

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

LETÍCIA BEATRIZ ALVES

ANÁLISE DE VIABILIDADE DA APLICAÇÃO DE UM PROJETO DE EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA NA ILUMINAÇÃO PÚBLICA DE UMA REGIÃO DA CIDADE DE
JOINVILLE-SC.

Joinville, SC

Março, 2021.

LETÍCIA BEATRIZ ALVES

ANÁLISE DE VIABILIDADE DA APLICAÇÃO DE UM PROJETO DE EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA NA ILUMINAÇÃO PÚBLICA DE UMA REGIÃO DA CIDADE DE
JOINVILLE-SC.

Monografia apresentada ao
Curso de Bacharelado em
Engenharia Elétrica do
Campus Joinville do
Instituto Federal de Santa
Catarina para a obtenção do
diploma de Bacharel em
Engenharia Elétrica.

Orientadora: Joice Luiz
Jeronimo, Me.

Coorientador: André
Bonetto Trindade, Esp.

Joinville, SC

Março, 2021

Alves, Letícia Beatriz.

Análise de viabilidade da aplicação de um Projeto de Eficiência Energética na Iluminação Pública de uma região da cidade de Joinville-SC / Letícia Beatriz Alves – Joinville, SC, 2021.

86 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Curso de Engenharia Elétrica, Joinville, 2021.

Orientador: Joice Luiz Jeronimo.

Coorientador: André Bonetto Trindade.

1. Eficiência Energética. 2. PEE. 3. Iluminação Pública. 4. LED. I. Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Santa Catarina. II. Título.

LETÍCIA BEATRIZ ALVES

ANÁLISE DE VIABILIDADE DA APLICAÇÃO DE UM PROJETO DE EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA NA ILUMINAÇÃO PÚBLICA DE UMA REGIÃO DA CIDADE DE
JOINVILLE-SC.

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título em Engenharia Elétrica,
pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, e
aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora abaixo indicada.

Joinville, 17 de Março de 2021.



Prof. Joice Luz Jeronimo, Me.

Orientadora

Instituto Federal de Santa Catarina - IFSC



Prof. André Bonetto Trindade, Esp.

- Coorientador

Instituto Federal de Santa Catarina - IFSC



Prof. Ana Barbara Kholseisen Sambaqui, Dr. Eng.

Instituto Federal de Santa Catarina - IFSC



Prof. Rafael Gomes Faust, Me.

Instituto Federal de Santa Catarina - IFSC

Dedico este trabalho a minha família que sempre me apoiou em todos os momentos e a todos que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

À minha família, pelo incentivo e apoio que sempre me deram para alcançar meus objetivos, e em especial aos meus pais, Magali e Sidnei, por sempre estarem prontos a ajudar em todas as dificuldades encontradas.

Ao Lucas Kolling, agradeço pelo apoio e carinho, por estar ao meu lado em todos os momentos de dificuldade pelos quais passei, sempre me incentivando a não desistir, e pelo incentivo dado durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

À minha orientadora, Professora Joice Luiz Jeronimo, agradeço por toda a confiança depositada, apoio, paciência e auxílio durante todo o processo de desenvolvimento deste trabalho.

Aos membros da banca, agradeço pela avaliação do trabalho e contribuições para a consolidação do documento.

À SmartGreen, agradeço pela confiança e oportunidades geradas, por disponibilizar diversas informações necessárias para o embasamento de parte deste trabalho.

Agradeço a todos os professores do Instituto Federal de Santa Catarina - IFSC, Câmpus Joinville, pelos ensinamentos transmitidos e todo o apoio prestado durante todo o período de graduação.

Aos colegas de graduação, pelas críticas, sugestões e apoio ao longo desta jornada.

Por fim, agradeço a todas as pessoas que de uma forma ou de outra me ajudaram a chegar até aqui, para todos deixo o meu muito obrigada!

Algo só é impossível até que alguém duvide e resolva provar o contrário (Albert Einstein).

RESUMO

Em virtude da elevada demanda de energia elétrica, a busca por eficiência em equipamentos e processos de diversos setores já é uma realidade. Dessa forma, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) tem lançado programas como o PROCEL e PEE para incentivar projetos e desenvolvimento de produtos voltados à eficiência energética. Neste trabalho foi realizada a análise de viabilidade de substituição de luminárias no bairro Costa e Silva, na cidade de Joinville, Santa Catarina, seguindo as etapas para elaboração de um Projeto de Eficiência Energética de acordo com as diretrizes do PEE e PROPEE da ANEEL e das normas cabíveis, utilizando como critérios a redução da energia consumida, da demanda na ponta e a Relação Custo-Benefício (RCB) que deve ser igual ou menor do que 0,8. Com objetivo de embasar os resultados teóricos foi realizada análise da economia de energia de um sistema que já teve suas luminárias substituídas na Avenida Santos Dumont em Joinville para LED, por meio de informações do sistema anterior e dados de consumo do sistema atual. Os resultados obtidos foram satisfatórios, demonstrando que a eficiência energética na iluminação pública é promissora e deve ser explorada, uma vez que beneficia toda sociedade com uma iluminação de melhor qualidade aliada à redução do consumo de energia e de recursos destinados a manutenção dos sistemas, visto que a vida útil destas novas luminárias é mais elevada.

Palavras-Chave: Eficiência Energética; PEE; Iluminação Pública; LED.

ABSTRACT

Due to the high demand for electric energy, the search for efficiency in equipment and processes in different sectors is already a reality. Thus, the National Electric Energy Agency (ANEEL) has been launching programs such as PROCEL and PEE to stimulate the development of projects and products aimed at energy efficiency. In this work, the feasibility analysis of the replacement of lighting fixtures in the Costa e Silva neighborhood, in the city of Joinville, Santa Catarina, was carried out, following the steps for preparing an Energy Efficiency Project according to the guidelines of the PEE and PROPEE of ANEEL and the applicable standards, using as criteria the reduction of energy consumed, demand at the end and the Cost-Benefit Ratio (RCB) which must be equal to or less than 0.8. In order to support the theoretical results, an analysis was made of the energy savings of a system that has already had its luminaires replaced on Avenue Santos Dumont in Joinville, using information from the previous system and consumption data from the current system. The results obtained were satisfactory, demonstrating that energy efficiency in public lighting is interesting and should be explored, since it benefits the whole society with better quality lighting combined with reduced energy consumption and resources for the maintenance of systems, due to the useful life of these new luminaires being higher.

Keywords: Energy Efficiency; Energy efficiency program; Street lighting; LED.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Representação do Fluxo Luminoso..... | 18 |
| Figura 2 - Representação da Iluminância..... | 19 |
| Figura 3 - Representação da Intensidade Luminosa..... | 19 |
| Figura 4 - Representação da Luminância. | 20 |
| Figura 5 - Temperaturas de Cor Correlatas plotadas no Diagrama de Cromaticidade da CIE. | 21 |
| Figura 6 - Diagrama Sistema de Iluminação Pública..... | 27 |
| Figura 7 - Tipos de lâmpadas mais comuns..... | 28 |
| Figura 8 - Evolução das tecnologias de iluminação pública nos parques nacionais. | 29 |
| Figura 9 - Evolução da eficácia luminosa das diferentes tecnologias de iluminação..... | 30 |
| Figura 10 - Matriz Energética Mundial em 2018..... | 31 |
| Figura 11 - Luminárias para Iluminação Pública. | 31 |
| Figura 12 - Luminária LED Philips..... | 32 |
| Figura 13 - Reator externo. | 33 |
| Figura 14 - Driver. | 33 |
| Figura 15 - Relé fotoelétrico e base para instalação. | 34 |
| Figura 16 - Postes e colunas utilizados na iluminação pública..... | 34 |
| Figura 17 - Distribuição Longitudinal da Intensidade Luminosa. | 37 |
| Figura 18 - Distribuição Transversal da Intensidade Luminosa..... | 38 |
| Figura 19 - Representação do fluxo luminoso emitido no meio externo..... | 38 |
| Figura 20 - Trajeto da Av. Santos Dumont aplicado o retrofit..... | 42 |
| Figura 21 - Etapas PEE..... | 44 |
| Figura 22 - Módulos PEE. | 44 |
| Figura 23 - Ruas escolhidas para estudo..... | 54 |
| Figura 24 - Tipo de projeto no DIALux Evo. | 62 |
| Figura 25 - Classificação da via. | 62 |
| Figura 26 - Configuração da distribuição das luminárias..... | 63 |
| Figura 27 - Critérios a serem atendidos para classificação V4 na simulação. | 63 |
| Figura 28 - Luminárias com lâmpada vapor de sódio instalada. | 70 |
| Figura 29 - Luminária LED escolhida para substituição. | 72 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Informações a serem enviadas para ANEEL. | 46 |
| Tabela 2 - Características Lâmpadas analisadas..... | 55 |
| Tabela 3 - Consumo estimado do trajeto anterior a troca. | 56 |
| Tabela 4 - Consumo medido do trajeto posterior a troca. | 57 |
| Tabela 5 - Tráfego motorizado. | 59 |
| Tabela 6 - Tráfego de pedestres ^a | 59 |
| Tabela 7 - Classes de iluminação para cada tipo de via. | 60 |
| Tabela 8 - Requisitos de iluminância e uniformidade. | 61 |
| Tabela 9 - Consumo de energia dos sistemas. | 64 |
| Tabela 10 - Demanda média na ponta dos sistemas. | 65 |
| Tabela 11 - Benefício anualizado do projeto. | 66 |
| Tabela 12 - Custo dos equipamentos do projeto..... | 66 |
| Tabela 13 - Custos totais do projeto..... | 67 |
| Tabela 14 - Custo anualizado do projeto..... | 67 |
| Tabela 15 - Características Lâmpadas Vapor de Sódio Avenida Santos Dumont..... | 68 |
| Tabela 16 - Características Luminárias LED Avenida Santos Dumont. | 69 |
| Tabela 17 - Consumo estimado do trajeto com lâmpadas vapor de sódio 250W..... | 69 |
| Tabela 18 - Consumo medido do trajeto com lâmpadas LED 160W..... | 70 |
| Tabela 19 - Características do sistema atual. | 71 |
| Tabela 20 - Características do sistema proposto. | 72 |
| Tabela 21 - Consumo de energia dos sistemas atual e proposto..... | 73 |
| Tabela 22 - Demanda média na ponta dos sistemas atual e proposto..... | 74 |
| Tabela 23 - Benefício anualizado..... | 75 |
| Tabela 24 - Custo dos equipamentos..... | 75 |
| Tabela 25 - Custos totais. | 76 |
| Tabela 26 - Custo anualizado..... | 76 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|-----------|--|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| ANEEL | Agência Nacional de Energia Elétrica |
| CED | Custo Evitado de Demanda |
| CEE | Custo da Energia Evitada |
| CELESC | Centrais Elétricas de Santa Catarina S.A. |
| COSIP/CIP | Contribuição para Custeio do Serviço de Iluminação Pública |
| EE | Eficiência Energética |
| FRCu | Fator de Recuperação do Capital |
| HID | <i>High Intensity Discharge</i> |
| IES | <i>Illumination Engeneering Society</i> |
| IP | Iluminação Pública |
| IRC | Índice de Reprodução de Cor |
| K | Kelvin - Unidade de medida de temperatura |
| LED | Diodo Emissor de Luz |
| NBR | Norma Técnica Brasileira |
| P | Potência ativa |
| PEE | Programa de Eficiência Energética |
| PROCEL | Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica |
| PROPEE | Procedimentos do Programa de Eficiência Energética |
| RCB | Relação Custo-Benefício |
| RDP | Relação de Demanda na Ponta |
| S | Potência Aparente |
| SI | Sistema Internacional de Unidades |
| THD | Distorção Harmônica Total |

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1 INTRODUÇÃO | 15 |
| 1.1 Justificativa | 16 |
| 1.2 Objetivos | 17 |
| 1.2.1 Objetivo geral | 17 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 17 |
| 2.1 Iluminação | 17 |
| 2.1.1 Características e Grandezas Fotométricas | 18 |
| 2.1.2 Características Cromáticas | 20 |
| 2.1.3 Desempenho das Fontes Luminosas | 22 |
| 2.1.4 Desempenho dos Sistemas de Iluminação | 23 |
| 2.2 Iluminação pública | 25 |
| 2.2.1 O Sistema de Iluminação Pública | 26 |
| 2.2.2 Componentes Utilizados na Iluminação Pública | 27 |
| 2.2.2.1 Lâmpadas | 27 |
| 2.2.2.2 Luminárias | 31 |
| 2.2.2.3 Componentes Elétricos e Eletrônicos | 32 |
| 2.2.2.4 Sistemas de Controle | 34 |
| 2.2.2.5 Componentes Estruturais | 34 |
| 2.3 Regulamentação e Critérios Básicos | 35 |
| 2.3.1 Visibilidade e Uniformidade | 36 |
| 2.3.2 Distribuição espacial da luz | 36 |
| 2.3.3 Poluição Luminosa | 38 |
| 2.4 Iluminação Pública em Santa Catarina | 39 |
| 2.4.1 Centrais Elétricas de Santa Catarina | 39 |
| 2.5 Eficiência energética. | 40 |
| 3 METODOLOGIA | 41 |
| 3.1 Análise da modernização da Avenida Santos Dumont | 42 |
| 3.2 Projeto de Eficiência Energética | 43 |
| 3.2.1 Módulo 4 – Tipologias de Projetos | 45 |
| 3.2.2 Módulo 7 – Cálculo da Viabilidade | 48 |
| 3.3 Região delimitada para estudo | 54 |
| 4 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO | 55 |
| 4.1 Avenida Santos Dumont | 55 |
| 4.1.1 Coleta de dados do sistema analisado | 55 |
| 4.1.1.1 Sistema antes da troca | 55 |
| 4.1.1.2 Sistema após a troca | 55 |
| 4.1.2 Análise do consumo anterior e posterior a troca | 56 |
| 4.2 Projeto de Eficiência Energética em região do bairro Costa e Silva | 57 |

| | |
|---|-----------|
| 4.2.1 Coleta de dados gerais do sistema atual | 57 |
| 4.2.2 Coleta de dados da luminária LED | 57 |
| 4.2.3 Simulações da luminária LED | 58 |
| 4.2.3.1 Classificação das vias | 58 |
| 4.2.3.2 Configuração do simulador DIALux Evo | 61 |
| 4.2.4 Aplicação do Projeto de Eficiência Energética da CELESC | 64 |
| 5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS | 68 |
| 5.1 Resultados da Avenida Santos Dumont | 68 |
| 5.2 Projeto de Eficiência Energética para Costa e Silva | 70 |
| 5.2.1 Análise da viabilidade | 74 |
| 6 CONCLUSÃO | 77 |
| REFERÊNCIAS | 79 |
| ANEXO A | 83 |
| APÊNDICE A | 84 |

1 INTRODUÇÃO

A luz é essencial na vida atualmente. Desde a descoberta do fogo as fontes luminosas vem sofrendo evoluções e se tornando mais eficientes. A evolução humana está diretamente ligada à utilização da luz natural e artificial, uma vez que a visão está relacionada ao desenvolvimento do cérebro desde as formas de vida mais primitivas. Um dos fatores utilizados para avaliar o desenvolvimento de uma sociedade é o nível de iluminação disponível (VASCONCELLOS & LIMBERGER, 2013). Se tratando da iluminação pública a ausência da mesma nas vias representa perigo e transmite a sensação de falta de segurança. Especialmente durante a noite, a iluminação é fator determinante para os sentidos de localização, tanto para os condutores de veículos quanto para pedestres.

A iluminação pública (IP) é o serviço que tem por objetivo prover de luz ou claridade artificial os logradouros públicos. Este serviço tem influência direta na vida de todo cidadão, uma vez que contribui para a segurança da população, para o tráfego de veículos e viabiliza atividades de comércio, turismo, lazer, etc. (CASA, 1999).

Com a evolução da tecnologia tem-se uma maior exigência, de forma que não basta que os sistemas de iluminação pública forneça apenas uma iluminação suficiente e que garanta a segurança e visibilidade, é preciso que os sistemas acompanhem os desenvolvimentos tecnológicos visando a redução de consumo, consequentemente reduzindo os custos despendidos com iluminação, garantindo melhor eficiência energética além da melhora em questões visuais.

Dentre toda a energia elétrica gerada no mundo, aproximadamente 30% é destinada à produção de iluminação artificial (POLONSKII, 2008), isso faz com que ações voltadas à economia de energia no setor de iluminação acarretem em significativos impactos econômicos e ambientais.

Diante deste cenário a iluminação por meio dos dispositivos de LED vem ganhando destaque e alterando o conceito de iluminação, visto que de forma oposta às lâmpadas utilizadas inicialmente, passa-se a existir um conjunto de LEDs que de forma direcionada são responsáveis por emitir o fluxo luminoso. Assim, é possível obter os mesmos níveis de iluminância de luminárias de descarga por exemplo, com LED que possuem fluxo luminoso e potência mais baixos.

1.1 Justificativa

Hoje a iluminação pública possui grande impacto no desenvolvimento tanto social quanto econômico, e tem como principal objetivo prover luz aos logradouros públicos, sendo de extrema importância para a segurança das cidades com relação à criminalidade e no tráfego de veículos e pedestres, e possibilitando à prática de atividades noturnas, podendo também movimentar a economia local.

É evidente a falta de recursos em alguns municípios para tratar a questão da iluminação pública. Com isso, tem-se a estagnação do sistema por completo, ocasionando expansões não planejadas e gestão ineficiente. Nos parques já existentes, com o passar do tempo também ocorrem desgastes dos dispositivos que compõem o sistema de iluminação pública, fato esperado, visto que tais equipamentos possuem um período de vida útil. Com isso, se faz necessária a troca destes itens, sendo essenciais serviços de manutenção tanto corretiva quanto preventiva.

A modernização dos parques existentes, juntamente com a implantação de novas tecnologias mais avançadas e eficientes, culmina em uma melhor qualidade do serviço prestado aos municípios, além da redução no consumo de energia elétrica. Cerca de 17% do consumo total de energia elétrica no Brasil está associado a produção de luz (KOZLOFF et al., 2001), sendo que a iluminação pública representa em torno de 3,5% do consumo total deste tipo de energia, portanto ações que promovam a redução da demanda elétrica por parte da iluminação pública geram reduções expressivas nos custos.

Com isso a iluminação através de LED vem ganhando destaque nesse setor, permitindo um controle através de dimerização, sendo compatível com novas tecnologias como os sistemas de telegestão (gerenciamento remoto). Embora ainda existam questionamentos com relação ao real benefício do emprego dessa nova tecnologia, em diversos setores é evidente a demanda de atualização por meio da utilização de equipamentos mais eficientes, e nesse sentido estudos como este tem como foco trazer novas análises destes sistemas a fim de acrescentar diferentes perspectivas aos já existentes, utilizando o programa de eficiência energética da ANEEL e seus procedimentos como base para a análise de viabilidade da aplicação de retrofit em sistemas antigos.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem com objetivo principal a análise e estudo da realização de um projeto de eficiência energética voltado à iluminação pública na cidade de Joinville - SC, com base na NBR 5101 de iluminação pública, na NBR 15129 de luminárias públicas, no Programa de Eficiência Energética (PEE) e nos Procedimentos do Programa de Eficiência Energética (PROPEE).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Iluminação

O discernimento de espaço e do ambiente noturno vem de um alicerce de percepções obtidas durante o período diurno, embora em muitos casos a luz não teve o destaque merecido mesmo que tenha estado presente.

Define-se LUZ como a energia radiante que é capaz de excitar a retina do olho humano e produzir, por consequência uma sensação visual, desencadeando o processo visual. A compreensão completa da luz implica não somente o conhecimento das leis da física sobre sua natureza como também as respostas do ser humano perante esse fenômeno. (GODOY, 2015, p. 28).

A iluminação foi, é e sempre será de extrema importância para a percepção de qualquer ambiente, interno ou externo. De acordo com Walter Kohler “O homem como ser predominantemente visual é mais fortemente afetado pela luz do que por qualquer outra sensação” (VIANNA, 2001, p 27). Sendo assim, a luz desde a antiguidade proporciona ao homem perceber e observar o meio no qual se encontra. Entretanto, a luz natural é instável, podendo obter diferentes percepções do mesmo local alterando o horário e posicionamento em relação ao sol, além de diversas propriedades da iluminação como temperatura de cor e luminância estarem variando de acordo com o dia e o período do ano.

A luz e a energia ao longo dos tempos foram elementos que auxiliaram no

desenvolvimento exponencial da tecnologia e facilitaram as atividades sociais. Sendo pouco provável e até impossível a reprodução da iluminação solar em períodos noturnos, a iluminação artificial trás novas perspectivas a este cenário, e hoje a iluminação faz parte do cotidiano, seja nos períodos diurnos através da iluminação natural, e em certos ambientes pela iluminação artificial, que está amplamente presente no período noturno.

2.1.1 Características e Grandezas Fotométricas

a. Fluxo luminoso:

É a quantidade de energia luminosa emitida por uma fonte de luz em todas as direções, ou seja, o total de saída de luz de uma lâmpada (COPEL, 2012) e (EDP, 2016). A sua unidade de medida pelo SI é o Lúmen [lm] definido como “fluxo luminoso emitido no interior de um ângulo sólido igual a um esferorradiano, por uma fonte luminosa puntiforme de intensidade invariável e igual a uma candela, de mesmo valor em todas as direções” (MOREIRA, 1999). A ilustração deste conceito está representada na Figura 1.

Figura 1 - Representação do Fluxo Luminoso.



Fonte: Everlight.

b. Iluminância:

Representa o fluxo luminoso que atinge uma superfície por unidade de área [m²] (EDP, 2016) e (PROCEL, 2011). A unidade de medida é o Lux [lx], onde um lux é

equivalente a um lúmen por metro quadrado [lm/m^2], e é medido através de um aparelho denominado luxímetro. Na Figura 2 encontra-se a representação da Iluminância.

Figura 2 - Representação da Iluminância.



Fonte: Everlight.

c. Intensidade Luminosa:

É definida como a parcela do fluxo luminoso em uma direção, partindo de uma fonte de luz contida num ângulo sólido (EDP, 2016). A unidade de medida para a intensidade luminosa é a Candela [cd]. A Figura 3 ilustra a representação gráfica da intensidade luminosa.

Figura 3 - Representação da Intensidade Luminosa.



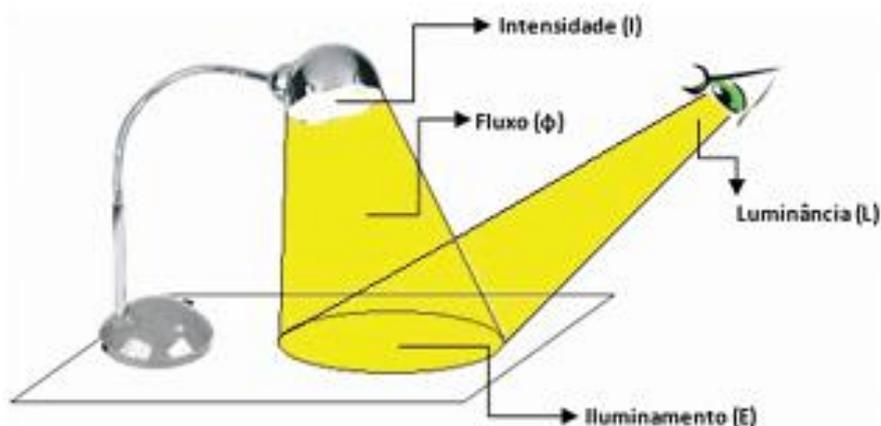
Fonte: Everlight.

d. Luminância:

Consiste na intensidade luminosa que é refletida pela superfície e percebida pelo

observador. De acordo com PROCEL (2011) “é dada como a relação entre a intensidade na direção considerada e a área aparente da superfície real ou imaginária de onde provém o fluxo luminoso”. A sua unidade de medida é a candela por metro quadrado [cd/m^2]. A Figura 4 ilustra o conceito da luminância.

Figura 4 - Representação da Luminância.



Fonte: Pedroso (2016).

e. Eficiência Luminosa:

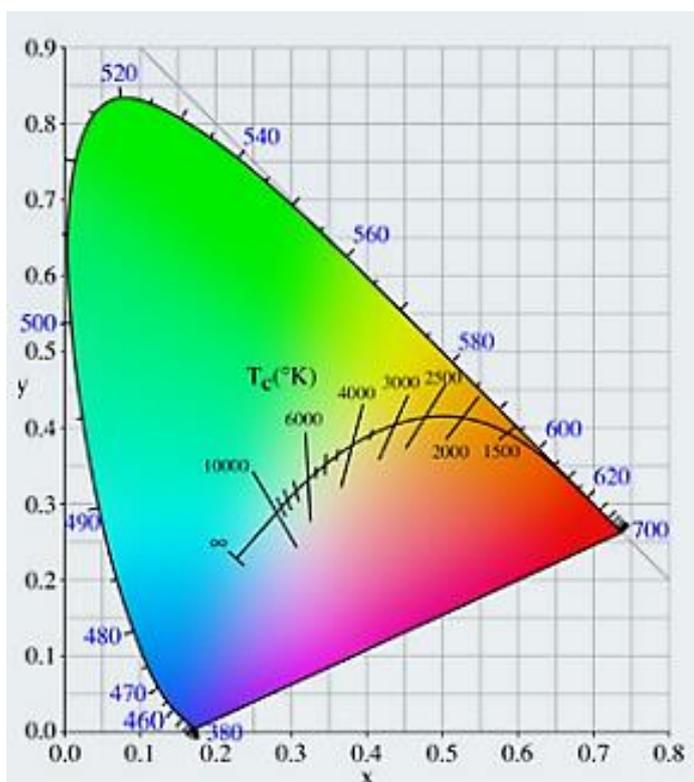
Se trata da relação entre o fluxo luminoso emitido e a energia elétrica consumida por unidade de tempo (potência) de uma fonte de luz (PROCEL, 2011), de forma que quanto maior for a eficiência luminosa de uma lâmpada, menor será o consumo de energia da mesma. Sua unidade é o Lúmens por Watts [lm/W].

2.1.2 Características Cromáticas

a. Temperatura de Cor Correlata (TCC):

É definida como a temperatura de cor medida num corpo negro (radiador de Plank), e é realizada pela adição de calor causando a incandescência deste corpo até sua fusão. A partir deste experimento foi definida a escala de temperaturas de cor, onde sua unidade de medida é o Kelvin (K).

Figura 5 - Temperaturas de Cor Correlatas plotadas no Diagrama de Cromaticidade da CIE.



Fonte: EDP (2016).

Na Figura 5 é possível visualizar algumas das temperaturas de cor correlatas relacionadas às suas respectivas cores aparentes. Segundo PROCEL (2011), a temperatura de cor está relacionada à tonalidade de cor que apresenta no ambiente, além das tonalidades mais quentes tornarem o ambiente aconchegante e as mais frias são mais estimulantes. A temperatura de cor das fontes luminosas artificiais pode ficar entre 2.000K (quente) e acima de 10.000K (frias).

b. Índice de Reprodução de Cor (IRC):

Corresponde a descrição da aparência das superfícies iluminadas pela fonte de luz (IEA, 2006). Indica a capacidade que uma lâmpada possui em manter as cores dos objetos o mais próximo das cores quando o mesmo é exposto à luz do dia. É medida através da porcentagem (%), em uma escala de 0 a 100. Quanto mais alto for o IRC mais próximo da reprodução de cores em luz natural a percepção será, ou seja, será mais fiel às cores reais dos objetos.

2.1.3 Desempenho das Fontes Luminosas

Para definir o desempenho das diversas fontes luminosas alguns critérios são utilizados. Segue os principais.

a. Eficiência Luminosa

Conforme já citado, a eficiência ou eficácia luminosa é a razão entre o fluxo luminoso (Lumens) emitido pela lâmpada, pela energia elétrica por ela consumida no tempo. É expressa por (1), sendo sua unidade de medida Lumens por Watt (lm/W).

$$\eta = \phi/P \quad (1)$$

Onde: η - eficácia luminosa de uma fonte;

ϕ - fluxo luminoso total emitido pela fonte;

P - potência consumida.

A economia obtida através de uma fonte luminosa está diretamente ligada a sua eficiência luminosa, uma vez que, quanto maior a eficiência luminosa de uma lâmpada menor será o consumo de energia elétrica para fornecer uma quantidade de luz. Porém, a eficiência luminosa de uma lâmpada difere da eficiência de um sistema de iluminação completo, uma vez que os demais componentes do sistema consomem energia, podendo reduzir a eficiência quando analisado o todo.

b. Fator de Depreciação

A depreciação da capacidade de iluminância das lâmpadas é reduzida ao longo de sua operação, além do próprio tempo de utilização, ela ocorre por conta do acúmulo de resíduos na lâmpada. A depreciação é um fenômeno inerente a todas as lâmpadas elétricas (PROCEL, 2011), sua unidade é a porcentagem (%).

Tendo conhecimento que as lâmpadas vão perder sua capacidade de iluminação, e para que os critérios de iluminação em um ambiente sejam atendidos, durante a elaboração de projetos luminotécnicos para dimensionamento e cálculo através do método do fluxo luminoso é determinada uma porcentagem em que o fluxo

luminoso é mantido após um tempo de vida útil de determinada lâmpada. Com isso o fator de depreciação é obtido através da razão entre o fluxo luminoso no fim do tempo determinado, e o fluxo luminoso do início de funcionamento, o que acaba por definir um nível de iluminação no início maior do que o necessário, para que ao longo de sua utilização os níveis de iluminação permaneçam adequados de acordo com as normativas aplicadas ao sistema.

c. Vida Útil

Toda lâmpada possui um período total a qual é estimado que ela opere, até o momento em que ela vai parar de funcionar ou seu fluxo luminoso será reduzido, com base em uma taxa estipulada por critérios pré estabelecidos por normas técnicas (PROCEL, 2011). Tem como unidade de medida a hora (h).

Embora um mesmo tipo de lâmpada possa ter variações em tempo de vida, este valor pode variar de acordo com os diferentes fabricantes, mas se baseiam em dois indicadores que têm conformidade com metodologia estabelecida por norma (PROCEL, 2011), são eles: Vida Mediana (B50) que corresponde ao tempo em que 50% de um lote de lâmpadas ensaiadas deixa de emitir fluxo luminoso, e Vida Útil (L70) que é determinado por quantas horas se tinge 70% do fluxo luminoso inicial do conjunto ensaiado.

Dentre os indicadores de falha também tem-se a curva de mortalidade, que é representada pela porcentagem de lâmpadas que continuam operando após um período determinado. Para lâmpadas fluorescentes e HID, o período de operação média e a frequência de ativação e desativação da lâmpada tem influência na curva de mortalidade.

2.1.4 Desempenho dos Sistemas de Iluminação

Além do desempenho das lâmpadas de forma isolada, também deve ser considerado o desempenho do sistema de iluminação, uma vez que estes têm influência sobre a eficiência final do conjunto.

a. Fator de Fluxo

O fator de fluxo define quanto de fluxo luminoso a lâmpada fornecerá. Este fator depende diretamente do tipo de reator e é obtido através de (2), sendo sua unidade de medida a porcentagem (%).

$$BF = \frac{\phi_{obtido}}{\phi_{nominal}} \quad (2)$$

Onde: ϕ_{obtido} - fluxo luminoso total emitido desconsiderando as perdas do reator [lm];
 $\phi_{nominal}$ - fluxo luminoso sem perdas do reator de acordo com fabricante[lm].

b. Fator de Potência

O Fator de Potência (FP) é definido por um valor adimensional, variando entre 0 e 1, indicando quanto da energia fornecida pela fonte é consumida pelo equipamento, ou seja, determina a quantidade de potência que o equipamento consome da fonte, e tem influência direta em como o reator utiliza a energia de entrada.

É definido pela razão entre a potência ativa (P) e a potência aparente (S) de um circuito. Quanto mais próximo a zero, indica que a maior parte da energia consumida é reativa, necessária para o funcionamento de elementos armazenadores de energia, como indutores e capacitores, mas que deve ser compensada, pois gera perdas e diversas perturbações no sistema elétrico (COPEL, 2012).

c. Distorção Harmônica Total

A Distorção Harmônica Total (THD – *Total Harmonic Distortion*) é caracterizada pela relação entre correntes alternadas causadas por equipamentos de alta frequência com sua componente fundamental, expresso em termos percentuais. Uma corrente com elevado THD pode provocar distorções nas formas de onda da corrente e tensão do sistema elétrico, reduzindo a qualidade da energia entregue e prejudicando o funcionamento de outros equipamentos conectados à mesma rede (COPEL, 2012).

2.2 Iluminação pública

A iluminação possui um papel fundamental no que diz respeito ao desenvolvimento. Já há indícios de uso da iluminação artificial por meio da utilização de óleo nos povos antigos e séculos mais tarde, o óleo de baleia passou a ser empregado em diversos países (ROSITO, 2009). Estima-se que a iluminação pública tem sua origem por volta do século XV na Inglaterra, em decorrência de solicitações a fim de combater a criminalidade (SANTANA, 2010).

No Brasil o início da Iluminação Pública ocorreu no século XVIII, e durante o século XIX as lâmpadas a gás tiveram uma utilização em grande escala. A instalação de 100 luminárias a óleo de azeite no Rio de Janeiro remete aos primórdios da iluminação pública no Brasil. A utilização de postes para iluminação pública alimentada a óleo não era uma solução prática (SANTANA, 2010), uma vez que as manutenções eram difíceis e os escravos eram responsáveis por limpar as luminárias, o que os deixavam sempre sujos de óleo e fuligem.

Segundo Santana (2010), durante a revolução industrial, inventores e empresários ingleses estavam buscando tornar seus processos produtivos mais eficientes, culminando na descoberta do carvão de pedra, o qual durante sua destilação gerava diversos compostos de carbono, com alto poder calorífico e características iluminantes. Com isso, em 1854 a Iluminação pública a gás foi inaugurada, obra realizada por uma companhia do Visconde de Mauá, tornando o Rio de Janeiro a primeira cidade no Brasil a ter iluminação pública a gás. Algum tempo depois, em 1874, a cidade de Porto Alegre recebeu postes de iluminação pública a gás em virtude da inauguração da usina do gasômetro.

A energia elétrica chegou ao Brasil em 1879 através de Dom Pedro II, e em meados do século XIX teve suas primeiras funcionalidades aplicadas no transporte, iluminação pública e na indústria. Com a operação de uma usina elétrica na região em 1887, Porto Alegre foi a primeira a receber serviço municipal de iluminação elétrica (ROSITO, 2009). Assim com a utilização da eletricidade a iluminação pública começa a passar por processos de inovação, incluindo a utilização das lâmpadas de descarga e equipamentos mais eficientes. Ainda no século XX a evolução da geração de energia é acentuada, dessa forma contribuindo também para a evolução da iluminação pública.

Os equipamentos utilizados inicialmente na iluminação pública eram importados,

porém com os avanços e a utilização da iluminação a gás e elétrica a utilização de postes para otimizar a iluminação dos locais passou a ser essencial, e com isso os equipamentos para iluminação pública passaram a ser fabricados no Brasil. A *General Electric Company* (GE) passou a fabricar produtos elétricos no Brasil após a construção de sua primeira fábrica de lâmpadas em 1921. Com o desenvolvimento a todo vapor oito anos após a primeira inauguração a GE inaugura sua fábrica de medidores de energia elétrica, e posteriormente a fábrica de transformadores de distribuição em 1930, a fábrica de transformadores de força em 1936, a produção automática de bulbo de vidros em 1938, as lâmpadas a vapor de mercúrio em 1965 e a lâmpada vapor de sódio em alta pressão em 1978.

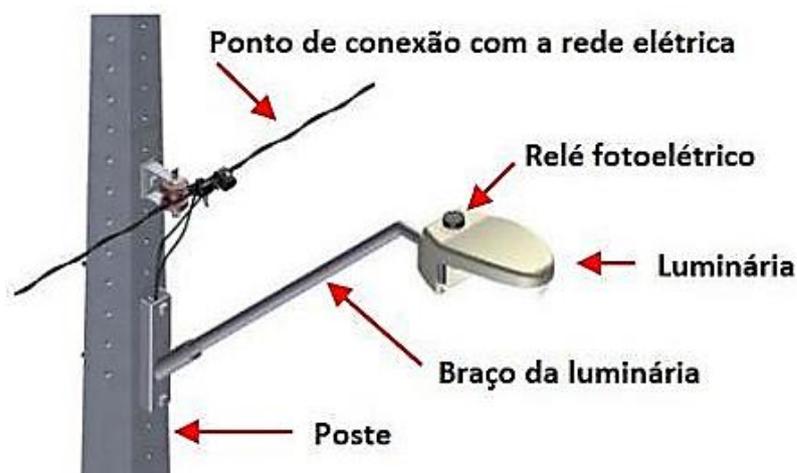
A invenção da lâmpada elétrica tem papel fundamental na evolução da iluminação, iniciando através das incandescentes, depois com as lâmpadas vapor de mercúrio, vapor de sódio, multivapores metálicos, passando pelas lâmpadas de indução e chegando nos LEDs. É visível a mudança nos conceitos que a iluminação vem sofrendo. É impossível hoje imaginar uma cidade sem uma infraestrutura, mesmo que básica, de iluminação pública, uma vez que a mesma contribui para a melhoria da qualidade de vida da população, propicia a utilização de espaços públicos durante períodos que antes não eram utilizados, e tendo participação também no fluxo do comércio e turismo.

2.2.1 O Sistema de Iluminação Pública

A iluminação pública tem grande influência no desenvolvimento das cidades. Através dela é possível proporcionar segurança e bem-estar aos cidadãos aumentando os níveis de visibilidade durante a noite. Embora possa também influenciar na saúde e conforto da população, por meio de poluição luminosa quando não executada da maneira adequada, ainda assim promove segurança do tráfego tanto veicular quanto de pedestres, além de auxiliar na prevenção da criminalidade e no desenvolvimento da economia, visto que, estabelecimentos são beneficiados com um maior fluxo de pessoas circulando durante o período noturno.

A iluminação pública está distribuída pelos mais de 5 mil municípios brasileiros, formando um grande parque, exigindo ainda, uma grande diversidade de sistemas, tecnologias, níveis de atendimento e de qualidade dos serviços prestados (SILVA, 2006).

Figura 6 - Diagrama Sistema de Iluminação Pública.



Fonte: Muse (2019).

O sistema de iluminação pública não se trata apenas de fontes de luz, outros equipamentos o compõem permitindo que as necessidades da iluminação urbana sejam atendidas. Além das lâmpadas, têm-se as luminárias responsáveis por abrigar as mesmas e auxiliar na dispersão da luz no espaço, e os equipamentos elétricos, eletrônicos e de controle que são responsáveis por acionar, controlar e regular o sistema. Para sustentar todo o sistema é necessária uma estrutura que garanta a conexão com a rede elétrica, além de promover uma distribuição correta do fluxo luminoso. Todo este conjunto que caracteriza um sistema de iluminação pública está ilustrado na Figura 6.

2.2.2 Componentes Utilizados na Iluminação Pública

Novas tecnologias vêm sendo empregadas na iluminação pública, entretanto inicialmente serão descritos os principais componentes presentes em um sistema de IP, bem como as categorias de lâmpadas tipicamente utilizadas.

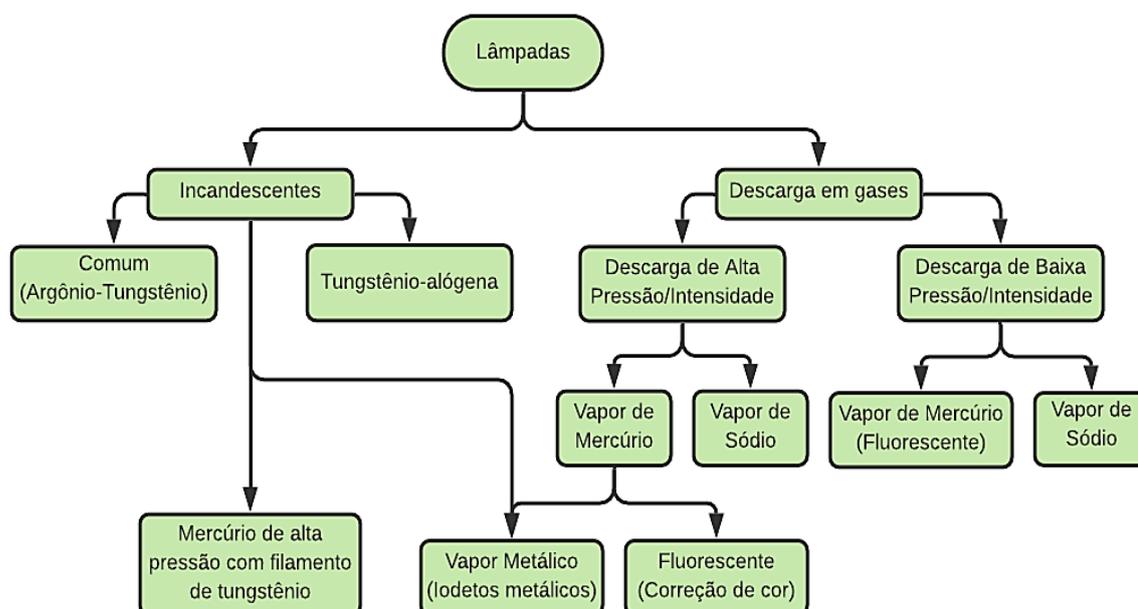
2.2.2.1 Lâmpadas

A lâmpada pode ser considerada como o equipamento que possui maior influência sobre as características de um ponto luminoso. Os diferentes tipos de lâmpadas presentes no mercado tem sua construção voltada às aplicações específicas. Em se tratando da iluminação pública, as lâmpadas mais utilizadas

mundialmente são as de Descarga de Alta Intensidade (HID).

No acionamento das lâmpadas de Descarga de Alta Intensidade (HID) ocorre a ionização de um gás inerte, na grande maioria dos casos o gás é o argônio, o que provoca um aquecimento no bulbo da lâmpada de forma a evaporar o mercúrio resultando em uma luz amarelada pelo deslocamento dos elétrons. Posteriormente ocorre a ionização do mercúrio e o choque entre os elétrons livres com o argônio o que produz uma luz azulada, e a junção das duas luzes geradas é o resultado encontrado para este tipo de lâmpada. A Figura 7 traz a representação, por meio de um organograma, das lâmpadas mais utilizadas para iluminação.

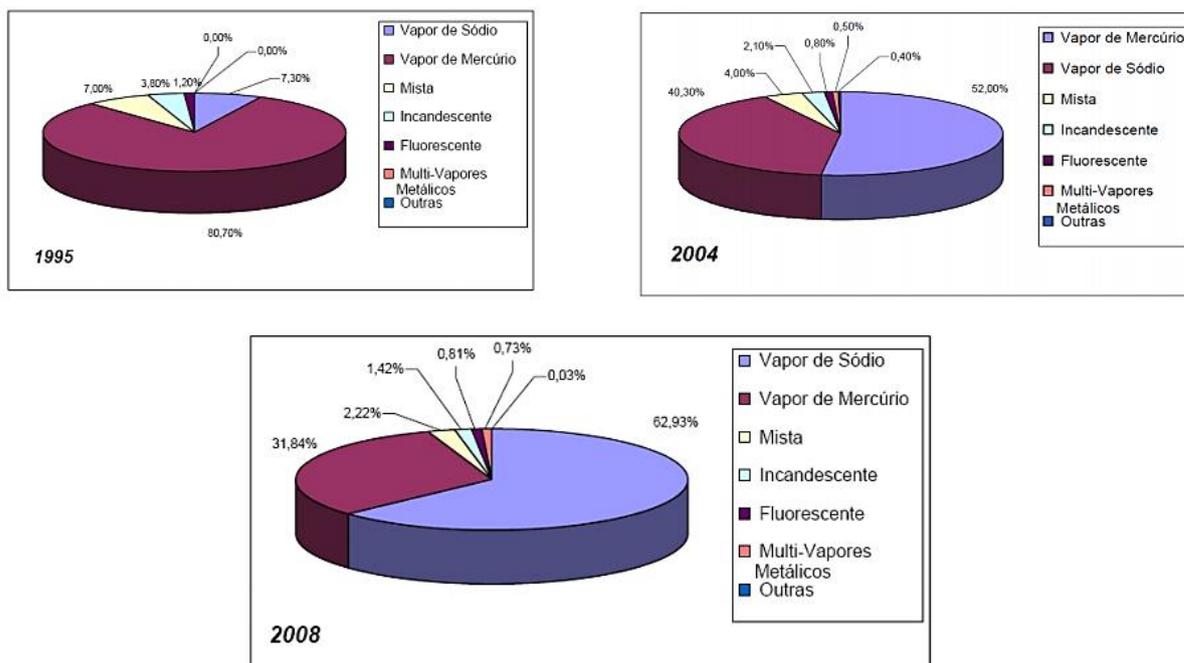
Figura 7 - Tipos de lâmpadas mais comuns.



Fonte: Elaboração própria baseada em Muse (2019).

Por meio da Figura 8 é possível verificar a evolução das tecnologias empregadas na iluminação pública nacional, onde fica evidente que a tecnologia mais empregada é a lâmpada de vapor de sódio em alta pressão, precedida da lâmpada de vapor de mercúrio. Essa vasta utilização das lâmpadas de vapor de sódio se dá por conta da sua eficiência luminosa (em média 120lm/W) e pela vida útil elevada comparada a outras tecnologias já consolidadas, podendo chegar a 32.000 horas (SOARES, 2012).

Figura 8 - Evolução das tecnologias de iluminação pública nos parques nacionais.



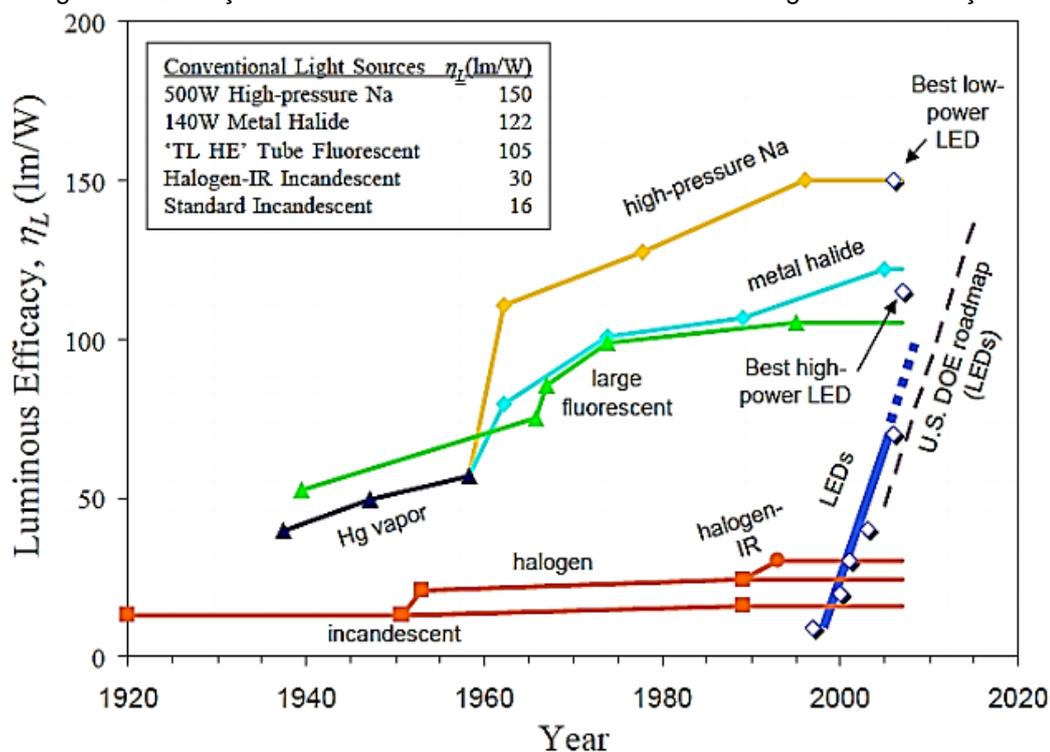
Fonte: SOARES (2012).

Por conta de sua irradiação em todas as direções a lâmpada de sódio precisa de uma luminária em que o corpo refletor distribui espacialmente o fluxo luminoso emitido pela lâmpada, dessa forma como grande parte da radiação intrínseca a lâmpada precisa ser refletido, ocorre a perda de eficiência do sistema. Com isso o rendimento destes tipo de luminária fica em torno de 70% a 85%.

Os sistemas de iluminação tem passado por muitos avanços nos últimos tempos com a introdução da Eletrônica nos processos de acionamento e melhoria da eficiência energética. A preocupação por um consumo de forma mais sustentável dos recursos vem ganhando destaque, atualmente como consequência do desequilíbrio ambiental que vem sendo vivenciado.

Diante deste cenário uma tecnologia que vem se destacando são os LEDs. Desde 1962, ano em que a *General Electric* descobriu essa nova tecnologia, os LEDs se restringiam apenas às cores vermelho, verde e amarelo, tendo sua aplicabilidade limitada a indicadores e sinalizadores. Por volta da década de 90 com o surgimento do LED na azul, tornou-se possível a composição de diversas cores para o desenvolvimento da emissão de luz branca, fazendo com que o LED se tornasse presente em diversos sistemas de iluminação.

Figura 9 - Evolução da eficácia luminosa das diferentes tecnologias de iluminação.

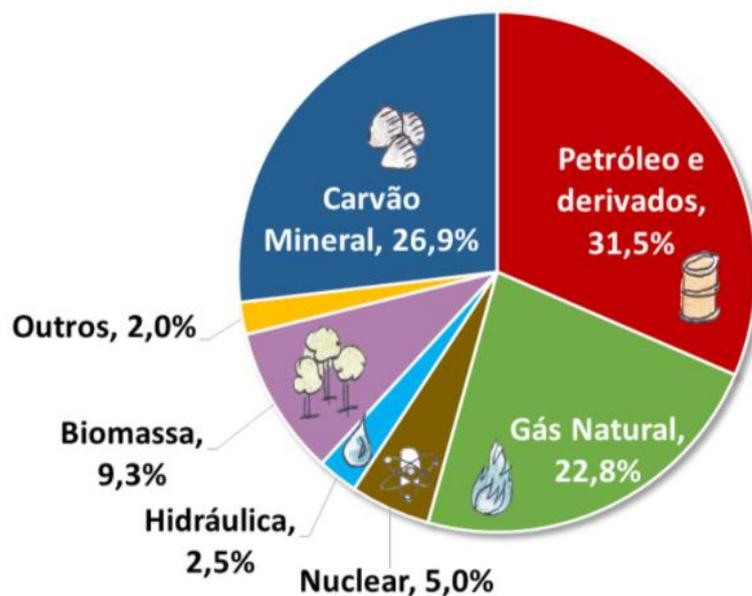


Fonte: CRAFORD (2007).

O LED emite luz através da liberação de fótons quando uma corrente elétrica é conduzida através deste componente. Dentre suas vantagens estão sua vida útil média de 50000 horas, alta eficácia luminosa, elevado IRC, níveis de cores flexíveis e possibilidade de dimerização e integração com dispositivos de controle inteligente. A Figura 9 demonstra a evolução da eficácia luminosa em diferentes tecnologias ao longo dos anos. As lâmpadas de LED não possuem elementos químicos como mercúrio em sua construção, contribuindo também na redução dos resíduos sólidos poluentes, além de ser constituído de poucas matérias, e em sua maioria sendo alumínio, material que pode ser reprocessado de forma mais fácil do que outros tipos de materiais.

Levando em consideração a questão ambiental, onde a utilização de combustíveis fósseis ocupa o primeiro lugar na matriz energética mundial de 2018, conforme informação da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2021) e Figura 10, a redução do consumo de energia elétrica está intimamente ligada à redução da poluição da atmosfera. Dessa forma a utilização de dispositivos de estado sólido trará benefícios tanto na questão econômica quanto na ambiental, ocasionando em um grande desenvolvimento da tecnologia LED voltada para a iluminação pública atualmente.

Figura 10 - Matriz Energética Mundial em 2018.



Fonte: EPE (2021).

2.2.2.2 Luminárias

As luminárias têm a função de abrigar as lâmpadas e demais dispositivos conectados à rede elétrica. Além de proteger e sustentar a lâmpada e os componentes elétricos e eletrônicos, também auxiliam no direcionamento do fluxo luminoso para a área desejada.

Figura 11 - Luminárias para Iluminação Pública.



Fonte: Braluz (2020).

Os modelos de luminária da Figura 11 são os mais utilizados uma vez que possibilitam a utilização de lâmpadas vapor de sódio, vapores metálicos dentre outras para a mesma luminária. No caso das luminárias de LED (Figura 12) o módulo de lâmpadas LED já é integrado ao corpo da luminária, sendo que para a ignição das lâmpadas de LED é utilizado um equipamento denominado *Driver* acoplado às placas de LED no interior da luminária.

Figura 12 - Luminária LED Philips.



Fonte: Catálogo Philips e LEDSTAR (2020).

As luminárias têm grande impacto tanto na qualidade da iluminação como na eficiência energética, de acordo com cada tipo e composição física, propriedades ópticas e resistência.

2.2.2.3 Componentes Elétricos e Eletrônicos

A maioria das lâmpadas utilizadas na iluminação pública precisam de um equilíbrio das tensões elétricas para emitir luz, de forma que alguns equipamentos auxiliares são utilizados para tal função, sendo eles, Reatores, Capacitores, Indutores e Transformadores.

Para as lâmpadas que produzem luz pela excitação de gases (HID) as quais são mais utilizadas na iluminação pública, no momento antes do acionamento a lâmpada possui alta impedância, após o acionamento e com a ionização dos gases a impedância passa para valores muito baixos, fazendo com que o comportamento

deste tipo de lâmpada se assemelhe a um curto circuito. Com isso é preciso que uma tensão elevada seja aplicada por um período curto de tempo para que a alta impedância inicial seja ultrapassada. Esta tensão normalmente é obtida com o auxílio de um componente denominado ignitor. Como após o acendimento a impedância cai para valores baixos é utilizado um reator (Figura 13), de forma a garantir que a corrente de alimentação se mantenha dentro do valor ideal, promovendo uma partida estável na lâmpada, evitando cintilação.

Figura 13 - Reator externo.



Fonte: COPEL, 2012.

Já nas luminárias LED são utilizados drivers (Figura 14) para seu acionamento, de forma que a luminária receba a energia de forma contínua, operando como uma fonte de alimentação, e também fazendo com que a corrente não possua picos garantindo que o LED não tenha sua vida útil e confiabilidade reduzidas. Para que o funcionamento seja correto, o driver precisa ser compatível com as tensões do sistema e da luminária e que a conversão ocorra sem perdas significativas, além de possuir um elevado fator de potência e reduzida geração de harmônicas na rede.

Figura 14 - Driver.



Fonte: Dicas Led (2019).

2.2.2.4 Sistemas de Controle

Os sistemas de controle possibilitam a otimização do consumo de energia mantendo os níveis de visibilidade exigidos para cada local. Embora já existam tecnologias mais desenvolvidas para gestão e controle automatizado dos parques de iluminação pública, o equipamento tipicamente utilizado para controle é o relé fotoelétrico (Figura 15), e o controle pode ser realizado de forma individual ou em grupo.

Figura 15 - Relé fotoelétrico e base para instalação.

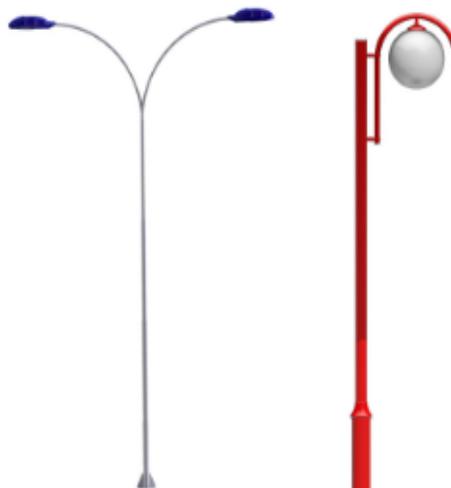


Fonte: Ilutron (2019).

2.2.2.5 Componentes Estruturais

As estruturas responsáveis pela sustentação das luminárias também acabam por definir como a luz será distribuída no espaço. A instalação das luminárias destinadas à iluminação pública podem ser realizadas sobre postes ou colunas, através de cabos de suspensão ou em suportes nas fachadas dos edifícios.

Figura 16 - Postes e colunas utilizados na iluminação pública.



Fonte: Fibrometal (2018).

Os postes e colunas são produzidos com a utilização de aço, concreto ou alumínio, seguindo os requisitos exigidos por normas técnicas específicas. Na Figura 16 estão ilustrados alguns postes de iluminação pública ainda utilizados.

2.3 Regulamentação e Critérios Básicos

É de responsabilidade de cada município a prestação de serviço público na qual faz parte a iluminação pública conforme definido no art. 30, inciso V da Constituição Federal. Porém fica sujeito também a legislação federal, visto que se trata de um serviço que requer fornecimento de energia elétrica. Tal atividade pode ser prestada por órgão/empresa pública ou contratada, e cabe aos municípios a fiscalização, elaboração de políticas de iluminação pública e definição da contribuição por parte dos usuários. O órgão regulador e fiscalizador dos serviços que envolvem energia elétrica atualmente é a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL.

A resolução de nº 456/2000 da ANEEL é o instrumento normativo que regula as condições de fornecimento de energia elétrica, bem como a relação entre as concessionárias e permissionárias de serviço público e seus consumidores. Inicialmente era cobrada nas contas de energia uma taxa destinada a custear os serviços voltados à iluminação pública, a Taxa de Iluminação Pública (TIP), porém teve sua cobrança suspensa judicialmente em alguns municípios. Com a promulgação da Emenda Constitucional nº 39 em 2002, o artigo 149-A foi adicionado a Constituição Federal, com isso foi instituída a Contribuição para Custeio do Serviço de Iluminação Pública (COSIP ou CIP), tornando facultativa a cobrança na fatura.

Quando o sistema é de domínio da prefeitura, o ponto de entrega é caracterizado pela conexão da rede de distribuição com as instalações de iluminação pública, porém quando as instalações de iluminação pertencem a concessionária o ponto de entrega se caracteriza pelo bulbo da lâmpada. As concessionárias não são obrigadas a instalar equipamentos de medição nos sistemas de iluminação pública, a menos que seja solicitado pela prefeitura para circuitos especiais, com isso o valor do consumo de energia elétrica por estes sistemas é estimado.

A iluminação pública se enquadra no subgrupo B4 das tarifas definidas pela resolução da ANEEL nº456/2000, classificadas como unidades consumidoras com fornecimento em tensão inferior a 2,3 kV. De forma que quando o sistema pertence à prefeitura a tarifa utilizada é a de menor valor, ou seja B4a, e a prefeitura é

responsável pela manutenção dos pontos de iluminação. Já para os sistemas que têm como responsável a concessionária, a tarifa utilizada é a de maior valor, no caso B4b, e neste caso a concessionária fica responsável pelas manutenções do sistema.

A estimativa é feita com base na soma das potências das lâmpadas instaladas, e considerando as perdas nos reatores, isso é multiplicado pelo número de horas em que a iluminação pública opera durante o mês. Para calcular a energia consumida pelos equipamentos secundários são utilizados os critérios estabelecidos nas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), levando em consideração informações fornecidas pelos fabricantes e ensaios em laboratórios credenciados pelo PROCEL. Todas as condições acordadas devem constar no contrato de fornecimento entre a concessionária e o município.

Além de promover uma boa condição de visibilidade no período noturno, a iluminação pública também deve garantir certa uniformidade da iluminação nas vias, de forma que a distribuição espacial da luz é requisito indispensável nos projetos de iluminação pública. A norma brasileira que estabelece os critérios básicos para iluminação pública é a NBR-5101 - Iluminação Pública: Procedimento, a qual entrou em vigor em outubro de 1992 (ABNT, 2018).

2.3.1 Visibilidade e Uniformidade

Por definição, visibilidade é a percepção pelo sentido da visão, de forma que a visibilidade é fundamental para identificação de objetos e pessoas. Em se tratando da iluminação em vias públicas a visibilidade permite que motoristas e pedestres visualizem detalhes mais relevantes à sua volta.

A projeção da iluminação na superfície das vias de forma a garantir a identificação dos obstáculos, como faixas de pedestre e rolagem, está diretamente relacionada à uniformidade. Para que tais condições sejam atendidas é preciso que nenhuma zona permaneça sem iluminação, evitando o zebraamento, o qual se baseia na intercalação entre superfícies iluminadas e não iluminadas na via (Muse, 2019).

2.3.2 Distribuição espacial da luz

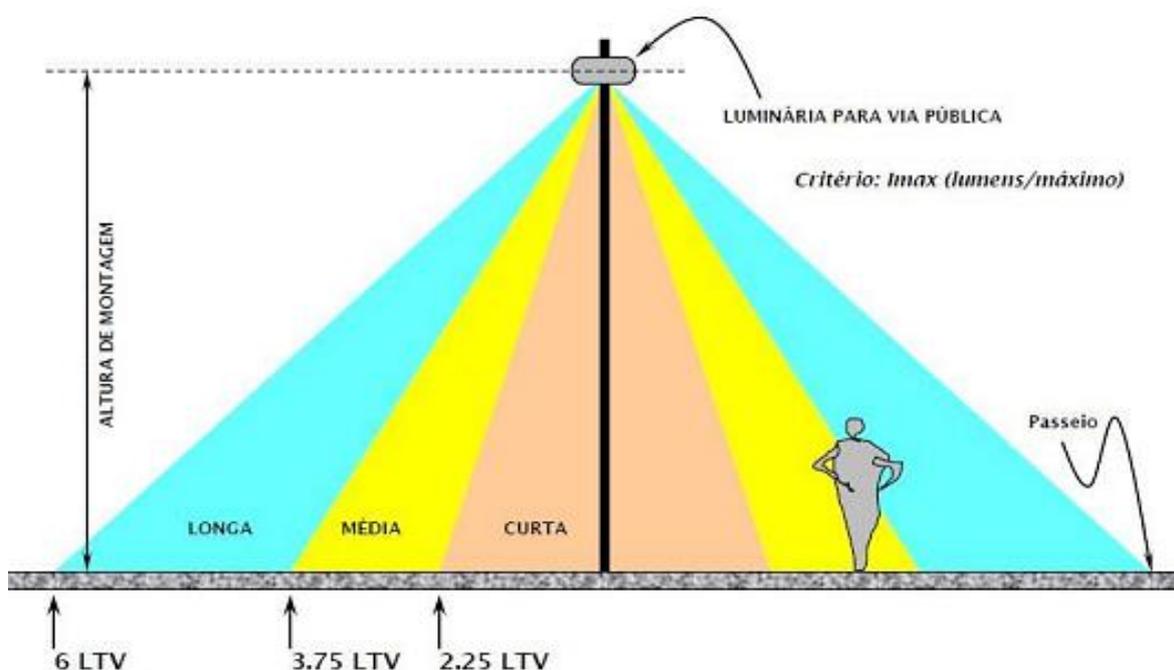
Na iluminação pública a distribuição fotométrica das luminárias está diretamente ligada a distribuição espacial da luz. As distribuições são classificadas de

acordo com a projeção da luz no plano que se deseja iluminar, direcionando-a seguindo os critérios da norma NBR 5101:2018 (ABNT, 2018), sendo divididos entre longitudinal, transversal e controle da distribuição.

“A distribuição apropriada das intensidades luminosas das luminárias é um dos fatores essenciais de iluminação eficiente em vias. As intensidades emitidas pelas luminárias são controladas direcionalmente e distribuídas de acordo com a necessidade para visibilidade adequada (rápida, precisa e confortável).”

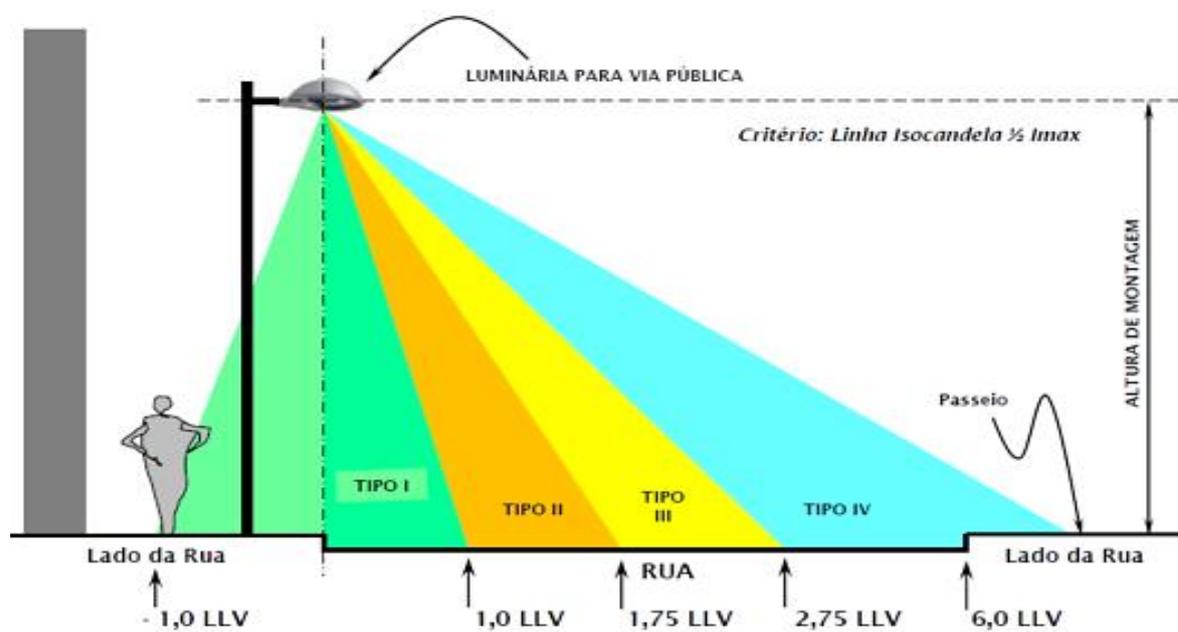
A distribuição longitudinal se baseia na abrangência do feixe de luz de forma paralela ao eixo da via (Figura 17), já a distribuição transversal é caracterizada pela abertura dos planos paralelos ao eixo da via (Figura 18). O controle da distribuição por sua vez está ligado ao encadeamento produzido pela luminária, quanto maior for o controle menos poluição luminosa e o ofuscamento ocorrerá.

Figura 17 - Distribuição Longitudinal da Intensidade Luminosa.



Fonte: Fonseca (2017).

Figura 18 - Distribuição Transversal da Intensidade Luminosa.

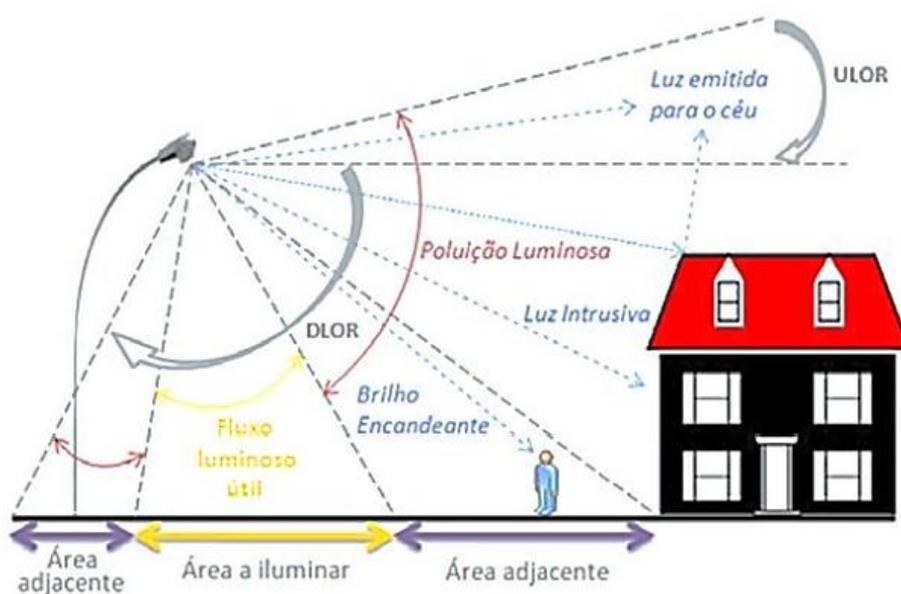


Fonte: Fonseca (2017).

2.3.3 Poluição Luminosa

A poluição luminosa é caracterizada pelo excesso de iluminação artificial mal direcionada ou pela reflexão da mesma sobre superfícies onde está inserida. Se tratando de iluminação urbana a poluição é definida pela porcentagem do fluxo luminoso que não incide sobre a área útil.

Figura 19 - Representação do fluxo luminoso emitido no meio externo.



Fonte: EDP (2016).

Na Figura 19 é exemplificada a parcela do fluxo luminoso que se caracterizam como poluição luminosa, estas estão divididas em luz emitida para o céu, luz intrusiva a qual acaba incidindo sobre áreas que não tem-se o objetivo de iluminar, e o brilho encadeante sendo aquele que causa ofuscamento ao observador.

2.4 Iluminação Pública em Santa Catarina

2.4.1 Centrais Elétricas de Santa Catarina

Inicialmente as demandas energéticas de Santa Catarina eram supridas por pequenos e médios sistemas elétricos até meados do século XX, estes sustentados pela iniciativa privada. Mesmo com a construção de novas usinas hidrelétricas no estado, o modelo vigente baseado no regionalismo não foi capaz de suprir a crescente demanda de energia impulsionada pelo cenário desenvolvimentista presente no governo de Juscelino Kubitschek.

Em 1955, através do Decreto Estadual nº 22 o Governador Irineu Bornhausen criou a Centrais Elétricas de Santa Catarina (CELESC), diante da necessidade da criação de uma política única visando a oferta de infraestrutura adequada a novos investimentos no estado de Santa Catarina. Dentre as atividades da nova Empresa estavam planejar, construir e explorar o sistema de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica no Estado. Sua instalação ocorreu formalmente no dia 4 de agosto de 1956. Embora muitos avanços estivessem ocorrendo referente a energia elétrica, a escuridão ainda era comum para os catarinenses, e os brasileiros que possuíam acesso à energia, ainda passavam por constantes racionamentos.

De início a Celesc operou como órgão de planejamento do sistema elétrico estadual, após começou a incorporar o patrimônio das antigas empresas regionais assumindo o papel de *holding*, dando início ao ciclo de expansão da empresa. Em 1962 a empresa já operava em 39 cidades, com mais de 87 mil consumidores, estando presente nos maiores municípios catarinenses. Mais tarde, entre 1963 e 1967, deu-se a inauguração de cinco usinas hidrelétricas pela Celesc. Durante este período ocorreram a consolidação técnica e o delineamento do sistema elétrico no estado, além da construção e energização das Linhas de Transmissão Tubarão e Tronco Norte.

Durante o período chamado de "milagre econômico", entre 1968 e 1973, com o

crescimento do Brasil a Celesc anexou cerca de 50 municípios ao seu atendimento, chegando ao fim do período com 300 mil consumidores. No final deste período, em 22 de agosto foi firmado o contrato de interligação e fornecimento de energia elétrica entre a Celesc, Eletrosul, Cia. Estadual de Energia Elétrica do Rio Grande do Sul (CEEE) e a Cia. Paranaense de Energia Elétrica (Copel); ainda em 1973 estas empresas assinaram convênio para fornecimento da energia que seria produzida pela usina de Itaipu, a qual ainda estava em obras. Em 1978 o sistema Tronco Norte foi capacitado, passando de uma operação de 69 kV para 138 kV.

No início dos anos 80 a Celesc atingiu meio milhão de clientes, sendo que nove anos após este fato, a empresa já registrava um milhão de clientes atendidos. Diversos avanços foram executados durante esta década, logo no início foi lançado o programa ENERCAP - Energia para a Capital, sendo implantado o sistema de 69 kV, entretanto o mesmo já foi construído visando o atendimento a tensão de 138 kV. Alguns anos depois, em 1986, a Subestação Trindade passou a operar em 138 kV, após estudos de engenharia e coordenação, além de um trabalho de isolamento robusto na subestação.

Além dos avanços com relação a operação do sistema naquela década, a Celesc incorporou cooperativas de eletrificação rural. Já em 1987 foi incorporada a Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural de Santa Catarina - ERUSC à Celesc, o que alavancou o processo de integração das cooperativas de eletrificação rural, solidificando o compromisso com o desenvolvimento social e econômico do Estado, contribuindo também para a descentralização do atendimento.

A década de 90 foi marcada por diversas obras que melhoraram o atendimento aos consumidores e aumentaram a confiabilidade do sistema, neste ponto a Celesc já havia se firmado como uma das maiores empresas distribuidoras de energia elétrica do País, através de um sistema elétrico robusto e integrando energeticamente todas as regiões de sua área de concessão, além de estruturar o sistema de alta tensão ligado ao Sistema Interligado Nacional no início de 2000 (CELESC, 2020).

2.5 Eficiência energética.

Diante da atual crise energética mundial, o termo eficiência energética tem sido amplamente divulgado, seja no meio acadêmico ou industrial (GOLDEMBERG, 2000). Tendo como foco eliminar o desperdício de energia, a efficientização de sistemas

energéticos acarreta na redução dos investimentos voltados à ampliação da geração e distribuição de energia, como construção de novas usinas e ampliação de linhas de transmissão, conseqüentemente tem-se a preservação do meio ambiente e a redução das tarifas.

Tratando de desperdício de energia, segundo Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Conservação de Energia - ABESCO (2018) o Brasil deixou de economizar 142.820,69 GWh entre 2015 e 2017, o que representa aproximadamente metade da produção de energia elétrica de Itaipu durante o mesmo período. Sendo o potencial de economia em torno de R \$52,17 bilhões. Com isso fica evidente que ações destinadas à eficiência energética são uma das alternativas para gerar e disponibilizar energia para uso efetivo.

Embora a efficientização de sistemas energéticos ainda não ocupe um patamar relevante a ponto de reduzir consideravelmente o desperdício de energia, em 2000 o Governo Brasileiro criou a lei no 9.991, obrigando as empresas de serviço público de distribuição de energia elétrica a aplicar anualmente parte de sua Receita Operacional Líquida - ROL (0,50% da receita) em desenvolvimento de programas para o incentivo da eficiência energética no último estágio do uso da energia elétrica. Em 2001 através da resolução nº 394 foram estabelecidos os critérios para a aplicação de recursos em projetos de eficiência energética (ANEEL, 2001). Desde então, estes projetos voltados à efficientização dos sistemas devem seguir o modelo proposto pelo Manual para Elaboração dos Programas Anuais de Combate ao Desperdício de Energia Elétrica.

O Plano Nacional de Eficiência Energética (PNEF) lançado em outubro de 2011 por meio da portaria nº 594, tem como objetivo reduzir a demanda em 0,5% ao ano, o equivalente a 106 TWh até 2030. O investimento em equipamentos mais modernos e eficientes podem auxiliar como “fonte de energia” atendendo ao aumento da demanda elétrica, uma vez que a utilização destes equipamentos reduz o consumo de eletricidade possibilitando a conservação da energia que seria disponibilizada ao mercado, tal energia passa a ficar disponível para o sistema elétrico e outros consumidores.

3 METODOLOGIA

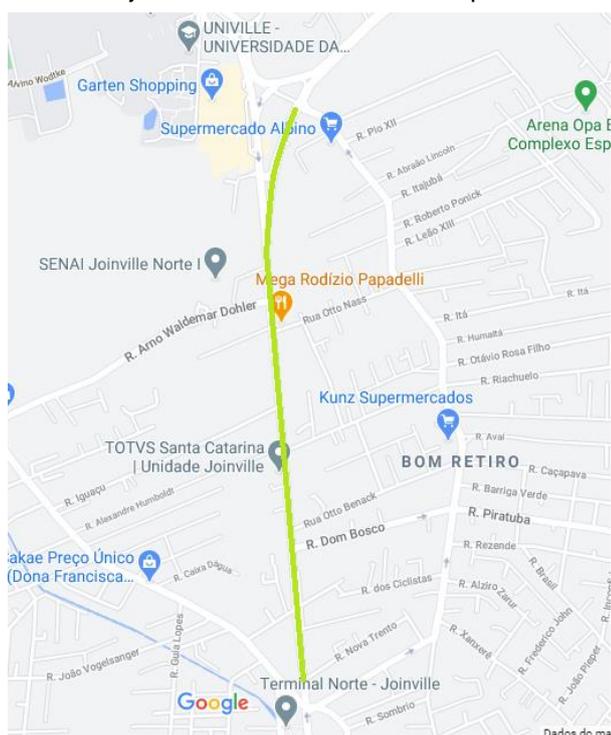
De modo a embasar o projeto de eficiência energética nas luminárias públicas em uma região do bairro Costa e Silva na cidade de Joinville, foi realizada análise do

impacto da modernização com LED já implantada em parte da Avenida Santos Dumont, na cidade de Joinville. Posteriormente foi realizada análise da implantação de um projeto de eficiência energética para a região predeterminada no bairro Costa e Silva, considerando o modelo de projeto exigido pela CELESC e ANEEL através do Programa de Eficiência Energética (PEE) e os Procedimentos do Programa de Eficiência Energética (PROPEE) (ANEEL, 2019), além de todas as normas pertinentes.

3.1 Análise da modernização da Avenida Santos Dumont

Em um trajeto da Avenida Santos Dumont, situada na cidade de Joinville, mostrada na Figura 20, foi realizada a troca das luminárias a vapor de sódio para LED, com o intuito de modernizar o parque, levando em consideração os benefícios ambientais e econômicos provenientes da utilização desta tecnologia. Sendo considerado um *retrofit*, que consiste na substituição de equipamentos com tecnologia antiga por equipamentos mais desenvolvidos e eficientes, sem que mudanças estruturais sejam necessárias, possibilitando a análise do impacto econômico apenas com a troca das lâmpadas.

Figura 20 - Trajeto da Av. Santos Dumont aplicado o retrofit.



Fonte: Adaptado Google Maps (2021).

Para ilustrar o impacto que tal ação ocasionou com relação a economia de energia, foram coletadas informações deste sistema antes e depois do *retrofit*. Para obter o consumo do sistema com utilização de lâmpadas vapor de sódio é necessária a utilização de variáveis, como horas de consumo diárias, aplicadas aos sistemas de iluminação pública, para este tipo de instalação que se caracteriza como unidades consumidoras com fornecimento em tensão inferior a 2,3 kVA (Grupo B de fornecimento de energia).

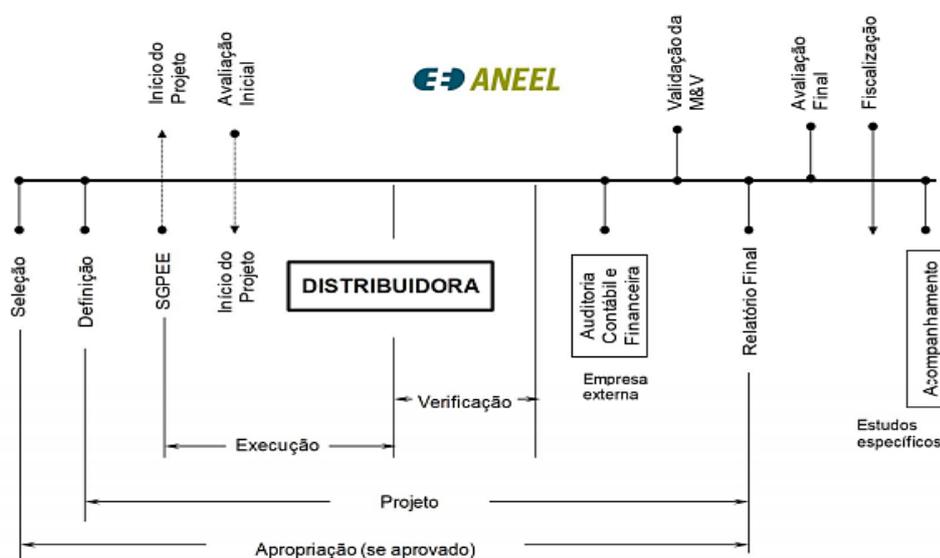
Conforme determinação da Agência Nacional de Energia Elétrica em 2009, a média nacional de horas de consumo diárias para faturamento da energia destinada à iluminação pública é de 11:27 horas, podendo variar entre os municípios. Porém, para atender aos critérios estipulados pela CELESC na chamada pública PEE/CELESC nº 001/2019 (CELESC, 2019) será considerado um funcionamento de 12 horas diárias durante 365 dias por ano.

As informações de consumo posteriores à troca foram adquiridas através do sistema de telegerenciamento, disponibilizado pela empresa SmartGreen Desenvolvimento de Tecnologias S/A, responsável pelo fornecimento dos equipamentos e sistema além de prestar suporte ao telegerenciamento, o qual permite acompanhar o funcionamento dos pontos de iluminação e obter informações quanto ao consumo de energia, potência consumida, período em que a luminária permaneceu ligada e desligada, dentre outras funcionalidades.

3.2 Projeto de Eficiência Energética

O projeto de eficiência dos pontos de iluminação instalados na região selecionada do bairro Costa e Silva terá como base o PROPEE (ANEEL, 2019), e foi desenvolvido com o intuito de delimitar os tipos de projetos contemplados pelo PEE, além de definir os critérios de fiscalização e avaliação.

Figura 21 - Etapas PEE.

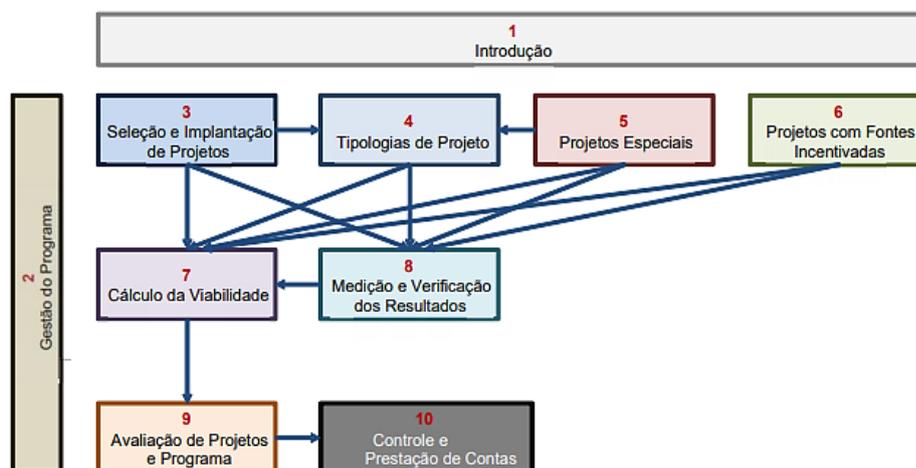


Fonte: Procedimentos do Programa de Eficiência Energética – PROPEE 2019.

Estes programas visam promover o consumo consciente e eficiente de energia elétrica através de projetos que expressem a viabilidade econômica e a importância de adotar ações de combate ao desperdício e a utilização de equipamentos mais eficientes. As etapas do programa estão descritas na Figura 21.

O PROPEE é dividido em 10 módulos, sendo eles Introdução, Gestão do Programa, Seleção e Implantação de Projetos, Tipologias de Projetos, Projetos Especiais, Projetos com Fontes Incentivadas, Cálculo da Viabilidade, Medição e Verificação de Resultados, Avaliação de Projetos e Programa e Controle e Prestação de Contas. A Figura 22 ilustra os módulos do PROPEE.

Figura 22 - Módulos PEE.



Fonte: Procedimentos do Programa de Eficiência Energética – PROPEE 2019.

Para este projeto serão utilizados como base os módulos 4 e 7 referentes à tipologia de projetos e cálculo da viabilidade respectivamente, uma vez que o objetivo é identificar a viabilidade da aplicação de um projeto de eficiência energética para uma determinada região, seguindo as diretrizes do PROPEE da ANEEL com base na chamada pública vigente da concessionária local

3.2.1 Módulo 4 – Tipologias de Projetos

No módulo 4 são compreendidas as características para a realização de projetos com as tipologias mais usuais, não limitado apenas a projetos citados, mas facilitando a execução dos projetos mais frequentes. São considerados projetos de diversos setores da economia, classe de consumo e uso final, podendo ser: industrial, comércio e serviços, poder público, serviços públicos, rural, residencial, baixa renda, gestão energética municipal, educacional e iluminação pública.

É imprescindível que os equipamentos instalados a partir dos recursos do PEE sejam energeticamente eficientes, ou seja, equipamentos que possuam o Selo Procel de Economia de Energia, ou Selo Procel (ELETROBRAS/PROCEL, em parceria com o INMETRO) para cada categoria do programa. Nos casos em que não há disponibilidade no mercado de tais equipamentos, devem ser utilizados equipamentos com a Etiqueta A de desempenho energético (Etiqueta Nacional de Conservação de Energia - ENCE) do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), de responsabilidade do INMETRO (ANEEL, 2019).

Para projetos de iluminação pública o objetivo é auxiliar as prefeituras municipais no que diz respeito à melhoria da eficiência energética dos sistemas, que é feita através do uso de equipamentos e lâmpadas mais eficientes, compreendendo a troca de reatores, ignitores, luminárias, relés fotoelétricos, fiação e até mesmo postes, braços e conjuntos de fixação. Os dados que devem ser informados à ANEEL constam na Tabela 1.

Tabela 1 - Informações a serem enviadas para ANEEL.

| SISTEMA ATUAL | | |
|-----------------------------|--------------------------------------|---|
| 0 | Sistema 1 | TOTAL |
| 1 | Tipo de lâmpada | |
| 2 | Potência (lâmpada+reator) W | pa_1 |
| 3 | Quantidade | qa_1 |
| 4 | Potência instalada (kW) | $Pa_1 = \frac{pa_1 \times qa_1}{1000}$ |
| 5 | Funcionamento (h/ano) | ha_1 |
| 6 | FCP (fator de coincidência na ponta) | $FCPa_1 = \frac{Da_1}{Pa_1}$ |
| 7 | Energia Consumida (MWh/ano) | $Ea_1 = \frac{Pa_1 \times ha_1}{1000}$ $Ea = \sum Ea_i$ |
| 8 | Demanda média na ponta (kW) | Da_1 $Da = \sum Da_i$ |
| SISTEMA PROPOSTO | | |
| 10 | Sistema 1 | TOTAL |
| 11 | Tipo de lâmpada | |
| 12 | Potência (lâmpada+reator) W | pp_1 |
| 13 | Quantidade | qp_1 |
| 14 | Potência instalada (kW) | $Pp_1 = \frac{pp_1 \times qp_1}{1000}$ |
| 15 | Funcionamento (h/ano) | hp_1 |
| 16 | FCP (fator de coincidência na ponta) | $FCPp_1 = \frac{Dp_1}{Pp_1}$ |
| 17 | Energia Consumida (MWh/ano) | $Ep_1 = \frac{Pp_1 \times hp_1}{1000}$ $Ep = \sum Ep_i$ |
| 18 | Demanda média na ponta (kW) | Dp_1 $Dp = \sum Dp_i$ |
| RESULTADOS ESPERADOS | | |
| 20 | Sistema 1 | TOTAL |
| 21 | Redução de Demanda na Ponta (kW) | $RDP = \sum RDP$ |
| 22 | Redução de Demanda na Ponta (%) | $RDP\% = \frac{RDP}{Da}$ |
| 23 | Energia Economizada (MWh/ano) | $EE = \sum EE_i$ |
| 24 | Energia Economizada (%) | $EE\% = \frac{EE}{Ea}$ |

Fonte: PROPEE ANEEL - Módulo 4.

A Tabela 1 é composta por 24 linhas, explicando os itens compreendidos por ela, tem-se que:

0) Agrupar as lâmpadas em Sistemas que tenham o mesmo regime de funcionamento e sejam trocadas por um determinado tipo de lâmpada - usar Sistemas diferentes para troca diferentes;

- 1) Tipo de lâmpada (incandescente, fluorescente, etc.) e potência nominal;
- 2) Incluir a potência média consumida pelos reatores por cada lâmpada;
- 3) Quantidade de lâmpadas em cada Sistema considerado;

- 4) Potência total instalada;
- 5) Funcionamento médio anual (h/ano);
- 6) Fator de coincidência na ponta;
- 7) Energia Consumida (MWh/ano);
- 8) Demanda média na ponta (kW);

10 a 18) – mesmas considerações acima. O funcionamento só será diferente se forem instalados dispositivos de controle adicionais. Troca-se o subscrito at (atual) por pr (proposto);

- 21) Redução de demanda na ponta (RDP);
- 22) RDP em termos percentuais;
- 23) Energia economizada (EE);
- 24) EE em termos percentuais.

Para calcular os itens RDP e EE utiliza-se as seguintes equações:

$$EE = [\sum_{Sistema\ i}(q_{a_i} \times p_{a_i} \times h_{a_i}) - \sum_{Sistema\ i}(q_{p_i} \times p_{p_i} \times h_{p_i})] \times 10^{-6} \quad (3)$$

Onde: EE – energia economizada [MWh/ano];

q_{a_i} – número de lâmpadas no Sistema i atual [unidade];

p_{a_i} – potencia da lampada e reator no Sistema i atual [W];

h_{a_i} – tempo de funcionamento do Sistema i atual [h/ano];

q_{p_i} – número de lâmpadas e reator no Sistema i proposto [unidade];

p_{p_i} – potencia da lampada e reator no Sistema i proposto [W];

h_{p_i} – tempo de funcionamento do Sistema i proposto [h/ano].

$$RDP = [\sum_{Sistema\ i}(q_{a_i} \times p_{a_i} \times FCP_{a_i}) - \sum_{Sistema\ i}(q_{p_i} \times p_{p_i} \times FCP_{p_i})] \times 10^{-3} \quad (4)$$

Onde: RDP – redução de demanda na ponta [kW];

FCP_{a_i} – fator de coincidência na ponta no Sistema i atual [unidade];

FCP_{p_i} – fator de coincidência na ponta no Sistema i atual, sendo diferente de FCP_{a_i} quando houver instalação de algum dispositivo de controle que o permita [unidade].

O fator de coincidência é utilizado para o cálculo de redução de demanda no

horário de ponta. O valor do fator de coincidência na ponta deverá ser menor ou igual a 1 (um) e o cálculo deste fator deverá utilizar a equação abaixo para todos os usos finais, com exceção do uso final “aquecimento solar de água” (CELESC, 2019).

$$FCP = \frac{nup \times nd \times nm}{792} \quad (5)$$

Onde: *FCP* – Fator de coincidência na ponta;

nup – Número de horas por dia de utilização do sistema a ser eficientizado no horário de ponta. Para a CELESC, o horário de ponta a ser considerado deverá ser menor ou igual a 3 (três) horas e está compreendido entre 18h30 e 21h30;

nd – Número de dias úteis (segunda-feira a sexta-feira) ao longo do mês em que se utiliza o sistema a ser eficientizado no horário de ponta. Nesta chamada PÚBLICA considera-se um mês padrão com 22 (vinte e dois) dias úteis mensais;

nm – Número de meses, no período de um ano, em que se utiliza o sistema a ser eficientizado. Considera-se um ano padrão com 12 (doze) meses;

792 –Número de horas equivalente às horas de ponta disponíveis ao longo de um ano (3 horas de ponta diárias x 22 dias úteis por mês x 12 meses por ano).

Para o cálculo do fator de coincidência na ponta dos sistemas de aquecimento solar de água, são utilizados como fatores o número médio de banhos por dia no horário de ponta, o tempo médio de banho em minutos, o número de chuveiros por unidade consumidora e 180 minutos que é equivalente a 3 (três) horas de ponta.

3.2.2 Módulo 7 – Cálculo da Viabilidade

Neste módulo são compreendidos os diferentes fatores e maneiras de calcular a viabilidade econômica de um projeto realizado no âmbito do PEE. Através dele são estabelecidas diretrizes e procedimentos para calcular a viabilidade dos projetos.

Dentre os critérios utilizados para a análise da viabilidade econômica, o principal é a Relação Custo Benefício (RCB) que o projeto proporciona, considerando a valoração da energia economizada e a redução da demanda na ponta durante a vida útil do projeto. Duas avaliações devem ser realizadas pela proponente ao longo do projeto com relação aos dados disponíveis, sendo elas:

- Avaliação *ex ante*, utilizando valores estimados durante a fase de definição, quando é avaliado o custo e o benefício.
- Avaliação *ex post*, através de valores mensurados, considerando a economia de energia e redução da demanda na ponta.

Para analisar a viabilidade econômica do projeto é necessário considerar a ótica do sistema elétrico, onde é valorada a economia de energia e redução da demanda pelo custo da ampliação do sistema do ponto de vista do consumidor. Assim o benefício obtido com a energia e demanda reduzidas deve ser de, no mínimo, 25% acima do custo do projeto, ou seja, a relação custo-benefício deve ser igual ou inferior a 0,8. Portanto, o critério chave que norteia a avaliação econômica de viabilidade de um projeto que segue as diretrizes do PEE é que a RCB calculada pela ótica do sistema elétrico e do ponto de vista do PEE seja igual ou inferior a 0,8 (oito décimos) (ANEEL, 2019).

A energia economizada e a redução da demanda são os principais indicadores quantitativos dos projetos de eficiência energética. Para a avaliação após a conclusão do projeto (*ex post*) estes valores são mensurados através de Medição e Verificação (M&V). Na avaliação durante o estudo (*ex ante*) devem ser estimados valores de energia economizada e demanda evitada que possam ser atingidos com a implantação das alterações propostas, sendo admitidas diferenças entre as estimativas *ex ante* e *ex post* desde que a RCB se mantenha no valor máximo definido para a tipologia do projeto.

Para determinar o Custo Evitado de Demanda (CED) e o Custo da Energia Evitada (CEE) o cálculo se baseia no impacto no sistema de carga evitada, de maneira que segundo a ANEEL, a energia e demanda evitadas correspondem a uma redução de perdas no sistema e o benefício “de evitar uma unidade de perdas é numericamente igual ao custo de fornecer uma unidade adicional de carga”.

Utilizando um perfil de carga caracterizado pelo fator de carga (F_c), as perdas que estão sendo evitadas são calculadas a partir da redução de 1kW na ponta, pelo reflexo na demanda fora de ponta (L_p) por meio do fator de carga “e pelos fatores de perda (F_p , que levam ao cálculo de LE1, LE2, LE3 e LE4, juntamente com a permanência de cada posto horário no ano – 450, 315, 4.686 e 3.309 h/ano respectivamente), que medem o reflexo desta redução no horário fora de ponta e na energia consumida nos diferentes postos tarifários” (ANEEL, 2017). O fator de perda pode ser estimado utilizando o fator de carga através da equação.

$$F_p = k \times F_c + (1 - k) \times F_c^2 \quad (6)$$

Onde: k – Constante. Varia tipicamente de 0,15 a 0,30. Recomenda-se adotar $k = 0,15$ ou justificar o valor adotado no projeto;

F_c – Fator de carga do segmento elétrico;

F_p – Fator de perda.

O cálculo do custo evitado de energia e das constantes de perdas são obtidos pelas seguintes equações:

$$CEE = \frac{(C_p \times LE_p) + (C_{fp} \times LE_{fp})}{LE_p + LE_{fp}} \quad (7)$$

$$LE_p = \frac{(7 \times LE_1) + (5 \times LE_2)}{12} \quad (8)$$

$$LE_{fp} = \frac{(7 \times LE_3) + (5 \times LE_4)}{12} \quad (9)$$

Onde: CEE – Custo Unitário Evitado de Energia [R\$/MWh];

C_p – Custo unitário da energia no horário de ponta na bandeira verde [R\$/MWh];

C_{fp} – Custo unitário da energia no horário fora de ponta na bandeira verde [R\$/MWh];

LE_p – Constante de perda de energia no posto de ponta considerando 1 kW de perda de demanda no horário de ponta [1];

LE_{fp} – Constante de perda de energia no posto de fora de ponta considerando 1 kW de perda de demanda no horário fora de ponta [1];

LE_1 – Constante de perda de energia no posto de ponta de períodos secos considerando 1 kW de perda de demanda no horário de ponta [1];

LE_2 – Constante de perda de energia no posto de ponta de períodos úmidos considerando 1 kW de perda de demanda no horário de ponta [1];

LE_3 – Constante de perda de energia no posto fora de ponta de períodos secos considerando 1 kW de perda de demanda no horário fora de ponta [1];

LE_4 – Constante de perda de energia no posto fora de ponta de períodos úmidos considerando 1 kW de perda de demanda no horário fora de ponta [1].

Os projetos da Tipologia Iluminação Pública devem utilizar a modalidade tarifária Branca, subgrupo B3 – Demais Classes (ANEEL, 2017), com isso o Custo da Demanda Evitada (CED) unitário será calculado pela equação abaixo:

$$CED = (12 \times C_1 \times h_p \times F_c \times 10^{-3}) + (12 \times C_2 \times h_{fp} \times F_c \times 10^{-3} \times LP) \quad (10)$$

Onde: CED – Custo Unitário Evitado de Demanda [R\$/kW ano];

12 – Meses [mês/ano];

C_1 – Custo unitário do uso do Sistema de Distribuição no horário de ponta [R\$/MWh];

C_2 – Custo unitário do uso do Sistema de Distribuição no horário fora de ponta [R\$/kWh];

LP – Constante de perda de demanda no posto fora de ponta, considerando 1kW de perda de demanda no horário de ponta [1];

h_p – Número de horas da ponta em um mês, considerando somente os dias úteis [horas];

h_{fp} – Número de horas fora da ponta em um mês [horas];

F_c – Fator de carga do segmento elétrico [1].

Com a avaliação dos custos de demanda e energia e a economia de ambos é possível avaliar os benefícios anualizados (BA_T) do projeto

$$BA_T = (EE \times CEE) + (RDP \times CED) \quad (11)$$

Onde: BA_T – Benefício anualizado [R\$/ano];

EE – Energia anual economizada [MWh/ano];

CEE – Custo unitário da energia [R\$/MWh];

RDP – Demanda evitada na ponta [kW ano];

CED – Custo unitário evitado de demanda [R\$/kW ano].

O custo anualizado total é obtido através da seguinte equação:

$$CA_T = \sum n CA_n \quad (12)$$

Onde: CA_T – Custo anualizado total [R\$/ano];

CA_n – Custo anualizado de cada equipamento incluindo custos relacionados (mão de obra, etc.) [R\$/ano].

Para calcular o custo anualizado de cada equipamento, é utilizada a equação a seguir:

$$CA_n = CE_n \times \frac{CT}{CE_T} \times FRC_u \quad (13)$$

Onde: CA_n – Custo anualizado de cada equipamento incluindo custos relacionados (mão de obra, etc.) [R\$/ano];

CE_n – Custo de cada equipamento [R\$];

CT – Custo total do projeto [R\$];

CE_T – Custo total em equipamentos [R\$];

FRC_u – Fator de recuperação do capital para u anos [1/ano].

Assim, para obter os Custo Total em Equipamentos (CE_T) e o Fator de Recuperação de Capital (FRC_u) são utilizadas as seguintes equações:

$$CE_T = \sum n CE_n \quad (14)$$

Onde: CE_T – Custo total em equipamentos [R\$];

CE_n – Custo de cada equipamento [R\$].

$$FRC_u = \frac{i(1+i)^u}{(1+i)^u - 1} \quad (15)$$

Onde: FRC_u – Fator de recuperação do capital para u anos [1/ano];

u – Vida útil dos equipamentos [ano];

i – taxa de desconto considerada [1/ano].

Se tratando de um projeto no município de Joinville, para determinar o custo anualizado é utilizado o custo total do projeto, e para tanto devem ser considerados os custos com mão de obra, transporte, auditoria contábil e financeira e outros custos indiretos - ART (estes são determinados previamente pela CELESC através da chamada pública PEE/CELESC nº 001/2019 ou vigente, por meio das equações seguintes):

$$MOP = 480 Hh \times R\$107,43 + 0,05 \times (\text{custo total com recursos próprios do projeto}) \quad (16)$$

Onde: MOP – Mão de obra própria [R\$];

480 Hh– Número de homens-horas da CELESC mínimo estimado;

R\$ 107,43– Custo unitário a ser considerado por homem-hora;

$0,05 \times \text{custo total com recursos próprios do projeto}$ – Correspondem a 5% (cinco por cento) do custo total com recursos próprios da “proposta de projeto”.

$$TR = 12 \times [400 + 1,4 \times (DCF)] \quad (17)$$

Onde: TR – Custo de transporte [R\$];

12– Número de viagens a serem realizadas;

DCF – Distância (em quilômetros) entre Florianópolis e a cidade do projeto;

$400 + 1,4 \times DCF$ – Custo unitário a ser considerado para cada viagem.

A análise da viabilidade ou relação custo-benefício é realizada utilizando como referências os valores do benefício e do custo anualizados, partindo da equação básica da relação custo benefício:

$$RCB = \frac{CA_T}{BA_T} \quad (18)$$

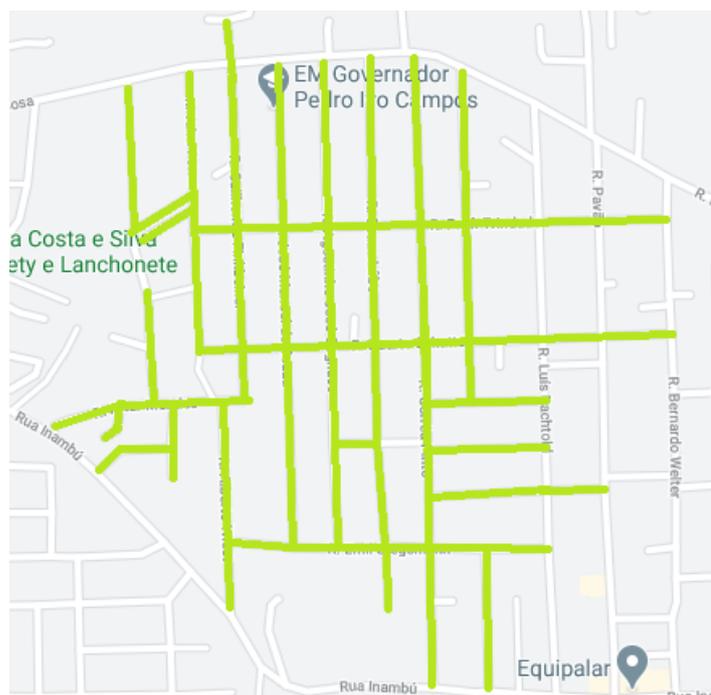
Onde: CA_T – Custo anualizado total [R\$/ano];

BA_T – Benefício anualizado [R\$/ano].

3.3 Região delimitada para estudo

Para este estudo foi escolhida uma região do bairro Costa e Silva na cidade de Joinville. As ruas definidas para aplicação do projeto encontram-se destacadas em verde na Figura 23, compreendem 273 pontos com lâmpadas vapor de sódio com potência de 100W instaladas. O projeto de eficiência energética desta região terá como base o PROPEE, terá como foco a substituição do conjunto anterior, composto pelas lâmpadas vapor de sódio, reatores e pelas luminárias que abrigam as lâmpadas, por equipamentos mais eficientes, neste caso as luminárias de LED, que possuem as placas de LED e o *driver* já integrados à sua estrutura, e a avaliação da viabilidade econômica apenas realizando a troca das luminárias.

Figura 23 - Ruas escolhidas para estudo.



Fonte: Adaptado Google Maps (2020).

4 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

4.1 Avenida Santos Dumont

4.1.1 Coleta de dados do sistema analisado

Os dados do sistema, tanto anterior quanto posterior à troca, foram obtidos através do sistema de telegerenciamento da Smartgreen, sendo que por meio dele foi possível obter o tipo e potência das luminárias, além da quantidade delimitada de pontos que foram substituídos.

4.1.1.1 Sistema antes da troca

Para o sistema antes da troca foi obtida a potência e o tipo de luminárias. Com estas informações buscou-se nos catálogos do fabricante características como, fluxo luminoso, eficiência luminosa, vida mediana, temperatura de cor e IRC. Neste caso, como os pontos de iluminação já haviam passado pela troca e não foi possível efetuar a medição de consumo real destes pontos, foi realizada uma estimativa com base no período de funcionamento e nas características das luminárias. As informações adquiridas a partir do tipo e modelo da luminária são as descritas na Tabela 2.

Tabela 2 - Características Lâmpadas analisadas.

| Tipo da Lâmpada | |
|------------------------|------|
| Potência | W |
| Fluxo luminoso | lm |
| Eficiência luminosa | lm/W |
| Vida mediana | h |
| Temperatura de cor | K |
| IRC | |

Fonte: Autoria própria (2021).

4.1.1.2 Sistema após a troca

No caso das luminárias que foram utilizadas para a substituição também foi realizado o levantamento das características das mesmas, porém a estimativa de

consumo foi executada com o auxílio do sistema de telegerenciamento, que disponibiliza o consumo destes pontos já considerando as perdas do sistema. Com estes dados foi alcançada uma média simples para obter um valor médio de consumo em Watts. A tabela 2 pode ser utilizada para a coleta das informações referentes às luminárias propostas.

4.1.2 Análise do consumo anterior e posterior a troca

Para efetuar a análise da redução do consumo através da substituição das luminárias, primeiramente foi calculada uma estimativa do consumo do sistema antigo utilizando a Tabela 3, e sendo considerado um período de utilização de 12 horas por dia, sendo que este valor pode variar em diferentes estados ou de uma concessionária para a outra. O produto do consumo diário de um ponto de iluminação e da quantidade de pontos do sistema será o consumo total do sistema diário, de forma que para encontrar o consumo anual do sistema, multiplica-se o consumo total diário por 365 (dias no ano).

Para encontrar o consumo do sistema com a utilização da luminária mais eficiente o mesmo método citado acima pode ser aplicado, porém neste caso as informações referentes ao consumo dos pontos foram disponibilizadas pela empresa Smartgreen. Com os dados, fez-se uma média do consumo dos pontos, e o produto da média pela quantidade de pontos foi o consumo total diário, com esse valor multiplicado por 365 tem-se o consumo total anual do sistema conforme Tabela 4.

Tabela 3 - Consumo estimado do trajeto anterior a troca.

| | |
|--------------------------|---------|
| Potência Lâmpada | W |
| Perdas Reator | W |
| Horas | h |
| Consumo diário por ponto | kWh |
| Quantidade de pontos | Unidade |
| Consumo total diário | kWh |
| Consumo anual | MWh/ano |

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 4 - Consumo medido do trajeto posterior a troca.

| | |
|-------------------------------|---------|
| Consumo médio por ponto (kWh) | kWh |
| Quantidade de pontos | Unidade |
| Consumo total diário (kWh) | kWh |
| Consumo anual (MWh) | MWh |

Fonte: Aatoria própria (2021).

4.2 Projeto de Eficiência Energética em região do bairro Costa e Silva

4.2.1 Coleta de dados gerais do sistema atual

Os dados do sistema atual foram obtidos através da consulta física dos locais. Por meio desta, foi possível obter o tipo e potência das luminárias além da quantidade delimitada de pontos. Este levantamento de dados também pode ser efetuado com o auxílio da empresa responsável pela base de dados do sistema de IP da cidade em questão. Através do tipo e potência das luminárias, buscou-se nos catálogos do fabricante características como, fluxo luminoso, eficiência luminosa, vida mediana, temperatura de cor, IRC e as perdas do reator ou driver, utilizando como referência para demonstração das características a Tabela 2.

4.2.2 Coleta de dados da luminária LED

Para a escolha da luminária LED a ser utilizada para substituição devem ser seguidas as diretrizes PROPEE da Aneel, onde as luminárias precisam ser certificadas com selo PROCEL ou que haja comprovação de sua eficiência por meio de documentação fornecida pela fabricante. No site do PROCEL Info encontram-se a relação de luminárias e equipamentos com selo PROCEL e seus documentos IES, além disso também é necessário o *datasheet* da luminária escolhida, este podendo estar disponível publicamente na internet ou disponibilizado pela própria fabricante.

Deve ser realizada a cotação dos custos referente a luminária escolhida junto a fabricante ou fornecedores, possibilitando cálculos futuros da viabilidade da implantação de um projeto de eficiência para o caso em estudo.

4.2.3 Simulações da luminária LED

Após a escolha da luminária para substituição é realizada simulação para verificar se a mesma atende aos requisitos mínimos da norma ABNT NBR 5101 de Iluminação Pública, que estabelece os requisitos necessários referentes à iluminação pública. O DIALux Evo é um *software* gratuito de projetos de iluminação tanto para ambientes internos, como externos, e será utilizado e explicado à frente. Para efetuar as simulações no DIALux Evo é necessário definir algumas características da via em estudo, sendo que estas informações devem ser obtidas com base na NBR 5101.

4.2.3.1 Classificação das vias

A NBR 5101 classifica os tipos de vias em dois grupos principais, vias urbanas e vias rurais, além de determinar a classificação das mesmas de acordo com o tráfego motorizado e de pedestres. A classificação se dá da seguinte forma.

- 1) Vias urbanas: são as vias que possuem construção a sua margem, que possuem tráfego tanto de veículos motorizados quanto de pedestres. Podem ser ruas, avenidas, vielas ou caminhos abertos à circulação pública que estejam em região urbana. Estas podem ainda ser consideradas como:
 - Via de trânsito rápido: Caracterizadas por avenidas e ruas asfaltadas, exclusivamente para tráfego motorizado, com acessos especiais e trânsito livre, sem interseções e travessia de pedestres em nível, velocidade máxima de 80 km/h.
 - Via arterial: Exclusiva para tráfego motorizado, cruzamentos em dois planos, escoamento, velocidade de operação elevada e proibição de estacionamento na pista. Possui interseções em nível com presença de semáforos, tendo acesso às vias secundárias e locais, velocidade máxima de 60 km/h.
 - Via coletora: Exclusiva para tráfego motorizado, destinada a coletar e distribuir o trânsito que tenha necessidade de entrar ou sair das vias de trânsito rápido ou arteriais, velocidade máxima de 40 km/h.
 - Via local: Vias que permitem o acesso a edificações e as outras vias urbanas, pequeno volume de tráfego, é caracterizada por interseções em nível e não possui semáforos, velocidade máxima de 30 km/h.

2) Vias rurais: Conhecidas como estradas de rodagem, que não necessariamente apresentam somente tráfego motorizado. Sendo elas:

- Rodovias: Destinadas a tráfego motorizado, pavimentadas, podendo apresentar acostamento, com tráfego de pedestres. Podem possuir trechos considerados urbanos, tendo velocidades de 110 km/h para automóveis e camionetas, 90 km/h para ônibus e micro-ônibus e 80 km/h para demais veículos.
- Estradas: Destinadas a tráfego motorizado, sendo via rural não pavimentada, podendo apresentar acostamento, com tráfego de pedestres. Podem possuir trechos considerados urbanos, com velocidade máxima de 60 km/h.

Os valores de tráfego, tanto para veículos quanto para pedestres são estabelecidos de acordo com as Tabelas 5 e 6 respectivamente.

Tabela 5 - Tráfego motorizado.

| Classificação | Volume de tráfego noturno^a de veículos por hora, em ambos os sentidos^b, em pista única |
|--|---|
| Leve (L) | 150 a 500 |
| Médio (M) | 501 a 1200 |
| Intenso (I) | Acima de 1200 |
| ^a Valor máximo das médias horárias obtidas nos períodos compreendidos entre 18 h e 21 h. | |
| ^b Valores para velocidades regulamentadas por lei. | |
| NOTA Para vias com tráfego menor do que 150 veículos por hora, consideram-se as exigências mínimas do grupo leve (L) e, para vias com tráfego muito intenso, superior a 2400 veículos por hora, consideram-se as exigências máximas do grupo de tráfego intenso (I). | |

Fonte: ABNT (2018).

Tabela 6 - Tráfego de pedestres^a.

| Classificação | Pedestres cruzando vias com tráfego motorizado |
|--|---|
| Sem tráfego (S) | Como nas vias arteriais |
| Leve (L) | Como nas vias residenciais médias |
| Médio (M) | Como nas vias comerciais secundárias |
| Intenso (I) | Como nas vias comerciais principais |
| ^a O projetista deve levar em conta esta tabela, para fins de elaboração do projeto. | |

Fonte: ABNT (2018).

As classes de iluminação para cada tipo de via para tráfego de veículos são definidas na Tabela 7. As recomendações de iluminação estão em classe, de V1 a V5 para veículos e P1 a P4 para pedestres. As classes são selecionadas de acordo com a função da via, da densidade de tráfego, da complexidade do tráfego, da separação do tráfego e da existência de facilidades para o controle do tráfego, como os sinais.

Tabela 7 - Classes de iluminação para cada tipo de via.

| Descrição da via | Classe de iluminação |
|--|-----------------------------|
| Vias de trânsito rápido; vias de alta velocidade de tráfego, com separação de pistas, sem cruzamentos em nível e com controle de acesso; vias de trânsito rápido em geral; Auto-estradas. Volume de tráfego intenso Volume de tráfego médio | V1 V2 |
| Vias arteriais; vias de alta velocidade de tráfego com separação de pistas; vias de mão dupla, com cruzamentos e travessias de pedestres eventuais em pontos bem definidos; vias rurais de mão dupla com separação por canteiro ou obstáculo Volume de tráfego intenso Volume de tráfego médio | V1 V2 |
| Vias coletoras; vias de tráfego importante; vias radiais e urbanas de interligação entre bairros, com tráfego de pedestres elevado Volume de tráfego intenso Volume de tráfego médio Volume de tráfego leve | V2 V3 V4 |
| Vias locais; vias de conexão menos importante; vias de acesso residencial Volume de tráfego médio Volume de tráfego leve | V4 V5 |

Fonte: ABNT (2018).

As descrições das vias e estradas são abrangentes, de modo que possam ser interpretadas como exigências individuais para as recomendações nacionais (NBR 5101). A Tabela 8 mostra os requisitos de iluminância e uniformidade para cada uma

das classificações para vias compreendidas na NBR 5101, que devem ser atendidos em projetos destinados à iluminação pública, mais especificamente para projetos de iluminação de vias públicas.

Tabela 8 - Requisitos de iluminância e uniformidade.

| Classe de iluminação | <i>L_{med}</i> | <i>U_o</i> ≥ | <i>U_l</i> ≥ | <i>TI</i>% ≤ | <i>SR</i> ≥ |
|-----------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|------------------------|
| V1 ^a | 2,00 | 0,40 | 0,70 | 10 | 0,5 |
| V2 ^a | 1,50 | 0,40 | 0,70 | 10 | 0,5 |
| V3 ^a | 1,00 | 0,40 | 0,70 | 10 | 0,5 |
| V4 | 0,75 | 0,40 | 0,60 | 15 | - |
| V5 | 0,50 | 0,40 | 0,60 | 15 | - |

Legenda
L_{med} luminância média
U_o uniformidade global
U_l uniformidade longitudinal
TI incremento de limiar
SR razão das áreas adjacentes à via
 NOTA Os critérios de *TI* e *SR* são orientativos, assim como as classes V4 e V5.

^a Para as classes V1, V2 e V3 deve-se atender aos requisitos de luminância média, uniformidade global e uniformidade longitudinal.

Fonte: ABNT (2018).

4.2.3.2 Configuração do simulador DIALux Evo

No DIALux Evo a simulação é realizada como projeto de iluminação de rua (Figura 24), porém é utilizada como base a norma europeia de iluminação pública EN 13201:2015. Desta forma, deve-se verificar qual a classificação de iluminação da EN 13201 possui os mesmos valores da classificação determinada através da NBR 5101 e selecioná-la no software (Figura 25).

Após configurar a classificação da via no *software*, faz-se a configuração das luminárias, e a importação do arquivo fotométrico ou IES da luminária escolhida, dessa forma todas as informações referentes à luminosidade da luminária são transferidas

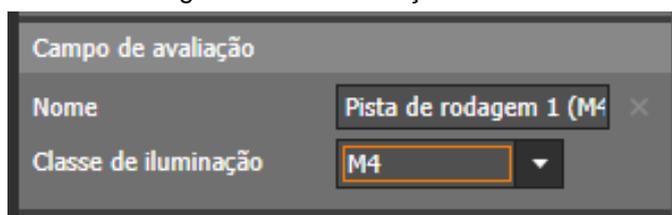
automaticamente para a simulação. Também existe a possibilidade de selecionar uma luminária diretamente na base de dados do DIALux Evo®, que conta com catálogos e arquivos de diversos equipamentos de marcas distintas.

Figura 24 - Tipo de projeto no DIALux Evo.



Fonte: A autoria própria (2021).

Figura 25 - Classificação da via.



Fonte: A autoria própria (2021).

As últimas configurações a serem realizadas são as de distribuição das luminárias, onde estas podem ser customizadas de acordo com as características do local em estudo, sendo possível variar a distância entre postes, altura do ponto de luz, inclinação do braço extensor, pendor do ponto de luz, distância entre poste e pista de rodagem e comprimento do braço extensor (Figura 26). Com todas as informações tanto da via quanto das luminárias inseridas no DIALux Evo, verifica-se se a luminária escolhida atendeu todos os requisitos da classificação determinada previamente (Figura 27).

O DIALux Evo possibilita a geração de uma documentação com todas as informações referentes às simulações desenvolvidas, com dados do equipamento e da via utilizados, com os resultados para o campo de avaliação escolhido, os resultados do ponto de vista de dois observadores inseridos na cena, e ainda são disponibilizadas as curvas de iluminância da via, a malha e tabela com todos os valores calculados.

Figura 26 - Configuração da distribuição das luminárias.

The screenshot shows the 'Distribuição de luminárias' configuration panel. It includes a 'Tipo de distribuição' section with four icons representing different luminaire layouts. Below this are several input fields and checkboxes:

- Distância entre postes: 15.000 m (with an 'Otimizar' checkbox)
- Altura do ponto de luz: 8.000 m
- Inclinação do braço extensor: 0.0 °
- Pendor do ponto de luz: 0.000 m
- Rotação de poste: 0.0 °
- Luminárias por poste: 1
- Distância poste-pista de rodagem: 0.000 m (with a radio button)
- Comprimento do braço extensor: 0.000 m (with a radio button)
- Deslocamento longitudinal: 0.000 m
- Exibir geometria de poste

Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 27 - Critérios a serem atendidos para classificação V4 na simulação.

| Campo de avaliação (M4) | | Pista de rodagem 1 (M4) | | |
|-------------------------|----------------------|-------------------------|------|---|
| Lm | [cd/m ²] | ✓ ≥ 0.75 | 0.75 | ✓ |
| Uo | | ✓ ≥ 0.40 | 0.50 | ✓ |
| UI | | ✓ ≥ 0.60 | 0.62 | ✓ |
| TI | | ✓ ≤ 15 | 9 | ✓ |
| EIR | | ✓ ≥ 0.30 | 0.54 | ✓ |

Fonte: Autoria própria (2021).

4.2.4 Aplicação do Projeto de Eficiência Energética da CELESC

Com as características do sistema atual e do sistema proposto definidas é realizada a análise da energia consumida de acordo com as diretrizes do PROPEE e da chamada pública PEE CELESC vigente para o caso de Joinville, ou de acordo com edital da concessionária local, a fim de estimar os resultados a serem obtidos por meio da execução do PEE na região escolhida. As informações referentes aos sistemas atual e proposto foram inseridas na Tabela 9, possibilitando a análise da energia consumida dos sistemas. Para a sua elaboração foi utilizada como base a Tabela 1.

Tabela 9 - Consumo de energia dos sistemas.

| Sistema Atual | |
|--------------------------------|---|
| Tipo de lâmpada | |
| Potência da lâmpada | W |
| Potência do reator | W |
| Quantidade | Unidade |
| Potência instalada | $(\text{Potência da lâmpada} + \text{Potência do reator}) \times \text{Quantidade}$ |
| Tempo de utilização do sistema | h/dia |
| Dias de utilização do sistema | dia/ano |
| Funcionamento do sistema | $\text{Tempo de utilização do sistema} \times \text{Dias de utilização do sistema}$ |
| Energia Consumida | $\text{Potência instalada} \times \text{Funcionamento do sistema}$ |
| Sistema Proposto | |
| Tipo de lâmpada | |
| Potência da lâmpada | W |
| Potência do driver | W |
| Quantidade | Unidade |
| Potência instalada | $(\text{Potência da lâmpada} + \text{Potência do reator}) \times \text{Quantidade}$ |
| Tempo de utilização do sistema | h/dia |
| Dias de utilização do sistema | dia/ano |
| Funcionamento do sistema | $\text{Tempo de utilização} \times \text{Dias de utilização do sistema}$ |
| Energia Consumida | $\text{Potência instalada} \times \text{Funcionamento do sistema}$ |

Fonte: Autoria própria (2021).

Para determinar a redução da demanda na ponta é utilizado um fator de coincidência na ponta ($FCpa$), conforme Equação 5, fator de carga (Fc) e constante k definidos de acordo com a chamada pública vigente. A Tabela 10 foi utilizada para analisar o impacto na demanda com a substituição das luminárias.

Tabela 10 - Demanda média na ponta dos sistemas.

| Sistema Atual | |
|--|---|
| Tipo de lâmpada | |
| Potência instalada | (Potência da lâmpada + Potência do reator) x Quantidade |
| Meses no ano de utilização do sistema no horário de ponta | Meses |
| Dias úteis no mês de utilização do sistema no horário de ponta | Dias |
| Horas por dia de utilização do sistema no horário de ponta | Horas |
| Potência média na ponta | Potência instalada x [(meses x dias x horas)/(12x22x3)] |
| Fator de coincidência na ponta | (meses x dias x horas)/(12x22x3) |
| Demanda média na ponta (kW) | Potência instalada x Fator de coincidência na ponta |
| Sistema Proposto | |
| Tipo de lâmpada | |
| Potência instalada (kW) | (Potência da lâmpada + Potência do reator) x Quantidade |
| Meses no ano de utilização do sistema no horário de ponta | Meses |
| Dias úteis no mês de utilização do sistema no horário de ponta | Dias |
| Horas por dia de utilização do sistema no horário de ponta | Horas |
| Potência média na ponta (kW) | Potência instalada x [(meses x dias x horas)/(12x22x3)] |
| Fator de coincidência na ponta | (meses x dias x horas)/(12x22x3) |
| Demanda média na ponta (kW) | Potência instalada x Fator de coincidência na ponta |

Fonte: Autoria própria (2021).

Para determinar o benefício anualizado¹ proveniente da implantação deste projeto foram utilizados o Custo Evitado de Demanda (CED), determinado a partir da Equação 10, e o Custo da Energia Evitada (CEE), de acordo com Equação 7, os quais podem ser disponibilizados pela concessionária na chamada pública do PEE vigente, bem como a Demanda Evitada na Ponta (RDP) conforme Equação 4, e a Energia Economizada (EE) determinada através da Equação 3, de acordo com as Tabelas 9 e 10. A Tabela 11 foi utilizada para determinar o benefício anualizado conforme Equação 11.

Tabela 11 - Benefício anualizado do projeto.

| Resultados Esperados | |
|---------------------------------|---------|
| Demanda evitada na ponta | kW |
| Custo evitado de demanda | R\$/kW |
| Energia economizada | MWh/ano |
| Custo da energia economizada | R\$/MWh |
| Benefício anualizado iluminação | R\$ |

Fonte: Autoria própria (2021).

Para determinar a relação custo benefício são necessárias as informações de preço do modelo escolhido das luminárias, que podem ser obtidas por meio de consulta em sites de venda na internet ou através de contato com empresa responsável pelo fornecimento. A Tabela 12 foi utilizada para organizar estas informações e obter o FRC utilizando a Equação 15.

Tabela 12 - Custo dos equipamentos do projeto.

| Equipamento | Custo unitário (R\$) | Quantidade | Custo total (R\$) | Vida útil (anos) | FRC |
|--------------------|-----------------------------|-------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------------|
| Tipo da luminária | Valor | Unidade | Valor x Unidade | anos | $\frac{i(1+i)^u}{(1+i)^u - 1}$ |

Fonte: Autoria própria (2021).

¹ É a valorização da energia economizada e da redução da demanda na ponta durante o período de um ano com a aplicação do projeto.

Com os custos dos equipamentos determinados a partir da Equação 14 é calculado o custo total do projeto. A concessionária pode estabelecer custos fixos ou relacionados ao custo total do projeto na chamada pública vigente, dessa forma estes também passam a integrar no custo total do projeto, sendo eles o custo com mão de obra própria, definido pela Equação 16 e o custo com transporte, calculado através da Equação 17. A Tabela 13 traz a relação destes custos.

Tabela 13 - Custos totais do projeto.

| Tipo de Custo | R\$ |
|--|---------------------------------|
| Materiais e Equipamentos | R\$ |
| Mão de Obra Própria (Concessionária) - MOP | R\$ |
| Transporte | R\$ |
| Outros custos indiretos | R\$ |
| Auditoria Contábil Financeira | R\$ |
| Total | Somatório dos custos anteriores |

Fonte: Autoria própria (2021).

Por fim, para determinar a relação custo-benefício do projeto é necessário definir o custo anualizado² utilizando a Equação 13 e o custo anualizado total utilizando a Equação 12, onde são relacionados os custos unitários e totais dos equipamentos, o custo total do projeto, o FRC determinado anteriormente na Tabela 12, e a quantidade de equipamentos, conforme Tabela 14.

Tabela 14 - Custo anualizado do projeto.

| | |
|---------------------------------------|--|
| Custo de cada equipamento (R\$) | |
| Custo total do projeto (R\$) | |
| Custo total em equipamentos (R\$) | |
| Fator de recuperação do capital - FRC | |
| Quantidade de equipamentos | |
| Custo anualizado total (R\$) | |

Fonte: Autoria própria (2021).

² Relação de todos os custos e do fator de recuperação de capital (FRC) referentes a aplicação do projeto no período de 1 (um) ano.

Com o benefício e o custo anualizado calculados é definida a relação custo benefício do projeto por meio da Equação 18.

$$RCB = \frac{CA_T}{BA_T}$$

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 Resultados da Avenida Santos Dumont

O conjunto de pontos analisados da Avenida Santos Dumont é composto por 114 pontos de iluminação, inicialmente estes eram compostos por lâmpadas vapor de sódio de 250W e reatores para ignição das mesmas. As informações gerais foram extraídas dos catálogos da Demape que se encontram na Tabela 15.

Tabela 15 - Características Lâmpadas Vapor de Sódio Avenida Santos Dumont.

| Lâmpadas Vapor de Sódio | |
|--------------------------------|----------|
| Potência | 250 W |
| Fluxo luminoso | 28000 lm |
| Eficiência luminosa | 112 lm/W |
| Vida mediana | 32000 h |
| Temperatura de cor | 2000 K |
| IRC | > 20 |

Fonte: Autoria própria (2021).

Nestes pontos foi realizada a troca por luminárias LED de 160W Philips com *driver* integrado, sendo as informações técnicas na Tabela 16 e foram obtidas através do catálogo e *datasheet* do fabricante.

Tabela 16 - Características Luminárias LED Avenida Santos Dumont.

| Luminária LED | |
|----------------------|----------|
| Potência | 160 W |
| Fluxo luminoso | 14400 lm |
| Eficiência luminosa | 90 lm/W |
| Vida mediana | 50000 h |
| Temperatura de cor | 4000 K |
| IRC | 75 |

Fonte: Aatoria própria (2021).

Para comparar o consumo referente à utilização destes dois componentes, para o sistema com luminárias a vapor de sódio foram estimados valores de consumo com base no período utilizado pela CELESC para o cálculo de consumo sendo de 12 horas diárias em 365 dias por ano, totalizando 4.380 horas de funcionamento anual, disponível na chamada pública PEE CELESC nº 001/2019 item 8.5.5, e para obter os custos após a implantação das luminárias LED foi utilizado sistema de telegerenciamento que conta com medição de consumo pelos equipamentos de acionamento instalados.

Nesta etapa a análise está sendo realizada sobre pontos de iluminação que já tiveram seus componentes substituídos. Os valores indicados na Tabela 17 são estimativas levando em consideração a potência da lâmpada e perda do reator e o período médio utilizado para cobrança, indicado pela ANEEL. Já as informações de consumo indicadas na Tabela 18 foram obtidas através do sistema de telegerenciamento, sendo que estas medições já contam com o consumo de todo o sistema, lâmpada, *driver* e equipamento de acionamento, assim tem-se um valor mais próximo do real.

Tabela 17 - Consumo estimado do trajeto com lâmpadas vapor de sódio 250W.

| | |
|--------------------------------|----------|
| Potência Lâmpada (W) | 250 |
| Perdas Reator (W) | 30 |
| Horas (h) | 12 |
| Consumo diário por ponto (kWh) | 3,360 |
| Quantidade de pontos | 114 |
| Consumo total diário (kWh) | 383,04 |
| Consumo anual (MWh/ano) | 139,8096 |

Fonte: Aatoria própria (2021).

Tabela 18 - Consumo medido do trajeto com lâmpadas LED 160W.

| | |
|-------------------------------|--------|
| Consumo médio por ponto (kWh) | 1,8 |
| Quantidade de pontos | 114 |
| Consumo total diário (kWh) | 205,2 |
| Consumo anual (MWh/ano) | 74,898 |

Fonte: Autoria própria (2021).

Utilizando a análise feita dos dados anteriores do sistema de iluminação da Avenida Santos Dumont e comparando-as com as informações de consumo obtidas através do sistema de telegerenciamento, fica evidente a redução de consumo proveniente da troca das luminárias, onde mesmo com a redução da potência instalada os critérios mínimos exigidos pela NBR 5101 continuam a ser atendidos.

Através da troca das luminárias obtém-se uma redução no consumo anual de 139,8096 MWh/ano utilizando lâmpadas vapor de sódio, para 74,898 MWh/ano com a utilização de luminária LED, proporcionando uma redução de 46,43% no consumo de energia.

5.2 Projeto de Eficiência Energética para Costa e Silva

A região escolhida do bairro Costa e Silva é composta por 273 pontos de iluminação, e estes possuem lâmpadas vapor de sódio de 100W e reatores para ignição das mesmas. A Figura 28 indica as luminárias instaladas em duas das ruas que fazem parte da região escolhida e as informações gerais foram extraídas dos catálogos da Demape que se encontram na Tabela 19.

Figura 28 - Luminárias com lâmpada vapor de sódio instalada.



Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 19 - Características do sistema atual.

| Lâmpadas Vapor de Sódio | |
|--------------------------------|---------|
| Potência | 100 W |
| Fluxo luminoso | 9500 lm |
| Eficiência luminosa | 95 lm/W |
| Vida mediana | 32000 h |
| Temperatura de cor | 2000 K |
| IRC | > 20 |

Fonte: Autoria própria (2021).

Através das disposições do PROPEE, a ANEEL exige que os equipamentos utilizados nos projetos de eficiência energética possuam o selo PROCEL de eficiência energética. Para definir o modelo e características da luminária que será utilizada para a substituição, foi realizada pesquisa no site PROCEL Info, inicialmente foi escolhida a luminária SL Mini 45W da LEDSTAR que integrava a lista disponibilizada pelo PROCEL, porém a mesma teve sua fabricação descontinuada sendo substituída pelo novo modelo da empresa, a SL Vitta 46W.

Entretanto, como este novo modelo não teve seus arquivos fotométricos publicados no PROCEL, a empresa não está autorizada a disponibilizá-los. Foram realizadas tentativa de contato com o PROCEL e com outra empresa listada da relação do mesmo, porém não houve retorno de nenhuma das partes, dessa forma obteve-se as informações e cotações da SL Vitta 46W V9.6, junto a LEDSTAR, mostrada na Figura 29, porém as simulações foram realizadas com os arquivos fotométricos da SL Mini 45W, uma vez que características como fluxo luminoso, eficiência luminosa, índice de reprodução de cor e temperatura de cor são equivalentes entre ambas.

A simulação com o software DIALux Evo foi realizada para verificação do atendimento aos parâmetros de iluminação definidos pelas normas ABNT NBR 5101 de Iluminação Pública e ABNT NBR 15129 de Luminárias Públicas para vias com classificação V4 equivalente a classificação M4 de acordo com a norma europeia EN 13201 utilizada pelo *software*. Na Tabela 20 encontram-se as informações da luminária escolhida e no Apêndice A estão as informações referentes a simulação das mesmas.

Figura 29 - Luminária LED escolhida para substituição.



Fonte: LEDSTAR (2021).

Tabela 20 - Características do sistema proposto.

| Luminária LED | |
|----------------------|-------------|
| Potência | 46 W |
| Fluxo luminoso | 6670 lm |
| Eficiência luminosa | 145 lm/W |
| Vida mediana | > 100.000 h |
| Temperatura de cor | 5000 K |
| IRC | > 70 |

Fonte: Autoria própria (2021).

Com as características do sistema atual e do sistema proposto foi efetuada análise da energia consumida de acordo com as determinações item 3.1.3 do módulo 4 do PROPEE, a fim de estimar os resultados a serem obtidos por meio da execução do PEE na região escolhida. Foi utilizada como referência a Tabela 9, assim as informações e análise da energia consumida e economizada encontram-se na Tabela 21.

Tabela 21 - Consumo de energia dos sistemas atual e proposto.

| Sistema Atual | |
|---|----------------|
| Tipo de lâmpada | Vapor de Sódio |
| Potência da lâmpada (W) | 100 |
| Potência do reator (W) | 100 |
| Quantidade | 273 |
| Potência instalada (kW) | 54,6 |
| Tempo de utilização do sistema (h/dia) | 12 |
| Dias de utilização do sistema (dia/ano) | 365 |
| Funcionamento do sistema (h/ano) | 4380 |
| Energia Consumida (MWh/ano) | 239,148 |
| Sistema Proposto | |
| Tipo de lâmpada | LED |
| Potência da lâmpada (W) | 46 |
| Potência do driver (W) | 60 |
| Quantidade | 273 |
| Potência instalada (kW) | 28,938 |
| Tempo de utilização do sistema (h/dia) | 12 |
| Dias de utilização do sistema (dia/ano) | 365 |
| Funcionamento do sistema (h/ano) | 4380 |
| Energia Consumida (MWh/ano) | 125,5527 |

Fonte: Autoria própria (2021).

Para determinar a redução da demanda na ponta foi utilizado um fator de coincidência na ponta (FC_{pa}) de 1 de acordo com o item 8.5.1 da chamada pública PEE/CELESC nº 001/2019, visto que foi considerado que o sistema permanece operando em todo o período máximo de ponta estipulado pela CELESC. Foi utilizada a Tabela 10 como referência, e o item 3.1.3 do módulo 4 do PROPEE. Desta forma, a Tabela 22 exibe os dados referentes a redução da demanda na ponta. Também sendo considerado fator de carga (F_c) de 70% e constante k igual a 0,15.

Tabela 22 - Demanda média na ponta dos sistemas atual e proposto.

| Sistema Atual | |
|--|----------------|
| Tipo de lâmpada | Vapor de Sódio |
| Potência instalada (kW) | 54,60 |
| Meses no ano de utilização do sistema no horário de ponta | 12 |
| Dias úteis no mês de utilização do sistema no horário de ponta | 22 |
| Horas por dia de utilização do sistema no horário de ponta | 3 |
| Potência média na ponta (kW) | 54,60 |
| Fator de coincidência na ponta | 1 |
| Demanda média na ponta (kW) | 54,60 |
| Sistema Proposto | |
| Tipo de lâmpada | LED |
| Potência instalada (kW) | 28,938 |
| Meses no ano de utilização do sistema no horário de ponta | 12 |
| Dias úteis no mês de utilização do sistema no horário de ponta | 22 |
| Horas por dia de utilização do sistema no horário de ponta | 3 |
| Potência média na ponta (kW) | 28,938 |
| Fator de coincidência na ponta | 1 |
| Demanda média na ponta (kW) | 28,938 |

Fonte: Autoria própria (2021).

5.2.1 Análise da viabilidade

Os custos evitados de demanda e de energia economizada são disponibilizados no item 8.15 da chamada pública no PEE CELESC nº 001/2019 de acordo com tabela que encontra-se no Anexo A, não sendo necessário calculá-los para o projeto. Para determinar o benefício anualizado proveniente da implantação deste projeto foram utilizados o Custo Evitado de Demanda (CED) e o Custo da Energia Evitada (CEE) bem como a Demanda Evitada na Ponta e a Energia Economizada. O resultado encontra-se na Tabela 23, sendo utilizada como referência a Tabela 11.

Tabela 23 - Benefício anualizado.

| Resultados Esperados | |
|--|-----------|
| Demanda evitada na ponta (kW) | 25,66 |
| Custo evitado de demanda (R\$/kW) | 846,20 |
| Energia economizada (MWh/ano) | 112,4 |
| Custo da energia economizada (R\$/MWh) | 490,76 |
| Benefício anualizado iluminação (R\$) | 76.876,39 |

Fonte: Aatoria própria (2021).

Para efetuar os cálculos referente à relação custo benefício, foram obtidas informações sobre o preço do modelo escolhido das luminárias através de contato com empresa responsável pelo fornecimento, conforme Tabela 24 que tem como referência a Tabela 12. A taxa de desconto considerada para determinar o fator de recuperação de capital foi de 8%, conforme item 8.7 da chamada pública PEE CELESC nº 001/2019.

Tabela 24 - Custo dos equipamentos.

| Equipamento | Custo unitário (R\$) | Quantidade | Custo total (R\$) | Vida útil (anos) | FRCu |
|--------------------|-----------------------------|-------------------|--------------------------|-------------------------|-------------|
| LED 46W | 478,53 | 273 | 130.638,69 | 22 | 0,09803 |

Fonte: Aatoria própria (2021).

A partir dos custos relacionados aos equipamentos foi determinado o custo total do projeto, incluindo os custos com mão de obra, transporte, custos indiretos e auditoria contábil financeira, expressos na Tabela 25 com referência a Tabela 13. Todas as “propostas de projeto” deverão apresentar o valor de R\$ 5.000,00 referentes a auditoria contábil e financeira já contratada pela CELESC, de acordo com item 8.10 da chamada pública PEE CELESC nº 001/2019.

Já os custos indiretos referem-se às despesas da CELESC com a emissão da Anotação de Responsabilidade Técnica - ART, a ser registrada junto aos conselhos de classe (CREA, CAU, entre outros), e referente à gestão e fiscalização do projeto proposto. Deverá ser previsto um valor de R\$ 500,00 para este item (CELESC, 2019). Com tais informações, obtém-se o custo anualizado que possibilita então o cálculo da relação custo benefício do projeto, com referência a Tabela 14 as informações estão expressas na Tabela 26.

Tabela 25 - Custos totais.

| Tipo de Custo | R\$ |
|--|-------------------|
| Materiais e Equipamentos (R\$) | 130.638,69 |
| Mão de Obra Própria (Concessionária) - MOP (R\$) | 61.869,78 |
| Transporte (R\$) | 8.059,20 |
| Outros custos indiretos (R\$) | 500,00 |
| Auditoria Contábil Financeira (R\$) | 5.000,00 |
| Total | 206.067,67 |

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 26 - Custo anualizado.

| | |
|--|------------|
| Custo de cada equipamento (R\$) | 478,53 |
| Custo total do projeto (R\$) | 206.067,67 |
| Custo total em equipamentos (R\$) | 130.638,69 |
| Fator de recuperação do capital - FRCu | 0,09803 |
| Quantidade de equipamentos | 273 |
| Custo anualizado total (R\$) | 20.200,81 |

Fonte: Autoria própria (2021).

Com o benefício e o custo anualizados calculados é possível definir a relação custo benefício do projeto, sabendo que o benefício anualizado será de R\$76.876,39 e que o custo anualizado será R\$ 20.200,81, de acordo com a equação (temos que a relação custo benefício será:

$$RCB = \frac{CA_T}{BA_T} = \frac{20.200,81}{76.876,39} = 0,26$$

Através dos resultados e com as informações indicadas nas Tabelas 21, 22 e 23 com a substituição das luminárias obtém-se uma redução de 47%, tanto da energia consumida quanto da demanda na ponta, e com isso tem-se um benefício anualizado de R\$76.876,39. Seguindo as etapas do PROPEE foram calculadas as variáveis necessárias para avaliar a viabilidade da implantação do projeto, resultando em um valor de relação custo-benefício de 0,26, o qual fica abaixo dos 0,8 delimitado pela ANEEL como valor máximo para que o projeto seja considerado viável.

Com os custos do projeto e o benefício anualizado do mesmo, determinados nas

Tabelas 25 e 23 respectivamente, é possível estimar de forma simplificada o tempo de retorno do investimento para o projeto. Para encontrar o período de retorno do investimento são somados os benefícios anualizados acumulados, até que o valor total se iguale a quantia do investimento inicial. Dessa forma tem-se que o tempo de retorno para os valores de custos determinados pela CELESC para o ano de 2019, e para este projeto em específico, será de aproximadamente 2 anos e 8 meses, conforme calculado abaixo.

$$tr = \frac{\text{Custo total projeto}}{\text{Benefício anualizado}} = \frac{206.067,67}{76.876,39} = 2,68 \text{ anos}$$

6 CONCLUSÃO

A preocupação com a eficiência energética está cada vez mais evidente na maioria dos países. Através de iniciativas e do desenvolvimento de equipamentos visando uma melhor eficiência energética é possível reduzir o consumo consideravelmente, como consequência, tem-se uma melhor distribuição da energia já gerada, de forma que ocorra uma redução na necessidade de expansão do sistema e dos impactos ambientais decorrentes do processo de expansão. A partir desta necessidade, tem-se a criação do PROCEL, atuando em diversas áreas como o setor residencial, público, educacional, industrial, iluminação pública, dentre outras.

Aliado aos programas voltados à efficientização, o desenvolvimento de novos dispositivos e equipamentos mais eficientes tem se tornado uma tendência global. Através deste estudo é evidente que a tecnologia LED possui um grande potencial para o setor em diversos aspectos, se tratando da iluminação pública além do benefício da eficiência energética e da redução dos custos operacionais e de manutenção. O LED trás novas possibilidades quanto à inclusão de soluções de gestão urbana integrada, auxiliando no gerenciamento destes sistemas.

Nesta elaboração de um projeto seguindo as diretrizes do PROPEE, buscou-se analisar a viabilidade e o impacto da substituição das luminárias mais antigas por luminárias mais eficientes. Foram coletadas informações como consumo de energia, quantidade, modelo das luminárias e tempo de funcionamento, com o objetivo de obter uma redução no consumo de energia sem a necessidade de alterar todo o sistema, apenas através da troca das luminárias.

Assim, de acordo com o PROPEE foi identificada uma luminária que atendesse aos requisitos mínimos exigidos pela NBR 5101 para a via em questão e que possuísse o selo PROCEL. Porém as simulações foram realizadas com o modelo antigo que estava presente na lista do PROCEL, uma vez que a empresa não estava autorizada a disponibilizar os arquivos. Entretanto, conforme próprio vendedor técnico da empresa, as luminárias são equivalentes, e dessa forma foi utilizado o modelo mais recente da marca para obter as informações e orçamento e a título de simulação utilizou-se o arquivo fotométrico do modelo antigo.

Embora tenham sido utilizadas as diretrizes e metodologia do PROPEE para a elaboração deste trabalho, como o mesmo não foi implementado fisicamente, alguns módulos não foram abordados. Com os resultados obtidos através das análises é notória a viabilidade da implantação de novas tecnologias e equipamentos mais eficientes visando benefícios como redução de consumo de energia e de demanda.

Inicialmente, através das análises da Avenida Santos Dumont, onde a substituição das luminárias já foi realizada pela prefeitura é nítida a redução do consumo de energia através da troca das luminárias vapor de sódio de 250W para LED de 160W, resultando em uma redução de 46,43% no consumo de energia e mantendo os níveis de iluminação ideais. Analisando os resultados da elaboração do projeto para um grupo de pontos do bairro Costa e Silva, tem-se uma redução de 47% tanto da energia consumida quanto da demanda na ponta, apenas com a substituição de luminárias vapor de sódio de 100W para LED de 46W, além de gerar um benefício anualizado de R\$76.876,39. Através da relação custo-benefício conclui-se que o projeto é viável para implantação, de forma que os benefícios ultrapassam os custos demandados pela modernização da região.

Como estudos futuros, sugere-se o desenvolvimento de um projeto de eficiência energética contemplando todos os módulos do PROPEE para aplicação efetiva em sistemas de iluminação não eficientizados, com maior aprofundamento no PROPEE nas normas da CELESC e na Norma 5101 de Iluminação Pública. O estudo da utilização de novas tecnologias como os equipamentos de telegerenciamento em substituição aos relés fotoelétricos convencionais, integrados à utilização das luminárias LED e a análise da redução do consumo com a utilização da dimerização dos sistemas de iluminação. E a avaliação dos benefícios sociais e econômicos após a implantação de projetos de eficiência energética, visando constatar as expectativas do programa.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Org.). Resolução Nº 394, de 17 de Setembro de 2001. Brasília, 2001.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Org.). Resolução Nº 456, de 29 de Novembro de 2000. Brasília, 2000.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Org.). Procedimentos do Programa de Eficiência Energética – PROPEE 2019. Brasília: ANEEL, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE SERVIÇOS DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA (ABESCO). O Brasil desperdiça meia Itaipu por ano. 2018. Disponível em: <http://www.abesco.com.br/pt/novidade/brasil-desperdica-meia-itaipu-por-ano/>. Acesso em: 22 nov. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5101: Iluminação Pública – Procedimento. Rio de Janeiro, p. 43. 2018.

BRALUZ. Página da empresa. Luminária Pública, 2020. Disponível em: <https://www.braluz.com.br/produto/rpf-155-luminaria-publica/> Acesso em: 23 jul. 2020.

CASA, G; VERONI, F. “A new way to manage public lighting.” IEEE Meeting and Tariffs for Energy Supply, no. 462, pp. 91 – 95, May 1999.

CELESC. Chamada Pública PEE CELESC nº 001/2019. Seleção de Propostas de Projeto em Eficiência Energética. 2019. Disponível em: http://site.celesc.com.br/peecelesc/images/arquivos/ChamadaPublica2019/Edital_CP_P_PEE_Celesc_001_2019.pdf. Acesso em: 15 fev. 2021.

CELESC. História, Linha do tempo. Disponível em: <https://www.celesc.com.br/home/historia#1990>. Acesso em: 18 mar. 2021.

COPEL. Manual de Iluminação Pública. Curitiba: Distribuição - SED/DNGO/VNOT, Companhia Paranaense de Energia - COPEL, 2012. Disponível em: https://hosting.iar.unicamp.br/lab/luz/ld/Arquitetural/Ilumina%e7%e3o%20P%fablica/Manuais/manual_de_iluminacao_publica_copel_companhia_paranaense_de_energia.pdf. Acesso em: 23 de jul. de 2020.

CRAFORD, M. G. Current State of the art in high brightness LEDs. American Physical Society Meeting, 2007.

Dicas Led. A importância dos drivers na iluminação LED. 2019. Disponível em: <https://www.dicasled.pt/a-importancia-dos-drivers-na-iluminacao-led/>. Acesso em: 10 fev. 2021.

EDP. Manual de Iluminação Pública. Coimbra: EDP Distribuição e ISR-UC Coimbra, 2016. Disponível em: <https://www.edpdistribuicao.pt/sites/edd/files/2019-04/Manual%20Iluminacao%20Publica.pdf> . Acesso em: 23 jul 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Matriz Energética e Elétrica. 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 18 mar 2021

EVERLIGHT. Manutenção do Fluxo Luminoso. Disponível em: <http://www.everlight.com.br/tecnologia/manutencao-do-fluxo-luminoso>. Acesso em: 15 ago. 2020.

FIBROMETAL. Página da empresa. Postes decorativos, 2018. Disponível em: <http://www.fibrometal.com.br/Produtos/1/1/0/Poste-Decorativo>. Acesso em: 23 de jul. de 2020.

FONSECA, A. P. DocPlayer (Página de hospedagem de documentos). Iluminação Externa - Iluminação Pública Monumentos Fachadas Vias e Parques - Apresentação de Slides, 2017. Disponível em: <https://docplayer.com.br/50208657-Iluminacao-publica-monumentos-fachadas-vias-e-parques.html>. Acesso em: 23 de jul. de 2020.

GODOY, Plínio. Iluminação Pública e Urbana. 2015. Disponível em: http://www.osetoreletrico.com.br/wp-content/uploads/documentos/fasciculos/ed-108_Fasciculo_Cap-I-Iluminacao-publica-e-urbana.pdf . Acesso em:

GOLDEMBERG, JOSÉ. Pesquisa e desenvolvimento na área de energia. São Paulo, Perspec., São Paulo , v. 14, n. 3, p. 91-97, July 2000 . Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-88392000000300014&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 22 nov. 2020. <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-88392000000300014>.

IEA. Light's Labour's Lost: Policies for Energy-efficient Lighting. Paris: International Energy Agency - IEA, 2006.

ILUCTRON. Página da empresa. Fococélula, 2019. Disponível em: <http://www.iluctron.com.br/uploads/produtos/fococelula/fococelula-iluctron-led-technology-detalle-1555506665805-iltic.jpg>. Acesso em: 26 jul. 2019.

KOZLOFF, K.; COWART, R.; JANNUZZI, G. DE M.; MIELNIK, O. , 2001 – Energia: Recomendações para uma Estratégia Nacional de Combate ao Desperdício – USAID, Campinas, 193p.

LEDSTAR. Street Light. 2020. Disponível em: https://www.ledstar.com.br/categoria-produto/produtos/iluminacao-lateral-externa/street-light/?product_order=date. Acesso em: 27 out. 2020.

LEDSTAR. Datasheet LEDSTAR® Street-Light VITTA V9.6. 2021.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). Portaria nº 594, de 18 de outubro de 2011.

MOREIRA, V. A. Iluminação Elétrica. Editora Edgard Blücher, 1ª edição, São Paulo, 1999.

MUSE, Larissa Paredes. Iluminação Pública no Contexto das Cidades Inteligentes: matriz multicritério para aplicação do led e da iot no brasil. 2019. 219 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Urbana, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <http://dissertacoes.poli.ufrj.br/dissertacoes/dissertpoli2654.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2020.

SOARES, Guilherme Marcio. Driver de longa vida e alta eficiência para acionamento de Leds em iluminação pública. Monografia - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 101f, 2012.

PEDROSO, Luciano Soares et al . Construção de um luxímetro de baixo custo. Rev. Bras. Ensino Fís., São Paulo , v. 38, n. 2, e2503, 2016 . Disponível em http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172016000200603&lng=pt&nrm=iso. acessos em 22 nov. 2020. Epub 19-Abr-2016. <https://doi.org/10.1590/S1806-11173812136>.

PHILIPS. Catálogo Luminárias Outdoor. 2017. Disponível em: https://issuu.com/philipsilumina/docs/catalogo_20de_20luminarias_20outdoo. Acesso em: 14 fev. 2021.

POLONSKII, M; SEIDEL, A. R. (2008). Reatores Eletrônicos para Iluminação Fluorescente. Editora Unijuí 1. Ed. Ijuí.

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA. Emenda constitucional nº 39, de 19 de Dezembro de 2002. Brasília, 2002.

PROCEL. Manual de Iluminação Procel. Rio de Janeiro: Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica - PROCEL, 2011. Disponível em: http://drb-m.org/MANUAL%20DE%20ILUMINACAO%20-%20PROCEL_EPP%20-AGOSTO%202011.pdf. Acesso em: 23 jul 2020.

ROSITO, L. H. DESENVOLVIMENTO DA ILUMINAÇÃO PÚBLICA NO BRASIL. O Setor Elétrico, 2009. Disponível em: https://www.fne.org.br/upload/documentos/projetos/iluminacao-publica/desenvolvimento_i_p_no_brasil_-_luciano_haas_rosito.pdf. Acesso em: 20 nov. 2020.

SANTANA, Rosa Maria Bomfim. ILUMINAÇÃO PÚBLICA: uma abordagem gerencial. 2010. 94 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Regulação da Indústria de Energia, Universidade Salvador – Unifacs, Salvador, 2010. Disponível em: https://hosting.iar.unicamp.br/lab/luz/ld/Arquitetural/Pesquisa/iluminacao_publica_um_a_abordagem_gerencial.pdf. Acesso em: 21 nov. 2020.

SILVA, L. L. F da. Iluminação Pública no Brasil: Aspectos Energéticos e Institucionais. 2006. Dissertação. (Mestrado em Planejamento Energético) - Faculdade de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

VASCONCELLOS, L., & LIMBERGER, M. Iluminação Eficiente - Iniciativas da Eletrobras, Procel e Parceiros. Rio de Janeiro: Eletrobras, Procel. 2013.

VIANNA, N. S., GONÇALVES, J. C. S. Iluminação e arquitetura, São Paulo, SP: vitrus s/c ltda, 2001.

ANEXO A

| | NÍVEL DE TENSÃO | CEE* (R\$/MWh) | CED* (R\$/kW) |
|-----|--------------------|----------------|---------------|
| A1 | 230 kV ou mais | 309,68 | 90,10 |
| A2 | 88 kV a 138 kV | 313,12 | 200,24 |
| A3 | 69 kV | 317,23 | 281,17 |
| A3a | 30 kV a 44 kV | 330,67 | 447,96 |
| A4 | 2,3 kV a 25 kV | 330,67 | 447,96 |
| B1 | Residencial | 460,97 | 737,51 |
| B2 | Rural | 357,88 | 588,04 |
| B3 | Demais classes | 490,76 | 846,20 |
| B4 | Iluminação Pública | 490,76 | 846,20 |

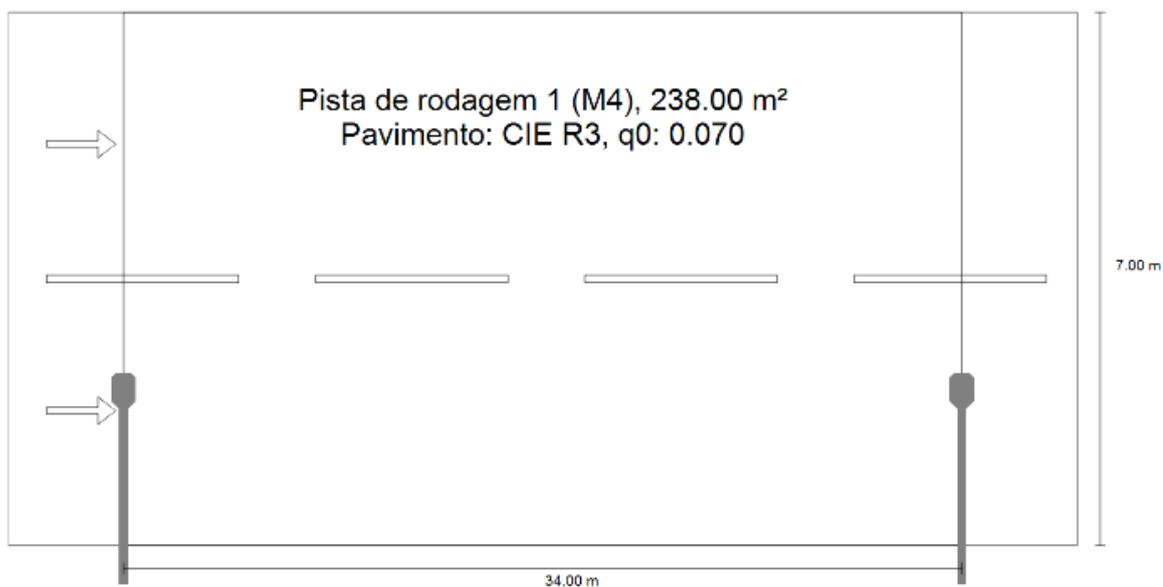
*Fonte: Resolução ANEEL Nº 2.593, de 20 de agosto de 2019, para FC = 70% e k = 0,15

APÊNDICE A

Simulações da luminária LED

LEDSTAR MINI 45W · Alternativa 15

Resumo (em direcção EN 13201:2015)



LEDSTAR MINI 45W · Alternativa 15

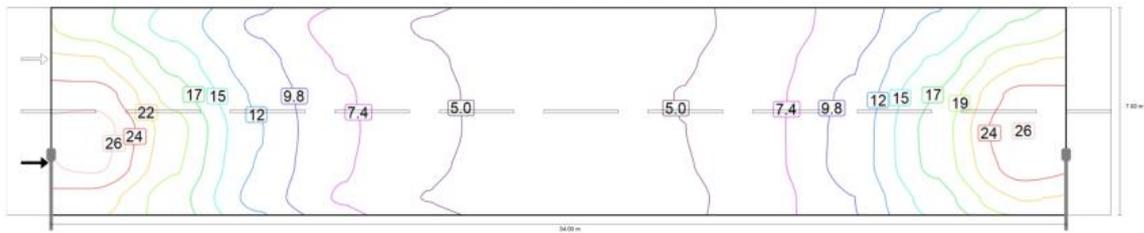
Pista de rodagem 1 (M4)

Resultados para o campo de avaliação

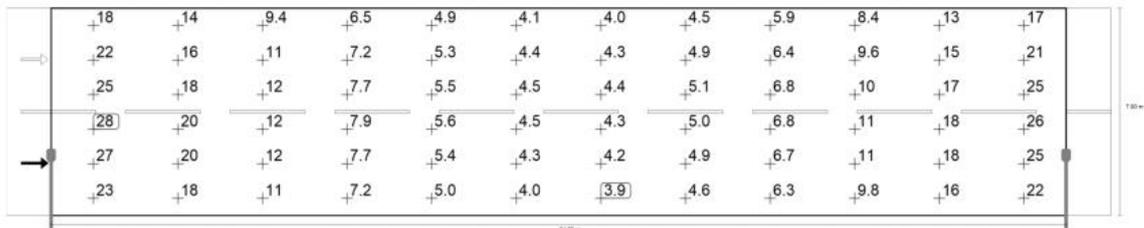
| | Tamanho | Calculado | Nominal | Check |
|-------------------------|---------------|------------------------|--------------------------|-------|
| Pista de rodagem 1 (M4) | L_m | 0.80 cd/m ² | ≥ 0.75 cd/m ² | ✓ |
| | U_o | 0.42 | ≥ 0.40 | ✓ |
| | U_l | 0.71 | ≥ 0.60 | ✓ |
| | TI | 15 % | ≤ 15 % | ✓ |
| | R_{\square} | 0.58 | ≥ 0.30 | ✓ |

Resultados para o observador

| | Tamanho | Calculado | Nominal | Check |
|--|---------|------------------------|--------------------------|-------|
| Observador 1 Posição: -60.000 m, 1.750 m, 1.500 m | L_m | 0.80 cd/m ² | ≥ 0.75 cd/m ² | ✓ |
| | U_o | 0.42 | ≥ 0.40 | ✓ |
| | U_l | 0.73 | ≥ 0.60 | ✓ |
| | TI | 15 % | ≤ 15 % | ✓ |
| Observador 2 Posição: -60.000 m, 5.250 m, 1.500 m | L_m | 0.82 cd/m ² | ≥ 0.75 cd/m ² | ✓ |
| | U_o | 0.48 | ≥ 0.40 | ✓ |
| | U_l | 0.71 | ≥ 0.60 | ✓ |
| | TI | 12 % | ≤ 15 % | ✓ |



Valor de manutenção de iluminância horizontal [lx] (Linhas de isolux)

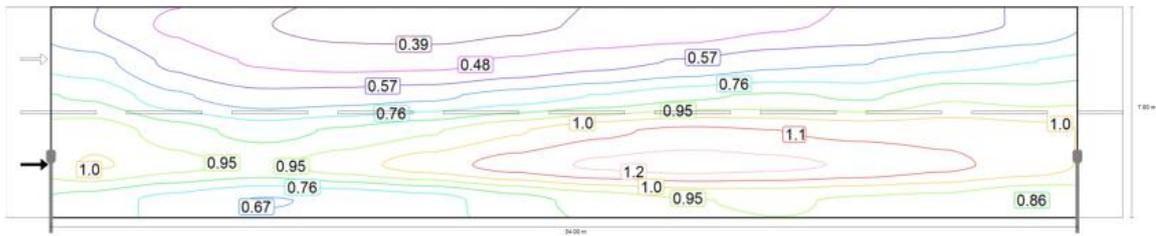


Valor de manutenção de iluminância horizontal [lx] (Grelha de valores)

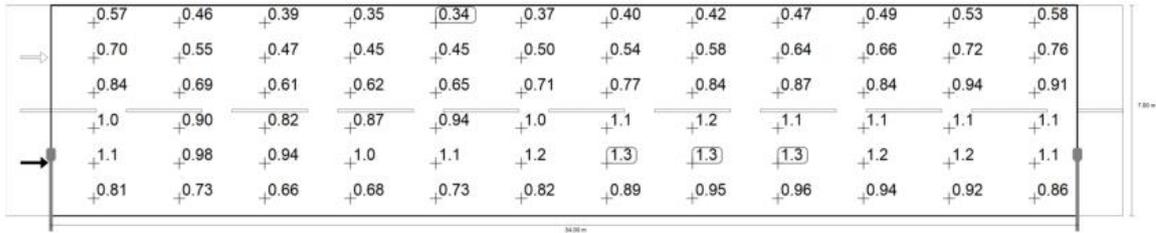
| | | | | | | | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| m | 1.417 | 4.250 | 7.083 | 9.917 | 12.750 | 15.583 | 18.417 | 21.250 | 24.083 | 26.917 | 29.750 | 32.583 |
| 6.417 | 17.91 | 13.61 | 9.42 | 6.52 | 4.88 | 4.07 | 3.96 | 4.52 | 5.88 | 8.40 | 12.71 | 17.29 |
| 5.250 | 22.02 | 16.07 | 10.77 | 7.22 | 5.31 | 4.38 | 4.25 | 4.85 | 6.39 | 9.57 | 14.90 | 21.44 |
| 4.083 | 25.38 | 18.27 | 11.78 | 7.72 | 5.53 | 4.49 | 4.36 | 5.08 | 6.76 | 10.19 | 16.99 | 24.83 |
| 2.917 | 27.55 | 20.29 | 12.21 | 7.89 | 5.57 | 4.49 | 4.33 | 5.03 | 6.78 | 10.51 | 17.79 | 26.38 |
| 1.750 | 27.04 | 19.65 | 11.97 | 7.67 | 5.39 | 4.33 | 4.19 | 4.90 | 6.73 | 10.58 | 17.56 | 25.27 |
| 0.583 | 22.92 | 17.90 | 11.30 | 7.17 | 4.98 | 4.00 | 3.85 | 4.56 | 6.28 | 9.76 | 15.54 | 21.75 |

Valor de manutenção de iluminância horizontal [lx] (Tabela de valores)

| | E_m | E_{min} | E_{max} | g_1 | g_2 |
|---|---------|-----------|-----------|-------|-------|
| Valor de manutenção de iluminância horizontal | 11.1 lx | 3.85 lx | 27.6 lx | 0.346 | 0.140 |



Observador 1: Valor de manutenção de luminância com via de rodagem seca [cd/m²] (Linhas de isolux)



Observador 1: Valor de manutenção de luminância com via de rodagem seca [cd/m²] (Grelha de valores)

| m | 1.417 | 4.250 | 7.083 | 9.917 | 12.750 | 15.583 | 18.417 | 21.250 | 24.083 | 26.917 | 29.750 | 32.583 |
|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 6.417 | 0.57 | 0.46 | 0.39 | 0.35 | 0.34 | 0.37 | 0.40 | 0.42 | 0.47 | 0.49 | 0.53 | 0.58 |
| 5.250 | 0.70 | 0.55 | 0.47 | 0.45 | 0.45 | 0.50 | 0.54 | 0.58 | 0.64 | 0.66 | 0.72 | 0.76 |
| 4.083 | 0.84 | 0.69 | 0.61 | 0.62 | 0.65 | 0.71 | 0.77 | 0.84 | 0.87 | 0.84 | 0.94 | 0.91 |
| 2.917 | 1.00 | 0.90 | 0.82 | 0.87 | 0.94 | 1.04 | 1.12 | 1.16 | 1.14 | 1.11 | 1.10 | 1.08 |
| 1.750 | 1.06 | 0.98 | 0.94 | 1.01 | 1.09 | 1.18 | 1.25 | 1.28 | 1.26 | 1.22 | 1.16 | 1.10 |
| 0.583 | 0.81 | 0.73 | 0.66 | 0.68 | 0.73 | 0.82 | 0.89 | 0.95 | 0.96 | 0.94 | 0.92 | 0.86 |

Observador 1: Valor de manutenção de luminância com via de rodagem seca [cd/m²] (Tabela de valores)

| | L _m | L _{min} | L _{max} | g ₁ | g ₂ |
|---|------------------------|------------------------|------------------------|----------------|----------------|
| Observador 1: Valor de manutenção de luminância com via de rodagem seca | 0.80 cd/m ² | 0.34 cd/m ² | 1.28 cd/m ² | 0.424 | 0.264 |