

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

RAFAEL FIDELES COSTA

**Estudo de Qualidade da Energia Elétrica e
Viabilidade Econômica Visando o Uso de Lâmpadas
LED em Iluminação Pública**

São Carlos
2015

RAFAEL FIDELES COSTA

**Estudo de Qualidade da Energia Elétrica e
Viabilidade Econômica Visando o Uso de Lâmpadas
LED em Iluminação Pública**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo.

Curso de Engenharia Elétrica com Ênfase em
Sistemas de Energia e Automação

ORIENTADOR: Prof. Dr. Ricardo A. S. Fernandes

São Carlos
2015

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTA TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

C837e Costa, Rafael Fideles
Estudo de Qualidade da Energia Elétrica e
Viabilidade Econômica Visando o Uso de Lâmpadas LED em
Iluminação Pública / Rafael Fideles Costa; orientador
Ricardo Fernandes. São Carlos, 2015.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com
ênfase em Sistemas de Energia e Automação) -- Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,
2015.

1. Distorção harmônica. 2. Lâmpadas LED. 3.
Eficiência energética. 4. Viabilidade econômica. I.
Titulo.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Rafael Fideles Costa

Título: “Estudo de qualidade da energia elétrica e viabilidade econômica visando o uso de lâmpadas LED em iluminação pública”

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 01/12/2015,

com NOTA 9,0 (Nove, Zero), pela Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Ricardo Augusto Souza Fernandes - (Orientador - UFSCar)

Prof. Dr. Claudionor Francisco do Nascimento - (UFSCar)

Prof. Associado Rogério Andrade Flauzino - (SEL/EESC/USP)

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Prof. Dr. José Carlos de Melo Vieira Júnior

Dedicatória e Agradecimentos

Esse trabalho de conclusão de curso só foi possível devido ao incentivo e auxílio de várias pessoas, porém as principais delas merecem ser lembradas.

Dedico esse trabalho a toda minha família que é responsável por me ensinar todos os valores que carrego e pela dedicação em proporcionar as oportunidades necessárias para que eu pudesse perseguir meus sonhos. Dedico à minha mãe Cleunice que sempre se preocupou com meu bem-estar e foi minha maior incentivadora e meu porto seguro, ao meu pai Osvander, exemplo como engenheiro, a quem sempre pedi auxílio nos momentos de dúvida e hesitação, ao meu irmão Lucas que sempre esteve ao meu lado nesses últimos anos e presenciou todas as agonias e alegrias proporcionadas pela graduação.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Ricardo Fernandes pela confiança depositada e toda orientação e ensinamentos passados durante toda elaboração e confecção desse trabalho, aos meus companheiros de república a quem tenho a mesma consideração que tenho pela minha família, aos muitos amigos que fiz durante esses 5 anos vivendo em São Carlos e, especialmente, aos companheiros (as) do São Carlos Bulldogs Football.

Um agradecimento especial aos colaboradores da Elektro Eletricidade e Serviços S.A., principalmente a equipe da Gerência de Suprimentos e da Gerência de Planejamento Operacional por todo o auxílio e paciência nesses últimos meses.

Também agradeço aos colegas do curso de engenharia elétrica pela ajuda e companheirismo nas inúmeras horas de estudo durante toda graduação.

A todos aqueles que influenciaram a minha vida a ponto de me direcionar para esse momento, meu muito obrigado.

Resumo

COSTA, R. F. (2015). Estudo de Qualidade da Energia Elétrica e Viabilidade Econômica Visando o Uso de Lâmpadas LED em Iluminação Pública. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2015.

Atualmente, há muitas discussões em voga relacionadas ao consumo de energia elétrica no Brasil, assunto este bastante difundido devido à crise energética e econômica. Neste sentido, a utilização de lâmpadas LED pode ser uma alternativa à iluminação pública devido à sua alta eficiência e baixa potência ativa, porém, estudos a respeito do seu efeito na rede elétrica são escassos. Desse modo, este trabalho propõe uma análise das distorções harmônicas provocadas por lâmpadas LED, onde para tal finalidade foram realizadas simulações computacionais empregando-se o software Alternative Transients Program (ATP). Cabe ainda mencionar que as simulações dizem respeito ao campus da UFSCar (na cidade de São Carlos–SP), pois, todos os dados da rede primária foram disponibilizados e, assim, foi possível analisar os efeitos das lâmpadas LED em uma rede de distribuição com dimensões aceitáveis. Por meio dessas simulações, foi possível prever e analisar o comportamento das lâmpadas LED. Além disso, também fora analisado o retorno de investimento, bem como a viabilidade financeira para a substituição das lâmpadas de vapor de sódio por lâmpadas LED. Ressalta-se que os custos dos equipamentos e a mão de obra como base do cálculo do retorno do investimento foram levantados segundo pesquisa de mercado.

Palavras Chave: Distorção harmônica, lâmpadas LED, eficiência energética, viabilidade econômica.

Abstract

COSTA, R. F. (2015). Power Quality and Economic Feasibility Study for the Use of LED Lamps in Public Lighting. Major Thesis – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, 2015.

Currently, there are many discussions related to electricity consumption in Brazil, which is based on the energy and economic crisis. In this sense, the use of LED lamps can be an alternative to public lighting due to its high efficiency. However, studies on its effect on the power distribution system are scarce. Thus, this work proposes an analysis based on harmonic distortion caused by LED lamps, which employs the software Alternative Transients Program (ATP) to generate a realistic scenario. It is also worth mentioning that the simulations are done using data from the campus of Federal University of São Carlos, because the primary network has a good dimension to perform the intended analysis. Through these simulations, we could predict and analyze the behavior of LED lamps. Moreover, it also was analyzed the return on investment as well as the economic feasibility for replacing sodium vapor lamps by LED lamps. It is noteworthy that the cost of equipment and labor as the basis for calculating the return on investment was raised according to market research.

Keywords: Harmonic distortion, LED lamps, energy efficiency, economic feasibility.

Lista de Figuras

FIGURA 2.1 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO TETRAEDRO DE POTÊNCIAS.....	8
FIGURA 3.1 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS LIGAÇÕES DA BANCADA EXPERIMENTAL.	12
FIGURA 3.2 – FONTE DE ALIMENTAÇÃO PROGRAMÁVEL E ANALISADOR DE ENERGIA.....	13
FIGURA 3.3 – INTERFACE GRÁFICA DO SOFTWARE DE PARAMETRIZAÇÃO DA FONTE DE ALIMENTAÇÃO....	13
FIGURA 3.4 – INTERFACE GRÁFICA DE AQUISIÇÃO DOS DADOS DE DISTORÇÃO HARMÔNICA.	14
FIGURA 3.5 – DADOS EXPORTADOS PELO SOFTWARE EM FORMATO TEXTO.....	14
FIGURA 3.6 – LÂMPADA LED DE 3 MÓDULOS UTILIZADA DURANTE OS ENSAIOS LABORATORIAIS.....	15
FIGURA 3.7 – LÂMPADA LED DE 2 MÓDULOS UTILIZADA DURANTE OS ENSAIOS LABORATORIAIS.....	15
FIGURA 3.8 – COMPARAÇÃO DOS ESPECTROS HARMÔNICOS DAS LÂMPADAS ENSAIADAS.	16
FIGURA 4.1 – PLANTA DA REDE PRIMÁRIA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DA UFSCAR.....	18
FIGURA 4.2 – LEGANDA DOS ELEMENTOS PRINCIPAIS DA PLANTA DA REDE PRIMÁRIA.	19
FIGURA 4.3 – ARRANJO DE CONEXÃO DA LÂMPADA SIMULADA.....	20
FIGURA 4.4 – DIAGRAMA UNIFILAR DA REDE PRIMÁRIA APÓS INSERÇÃO DAS LÂMPADAS LED.....	22
FIGURA 4.5 – FORMAS DE ONDA DE TENSÃO MEDIDAS EM DOIS TRANSFORMADORES.....	23
FIGURA 4.6 – ESPECTRO HARMÔNICO (EM TENSÃO) RESULTANTE NOS DOIS TRANSFORMADORES.....	23
FIGURA 5.1 – VALOR FINAL DO VPL NO DECORRER DE 17 ANOS.	31

Lista de Tabelas

TABELA 2.1 – VALORES DE REFERÊNCIA PARA O DHT ESTABELECIDOS PELA ANEEL.	9
TABELA 2.2 – VALORES DE REFERÊNCIA PARA O DHI ESTABELECIDOS PELA ANEEL.	10
TABELA 3.1 – VALORES DAS COMPONENTES HARMÔNICAS DAS CARGAS OBTIDAS DURANTE OS ENSAIOS LABORATORIAIS.	16
TABELA 4.1 – QUANTIDADES DE LÂMPADAS E RESISTÊNCIAS PARALELAS.	21
TABELA 4.2 – VALORES DE DHT (DE TENSÃO) PARA CADA UM DOS TRANSFORMADORES.	24
TABELA 4.3 – VALORES DE DHI (DE TENSÃO) PARA CADA UM DOS TRANSFORMADORES.	24
TABELA 5.1 – CONSIDERAÇÕES SOBRE A TROCA DAS LÂMPADAS.	29
TABELA 5.2 – RESULTADOS DA ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA.	30

Sumário

RESUMO.....	I
ABSTRACT.....	III
LISTA DE FIGURAS.....	V
LISTA DE TABELAS.....	VII
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO AO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO.....	1
1.1 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA	1
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.3 ORGANIZAÇÃO.....	2
CAPÍTULO 2 FUNDAMENTOS DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS.....	5
2.1 CARGAS NÃO LINEARES	5
2.2 PARÂMETROS ELÉTRICOS SOB EFEITO DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS	6
2.3 RELAÇÃO DOS HARMÔNICOS COM AS COMPONENTES DE SEQUÊNCIA	8
2.4 INDICADORES PARA DISTORÇÕES HARMÔNICAS	9
2.5 EFEITOS DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS	10
CAPÍTULO 3 ENSAIOS LABORATORIAIS.....	12
3.1 BANCADA EXPERIMENTAL	12
3.2 FONTE DE ALIMENTAÇÃO E ANALISADOR DE ENERGIA	13
3.3 LÂMPADAS LED DE 2 E 3 MÓDULOS.....	15
CAPÍTULO 4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E ANÁLISES DE QEE.....	17
4.1 ATPDRAW	17
4.2 MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA REDE PRIMÁRIA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DA UFSCAR	18
4.3 SIMULAÇÃO DA REDE DA UFSCAR COM INSERÇÃO DE LÂMPADAS LED.....	20
4.4 ANÁLISE DA INSERÇÃO DAS LÂMPADAS LED	23
CAPÍTULO 5 ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA	26
5.1 ASPECTOS FUNDAMENTAIS	26
5.2 CÁLCULO DO FLUXO DE CAIXA.....	28
5.3 RESULTADOS DA VIABILIDADE ECONÔMICA	30
CAPÍTULO 6 CONCLUSÕES.....	32
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	34

Capítulo 1

Introdução ao Trabalho de Conclusão de Curso

1.1 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA

Atualmente, a discussão a respeito de consumo de energia elétrica tem atraído a atenção de todo o país, sendo o principal agente motivador de tais discussões o aumento do preço das tarifas e a crise econômica. No entanto, esse cenário fortalece e incentiva o desenvolvimento e a aplicação de tecnologias que sejam energeticamente mais eficientes. Entretanto, essa área de estudo não abrange apenas a idealização de novas tecnologia, mas também o desenvolvimento de técnicas e soluções que proporcionem economia, como por exemplo, os estudos de luminotécnica que visam a utilização de uma menor quantidade de lâmpadas ou de lâmpadas de potência ativa menor que proporcione o mesmo fluxo luminoso.

Deste modo, é cabível destacar que os avanços em termos da eletrônica de potência, proporcionaram o acionamento de cargas por meio de tensões e correntes em frequências distintas da fundamental, reduzindo assim a quantidade de potência ativa absorvida pelo equipamento. Assim, este tipo de carga, por operar em não apenas em função da frequência fundamental da rede, são chamadas de cargas não lineares, pois, estas utilizam muitos elementos ativos para chaveamento. Em contrapartida, este tipo de carga, pode provocar distorções harmônicas (principalmente na corrente) que, por sua vez, incrementam as amplitudes de tensões e correntes em frequências múltiplas inteiras da fundamental. Assim, caso haja uma alta densidade de correntes harmônicas fluindo pela rede primária de distribuição de energia elétrica, estas poderão provocar o mau funcionamento de equipamentos eletrônicos, sobreaquecimento de cabos (devido ao efeito pelicular), ressonância com bancos de capacitores, entre outros (Dugan et. al., 2004).

Seguindo o contexto supracitado, as lâmpadas LED podem representar um novo paradigma em relação às tecnologias vigentes em iluminação pública, pois, sua eficiência energética é notável quando comparada às lâmpadas de vapor de sódio. No entanto, por serem compostas por elementos semicondutores (diodos emissores de luz), sua alimentação deve ser feita por tensão em corrente contínua, tornando-se necessário empregar fontes retificadoras para a conversão CA-CC.

Dessa forma, as lâmpadas LED se encaixam perfeitamente em todos os aspectos motivadores desse trabalho de conclusão de curso, pois, representam uma tecnologia que

poderá ser a embaixadora da economia de energia, provoca distorções harmônicas e representa um investimento em potencial, o que incentiva projetos de eficiência energética. Além disso, pouco se conhece a respeito dos efeitos provocados pela utilização em larga escala desse tipo de carga.

1.2 OBJETIVOS

Esse trabalho consiste num estudo de Qualidade de Energia Elétrica e de Eficiência Energética, onde serão enfatizados os aspectos relativos às distorções harmônicas, à viabilidade econômica e ao retorno financeiro.

Assim, é importante comentar que as análises relativas à Qualidade da Energia Elétrica foram realizadas em conformidade com o PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional) (ANEEL, 2015), onde em seu oitavo módulo são definidos os indicadores de Distorções Harmônicas Totais (DHT) aceitáveis para redes de distribuição de energia elétrica com tensões nominais maiores ou iguais a 13,8 kV. Deste modo, estes indicadores serão tidos como referências para as análises do impacto das lâmpadas LED quando inseridas na rede primária de distribuição de energia elétrica da UFSCar. Ainda é importante mencionar que o PRODIST é a norma vigente no Brasil e que fora criada pela Agencia Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

Por fim, ressalta-se que o estudo de retorno de investimento e viabilidade econômica foi implementado de forma a avaliar o aumento de eficiência energética do novo parque de iluminação da UFSCar. Além disso, tal estudo fora realizado com o intuito de aproximar esse trabalho de um caso real onde o empreendedor invista nessa tecnologia para diminuir o consumo de energia elétrica e garanta o sucesso de seu projeto. Portanto, as técnicas usadas para a avaliação de investimento são as mesmas utilizadas por empresas no mercado financeiro e representam resultados práticos para esse tipo de análise, uma vez que essa análise possui uma série de variáveis que podem sofrer alterações no decorrer dos anos. Ademais, é importante comentar que essa análise financeira pode fornecer diferentes resultados dependendo do cenário econômico.

1.3 ORGANIZAÇÃO

Esse trabalho de conclusão de curso está dividido, segundo o julgamento do autor, da maneira mais didática para entendimento do assunto e desenvolvimento dos conceitos que nortearam os estudos e o andamento desse trabalho.

Inicialmente, no Capítulo 2, foi realizada uma pesquisa bibliográfica para levantamento de conceitos fundamentais em Qualidade da Energia Elétrica que motivassem e munissem o autor de argumentos para a elaboração do trabalho. Essa pesquisa também permitiu a definição do que seria o método utilizado para o estudo de distorções harmônicas utilizando softwares computacionais de simulação, como o ATP.

No Capítulo 3, são apresentados os ensaios laboratoriais feitos com lâmpadas LED de 2 e 3 módulos. Tais ensaios foram realizados em regime permanente e as lâmpadas foram alimentadas com tensão puramente senoidal para que fosse possível conhecer a real resposta das lâmpadas em frequência.

Já o Capítulo 4 apresenta as simulações computacionais feitas por meio do software ATP. Assim, partiu-se de uma rede de distribuição de energia elétrica modelada pelo Grupo de Pesquisa em Smart Grids e Qualidade da Energia Elétrica da UFSCar. Portanto, partindo-se da rede primária, foi possível alocar o modelo de lâmpada LED para análise dos efeitos das distorções harmônicas na rede.

No Capítulo 5 são feitas as análises de viabilidade econômica, onde tem-se o objetivo de averiguar a economia de energia alcançada com a substituição de lâmpadas de vapor de sódio por lâmpadas LED, bem como o retorno do investimento.

Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões obtidas ao final da execução desse trabalho de conclusão de curso.

Capítulo 2

Fundamentos de Distorções Harmônicas

O problema relativo às distorções harmônicas tem se tornado uma das maiores preocupações e objetos de estudo dos engenheiros eletricitas nos últimos anos, fazendo parte da área de estudo e dos fenômenos de Qualidade da Energia Elétrica (QEE). Inicialmente, as distorções harmônicas eram especialmente causadas pela saturação de transformadores, fornos industriais a arco, assim como outros dispositivos que operam utilizando-se arcos elétricos, tais como soldadores elétricos (Ali, 2013).

Atualmente, a discussão tem sido levantada pela utilização de cargas não lineares, pois, esses tipos de equipamentos possuem a capacidade de injetar correntes harmônicas na rede (Dugan et. al., 2004). Uma vez que a utilização de cargas não lineares tem crescido, tanto nas residências quanto nas indústrias, motivada principalmente pela eficiência energética e economia de energia, acredita-se que problemas relacionados à distorção harmônica serão cada vez mais comuns e graves. Por consequência, níveis inaceitáveis de QEE podem gerar mal funcionamento em uma série de equipamentos elétricos, refletindo o distúrbio por todo o alimentador (Fernandes, 2009).

Portanto, este capítulo irá apresentar os principais conceitos que permeiam as distorções harmônicas, pois, esse assunto está intimamente relacionado a um dos objetivos do trabalho de conclusão de curso.

2.1 CARGAS NÃO LINEARES

Conforme previamente comentado, as cargas não lineares causam distorções harmônicas, uma vez que nesses dispositivos a corrente não é proporcional à tensão aplicada (Dugan et al., 2004).

Formas de onda distorcidas podem ser expressas como uma soma de curvas senoidais. Quando uma forma de onda é idêntica em todos os ciclos, ela pode ser representada por uma soma de ondas senoidais puras onde a frequência de cada uma dessas parcelas é um múltiplo inteiro da frequência fundamental do sistema. Esse número inteiro é conhecido como harmônico. Assim, pela soma dos senos, tem-se a série de Fourier, a qual pode ser expressa por:

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [A_n \cdot \cos(w_n t - \theta_n)] + B_n \cdot \text{sen}(w_n t - \theta_n)]. \quad (2.1)$$

onde A_0 representa o valor médio da função periódica $f(t)$ e tanto B_n e A_n são os coeficientes da série extendendo-se até a n-ésima ordem harmônica.

Portanto, um sistema qualquer que apresente distorções harmônicas pode ter seus harmônicos analisados de forma isolada.

No entanto, para que uma carga não linear seja simulada, faz-se necessário modelá-la com seus componentes elétricos ou então, para estudos em torno de distorções harmônicas, pode-se considerar a carga como um conjunto de fontes de corrente (todas conectadas em paralelo entre si) em paralelo com uma impedância característica da carga (Dugan et al., 2004).

2.2 PARÂMETROS ELÉTRICOS SOB EFEITO DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS

O cálculo das variáveis elétricas não é o mesmo para o caso onde correntes e tensões harmônicas estão presentes em sistemas elétricos de potência. Usualmente, o cálculo de tensões, correntes e potências são realizados considerando-se apenas a frequência fundamental (Dugan et. al., 2004). Entretanto, com as componentes harmônicas, deve-se considerar as principais frequências que compõem a forma de onda do sistema.

Segundo Dugan et. al. (2004), existem três formas de se quantificar potência, a saber:

- Potência Aparente [Volt-Ampère (VA)] – representa o produto dos valores de corrente e tensão em RMS;
- Potência ativa [Watt (W)] – representa a média de energia entregue a uma carga e é a potência que produz trabalho;
- Potência reativa [Volt-Ampère-reativo (VAr)] – representa a porção de potência que flui na rede e está fora de fase ou quadrante em relação à potência ativa.

O valor da Potência Aparente, segundo a definição supracitada, aplica-se para os casos de formas de onda puramente senoidais. Assim, tais parâmetros podem ser obtidos, respectivamente por meio das Equações 2.2, 2.3 e 2.4:

$$S = V_{rms} \times I_{rms}, \quad (2.2)$$

$$P = \frac{V_1 I_1}{2} \cos \theta_1 = V_{1rms} I_{1rms} \cos \theta_1 = S \cos \theta_1, \quad (2.3)$$

$$Q = S \sin \theta_1 = \frac{V_1 I_1}{2} \sin \theta_1 = V_{1rms} I_{1rms}, \quad (2.4)$$

onde, V_1 e I_1 representam as tensões e correntes fundamentais. Assim, θ_1 representa o ângulo de fase entre tensão e corrente em frequência fundamental.

No caso de forma de onda distorcida, a mesma é formada por uma soma de senos em frequências harmônicas de diferentes amplitudes, dessa forma das tensões e correntes eficazes são dados por meio de (Dugan et. al., 2004):

$$V_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{max}} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} V_h\right)^2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{V_1^2 + V_2^2 + \dots + V_{h_{max}}^2}, \quad (2.5)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{max}} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} I_h\right)^2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_{h_{max}}^2}, \quad (2.6)$$

onde h representa a ordem harmônica.

Além disso, segundo Dugan et. al. (2004), pode-se definir uma nova potência, denominada potência harmônica ou potência de distorção:

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2}. \quad (2.7)$$

Portanto, a relação entre as potências passa a ser definida conforme a Figura 2.1, a qual é denominada por tetraedro de potências, ao invés do comumente conhecido triângulo de potências.

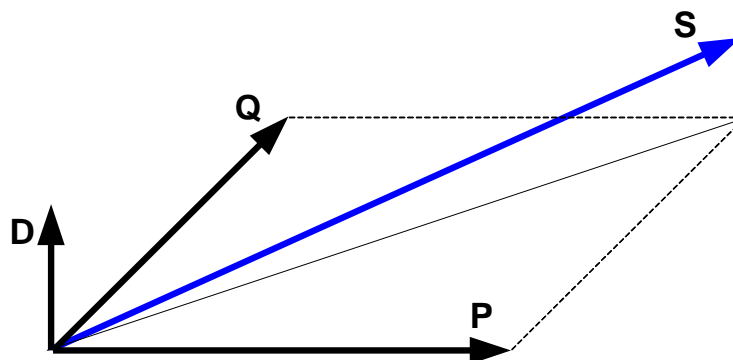


Figura 2.1 – Representação gráfica do tetraedro de potências.

Fonte: Fernandes (2009).

Com isso, apesar de o cálculo do fator de potência se manter, seus resultados são bastante distintos ao se considerar a influência da potência de distorção.

2.3 RELAÇÃO DOS HARMÔNICOS COM AS COMPONENTES DE SEQUÊNCIA

Segundo Dugan et. al. (2004), qualquer sistema trifásico desbalanceado pode ser composto por três sistemas balanceados, denominados por sequência positiva, negativa e zero.

Assim, o sistema de sequência positiva é formado por três senóides com diferença de ângulo de fase de 120° , onde a sequência de fases é A-B-C e os respectivos ângulos são 0° , -120° e 120° . Já para sistemas de sequência negativa, o conjunto de fases segue a sequência A-C-B e os ângulos de fase são 0° , 120° e -120° , respectivamente. As correntes e tensões de sequência zero, por definição, são aquelas onde as três fases estão em fase, isto é, o ângulo de fase entre cada uma das fases é de 0° .

No domínio do tempo para tensão, as componentes de sequências são definidas por:

$$V_{a+} = V_+ \text{sen}(w_n t + \theta_{n+}) \quad (2.8)$$

$$V_{b+} = V_+ \text{sen}(w_n t + \theta_{n+} - 120^\circ) \quad (2.9)$$

$$V_{c+} = V_+ \text{sen}(w_n t + \theta_{n+} + 120^\circ) \quad (2.10)$$

$$V_{a-} = V_- \text{sen}(w_n t + \theta_{n-}) \quad (2.11)$$

$$V_{b-} = V_- \text{sen}(w_n t + \theta_{n-} - 120^\circ) \quad (2.12)$$

$$V_{c-} = V_- \text{sen}(w_n t + \theta_{n-} + 120^\circ) \quad (2.13)$$

onde V_+ e V_- representam as amplitudes de sequência positiva e negativa, respectivamente.

Em sistemas balanceados, o ângulo de fase dos harmônicos pode ser determinado multiplicando-se o valor de ordem do harmônico h pelos valores de fase de um sistema de sequência positiva. Por exemplo, para o segundo harmônico ($h = 2$) tem-se $2 \times (0^\circ, -120^\circ, 120^\circ)$ que irá resultar em $(0^\circ, 120^\circ, -120^\circ)$, correspondendo aos valores de fase de um sistema de sequência negativa.

Existem características que merecem atenção a respeito dos harmônicos múltiplos de três, pois, correntes que contenham estes harmônicos fluem pelo neutro do sistema uma vez que essas correntes e tensões estão em fase entre si, isto é: o ângulo entre as fases é de 0°.

2.4 INDICADORES PARA DISTORÇÕES HARMÔNICAS

Existem dois principais índices que são utilizados para mensurar os harmônicos de uma forma de onda, usados inclusive por órgãos reguladores e recomendações como critérios para se determinar se os índices de Qualidade da Energia Elétrica de determinado ponto da rede e verificar se tais níveis são aceitáveis. Dentre estes indicadores, os principais são o DHT (Distorção Harmônica Total) e a DTD (Distorção Total da Demanda).

O DHT é definido como:

$$DHT_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} V_h^2}}{V_1} \times 100. \quad (2.14)$$

Da mesma forma, o DTD pode ser definido como:

$$DTD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} I_h^2}}{I_1} \times 100\% \quad (2.15)$$

A ANEEL, por meio do oitavo módulo do PRODIST, determina os valores aceitáveis de DHT para a tensão, conforme apresentado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Valores de referência para o DHT estabelecidos pela ANEEL.

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

Fonte: PRODIST, 2014.

Além dos indicadores supracitados, a ANEEL também considera a Distorção Harmônica Individual de tensão que pode ser calculada por meio de:

$$DHI_h = \frac{V_h}{V_1} \times 100. \quad (2.16)$$

Os valores de referência do podem ser observados por meio da Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Valores de referência para o DHI estabelecidos pela ANEEL.

Ordem Harmônica	Distorção Harmônica Individual de Tensão [%]				
	$V_n \leq 1 \text{ kV}$	$1 \text{ kV} < V_n \leq 13,8 \text{ kV}$	$13,8 \text{ kV} < V_n \leq 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} < V_n < 230 \text{ kV}$	
Ímpares não múltiplas de 3	5	7,5	6	4,5	2,5
	7	6,5	5	4	2
	11	4,5	3,5	3	1,5
	13	4	3	2,5	1,5
	17	2,5	2	1,5	1
	19	2	1,5	1,5	1
	23	2	1,5	1,5	1
	25	2	1,5	1,5	1
Ímpares múltiplas de 3	>25	1,5	1	1	0,5
	3	6,5	5	4	2
	9	2	1,5	1,5	1
	15	1	0,5	0,5	0,5
	21	1	0,5	0,5	0,5
Pares	>21	1	0,5	0,5	0,5
	2	2,5	2	1,5	1
	4	1,5	1	1	0,5
	6	1	0,5	0,5	0,5
	8	1	0,5	0,5	0,5
	10	1	0,5	0,5	0,5
	12	1	0,5	0,5	0,5
>12	1	0,5	0,5	0,5	

Fonte: PRODIST, 2014.

A ANEEL também define que o espectro harmônico a ser considerado para o devido cálculo do DHT deve compreender uma faixa de frequências entre a fundamental e o 25º harmônico.

Os indicadores supramencionados são as referências para se determinar o estado de distorção harmônica de um determinado ponto na rede elétrica, também denominado por ponto de acoplamento comum. Portanto, tais indicadores são de grande importância para esse trabalho de conclusão de curso, pois, dessa forma, será possível determinar os valores do DHT e o DHI considerando a rede modelada com a inserção das lâmpadas LED de iluminação pública. É importante destacar que no caso a ser analisado, o ponto de acoplamento comum será o ponto de entrega de energia elétrica à área norte da UFSCar, ou seja, na cabine de primário.

2.5 EFEITOS DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS

Segundo Dugan et. al. (2004), distorções harmônicas na corrente e/ou na tensão contribuirão significativamente no aquecimento de transformadores. Dessa forma, os projetistas de transformadores têm uma preocupação adicional que é de acomodar as perdas por efeito Joule devidas ao aparecimento de componentes harmônicas.

Motores elétricos também sofrem impactos significativos devido às distorções harmônicas, principalmente, quando a distorção é bastante evidente na tensão, pois, estas tensões harmônicas são basicamente transformadas em fluxos magnéticos harmônicos. No entanto, dependendo da sequência do harmônico, alguns dos fluxos poderão não contribuir para o torque do motor. Os efeitos em motores vão desde perdas a até sons, ruídos agudos, vibrações e sobreaquecimentos (Dugan et. al., 2004).

Correntes harmônicas fluindo no sistema de distribuição podem criar interferências e ruídos nas redes de comunicação quando os dois sistemas compartilham do mesmo caminho (Dugan et. al., 2004).

Os medidores eletromecânicos utilizados na entrada dos consumidores, podem sofrer influência de correntes harmônicas, prejudicando sua precisão e credibilidade. Devido aos discos serem magnéticos, com o aumento da frequência também haverá um aumento na imprecisão da medida (Dugan et. al., 2004).

Por fim, outro grave e comum problema se dá pelo efeito de ressonância de frequências harmônicas em bancos de capacitores, podendo incrementar as amplitudes dos harmônicos e causar sobrecorrentes no elemento capacitivo.

Capítulo 3

Ensaio Laboratoriais

Durante essa etapa do trabalho, foram realizados ensaios laboratoriais em lâmpadas LED de 2 e 3 módulos com o objetivo de verificar seus desempenhos em termos de Qualidade da Energia Elétrica. Portanto, durante estes ensaios, foram obtidos diversos parâmetros de tais lâmpadas, como: corrente e potência instantânea, fator de potência, componentes harmônicos, dentre outros.

Assim, pretende-se, por meio desse capítulo, relatar os dispositivos utilizados durante os ensaios laboratoriais, bem como apresentar os dados obtidos.

3.1 BANCADA EXPERIMENTAL

De maneira simplificada, a bancada experimental é composta por uma fonte de alimentação programável que possui no mesmo chassi um analisador de energia, pelas cargas (lâmpadas), um microcomputador responsável pela parametrização da fonte e aquisição dos dados. Deste modo, a bancada experimental pode ser ilustrada conforme a Figura 3.1.

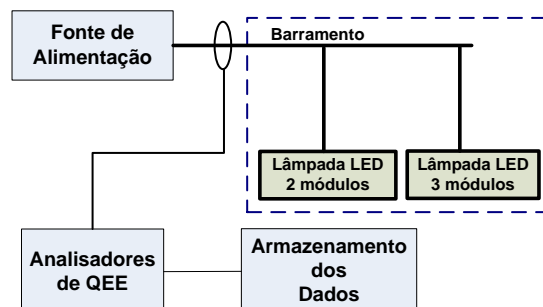


Figura 3.1 – Representação gráfica das ligações da bancada experimental.

Fonte: Adaptado de Fernandes (2009).

Assim, por meio dessa configuração, foi possível extrair os parâmetros necessários às análises propostas, tornando possível ainda uma simulação fiel da inserção das lâmpadas na rede primária de distribuição.

Inicialmente, cada uma das lâmpadas foi alimentada por uma fonte puramente senoidal (sem harmônicos) para que fossem levantados os dados das correntes e o espectro harmônico de cada uma delas. Isso só foi possível devido à utilização do analisador de energia.

3.2 FONTE DE ALIMENTAÇÃO E ANALISADOR DE ENERGIA

Cabe mencionar que a fonte de alimentação utilizada para testar as lâmpadas é monofásica, modelo 5001iX da fabricante California Instruments, e possui uma potência aparente nominal de 5 kVA. Além disso, conforme previamente comentado, essa fonte possui ainda a função de analisador de energia (Figura 3.2).



Figura 3.2 – Fonte de alimentação programável e analisador de energia.

Fonte: Fernandes (2009).

Para os ensaios, a fonte foi ajustada para fornecer tensão eficaz de 220 V com ângulo de fase em 0° e frequência nominal de 60 Hz, conforme esperado de um sistema ideal, ou seja, sem distorções harmônicas. Ademais, as configurações da fonte podem ser realizadas manualmente pelo painel frontal ou por meio de um software fornecido pela fabricante, conforme mostrado na Figura 3.3. A interface entre o software (microcomputador) e a fonte é realizada via canal de comunicação serial RS-232. Com o intuito de ilustrar o software de controle (CiguiSII iX Series II®).

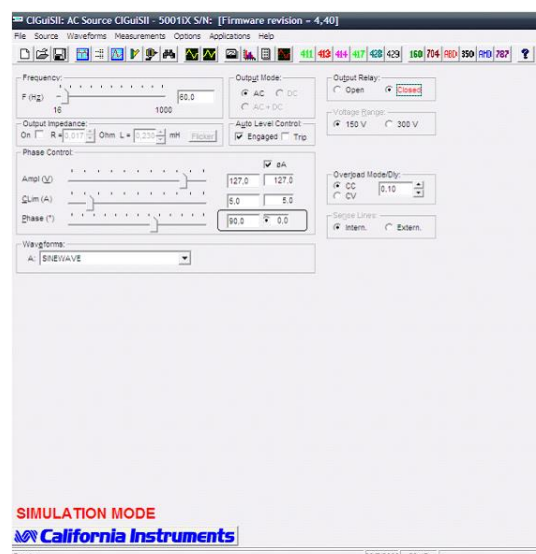


Figura 3.3 – Interface gráfica do software de parametrização da fonte de alimentação.

Fonte: Fernandes (2009).

O equipamento utilizado possui uma placa de aquisição de dados que permite extração dos valores num curto espaço de tempo. Além disso, a interface também possibilita que os dados sejam tratados em tempo-real e extraídos em formato texto. É válido comentar que durante todos os ensaios, houve a necessidade de realizar os ensaios somente após alguns segundos do acionamento das lâmpadas para que houve tempo hábil de as mesmas operarem em regime permanente.

A Figura 3.4 apresenta a interface gráfica utilizada para a obtenção dos dados relativos às componentes harmônicas.

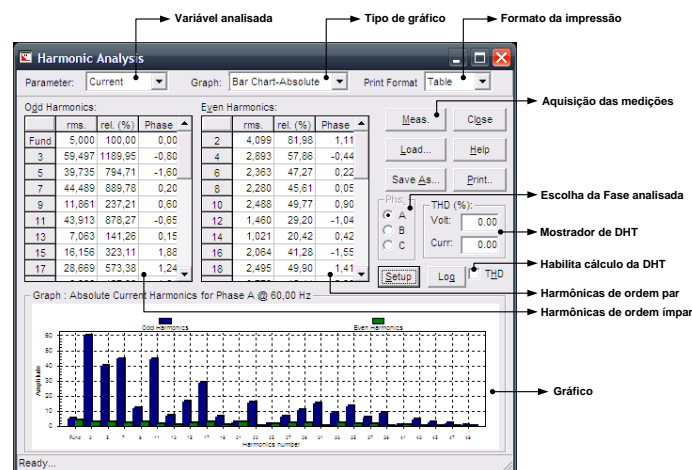


Figura 3.4 – Interface gráfica de aquisição dos dados de distorção harmônica.

Fonte: Fernandes (2009).

A exportação dos dados das componentes harmônicas também pode ser feita por meio de arquivo texto. Entretanto, estes arquivos encontram-se em uma organização específica que é apresentada na Figura 3.5:

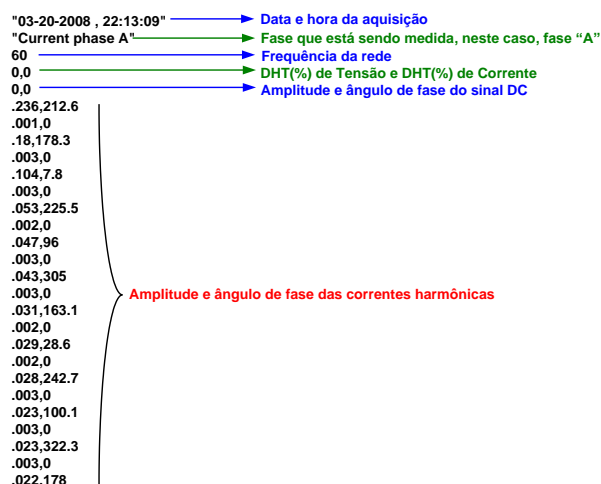


Figura 3.5 – Dados exportados pelo software em formato texto.

Fonte: Fernandes (2009).

3.3 LÂMPADAS LED DE 2 E 3 MÓDULOS

Como objeto desse trabalho, foram extraídos dados relativos a duas cargas, destacadas nas Figuras 3.6 e 3.7. Após realizadas as primeiras medições, notou-se que a lâmpada LED de 2 módulos possui uma potência ativa de aproximadamente 33 W. Já a lâmpada LED de 3 módulos apresenta uma potência ativa de aproximadamente 100 W. Além disso, pôde ser notado um fator de potência de 0,94 para a lâmpada LED de 2 módulos e de 0,96 para a lâmpada LED de 3 módulos.



Figura 3.6 – Lâmpada LED de 3 módulos utilizada durante os ensaios laboratoriais.

Fonte: próprio autor.



Figura 3.7 – Lâmpada LED de 2 módulos utilizada durante os ensaios laboratoriais.

Fonte: próprio autor.

Por meio dos ensaios foi possível levantar os dados referentes ao valor eficaz de cada corrente harmônica para ambas as cargas operando separadamente e alimentadas por uma forma de onda de tensão puramente senoidal. Dessa forma, a Tabela 3.1 apresenta os harmônicos das lâmpadas ensaiadas, entre a componente fundamental e a 25ª ordem. Além disso, a Figura 3.8 apresenta uma comparação gráfica dos espectros harmônicos das lâmpadas supramencionadas.

Tabela 3.1 – Valores das componentes harmônicas das cargas obtidas durante os ensaios laboratoriais.

Ordem Harmônica (Ímpares)	Corrente RMS (A)		Ordem Harmônica (Pares)	Corrente RMS (A)	
	3 módulos	2 módulos		3 módulos	2 módulos
1	0.447	0.152	2	0.001	0
3	0.04	0.009	4	0.001	0.001
5	0.018	0.005	6	0	0
7	0.014	0.007	8	0	0
9	0.01	0.004	10	0	0
11	0.008	0.003	12	0	0
13	0.005	0.001	14	0	0
15	0.003	0.001	16	0	0
17	0.002	0.001	18	0	0
19	0.002	0	20	0	0
23	0.002	0.001	22	0	0
25	0.003	0.001	24	0	0

Fonte: próprio autor.

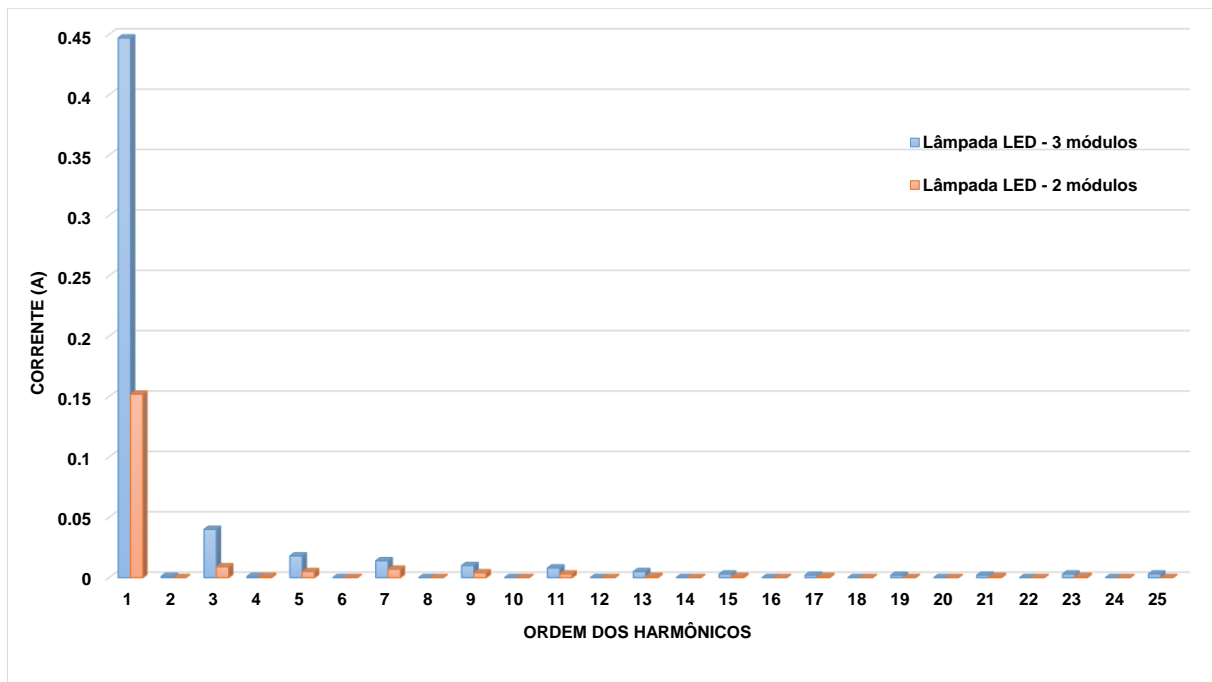


Figura 3.8 – Comparação dos espectros harmônicos das lâmpadas ensaiadas.

Fonte: próprio autor.

Capítulo 4

Simulação Computacional e Análises de QEE

Com o objetivo de prever o comportamento de sistemas elétricos de potência, principalmente, visando o planejamento do sistema, os profissionais de engenharia das concessionárias têm cada vez mais utilizado softwares de simulação. À utilização de simulações computacionais soma-se a praticidade, visto que se faz necessário apenas um microcomputador e o software (Garcia, 2010). Dentre os softwares mais utilizados em simulações de sistemas elétricos, ou seja, pelas concessionárias, pode-se citar com um dos mais empregados o ATP e o OpenDSS devido a serem gratuitamente distribuídos. Entretanto, ainda é possível destacar o PSCAD e o Power Factory, ambos com licenças pagas.

Deste modo, optou-se por utilizar o software ATP que conta com uma interface gráfica denominada por ATPDraw. Apesar de não ser um software de fácil uso, o mesmo é bastante confiável e vastamente empregado tanto em pesquisa como também pelas concessionárias brasileiras para estudos voltadas à expansão de redes de distribuição de energia elétrica.

Assim, é importante destacar que a rede primária de distribuição utilizada para os estudos de QEE já se encontrava modelada em ATP e fora disponibilizada pelo Grupo de Pesquisa em Smart Grids e Qualidade da Energia Elétrica da UFSCar.

4.1 ATPDRAW

O ATP Draw corresponde a um *front-end* que garante ao usuário uma interface amigável para o desenvolvimento de uma simulação em ATP (o qual fora criado em 1984), pois, simulações em feitas por meio do ATP necessitam de programação em cartão e utilizam basicamente a linguagem de programação funcional Fortran. Além disso, toda simulação em ATP se baseia na utilização da matriz de admitância das barras/nós que garante a simulação de transitórios eletromagnéticos. O método utilizado pelo software para os cálculos numéricos nas simulações é baseado na integração trapezoidal para solução de equações diferenciais para sistemas no domínio do tempo (Fonseca e Leal, 2003).

Uma facilidade apresentada pelo ATPDraw é que sua interface gráfica permite que usuários com pouca experiência em programação possam simular sistemas complexos. No entanto, para usuários com grande experiência de linguagens de programação funcionais, o software apresenta uma gama ainda maior de possibilidades.

Além disso, é possível integrar outros softwares ao ATPDraw, garantindo outras funcionalidades como: análises gráficas de sinais de tensão e corrente e cálculo da Transformada Rápida de Fourier para obtenção do espectro harmônico. Como exemplos de softwares, pode-se citar o PLOTXY e o TOP, ambos distribuídos de forma livre.

4.2 MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA REDE PRIMÁRIA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DA UFSCAR

Com o intuito de gerar uma análise consistente, empregou-se a rede primária da Área Norte do campus de São Carlos da UFSCar. Todos os dados utilizados foram disponibilizados pela prefeitura universitária. Deste modo, por meio da planta da Figura 4.1, foi possível definir os transformadores de distribuição que alimentam as lâmpadas, bem como a quantidade de postes e de lâmpadas conectadas em cada transformador. Os principais elementos dessa planta são descritos na legenda apresentada por meio da Figura 4.2.



Figura 4.1 – Planta da rede primária de distribuição de energia elétrica da UFSCar.

Fonte: próprio autor.

LEGENDA



Figura 4.2 – Legenda dos elementos principais da planta da rede primária.

Fonte: próprio autor.

Para a simulação, foi considerado o sistema já modelado pelo Grupo de Pesquisa em Smart Grids e Qualidade da Energia Elétrica. Entretanto, houve a necessidade de adequá-lo para incluir o parque de iluminação do campus que é basicamente formado por luminárias presentes nos postes de distribuição e por luminárias menores de decoração que estão conectadas em pontos distribuídos em diversas áreas de uso comum. Em geral, essas lâmpadas estão conectadas aos transformadores de distribuição e os cabeamentos são parte integrante do sistema de linhas aéreas de distribuição que percorre o campus.

Cabe mencionar que o sistema simulado, possui rede primária com tensão nominal de 11,9 kV e rede secundária com tensão nominal de 220 V. Assim, os transformadores de distribuição foram configurados para tais tensões (nos lados de alta e baixa). Entretanto, ao se utilizar o ATPDraw, faz-se necessário configurar ainda o valor da resistência dos enrolamentos e as reatâncias internas dos transformadores. Em relação às resistências dos enrolamentos, estas são muito pequenas devido às bobinas serem de cobre e, dessa forma, foram desconsideradas. Por outro lado, as reatâncias internas são calculadas a partir de (WEG, 2015):

$$Z_{interno} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}} \quad (4.1)$$

onde $Z_{interno}$ representa a impedância interna de cada um dos lados, V_{base} é o valor da tensão de cada um dos lados do transformador e S_{base} é o valor base de potência que é dado pela potência nominal do equipamento.

A ABNT por meio da norma NBR 5440/1994 determina valores adequados de corrente de excitação máxima, perdas em vazio, perdas totais e impedância para transformadores de distribuição. Os valores fornecidos por essa são apresentados de forma percentual e, portanto, utiliza-se o método de cálculo em p.u.. Assim, deve-se considerar a potência nominal de cada transformador do campus (dados fornecidos pela prefeitura do campus).

4.3 SIMULAÇÃO DA REDE DA UFSCAR COM INSERÇÃO DE LÂMPADAS LED

Segundo Dugan et. al. (2004), em simulações que visam a análise de distorções harmônicas, é possível realizar a simulação de cargas não lineares considerando-as como fontes de corrente ajustadas para as frequências harmônicas de interesse, as quais devem estar em paralelo com uma impedância equivalente da carga. Os valores de corrente para cada harmônico foram definidos nos ensaios realizados em laboratório, conforme previamente mostrado por meio da Tabela 3.1.

Para a simulação da carga, foi utilizada uma fonte de corrente do tipo HFS (*Harmonic Frequency Scan*) que possibilita a configuração de uma fonte de harmônicos, até 11ª ordem. Assim como Da Silva (2014), para a modelagem da carga não linear, em paralelo com a fonte de harmônicos foi alocada uma resistência equivalente, conforme pode ser observado na Figura 4.3. Portanto, o equivalente da lâmpada foi conectado à rede por meio de uma chave que está alocada em série com o lado de baixa tensão do transformador de distribuição que se conecta à rede primária.

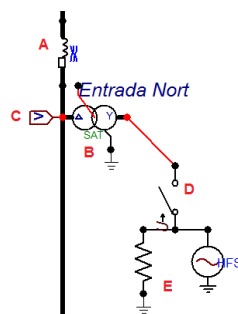


Figura 4.3 – Arranjo de conexão da lâmpada simulada.

Fonte: próprio autor.

Analisando a Figura 4.3, nota-se que “A” representa a impedância dos cabos da rede primária, “B” é o transformador de distribuição onde a lâmpada será ligada, “C” representa o medidor de tensão no lado de alta tensão do transformador, “D” é a chave para controle de abertura e fechamento da carga (lâmpada) e, finalmente, “E” representa o circuito equivalente da lâmpada ou de um conjunto de lâmpadas.

Uma vez que o arrajo da Figura 4.3 possa representar um conjunto de lâmpadas, o circuito representado por “E” tem valor de resistência equivalente igual a configuração em paralelo das resistências de cada lâmpada e os valores das correntes são a soma dos valores eficazes das correntes harmônicas individuais de cada uma das cargas.

As quantidades de lâmpadas conectadas em cada transformador foram estimadas (para lâmpadas LED de 3 e 2 módulos) analisando-se a planta fornecida pela prefeitura universitária e equilibrando as cargas devido a proximidade das lâmpadas aos transformadores, uma vez que não foi possível obter diagramas de rede que possuem informações suficientes para um levantamento preciso dessas quantidades. Além disso, foram consultados os documentos de padrões técnicos da concessionária CPFL (GED-2858, GED-11847, GED-3446 e GED-3523) para melhor avaliação da instalação do parque de iluminação pública analisado e melhor definição das quantidades de lâmpadas conectadas em cada transformador. As quantidades de lâmpadas e resistências paralelas utilizadas são mostradas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Quantidades de lâmpadas e resistências paralelas.

Identificação do Transformador	Número de lâmpadas		Resistências Paralelas (Ω)	Correntes Harmônicas (A)					
	3 mód.	2 mód.		Fund.	3º	5º	7º	9º	11º
Entrada Nort	18	0	26.96	8.064	0.720	0.306	0.252	0.180	0.126
Oficina	8	5	42.33	4.344	0.370	0.166	0.147	0.100	0.071
Pç4-USE	6	10	37.53	4.208	0.340	0.162	0.154	0.100	0.072
Enf Norte	4	22	25.22	5.136	0.380	0.200	0.210	0.128	0.094
USE-b11	6	15	29.60	4.968	0.390	0.192	0.189	0.120	0.087
USE-b12	2	14	41.47	3.024	0.220	0.118	0.126	0.076	0.056
LAB NET	6	8	42.04	3.904	0.320	0.150	0.140	0.092	0.066
IFSP	12	5	31.38	6.136	0.530	0.234	0.203	0.140	0.099
Resíduos	8	3	48.15	4.040	0.350	0.154	0.133	0.092	0.065
FAI	5	6	52.99	3.152	0.260	0.121	0.112	0.074	0.053
EQ1	6	5	51.27	3.448	0.290	0.132	0.119	0.080	0.057
EQ2	4	6	59.49	2.704	0.220	0.104	0.098	0.064	0.046
EQ3	0	6	116.72	0.912	0.060	0.036	0.042	0.024	0.018
EQ4	0	8	87.54	1.216	0.080	0.048	0.056	0.032	0.024
Microscopia	4	5	65.01	2.552	0.210	0.098	0.091	0.060	0.043
Polímeros	4	4	71.66	2.400	0.200	0.092	0.084	0.056	0.040
Reciclagem	4	6	59.49	2.704	0.220	0.104	0.098	0.064	0.046

CCDM	5	4	62.44	2.848	0.240	0.109	0.098	0.066	0.047
Polimeros SE	5	5	57.33	3.000	0.250	0.115	0.105	0.070	0.050
DEMA RS P/M	6	5	51.27	3.448	0.290	0.132	0.119	0.080	0.057
DEMA Poli RL	3	7	61.81	2.408	0.190	0.093	0.091	0.058	0.042
DEMA ME RL	3	8	56.80	2.560	0.200	0.099	0.098	0.062	0.045
DEMA RL	3	8	56.80	2.560	0.200	0.099	0.098	0.062	0.045
DEMA RS	5	6	52.99	3.152	0.260	0.121	0.112	0.074	0.053
DEMA ALCOA	5	8	46.03	3.456	0.280	0.133	0.126	0.082	0.059
BIOTÉRIO	5	8	46.03	3.456	0.280	0.133	0.126	0.082	0.059
LAMAVI	6	6	47.77	3.600	0.300	0.138	0.126	0.084	0.060
ENG. CIVIL	5	4	62.44	2.848	0.240	0.109	0.098	0.066	0.047
ALCOA	6	5	51.27	3.448	0.290	0.132	0.119	0.080	0.057
AT7	10	10	28.66	6.000	0.500	0.230	0.210	0.140	0.100
CSPP	8	5	42.33	4.344	0.370	0.166	0.147	0.100	0.071

Fonte: próprio autor.

É importante comentar que a fonte de corrente harmônica (HFS) utiliza valores de pico para cada harmônico e, dessa forma, foram utilizados os valores da Tabela 3.1 multiplicados por $\sqrt{2}$.

Finalmente, foi possível adequar a simulação da rede primária no software ATPDraw. O diagrama unifilar dessa rede pode ser visualizado pela Figura 4.4.

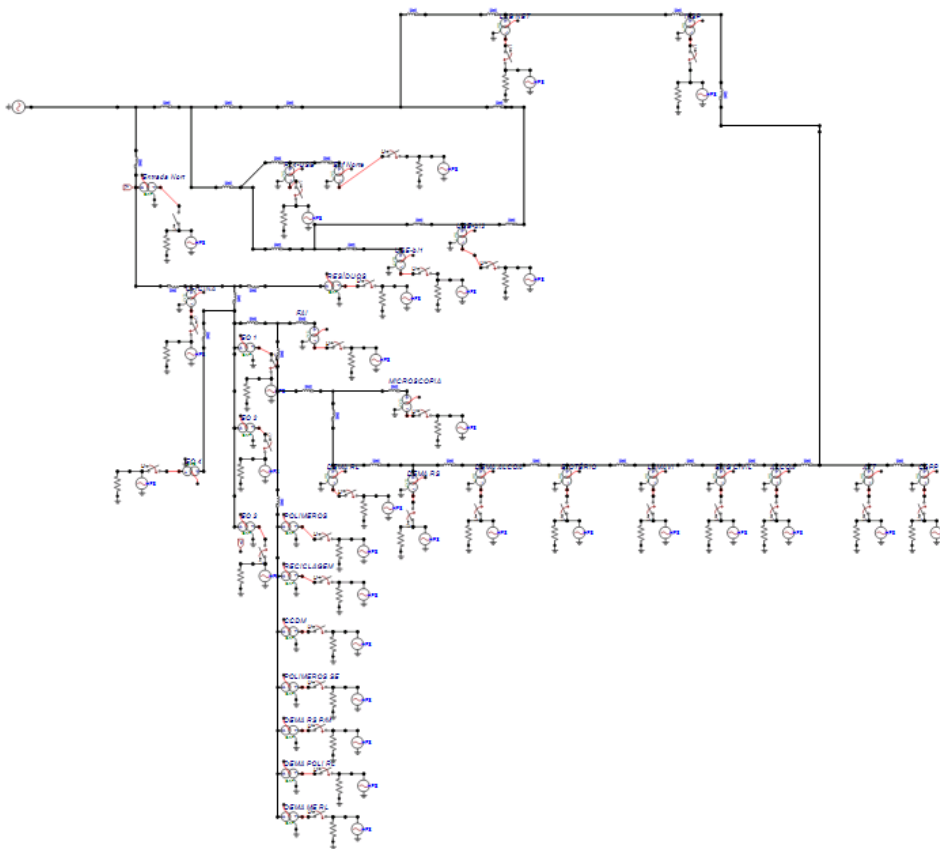


Figura 4.4 – Diagrama unifilar da rede primária após inserção das lâmpadas LED.

Fonte: próprio autor.

Utilizando a ferramenta PLOTXY previamente mencionada, foi possível analisar cada um dos secundários dos transformadores que compõem o sistema, não apenas a forma de onda como também realizar uma análise do espectro harmônico para, posteriormente, definir os valores de distorção harmônica, conforme exemplificado nas Figuras 4.5 e 4.6.

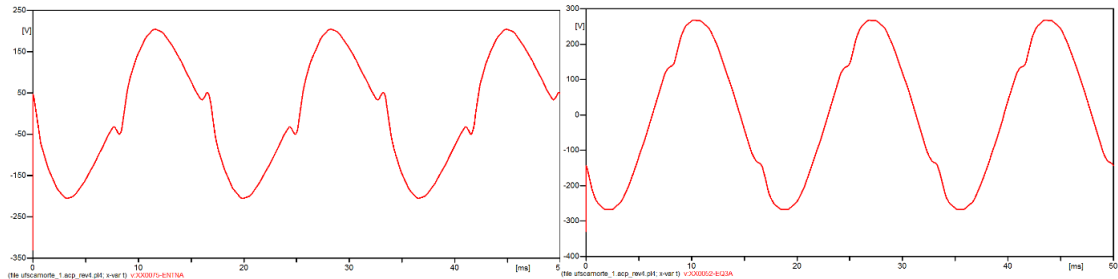


Figura 4.5 – Formas de onda de tensão medidas em dois transformadores.

Fonte: próprio autor.

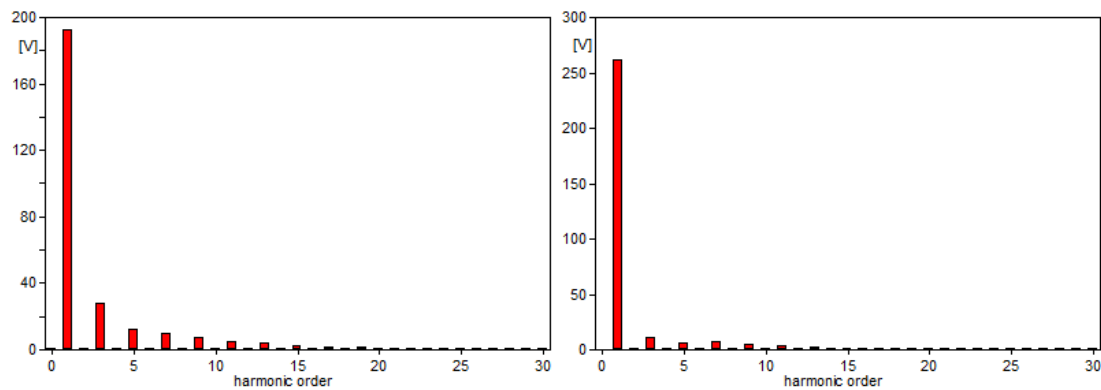


Figura 4.6 – Espectro harmônico (em tensão) resultante nos dois transformadores.

Fonte: próprio autor.

A figura 4.5 representa as formas de onda de dois pontos analisados do sistema simulado, o primeiro possui valores consideráveis de correntes harmônicas e isso reflete-se na forma de onda que pouco se assemelha a forma de onda de frequência fundamental. É possível também perceber que a forma de onda com maior distorção também possui menor amplitude, porém com maior contribuição de harmônicos que é evidenciado na figura 4.6.

4.4 ANÁLISE DA INSERÇÃO DAS LÂMPADAS LED

Com os valores fornecidos pela ferramenta PLOTXY definiu-se todos os valores de distorções harmônicas para os pontos de acoplamento comum de cada um dos transformadores de distribuição apresentados na Tabela 4.1. Assim, foi possível definir os

valores de DHT e DHI de tensão para cada um destes pontos, conforme mostrado nas Tabelas 4.2 e 4.3.

Tabela 4.2 – Valores de DHT (de tensão) para cada um dos transformadores.

Identificação do Transformador	DHT de Tensão	Identificação do Transformador	DHT de Tensão
Entrada Nort	17.06%	Reciclagem	10.77%
Oficina	13.36%	CCDM	12.66%
Pç4-USE	10.45%	Polimeros SE	12.02%
Enf Norte	15.69%	DEMA RS P/M	12.55%
USE-bl1	9.31%	DEMA Poli RL	9.50%
USE-bl2	7.21%	DEMA ME RL	9.14%
LAB NET	11.13%	DEMA RL	9.14%
IFSP	14.36%	DEMA RS	11.46%
Resíduos	14.58%	DEMA ALCOA	10.57%
FAI	11.46%	BIOTÉRIO	10.97%
EQ1	12.55%	LAMAVI	11.12%
EQ2	10.77%	ENG. CIVIL	12.66%
EQ3	5.56%	ALCOA	12.61%
EQ4	5.57%	AT7	12.00%
Microscopia	11.34%	CSPP	13.36%
Polimeros	12.02%		

Fonte: próprio autor.

Em destaque na tabela 4.2 estão todos os pontos, com suas respectivas identificações do transformador, que possuem valores de DHT sob não conformidade com os valores definidos como aceitáveis pela ANEEL. Dos 31 pontos analisados, 24 apresentam valores de distorção harmônica total superiores a 10%, parâmetro máximo definido para pontos onde a tensão nominal é menor que 1kV.

Tabela 4.3 – Valores de DHI (de tensão) para cada um dos transformadores.

Identificação transformador	DHI de Tensão				
	3º	5º	7º	9º	11º
Entrada Nort	14.30%	6.08%	5.00%	3.58%	2.50%
Oficina	10.91%	4.90%	4.34%	2.94%	2.09%
Pç4-USE	8.27%	3.94%	3.75%	2.42%	1.75%
Enf Norte	13.15%	5.59%	4.60%	3.29%	2.30%
USE-bl1	7.22%	3.56%	3.49%	2.22%	1.61%
USE-bl2	5.32%	2.84%	3.02%	1.82%	1.34%
LAB NET	8.89%	4.16%	3.88%	2.55%	1.82%
IFSP	11.82%	5.22%	4.52%	3.12%	2.21%
Resíduos	12.02%	5.29%	4.56%	3.16%	2.23%

FAI	9.18%	4.27%	3.94%	2.62%	1.87%
EQ1	10.17%	4.64%	4.17%	2.80%	2.01%
EQ2	8.55%	4.04%	3.82%	2.50%	1.79%
EQ3	3.79%	2.27%	2.63%	1.52%	1.11%
EQ4	3.78%	2.27%	2.64%	1.51%	1.14%
Microscopia	9.06%	4.24%	3.94%	2.59%	1.86%
Polímeros	9.69%	4.45%	4.07%	2.70%	1.95%
Reciclagem	8.55%	4.04%	3.82%	2.50%	1.79%
CCDM	10.27%	4.67%	4.21%	2.82%	2.00%
Polimeros SE	9.69%	4.46%	4.05%	2.71%	1.94%
DEMA RS P/M	10.17%	4.64%	4.17%	2.80%	2.01%
DEMA Poli RL	7.39%	3.63%	3.54%	2.25%	1.62%
DEMA ME RL	7.06%	3.49%	3.47%	2.20%	1.60%
DEMA RL	7.06%	3.49%	3.47%	2.20%	1.60%
DEMA RS	9.18%	4.27%	3.94%	2.62%	1.87%
DEMA ALCOA	8.38%	3.98%	3.76%	2.45%	1.76%
BIOTÉRIO	8.37%	3.98%	3.76%	3.83%	1.75%
LAMAVI	8.96%	4.12%	3.76%	2.51%	1.80%
ENG. CIVIL	10.27%	4.67%	4.21%	2.82%	2.00%
ALCOA	10.22%	4.66%	4.19%	2.82%	2.02%
AT7	9.68%	4.45%	4.06%	2.71%	1.93%
CSPP	10.91%	4.90%	4.34%	2.94%	2.09%

Fonte: próprio autor.

Na tabela 4.3 é possível conferir os valores das distorções harmônicas individuais e alguns algumas partes da rede de distribuição excedem os valores de referência estabelecidos pelo PRODIST destacando-se os valores de 3º e 9º harmônicos.

Importante ressaltar que os pontos USE-bl1, DEM A Poli RL, DEM A ME RL e DEM A RL apesar de possuírem valores de DHT abaixo de 10%, apresentam valores de DHI de tensão para os harmônicos de 3º e 9º ordem acima do que é considerado aceitável pela norma, isso significa que 28 dos 31 pontos de análise apresentam índices de inconformidade de distorção harmônicas.

Capítulo 5

Estudo de Viabilidade Econômica

Como símbolo de tecnologias que possuem a capacidade de ser mais eficientes do que outras lâmpadas equivalentes, as lâmpadas LED são uma opção a ser considerada em vários projetos de redução de consumo de energia elétrica e de eficiência energética. Atualmente, esta tem sido uma opção, principalmente, pela conscientização do uso de recursos naturais. Porém, mesmo que essa abordagem seja, moralmente, correta, ela sozinha não é suficiente para estimular investimentos que resultem em economia de energia.

Devido aos crescentes valores das tarifas de energia elétrica, especialmente relacionadas à política de bandeiras tarifárias adotada e aos aumentos de preço que ocorreram entre os anos de 2014 e 2015, os gastos cada vez maiores com energia elétrica têm incentivado iniciativas para queda do consumo.

Segundo dados da Abilux (Associação Brasileira da Indústria de Iluminação), atualmente, a iluminação representa 20% da energia elétrica consumida no Brasil, sendo que 3,5% desse montante se refere à iluminação pública. A substituição dos mais de 5 milhões de pontos de iluminação do país por lâmpadas LED representaria uma economia de 0,8% do consumo total de energia.

Tendo como base estas discussões, este capítulo se dedica ao estudo de viabilidade econômica para o investimento da implantação de lâmpadas LED em iluminação pública, isto é, visando a substituição das tradicionais lâmpadas de vapor de sódio. Portanto, o objetivo final dessa análise é a estimativa das perspectivas de desempenho financeiro de um produto e/ou projeto, assegurando para o investidor o retorno financeiro do capital investido, empregando-se técnicas de engenharia econômica (Grant, 1982).

5.1 ASPECTOS FUNDAMENTAIS

Para o melhor entendimento dos termos e técnicas utilizadas na análise de viabilidade econômica, é importante compreender alguns termos e definições, como:

- Fluxo de caixa - representa as entradas e saídas de capital para um determinado investimento. A entrada é referente aos ganhos (lucros) enquanto a saída é referente a demais custos no decorrer de um empreendimento;

- Payback - se refere ao período de recuperação de um investimento, ou seja, o tempo necessário até que o acumulado da entrada de capital no fluxo de caixa de um empreendimento fique igual ao capital inicialmente investido (Brealey, 2013). Este cálculo pode ser realizado de acordo com:

$$I = \sum_{t=1}^T \frac{Rt - Ct}{(1 + i)^{t'}} \quad (5.1)$$

onde T é o período de recuperação, t é o período de análise do fluxo de caixa (em anos, meses, semanas, dias, etc.), Rt são as receitas (capital de entrada) no tempo t , Ct são os custos (capital de saída) no tempo t , I é o investimento inicial e i são os juros;

- Valor Presente Líquido (VPL) - é o método de cálculo de retorno de investimento mais utilizado por empresas (Brealey, 2013). Ela consiste em substituir as quantias que existem no fluxo de caixa para o valor no momento no qual é tomada a decisão de se investir. Dessa forma, se o valor do VPL for maior que zero, o investimento é considerado atrativo e seu valor representa o lucro de um determinado empreendimento. Se o valor é igual a zero ele é dito indiferente e caso seja negativo isso representa que o investimento não é atrativo (Grant, 1982). O VPL pode ser calculado da seguinte forma:

$$VPL = I + \sum_{t=1}^T \frac{Rt - Ct}{(1 + i)^{t'}} \quad (5.2)$$

onde os índices que compõem essa equação são os mesmos da Equação (5.1);

- Taxa Mínima de Atratividade (TMA) - representa o tempo para retorno do investimento segundo as expectativas de um investidor, ou seja, qual o tempo necessário para um investimento dar o retorno percentual esperado para um empreendedor (Grant, 1982). Cada indivíduo ou empresa possui sua própria TMA que é dependente principalmente do risco envolvido num investimento. A TMA pode ser obtida por meio de:

$$VPL = 0 = I + \sum_{t=1}^T \frac{Rt - Ct}{(1 + TMA)^{t'}} \quad (5.3)$$

5.2 CÁLCULO DO FLUXO DE CAIXA

Para definição do fluxo de caixa é necessário estabelecer o ganho para esse investimento, mais especificamente, o que seriam gastos (saída de capital) e o que seriam ganhos (entrada de capital).

A princípio, foi necessário definir o período de análise do investimento, ou seja, qual o espaço em que se espera ter o retorno do investimento. De acordo com a literatura, uma das maiores vantagens a respeito da utilização de lâmpadas LED é que as mesmas não precisam serem trocadas com frequência, isso se deve à sua alta vida útil e sua capacidade de não ser afetada com a comutação de ligar e desligar (Ferroni, Veira, Leite e Silva, 2014). Após realizar uma pesquisa com os dados fornecidos pelo fabricante, foi possível definir que a vida útil das lâmpadas LED ensaiadas era de aproximadamente 70.000 horas (esses valores variam para cada modelo e fabricante desde 40.000 horas até 100.000 horas. Essa variação está relacionada à temperatura de junção.

Uma vez que é esperado que tais lâmpadas sejam utilizadas por um tempo médio de 11 horas por dia, isso representa mais de 6300 dias e um tempo superior a 17 anos. Dessa forma, para o estudo de viabilidade econômica, será considerado um retorno de investimento para o horizonte de 17 anos. Como esse projeto tem como objetivo economia do consumo de energia elétrica, não é possível definir entradas e saídas de capitais no fluxo de caixa como é tradicionalmente feito em outras análises financeiras. Para determinação do fluxo de caixa, foi considerado o valor total economizado por mês da seguinte maneira:

$$Renda = C_{W\text{ mercúrio}} + C_{T\text{ mercúrio}} - C_{W\text{ LED}} \quad (5.4)$$

onde *Renda* é a economia mensal, $C_{W\text{ mercúrio}}$ é o gasto com energia elétrica das lâmpadas de vapor de mercúrio, $C_{T\text{ mercúrio}}$ é o gasto com manutenção (troca) das lâmpadas de vapor de mercúrio e $C_{W\text{ LED}}$ é o gasto com energia elétrica das lâmpadas LED.

Para a definição das variáveis que compõem a Equação 5.4, foi considerada a substituição das lâmpadas a vapor de mercúrio, no sistema original (considerando quantidades e tipos), pelas lâmpadas LED. Estas substituições foram realizadas de acordo com a Tabela 5.1.

O valor dos custos com energia e manutenção são definidos por:

$$C_W = Q_{\text{horas/ano}} * Q_{\text{lâmpadas}} * P_{\text{lâmpadas}} * C_{kWh} \quad (5.5)$$

$$C_t = (C_{l\u00e2mpada} + C_{m\u00e3o\ de\ obra}) * \frac{horas_{ano}}{vida\ \u00fatil} * Q_{l\u00e2mpadas}, \quad (5.6)$$

onde $Q_{l\u00e2mpadas}$ \u00e9 a quantidade de l\u00e2mpadas; $Q_{horas/ano}$ \u00e9 a quantidade de horas de funcionamento por ano; $P_{l\u00e2mpadas}$ \u00e9 a pot\u00eancia das l\u00e2mpadas em kW; $C_{l\u00e2mpada}$ representa o custo da l\u00e2mpada; $C_{m\u00e3o\ de\ obra}$ \u00e9 o custo de m\u00e3o de obra para realiza\u00e7\u00e3o das trocas das l\u00e2mpadas; e C_{kWh} \u00e9 o custo da tarifa de energia el\u00e9trica. Dessa forma, o valor de C_t representa uma m\u00e9dia dos custos de manuten\u00e7\u00e3o por ano.

Tabela 5.1 – Considera\u00e7\u00f5es sobre a troca das l\u00e2mpadas.

Sistema original		Sistema proposto	
Vapor de merc\u00far\u00edo 250W	172	LED 3 m\u00f3dulos	172
Vapor de merc\u00far\u00edo 150W	174	LED 2 m\u00f3dulos	217
Vapor de merc\u00far\u00edo 70W	43		

Fonte: pr\u00f3prio autor.

Ressalta-se que os valores de custo das l\u00e2mpadas foram levantados por meio de pesquisa de mercado. Para defini\u00e7\u00e3o da pot\u00eancia das l\u00e2mpadas de vapor de merc\u00far\u00edo foram considerados os valores do conjunto l\u00e2mpada e reator fornecidos pelo fabricante (OSRAM, documentos t\u00e9cnicos). J\u00e1 para as l\u00e2mpadas LED foi considerado os valores levantados nos ensaios laboratoriais. Os dados de vida \u00fatil tamb\u00e9m s\u00e3o fornecidos pelo fabricante em cat\u00e1logos que podem ser consultados *on-line*.

Para defini\u00e7\u00e3o do valor de investimento, foi realizada uma pesquisa de mercado que visou tanto para a defini\u00e7\u00e3o do material utilizado (pre\u00e7os das l\u00e2mpadas LED) quanto da m\u00e3o de obra necess\u00e1ria para a instala\u00e7\u00e3o das l\u00e2mpadas. Os custos de m\u00e3o de obra foram definidos segundo pesquisa em distribuidoras de energia el\u00e9trica e empresas de presta\u00e7\u00e3o de servi\u00e7os terceirizados de manuten\u00e7\u00e3o e instala\u00e7\u00e3o de sistemas de ilumina\u00e7\u00e3o, na resolu\u00e7\u00e3o normativa n\u00b0 414 de 9 de Setembro de 2010 no artigo 21, descreve a responsabilidade dos munic\u00edpios de prestar manuten\u00e7\u00e3o no parque de ilumina\u00e7\u00e3o que \u00e9 feita atrav\u00e9s de empresas privadas contratadas. Assim, o c\u00e1lculo do investimento foi realizado por:

$$Investimento = (C_{m\u00e3o\ de\ obra} + C_{l\u00e2mpada}) * Q_{l\u00e2mpadas} , \quad (5.7)$$

Neste sentido, considerou-se uma estimativa de 11 horas por dia, ou seja, um total de 4015 horas por ano. Segundo as normas regulat\u00f3rias do setor de energia existem tarifas especiais que s\u00e3o cobradas para sistemas de ilumina\u00e7\u00e3o p\u00fablica e est\u00e3o dispon\u00edveis no *website* da ANEEL para consulta no Relat\u00f3rio Classe de Consumo. Como o alto pre\u00e7o da tarifa \u00e9 a principal vari\u00e1vel para incentivo de investimentos em economia de energia, foi

considerado para os primeiros 3 anos do horizonte em análise a tarifa atual e para os demais anos o valor é referente à média dos últimos 17 anos.

Em relação à taxa de juros, foi considerado que a mesma também apresenta um valor fixo que representa a média dos últimos 17 anos, esses valores podem ser consultados no *website* do Banco Central do Brasil.

Por fim, a definição do consumo das lâmpadas do sistema original foi considerada de acordo com as informações fornecidas pelos catálogos de fabricantes e contempla a potência do conjunto lâmpada e reator.

5.3 RESULTADOS DA VIABILIDADE ECONÔMICA

É importante destacar que o valor de TMA foi considerado 20% ao ano, o qual é muito adotado como critério de atratividade para investimentos de empresas. Assim, foi possível obter os valores apresentados por meio da Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Resultados da Análise de Viabilidade Econômica.

Investimento		R\$ 340,506.81			
Juros		14.45% ao ano	TMA	20% ao ano	
Ano	Tarifa	Renda	VPL	Payback	TMA
1	0.33943	R\$ 83,776.06	-R\$ 267,307.98	R\$ 73,198.83	-R\$ 270,693.43
2	0.33943	R\$ 83,776.06	-R\$ 203,350.95	R\$ 137,155.86	-R\$ 212,515.61
3	0.33943	R\$ 83,776.06	-R\$ 147,468.87	R\$ 193,037.94	-R\$ 164,034.10
4	0.23259	R\$ 58,142.54	-R\$ 113,582.05	R\$ 226,924.76	-R\$ 135,994.68
5	0.23259	R\$ 58,142.54	-R\$ 83,973.65	R\$ 256,533.16	-R\$ 112,628.50
6	0.23259	R\$ 58,142.54	-R\$ 58,103.48	R\$ 282,403.33	-R\$ 93,156.68
7	0.23259	R\$ 58,142.54	-R\$ 35,499.58	R\$ 305,007.23	-R\$ 76,930.16
8	0.23259	R\$ 58,142.54	-R\$ 15,749.56	R\$ 324,757.25	-R\$ 63,408.06
9	0.23259	R\$ 58,142.54	R\$ 1,506.91	R\$ 342,013.72	-R\$ 52,139.65
10	0.23259	R\$ 58,142.54	R\$ 16,584.64	R\$ 357,091.45	-R\$ 42,749.31
11	0.23259	R\$ 58,142.54	R\$ 29,758.72	R\$ 370,265.53	-R\$ 34,924.02
12	0.23259	R\$ 58,142.54	R\$ 41,269.49	R\$ 381,776.30	-R\$ 28,402.95
13	0.23259	R\$ 58,142.54	R\$ 51,326.96	R\$ 391,833.77	-R\$ 22,968.72
14	0.23259	R\$ 58,142.54	R\$ 60,114.61	R\$ 400,621.42	-R\$ 18,440.20
15	0.23259	R\$ 58,142.54	R\$ 67,792.77	R\$ 408,299.58	-R\$ 14,666.43
16	0.23259	R\$ 58,142.54	R\$ 74,501.51	R\$ 415,008.32	-R\$ 11,521.62
17	0.23259	R\$ 58,142.54	R\$ 80,363.23	R\$ 420,870.04	-R\$ 8,900.95

Fonte: próprio autor.

Analisando a Tabela 5.2, é possível perceber que o valor final do VPL (que representa o lucro total do final do empreendimento) é de R\$ 80.363,23, porém, não é possível alcançar

o valor esperado para a taxa mínima de atratividade de 20% ao ano. Com o intuito de melhor apresentar tais resultados, os mesmos são ilustrados por meio do gráfico da Figura 5.1.

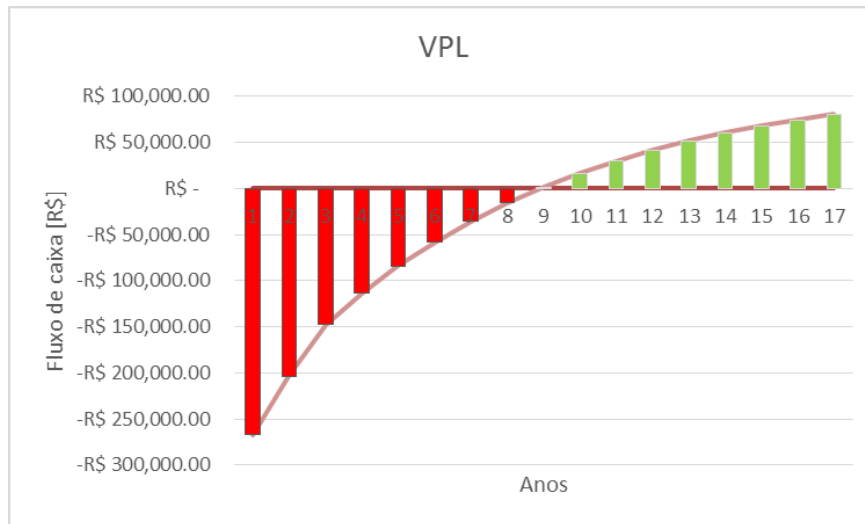


Figura 5.1 – Valor final do VPL no decorrer de 17 anos.

Fonte: próprio autor.

É possível perceber pela inclinação da reta do gráfico da figura 5.1 que o retorno anual desse investimento é decrescente com o passar do tempo, efeito que é consequência da taxa de juros.

Capítulo 6

Conclusões

Esse trabalho apresentou um método de análise de distorções harmônicas geradas por lâmpadas LED, fazendo-se uso do software ATP. Os valores obtidos de distorção foram de certa forma elevados. Os resultados apresentados servem de alerta para a utilização de lâmpadas LED, devendo-se atentar aos valores de correntes harmônicas quando a análise for realizada para larga escala. Por outro lado, as lâmpadas LED além de econômicas não possuem em sua composição metais pesados e, dessa forma, não degradam o meio ambiente no momento de realizar seu descarte (Sales et. al., 2011). Essas lâmpadas possuem características luminotécnicas que variam de acordo com a composição e a dopagem do material semiconductor, resultando em uma infinidade de espectros de luz para as mais diversas finalidades.

Portanto, é possível concluir que os resultados apresentados apontam que no aspecto de Qualidade da Energia Elétrica, ao se instalar lâmpadas LED em uma rede com dimensões como à da UFSCar, as normas da ANEEL não são completamente atendidas. Foi possível perceber altos valores de harmônicos de tensão de terceira ordem e, portanto, poderia ser necessário a utilização de filtros para eliminação ou atenuação desse harmônico.

Em relação à análise de viabilidade econômica, o empreendimento apresentou retorno financeiro entre o oitavo e nono ano, porém para o valor de TMA de 20% não é possível obter o valor esperado. Portanto, pode-se dizer que esse tipo de investimento é de longo prazo e de baixo rendimento. Isso explica a desconfiança de concessionárias de energia elétrica em propor a substituição de lâmpadas de vapor de sódio ou de vapor de mercúrio por lâmpadas LED. Ao se considerar valores onde os juros sejam menores que o considerado, ou que o valor da tarifa seja maior, o índice de rendimento desse investimento pode ser maior e, portanto, o retorno acontecerá ainda mais cedo com um percentual ainda maior. O inverso também pode acontecer e o investimento pode ser completamente inviável sem retorno para o investidor e, dessa forma, o risco para esse tipo de empreendimento se tornaria alto e não incentivaria grandes empresas.

A maior influência para o alto custo do investimento, é o valor da própria lâmpada, visto que o custo de mão de obra para instalação representa algo em torno de apenas 5% do valor final. Entretanto, é importante frisar que, em geral, o custo das lâmpadas LED caiu 50% nos últimos 12 meses. Caso haja uma tendência nessa queda de preços, seria possível que os novos sistemas de iluminação pública possam ser compostos por lâmpadas LED.

Referências Bibliográficas

ALI, S. A. Modeling of Power Networks by ATP-Draw for Harmonics Propagation Study. *Transactions on Electrical and Electronic Materials*, Vol. 14, No. 6, pp. 283-290, 2013.

ANEEL. “Relatório Classe de Consumo” Disponível em: http://relatorios.aneel.gov.br/_layouts/xlviewer.aspx?id=/RelatoriosSAS/RelSampClasseCons.xlsx&Source=http%3A%2F%2Frelatorios%2Eaneel%2Egov%2Ebr%2FRelatoriosSAS%2FForms%2FAIItems%2Easpx&DefaultItemOpen=1 Acessado em 20 de Outubro de 2015.

ANEEL. Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica. Resolução Normativa nº 414 de 9 de Setembro de 2010.

ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – Módulo 8. Resolução Normativa nº 641/2014 de 01 Janeiro de 2015.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. “Histórico das taxas de juros”, Disponível em: <http://www.bcb.gov.br/?COPOMJUROS>, Acessado em 22 de Outubro de 2015.

Brealey, A. R., Myers S. C. e Allen F. Princípios de Finanças Corporativas, McGraw-Hill, 2013.

CPFL. GED-2858 Fornecimento em Tensão Primária 15kV, 25kV e 34,5kV – Volume 3 - Anexos. Norma técnica, 2015.

CPFL. GED-11847 Rede Primária Compacta 15kV e 25kV – Estruturas básicas – Montagem. Padrão técnico, 2015.

CPFL. GED-3446 Iluminação Pública - Montagem. Padrão técnico, 2015.

CPFL. GED-3523 Iluminação Pública - Conexões. Padrão técnico, 2015.

DA SILVA, M. P. C. Proposta de Modelagem e Simulação para Análise de Distorção Harmônica. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014.

DUGAN, R. C., McGRANAGHAN, M. F., SANTOSO, S. e BEATY, H. W. *Electrical Power Systems Quality*, McGraw-Hill, 2004.

FERNANDES, R. A. S. Identificação de fontes de correntes harmônicas por redes neurais artificiais. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2009.

FERRONI, E. H., VIEIRA H. R., DOMINGUETI A., LEITE W. e SILVA P. C. R. Viabilidade de Aplicação da Tecnologia LED: Aplicação em um campus universitário. Lumiere Eletric, Ed. 197, Outubro 2014.

FONSECA, H. L. C. A. e LEAL, M. F. Análise de Transitórios Eletromagnéticos Utilizando o ATPDraw. Monografia de Graduação, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, 2003.

GARCIA, M. A. A modelagem de cargas especiais (não-lineares) para estudos relacionados à qualidade da energia elétrica via o software ATP. Trabalho de Conclusão de Curso. Escolha de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2010.

GRANT, E. L. Principles of Engineering Economy. 7ª edição, 1982.

ABNT “Transformadores para redes aéreas de distribuição — Requisitos” NBR 5440:2014, Normas Técnicas, 2014.

SALES, R. P. LED, o novo paradigma da iluminação pública. Dissertação de mestrado. Instituto de Tecnologia Para o Desenvolvimento, Instituto de Engenharia do Paraná, 2011.

OSRAM. Reatores Eletrônicos/Drivers. Documentos técnicos, catálogo 2015.

WEG. Cálculo de Transformadores. Documentos técnicos, 2015.