, G.C.M; RESENDE, P.P.C; COSTA, J.S; CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA /CONTECC Goiânia/GO 2021 - Efeitos da substituição de tecnologia na iluminação de interiores - estudo de casos
- [7] GOUVEIA, M.P.T; CHAVES, F.C; SANTOS, G.S; CASTRO, M.C.A; CARVALHO,C.C.M.M; XI CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA/ CBQEE Campina Grande/PB 2015 - Análise Comparativa de Lâmpadas Compactas Utilizadas em Ambientes Residenciais Considerando Aspectos de Qualidade de Energia
- [8] LOPES, L.O; PEREIRA, A.M.E; FORTES, M.Z; FRAGOSO, A.P; TAVARES, G.M; XI CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA/ CBQEE Campina Grande/PB 2015 - Efeito Harmônico da Associação de Lâmpadas Fluorescentes Compactas
- [9] INMETRO - INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. Portaria nº 389 de 25 de agosto de 2014, Brasília, DF, 2014.

- [10] INMETRO - INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. Portaria nº 143, de 13 de março de 2015.
- [11] INMETRO - INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. Portaria nº 144 de 13 de março de 2015, Brasília, DF, 2015.
- [12] INMETRO - INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. Portaria n.º 76, de 24 de fevereiro de 2016.
- [13] INMETRO - INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. Portaria n.º 221, de 16 de maio de 2016.
- [14] DORF, R.C.; SVOBODA J.A.; SVOBODA D.J. Introduction to Electric Circuits. USA: John Wiley & Sons, 9th Revised ed. edição (11 março 2013), 2013.
- [15] DUGAN, R. C.; McGranaghan, M. F. ; BEATY, H. W. Electrical Power Systems Quality. United States of America: Ed. McGraw-Hill, 1995.
- [16] KENNEDY, BARRY W. Power Quality Primer. United States of America: Ed. McGraw-Hill, 2000.
- [17] MAMEDE FILHO, JOÃO, *Instalações elétricas industriais*/João Mamede Filho, -8. ed – [Reimpr]. Rio de Janeiro: LTC, 2011.
- [18] MARTINHO, EDSON. *Distúrbios da Energia Elétrica*. 2ª Edição, 2012.
- [19] Ciência e Notícia disponível em:
<http://ciencia.hsw.uol.com.br/lampadas-fluorescentes2.htm>
- [20] Qualidade Online Wordpress disponível em:
<http://qualidadeonline.wordpress.com/lâmpadas-incandescentes>.
- [21] LEDOBRASIL, tecnologia LED. Disponível em <http://ledobrasil.com.br/>.
- [22] NBR ISO/IEC 8995-1 de 03/2013 Iluminação de ambientes de trabalho – Parte 1: Interior
- [23] ARRILAGA, J.; BRADLEY, D. A.; BODGER, P. S. *Power Systems Harmonic*. New York: J. Wiley, 1985.

- [24] ANEEL *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST - Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica Revisão 12 – 2021*
- [25] IEEE 519-2014 - *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*
- [26] IEEE 1100-2005 - *IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment*
- [27] IEC 61000-3-2: 2018/AMD 1: 2020 *Amendment 1 - Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-2: Limits - Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase)*
- [28] IEEE Std 1459-2010, *IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power*
- [29] ABNT - NBR 5410 (2004 - *Instalações Elétricas de Baixa Tensão*).
- [30] ABNT-NBR 13966:2008 *Móveis para escritório – Mesa*

Apêndice A

Artigos

O presente Apêndice apresenta dois estudos de caso, descritos em forma de artigos, os quais foram apresentados na XIV Conferência Brasileira de Qualidade da Energia Elétrica 2021 (XIV CBQEE 2021) no dia 30 de agosto de 2021.

O primeiro estudo de caso (A1) foi realizado na indústria, mas em um ambiente com perfil de escritório e com a carga composta por lâmpadas tubulares fluorescentes e, em um segundo momento, após *retrofit*, por lâmpadas tubulares com tecnologia LED.

O segundo estudo de caso (A2) também foi realizado na indústria, mas em um ambiente com perfil de galpão industrial e com a carga composta por refletores contendo lâmpadas de LED e em um segundo momento, após substituição temporária, por refletores com lâmpadas a vapor de mercúrio.

A1 - Aspectos Luminotécnicos e de Qualidade da Energia de Lâmpadas Tubulares com Tecnologia LED e Fluorescentes na Indústria – Um estudo de Caso

Aspectos luminotécnicos e de qualidade da energia de lâmpadas tubulares com tecnologia LED e Fluorescentes na Indústria – Um estudo de Caso

Lucas Loures Rosa
Escola de engenharia elétrica, mecânica
e de computação(EMC)
Universidade Federal de Goiás(UFG)
Goiânia, Brasil
lucaslouresrosa@gmail.com

Euler Bueno dos Santos
Escola de engenharia elétrica, mecânica
e de computação(EMC)
Universidade Federal de Goiás(UFG)
Goiânia, Brasil
euler.bueno.santos@gmail.com

Bernardo Pinheiro de Alvarenga
Escola de engenharia elétrica, mecânica
e de computação(EMC)
Universidade Federal de Goiás(UFG)
Goiânia, Brasil
bernardo_alvarenga@ufg.br

Resumo—Este artigo tem como objetivo apresentar um estudo sobre sistemas de iluminação com tecnologia LED e fluorescente tubulares, considerando aspectos luminotécnicos e de qualidade da energia elétrica. Trata-se de um estudo de caso, onde procede um comparativo entre diferentes tecnologias de iluminação, considerando questões de regulamentações e eficiência energética. É também realizada

sobre os impactos do retrofit no ambiente industrial observado.

Palavras-chaves—Lâmpadas Fluorescentes. Lâmpadas LED. Eficiência energética. Qualidade da energia.

I. INTRODUÇÃO

É perceptível o aumento do uso de energia elétrica no mundo, devido ao crescimento populacional e o avanço da tecnologia. Estes fatores estão diretamente relacionados a necessidade do homem em obter produtos e serviços que necessitam de energia elétrica e que consequentemente provocam o crescimento da demanda.

No Brasil, essa situação também é notória. Segundo o anuário 2020 da EPE (Empresa de Pesquisa Energética) [1], a demanda por energia elétrica no Brasil deverá crescer 3,6% ao ano até 2032, com a demanda da indústria subindo em um ritmo mais lento, a 2,9% ao ano. Diante disso, usar a energia de forma racional traz diversos benefícios. Avaliando a perspectiva ambiental, a redução da necessidade de fazer obras para acompanhar o aumento da demanda por energia, como construção de usinas, de subestações e de linhas de transmissão e distribuição, que são empreendimentos que causam um impacto ambiental significativo também é um outro fator que impulsiona a necessidade de avanço tecnológico capaz de suprir o crescimento da demanda.

Dentre as iniciativas de eficiência energética aborda-se o tema iluminação, de modo que um sistema eficiente e bem

planejado requer um estudo aprimorado, tanto nos aspectos de qualidade dos equipamentos de iluminação utilizados quanto na forma que são aplicados. Sendo assim, a qualidade dos dispositivos devem ser testada e avaliada, para evitar perdas no sistema de distribuição de energia elétrica.

Em relação a temática iluminação podem ser destacadas duas tecnologias já consolidadas no mercado consumidor atual, as lâmpadas tubulares de LED e tubulares fluorescentes. O estudo de caso é aplicado em um ambiente industrial, uma vez que neste setor a participação do consumo da iluminação é de aproximadamente 2% em relação ao consumo industrial total [2]. Ainda assim, vale ressaltar que estes dispositivos também são utilizados no setor comercial e residencial.

II. LUMINOTÉCNICA E QUALIDADE DA ENERGIA

O elemento principal de uma lâmpada fluorescente é o tubo selado de vidro. Este tubo contém uma pequena porção de mercúrio e um gás inerte, tipicamente o argônio, mantidos sob pressão muito baixa. O tubo também contém um revestimento de pó de fósforo em sua parte interna e dois eletrodos, um em cada extremidade, permitindo conectar a um reator.

O LED – Light Emitting Diode (Diodo Emissor de Luz), é um semicondutor que emite luz quando percorrido por uma corrente elétrica. A cor da luz emitida pode ser branca, branco comercial, amarela ou qualquer cor do espectro de cores. Suas aplicações são as mais variadas, podendo ser utilizados na substituição de lâmpadas convencionais, em semáforos de trânsito, circuitos eletrônicos e iluminações diversas [2].

Outro aspecto relevante das lâmpadas de LED é uma vida útil maior do que as demais lâmpadas convencionais (fluorescentes compactas e tubulares e, incandescentes). As

lâmpadas de LED não necessitam de reator adicional para o seu acionamento. No entanto, possuem um circuito de acionamento denominado *driver*.

Dentro dos objetivos a serem alcançados por uma concessionária de energia, destaca-se a qualidade de fornecimento de energia aos consumidores industriais, comerciais e residenciais. Em condições ideais esta energia deveria ser fornecida com uma tensão puramente senoidal, com frequência e amplitude constantes. Entretanto, constata-se na prática desvios significativos daquilo que seria o ideal e nesse âmbito a avaliação da qualidade do produto é fundamental.

A. Distorções Harmônicas

As distorções harmônicas são aspectos importantes para qualidade da energia. Para os cálculos foi utilizado o método proposto por IEEE [3], conforme equações (1) e (2).

Distorção harmônica total de tensão (THD_v) e da corrente (THD_i):

$$THD_v = V_H / V_1 \quad (1)$$

$$THD_i = I_H / I_1 \quad (2)$$

Onde:

V_H, I_H - Tensão e corrente não fundamental, respectivamente;

V_1, I_1 - Tensão e corrente fundamental, respectivamente.

B. Fator de Potência

Outro aspecto relevante é o fator de potência (FP), definido conforme a equação (3), considerando distorção harmônica total de corrente (THD_i) e tensão (THD_v) [3] e [5].

$$FP = K_1 / K_2 \quad (3)$$

Onde:

$$K_1 = (1 + P_H / P_1) FP_1$$

$$K_2 = [1 + THD_i^2 + THD_v^2 + (THD_i * THD_v)^2]^{1/2}$$

Sendo:

P_1 - Potência ativa fundamental;

P_H - Potência ativa não fundamental;

FP_1 - Fator de potência fundamental;

THD_i - Distorção harmônica Total de corrente;

THD_v - Distorção harmônica Total de tensão.

III. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste estudo de caso utilizou-se um ambiente dentro da indústria com perfil de escritório, contendo 12 luminárias, sendo cada uma delas composta por 2 lâmpadas fluorescentes tubulares de 32W. O ambiente possui uma área total de 81,09m² e a disposição das luminárias está exposta na planta baixa da Fig 1.

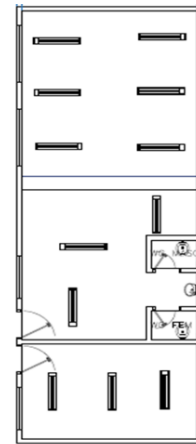


Fig. 1. Planta baixa com disposição das luminárias.

A. Analisador de Qualidade da Energia

Atualmente há vários equipamentos de medição sofisticados, que são capazes não só de medir as grandezas de um sistema de energia, mas também gerar gráficos, histogramas através de softwares desenvolvidos pelos fabricantes.

Essa série de informações auxilia bastante para análise de consumo e qualidade da energia. Neste estudo o intuito principal é avaliar parâmetros de qualidade da energia e aspectos luminotécnicos de lâmpadas tubulares fluorescentes e lâmpadas tubulares de LED após realização de substituição.

Para medição de tensão, corrente, potência ativa e reativa, harmônicas e outros indicadores, foi utilizado o analisador de qualidade da energia Fluke 435 série II, apresentado na Fig. 2.



Fig. 2. Analisador de qualidade de energia Fluke 435 série II.

B. Luxímetro Digital

O luxímetro é um aparelho criado e patenteado por Walter D'Arcy Ryan no ano de 1909, que mede a intensidade da luz que chega a seu sensor. Com isso, pode-se determinar uma grandeza denominada iluminância de um determinado local. A Fig. 3 apresenta o luxímetro utilizado nesse estudo de caso.



Fig. 3. Luxímetro digital Minipa.

C. Lâmpadas

A Tabela I apresenta os dados técnicos disponibilizados pelos fabricantes das lâmpadas tubulares fluorescentes e LED que representam a carga analisada nesse estudo no qual a alimentação do circuito é monofásica, tensão nominal de 220V entre fase e neutro.

TABELA I – DADOS DOS FABRICANTES DAS LÂMPADAS

Especificação	Lâmpada tubular fluorescente	Lâmpada tubular de LED
Modelo	T8 branca comfort	T8 Master LEDTube
Fabricante	A	B
Potência	32W	18W
Tensão	139-240V	100-240V
Frequência	60Hz	50/60Hz
Temp. De cor	4100k	6500k
Fator de Potência	>0,93	>0,92
Corrente trabalho	265mA	74-210mA
Vida útil	7.500h	25.000h

IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A. Monitoramento da tensão e corrente

Neste estudo de caso, a alimentação é monofásica, tensão nominal de 220V entre fase e neutro, e na condição de regime permanente.

A variação do valor eficaz da tensão no circuito alimentador terminal, no intervalo de tempo entre 17h20min até 17h30min no dia 20/05/2021, mostrou o comportamento conforme o gráfico apresentado na Fig. 4. Nesta ocasião a carga era composta por 24 lâmpadas tubulares com tecnologia fluorescente de 32W de potência cada.

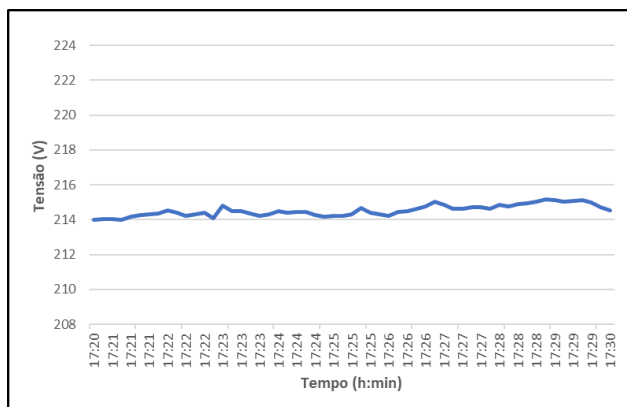


Fig. 4. Variações de tensão com carga composta por lâmpadas tubulares com tecnologia fluorescente

Nota-se que no intervalo de tempo da Fig. 4 a tensão apresentou valor eficaz de aproximadamente 214V. Em determinado instante com o analisador de qualidade de energia no modo osciloscópio obteve-se as formas de onda da tensão e corrente conforme Fig. 5.

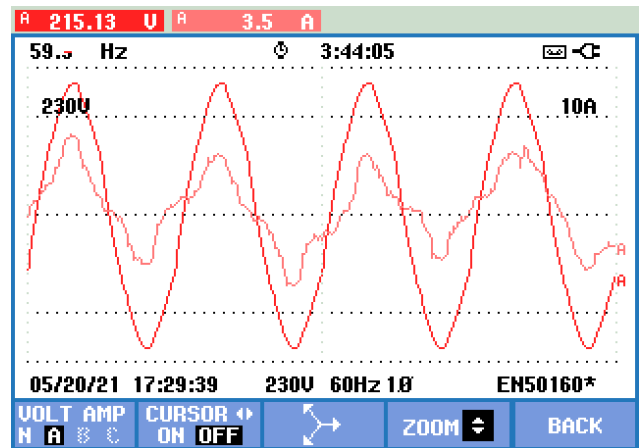


Fig. 5. Formas de onda da tensão e corrente com carga composta por lâmpadas tubulares com tecnologia fluorescente

Na forma de onda da corrente apresentada na Fig. 5, nota-se a presença de harmônicas pelas deformações apresentadas em relação a senoide. Neste intervalo, obteve-se também o comportamento das $THDi$ e $THDv$, conforme Fig. 6.

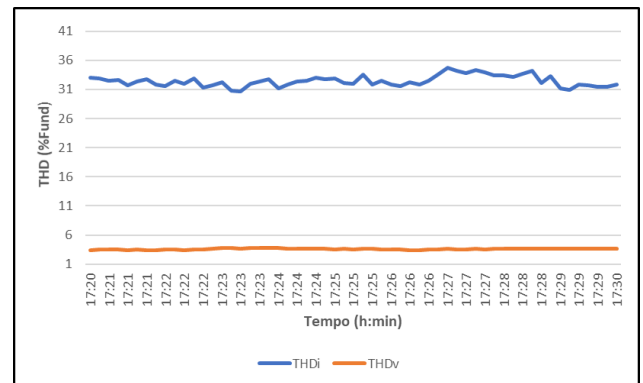


Fig. 6. $THDv$ e $THDi$ com carga composta por lâmpadas tubulares com tecnologia fluorescente

A variação da $THDv$ em relação a fundamental ficou em torno de 2% durante o tempo observado, enquanto a $THDi$ em um patamar próximo de 35% em relação da fundamental, conforme Fig. 6. Vale comentar que é possível obter as distorções harmônicas individuais de corrente até a 50º ordem.

Para exemplificar, segue gráfico com as distorções harmônicas individuais de corrente até a 19º ordem, em um determinado instante, conforme Fig. 7. Neste caso, a componente contínua possui um valor maior comparado aos conteúdos harmônicos diferentes da fundamental. Vale destacar que entre as demais harmônicas não fundamentais, a de ordem 3 apresenta contribuição acentuada.

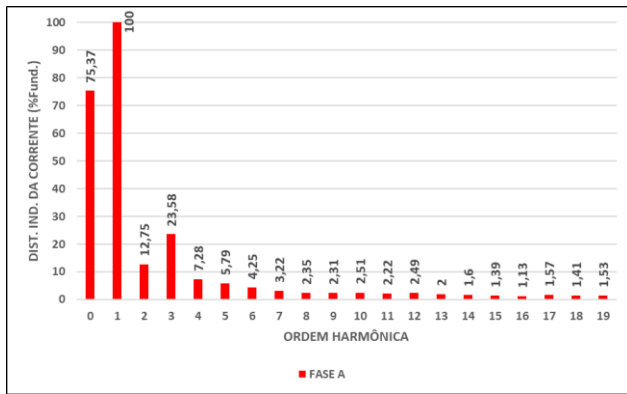


Fig. 7. Distorções individuais de corrente com carga composta por lâmpadas tubulares com tecnologia fluorescente

Em relação a tensão, a harmônica individual de tensão de ordem 5 é o que apresentou maior valor entre os conteúdos harmônicos de ordem maior que a fundamental, conforme o gráfico da Fig. 8.

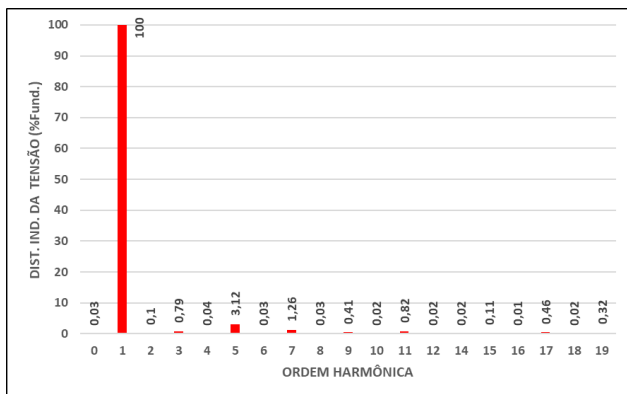


Fig. 8. Distorções individuais de tensão com carga composta por lâmpadas tubulares com tecnologia fluorescente

Com o intuito de observar as variações do valor eficaz da tensão no circuito alimentador terminal quando a carga é composta por lâmpadas tubulares com tecnologia de LED obteve-se o comportamento no intervalo entre 17h34min até 17h41min, no dia 20/05/2021, conforme o gráfico apresentado na Fig. 9.

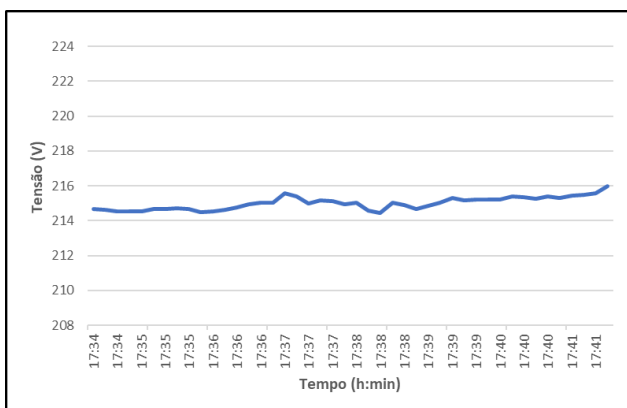


Fig. 9. Variações de tensão com carga composta por lâmpadas tubulares com tecnologia de LED

Com a carga composta por 24 lâmpadas tubulares com tecnologia de LED, e o analisador de qualidade de energia

configurado no modo osciloscópio obteve-se a forma de onda da tensão e corrente no instante 17h34min, no dia 20/05/2021, conforme exposto na Fig. 10.

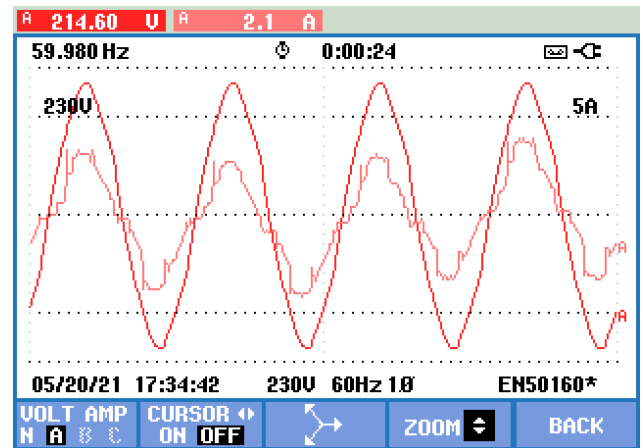


Fig. 10. Forma de onda da tensão e corrente com carga composta por lâmpadas tubulares com tecnologia de LED

Na forma de onda da corrente apresentada na Fig. 10, nota-se a presença de harmônicas pelas deformações em relação à senoide. Observou-se em um determinado intervalo de tempo o comportamento das $THDi$ e $THDv$, conforme Fig. 11.

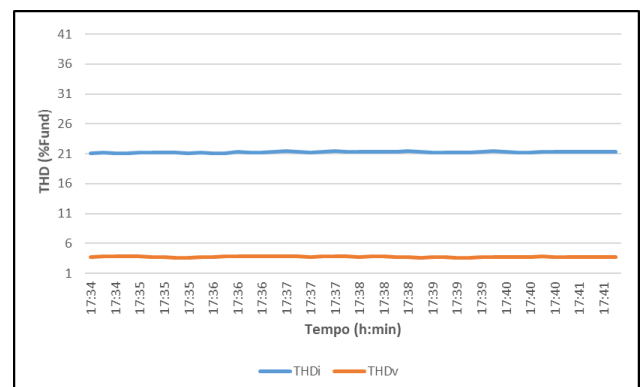


Fig. 11. THDv e THDi das lâmpadas tubulares com tecnologia de LED

Na Fig. 11 nota-se a $THDv$ em um nível de 2% em relação a fundamental, enquanto o $THDi$ em um patamar próximo de 21% em relação da fundamental. Com a carga composta por lâmpadas com tecnologia de LED, para um determinado instante, é apresentado na Fig. 12 as distorções harmônicas individuais de corrente até 19º ordem. Neste caso, excetuando a componente fundamental, os maiores valores são os da componente contínua seguido da harmônica de ordem 3.

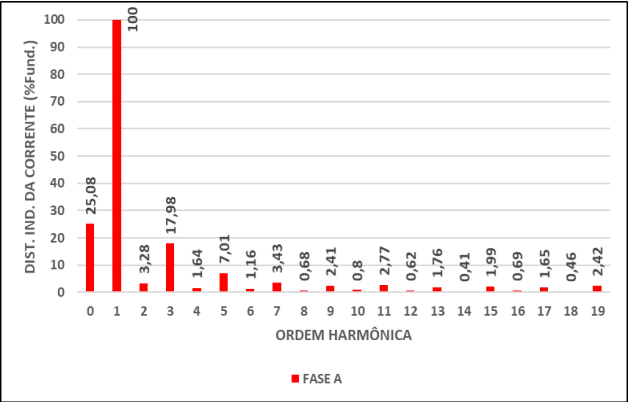


Fig. 12. Distorções individuais de corrente com carga composta lâmpadas tubulares com tecnologia de LED

Em relação a tensão, excluindo a fundamental, a harmônica individual de tensão de ordem 5 é a de maior valor conforme gráfico da Fig. 13. Neste estudo percebe-se que o comportamento das harmônicas individuais de tensão para ambas as tecnologias foi semelhante, mesmo com medições realizadas em instantes distintos.

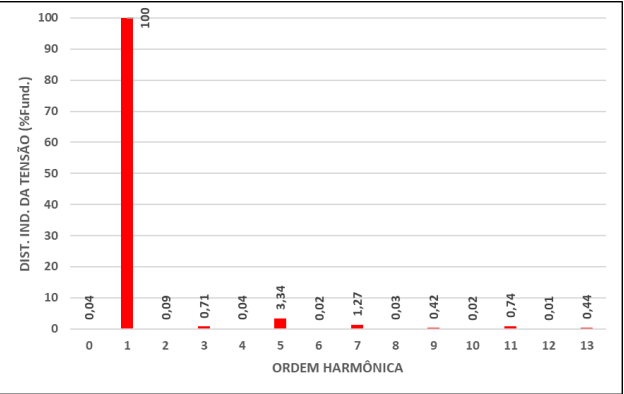


Fig. 13 Distorções individuais de tensão com carga composta por lâmpadas tubulares com tecnologia de LED

B. Resultados de Fator de Potência

Foi realizado o monitoramento com analisador de qualidade de energia Fluke considerando o aspecto do fator de potência para o caso no qual a carga era composta pelas 24 lâmpadas tubulares com tecnologia fluorescente. Após o retrofit o mesmo ensaio foi realizado para lâmpadas tubulares com tecnologia de LED.

A tabela II apresenta os valores obtidos para fator de potência determinado para cada tipo de tecnologia ensaiada.

TABELA II – FATOR DE POTÊNCIA

Descrição	Lâmpada tubular fluorescente	Lâmpada tubular de LED
Fator de potência obtido	0,94	0,95
Valor Referência ANEEL	>0,92	>0,92
Diferença % em relação especificação ANEEL	2,17%	3,26%

C. Luminotécnica

Em relação a temática iluminação, o principal fator avaliado e normatizado é a iluminação de ambientes de trabalho, o qual é regulamentado pela norma ABNT - NBR ISO_CIE 8995_1 - Iluminação de ambientes de trabalho que teve sua publicação em 21/03/2013, a qual está em vigor atualmente [6].

Essa norma especifica os requisitos de iluminação para locais de trabalho internos e os requisitos para que as pessoas desempenhem tarefas visuais de maneira eficiente, com conforto e segurança durante todo o período de trabalho. A grandeza verificada nas medições é a iluminância, que está definida como:

“Iluminamento, intensidade de iluminação ou iluminância é uma grandeza de luminosidade, representada pela letra E, que faz a relação entre o fluxo luminoso que incide na direção perpendicular a uma superfície e a sua área. A unidade do SI para iluminância é o lux (lx)”.

Para as medições foi considerado também a ABNT-NBR 13966:2008 Móveis para escritório - Mesas - Classificação e características físicas dimensionais e requisitos e métodos de ensaio publicação em 14/04/2008, a qual está em vigor atualmente [7]. O motivo de considerar essa norma é para apresentar uma referência para a medição de luminosidade de um ambiente de trabalho.

Como a ABNT-NBR 13966:2008 define que a altura da superfície superior do tampo da mesa deve ser entre 720 mm e 750 mm, ao realizar os ensaios foi necessário a elaboração de um suporte, aqui denominado “gabarito” para coleta de medições de iluminância simulando a altura do plano de trabalho, 720 mm. A Fig. 14 apresenta o gabarito desenvolvido.



Fig. 14. Gabarito com altura de 720mm.

Com o padrão definido, foi elaborado uma malha de medição de iluminância conforme recomendação da norma [6], essa condição permitiu a observação de 28 valores, em lux, para a verificação de iluminância no plano de trabalho. Dentre os pontos definidos, observou-se que para a tecnologia fluorescente tubular os valores ficaram abaixo dos especificados pela norma [6]. O valor esperado era de 500 lux, e a Fig. 15 apresenta o resultado das medições e dos valores encontrados em cada ponto do plano de trabalho.



Fig. 15. Iluminância em Lux para lâmpadas tubulares fluorescentes (A) e lâmpadas tubulares de LED (B).

Após a realização do *retrofit* para lâmpadas tubulares de LED, o resultado foi totalmente diferente, todos os pontos medidos com luxímetro considerando o mesmo método e equipamento estavam em conformidade com o especificado na norma [6], assim como é apresentado na Fig.15.

D. Fator de Uniformidade

É necessário que exista uma uniformidade razoável de iluminamento no ambiente iluminado. O fator de uniformidade é o indicador desta condição [2].

A uniformidade da iluminância é a razão entre o valor mínimo e o valor médio. A área da tarefa deve ser iluminada o mais uniformemente possível. A uniformidade da iluminância na tarefa não pode ser menor que 0,7. A uniformidade da iluminância no entorno imediato não pode ser inferior a 0,5 [6].

Baseado no conceito do Anexo B - Malha de cálculo para projeto do sistema de iluminação [6], o ambiente do ensaio caracteriza-se com uma sala média, na qual o tamanho da malha seja de no máximo um metro. Nesta condição, foi elaborado a malha de medição conforme Fig. 6 e para lâmpada fluorescente tubular obteve-se, no mesmo recinto, o valor médio de iluminamento sendo 371lux e o menor com 261lux. Logo, o fator de uniformidade é 0,70, valor este que corresponde ao valor recomendado pela norma.

Ao se elaborar o ensaio nas mesmas condições para as lâmpadas tubulares de LED, obteve-se como valor médio de iluminamento 679lux e o menor valor 509lux, resultando assim em um fator de uniformidade de 0,75, resultado este que apresenta uma uniformidade adequada. A Fig. 16 é uma foto comparativa do ambiente, antes e após o *Retrofit*.



Fig. 16. Ilustração do ambiente com lâmpadas fluorescentes tubulares (A) e lâmpadas LED tubulares (B).

V. CONCLUSÃO

O objetivo principal deste estudo de caso é apresentar dados e evidências sobre medições em sistemas de iluminação com tecnologia LED e fluorescente tubulares, considerando aspectos luminotécnicos e de qualidade da energia elétrica. As normas nacionais da ABNT, internacionais da IEEE e as regulamentações da ANEEL foram utilizadas como referências durante a análise dos resultados.

Em relação a qualidade da energia, as duas tecnologias estão dentro dos limites recomendáveis pelos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica vigente. Entretanto, quando é avaliado outro parâmetro relevante que é o fator de potência, as lâmpadas tubulares com tecnologia de LED apresentaram um desempenho melhor que as lâmpadas tubulares com tecnologia fluorescente.

A distorção harmônica total da tensão no circuito alimentador terminal para as duas tecnologias permaneceu dentro dos limites recomendáveis. Sobre a distorção harmônica total de corrente, conclui-se que as lâmpadas tubulares com tecnologia de LED apresentaram um desempenho melhor quando comparado as lâmpadas tubulares fluorescentes, considerando a mesma finalidade.

Sobre as componentes da corrente, excetuando a fundamental, é possível concluir que a componente contínua é de maior valor que as harmônicas de ordem ímpar, apresentando assim um ponto de atenção para os possíveis impactos da presença de componente contínua no sistema.

Analisando a iluminação do ambiente de trabalho e o aspecto normativo deste item, ficou evidenciado que as lâmpadas tubulares com tecnologia de LED apresentaram valores acima dos especificados pela norma ABNT vigente, enquanto que as lâmpadas tubulares com tecnologia fluorescente não atingiram os níveis mínimos de iluminância. Ainda assim, vale ressaltar que na avaliação do fator de uniformidade do ambiente, ambos os dispositivos atenderam as recomendações normativas.

VI. REFERÊNCIAS

- [1] EPE (Empresa de Pesquisa Energética, <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>. Acesso 21/10/2020
- [2] Mamede Filho, João, Instalações elétricas industriais/João Mamede Filho, -8.ed - [Reimpr].Rio de Janeiro: LTC, 2011
- [3] IEEE Std 1459-2010, IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power
- [4] ANEEL Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST - Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica Revisão 12 - 2021
- [5] DUGAN, R. C.; McGranaghan, M. F.; BEATY, H. W. Electrical Power Systems Quality.United States of América: Ed. McGraw-Hill, 1995.
- [6] ABNT NBR ISO CIE 8991/1 Iluminação de ambientes de trabalho. Parte 1: interior.
- [7] ABNT-NBR 13966:2008 Móveis para escritório – Mes

**A2 - Qualidade da Energia em Instalações Industriais Devido Refletores
Contendo Lâmpadas a Vapor de Mercúrio e Lâmpadas LED – Um Estudo
de Caso**

Qualidade da energia em instalações industriais devido refletores contendo lâmpadas a vapor de mercúrio e lâmpadas de LED – Um estudo de Caso

Lucas Loures Rosa
Escola de engenharia elétrica, mecânica
e de computação(EMC)
Universidade Federal de Goiás(UFG)
Goiânia, Brasil
lucaslouresrosa@gmail.com

Euler Bueno dos Santos
Escola de engenharia elétrica, mecânica
e de computação(EMC)
Universidade Federal de Goiás(UFG)
Goiânia, Brasil
euler.bueno.santos@gmail.com

Bernardo Pinheiro de Alvarenga
Escola de engenharia elétrica, mecânica
e de computação(EMC)
Universidade Federal de Goiás(UFG)
Goiânia, Brasil
bernardo_alvarenga@ufg.br

Resumo—Este artigo tem como objetivo apresentar um estudo sobre sistemas de iluminação com refletores contendo lâmpadas a vapor de mercúrio de alta pressão e refletores com lâmpadas de LED, considerando aspectos e efeitos relacionados a qualidade da energia elétrica. Neste sentido trata-se de um estudo de caso, no qual em um ambiente industrial é realizado um comparativo entre valores de grandezas de diferentes dispositivos de iluminação considerando as regulamentações e eficiência energética. Os dados necessários para obtenção dos resultados foram obtidos através de medições, realizadas com equipamento de última geração.

Palavras-chaves—Lâmpadas a vapor de mercúrio. Refletores com lâmpadas de LED. Harmônicas. Componente fundamental.

I. INTRODUÇÃO

A necessidade da economia de energia, decorrente da escassez deste produto devido à crescente demanda, juntamente com os diversos programas de eficiência energética, causou a inserção de uma grande variedade de aparelhos elétricos eficientes no sistema de distribuição de energia elétrica.

Além disso, tem-se verificado um crescimento vertiginoso na aquisição de equipamentos e dispositivos eletrônicos cada vez mais sofisticados, que são disponibilizados pelo mercado. Tais aparelhos mencionados podem possuir características de cargas não lineares como as que serão abordadas neste trabalho. Esta característica é responsável pela alteração na forma de onda senoidal de sinais elétricos, influenciando alguns indicadores da qualidade da energia.

Dentre estes aparelhos, deve-se incluir os dispositivos desenvolvidos para a iluminação de ambientes residenciais, comerciais e industriais. Para este estudo de caso, o enfoque

será em refletores de lâmpadas à LED e à vapor de mercúrio, os quais são utilizados na indústria. Vale ressaltar que essas tecnologias, também são aplicadas na iluminação pública.

É importante salientar a relevância do consumo de energia elétrica relacionado a classe industrial e a iluminação pública. De acordo com [1], os dois somados representam 38,1% de todo consumo de energia do país.

Grande parte do consumo na indústria trata-se de equipamentos e máquinas elétricas, como motores, bombas, compressores e outros, porém a iluminação tem sua representatividade. No setor industrial a participação do consumo da iluminação é de aproximadamente 2% [2].

Diante disso, planejar e utilizar a iluminação de forma racional, sem desperdício, promove diversos benefícios. Com relação ao meio ambiente, reduz a necessidade de fazer obras para acompanhar o aumento da demanda por energia, como construção de usinas, de subestações e de linhas de transmissão e distribuição, que são empreendimentos que provocam um impacto ambiental significativo.

Aliado ao consumo racional deve-se implementar ações voltadas para eficiência energética, com a utilização de tecnologias de iluminação, de modo que um sistema eficiente e bem planejado atenda a necessidade com menor consumo e desperdício possível. Sendo assim, a qualidade dos dispositivos de iluminação deve ser testada e aprovada para evitar, entre outros efeitos, perdas no sistema de distribuição de energia elétrica.

Com relação a iluminação será abordado duas tecnologias já consolidadas no mercado consumidor atual, quais sejam, refletores com lâmpadas à vapor de mercúrio de alta pressão e refletores com lâmpadas de LED. Este trabalho é parte de uma pesquisa em fase inicial.

II. CARGAS LINEARES E NÃO LINEARES

As lâmpadas à vapor de mercúrio são constituídas por um pequeno tubo de quartzo, onde são instalados nas extremidades, em geral, dois eletrodos principais e um eletrodo auxiliar ligados em série com uma resistência de valor elevado. Dentro do tubo são colocadas algumas gotas de mercúrio, juntamente com gás inerte, como argônio, cuja finalidade é facilitar a formação da descarga inicial. Ao se aplicar tensão nos terminais da lâmpada, cria-se um campo elétrico entre os eletrodos auxiliares e o principal mais próximo, provocando a formação de um arco elétrico entre eles, aquecendo as substâncias emissoras de luz, o que resulta na ionização do gás e na consequente formação de vapor de mercúrio [2].

O LED – *Light Emitting Diode* (Diodo Emissor de Luz), é um semicondutor que emite luz quando percorrido por uma corrente elétrica. A cor da luz emitida pode ser branca, branco comercial, amarela ou qualquer cor do espectro de cores. Suas aplicações são as mais variadas, podendo ser utilizados na substituição de lâmpadas convencionais, em semáforos de trânsito, circuitos eletrônicos e iluminações diversas.

Outro aspecto relevante do LED é a maior vida útil do que as demais lâmpadas convencionais (fluorescentes compactas e tubulares, vapor de mercúrio, vapor de sódio e, incandescentes), as lâmpadas de LED não necessitam de reator adicional para o seu acionamento. No entanto, necessitam de um circuito de acionamento denominado *driver*.

As cargas lineares são caracterizadas por manter os valores de sua impedância constantes, ou seja, não importa a forma de onda da tensão que lhe é aplicada ou a intensidade de corrente que flui pela mesma (dentro das faixas de operação da carga), o valor “ôhmico” não é alterado. São exemplos de cargas lineares: lâmpadas incandescentes, chuveiro com resistência (sem controle eletrônico), aquecedores em geral, motores de indução, resistores lineares e outras [3].

Devido ao fato de possuir uma relação tensão/corrente constante, ao submeter uma carga linear a um sinal de tensão, a corrente que irá circular por ela terá o mesmo formato da onda de tensão, mantendo assim uma proporcionalidade, podendo porém, os sinais de tensão e corrente estarem defasados ou não entre si.

Ao contrário das cargas lineares, as cargas não lineares são caracterizadas por não possuírem uma relação tensão/corrente constante. Como exemplo, podem ser citadas cargas que possuem algum dispositivo de eletrônica de potência, tais como diodos, transistores e tiristores. Estes componentes operam como chave, caracterizando assim, um comportamento não linear destes elementos [3]. São exemplos de cargas não lineares: lâmpadas de descarga, aparelhos de TV, microcomputadores, inversores de frequência, fornos a arco elétrico e outros.

Em decorrência da crescente utilização de cargas não lineares, as distorções harmônicas encontram-se presentes

nos sinais de corrente e tensão em diversos pontos dos sistemas elétricos [4]. Assim sendo, é necessário conhecer a natureza deste fenômeno devido aos efeitos indesejáveis que provocam em diversos componentes dos sistemas de potência.

As harmônicas associadas aos sinais distorcidos causam uma série de problemas nos equipamentos e sistemas, como: Equipamentos eletromagnéticos, tais como transformadores e motores, que sofrem sobreaquecimento porque a alta frequência induz perdas; Sistemas eletrônicos podem funcionar erroneamente; capacitores de fator de potência ficam sobreaquecidos e podem falhar, seus fusíveis de proteção podem atuar.

Todos os efeitos citados acima são danosos e prejudiciais no ambiente industrial, gerando perdas de produção e até um alto custo de manutenção e operação, visto que pode gerar defeito nos equipamentos e pagamento de multas para concessionária.

Para o estudo de qualidade da energia, foram considerados aspectos de fator de potência e distorções harmônicas presentes, observando as regulamentações nacionais [5] e [6], além de referências internacionais [7].

III. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste estudo de caso utilizou-se um ambiente composto por refletores contendo lâmpadas à vapor de mercúrio com 400W de potência, e refletores com lâmpadas de LED com 200W de potência. O ambiente de ensaio possui uma área total de 114,24m² e um pé direito de 4,76m.

Atualmente há vários equipamentos de medição sofisticados, que são capazes não só de medir as grandezas de um sistema de energia, mas também gerar gráficos, histogramas através de softwares desenvolvidos pelos fabricantes. Essa série de informações auxilia bastante para análise de consumo de energia e qualidade da energia. Neste estudo o intuito principal é avaliar parâmetros e grandezas de qualidade da energia devido ao funcionamento de refletores com lâmpadas a vapor de mercúrio e compará-los com aqueles refletores compostos por lâmpadas de LED.

Para medição das grandezas relacionadas à qualidade da energia elétrica foi utilizado o equipamento Fluke 435 série II, como pode ser visto na Fig. 1.



Fig. 2. Analisador de qualidade de energia Fluke 435 série II.

B. Dispositivos de iluminação

A Tabela I apresenta os dados técnicos dos refletores com lâmpadas à vapor de mercúrio e refletores com lâmpadas de LED que representam a carga analisada nesse estudo no qual o circuito é monofásico.

TABELA I – DADOS DOS FABRICANTES DAS LÂMPADAS

Especificação	Refletor com lâmpada a vapor de mercúrio	Refletor com lâmpadas de LED
Modelo	HPL-N	*
Fabricante	A	B
Potência	400W	200W
Tensão	130-240V	85-265V
Frequência	60Hz	50/60Hz
Temp. De cor	3900k	6500k
Vida útil	5000h	25.000h

*Não informado pelos fabricantes

Os refletores com lâmpadas à vapor de mercúrio e os refletores com lâmpadas de LED da Tabela I, foram submetidos a ensaio. Com intuito de ilustrar os dispositivos ensaiados, são expostos na Fig. 2 e Fig. 3 tais dispositivos de iluminação já com seus acessórios.



Fig. 2. Refletor com lâmpada a vapor de mercúrio de alta pressão.



Fig. 3. Refletor com lâmpadas de LED.

C. Equacionamento

No estudo de caso que se apresenta para determinação de indicadores da qualidade da energia elétrica serão observadas as tensões e correntes periódicas no circuito de alimentação de cargas não lineares (dispositivos de iluminação) funcionando na condição de regime permanente.

Na tarefa de medição foi utilizado equipamento de última geração, capaz de realizar aquisição de dados e disponibilizar com ótima precisão a potência ativa entregue ao circuito e os valores eficazes da tensão e corrente bem como valores associados a frequência do sistema (frequência da componente fundamental cujo valor nominal é de 60Hz), seus múltiplos inteiros (harmônicas) e os valores das componentes contínuas da tensão e da corrente.

Como as cargas são não lineares, na determinação de grandezas associadas a qualidade da energia, serão utilizadas expressões matemáticas para a condição não senoidal. Assim sendo, será observado a condição do sistema com alimentação por circuito monofásico.

Considerando que as formas de onda da tensão e da corrente possam ser decompostas de modo que os valores eficazes

das harmônicas constituintes possam ser determinados, as expressões (1) e (2) podem ser aplicadas.

$$V = [V_0^2 + V_1^2 + \sum_{h=2} V_h^2]^{1/2} \quad (1)$$

$$I = [I_0^2 + I_1^2 + \sum_{h=2} I_h^2]^{1/2} \quad (2)$$

Onde:

V_0, I_0 - Componente contínua da tensão e corrente respectivamente;

V_1, I_1 - Valor eficaz das componentes fundamentais da tensão e corrente respectivamente;

V_h, I_h - Valor eficaz das h-ésimas, harmônicas da tensão e da corrente respectivamente;

h - Ordem harmônica.

De posse dos valores mencionados determina-se valores de outras grandezas e parâmetros utilizando as expressões que seguem [7]:

Tensão (V_H) e corrente (I_H) não fundamentais:

$$V_H = [V^2 - V_1^2]^{1/2} \quad (3)$$

$$I_H = [I^2 - I_1^2]^{1/2} \quad (4)$$

Distorção harmônica total de tensão (THD_v) e da corrente (THD_i):

$$THD_v = V_H/V_1 \quad (5)$$

$$THD_i = I_H/I_1 \quad (6)$$

Potência ativa não fundamental (P_H):

$$P_H = P - P_1 \quad (7)$$

Potência aparente (S), potência aparente fundamental (S_1) e não fundamental (S_N):

$$S = VI \quad (8)$$

$$S_1 = V_1 I_1 \quad (9)$$

$$S_N = [S^2 - S_1^2]^{1/2} \quad (10)$$

Potência e distorção da corrente (D_i) e da tensão (D_v):

$$D_i = V_1 I_H \quad (11)$$

$$D_v = V_1 V_H \quad (12)$$

Potência aparente Harmônica (S_H):

$$S_H = V_H I_H \quad (13)$$

Potência de distorção Harmônica (D_H):

$$D_H = [S_H^2 - P_H^2]^{1/2} \quad (14)$$

Potência não ativa (N):

$$N = [S^2 - P^2]^{1/2} \quad (15)$$

Fator de potência (FP):

$$FP = P/S \quad (16)$$

Poluição Harmônica (PH):

$$PH = S_n/S_1 \quad (17)$$

IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A. Monitoramento da tensão e corrente

Neste estudo de caso, a alimentação é monofásica, tensão nominal de 220V entre fase e neutro, e na condição de regime permanente.

A variação do valor eficaz da tensão no circuito alimentador terminal, no intervalo de tempo entre 11h44min até 12h12min no dia 26/03/2021, mostrou o comportamento conforme o gráfico apresentado na Fig. 4. Nesta ocasião a carga era composta por quatro refletores com lâmpadas à vapor de mercúrio de alta pressão.

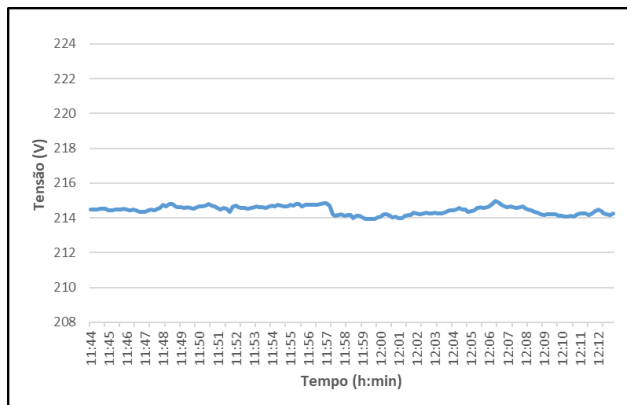


Fig. 4. Variações de tensão com carga composta por refletores contendo lâmpadas à Vapor de Mercúrio.

Nota-se que no intervalo de tempo da Fig. 4 a tensão apresentou valor eficaz de aproximadamente 214V. Em determinado instante com o analisador de qualidade de energia no modo osciloscópio obteve-se as formas de onda da tensão e corrente conforme Fig. 5.

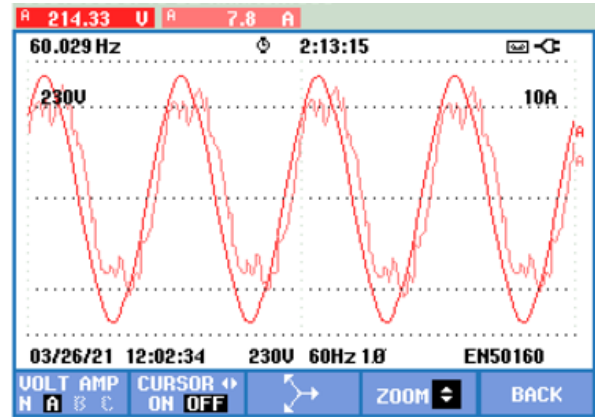


Fig. 5. Formas de onda da tensão e corrente com carga composta por lâmpadas à vapor de mercúrio.

Na forma de onda da corrente apresentada na Fig. 5, nota-se a presença de harmônicas pelas deformações apresentadas em relação a senoide. Neste intervalo, obteve-se também o comportamento das $THDi$ e $THDv$, conforme Fig. 6.

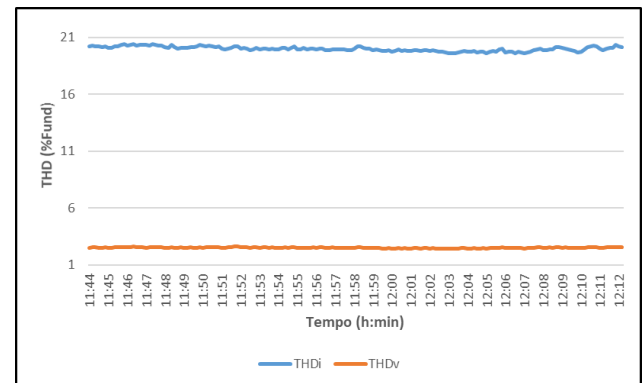


Fig. 6. $THDv$ e $THDi$ com carga composta por refletores contendo lâmpadas à Vapor de Mercúrio.

A variação da $THDv$ em relação a fundamental ficou em torno de 2% durante o tempo observado, enquanto a $THDi$ em um patamar próximo de 21% em relação da fundamental, conforme Fig. 6. Vale comentar que é possível obter as distorções harmônicas individuais de corrente até a 50ª ordem.

Para exemplificar, segue gráfico com as distorções harmônicas individuais de corrente até a 19ª ordem, em um determinado instante, conforme Fig. 7. Neste caso, a harmônica individual de corrente de ordem 3 é a de maior valor entre os conteúdos diferentes da fundamental.

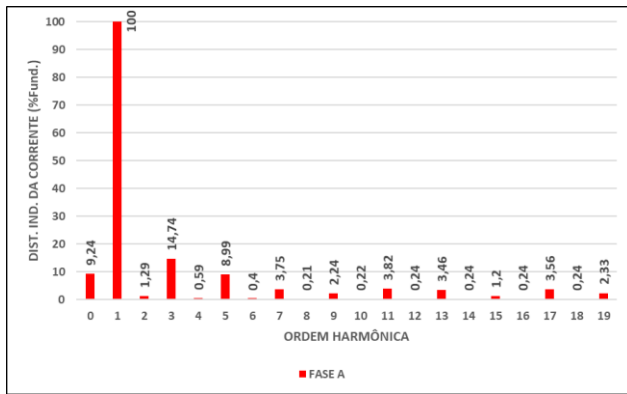


Fig. 7. Distorções individuais de corrente com carga composta por refletores contendo lâmpadas à Vapor de Mercúrio.

Em relação a tensão, a harmônica individual de tensão de ordem 5 é o que apresentou maior valor entre os conteúdos harmônicos de ordem maior que a fundamental, conforme o gráfico da Fig. 8.

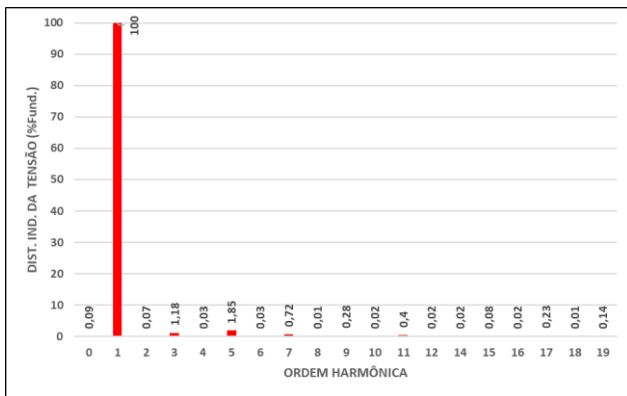


Fig. 8. Distorções individuais de tensão com carga composta por refletores contendo lâmpadas à Vapor de Mercúrio.

Com o intuito de observar as variações do valor eficaz da tensão no circuito alimentador terminal quando a carga é composta por refletores com lâmpadas de LED obteve-se o comportamento no intervalo entre 11h58min até 12h26min, no dia 29/03/2021, conforme o gráfico apresentado na Fig. 9.

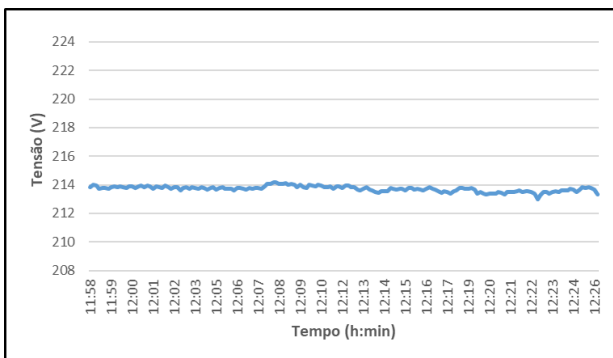


Fig. 9. Variações de tensão com carga composta por refletores de LED

Com a carga composta por quatro refletores de LED, e o analisador de qualidade de energia configurado no modo osciloscópio obteve-se a forma de onda da tensão e corrente

no instante 11h58min, no dia 29/03/2021, conforme exposto na Fig. 10.

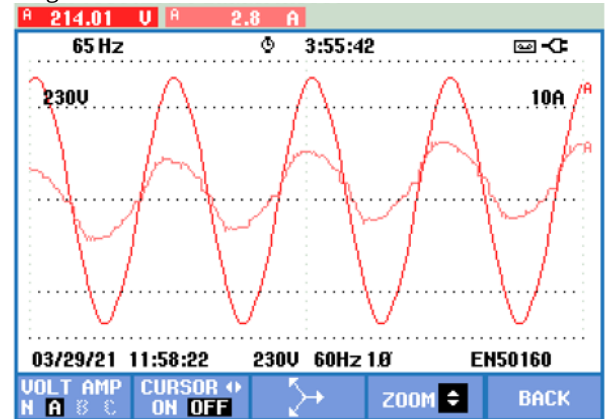


Fig. 10. Forma de onda da tensão e corrente com carga composta por refletores com lâmpadas de LED

Na forma de onda da corrente apresentada na Fig. 10, nota-se a presença de harmônicas pelas deformações em relação à senoide. Observou-se em um determinado intervalo de tempo o comportamento das THD_i e THD_v , conforme Fig. 11.

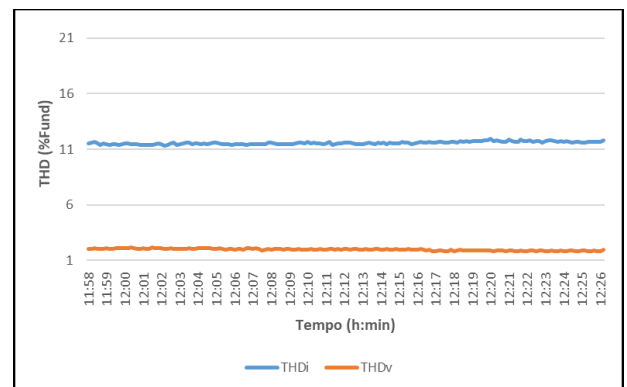


Fig. 11. THDv e THDi com refletores contendo lâmpadas de LED

Na Fig. 11 nota-se a THD_v em um nível de 2% em relação a fundamental, enquanto o THD_i em um patamar próximo de 12% em relação da fundamental. Com a carga composta por refletores com lâmpadas de LED, para um determinado instante, é apresentado na Fig. 12 as distorções harmônicas individuais de corrente até 19º ordem. Neste caso, excetuando a componente fundamental, os maiores valores são os da componente contínua e da harmônica de ordem 3.

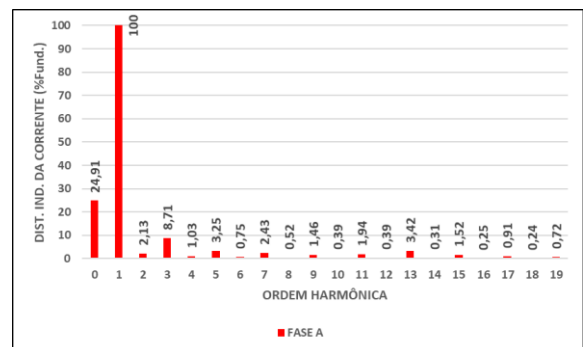


Fig. 12. Distorções individuais de corrente com carga composta por refletores de LED

Em relação a tensão, excluindo a fundamental, a harmônica individual de tensão de ordem 5 é a de maior valor conforme gráfico da Fig. 13. Neste estudo percebe-se que o comportamento das harmônicas individuais de tensão para ambas as tecnologias foi semelhante, mesmo com medições realizadas em instantes distintos.

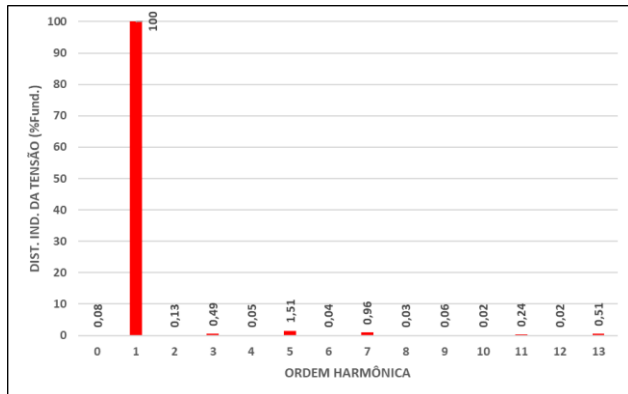


Fig. 13. Distorções individuais de tensão com carga composta por refletores de LED

B. Resultados de Potências

Para o instante 12h01min28s, no dia 26/03/2021, com o sistema de iluminação funcionando com refletores contendo lâmpadas à vapor de mercúrio e utilizando o equacionamento apresentado obteve-se os resultados da Tabela II.

Na Tabela II, consta também os resultados no instante 12h07min59s, do dia 29/03/2021, momento no qual a carga era composta por refletores com lâmpadas de LED. Nota-se na Tabela II uma grande redução nas potências, destacado pela diferença percentual (Dif%), quando a carga é composta por refletores com lâmpadas de LED, e consequentemente resultará em um consumo menor de energia elétrica.

TABELA II – POTÊNCIAS DE REFLETORES COM LÂMPADAS: A VAPOR DE MERCÚRIO E COM LÂMPADAS DE LED

Potência	Indicador	Vapor Mercúrio (I)	LED (II)	Dif % II e I
Aparente (VA)	S	1670,06	599,40	-64,1%
	S ₁	1632,25	581,82	-64,4%
	S _n	353,35	144,08	-59,2%
	S _H	8,64	2,93	-66,1%
Ativa (W)	P	1508,59	577,35	-61,7%
	P ₁	1506,03	576,95	-61,7%
	P _H	2,56	0,40	-84,2%
	N	716,41	161,05	-77,5%
Não Ativa (var)	Q ₁	629,37	75,14	-88,1%
	D _i	350,96	143,56	-59,1%
	D _v	40,19	11,87	-70,5%

A tabela III apresenta os valores obtidos para fator de potência determinado para cada tipo de tecnologia ensaiada.

TABELA III – FATOR DE POTÊNCIA

Descrição	Refletor com lâmpada a vapor de mercúrio	Refletor com lâmpada de LED
Fator de potência obtido	0,90	0,96
Valor Referência ANEEL	>0,92	>0,92
Diferença % em relação especificação ANEEL	-2,17%	4,3%

Conforme os valores apresentados na Tabela III, verifica-se que para os refletores com lâmpadas à vapor de mercúrio ficou com fator de potência abaixo do limite recomendado pela ANEEL [5], já os refletores com lâmpadas de LED ficaram 4,3% acima do limite recomendado.

V. CONCLUSÃO

O intuito principal deste estudo de caso é observar o comportamento de sistemas de iluminação com refletores com lâmpadas de LED em comparação com sistemas compostos por refletores com lâmpadas à vapor de mercúrio de alta pressão, considerando aspectos de qualidade da energia elétrica.

A distorção harmônica total da tensão no circuito alimentador terminal para as duas tecnologias permaneceu dentro dos limites recomendáveis do Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST - Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica Revisão 12 - 2021, da ANEEL, mesmo a medição sendo realizada após transformadores da indústria. As distorções harmônicas individuais de tensão apresentaram valores satisfatórias em ambas as condições.

Sobre a distorção harmônica total de corrente, conclui-se que os refletores com lâmpadas de LED apresentaram um desempenho melhor quando comparado aos refletores contendo lâmpadas à vapor de mercúrio, considerando a mesma finalidade.

Com relação ao fator de potência das cargas, é mais vantajoso os dispositivos de LED quando comparados com os refletores com lâmpadas a vapor de mercúrio, inclusive estes últimos apresentaram valores abaixo das especificações estabelecidas pela ANEEL.

Quanto a eficiência energética, percebe-se que os refletores com lâmpadas de LED apresentam potências ativa inferiores as encontradas para os refletores com lâmpadas a vapor de mercúrio, influenciando o consumo da energia elétrica. Isto representa um avanço tecnológico que contribui para a redução no consumo de energia elétrica.

VI. REFERÊNCIAS

- [1] EPE Empresa de Pesquisa Energética, <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica> Acesso em 21 out 2020.
- [2] Mamede Filho, João, Instalações elétricas industriais/João Mamede Filho, -8. ed – [Reimpr].Rio de Janeiro: LTC, 2011.
- [3] Cotrim, Instalações elétricas - 5ª edição (28 novembro 2008).
- [4] Albadó, R., "Qualidade na Energia elétrica" São Paulo: Artliber, 2001.
- [5] ANEEL Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST - Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica Revisão 12 – 2021.
- [6] ABNT - NBR 5410 (2004 - Instalações Elétricas de Baixa Tensão).
- [7] IEEE Std 1459-2010, IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power

