

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

Área de concentração: Infraestrutura e Meio Ambiente

Dissertação de Mestrado

ANÁLISE DOS BENEFÍCIOS E DO CUSTO DE CICLO DE
VIDA PARA A SELEÇÃO DE SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO
PÚBLICA

Gustavo Pansera

Passo Fundo

2019



Gustavo Pansera

ANÁLISE DOS BENEFÍCIOS E DO CUSTO DE CICLO
DE VIDA PARA A SELEÇÃO DE SISTEMAS DE
ILUMINAÇÃO PÚBLICA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia, sob a orientação do Prof. Dr. Francisco Dalla Rosa.

Passo Fundo

2019

CIP – Catalogação na Publicação

P196a Pansera, Gustavo

Análise dos benefícios e do custo de ciclo de vida para a seleção de sistemas de iluminação pública / Gustavo Pansera. – 2019.

87 f. : il. color. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Dalla Rosa.

Dissertação (Mestre em Engenharia) – Universidade de Passo Fundo, 2019.

1. Energia elétrica - Custos. 2. Iluminação pública.
3. Lâmpadas de LED. I. Rosa, Francisco Dalla, orientador.
II. Título.

CDU: 621.32

Catalogação: Bibliotecário Luís Diego Dias de S. da Silva – CRB 10/2241

Gustavo Pansera

A Comissão Examinadora, abaixo, aprova a dissertação de mestrado “Análise dos benefícios e do custo de ciclo de vida para a seleção de sistemas de iluminação pública” elaborada por Gustavo Pansera, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Data da aprovação: 12 de setembro de 2019

Membros componentes da Banca Examinadora:

Prof. Dr. Francisco Dalla Rosa
Universidade de Passo Fundo - UPF
Orientador

Profa. Dra. Luciana Londero Brandli
Universidade de Passo Fundo - UPF

Prof. Dr. Adriano Luis Toazza
Universidade de Passo Fundo - UPF

Prof. Dr. Flavio Jose Simioni
Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

Passo Fundo

2019



*“The mind that opens up to a new idea never
returns to its original size.”*

Albert Einstein

RESUMO

Uma análise do custo do ciclo de vida (LCCA) de três diferentes tecnologias empregadas para iluminação pública nos municípios brasileiros foi o objetivo deste estudo. Através destes, determinou-se os benefícios econômicos, ambientais e sociais dos gestores municipais investirem em sistemas de iluminação com tecnologia LED e, principalmente, na atribuição de inteligência a estas, como na implantação de sistemas de telegestão, responsáveis por dimerizar a iluminação. Encontrando assim qual sistema de iluminação tem melhor relação entre benefício e custo ao longo de sua vida útil. Dos sistemas analisados, um tem como componente principal a lâmpada de vapor de sódio em alta pressão (HPS), o segundo tem o Diodo Emissor de Luz (LED) como fonte de luz e o último apenas atribui um sistema de telegestão no sistema com LED dimerizando o fluxo luminoso, reduzindo o consumo de energia e minimizando as intervenções para manutenção. O consumo de energia da iluminação pública corresponde a uma parte considerável no consumo total de energia do país, desta forma, todos os incentivos para eficiência energética neste setor são importantes, porém, a falta de estudos e de conhecimento por parte das prefeituras, faz com que nem sempre se invista na melhor tecnologia de iluminação, considerando na tomada de decisão apenas o custo de aquisição. Foram consideradas as lâmpadas de 250 W de vapor de sódio e 150 W de LED na análise, e com menos potência elétrica foi possível determinar que o sistema com LED mantém uma iluminação da via mais forte e uniforme do que o sistema HPS. Os principais custos acumulados durante o período de 15 anos para cada tecnologia foram considerados na análise, custos de aquisição, instalação, energia elétrica, manutenção e disposição final. Foi possível compreender que o uso da dimerização das luminárias LEDs, resulta em inúmeros benefícios aos órgãos públicos, como a redução de 50 % do consumo de energia, mesmo possuindo custo de aquisição quase 7 vezes maior, comparando com o HPS. Em geral, o sistema com LED dimerizável tem menor custo acumulado no período de 15 anos, com economia de 11 % em relação ao sistema com LED convencional e 30 % em relação ao sistema HPS. O principal benefício ambiental é relacionado a menor emissão de CO₂, causado pela redução do consumo de energia elétrica e o principal benefícios sociais é relacionado a melhoria da iluminação, na substituição de luminárias HPS por LED. Espera-se que os resultados deste estudo auxiliem a tomada de decisão financeira e orçamentária na implementação de investimentos em projetos de iluminação pública inteligente e de eficiência energética.

Palavras-Chave: análise, custo do ciclo de vida, energia elétrica, dimerização, iluminação pública, LED, telegestão.

ABSTRACT

Energy consumption of street lighting accounts for a considerable part of the country's total energy consumption. All incentives for energy efficiency improvements in this sector has been important, but the lack of studies and knowledge by municipalities not always results in optimized investments in the best lighting technology. Frequently, the cities in Brazil usually considering in the decision making only the acquisition cost, and not be able to evaluate future demands as well as a budget provisioning. A life cycle cost analysis (LCCA) of three different technologies for public lighting in Brazilian municipalities was carried out in this study. Economic, environmental and social benefits were investigated in order to help the municipal managers on the budget provision. A lighting system with Light Emitting Diode (LED) technology associated to a smart grid based on the remote management system to dimerize the lights were considered in this study. A High-Pressure Sodium lamp (HPS) and traditional LED grid systems performance were also compared to dimerized LED system, considering the best cost-benefit ratio over their lifetime. Both LED and HPS lamps have the same luminous flux, which have resulted in energy consumption for HPS and LED equal to 250 W and 150 W respectively. The dimerized system has allowed to provide constant luminous flux in both evening and dawn periods, as well as throughout a remote management system in the LED system minimizing maintenance interventions. The main accumulated costs (equipment acquisition, installation, electricity, maintenance and final disposal) during the period of 15 years for each technology were considered in the analysis. It was possible to understand that the use of dimerized of LED system might results in several benefits to public agencies, such as a 50 % reduction in energy consumption, even having almost 7 times higher acquisition cost compared to HPS. In general, the dimmable LED system has a lower cumulative cost over 15 years, with savings of 11 % over the conventional LED system and 30 % over the HPS system. The primary environmental benefit is related to lower CO₂ emissions, due to the reduction of electricity consumption and the main social benefits is related to improving lighting, replacing HPS lamps with LED. The results of this study are expected to assist financial and budgetary decision making in the implementation of investments in smart and energy efficient street lighting projects.

Keywords: analysis, life cycle cost, electricity, dimerization, public lighting, LED, smart grid.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Sistema de iluminação com lâmpada de vapor de sódio.....	24
Figura 2: Componentes de uma lâmpada de vapor de sódio em alta pressão.	25
Figura 3: Distribuição do espectro da lâmpada de sódio em alta pressão.	25
Figura 4: Exemplo de luminária utilizada para iluminação pública.	28
Figura 5: Sistema de iluminação com luminária LED.	29
Figura 6: Principais componentes de um LED de alta potência.....	30
Figura 7: Espectro de LED branco/quente e um branco/frio.....	31
Figura 8: Ciclo de vida de um produto.	33
Figura 9: Diagrama das etapas da dissertação.	37
Figura 10: Iluminação resultante do sistema LED durante a noite.....	38
Figura 11: Iluminância natural diária 21/Jun nas 3 cidades.	40
Figura 12: Curva de degradação e mediana B50 lâmpada HPS.	43
Figura 13: Curva de degradação e L70 luminária LED.....	44
Figura 14: Funcionamento do sistema de telegestão.	49
Figura 15: Luminária LED selecionada.....	50
Figura 16: Curva de distribuição luminosa da luminária LED.....	51
Figura 17: Iluminação do sistema LED representada em cores falsas.	52
Figura 18: Isolinhas indicando a iluminância do sistema LED em lux.	52
Figura 19: Lâmpada e Luminária HPS selecionadas.....	53
Figura 20: Curva de distribuição luminosa do sistema HPS.	54
Figura 21: Iluminação do sistema HPS representada em cores falsas.....	54
Figura 22: Isolinhas indicando a iluminância do sistema HPS em lux.	55
Figura 23: Iluminância sistema LED dimerizável x iluminância natural.	60
Figura 24: Consumo de energia mensal sistema LED dimerizável.	61
Figura 25: Iluminância dos sistemas com fotocélula (LED e HPS) x iluminância natural.	62
Figura 26: Consumo de energia mensal sistema HPS.	63
Figura 27: Consumo de energia mensal sistema LED.....	63
Figura 28: Consumo de energia médio mensal 3 sistemas.....	64
Figura 29: Diagrama de fluxo de caixa sistema HPS.	70
Figura 30: Composição dos custos do sistema HPS.....	71
Figura 31: Diagrama de fluxo de caixa sistema LED.....	72

Figura 32: Composição dos custos do sistema LED.	72
Figura 33: Diagrama fluxo de caixa sistema LED dimerizável.....	73
Figura 34: Composição dos custos do sistema LED dimerizável.	73

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Conceitos luminotécnicos.....	22
Quadro 2: Características da lâmpada de vapor de sódio.....	26
Quadro 3: Características do LED.....	31
Quadro 4: Dados técnicos dos sistemas de iluminação escolhidos.	47
Quadro 5: Dados técnicos do reator HPS selecionado.	48
Quadro 6: Dados técnicos da fotocélula escolhida.....	48
Quadro 7: Custos de aquisição sistema HPS.....	57
Quadro 8: Custos de aquisição sistema LED.....	57
Quadro 9: Custos de aquisição sistema LED Dimerizável.....	58
Quadro 10: Custos de instalação do sistema HPS.	59
Quadro 11: Custos de instalação sistema LED.....	59
Quadro 12: Custos de instalação sistema LED Dimerizável.....	59
Quadro 13: Custo com energia elétrica acumulado no ano de 2018.	64
Quadro 14: Custo com energia elétrica acumulado nos 15 anos.....	65
Quadro 15: Custos de disposição final sistema HPS.....	66
Quadro 16: Custos de de disposição final sistema LED.....	66
Quadro 17: Custos de Manutenção do Sistema HPS.....	68
Quadro 18: Custos de Manutenção do Sistema LED.....	68
Quadro 19: Valor residual dos 3 sistemas ao final do período.....	70
Quadro 20: Custos acumulados pelos 3 sistemas em 15 anos.....	75
Quadro 21: Valor Presente Líquido dos 3 sistemas.....	75
Quadro 22: Comparativo entre os 3 sistemas.	76

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
Objetivos	17
1.1.1 <i>Objetivo Geral</i>	17
1.1.2 <i>Objetivos Específicos</i>	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 Iluminação Pública	18
2.2 Dimerização da Iluminação Pública e Iluminação Inteligente	20
2.3 Conceitos Luminotécnicos	22
2.4 Tecnologias Utilizadas em Iluminação Pública	23
2.4.1 <i>Sistema com Lâmpada de Vapor de Sódio em Alta Pressão (HPS)</i>	23
2.4.1.1 <i>Lâmpada HPS</i>	24
2.4.1.2 <i>Relé Fotoelétrico</i>	26
2.4.1.3 <i>Reator</i>	27
2.4.1.4 <i>Luminária</i>	27
2.4.2 <i>Sistema com Diodo Emissor de Luz (LED)</i>	28
2.5.2.1 <i>Lâmpada LED</i>	29
2.5.2.2 <i>Driver</i>	31
2.5.2.3 <i>Luminária</i>	32
2.5 Análise do Custo do Ciclo de Vida (LLCA)	32
2.5.1 <i>LCCA para Tecnologias de Iluminação Pública</i>	34
2.5.2 <i>Benefícios Ambientais e Sociais</i>	35
3 METODOLOGIA	36
3.1 Seleção dos Sistemas	37
3.2 Simulação dos Sistemas	38
3.3 Parâmetros do Sistema Dimerizável e Consumo de Energia	39

3.4 Custos Durante a Vida Útil	41
3.4.1 <i>Custos de Manutenção</i>	42
3.5 LCCA e Benefícios do uso da Dimerização de IP	45
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
4.1 Seleção dos Sistemas	47
4.1.1 <i>Sistema HPS e LED</i>	47
4.1.2 <i>Sistema de Telegestão</i>	48
4.2 Simulação dos Sistemas	49
4.2.1 <i>Sistema LED</i>	50
4.2.2 <i>Sistema HPS</i>	53
4.2.3 <i>Comparação Luminotécnica</i>	55
4.3 Levantamento dos Custos	56
4.3.1 <i>Custos de Aquisição</i>	57
4.3.2 <i>Custos de Instalação</i>	58
4.3.3 <i>Custos com Energia Elétrica</i>	60
4.3.4 <i>Custos com Disposição Final</i>	65
4.3.5 <i>Custos de Manutenção</i>	66
2.5.1.1 <i>Sistema HPS</i>	67
2.5.1.1 <i>Sistema LED</i>	68
2.5.1.1 <i>Sistema LED Dimerizável</i>	69
4.3.6 <i>Valor Residual</i>	69
4.4 LCCA e Benefícios do uso da Dimerização de IP	70
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	79
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81

1 INTRODUÇÃO

A iluminação pública (IP) atua como instrumento de cidadania, proporcionando melhora na ambiência urbana, colaborando na preservação do patrimônio da cidade e na proteção ao meio ambiente, além de estar diretamente ligada à segurança pública, trazendo maior sensação de segurança para as pessoas e melhorando a visibilidade e o trânsito à noite, diminuindo o número de acidentes entre veículos, ciclistas e pedestres (ABNT, 2012; ANEEL, 2010; SCHULZ NETO, 2010; STOKER, *et al.*, 2015; WANVIK, 2009).

Segundo a Resolução nº 414 de 2010 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2010) a iluminação pública pode ser definida como o serviço que tem por objetivo prover de luz aos logradouros públicos, no período noturno ou nos escurecimentos diurnos ocasionais, inclusive aqueles que necessitem de iluminação permanente no período diurno.

O consumo de energia dos equipamentos utilizados para iluminar as vias públicas caracteriza papel importante sobre o total de energia consumida no Brasil, uma vez que estes equipamentos permanecem ligados todos os dias durante a noite inteira. Por esse motivo, ações voltadas a melhoria da eficiência do sistema público de iluminação, podem resultar em grande economia de energia e recursos para os municípios brasileiros.

Segundo os resultados do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica PROCEL (2017), as lâmpadas mais utilizadas na iluminação pública nas cidades brasileiras, mais de 60 % do total, são de Vapor de Sódio em Alta Pressão (*High-Pressure Sodium - HPS*), tecnologia com eficiência energética superior às lâmpadas de Vapor de Mercúrio e Vapor Metálico. Entretanto, todas estas lâmpadas contêm gases sob alta pressão.

O sistema de iluminação com lâmpada HPS possui mais partes móveis, que podem necessitar de manutenção seguidamente, o reator apresenta ruído, perdas e baixa eficiência, contém internamente gases que podem contaminar o solo se não tiverem o descarte correto, desperdiça parte da energia em calor e a mesma também desperdiça parte do fluxo luminoso, causando poluição luminosa (DA SILVA E LUSTOSA, 2006; ROSITO, 2009; SCHULZ NETO, 2010).

Uma alternativa para redução da energia consumida em cada ponto de iluminação pública é a utilização de luminárias de Diodos Emissores de Luz (LED). Para apresentar a mesma percepção luminosa o LED utiliza potências significativamente inferiores, devido principalmente à qualidade superior da luz e também ao feixe de luz ser direcionado ao solo.

As luminárias LEDs superam as HPS em qualidade de luz, pois se assemelham mais da luz natural, têm melhor distribuição e uniformidade da iluminação, além disso, os usuários da iluminação pública com LED indicam que a visibilidade geral é melhorada (COOK, SHACKELFORD E PANG, 2008; COOK, SOMMER E PANG, 2008; GIBBONS, LI E MEYER, 2015; KINZEY E MYER, 2009; RODRIGUES, 2002).

Outra característica positiva das luminárias LED é que sua dimerização¹ é relativamente simples, podendo regular sua intensidade luminosa de 0 a 100 % através da implantação de um sistema de telegestão, com um equipamento de comunicação sem fio e controle em seu hardware. Um sistema de telegestão é baseado na gestão e no controle dos pontos de iluminação à distância, ou seja, sem fio, possibilitando dimerizar o fluxo luminoso a qualquer momento da noite e verificar a condição atual de cada luminária em tempo real (CENTRO DE ENERGIA REGIONAL DO MAR NEGRO, 2007; SANTOS, 2011).

Sistemas de iluminação inteligentes fazem parte da infraestrutura das Cidades Inteligentes, que são parte dos objetivos de sustentabilidade da União Europeia para 2030, onde foram delineados acordos para liderar o mundo rumo a uma sociedade com responsabilidade ambiental e desenvolvimento sustentável (EUROPEAN COMMISSION, 2016). A existência de tais sistemas de iluminação inteligente, com controle de fluxo luminoso, aliada a um sistema de gestão das luminárias, pode resultar em uma significativa economia de energia e um aumento da vida útil da luminária. O uso de novas tecnologias, têm resultado em relações Benefício/Custo maiores, onde tal relação tem sido determinada por estudos como a análise do custo de ciclo de vida (*Life Cycle Cost Analysis - LCCA*).

A análise do custo do ciclo de vida é um método utilizado para avaliar o custo total de um determinado produto, desde a sua fabricação até a sua disposição final. Na análise, não se considera apenas os custos de aquisição na decisão da compra, pois assim podem acontecer decisões errôneas. O custo do ciclo de vida de qualquer equipamento é a soma de todos custos acumulados pelo mesmo: custo de aquisição, custos de operação e manutenção, bem como custos com a substituição ao final da vida útil, que podem ser negativos ou positivos. O LCCA é especialmente útil quando é utilizado para comparar tecnologias que atendem os mesmos requisitos de desempenho, mas diferem em relação aos custos iniciais e operacionais (ASIEDU E GU, 1998; DHILLON, 2009; FHWA, 2002; FULLER E PETERSEN, 1995; PERERA, MORTON E PERFREMENT, 2009).

Para determinar qual é o investimento com melhor relação entre benefício e custo de luminárias próprias para iluminação de vias urbanas, é necessária a realização de uma análise

¹ Dimerização: Capacidade de controlar eletronicamente a intensidade luminosa de uma fonte de luz.

que avalie o custo do ciclo de vida dos três sistemas, desde a fabricação até a disposição final trazendo para valores reais e atuais o valor acumulado da luminária em uma janela de tempo suficiente para acumular os custos mais importantes.

É necessário que outros pontos além do custo inicial também sejam considerados ao avaliar a aquisição de novas luminárias, de modo a estabelecer qual terá a melhor relação benefício/custo até o final de sua vida útil e, assim, determinar qual melhor atende ao interesse público. Uma comparação das análises do custo do ciclo de vida da lâmpada HPS, da luminária LED e da mesma luminária LED com um sistema de telegestão integrada pode ser um recurso precioso para auxiliar na definição sobre qual tecnologia empregar no sistema de iluminação pública. Assim, torna-se clara a decisão sobre qual tecnologia de luminária investir para iluminação pública.

Segundo o Anuário Estatístico de Energia Elétrica de 2016, emitido pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2016), vinculada ao Ministério de Minas e Energia do Brasil, a energia consumida para abastecer o sistema de iluminação pública no país foi de 15.334 GWh em 2015, equivalente a 3,3 % de toda energia consumida no país neste ano, 9,2 % maior que no ano anterior, 2014, em que a energia consumida foi de 14.043 GWh.

Nos últimos anos o Sistema Interligado Nacional vem dando sinais de que a geração de energia poderá ser insuficiente para suprir a demanda futura devido a fatores climáticos e ou por falta de infraestrutura. Em determinados momentos os níveis dos reservatórios hídricos têm reduzido a patamares críticos, forçando o Operador Nacional do Sistema (ONS) a acionar as usinas termoeletricas, com custos muito maiores que as hidrelétricas e outras fontes renováveis.

Poupar energia em qualquer ramo é importante também, especialmente na iluminação pública, pois é um sistema que funciona todos os dias do ano, e em boa parte do tempo sem servir a seu propósito, visto que as luminárias permanecem ligadas no máximo de sua potência, mesmo que não haja nenhuma pessoa nas proximidades. Dada a relevância, deve-se buscar para este sistema eficiência energética equivalente à eficiência ideal a qualquer outro serviço público. Muitos municípios estão investindo na substituição das lâmpadas HPS por LED, resultando em benefícios como economia de energia e financeira na fatura de IP e na melhor qualidade da iluminação das vias.

Desta forma, a principal questão a ser respondida neste trabalho é: **Quais os benefícios econômicos, ambientais e sociais do uso da dimerização da iluminação pública em comparação a tecnologias atualmente utilizadas?**

O consumo de energia em iluminação pública representa uma parcela relevante no total de energia consumido no país, configurando-o como um setor em que a economia de recursos e de eletricidade tem grande potencial. Entretanto, no Brasil ações visando a economia neste setor ainda não são devidamente exploradas e implantadas. Segundo Santana (2010), a iluminação pública pode apresentar elevado desperdício de energia elétrica causado pela utilização de equipamentos inadequados e, principalmente, devido à gestão deficiente destes serviços.

A economia de energia é um dos principais benefícios do uso de sistemas de dimerização para iluminação pública, alcança de 30 a mais de 60 % de economia em comparação aos sistemas tradicionais como o HPS (ABDULLAH *et al.*, 2018, 2019; DJURETIC E KOSTIC, 2018; KHADE *et al.*, 2017; KUUSIK, ROSIN E VARJAS, 2016; LECCESE E PIZZUTI, 2017; LOKHAND E MARKANDE, 2018; MAGNO *et al.*, 2015; MARINO, MATOS *et al.*, 2016; SOH *et al.*, 2018; TOUBAL *et al.*, 2016; VIANI *et al.*, 2016; ZOTOS *et al.*, 2012).

A cobrança da energia utilizada na IP, em sua maioria, é feita através de cálculo, estimando a potência da luminária e o tempo em que a mesma permanece ligada. Se a luminária está funcionando ou não, a cobrança é feita do mesmo modo. Portanto, um sistema que precise de menos manutenção e que tenha uma vida útil maior acaba por economizar recursos para os municípios.

Os municípios brasileiros possuem o desafio de prever no orçamento municipal os custos com manutenções e principalmente os investimentos em melhorias da iluminação pública. Um fator importante a ser considerado ao avaliar a aquisição de equipamentos é o investimento em novas tecnologias de luminárias, visando o melhor para a iluminação dos locais públicos, além disso, devem preferir o investimento em sistemas sustentáveis que proporcionem a obtenção de uma melhoria da eficiência energética (EPEC, 2013; LAKSHMI, NAIK E RAJEYYAGIRI, 2012; SANTOS, 2011).

Quando se trata da troca das luminárias convencionais por sistemas baseados em LED, observa-se que as prefeituras encontram dificuldades técnicas para a correta escolha e instalação de tais dispositivos. Mesmo que as cidades tenham recurso para investir, a falta de conhecimento e clareza sobre os aspectos da tecnologia e as características adequadas aos equipamentos tornam difíceis as tarefas de definição e especificação dos produtos.

A pesquisa visa analisar a adequação do uso de luminárias LED e sua dimerização na iluminação pública ao demonstrar se o emprego de tais tecnologias pode ser vantajoso por

entregar resultados melhores no que tange a fatores como maior vida útil, menor necessidade de intervenções para manutenção e custos decorrentes, economia de energia elétrica e redução de impactos ambientais, apontando aos benefícios da implantação destas novas tecnologias em substituição às tecnologias atuais.

A linha de pesquisa Planejamento Territorial e Gestão da Infraestrutura do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGENG), da Universidade de Passo Fundo, ao longo dos últimos anos tem desenvolvido trabalhos envolvendo eficiência energética. Nesta área de aplicação, destaca-se um trabalho com foco de eficiência energética na iluminação pública desenvolvido por Salvia (2016) que realiza um estudo de multicasos, demonstrando qual alternativa de eficiência energética melhor se aplica para cada cidade estudada.

Inclusive, uma das alternativas analisadas é a utilização de um sistema de gestão de IP, sendo este sistema aplicado nesta pesquisa. Neste contexto, este trabalho contribui para expandir e encorpar a linha de pesquisa de eficiência energética do PPGENG, principalmente no que tange o setor de iluminação pública, pois este é fundamental na infraestrutura das cidades e a aplicação de sistemas de eficiência neste setor são de vital importância.

Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Comparar três soluções técnicas de iluminação pública através da análise do custo de ciclo de vida. Avaliar os benefícios do uso da dimerização como alternativa à tecnologias atualmente empregadas em iluminação pública.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos serão:

- a) Desenvolver padrão de dimerização para luminárias LED com gestão remota.
- b) Simular através de software luminotécnico as luminárias HPS, LED e LED com dimerização.
- c) Determinar os custos das luminárias HPS, LED e LED com dimerização durante um período de 15 anos.
- d) Identificar os benefícios econômicos, ambientais e sociais do uso da dimerização de IP a partir de revisão bibliográfica e de análise do custo do ciclo de vida das luminárias HPS, LED e LED Dimerizável.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Realizou-se uma revisão da literatura com o objetivo de apresentar os principais estudos e conceitos relacionados à definição de iluminação pública, os tipos de lâmpadas e luminárias utilizadas e suas características. Buscou-se ainda, explicar o que é uma análise do custo do ciclo de vida, e como aplicar tal análise para auxiliar na tomada de decisões de troca de luminárias de iluminação pública nas cidades brasileiras.

2.1 Iluminação Pública

Diferentes soluções para iluminação pública vêm sendo desenvolvidas, com eficiência energética e qualidade de iluminação aumentando continuamente ao longo dos anos. Somente a partir da década de 1930, começou-se a utilizar lâmpadas de descarga a vapor de mercúrio para os sistemas de iluminação pública. Ao final dos anos 1960, em função da melhor eficiência luminosa, iniciou-se a utilização das lâmpadas a vapor de sódio. Em meados de 1990 houve a introdução das lâmpadas sem eletrodos e nos anos 2000 iniciou-se a aplicação de sistemas a base de LED.

A iluminação é uma necessidade básica da sociedade moderna. Em ambientes externos como estradas, ruas, praças e parques, a iluminação permite a visualização de pessoas, veículos e outros objetos, contribuindo para a sensação de segurança e conforto dos cidadãos. Segundo o guia de Iluminação Pública do Governo de São Paulo (2013), alguns dos benefícios causados pela iluminação das ruas à noite são a inibição do crime, promoção do jovem saudável, com a utilização das áreas de lazer e cultura à noite, redução de acidentes de trânsito com pedestres e veículos, atração de turistas, valorizando monumentos públicos e o aumento da autoestima dos moradores, por ser possível circular com segurança durante à noite.

O crescimento e aglomeração da população nos centros urbanos ocasiona também um aumento na quantidade de energia utilizada para a iluminação pública, de modo que a economia de energia neste setor pode trazer um significativo alívio na matriz energética brasileira. Conforme os Resultados Procel (2017), estima-se que hoje exista instalado no Brasil em torno de 14,7 milhões de pontos de iluminação pública, na maioria destes, mais

de 60 %, são luminárias com lâmpadas de descarga a vapor de sódio, representando 3,3 % do total de energia consumida no Brasil em 2015 (EPE, 2016).

Segundo a Constituição Brasileira (1988) e a Resolução da Aneel nº. 414 (2010), os serviços de elaboração de projeto, implantação, expansão, operação e manutenção das instalações de iluminação pública no Brasil são de responsabilidade dos governos municipais. Estes, devem pagar os custos envolvidos na prestação de serviços de operação e manutenção de sistemas, como os custos com pessoal técnico e administrativo, veículos, equipamentos de segurança, infraestrutura, tributos e encargos, além dos equipamentos e materiais.

A mesma deve ser tratada de forma técnica, profissional e sistematizada, pois os recursos utilizados têm origem nos impostos e contribuições pagos pela população. Através de lei municipal, o município pode arrecadar a Contribuição de Iluminação Pública dos consumidores de energia elétrica, com a finalidade de custear a operação, manutenção, expansão e o consumo de energia elétrica dos serviços de iluminação pública prestados pela prefeitura local (ROSITO, 2009).

A tarifa aplicável ao fornecimento de energia elétrica para iluminação pública é a Tarifa B4a, sendo uma tarifa própria para este fim e equivalente a cerca de 50 % da tarifa de consumidor residencial. A energia utilizada quando não é medida, é faturada através da multiplicação da potência do sistema de iluminação e do tempo em que permanece ligado. Os Artigos 24 e 25 da Resolução da Aneel nº. 414 (2010) definem:

Art. 24 - Para fins de faturamento da energia elétrica destinada à iluminação pública ou à iluminação de vias internas de condomínios, o tempo a ser considerado para consumo diário deve ser de 11 (onze) horas e 52 (cinquenta e dois) minutos, ressalvado o caso de logradouros que necessitem de iluminação permanente, em que o tempo é de 24 (vinte e quatro) horas por dia do período de fornecimento (ANEEL, 2010).

Art. 25 - Para fins de faturamento, a energia elétrica consumida pelos equipamentos auxiliares de iluminação pública deve ser calculada com base nas normas específicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, em dados do fabricante dos equipamentos ou em ensaios realizados em laboratórios credenciados por órgão oficial, devendo as condições pactuadas constarem do contrato (ANEEL, 2010).

O governo municipal ao escolher a tecnologia de iluminação adequada para iluminar as vias, deve garantir que o nível de iluminação atenda aos padrões de segurança rodoviária. A Norma Brasileira (NBR) da Associação Brasileira De Normas Técnicas (ABNT) que estabelece os requisitos para iluminação pública, propiciando segurança aos tráfegos de

pedestres e de veículos é a NBR 5101 (ABNT, 2012). Esta norma estabelece níveis mínimos de iluminância e o fator de uniformidade, em função dos vários tipos de vias e da densidade de tráfego. As vias são classificadas pela norma como arteriais, coletoras, locais, de ligação, urbanas e especiais. As densidades de tráfego são classificadas como ausente, leve, médio ou intenso tanto para pedestres quanto para veículos.

2.2 Dimerização da Iluminação Pública e Iluminação Inteligente

Dimerizar a iluminação é ter a capacidade de controlar eletricamente o consumo ou a intensidade luminosa de uma fonte de luz. Lâmpadas dimerizáveis são as quais é possível regular a intensidade do brilho da mesma, gerando economia de energia.

Atualmente, diminuir o consumo de energia tem-se tornado cada vez mais necessário em qualquer setor. No setor de iluminação pública, sistemas de iluminação com controle inteligente se tornam soluções para economia de energia, pois sistemas que permitem a introdução de uma rede de comunicação para monitoramento e principalmente controle de dimerização da potência tem grande possibilidade de redução nos custos da eletricidade, redução nos custos de manutenção e menor emissão de CO₂ (ABDULLAH *et al.*, 2018; SÁ, 2011; TETRI, SARVARANTA E SYRI, 2014).

Diversos trabalhos foram publicados com o objetivo de associar recursos automatizados a sistemas de iluminação pública, pois representam um papel importante no consumo de energia. Santos (2011) cita algumas vantagens da implementação de um sistema de dimerização da iluminação pública, sendo estas, até 65 % de redução de gastos de energia e emissões de CO₂, aumento do tempo de vida das lâmpadas. Segundo Abdullah *et al.* (2018) com o sistema de dimerização da iluminação pública é possível gerar economia de energia de 40 a 45% ao mês, além disso, também reduz a emissão de dióxido de carbono (CO₂). A utilização de iluminação dimerizável pode economizar de 10 a 20 % de energia comparando com a mesma luminária sem este sistema, porque as luminárias dimerizáveis ajustam o brilho levando em conta a luz ambiente (INTEL CORPORATION, 2017).

O controle inteligente pode ser realizado com base em diversas variáveis, como tráfego de pedestres, intensidade da luz do dia, tempo, condições climáticas, entre outras. As principais conclusões de trabalhos e pesquisas cujo objetivo era desenvolver sistemas de iluminação pública inteligente, são a possibilidade de controlar o fluxo luminoso e monitorar

a situação em tempo real das luminárias, além da redução do custo com energia elétrica (ATTIA, OMAR E TAKRURI, 2016; CHEN E LIU, 2009; JING, SHU E GU, 2007; KE E XIAO, 2016; LEE *et al.*, 2006; LIAN E LI, 2012; PINTO *et al.*, 2015).

Também segundo Li-jun, Zi-zheng e Feng (2011), além dos benefícios econômicos, os sistemas de iluminação inteligentes trazem benefícios ambientais e sociais, como o embelezamento do ambiente urbano e o aumento da sensação de segurança dos veículos e pedestres.

Segundo Lakshmi, Naik e Rajeyyagiri (2012), com um sistema de iluminação inteligente pode-se melhorar significativamente o desempenho, eficiência e confiabilidade da iluminação pública no município, uma vez que não se precisa confiar apenas nas queixas públicas e inspeções visuais noturnas para monitorar o funcionamento das lâmpadas. Através de suas capacidades de redução de energia e manutenção, é visível o poder de liberar uma grande alocação de fundos públicos que podem contribuir para outros programas.

Entre os benefícios da iluminação pública inteligente, se destacam a eliminação de equipes de manutenção noturnas devido à identificação automática de todas as falhas no sistema, redução dos custos de manutenção, do número de reclamações de clientes insatisfeitos e a produção automática de relatórios gerenciais (SANTOS, 2011).

Verifica-se com isso, a vantagem da introdução de luminárias LED para iluminação das vias urbanas, uma vez que as mesmas permitem um controle sem fio do sistema, tendo em conta a facilidade na integração de sensores e facilidade na variação do fluxo luminoso (SÁ, 2011; PINTO *et al.*, 2015). Destacam-se perante um sistema de iluminação público tradicional o sistema de comunicação sem fio, a incorporação de sensores e o sistema de controle da luminária. Os dois primeiros, simplesmente não existem num sistema tradicional e o último desempenha um papel mais ativo neste tipo de sistemas, pois pode dimerizar a mesma não apenas ligando e desligando a lâmpada (COSTA, 2013).

Para o sistema de iluminação inteligente efetivamente economizar recursos públicos, é necessário que a distribuidora de energia ajuste a quantidade de horas e a potência a ser tarifada, conforme o Artigo 26 da Resolução da Aneel nº. 414 (2010) define:

Art. 26. Caso sejam instalados equipamentos automáticos de controle de carga que reduzam o consumo de energia elétrica do sistema de iluminação pública, devidamente comprovado e reconhecido por órgão oficial e competente, a distribuidora deve proceder à revisão da estimativa de consumo e considerar a redução proporcionada por tais equipamentos (ANEEL, 2010).

Os sistemas de telegestão normalmente utilizam duas tecnologias de comunicação sem fio, uma para a comunicação entre a central de controle e uma central instalada em uma luminária, chamada de coordenador. Por sua vez, este coordenador utiliza outra tecnologia para comunicação com as outras luminárias, formando uma rede de comunicação entre elas. Normalmente a tecnologia utilizada para comunicação entre a central e coordenador é *General Packet Radio Service (GPRS)*, e para a rede entre as luminárias, utiliza-se *ZIGBEE*, que é o padrão atualmente mais adotado na comunicação sem fios para iluminação pública inteligente em todo o mundo, sendo preferido para sistemas de testes e estudos de casos, onde apresentam bons resultados para implementação em grande escala (KE E XIAO, 2016; LAVRIC, 2012; LIAN E LI, 2012; URGILES, ARPI E CHACON-TROYA, 2015)

2.3 Conceitos Luminotécnicos

O Quadro 1 traz conceitos luminotécnicos essenciais para o entendimento do trabalho.

Quadro 1: Conceitos luminotécnicos.

Fluxo Luminoso	O fluxo luminoso, medido em lúmen (lm) pode ser entendido como uma potência luminosa emitida ou observada, ou ainda, representa a energia emitida ou refletida, por segundo, em todas as direções, sob a forma de luz.
Intensidade Luminosa	É a quantidade de luz emitida por uma fonte luminosa em uma determinada direção. Utilizada em lâmpadas refletoras, onde a intensidade luminosa está ligada ao ângulo do fecho, a unidade de medida é a candela (cd).
Iluminância	Iluminância é a densidade de fluxo luminoso recebido por uma superfície. Por definição a unidade de medida é o lúmen por metro ao quadrado (lm/m^2), que pode ser denominada também de lux e é representada pela letra E. Um lux corresponde à iluminância de uma superfície plana de um metro quadrado de área, sobre a qual incide perpendicularmente um fluxo luminoso de um lúmen.
Eficiência Luminosa	Relação entre o fluxo luminoso total emitido por determinada fonte e a potência elétrica da fonte de luz. Sendo a unidade de medida o lúmen por Watt (lm/W).

(Continuação)

Curva de Distribuição Luminosa	É a curva que representa, em coordenadas polares, as intensidades luminosas nos planos transversal e longitudinal. Estas curvas indicam se a fonte de luz têm uma distribuição de luz concentrada, difusa, simétrica ou assimétrica. As curvas de distribuição luminosa são geralmente representadas em cd/1.000 lm.
Índice de Reprodução de Cores (IRC)	Representa a capacidade de reprodução da cor de um objeto diante de uma fonte de luz. O índice de reprodução de cores (IRC) faz uma correspondência entre a cor real de um objeto e a que ele está apresentando diante da fonte de luz. Convencionalmente, o IRC varia entre 0 e 100 % e de acordo com a fonte luminosa do ambiente a que se destina.

Fonte: Adaptado de Bommel (2015).

2.4 Tecnologias Utilizadas em Iluminação Pública

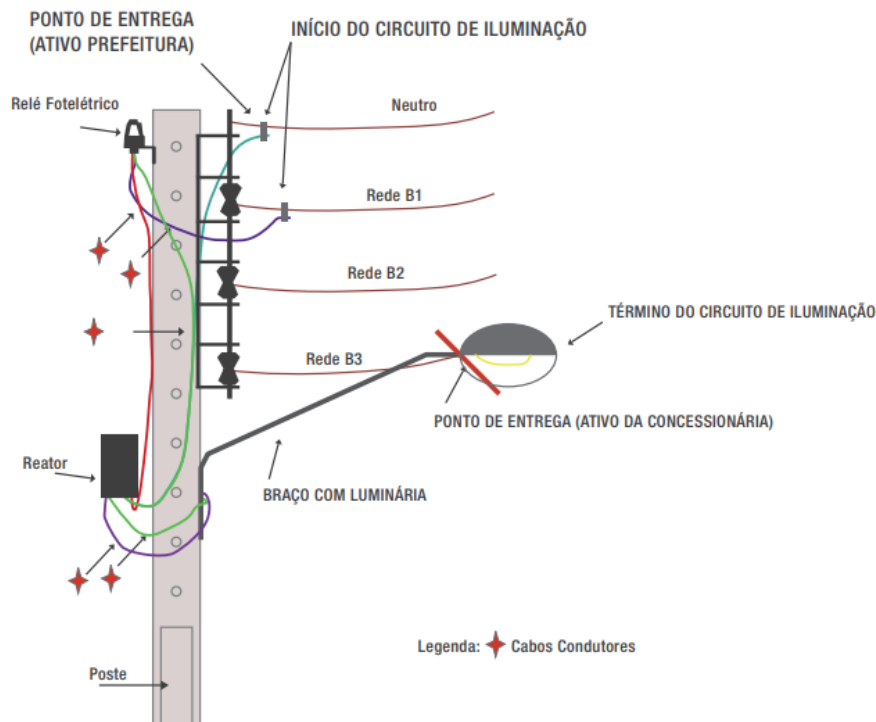
Desde os primeiros sistemas de iluminação pública, os seus componentes vêm evoluindo e resultando em novas soluções técnicas e estéticas, desempenhando maior eficiência e eficácia. Segundo Procel (2017), as lâmpadas mais utilizadas hoje para IP são de HPS, porém, uma alternativa para melhor eficiência energética nos sistemas de IP é a utilização de luminárias a LED.

Uma grande diferença na análise destas duas tecnologias são que, diferente do sistema a HPS, a luminária LED tem seus componentes básicos em um corpo único, com os componentes necessários para o funcionamento, *drivers* e LEDs, contidos no interior da luminária, já a HPS, a lâmpada é colocada dentro da luminária e o reator e o relé são posicionados fora, no poste, formando o sistema.

2.4.1 Sistema com Lâmpada de Vapor de Sódio em Alta Pressão (HPS)

Os sistemas de iluminação com lâmpadas HPS, são compostos pela fotocélula, reator, lâmpada e pela luminária, sendo essa responsável pela proteção do sistema e pelo direcionamento da luz gerada pela lâmpada. O início do circuito de iluminação fica na conexão dos cabos na rede elétrica da concessionária, e o sistema é disposto como mostra a Figura 1.

Figura 1: Sistema de iluminação com lâmpada de vapor de sódio.



Fonte: Governo Do Estado De São Paulo (2013).

2.4.1.1 Lâmpada HPS

Este tipo de lâmpada se apresenta nas versões tubulares e elipsoidais e é indicado para iluminação de locais onde a reprodução de cor não é um fator importante, pois tem um baixo índice de reprodução de cor e emite uma luz de cor amarelada (RODRIGUES, 2002). Na sua introdução no final da década de 1960, obteve-se uma alternativa muito eficiente para as muitas lâmpadas de mercúrio de alta pressão empregadas naquela época e que ainda são empregadas hoje em dia, na iluminação rodoviária.

A lâmpada de vapor de sódio compreende um tubo de cerâmica translúcido, que é capaz de suportar a natureza altamente corrosiva do sódio e as altas temperaturas geradas. O tubo é preenchido com vapor de sódio e a diferença de tensão é aplicada entre dois eletrodos colocados em ambas as extremidades, as quais fornecem a energia elétrica necessária para acender o vapor de sódio (BOMMEL, 2015).

O sódio é introduzido no tubo de descarga de gás como uma composição de amálgama de sódio e mercúrio, que vaporiza parcialmente quando a lâmpada atinge a temperatura de operação. Para isolar termicamente o tubo de descarga de gás e para proteger

seus componentes da oxidação, é utilizado um segundo tubo, chamado de tubo externo. Também é necessária uma fita interna de ignição, e adicionado muito perto do tubo de descarga para garantir uma ignição apropriada. Como a maioria das lâmpadas de descarga de gás, a lâmpada externa desta lâmpada também contém um *getter* para manter o vácuo durante a vida útil da lâmpada. A Figura 2 mostra uma lâmpada de vapor de sódio de alta pressão e seus componentes (BOMMEL, 2015).

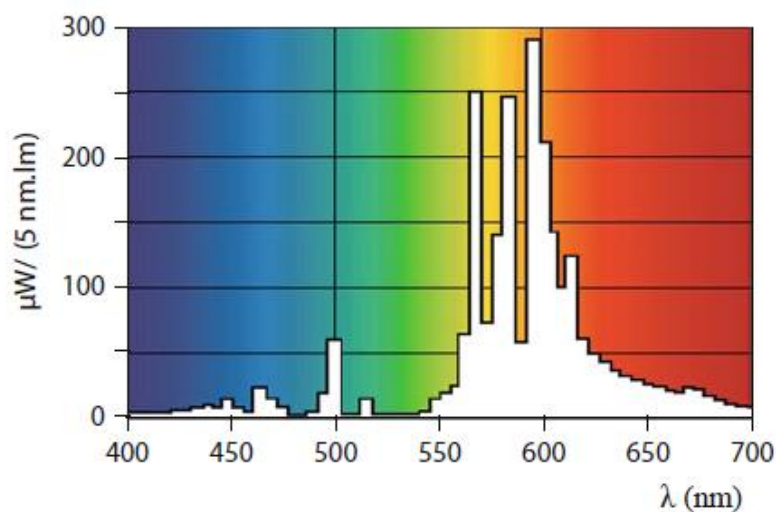
Figura 2: Componentes de uma lâmpada de vapor de sódio em alta pressão.



Fonte: Adaptado de Bommel (2015).

Como em outras as lâmpadas de descarga de gás, o espectro da lâmpada de sódio de alta pressão é descontínuo, como mostra a Figura 3. A parte principal do espectro é centrada em torno da linha de sódio amarelo, fornecendo uma luz amarelo/branca com a temperatura de cor de cerca de 2000 K e um índice de reprodução de cores de 25 %. O Quadro 2 mostra algumas características da lâmpada de vapor do sódio em alta pressão.

Figura 3: Distribuição do espectro da lâmpada de sódio em alta pressão.



Fonte: Bommel (2015).

Quadro 2: Características da lâmpada de vapor de sódio.

Fluxo Luminoso	Produzidas na faixa aproximada de 4.000 lm para lâmpadas de 50 W até 150.000 lm para lâmpadas de 1.000 W.
Eficiência Luminosa	A eficiência passa de 80 lm/W para lâmpadas de 50 W, para 140 lm/W nas lâmpadas de maiores potências.
Tempo de Vida	As lâmpadas de sódio de alta pressão têm uma vida útil de até 35.000 h.

Fonte: Adaptado de Bommel (2015).

A pressão nominal e fluxo luminoso total são alcançados entre 3 e 5 minutos após a ignição. A reinicialização da lâmpada requer que a mesma resfrie para permitir que a pressão diminua o suficiente para que o pulso de ignição ionize novamente os átomos de sódio para um novo acionamento.

2.4.1.2 Relé Fotoelétrico

A NBR 5123 (2016) especifica os requisitos de construção e desempenho dos relés fotoelétricos para iluminação. O relé fotoelétrico, ou fotocélula, é um dispositivo destinado ao controle de equipamento de iluminação em função da quantidade de luz. O mesmo faz com que os sistemas sejam automaticamente acionados e desligados através dos níveis de iluminamento, em lux, nos quais a carga é energizada ou não, respectivamente no início e no término dos escurecimentos.

O relé deve manter o sistema de iluminação ligado durante a noite. A concessionária tarifa cada ponto considerando que o mesmo permanece ligado 11 horas e 52 minutos por dia. Por serem sensores nem sempre precisos, os sistemas podem se manter ligados por mais tempo, resultando num desperdício de energia. Também é um dos componentes do sistema que mais apresenta defeitos e tem vida útil curta. Quando deixa de funcionar pode manter o sistema desligado não iluminando o local ou permanentemente ligado, desperdiçando energia durante o dia, quando não há necessidade de estar ligado.

2.4.1.3 Reator

Os reatores são equipamentos auxiliares instalados em conjunto com as lâmpadas de descarga, utilizados para controlar e estabilizar a corrente de partida e a tensão de funcionamento da lâmpada. A maioria das lâmpadas de descarga de gás possuem uma alta resistência interna que exigem um pico de tensão, superior à tensão de operação normal, para iniciar a descarga. As lâmpadas de sódio de alta pressão usadas para iluminação pública precisam de um pico de tensão de ignição de cerca de 3.000 a 5.000 Volts (BOMMEL, 2015).

Existem dois tipos de reatores utilizados para as lâmpadas de vapor de sódio, sendo estes o reator eletromagnético e o reator eletrônico. O reator eletromagnético é o mais utilizado nos sistemas de iluminação pública no Brasil. O reator eletromagnético é formado por bobinas indutivas responsáveis por limitar a corrente e por um ignitor, responsável pela partida da lâmpada. As perdas nos reatores eletromagnéticos variam entre cerca de 10 e 30 % da potência nominal da lâmpada e como os mesmos funcionam em temperaturas muito elevadas, acabam por ter uma vida útil menor (BOMMEL, 2015).

Já os reatores eletrônicos, comparados aos eletromagnéticos, tem perdas de energia menores, aumentando assim a eficácia luminosa do sistema, a ignição tem sua função incorporada e o peso e o volume são menores. As perdas no reator eletrônico variam entre cerca de 5 e 15 % da potência nominal da lâmpada e a vida da lâmpada aumenta de 30 a 50 % em relação aos reatores eletromagnéticos (BOMMEL, 2015).

2.4.1.4 Luminária

A luminária é um equipamento que controla a distribuição do fluxo luminoso da lâmpada contida nele, proporcionando ventilação adequada à lâmpada e mantendo a temperatura de operação nos limites estabelecidos. A luminária inclui todos os itens necessários para a fixação e proteção da lâmpada e para conectá-la ao circuito de alimentação elétrica. São importantes para a segurança e facilidade de manutenção e como fazem parte da cena diurna das ruas, seu aspecto estético também é importante.

As lâmpadas de descarga emanam luz em 360° e necessitam que a luminária direcione apenas para o local onde se quer iluminar, por isso, fazem papel de refletor. São construídas a partir de um metal, para ajudar na reflexão e direcionamento da luz, são dos

tipos abertas, abertas com proteção e fechadas. Cada local demanda um tipo de luminária, normalmente são utilizadas luminárias abertas, optando apenas pelas fechadas quando há risco da quebra da lâmpada por atos de vandalismo.

Embora não sejam equipamentos que consomem energia, os mesmos têm impacto direto no consumo e na iluminância do sistema de iluminação. Uma luminária que distribui a luz com qualidade, ilumina o local com uma lâmpada de menor potência, já uma luminária que não distribui corretamente a luz, precisa de uma lâmpada com maior potência para a mesma iluminância. A Figura 4 mostra um exemplo de luminária utilizada para iluminação pública.

Figura 4: Exemplo de luminária utilizada para iluminação pública.



Fonte: Olivo (2017).

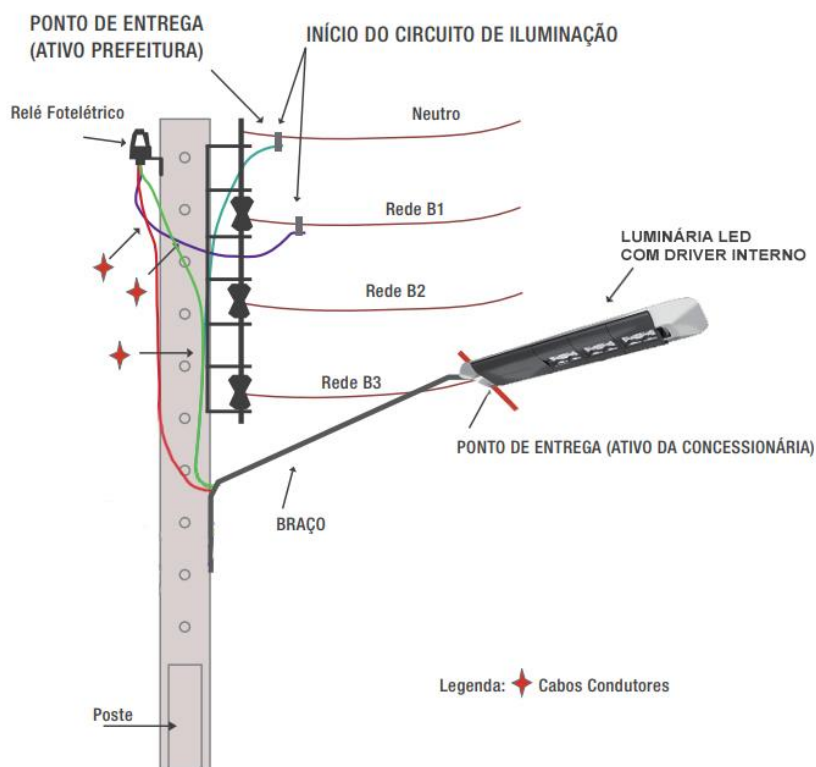
2.4.2 Sistema com Diodo Emissor de Luz (LED)

As principais cidades ao redor do mundo já atualizaram ou planejam atualizar em breve a iluminação das ruas para tecnologias com LED, pois fica evidente a partir de uma década de testes em todo o mundo, onde as cidades que adotaram luz de rua LED conseguiram economias de energia entre 50 % e 70 % (CIRIMINNA *et al.*, 2015; DJURETIC E KOSTIC, 2018; LOKHANDE E MARKANDE, 2018; TOUBAL *et al.*, 2016).

O sistema de iluminação pública com LEDs já contém todos componentes em um único invólucro, neste caso, sendo chamado de luminária. Dentro da mesma se encontra o driver, os LEDs e as lentes, que servem para expandir o feixe de luz dos LEDs, melhorando

a distribuição luminosa da luminária. A fotocélula normalmente é a mesma do sistema com lâmpadas HPS, o sistema é disposto como mostra a Figura 5.

Figura 5: Sistema de iluminação com luminária LED.



Fonte: Adaptado de Governo Do Estado De São Paulo (2013).

2.5.2.1 Lâmpada LED

O LED é constituído por uma série de camadas de material semicondutor. Diferentemente do que ocorre com as lâmpadas incandescentes, o LED emite luz em uma determinada cor. A cor branca pode ser produzida através da mistura das cores azul, vermelha e verde ou através do LED azul com fósforo amarelo. Com o avanço tecnológico, a eficiência do LED aumentou consideravelmente nos últimos anos (RODRIGUES, 2002).

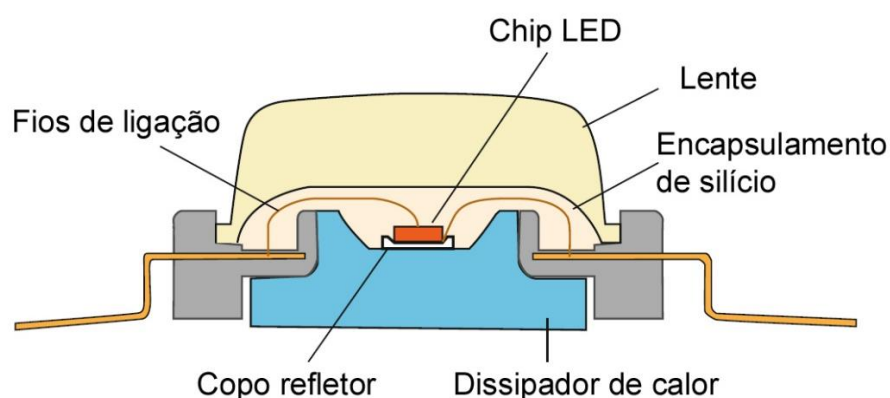
Como um diodo normal, o LED consiste em um chip de material semicondutor impregnado, ou dopado, com impurezas para criar uma junção p-n (portadores positivos e negativos). No estado estacionário, transportadores de sinais opostos (elétrons e lacunas) não podem penetrar na região de junção devido a um campo de carga espacial desenvolvido. Quando a junção de um LED é polarizada diretamente, como em outros diodos, a corrente

flui facilmente do lado p para o lado n. Quando os elétrons cruzam a junção do tipo n para o tipo p, o processo de recombinação elétron-lacuna produz fótons em um processo chamado eletroluminescência. Ao fazê-lo, os elétrons passam de um alto nível de energia para um mais baixo, sendo esta diferença de energia emitida como luz. O comprimento de onda da luz depende da diferença de nível de energia entre os materiais p e n, que por sua vez depende do material semicondutor utilizado (BOMMEL, 2015).

A junção de semicondutores p-n é o coração do LED e é chamado de chip LED. O material semicondutor utilizado determina o comprimento de onda e, portanto, a cor da luz emitida. Para LEDs, é utilizado material semicondutor, que é composto por diferentes sólidos cristalinos.

A Figura 6 mostra a construção do corpo e os principais componentes de um LED de alta potência e deve ser vista como um exemplo ilustrativo típico. O chip LED é colocado em um copo refletor, que devido à sua forma, ajuda a direcionar a luz em direção ascendente. Os LEDs de alta potência contam com um dissipador de calor de material de alta condutividade térmica para conduzir o calor longe do chip. O lado superior do chip, o copo do refletor e os fios de ligação são colocados em um encapsulamento de silício para proteção. Isto, juntamente com a lente, ajuda a aumentar a extração de luz do chip, o que é essencial para uma alta eficiência do LED (BOMMEL, 2015).

Figura 6: Principais componentes de um LED de alta potência.

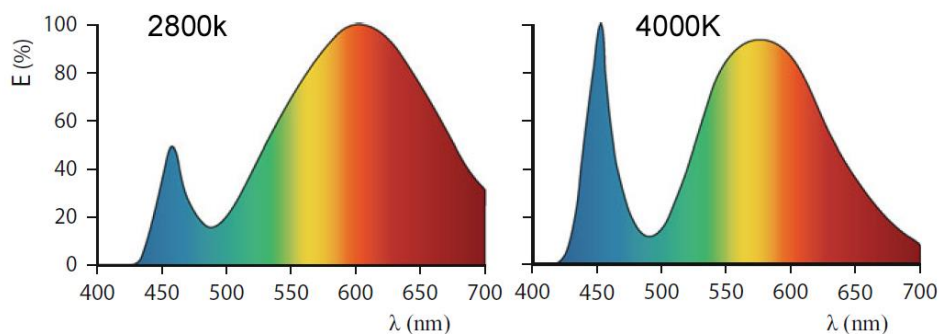


Fonte: Adaptado de Bommel (2015).

As versões de alta temperatura de cor têm um Índice de Reprodução de Cores (IRC) moderada, entre 50 e 75 %. Nas versões de baixa temperatura de cores, os LEDs estão disponíveis com bom IRC, superior a 80 %, até com excelente IRC, maior que 90 %. A

Figura 7 mostra o exemplo de um espectro de LED branco/quente com temperatura de cor de 2800 K e um branco/frio com temperatura de cor de 4000 K. A Quadro 3 mostra algumas características do LED.

Figura 7: Espectro de LED branco/quente e um branco/frio.



Fonte: Adaptado de Bommel (2015).

Quadro 3: Características do LED

Fluxo Luminoso	LEDs de alta potência podem alcançar um fluxo luminoso de cerca de 1.000 lm. A união de vários LED, para formar uma luminária LED, pode elevar muito este valor.
Eficiência Luminosa	A eficiência luminosa dos LEDs depende da potência e da qualidade de cor da luz que produz. Os LEDs de cores brancas/frias estão comercialmente disponíveis com eficiência de cerca de 150 lm/W e LEDs brancos/quentes com eficiência de cerca de 120 lm/W.
Tempo de Vida	As fontes de luz LED têm vida útil, se mantiver a temperatura da junção abaixo do limite, entre 50.000 e 120.000 h.

Fonte: Adaptado de Bommel (2015).

2.5.2.2 Driver

Os LEDs também não funcionam quando são operados diretamente a partir da tensão da rede de alimentação. O equipamento eletrônico utilizado para fazê-los funcionar corretamente é chamado de *driver*. O mesmo converte de corrente alternada (CA) para

corrente contínua (CC) e adequada a tensão e frequência para o melhor funcionamento dos LEDs.

Para incorporar um sistema de gestão remota com dimerização na luminária, é necessário que o *driver* tenha esta funcionalidade, ou seja, tenha uma entrada para que seja possível a dimerização. Normalmente a entrada do *driver* para dimerização é uma entrada digital de 0 a 10V, ou entrada *Pulse-Width Modulation* (PWM) de 0 a 100 % de *duty-cycle*.

2.5.2.3 Luminária

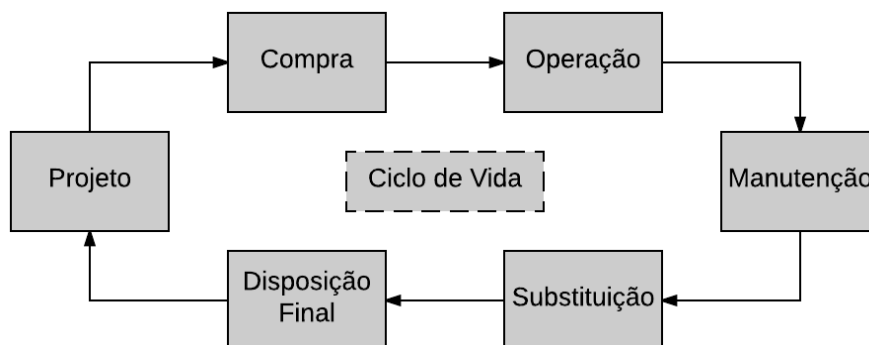
A luminária utilizada nos sistemas com LED tem o mesmo papel da luminária do sistema com HPS, porém, ela integra os LEDs, lentes e o *driver* dentro da mesma. Normalmente são fabricadas em alumínio, que exerce o papel de dissipador de calor para os LEDs, fazendo com que os mesmos operem abaixo do limite de temperatura.

Diferente das luminárias com HPS, não há necessidade dela exercer papel de refletor, pois o LED emite a luz apenas em um espaço semiesférico, e não em 360°, evitando a poluição luminosa.

2.5 Análise do Custo do Ciclo de Vida (LLCA)

O Manual do Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia (NIST) 135 (FULLER E PETERSEN, 1995), define o custo do ciclo de vida, ou do termo em inglês *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA) como o custo total de possuir, operar, manter e descartar uma instalação durante um período de tempo. A Figura 8 mostra o ciclo de vida de um produto, onde cada etapa do ciclo acumula um custo, e todos devem ser considerados em uma LCCA.

Figura 8: Ciclo de vida de um produto.



Fonte: Adaptado de Fuller e Petersen (1995).

A engenharia de ciclo de vida como uma abordagem para o desenvolvimento de um produto foi reconhecida como uma maneira eficaz de competir no mercado global atual, pois a crescente demanda por parte dos produtores de desenvolver produtos que são baratos para adquirir, usar e descartar exigiu que o custo do ciclo de vida dos produtos seja considerado também durante a criação do produto. A LCCA deve ser vista como uma ajuda para tomada de decisão da criação, compra, uso e disposição final de um produto (ASIEDU E GU, 1998; FHWA, 2002).

Para Perera, Morton e Perfrement (2009), o uso de LCCA é essencial para demonstrar que os processos de aquisição e as decisões podem ultrapassar o preço de compra de um bem ou serviço, pois o preço de compra não reflete os custos que um produto acumula durante toda sua vida útil. Uma LCCA típica é baseada nos custos de compra e todos os custos associados, tais como entrega, instalação, comissionamento e seguro, custos operacionais, incluindo custos de serviços públicos, como custos com uso de energia e água, custos de substituição, tais como remoção, reciclagem ou remodelação.

O valor residual ou de salvamento deve basear-se na vida restante de um produto no final do período de análise, como uma parcela rateada do último custo de substituição. Os custos operacionais se repetem diversas vezes, mas presume-se que o valor residual ocorra apenas uma vez ao final da análise. Como regra geral, o valor residual de um sistema com vida útil remanescente pode ser calculado linearmente pelos custos iniciais. (FULLER E PETERSEN, 1995; WALLS E SMITH, 1998; TÄHKÄMÖ *et al.*, 2012).

2.5.1 LCCA para Tecnologias de Iluminação Pública

Estima-se que ao longo da vida de uma instalação de iluminação pública, o valor dos materiais represente somente 15 % do valor total dos gastos, o restante vem da soma do consumo de energia elétrica e de manutenções no sistema. O valor de implantação de um projeto deve ser visto somente como o custo inicial e os bons investimentos em materiais com maior tecnologia agregada podem ter taxas de retorno bastante atrativas (ROSITO, 2009).

Normalmente após a instalação, uma luminária LED só precisará de manutenção após 12 anos, o que difere bastante dos 3 a 4 anos de uma instalação de lâmpada HPS (SANTOS, 2011). Segundo Tähkämö *et al.* (2012), a decisão sobre a escolha da tecnologia não deve basear-se apenas nos custos de investimento, uma vez que as luminárias LED oferecem economias em custos operacionais e longa vida útil. Além disso, o tempo de retorno do investimento da troca de HPS por LED pode ser menor que 6 anos.

Na análise realizada por Gibbons, Li e Meyer (2015), comprova-se que ao longo da vida útil das luminárias, o uso de luminárias LED resultará em economia no consumo de energia e custos totais relacionados à iluminação. Devido à manutenção mínima exigida pelas luminárias LED, a substituição das luminárias HPS tradicionais também reduzirá significativamente a manutenção e os custos relacionados. Também, Mutmansky *et al.* (2010) concluem em seu trabalho, que a análise do custo do ciclo de vida ilustrou a importância de considerar todos os aspectos da iluminação pública quanto à viabilidade econômica de cada cidade.

Segundo Benekohal, Gregerson e Medina (2015), um LCCA que compare diferentes tecnologias deve incorporar projetos individuais e listas de materiais para cada um. O custo com consumo de energia desempenha um papel importante no LCCA. Uma análise do custo do ciclo de vida de uma tecnologia de iluminação pública deve levar em consideração os custos de mão de obra dos profissionais envolvidos, desde a elaboração do projeto à instalação final do sistema, manutenções e os custos da compra dos componentes do sistema.

Segundo Boyce, Fotios e Richards (2019), os sistemas de monitoramento remoto aumentam os primeiros custos de uma instalação, mas reduzem significativamente os custos operacionais e os custos do ciclo de vida. Na análise do custo de ciclo de vida desenvolvido por Carlos (2010), comparando sistemas de iluminação LED, indução e HPS, os custos

gerais do ciclo de vida econômico para iluminação LED foram 21 % menores do que os custos para a iluminação HPS.

2.5.2 *Benefícios Ambientais e Sociais*

Por si só, os gases contidos nas lâmpadas HPS podem contaminar o solo se não tiverem o descarte correto. Além disso, as mesmas necessitam de um reator, que é responsável pelo acendimento e funcionamento da lâmpada, serve para limitar a corrente e adequar as tensões para o funcionamento das lâmpadas, porém o mesmo apresenta baixa eficiência, cintilamento e ruído que pode interferir em outros equipamentos. Ainda, este tipo de lâmpada irradia luz em 360°, o que acaba por desperdiçar boa parte do fluxo luminoso. (DA SILVA E LUSTOSA, 2006; SCHULZ NETO, 2010).

Ligados diretamente à economia gerada pelo menor consumo de energia, a troca de luminárias HPS por LED traz benefícios ambientais e sociais, como a redução da emissão de CO₂ e destinação dos recursos economizados para outros programas governamentais. Também destacam-se outros benefícios da substituição de HPS por LED, tais benefícios ambientais como a não utilização de lâmpadas contendo gases, reduzindo a toxicidade dos materiais e os impactos ecológicos no descarte e também a redução da poluição luminosa (DA SILVA E LUSTOSA, 2006; PATTISON, HANSEN E TSAO, 2018; SCHULZ NETO, 2010).

Os benefícios sociais no aspecto da segurança noturna, no tráfego de veículos e pedestres, pois no senso comum da sociedade, usualmente a iluminação pública é justificada como fator de redução de criminalidade, além de ser um índice determinante de urbanização, onde observa-se uma relação regional entre os índices de urbanização e a existência da iluminação pública (DA SILVA E LUSTOSA, 2006).

Na análise dos impactos ambientais no ciclo de vida de HPS e LED realizada por Tähkämö e Halonen (2015), os resultados confirmaram que o uso das luminárias causou a maioria dos impactos ambientais, superior a construção e destinação final. Na comparação por luminária, a LED causou 26 % menos impactos ambientais médios do que a luminária HPS.

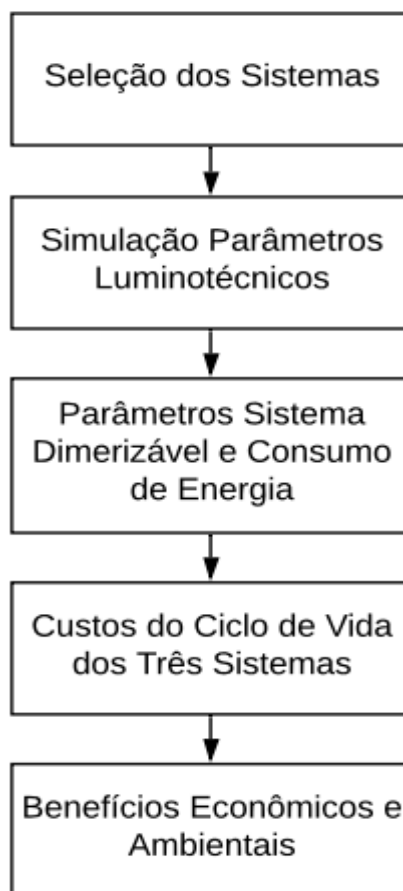
3 METODOLOGIA

Para identificar os benefícios econômicos, ambientais e sociais do uso da dimerização da iluminação pública, necessitou-se comparar as três soluções técnicas de iluminação pública, sistema com lâmpada de vapor de sódio (HPS), sistema com luminária LED e sistema com luminária LED dimerizável a partir da análise do custo de ciclo de vida destes 3 sistemas. Porém, para comparar os custos destas tecnologias é necessário que o padrão de iluminação gerado por elas seja equivalente, pois é importante que não existam grandes diferenças nos conceitos luminotécnicos das mesmas (BOUBEKRI, 2012).

As etapas da dissertação são ilustradas no diagrama da Figura 9, onde realizou-se primeiramente, a seleção das luminárias que foram avaliadas, após então foi realizada uma simulação dos sistemas a fim de entender os parâmetros luminotécnicos de cada sistema para determinar os que são equivalentes em termos luminotécnicos.

Foram encontrados e estabelecidos os parâmetros necessários para a utilização do sistema dimerizável, de consumo de energia e tempo de funcionamento diário dos três sistemas. Por fim, foram levantados os custos de todo ciclo de vida dos três sistemas, desde a compra e instalação, até a disposição final. Com isso, foi possível identificar o tempo do retorno do investimento (*payback time*) e definir qual sistema tem melhor relação entre benefício e custo.

Figura 9: Diagrama das etapas da dissertação.



Fonte: Próprio Autor.

3.1 Seleção dos Sistemas

A via modelo para as simulações e análises de iluminação possui 12 m de largura e 4 metros de passeio, com luminárias instaladas nos postes de distribuição de energia, a 8 m do solo, utilizando braço de 3m de comprimento e 10 graus de inclinação da luminária,

Como critério de seleção, elegeu-se a luminária LED com maior utilização nas cidades brasileiras, em vias das dimensões escolhidas acima, pois é necessário entender os custos de aquisição e manutenção da mesma e, também, para que seja possível simular suas grandezas luminotécnicas e o consumo de energia.

Tanto o sistema LED, quanto o sistema HPS devem iluminar a via com a maior semelhança possível. Entretanto, pode haver diferenças nos custos de compra, instalação, manutenção, operação e disposição, para isso é necessária a análise dos conceitos básicos

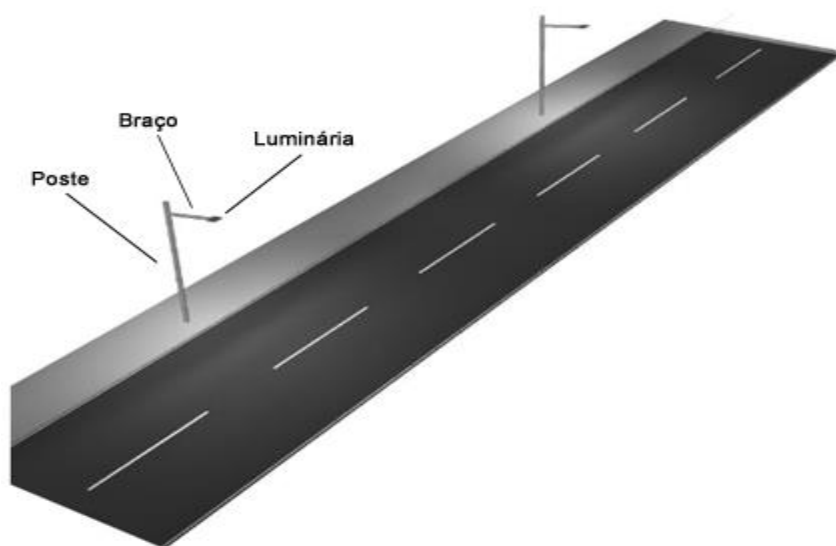
luminotécnicos, possibilitando encontrar duas luminárias, uma LED outra HPS, de índices semelhantes.

3.2 Simulação dos Sistemas

Para a comparação luminotécnica dos sistemas, e a utilização da luminária LED 150 W para substituir a lâmpada HPS de 250 W, utilizou-se o software luminotécnico Dialux 4.13. A área de trabalho para simulação foi uma área de 960 m², de uma avenida de 60 m de comprimento, 12 m de largura e 4 metros de calçada, nesta área foi simulada a iluminação produzida por 2 luminárias.

Foram simuladas luminárias instaladas junto aos postes de distribuição de energia, com a distância entre postes fixada em 40 m, como ilustra a Figura 10. Com os resultados gerados pelo software é possível comparar os dois sistemas para ver quais as diferenças luminotécnicas dos mesmos. O sistema com LED Dimerizável, conta com um equipamento instalado na mesma luminária LED, ou seja, os resultados da simulação são iguais ao sistema LED convencional.

Figura 10: Iluminação resultante do sistema LED durante a noite.



Fonte: Próprio Autor.

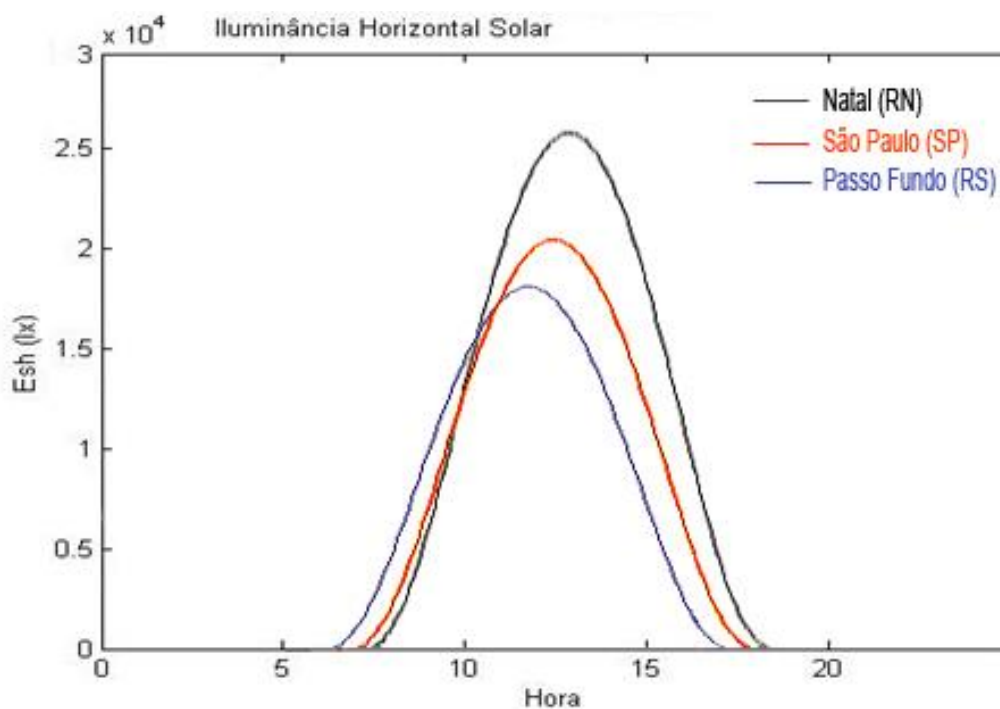
3.3 Parâmetros do Sistema Dimerizável e Consumo de Energia

Para encontrar a quantidade de horas de funcionamento diário e o consumo de energia de cada sistema, e principalmente para o funcionamento do LED dimerizável, responsável por regular o fluxo luminoso da luminária em determinados horários, foi necessário entender a incidência de luz natural sobre a via durante um dia, principalmente nos horários de amanhecer e anoitecer. Utilizou-se pontos geográficos de avenidas de três cidades brasileiras, Passo Fundo/RS, São Paulo/SP e Natal/RN, onde encontrou-se os valores de iluminância média diária durante um ano para então calcular o consumo de energia de cada sistema.

Para isso, foi utilizado o software TropLux 7.3.2, desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa em Iluminação da Universidade Federal de Alagoas (GRILU, 2018), amplamente utilizado para determinar iluminância em interiores, decorrente da incidência de luz natural direta ou indireta. O cálculo pode ser realizado para diversas cidades, com a possibilidade da inclusão de novos dados e processa separadamente a luz oriunda direta do Sol e a luz do céu, em diferentes distribuições de iluminâncias, no padrão da Comissão Internacional de Iluminação (CIE).

Em cada ponto geográfico, simulou-se um ambiente plano, para encontrar a iluminância em cima deste plano, simulando a iluminação na via. Foi adotado para cada cidade o dia 21 de cada mês, totalizando 12 simulações para cada cidade, para entender como é a iluminância diária durante o ano em cada uma delas e assim conhecer os horários de anoitecer e amanhecer. Isto, para saber quando os sistemas entram e saem de funcionamento, e assim conhecer o consumo de energia de cada sistema. A Figura 11 mostra a compilação dos gráficos gerados pelo software para as cidades de Passo Fundo/RS, São Paulo/SP e Natal/RN, para o dia 21 de junho, com comportamento da iluminância natural diária.

Figura 11: Iluminância natural diária 21/Jun nas 3 cidades.



Fonte: Próprio Autor.

Para o sistema dimerizável, enquanto não houver luz natural, a luminária irá manter a potência em 100 %. No entanto, durante o alvorecer a luminária irá diminuir a potência, e conseqüentemente o fluxo luminoso conforme a luz natural aumenta, mantendo a média de 20 lux na via, até se desligar por completo. Já ao anoitecer, a luminária irá aumentar o fluxo luminoso para manter a iluminância média em 20 lux, aumentando sua potência, conforme a luz natural irá diminuir. Quando não restar mais luz natural, neste momento, a luminária estará com 100 % da potência.

Por ser um sistema que permite a dimerização, durante períodos de menor movimento na via, como durante a madrugada, pode-se considerar reduzir a potência das luminárias. Neste trabalho é proposta a dimerização no intervalo entre a 00h00min e 05h00min, diminuindo a potência em 25 %, reduzindo assim a iluminância a fim de manter uma média de 10 lux na via, mínimo permitido pela norma NBR 5101 (ABNT, 2012), com o objetivo de economizar energia e elevar a vida útil da luminária.

De maneira similar, Kim e Hwang (2017) em seu projeto utilizaram o controle da luminosidade em três etapas, 100 % antes das 22h00min, 75 % das 22h00min à meia-noite e 50 % após a meia-noite. E através deste estudo determinou que a dimerização resultou numa economia de 25 % de energia na dimerização do LED. Além disto, verificou-se que o

LED tem uma vida útil mais longa, maior eficiência e contribui positivamente para o meio ambiente.

3.4 Custos Durante a Vida Útil

O período de análise do LCCA deve ser suficientemente longo para refletir as diferenças de custo a longo prazo associadas às diferentes estratégias ou produtos. Como regra geral, o período de análise deve ser longo o suficiente para incorporar pelo menos uma atividade de reinstalação (WALLS E SMITH, 1998). Portanto, determinou-se o período de análise de 15 anos, tempo suficiente para os sistemas acumularem custos importantes para a análise do custo do ciclo de vida.

É necessário entender todos os custos acumulados neste período pelos três sistemas, desde a compra até a disposição final. Para obtenção destes custos de aquisição, de instalação e de descarte, utilizou-se a ferramenta Painel de Preços, sendo os custos de aquisição dos equipamentos na seção de Materiais e os custos de instalação e disposição final na seção de Serviços. O Painel de Preços foi desenvolvido pela equipe da Secretaria de Gestão (SEGES) do Ministério do Planejamento, Desenvolvimento e Gestão (MP), que disponibiliza de forma simples, dados e informações de compras públicas homologadas no Sistema Integrado de Administração de Serviços Gerais (SIASG) e Comprasnet (ROGÉRIO, 2018).

O Painel de Preços tem o objetivo de auxiliar os gestores públicos na tomada de decisões acerca dos processos de compra e dar transparência aos preços praticados. A ferramenta devolve na busca a quantidade total comprada no ano, a média dos custos de todas aquisições no ano, que é a soma de todas as medições divididas pelo número de observações no conjunto de dado. A mediana, é o valor do meio que separa a metade maior da metade menor no conjunto de dados e o menor e maior preço pago por cada item (ROGÉRIO, 2018).

O Painel de Preços disponibiliza diversos filtros, como o ano da compra, nome do material (PDM), código do Material, pelo CATMAT ou código do serviço pelo CATSER, descrição do material ou descrição do serviço, objeto da compra, CNPJ/CPF ou nome do fornecedor, porte da empresa, unidade de fornecimento, modalidade da compra, esfera, entre outros.

Assim, é possível consultar todas compras de um determinado produto, com determinadas características realizadas por órgãos públicos nacionais, estaduais e municipais durante um período. Utilizou-se as compras dos sistemas realizadas no ano de 2018, considerando o valor de todos os componentes do sistema instalado como lâmpada, reator, fotocélula, luminária LED e outros, para trazer dados mais atuais de custos dos sistemas e dos custos durante a vida útil, como manutenção e consumo de energia.

Para o cálculo do custo com energia elétrica dos três sistemas, foi obtido junto ao Plano de dados abertos 2018-2019 da ANEEL (2018) a tarifa média nacional e com esta calculou-se o custo que cada acumulou com consumo de energia. Isto através dos parâmetros desenvolvidos para acionamento e desligamento dos sistemas, onde descobriu-se a quantidade de horas de funcionamento diária de cada sistema.

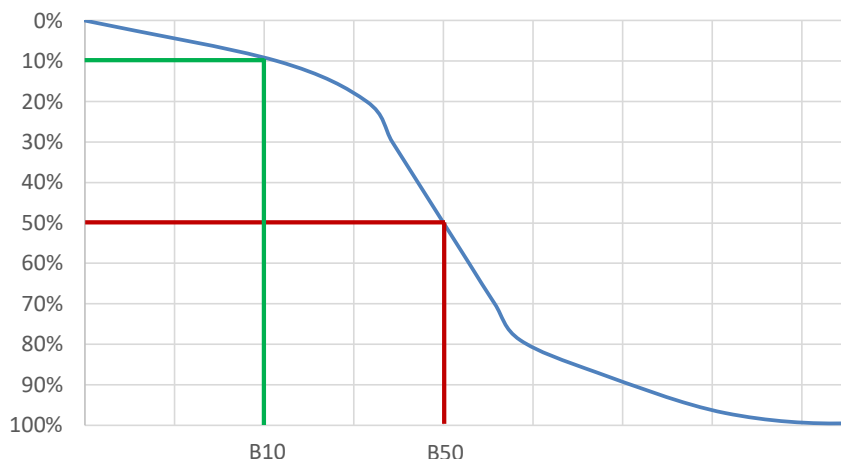
Com isso, foi possível estimar a emissão de CO₂ para o consumo de energia de cada sistema, através dos fatores de emissão médios de CO₂, de 2018, para energia elétrica, disponibilizados pelo Ministério de Ciência, Tecnologias, Inovações e Comunicações (MCTIC) (2019), informados em tCO₂/MWh, e têm como objetivo estimar a quantidade de CO₂ associada a geração de energia levando em conta a matriz energética brasileira. O valor residual de cada sistema foi calculado com base no custo de aquisição de cada item e o período de vida útil remanescente destes, para cada sistema no final do período da análise.

3.4.1 Custos de Manutenção

O custo de manutenção de um item, compreende a troca do mesmo, senso assim representado pelo somatório do custo de aquisição e instalação do novo item e o de descarte do item retirado. Tratando-se do sistema HPS, fabricantes de lâmpadas HPS atribuem uma classificação de vida útil a uma lâmpada com base no tempo em que se espera que 50 % de uma amostra grande pare de funcionar, usando medições e modelos preditivos. Não se determina a vida útil pela diminuição do fluxo luminoso, pois esta é mais lenta, e a lâmpada tende a falhar antes de chegar a um valor crítico de fluxo luminoso.

Historicamente, o uso dessa mediana de tempo, denotada por B50, para representar a vida útil de um produto funcionou satisfatoriamente bem para concluir análises econômicas. A mediana B50 é representada na Figura 12 com um ponto vermelho, sendo a curva em preto a que representa a degradação da vida útil de uma lâmpada HPS.

Figura 12: Curva de degradação e mediana B50 lâmpada HPS.



Fonte: Adaptado de Lumileds (2007).

Para determinar, ao longo do período de 15 anos, quando é necessária a troca da lâmpada HPS, utilizou-se a mediana B50. Ao final deste valor, optou-se por trocar a mesma. Assim como a lâmpada pode falhar antes, pode falhar depois deste período, optou-se por utilizar este por ser o valor mediano de falhas. Buscou-se os valores B50 informados pelos principais fabricantes de lâmpadas vendidas no mercado brasileiro e, a partir disto, utilizou-se a mediana destes valores para determinar quando foi necessária a troca da lâmpada do sistema HPS, ou seja, quando esta acumulou custo com manutenção.

Da mesma forma, buscou-se os valores de vida mediana dos reatores eletromagnéticos dos principais fabricantes utilizados no Brasil e a partir da mediana dos valores encontrados, encontrou-se o momento em que deve ser trocado o reator do sistema HPS.

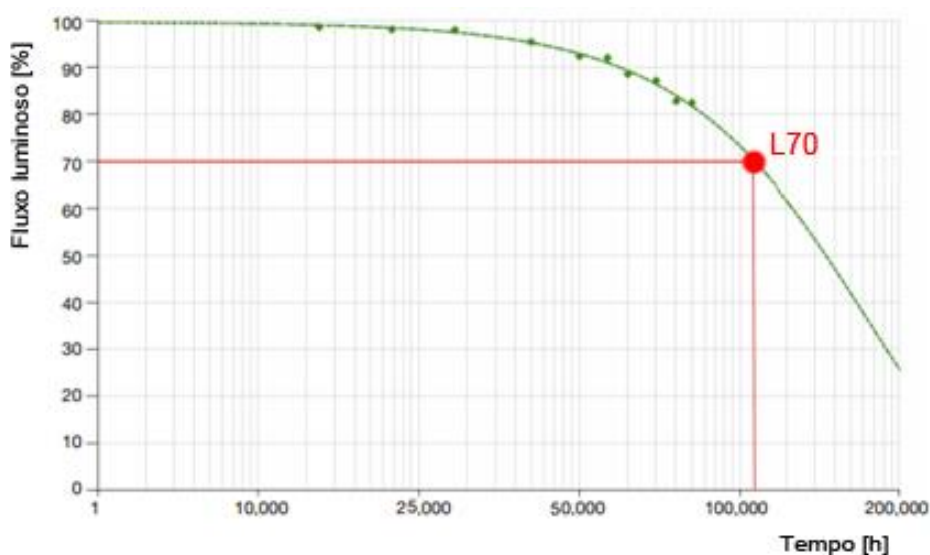
Além da lâmpada e do reator, o equipamento que apresenta manutenções durante os 15 anos, é o relé fotoelétrico. Este componente deve atender a NBR 5123 da ABNT (2016), atingindo, no mínimo 5.000 ciclos de operação (liga/desliga), sendo este valor base para a determinação da vida útil dos relés comumente utilizados para IP no Brasil.

Ao contrário dos sistemas de iluminação HPS, os sistemas de LED comercialmente disponíveis incluem luminárias totalmente integradas (luminária, driver, LED) e o desempenho deste sistema é normalmente afetado pelas interações entre estes componentes. Conseqüentemente, a abordagem típica para caracterizar a vida útil não é mais viável para sistemas LED. A vida útil dos LED's também pode ser influenciada por outros fatores, os

mais importantes incluem umidade, temperatura, corrente e tensão, forças mecânicas, produtos químicos e radiação de luz.

A vida útil do sistema LED é definida com base na manutenção do fluxo luminoso, pois o fluxo luminoso diminui com o tempo, e no caso do LED, diminuirá numa escala maior do que da lâmpada HPS. A *Alliance for Solid-State Illumination Systems and Technologies* (ASSIST, 2007), define a vida útil de um sistema LED como o tempo que leva até que sua saída de luz, ou manutenção de fluxo luminoso, atinja 70 % da saída inicial. Este tempo também chamado de L70, é representado pelo ponto em vermelho na Figura 13, onde a curva em verde representa a degradação do fluxo luminoso de uma luminária LED.

Figura 13: Curva de degradação e L70 luminária LED.



Fonte: Adaptado de Thomas e Markus (2018).

Assim como na análise de Swanson e Carlson (2012), assumiu-se L70 como o final da vida útil da luminária do sistema LED e, assim como para os demais equipamentos, buscou-se os valores L70 das principais luminárias LED comercializadas no Brasil e através destes valores, foi encontrada a mediana, sendo esta mediana o valor da vida útil da luminária LED utilizado para a análise do custo do ciclo de vida, para qual foi determinado quando é necessária a troca da luminária, ou seja, quando esta acumulou custo com manutenção.

3.5 LCCA e Benefícios do uso da Dimerização de IP

Após o levantamento dos custos acumulados por cada sistema, ao longo do período de 15 anos, foi realizado um diagrama de fluxo de caixa para cada sistema com o intuito de demonstrar a previsão dos gastos em cada sistema. Também foi ilustrada graficamente a composição percentual de cada custo para cada sistema, assim, pôde-se compreender quais custos tiveram mais relevância em cada sistema e compará-los.

Por fim, os cálculos de LCCA e do tempo de retorno do investimento (*payback time*) foram realizados a fim de entender quanto cada sistema acumula de custos durante este período e qual tem melhor relação entre benefício e custo, bem como o tempo de retorno do sistema dimerizável em comparação ao sistema HPS. Assim foi possível determinar os benefícios econômicos do uso do LED e, posteriormente do sistema LED Dimerizável.

As LCCA são realizadas usando o método do valor presente, aplicando aos valores futuros uma taxa de desconto, todos valores encontrados para o ano de 2018 serão replicados para custos futuros, então a taxa de desconto utilizada é uma taxa real, subtraída a inflação, a taxa utilizada foi a taxa Selic média de 2018, descontada a inflação média do mesmo ano. Os custos do ciclo de vida (LCC) para os 3 sistemas de iluminação foram calculados de acordo com a Equação 1, através da qual serão somados todos os custos encontrados no período de 15 anos da análise para os três sistemas.

$$LCC = Ci + \sum_0^t \frac{Co}{(1+i)^t} \quad (1)$$

Onde,

LCC = Valor presente líquido do custo do ciclo de vida total;

Ci = Investimento inicial (compra e instalação);

Co = Demais custos ao longo do período;

i = Taxa de desconto;

t = Período da análise em anos;

Assim, somou-se os custos iniciais com os demais custos acumulados no período de análise de 15 anos. Após o cálculo do custo do ciclo de vida, foi calculado o *payback time*. Neste caso, utilizou-se este método para encontrar o tempo de retorno do investimento do

sistema LED dimerizável em comparação com os outros dois sistemas, utilizando o quanto de economia anual este teve em relação aos outros durante o período. Este, foi conhecido através da Equação 2.

$$PAY = \frac{Ci1}{Co2 - Co1} \quad (2)$$

Onde,

PAY = Tempo de retorno do investimento;

Ci1 = Investimento inicial do produto 1 (compra e instalação);

Co1 = Demais custos anuais ao longo do período do produto 1;

Co2 = Demais custos anuais ao longo do período do produto 2;

As principais características encontradas foram ilustradas em um quadro comparando os três sistemas e indicando em verde e vermelho o melhor e pior sistema para cada característica. Também, através da análise dos resultados encontrados e da revisão bibliográfica realizada foram discutidos e determinados benefícios ambientais e sociais diretamente e indiretamente ligados com o uso dos sistemas LED e LED dimerizável, principalmente ligados a economia gerada pela substituição dos sistemas HPS por estas tecnologias.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados de cada etapa metodológica são apresentados a seguir. Foram selecionados os sistemas para a devida simulação e após realizado o levantamento dos custos de cada um dos três sistemas, para determinar os benefícios do uso de sistemas LED com dimerização em comparação com os demais sistemas.

4.1 Seleção dos Sistemas

Foram selecionados os equipamentos para formar os sistemas HPS, LED e LED Dimerizável, para simulação dos sistemas e assim encontrar os parâmetros luminotécnicos.

4.1.1 Sistema HPS e LED

Dentre a pesquisa dos diferentes tipos de luminárias, as que atenderam os critérios luminotécnicos apresentam potências de 150 W e 250 W respectivamente para o sistema LED e o HPS. A luminária LED selecionada para a análise do custo do ciclo de vida, foi a com maior utilização no Brasil para a via simulada, com potência de 150 W e fluxo luminoso de aproximadamente 28000 lm. Esta luminária normalmente é utilizada para substituição das lâmpadas instaladas de Vapor de Sódio com potência de 250 W e fluxo luminoso cerca de 17000 lm, por melhorar a iluminação consumindo menos energia elétrica.

Os dados técnicos dos sistemas de iluminação escolhidos são indicados no Quadro 4. O Quadro 5 mostra os dados da fotocélula selecionada para os dois sistemas e o Quadro 6 do reator escolhido para o sistema com lâmpada de Vapor de Sódio.

Quadro 4: Dados técnicos dos sistemas de iluminação escolhidos.

Sistema	HPS	LED
Potência	250 W	150 W
Fluxo Luminoso Médio	28000 lm	17000 lm
Temperatura da Cor Média	2000 K	5000 K
Corrente Nominal Média	1,5 A	0,7 A

Fonte: Próprio Autor.

Quadro 5: Dados técnicos do reator HPS selecionado.

Potência (Perdas) Médias	22 W
--------------------------	------

Fonte: Próprio Autor.

Quadro 6: Dados técnicos da fotocélula escolhida.

Tensão	220V
Potência Média	1,5 W

Fonte: Próprio Autor.

4.1.2 Sistema de Telegestão

O sistema de telegestão utilizado é o iluminaSmartIP, da fabricante Ilumina Energia e Tecnologia, localizada no Parque Tecnológico da Universidade de Passo Fundo (UPF). O sistema é composto por um equipamento instalado em um computador ou *tablet*, chamado de central, para fazer o controle e gestão dos pontos de iluminação pública, fazendo isso através de um software chamado iluminaDataTrid.

Neste software, pode-se fazer o controle manual ou automático das luminárias, e onde são recebidas as informações de defeitos das luminárias, caso aconteçam. O restante do sistema de telegestão é instalado diretamente na luminária, composto por um equipamento que serve como coordenador de rede, instalado em uma luminária, este tem o papel de receber as informações enviadas pela central e repassar para todas as luminárias da rede.

Estas luminárias recebem um equipamento chamado de dispositivo final, este, recebe e envia as informações da luminária para o coordenador. O iluminaSmartIP é um sistema simples, de baixo custo e eficiente, desenvolvido para funcionar com redes de até 250 luminárias conectadas a cada coordenador, podendo aumentar a rede aumentando o número de coordenadores. A Figura 14 ilustra o funcionamento deste sistema de telegestão.

Figura 14: Funcionamento do sistema de telegestão.



Fonte: Próprio Autor.

O software gera roteiros para manutenção automaticamente, mostrando no mapa os pontos georreferenciados, que necessitam de intervenção e cria uma rota automática para o atendimento. Assim, as rotinas de manutenção não necessitam de pessoas para estabelecer os locais a serem atendidos, otimizando os trajetos percorridos pelas equipes de campo, reduzindo assim as distâncias percorridas e os custos mensais com transporte.

O sistema também conta com uma proteção caso a comunicação falhe em qualquer ponto, através de programação dos dispositivos finais, de modo que os equipamentos permanecem com a programação dos horários independentemente da comunicação e seguirá esta programação caso não receba comandos do coordenador. Neste caso, o coordenador identifica a falha e gera um chamado de manutenção para reparo do equipamento.

O consumo de energia do equipamento é de 0,5 W/h, não impactando no consumo do sistema a ser instalado. Este sistema, foi escolhido devido a sua disponibilidade para os testes, realizados com 10 luminárias contendo o sistema de dimerização e uma central com software de controle, e por sua adequação às análises previstas para este trabalho.

4.2 Simulação dos Sistemas

Para as simulações luminotécnicas utilizou-se o software luminotécnico Dialux 4.13. A área de trabalho para simulação foi uma área de 960m², de uma avenida de 12 m de largura e 4 metros de calçada.

4.2.1 Sistema LED

Para a simulação do sistema LED, foi escolhida uma luminária com características em acordo com os valores médios definidos anteriormente e ilustrados no Quadro 4, sendo escolhida luminária do fabricante Ilumatic, modelo LPL Maestra 150 W, com fluxo luminoso de 17017 lm, mostrada na Figura 15 (ILUMATIC, 2018).

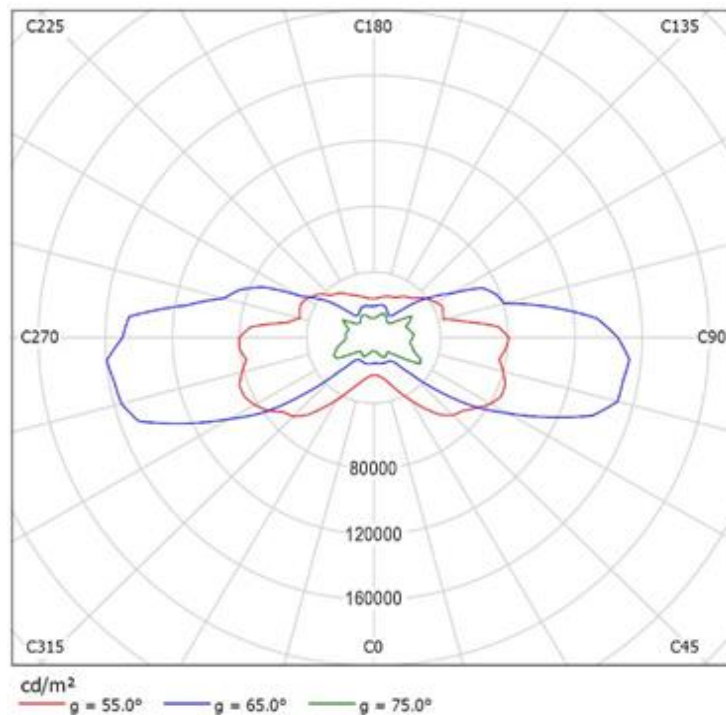
Após a escolha da luminária foi inserida a curva de distribuição luminosa da mesma no software, conforme ilustrado na Figura 16. Esta curva, obtida pelo fabricante através de ensaios em laboratório, é inserida no software para que os resultados da simulação sejam os mais próximos da realidade proporcionada pela instalação deste equipamento. É possível notar pela curva que as lentes acopladas nos LEDs da luminária fazem com que a luz seja melhor distribuída lateralmente, o que resulta em menos pontos escuros ou “zebramentos” na iluminação das vias.

Figura 15: Luminária LED selecionada.



Fonte: Ilumatic (2018).

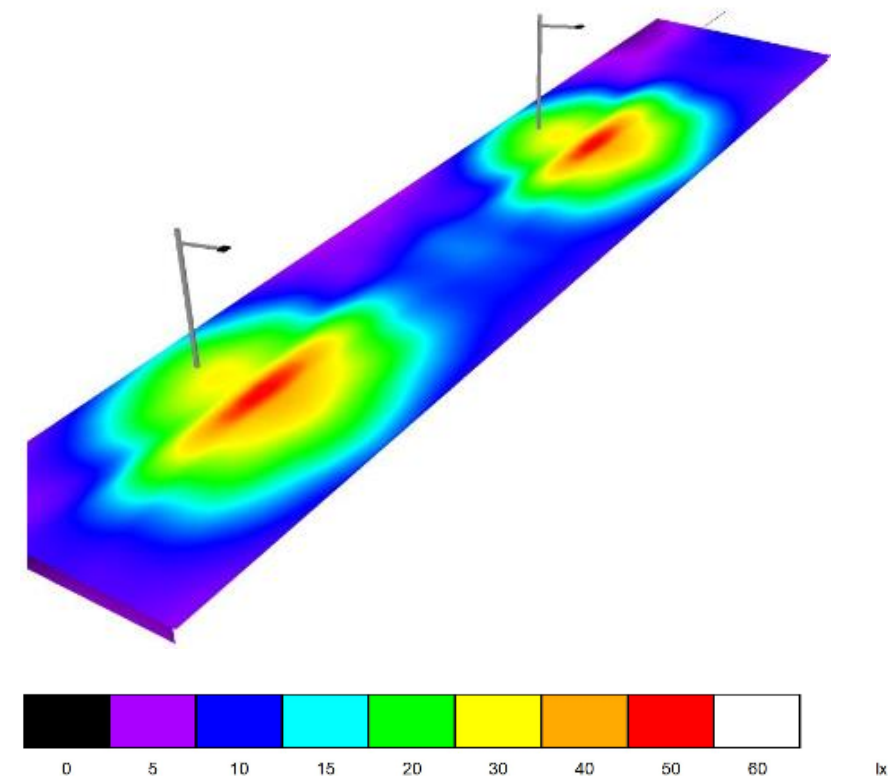
Figura 16: Curva de distribuição luminosa da luminária LED.



Fonte: Ilumatic (2018).

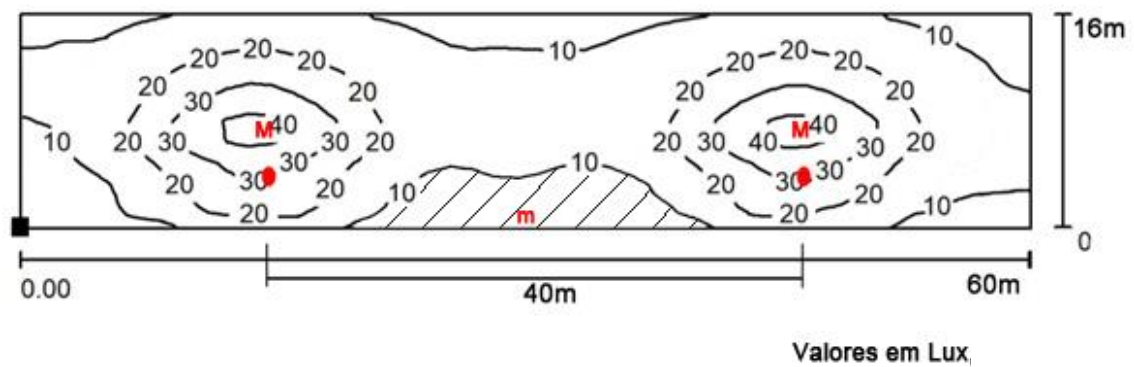
Como resultados obtidos na simulação, a Figura 17 mostra a iluminação representada em cores falsas, permitindo a melhor visualização da iluminação na via, bem como quais são os pontos mais e menos iluminados na área. A Figura 18 mostra a iluminação da área, com marcação de isolinhas na área indicando a iluminância em lux da área simulada.

Figura 17: Iluminação do sistema LED representada em cores falsas.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 18: Isolinhas indicando a iluminância do sistema LED em lux.



Fonte: Próprio Autor.

Observando os resultados da simulação, foi possível calcular o valor médio da iluminância, e que corresponde a 20 lux. Os valores máximo (M) e mínimo (m) foram respectivamente iguais a 48 lux e 7,76 lux.

4.2.2 Sistema HPS

Para a simulação do sistema HPS, elegeu-se uma luminária que tenha os valores médios escolhidos anteriormente ilustrados no Quadro 4, sendo escolhida assim a luminária do fabricante Philips, de modelo da luminária SPP368 e da lâmpada SON-T E E40 1SL 250 W, com 28000 lm, mostradas na Figura 19 (PHILIPS, 2017).

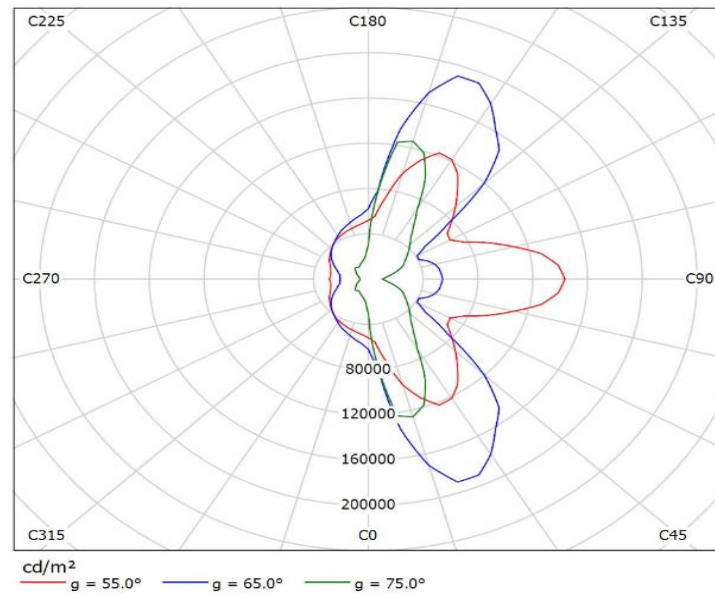
Após a escolha da luminária foi inserida a curva de distribuição luminosa da luminária contendo a lâmpada, ambas escolhidas anteriormente, sendo essa curva ilustrada na Figura 20. É inserida a curva luminotécnica no software para simulação mais próxima da realidade da iluminação deste sistema. É possível notar pela curva que a luminária não distribui a luz igualmente comparado ao sistema LED. A curva de distribuição luminosa da HPS apresenta menor uniformidade, resultando assim em mais pontos escuros e “zebramentos” na iluminação da via, pois sua iluminação permanece mais concentrada nas áreas mais próximas ao poste.

Figura 19: Lâmpada e Luminária HPS selecionadas.



Fonte: Philips (2017).

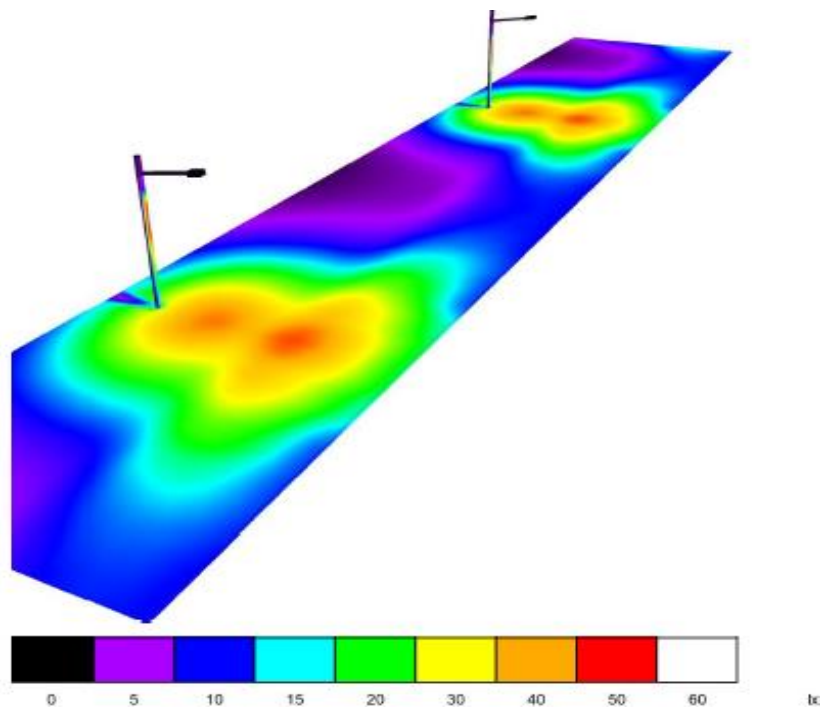
Figura 20: Curva de distribuição luminosa do sistema HPS.



Fonte: Philips (2017).

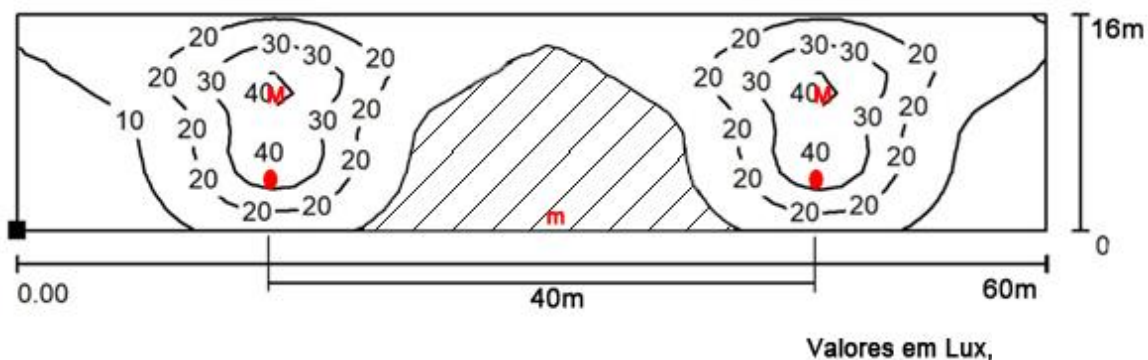
Como resultados obtidos na simulação, a Figura 21 mostra a iluminação representada em cores falsas, permitindo a melhor visualização da iluminação na via, assim como quais são os locais com maior e menor incidência de luz. A Figura 22 mostra a iluminação da área, com marcação de isolinhas na área indicando a iluminância em lux da área simulada.

Figura 21: Iluminação do sistema HPS representada em cores falsas.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 22: Isolinhas indicando a iluminância do sistema HPS em lux.



Fonte: Próprio Autor.

Observando os resultados da simulação, é possível calcular o valor médio da iluminância, e que corresponde a 15 lux. Os valores máximo (M) e mínimo (m) foram respectivamente 43 lux e 2,67 lux.

4.2.3 Comparação Luminotécnica

É possível notar na iluminação com HPS, assim como na iluminação com LED, que os pontos mais próximos às luminárias (pontos vermelhos), que a iluminância é maior, e conforme se afasta lateralmente a iluminância diminui. Porém, a simulação do HPS indicou que o sistema não é capaz distribuir uniformemente a luz como ocorre no sistema LED. A área com menor iluminação (área hachurada) é superior no sistema HPS em comparação ao LED. A distância de 40 m entre os postes deveria ser menor para ter uma distribuição mais uniforme, porém, como na grande maioria dos casos a luminária é fixada nos postes de energia elétrica, esta distância não pode ser alterada.

O sistema HPS cria mais pontos escuros e zebrações da iluminação da área, com pontos claros e escuros se intercalando. Essa situação pode impactar em diferentes aspectos, principalmente na questão de segurança, pois as áreas mais escuras são mais suscetíveis a assaltos e acidentes de trânsito (WANVIK, 2009). Verifica-se, através destes resultados que a iluminação com o sistema HPS, mesmo com equipamentos mais potentes e com maior fluxo luminoso quando comparados à luminária LED anteriormente avaliada, resultam em iluminâncias equivalentes nas imediações do poste, e bastante inferiores nos pontos

intermediários, demonstrando inferioridade desta no que se refere a sua capacidade de distribuição luminosa.

Assim como na análise de Cook, Shackelford e Pang (2008) na cidade de Oakland e Cook, Sommer e Pang (2008) em São Francisco, Califórnia, onde foram comparados sistemas HPS de 121 W com sistemas LED de 58 a 78 W, e como resultado, a uniformidade da iluminação melhorou em relação ao sistema HPS, além das luminárias LED forneceram desempenho geral melhor à iluminação pública comparado ao sistema HPS.

Da mesma forma, no trabalho de Henderson (2009) em Raleigh, Carolina do Norte, foram substituídas luminárias HPS com lâmpadas de 200 e 250 W por luminárias LED de 167 W, e obtiveram uma uniformidade de iluminação melhor, além do julgamento subjetivo de usuários que indicaram que a visibilidade geral foi melhorada.

Também na análise de Kinzey e Myer (2009) em Portland, Oregon, onde, um sistema de 120 W comparou-se com um sistema de LED de 53 W e conclui-se que o nível médio de luz foi substancialmente maior, além da uniformidade da luz mais alta no sistema LED em relação ao HPS.

No estudo, defendido pelo Departamento de Transportes da Virgínia, realizado por Gibbons, Li e Meyer (2015), as luminárias LED superaram o sistema HPS em qualidade, distribuição e estabilidade de luz. No geral, os sistemas de LED exibiram uma saída de luz muito mais branca, melhor uniformidade de luz e menor brilho e luz de fundo, além de todas as luminárias LED emitirem a luz muito mais próxima da cor da luz natural.

4.3 Levantamento dos Custos

Todos os custos significativos acumulados durante a vida útil de cada um dos 3 sistemas foram levantados, sendo eles os custos de aquisição, custos de instalação, que também são utilizados quando há troca dos equipamentos dos sistemas, custos com energia elétrica e por fim os custos com o descarte de cada sistema. Estes custos são os mais importantes durante a vida útil dos sistemas de iluminação em questão e através deles é possível entender e realizar e comparar a análise do custo do ciclo de vida dos sistemas HPS, LED e LED dimerizável.

4.3.1 Custos de Aquisição

Para levantar os custos do sistema HPS, utilizou-se como filtro as descrições de cada item no Painel de Preços de Materiais. Os custos encontrados foram ilustrados no Quadro 7, com o valor médio, mediano, mais alto e mais baixo comprados por órgãos públicos nacionais, estaduais e municipais no ano de 2018. O custo de aquisição total do sistema HPS é de R\$ 204,15, sendo este custo determinado pela soma do custo mediano de cada item.

Da mesma forma, o Quadro 8 mostra os custos para o sistema LED, que semelhante ao HPS possui o relé fotoelétrico, a base para o relé e o braço para fixação da luminária. O custo de aquisição total do sistema LED é de R\$ 1.122,60, este determinado pelo mesmo critério aplicado ao sistema HPS.

Também, para o sistema LED dimerizável, os custos estão dispostos no Quadro 9, sendo o custo total do sistema de R\$ 1.397,41. Este sistema se diferencia por não necessitar da base e do relé fotoelétrico, pois o acionamento da luminária é feito pelo sistema de telegestão, por sua vez, este item teve o custo levantado junto a empresa que fabrica o sistema, pois não foi encontrado no Painel de Preços.

Quadro 7: Custos de aquisição sistema HPS.

ITEM	MEDIANA	MÉDIA	BAIXO	ALTO
Lâmpada Vapor Sódio 250 W	R\$ 29,80	R\$ 34,15	R\$ 21,30	R\$ 58,00
Reator Lâmpada Sódio	R\$ 57,11	R\$ 77,37	R\$ 31,22	R\$ 219,00
Relé Fotoelétrico	R\$ 16,49	R\$ 19,20	R\$ 9,69	R\$ 52,00
Base Relé Fotoelétrico	R\$ 8,70	R\$ 11,42	R\$ 3,75	R\$ 38,00
Braço Luminária	R\$ 35,41	R\$ 54,95	R\$ 23,98	R\$ 125,00
Cabeça Luminária	R\$ 56,64	R\$ 73,65	R\$ 17,30	R\$ 200,00
Total	R\$ 204,15			

Fonte: Próprio Autor.

Quadro 8: Custos de aquisição sistema LED.

ITEM	MEDIANA	MÉDIA	BAIXO	ALTO
Luminária LED 150 W	R\$ 1.062,00	R\$ 1.103,72	R\$ 722,22	R\$ 1.580,00
Relé Fotoelétrico	R\$ 16,49	R\$ 19,20	R\$ 9,69	R\$ 52,00
Base Relé Fotoelétrico	R\$ 8,70	R\$ 11,42	R\$ 3,75	R\$ 38,00
Braço Luminária	R\$ 35,41	R\$ 54,95	R\$ 23,98	R\$ 125,00
Total	R\$ 1.122,60			

Fonte: Próprio Autor.

Quadro 9: Custos de aquisição sistema LED Dimerizável.

ITEM	MEDIANA	MÉDIA	BAIXO	ALTO
Luminária LED 150 W	R\$ 1.062,00	R\$ 1.103,72	R\$ 722,22	R\$ 1.580,00
Braço Luminária	R\$ 35,41	R\$ 54,95	R\$ 23,98	R\$ 125,00
Sistema de telegestão	R\$ 300,00	R\$ 300,00	R\$ 300,00	R\$ 300,00
Total	R\$ 1.397,41			

Fonte: Próprio Autor.

Através destes custos, percebe-se que o preço de aquisição do sistema HPS é inferior aos sistemas LED e LED dimerizável. Este custo inicial inferior acaba impactando na escolha do sistema, porém, entende-se que os sistemas que utilizam LED apresentam uma vida útil superior em comparação as lâmpadas de vapor de sódio do sistema HPS e também acumulem menos custos durante a vida útil.

Para Becalli *et al.* (2015) e Boyce, Fotios e Richards (2009) atualmente o custo inicial de fontes de iluminação mais eficientes é um dos principais fatores que atrasam a reforma do sistema de iluminação urbana. Em todos os cenários analisados por eles, os resultados de uma análise econômica são bastante satisfatórios, mesmo que o custo de aquisição do LED seja relativamente alto, isto porque esse fator é contrabalançado pela economia alcançável em custos de manutenção e consumo de energia durante a vida útil.

Há uma forte tendência de redução dos custos de fabricação do LED, segundo Bardsley *et al.* (2014) entre 2014 e 2020 era esperado que o custo seria em torno de 30 % menor, o que se concretizou. O preço do componente LED no preço da luminária está diminuindo rapidamente, o mesmo decresceu de 40 % em 2009 para 20 % em 2015, e nesta escala de fabricação continuará a diminuir.

4.3.2 Custos de Instalação

Para encontrar os custos com a instalação dos sistemas, utilizou-se a ferramenta de Serviços do Painel de Preços, utilizando os mesmos filtros e descrições de cada item da ferramenta de Materiais. Os custos encontrados para o sistema HPS estão dispostos no Quadro 10, para o sistema LED no Quadro 11 e para o LED dimerizável no Quadro 12.

Estes valores levam em conta o custo total pago em 2018, por órgãos nacionais, estaduais e municipais, pelo serviço de instalação de cada item, somando todos os custos

necessários para realização do serviço, como o custo da hora de uso do caminhão com cesto, da mão de obra do electricista e ajudante, entre outros.

Quadro 10: Custos de instalação do sistema HPS.

ITEM	MEDIANA	MÉDIA	BAIXO	ALTO
Lâmpada HPS 250 W	R\$ 9,42	R\$ 12,86	R\$ 3,85	R\$ 27,70
Reator Lâmpada Sódio	R\$ 24,77	R\$ 29,85	R\$ 20,20	R\$ 64,90
Relé Fotoelétrico	R\$ 11,86	R\$ 14,80	R\$ 11,86	R\$ 21,00
Cabeça Luminária	R\$ 29,60	R\$ 34,97	R\$ 20,30	R\$ 74,70
Braço Luminária	R\$ 19,20	R\$ 20,81	R\$ 12,30	R\$ 58,80
Total	R\$ 94,85			

Fonte: Próprio Autor.

Quadro 11: Custos de instalação sistema LED.

ITEM	MEDIANA	MÉDIA	BAIXO	ALTO
Luminária LED 150 W	R\$ 45,00	R\$ 42,46	R\$ 16,66	R\$ 75,00
Relé Fotoelétrico	R\$ 11,86	R\$ 14,80	R\$ 11,86	R\$ 21,00
Braço Luminária	R\$ 19,20	R\$ 20,81	R\$ 12,30	R\$ 58,80
Total	R\$ 76,06			

Fonte: Próprio Autor.

Quadro 12: Custos de instalação sistema LED Dimerizável.

ITEM	MEDIANA	MÉDIA	BAIXO	ALTO
Luminária LED 150 W	R\$ 45,00	R\$ 42,46	R\$ 16,66	R\$ 75,00
Braço Luminária	R\$ 19,20	R\$ 20,81	R\$ 12,30	R\$ 58,80
Total	R\$ 64,20			

Fonte: Próprio Autor.

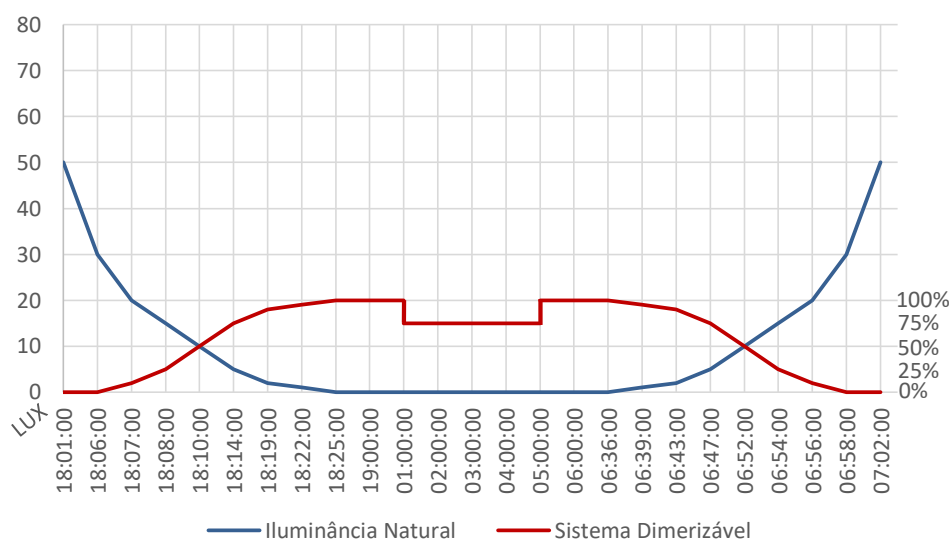
O sistema HPS possui mais partes móveis e por este motivo acumula um custo maior para instalação do sistema inteiro, em comparação com o sistema LED e principalmente o sistema LED dimerizável. Não há custo específico para instalação do equipamento de telegestão, pois é inserido junto da luminária LED e tem custo apenas na aquisição do mesmo. Contudo, quando é necessária a troca, o custo será o mesmo da troca da luminária LED, pois é necessário retirar a luminária, trocar o equipamento e reinstalar a luminária.

Este custo de instalação, foi utilizado tanto na primeira vez que o sistema foi instalado, quanto cada vez que se necessitou da troca, pois a troca acumula os mesmos custos para instalar qualquer equipamento dos sistemas.

4.3.3 Custos com Energia Elétrica

Através dos parâmetros de iluminação de cada sistema, e das curvas de iluminância natural, encontrou-se os consumos de energia de cada sistema, a Figura 23 ilustra a dimerização durante uma noite inteira, com o fluxo no anoitecer, madrugada e amanhecer, em comparação com a iluminância natural.

Figura 23: Iluminância sistema LED dimerizável x iluminância natural.

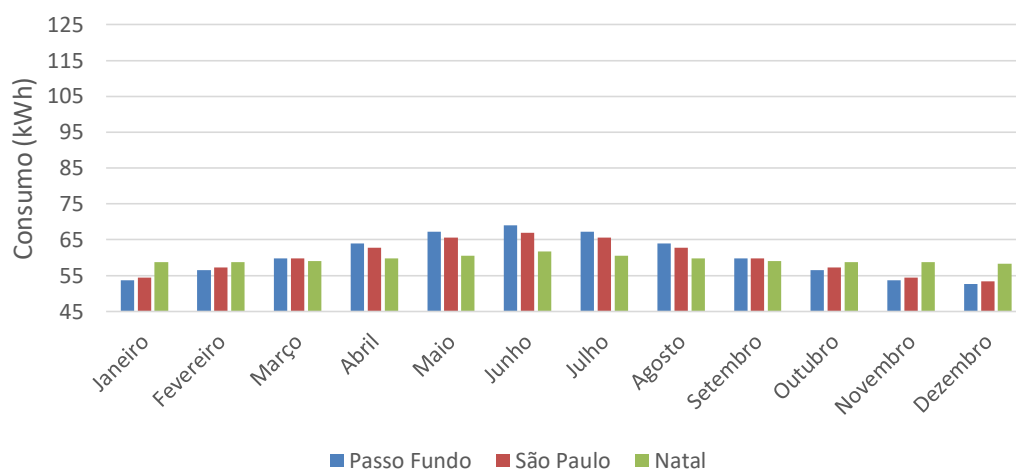


Fonte: Próprio Autor.

Para calcular o consumo de energia diário do sistema dimerizável, separou-se o consumo em quatro etapas, de acionamento durante o anoitecer onde a potência vai de 0 % a 100 %, de consumo noturno onde a potência é 100 %, etapa da madrugada onde a potência é de 75 % durante a 00h00min e 05h00min e de desligamento onde a potência vai de 100 % a 0 %. Ao final, a partir da combinação das quatro etapas encontrou-se o consumo de energia diário e somados todos os dias do mês, encontrou-se o consumo mensal do sistema, ilustradas na Figura 24.

Esta proposta de dimerização na madrugada também foi explorada por Soh *et al.* (2018), onde utilizaram a dimerização durante o período da meia-noite às 4 da manhã, e reduziu-se o consumo de energia, atingindo 37 % de economia por ano ao comparar com a mesma lâmpada sem a dimerização. Também, Khatavkar, Naik e Kadam (2017) em seu estudo utilizam a dimerização diminuindo a potência durante a madrugada, o que resultou em uma economia de mais de 35% da energia elétrica consumida pela iluminação pública.

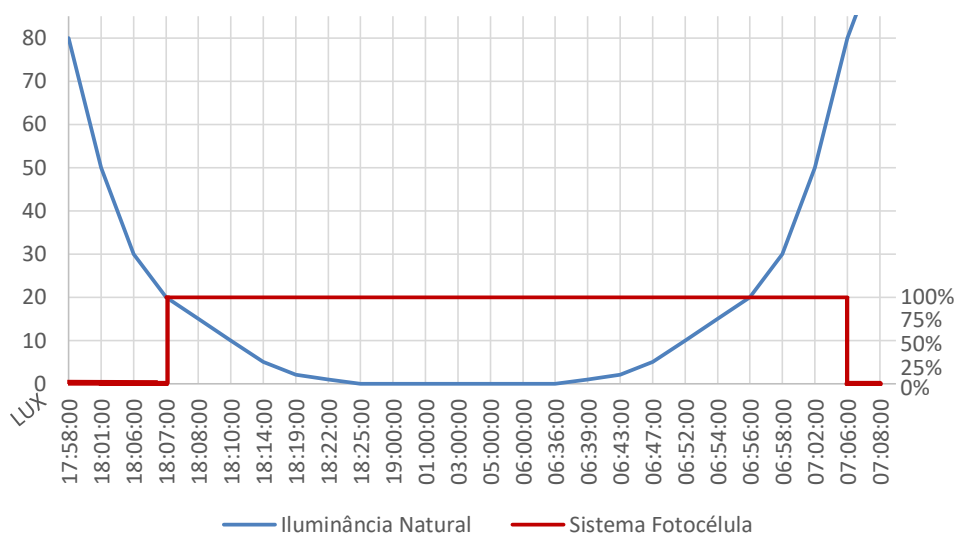
Figura 24: Consumo de energia mensal sistema LED dimerizável.



Fonte: Próprio Autor.

Os sistemas HPS e LED convencional, com acionamento através de fotocélula não aproveitam boa parte da iluminação natural, pois iniciam diretamente com a potência máxima quando a luz natural for menor que 20 lux e desligam a mesma quando a luz natural for maior que 80 lux (EXATRON, 2018; ABNT, 2012). A Figura 25 ilustra graficamente o funcionamento dos sistemas durante uma noite inteira em uma das cidades.

Figura 25: Iluminância dos sistemas com fotocélula (LED e HPS) x iluminância natural.

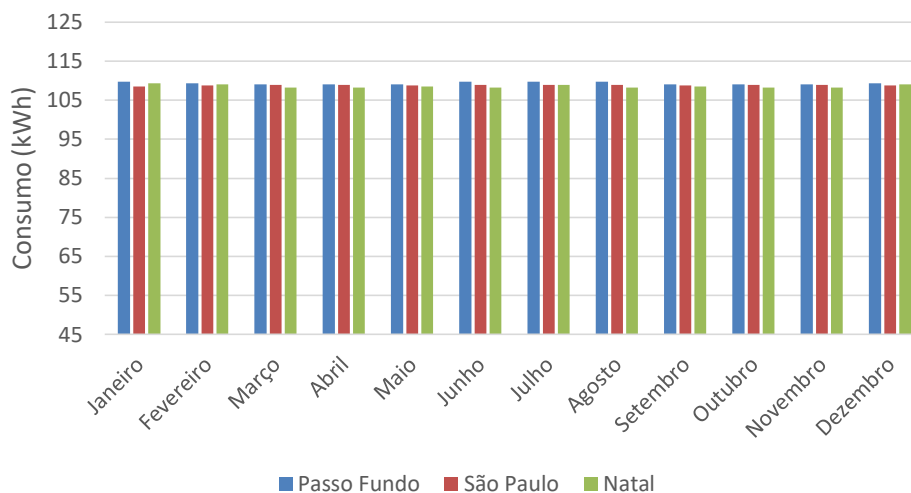


Fonte: Próprio Autor.

Segundo a NBR 5101 (ABNT, 2012), para sistemas acionados por fotocélula, aplica-se de maneira aproximada um total de 11h52min de funcionamento do sistema por dia para o consumo de energia elétrica. Porém, por se tratar apenas de uma aproximação, utilizou-se para encontrar os consumos reais destes sistemas os mesmos gráficos de iluminância natural utilizados para o sistema dimerizável, para as 3 cidades.

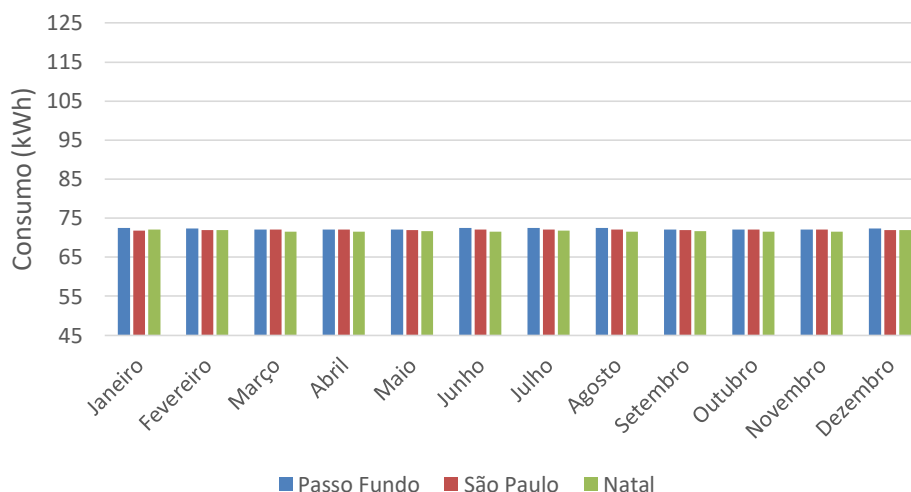
Assim encontrou-se uma média de funcionamento por ano dia, de 13h09min, e por ano, de 4.800h. Com base no período de funcionamento, determinou-se o consumo mensal do sistema HPS e do sistema LED, como é ilustrado o consumo do sistema HPS na Figura 26 e do sistema LED convencional na Figura 27, onde já se encontram somados os consumos do reator e da fotocélula.

Figura 26: Consumo de energia mensal sistema HPS.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 27: Consumo de energia mensal sistema LED.

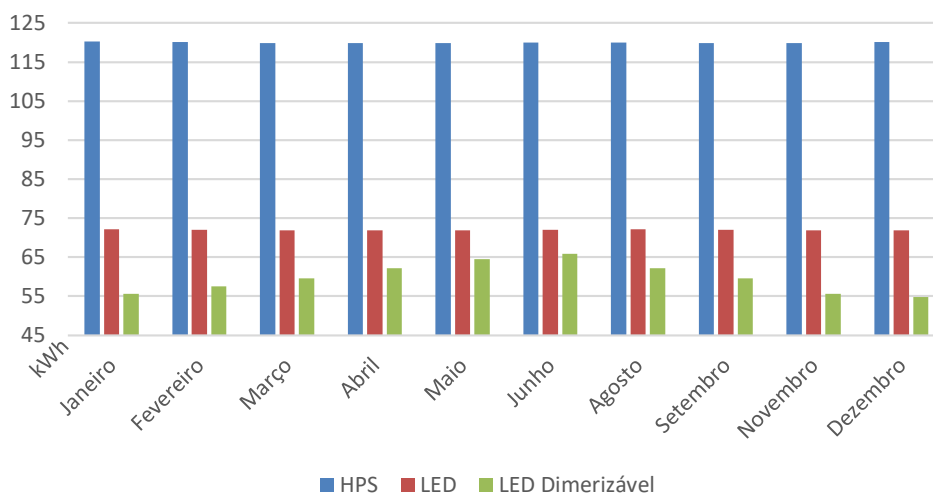


Fonte: Próprio Autor.

Analisou-se, que mesmo sendo regiões e cidades totalmente diferentes geograficamente, não há significativo impacto no funcionamento dos sistemas e consequentemente no consumo de energia. A diferença entre os locais resulta em horários de amanhecer e anoitecer em cada cidade diferentes, iniciando o amanhecer mais cedo uma em relação a outra, porém, o anoitecer também. Em virtude do período de funcionamento dos sistemas não serem muito diferentes entre as cidades, o consumo de energia dos sistemas torna-se semelhante para essas 3 diferentes cidades.

Considerando assim, a média do consumo destas 3 cidades uma média válida para todo o Brasil, esta média é representada na Figura 28, que também mostra graficamente a comparação do consumo médio entre os 3 sistemas.

Figura 28: Consumo de energia médio mensal 3 sistemas.



Fonte: Próprio Autor.

A partir da média nacional de tarifas B4a dos dados 2018-2019 da ANEEL (2018), de tarifas de energia cobradas no Brasil em 2018, de R\$ 0,37 por kWh/mês, calculou-se o gasto anual de cada unidade de luminária com energia no ano de 2018, sendo estes ilustrados no Quadro 13. O gasto acumulado nos 15 anos, onde foi realizada a multiplicação dos custos de 2018 para 15 anos, ilustrados no Quadro 14.

Quadro 13: Custo com energia elétrica acumulado no ano de 2018.

SISTEMA	CONSUMO (kWh)	CUSTO 2018 (R\$)
HPS	1.200,07	444,03
LED	720,03	266,41
LED Dimerizável	597,25	220,98

Fonte: Próprio Autor.

Quadro 14: Custo com energia elétrica acumulado nos 15 anos.

SISTEMA	CONSUMO TOTAL (kWh)	CUSTO TOTAL (R\$)
HPS	18.000,98	6660,39
LED	10.800,38	3996,17
LED Dimerizável	8.958,77	3314,74

Fonte: Próprio Autor.

O custo com consumo de energia elétrica no ano de 2018 é maior para o sistema HPS, devido a maior potência consumida durante a sua operação, além das perdas elétricas no reator. Seguindo, o custo do sistema LED convencional, em relação ao sistema HPS tem uma economia de 40 %. O sistema mais econômico no consumo de energia elétrica é o sistema LED Dimerizável, que economiza aproximadamente 17 % em relação ao sistema LED Convencional e 50 % ao sistema HPS, em virtude da dimerização que utiliza melhor a iluminância natural em relação aos sistemas com acionamento por fotocélula.

A substituição de HPS por LED oferece uma ótima oportunidade para aumentar a eficiência energética. Tetri, Sarvaranta e Syri (2014) estimaram que o consumo de energia da iluminação na Finlândia poderia ser reduzida em 72% em 2030 e em 78% em 2050 se a utilização de iluminação LED fosse assumida. Segundo Lokhande e Markande (2018) os sistemas de controle da iluminação para cidades inteligentes oferece a solução mais simples para economizar energia, e a dimerização da iluminação pode chegar resultar uma economia total de energia de até 65% em contraste com o sistema de iluminação convencional.

Também, estimou-se a emissão de Dióxido de Carbono (CO₂) com a geração de energia primária para consumo dos três conjuntos, através do fator de emissão médios de CO₂ do ano de 2018, que foi de 0,0740 tCO₂/MWh (MCTIC, 2019). A geração de energia para o consumo do sistema HPS, em 15 anos, emite 1,332 toneladas de CO₂, enquanto para o LED emite 0,799 toneladas e para o LED dimerizável 0,663 toneladas, resultando numa diminuição expressiva de emissão de CO₂ quando se utiliza o sistema dimerizável.

4.3.4 Custos com Disposição Final

Para encontrar os custos com a disposição final dos equipamentos do sistema HPS, utilizou-se a ferramenta de Serviços do Painel de Preços, utilizando os mesmos filtros e

descrições de cada item da ferramenta de Serviços. Os custos encontrados para disposição final para este sistema estão dispostos no Quadro 15.

Os custos com disposição final do sistema LED são ilustrados no Quadro 16. Não há custo extra para o descarte do sistema dimerizável, pois ele tem o mesmo destino do driver interno da luminária LED, e este sistema não utiliza relé fotoelétrico, não acumulando este custo, totalizando apenas a mediana de R\$ 13,45 no descarte deste sistema.

Quadro 15: Custos de disposição final sistema HPS.

ITEM	MEDIANA	MÉDIA	BAIXO	ALTO
Descarte Lâmpada HPS	R\$ 2,00	R\$ 2,89	R\$ 0,84	R\$ 7,80
Descarte Reator	R\$ 0,95	R\$ 0,95	R\$ 0,89	R\$ 1,00
Descarte Relé	R\$ 0,95	R\$ 0,95	R\$ 0,89	R\$ 1,00
Total	R\$ 3,90			

Fonte: Próprio Autor.

Quadro 16: Custos de de disposição final sistema LED.

ITEM	MEDIANA	MÉDIA	BAIXO	ALTO
Luminária LED 150 W	R\$ 12,50	R\$ 12,50	R\$ 12,50	R\$ 12,50
Descarte Relé	R\$ 0,95	R\$ 0,95	R\$ 0,89	R\$ 1,00
Total	R\$ 13,45			

Fonte: Próprio Autor.

Estes custos são acumulados cada vez que algum equipamento necessita ser trocado, então o equipamento retirado é enviado para a empresa que fará a reciclagem das partes, o custo do descarte do sistema LED é maior pois existem menos empresas que realizam este serviço no Brasil em relação a reciclagem de lâmpadas HPS. Assim, durante os 15 anos, o sistema HPS acumula custos com descarte e disposição final, nos momentos de manutenção, quando é feita a substituição das partes defeituosas e estas são enviadas para reciclagem.

4.3.5 Custos de Manutenção

Todos os equipamentos de iluminação falham em algum momento, isto é, chegam ao final de sua vida útil. A vida útil nominal de um produto pode ser afetada por seu design,

materiais, seleção de componentes, processo de fabricação e ambiente de uso, entre outros fatores. Determinar qual a vida útil de uma luminária é uma ação complexa, porém, diante de um equipamento sem erros de projeto, com componentes de qualidade, este período torna-se previsível.

A análise leva em conta o período de 15 anos, através dos gráficos exemplificados nas Figuras 23 e 25, onde foram apresentados o funcionamento em horas de cada sistema, sendo para o sistema HPS e LED de 4.800 horas anuais, totalizando 72.000 horas em 15 anos e para o sistema LED Dimerizável, utilizando a área da curva de funcionamento, fica em funcionamento aproximadamente 4.150 horas anuais, totalizando aproximadamente 62.000 horas de funcionamento em 15 anos. Nestes períodos, analisou-se os principais equipamentos de cada sistema, e encontrou-se quando cada sistema necessita de manutenção, somando-se assim custos de manutenção durante a vida útil de cada sistema.

2.5.1.1 Sistema HPS

A mediana dos valores de vida mediana B50 das principais lâmpadas utilizadas no Brasil, de 23 fabricantes cadastrados e com selo Procel, segundo Procel (2018), é de 28.000 horas, ou seja, a cada 28.000 horas é necessária a troca da lâmpada neste ponto de iluminação do sistema HPS. O custo acumulado por este ponto em relação a lâmpada HPS durante os 15 anos, foi de R\$ 82,44. Este valor é o somatório dos custos que compõem o custo de manutenção e é ilustrado no Quadro 17, pois foi estimada a troca da mesma 2 vezes durante a janela de tempo avaliada, acumulando R\$ 41,22 em cada manutenção, uma vez que a mesma fica em funcionamento aproximadamente 4.800 horas por ano.

O reator eletromagnético, segundo a NBR 13593 da ABNT (2011) deve ter a vida média de no mínimo 10 anos, da mesma forma, os principais fabricantes de reatores utilizados no Brasil informam a vida mediana de 50.000 horas (PROCEL, 2018). Ou seja, durante o período de 15 anos, é necessário substituí-lo apenas uma vez. O custo acumulado de manutenção do reator do sistema HPS é mostrado no Quadro 17.

O relé fotoelétrico deve atingir, no mínimo 5.000 ciclos de operação, este número de ciclos de operação, representa aproximadamente 7 anos de vida útil, necessitando assim de duas intervenções de manutenção de R\$ 29,30 cada durante o período de análise. Acumulando então R\$ 58,60, também descrito no Quadro 17, com manutenção do relé

fotoelétrico, este valor, é o mesmo acumulado pelo sistema LED convencional, visto que utiliza o mesmo relé e tem o mesmo número de ciclos de operação.

Quadro 17: Custos de Manutenção do Sistema HPS.

	Lâmpada HPS	Reator	Relé
Aquisição	R\$ 18,84	R\$ 57,11	R\$ 32,98
Instalação	R\$ 59,60	R\$ 24,77	R\$ 23,72
Descarte	R\$ 4,00	R\$ 0,95	R\$ 1,90
TOTAL Manutenção	R\$ 82,44	R\$ 82,83	R\$ 58,60

Fonte: Próprio Autor.

Sendo assim, durante o período de 15 anos, o sistema HPS acumulou o custo total com manutenção de R\$ 223,87. Este valor corresponde a aproximadamente 110 % do custo de aquisição inicial do sistema HPS.

2.5.1.1 Sistema LED

Os valores de vida útil L70 dos principais fabricantes de luminárias LED no Brasil, segundo Procel (2018), é de 70.000 horas, ou seja, a cada 70.000 horas é necessária a troca da luminária neste ponto de iluminação do sistema LED convencional. O custo acumulado por este ponto durante os 15 anos, foi de R\$ 1.178,10, este valor é o somatório dos custos que compõem o custo de manutenção e é ilustrado no Quadro 18.

Quadro 18: Custos de Manutenção do Sistema LED.

	Lâmpada LED	Relé
Aquisição	R\$ 1.062,00	R\$ 32,98
Instalação	R\$ 45,00	R\$ 23,72
Descarte	R\$ 12,50	R\$ 1,90
TOTAL Manutenção	R\$ 1.119,50	R\$ 58,60

Fonte: Próprio Autor.

Este total gasto é devido a necessidade de trocar a luminária em uma ocasião, no decimo quarto ano, acumulando um custo relativamente alto na análise de 15 anos, porém, pelo mesmo motivo o valor residual deste sistema é maior. Porém, corresponde a

aproximadamente 105 % do custo de aquisição inicial de todo sistema LED, mantendo aproximadamente a porcentagem de custo de manutenção que o sistema HPS acumulou.

Segundo Pulugurtha *et al.*(2013), durante um período de 12 anos as luminárias HPS são instaladas e são trocadas três vezes, enquanto as luminárias LED são instaladas e não necessitam de manutenção. Comparando os dois sistemas, HPS e LED, o primeiro necessitou de mais intervenções durante os 15 anos, sendo que a luminária LED precisou da troca somente após 14 anos.

2.5.1.1 Sistema LED Dimerizável

A luminária LED dimerizável utilizada é a mesma do sistema LED convencional, ou seja, a vida útil L70 é de 70.000 horas, e a cada ciclo L70 é necessária a troca da luminária neste ponto de iluminação. Este sistema não acumulou custo em manutenção durante os 15 anos, pois não foi estimada a troca a mesma em nenhuma ocasião, isto porque a luminária não fica com 100 % da sua potência nas mesmas 4.800 horas dos outros dois sistemas.

O sistema LED dimerizável, por sua vez, fica aproximadamente 62.000 horas em funcionamento nos 15 anos, não necessitando de manutenção neste período, neste caso, necessitaria da troca aproximadamente no 17º quando completaria o valor L70 da luminária, de 70.000 horas. Em comparação com o sistema HPS, esse exige a troca num tempo cerca de 290 % maior, e 16 % mais tempo que o sistema LED convencional. Assim como um dos estudos de caso conduzido por Santos (2011), onde os custos com manutenção diminuíram radicalmente, sendo necessárias menos visitas ao local e menos trocas de equipamentos devido a mais de 14 anos de vida útil das luminárias LED.

4.3.6 Valor Residual

O valor residual de cada sistema foi calculado com base no custo de aquisição e o tempo de vida útil remanescente no final do período de 15 anos, estes valores estão apresentados no Quadro 19.

Quadro 19: Valor residual dos 3 sistemas ao final do período.

Sistema	Valor Residual
HPS	R\$ 58,88
LED	R\$ 1.003,31
LED Dimerizável	R\$ 117,58

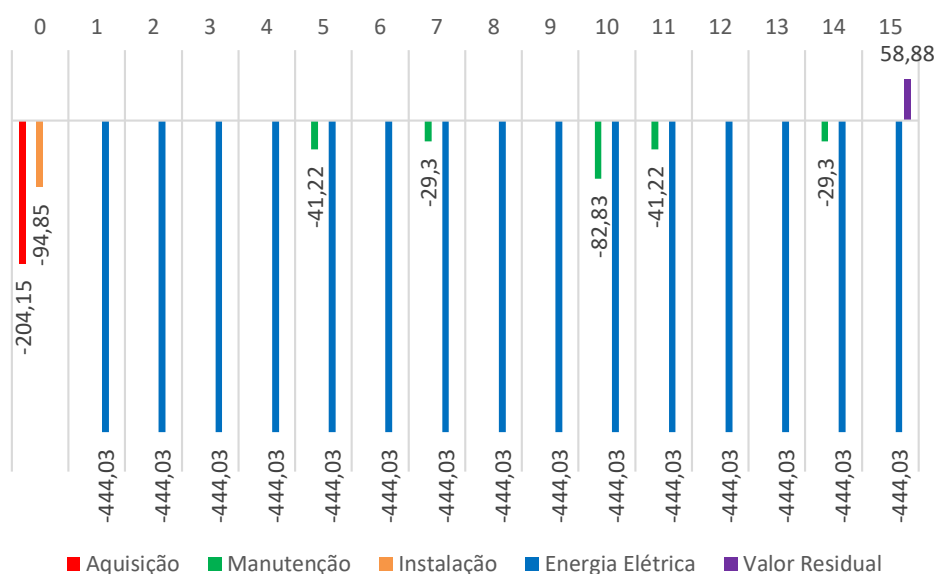
Fonte: Próprio Autor.

No fluxo de caixa, estes valores são positivos, estes valores ao final dos 15 anos da análise, são somados aos outros custos, que são negativos, representando assim o valor de salvamento de cada sistema. O sistema LED convencional teve o custo de manutenção alto pois a luminária foi trocada no 14º ano, e por este motivo tem uma vida útil remanescente e valor residual maiores.

4.4 LCCA e Benefícios do uso da Dimerização de IP

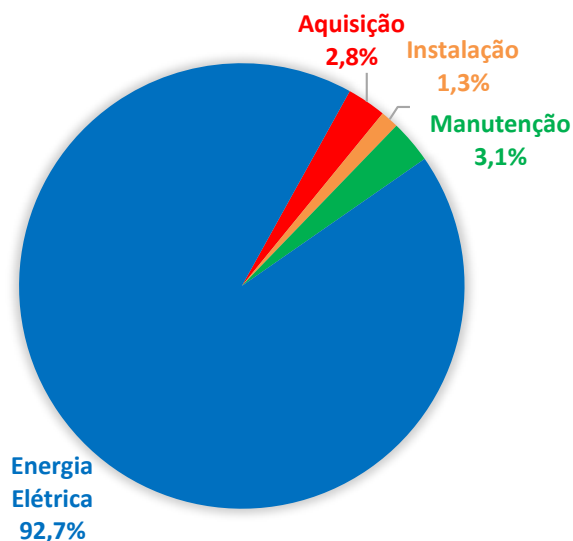
A Figura 29 ilustra o diagrama de fluxo de caixa dos custos acumulados nos 15 anos para os sistemas HPS e a Figura 30 demonstra a composição dos custos deste mesmo sistema. Com isso é possível entender quando ocorrem os gastos deste sistema e quais custos acumulam maior valor durante os 15 anos.

Figura 29: Diagrama de fluxo de caixa sistema HPS.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 30: Composição dos custos do sistema HPS.

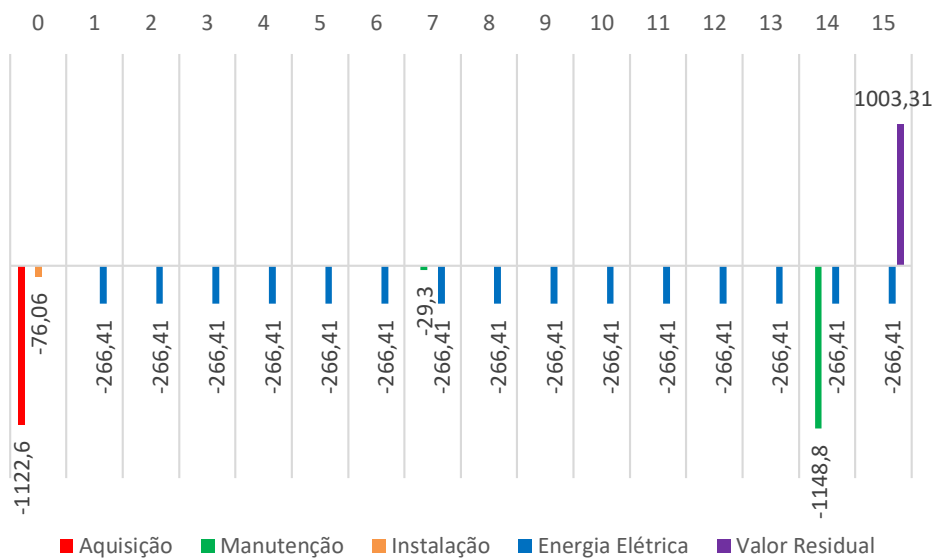


Fonte: Próprio Autor.

Pode-se verificar no fluxo de caixa em quais momentos ocorrem despesas, bem como quais custos estas representam. Os custos com energia elétrica representam 92,7 % do total dos custos nos 15 anos para o sistema HPS. Este sistema possui um custo de aquisição e instalação relativamente baixo, porém, os custos durante a operação são superiores aos iniciais e têm impacto relevante nos custos acumulados. Também é possível verificar que há pelo menos uma intervenção de manutenção a cada 4 anos, representando o segundo maior custo durante os 15 anos para este sistema.

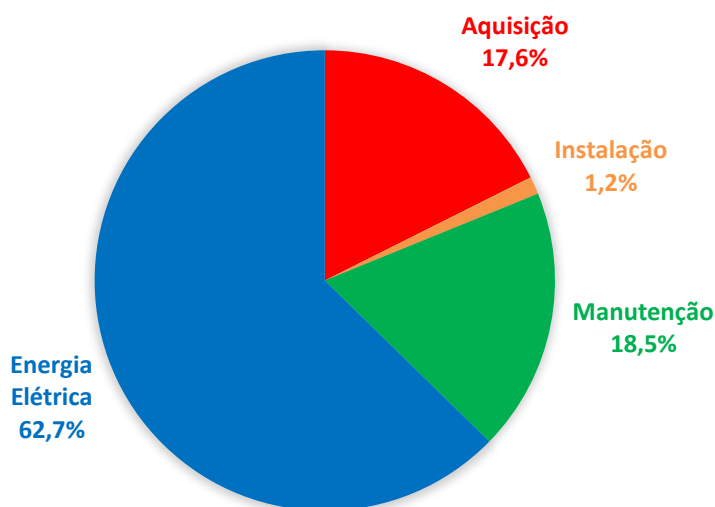
A Figura 31 ilustra o diagrama de fluxo de caixa dos custos acumulados nos 15 anos para os sistemas LED e a Figura 32 demonstra a composição dos custos deste mesmo sistema. Sendo assim, também é possível entender quando ocorrem os gastos deste sistema e quais custos acumulam maior valor ao longo dos 15 anos estudados.

Figura 31: Diagrama de fluxo de caixa sistema LED.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 32: Composição dos custos do sistema LED.



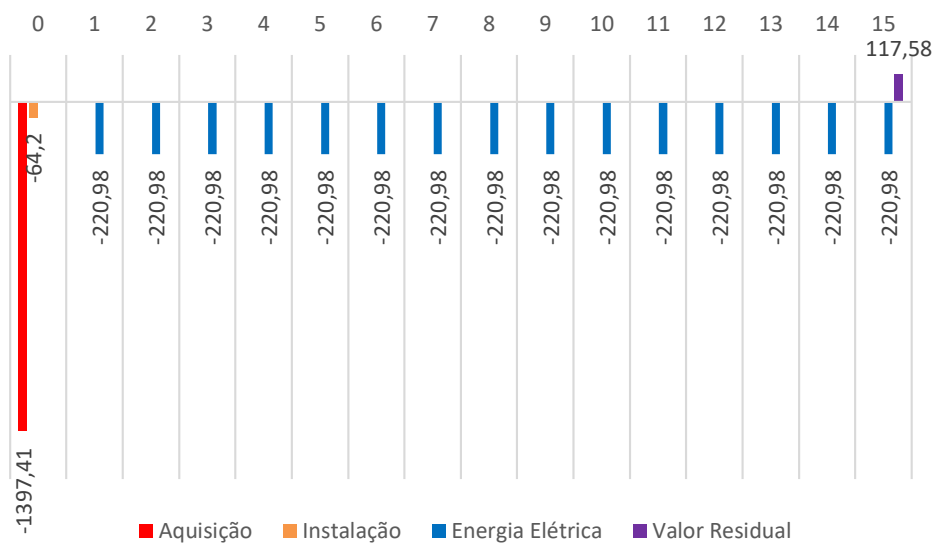
Fonte: Próprio Autor.

Diferente do sistema HPS, os custos destes sistemas são melhor distribuídos, porém o custo com energia elétrica continua sendo o maior, representando 62,7 %. Este sistema possui custo de aquisição superior, que representa 17,6 % do custo total nos 15 anos. Neste sistema, diferente do sistema HPS, foram necessárias apenas três intervenções de manutenção durante o período analisado, a cada 7 anos a substituição do relé fotoelétrico e

a troca da luminárias uma vez. Como o custo para a aquisição da luminária é alto, o custo com manutenção acumula 18,5 % do total, superior ao sistema HPS.

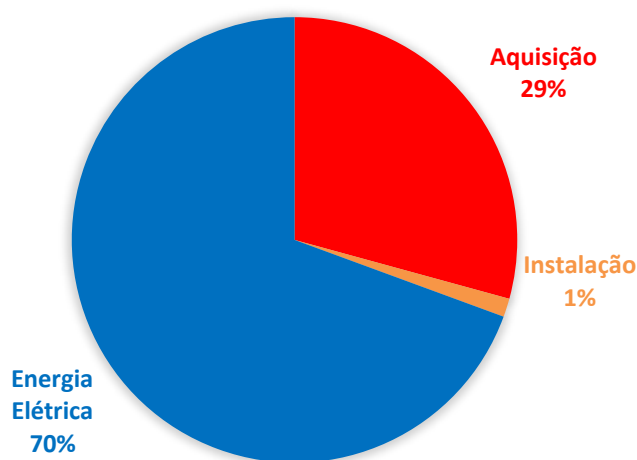
A Figura 33 ilustra o diagrama de fluxo de caixa dos custos acumulados nos 15 anos para os sistemas LED dimerizável e a Figura 34 demonstra a composição dos custos deste mesmo sistema. Sendo assim, também é possível entender quando ocorrem os gastos deste sistema e quais custos acumulam maior valor durante o período de 15 anos considerado.

Figura 33: Diagrama fluxo de caixa sistema LED dimerizável.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 34: Composição dos custos do sistema LED dimerizável.



Fonte: Próprio Autor.

O sistema LED dimerizável acumula valores menores de energia elétrica comparado aos demais, porém, como não acumula custos com manutenção o custo com energia acaba representando uma fatia maior do que para o sistema LED convencional, representando assim 70 % dos custos totais. O segundo maior custo neste sistema é o de aquisição, isto porque além da luminária LED ter um custo alto. Ainda deve ser considerado o sistema de supervisão e controle, responsável pela dimerização.

Como é possível notar pelo diagrama do fluxo de caixa, não há intervenções para manutenção neste sistema, uma vez que através da dimerização foi possível aumentar a vida útil da luminária, possibilitando adiar a troca da mesma. Assim, não há intervenções para troca do relé para acendimento e desligamento, pois este sistema não necessita do mesmo, porque estas funções também são realizadas pelo sistema de controle.

O valor residual do sistema LED convencional é superior aos demais porque a luminária foi trocada próximo ao final do período de análise, e por este motivo tem uma vida útil remanescente maior.

Pode se notar que os custos nos três sistemas analisados durante os 15 anos, ultrapassaram os custos iniciais, comprovando a importância desta análise para a tomada de gestores públicos para a decisão de compra de luminárias para iluminação pública. Também, para todos os sistemas, o custo com energia elétrica ultrapassou os demais custos em 15 anos, evidenciando que toda alternativa visando a eficiência energética é importante, e deve-se preferir utilizar sistemas de iluminação com melhor eficiência luminosa e menor consumo de energia.

O Quadro 20 mostra o custo final acumulado por cada sistema durante os 15 anos da análise contemplando os custos de aquisição, instalação, manutenção e consumo de energia. Também é mostrado o valor residual de cada sistema ao final do período de análise. No Quadro 21 encontra-se o total acumulado, com a taxa de desconto, durante o período para cada um dos sistemas, utilizando a Equação 1, sendo a taxa de desconto de 3 %, determinada pela taxa Selic descontada a inflação, ambas médias de 2018, ou seja, é apresentado o valor presente líquido de cada um dos três sistemas.

A economia anual do sistema LED dimerizável em relação ao sistema HPS é de R\$ 164,37, com o *payback time* de 7,07 anos. Ou seja, o tempo de retorno do investimento da substituição do sistema HPS por LED dimerizável é de 7 anos e 1 mês. Da mesma forma o tempo de retorno do investimento da substituição por LED convencional é de 8,5 anos.

Quadro 20: Custos acumulados pelos 3 sistemas em 15 anos.

Sistema	Aquisição	Instalação	Manutenção	Energia Elétrica	Valor Residual
HPS	R\$ 204,15	R\$ 94,85	R\$ 223,87	R\$ 6660,39	R\$ 58,88
LED	R\$ 1.122,60	R\$ 76,06	R\$ 1.178,10	R\$ 3996,17	R\$ 1.003,31
LED Dimerizável	R\$ 1.397,41	R\$ 64,20	R\$ 0,00	R\$ 3314,74	R\$ 117,58

Fonte: Próprio Autor.

Quadro 21: Valor Presente Líquido dos 3 sistemas.

Sistema	Total
HPS	R\$ 5.732,12
LED	R\$ 4.518,39
LED Dimerizável	R\$ 4.024,21

Fonte: Próprio Autor.

Muitos custos extras dos sistemas, como logística e custos operacionais, frequentemente excedem seus custos de aquisição, por este motivo, segundo Dihhlon (2009), o número de LCCA para determinar a aquisição de equipamentos teve grande crescimento nos últimos anos. Muitos estudos indicam que os custos como o de operação e manutenção ao longo do tempo de vida de um equipamento podem variar de 10 a 100 vezes seus custos de aquisição (RYAN, 1968).

O uso de luminárias LED resultará em economias significativas no consumo de energia e nos custos totais relacionados à iluminação (GIBBONS, LI E MEYER, 2015; YOOMAK *et al.*, 2018). Assim como relata Mutmanky e colaboradores (2010) em seu projeto, na cidade de San Diego, CA, as tecnologias de iluminação pública, usando fontes de LED, podem proporcionar economia de energia de mais de 40 % sem comprometer as características mínimas de luz exigidas. Também, no trabalho desenvolvido por Swanson e Carlson (2012), todas as luminárias LED avaliadas tinham um consumo de energia cerca de 50 % a 80 % menor do que as luminárias HPS.

Encontrou-se, da mesma forma como descrito no Guia de Eficiência Energética em Instalações de Iluminação Pública, *Intelligent Energy Europe* (2007), substituindo apenas as luminárias HPS por LED, teve-se entre 40 a 50 % de redução de energia. Ao implementar luminárias com inteligência incorporada, a redução de energia alcançada foi de até 70 %, assim como no estudo de Leccese e Leonowicz (2012), que obtiveram entre 66 e 71 % de economia de energia com um sistema de dimerização.

O sistema que tem o menor custo acumulado durante os 15 anos é o sistema LED dimerizável, com uma economia de 11 % em relação ao sistema LED convencional e 30 % em comparação com o sistema HPS, mesmo tendo o maior custo de aquisição dos três sistemas. O Quadro 22 ilustra as principais características encontradas comparando os três sistemas, indicando o melhor e o pior para cada característica.

Quadro 22: Comparativo entre os 3 sistemas.

	HPS	LED	LED Dimerizável
Custo Inicial (Aquisição + Instalação)	R\$ 299,00 ✓	R\$ 1.198,66	R\$ 1.461,61 ✗
Custo Acumulado em 15 Anos - VPL	R\$ 5.732,12 ✗	R\$ 4.518,39	R\$ 4.024,21 ✓
Consumo de Energia em 15 Anos	18.000,98 kWh ✗	10.800,38 kWh	8.958,77 kWh ✓
Emissão de CO2 em 15 Anos	1,332 tCO2 ✗	0,799 tCO2	0,663 tCO2 ✓
Vida Útil Mediana	28.000 h ✗	70.000 h ✓	70.000 h ✓
Primeira Troca da Luminária	5 anos ✗	14 anos	17 anos ✓
Intervenções de Manutenção em 15 Anos	5 ✗	3	0 ✓
Monitoramento Tempo Real	Não ✗	Não ✗	Sim ✓
Controle da Iluminação	Não ✗	Não ✗	Sim ✓
Iluminância Média na Área Simulada	15 lux ✗	20 lux ✓	20 lux ✓

Fonte: Próprio Autor.

A maior parte da economia dos sistemas LEDs em relação ao HPS está no custo com energia elétrica durante o tempo da análise, isto devido à redução da potência, mantendo ou melhorando o nível de iluminação. A redução dos gastos com energia elétrica chegou a 40 % na substituição do sistema HPS por LED sem dimerização e 50 % comparando os sistemas LED dimerizável e HPS, e entre os sistemas LEDs, o sistema dimerizável gasta 17 % menos com energia em relação ao convencional. Assim como no sistema proposto por Byun e colaboradores (2013), onde a adição de um sistema de controle de intensidade luminosa a luminárias LED reduziu o consumo de energia elétrica em aproximadamente 21,9 %.

No projeto de IP na Suécia, do Centro Regional de Energia do Mar Negro (2007), foi instalado um sistema inteligente de iluminação de cerca de 1800 luminárias. O cenário para escurecimento em condições normais foi baseado na hora e data para controlar a luz on-off, e obteve uma economia geral de energia elétrica de cerca de 50 % comparada com o sistema antigo.

A dimerização pode ser controlada de diversas formas, pelo tráfego de pedestres e carros, pela intensidade da luz do dia, tempo, condições climáticas, entre outros. Também existem sistemas de dimerização que unem diversos controles. Os sistemas que contêm sensores que dimerizam a iluminação conforme detecção do movimento de pedestres e automóveis, podem apresentar economia de energia de 30 % a 60 % (ABDULLAH *et al.*, 2018; ABDULLAH *et al.*, 2019; KHADE *et al.*, 2017; KUUSIK, VARJAS E ROSIN, 2016; MARINO, LECCESE E PIZZUTI, 2017; ZOTOS *et al.*, 2012)

Assim como estes sistemas, os sistemas que controlam a dimerização utilizando a iluminância diária, tal como o sistema proposto neste trabalho, oferecem a solução mais simples para economizar energia e também podem alcançar a economia de energia de 30 % a 60 % (DJURETIC E KOSTIC, 2018; LOKHAND E MARKANDE, 2018; SOH *et al.*, 2018; VIANI *et al.*, 2016).

No sistema proposto por Magno *et al.* (2015), que conta com a união dos sensores de iluminância e detecção de movimento, reduziu o consumo de energia entre 55 % e 69 %. Também, no projeto piloto desenvolvido por Matos *et al.* (2016), contando com dois tipos de sensores, de movimento e de luminosidade, além da dimerização do amanhecer e anoitecer, o sistema teve o nível de iluminância diminuído a meia noite e reestabelecido as 6h00min, possibilitando uma redução de 50 % do consumo de energia.

O sistema dimerizável também se destaca em economia no custo de manutenção, sendo que durante os 15 anos desta análise não foi necessária substituição de componentes do sistema, ou seja, este sistema demora muito mais para demandar reparos quando comparado com os demais sistemas analisados.

Como visto, utilizando sistemas de iluminação LED inteligentes, empregando o uso de dimerização, pode-se reduzir ambos os custos com manutenção e consumo de energia elétrica a níveis em que se proporcione economias significativas durante o ciclo de vida em sistemas dimerizáveis, tanto comparando com sistemas convencionais de LED quanto, principalmente, comparando com sistemas HPS.

São grandes os benefícios da utilização da iluminação LED nas vias públicas, seja pela maior vida útil, pela qualidade da iluminação, com alto índice de reprodução de cores ou pela possibilidade de dimerização. Estas características apresentam benefícios, não só econômicos, mas ambientais e sociais.

Indiretamente, a economia gerada pela utilização do sistema LED dimerizável em 15 anos, pode permitir que os municípios expandam a iluminação pública com esta tecnologia

para áreas adicionais, aumentando o acesso à iluminação melhorada em todas as áreas da cidade. Ainda, esta economia pode ser destinada a outros programas dos governos para melhoria da qualidade de vida da população (USAID e BEE, 2010).

Além de possibilitar os mesmos resultados que o LED convencional, o sistema dimerizável inclui a ferramenta de monitoramento remoto de cada ponto de iluminação. Assim sendo, tem-se a situação real de cada luminária, reduzindo o tempo de identificação e solução de problemas, deixando o ponto defeituoso o menor tempo possível sem iluminação, trazendo maior confiabilidade no sistema de IP. Além disso, benefícios sociais, como a melhora da sensação de segurança e a diminuição de acidentes podem ser alcançados, visto que locais escuros nas vias públicas diminuem a segurança tanto do trânsito quanto dos pedestres e dificultam o trabalho policial (GOVERNO DE SÃO PAULO, 2013; SCHULZ NETO, 2010).

O monitoramento remoto e a detecção automática de problemas tornam o trabalho dos supervisores de manutenção e dos membros das instalações mais eficaz, reduzindo o número de reparos e eliminando a necessidade das equipes procurarem os pontos com problemas ou aguardar receber chamados de reclamação da população. Essa detecção automática também significará uma confiabilidade maior do sistema de iluminação pública, traduzindo-se no conforto, satisfação e segurança das pessoas que a utilizam (INTEL CORPORATION, 2017; SHAHIDEHPOUR *et al.*, 2015).

A iluminação pública é uma área fundamental para aplicação de eficiência energética, cujos benefícios obtidos pela utilização de LEDs vão além da redução dos custos econômicos, mas incluem também a extinção de tecnologias nocivas ao meio ambiente e redução de emissões de gases de efeito estufa (EPEC, 2013; LI-JUN, ZI-ZHENG E FENG, 2011).

O efeito de corte nas emissões de dióxido de carbono pode ser muito importante na medida em que a iluminação LED reduz a demanda de energia primária (ABDULLAH *et al.*, 2018; CIRIMINNA *et al.*, 2015; TETRI, SARVARANTA E SYRI, 2014). Comprovou-se que o uso de luminárias com dimerização possibilita reduzir a emissão de cerca de 0,7 toneladas de CO₂ por luminária em 15 anos na geração de energia em detrimento das lâmpadas HPS. Também diminui-se a poluição luminosa, visto que os sistemas LEDs emitem a luz direcionada ao solo, ao contrário das luminárias do sistema HPS (DA SILVA E LUSTOSA, 2006; PATTISON, HANSEN E TSAO, 2018; SCHULZ NETO, 2010).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo geral deste trabalho foi alcançado, onde foi possível comparar três tecnologias aplicadas a iluminação pública no Brasil utilizando a análise do custo do ciclo de vida. Foi possível identificar os benefícios de investir em eficiência energética, substituindo tecnologias ultrapassadas por novas tecnologias de iluminação pública, que contam com sistemas inteligentes de monitoramento, gestão, controle e dimerização.

Como exemplo o sistema LED dimerizável, que consta com uma luminária LED com um sistema internamente instalado responsável por acionar e desligar a luminária e dimerizar a luminosidade da mesma. Este trabalho contribui para auxiliar em tomadas de decisões focadas na economia de recursos e na eficiência energética de sistemas de iluminação pública.

Foi desenvolvido um padrão de dimerização para a luminária LED, bem como foi identificado o período que cada sistema permanece ativo durante o dia, além da quantidade de energia consumida. Assim, foi possível atingir o primeiro objetivo específico e entender os custos com energia elétrica dos três sistemas, HPS, LED e LED dimerizável, e compreender o quanto o sistema inteligente de dimerização pode gerar de economia, tanto com o consumo de energia quanto com o aumento da vida útil da luminária, visto que este é capaz de considerar a iluminação natural desprezada por sistemas convencionais acionados por fotocélulas.

O segundo objetivo específico era simular, através de software luminotécnico, as três tecnologias de iluminação, para embasar as análises realizadas neste trabalho, visto que para comparar as economias geradas os três sistemas não poderiam possuir grandes diferenças em termos luminotécnicos. A simulação luminotécnica dos sistemas visa assegurar que a substituição das lâmpadas de vapor de sódio por luminárias LED mantenha a iluminação dentro dos padrões normativos e com características luminotécnicas similares. Desta forma foi possível definir que uma luminária LED de 150 W de potência, com as demais características conforme as apresentadas no modelo utilizado no estudo, pode substituir uma luminária com lâmpada HPS de 250 W de potência e manter as características técnicas de iluminação.

Quanto ao objetivo de levantar os custos totais dos sistemas HPS, LED e LED dimerizável durante o período de 15 anos e realizar uma análise destes custos, foi possível através da ferramenta Painel de Preços do Ministério do Planejamento, onde constam todos

preços pagos por itens em licitações públicas do Brasil. Através desta ferramenta foi possível conhecer os custos de aquisição, instalação, manutenção e disposição final de cada item de cada uma das três tecnologias.

A análise econômica foi limitada aos custos mais expressivos durante o período da análise, porém, através dos quais foi possível encontrar os benefícios do uso da dimerização na iluminação pública LED. Entretanto, não somente os benefícios econômicos foram medidos, mas também foram identificados benefícios ambientais e sociais ligados ao uso do sistema LED dimerizável, sendo que estes são de vital importância para tomadas de decisões relativas à implantação de sistemas de monitoramento e controle dos equipamentos de iluminação pública.

Ressaltam-se os benefícios encontrados, respondendo o problema da pesquisa, sendo que a substituição de sistemas HPS por sistemas LED dimerizáveis tem o retorno de investimento de 7,07 anos, tem menor custo acumulado nos 15 anos analisados, mesmo tendo custo de aquisição 7 vezes maior, principalmente em manutenção e consumo de energia, com 50 % de economia de energia elétrica e menor emissão de CO₂. Oferece melhorias na iluminação, com mais qualidade e uniformidade utilizando uma potência elétrica menor, além de contar com um sistema inteligente de detecção de defeitos.

Assim sendo, a utilização de dimerização de luminárias LED resulta em diversos benefícios, não somente econômicos, mas também ambientais e sociais. A eficiência energética neste setor é de suma importância, e a substituição de tecnologias ultrapassadas em IP, mesmo que possua um custo inicial elevado, no decorrer do tempo acumula menos custos. Assim, espera-se que os resultados deste estudo auxiliem a tomada de decisão financeira e orçamentária na implementação de investimentos em projetos de iluminação pública inteligente e de eficiência energética.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDULLAH, A. *et al.* **Energy efficient smart street light for smart city using sensors and controller.** Bulletin of Electrical Engineering and Informatics, v. 8, n. 2, p. 558-568, 2019.
- ABDULLAH, A. *et al.* **Smart street light using intensity controller.** 2018 7th International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE). IEEE, 2018. p. 1-5.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Plano de dados abertos 2018-2019.** 2018. Disponível em: < <http://www.aneel.gov.br/dados>>. Acesso em: 15 ago. 2018.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Resolução Nº 414/2010.** Estabelece as Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica de forma atualizada e consolidada. Brasília, 2010, 195p. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2010414.pdf>>. Acesso em: 28 set. 2017.
- ALLIANCE FOR SOLID-STATE ILLUMINATION SYSTEMS AND TECHNOLOGIES - ASSIST. **ASSIST recommends: LED Life for General Lighting.** Vol. 1, Iss. 7. Troy, N.Y.: Lighting Research Center, 2007.
- ASIEDU, Y; GU, P. **Product life cycle cost analysis: state of the art review.** International journal of production research, v. 36, n. 4, p. 883-908, 1998.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **NBR 13593:** Reator e ignitor para lâmpada a vapor de sódio a alta pressão - Especificação e ensaios. Rio de Janeiro, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **NBR 5101:** Iluminação Pública - Procedimento. Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **NBR 5123:** Relé fotocontrolador intercambiável e tomada para iluminação - Especificação e ensaios. Rio de Janeiro, 2016.
- ATTIA, H. A.; OMAR, A.; TAKRURI, M. **Design of decentralized street LED light dimming system.** 2016. 5th International Conference on Electronic Devices, Systems and Applications (ICEDSA).
- BARDSLEY, N. *et al.* **Manufacturing roadmap: solid-state lighting research and development.** US Department of Energy, 2014.
- BECALLI, M. *et al.* **Improvement of energy efficiency and quality of street lighting in South Italy as an action of Sustainable Energy Action Plans.** The case study of Comiso (RG). Energy, 2015.
- BENEKOHAL, R. F.; GREGERSON, C.; MEDINA, J. **LED Street Lighting Evaluation—Phase II: Led Specification and Life-Cycle Cost Analysis.** Illinois Center for Transportation/Illinois Department of Transportation, 2015.

- BOMMEL, W. **Road lighting: fundamentals, technology and application**. 2015.
- BOUBEKRI, M. **Life cycle cost analysis of building re-lamping alternatives**. Journal of Renewable and Sustainable Energy, v. 4, n. 2, p. 023119, 2012.
- BRASIL. **Constituição**. Constituição da República Federativa do Brasil. Brasília, DF: Senado Federal: Centro Gráfico, 1988.
- BOYCE, P.; FOTIOS, S.; RICHARDS, M. **Road lighting and energy saving**. Lighting Research & Technology, 41(3), 245–260. 2019.
- BYUN, J. *et al.* **Intelligent household LED lighting system considering energy efficiency and user satisfaction**. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 59(1), 70–76. 2013.
- CARLOS, J. C. Jr. **Assessing the economic and environmental impacts associated with currently available street lighting technologies**. 2010. Tese de Doutorado. Air Force Institute of Technology. Air Force Base, Ohio.
- CENTRO DE ENERGIA REGIONAL DO MAR NEGRO. **Intelligent Road and Street lighting in Europe**. 2007. Sofia (Bulgaria). Disponível em: <<https://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/en/projects/e-street>> Acesso em: 10 jan. de 2019.
- CHEN, Y.; LIU, Z **Distributed intelligent city street lamp monitoring and control system based on wireless communication chip nRF401**. 2009 International Conference on Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing. IEEE, 2009. p. 278-281.
- CIRIMINNA, R. *et al.* **LED street lighting: a looking ahead perspective**. Green, v. 5, n. 1-6, p. 83-94, 2015.
- COOK T.; SHACKELFORD J.; PANG T. **LED Street Lighting**: San Francisco, CA. San Francisco, CA: Pacific Gas and Electric. 2008.
- COOK T.; SOMMER A.; PANG T. **LED Street Lighting**: Oakland, CA. San Francisco, CA: Pacific Gas and Electric. 2008.
- COSTA, H. **Plataforma inteligente para sistemas de iluminação pública**. 2013. Dissertação de Mestrado. Universidade de Aveiro.
- DA SILVA, L. L. F.; LUSTOSA, L. **Iluminação Pública no Brasil: Aspectos energéticos e institucionais**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.
- DHILLON, B. S. **Life cycle costing for engineers**. CRC Press, 2009.
- DJURETIC, A.; KOSTIC, M. **Actual energy savings when replacing high-pressure sodium with LED luminaires in street lighting**. 2018. Energy, v. 157, p. 367-378.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2016**. Ano base 2015. Ministério de Minas e Energia: 2016. Disponível em: <

<http://www.epe.gov.br/AnuarioEstatisticodeEnergiaEletrica/Anu%C3%A1rio%20Estat%C3%ADstico%20de%20Energia%20El%C3%A9trica%202016.pdf>>. Acesso em: 5 out. 2017.

EUROPEAN COMMISSION. **Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions.** Next steps for a sustainable European future. European action for sustainability. COM, 739 Final, pp. 19, 2016.

EUROPEAN PPP EXPERTISE CENTRE - EPEC. **Energy Efficient Street Lighting.** 2013 Disponível em: <<http://www.eib.org/epec/ee/documents/factsheet-street-lighting.pdf>>. Acesso em: 8 out. 2017.

EXATRON. **Relé Fotocélula Tri-Fácil 220 V.** Disponível em: <<http://www.exatron.com.br/produtos/rele-fotocelula-tri-facil-220-v>> Acesso em 15 mai. 2018.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION - FHWA. **Life-cycle cost analysis primer.** Office of Asset Management, FHWA, US Department of Transportation, 2002.

FULLER, S. K.; PETERSEN, S. R. **Life-Cycle Costing Manual for the Federal Energy Management Program.** National Institute of Standards and Technology Building and Fire Research Laboratory. NIST Handbook 135. Office of Applied Economics. Gaithersburg, MD, 1995.

GIBBONS, R. B.; LI, Y.; MEYER, J. E. **The Assessment of the Performance of Lighting-Emitting Diode Roadway Lighting Technology.** Research report, Virginia Tech Transportation Institute. Virginia, 2015.

GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Iluminação Pública: Guia do Gestor.** São Paulo, 2013. Disponível em: <<http://www.energia.sp.gov.br/a2sitebox/arquivos/documentos/519.pdf>>. Acesso em 25 set. 2017.

HENDERSON R. L. **LED Street Lighting Test Project Report.** Raleigh, NC: Progress Energy Carolinas. 2009.

IDEAL. **Reator De Descarga Vapor Sódio Padrão Ence.** Disponível em: <<https://www.iluminacaoideal.com.br/reator-sodio>>. Acesso em 15 mai. 2018.

ILUMATIC. **Luminária Pública Maestra até 240 W.** Disponível em: <http://www.ilumatic.com.br/infotecnicas/Luminaria-LED-Maestra_8.pdf>. Acesso em 15 mai. 2018.

INTEL CORPORATION, **Smart Street Lights for Brighter Savings and Opportunities.** vol. 1, no. 1, pp. 1–4, 2017. Disponível em: <<https://www.intel.com/content/dam/www/public/us/en/documents/solution-briefs/smart-street-lights-for-brighter-savings-solutionbrief.pdf>>. Acesso em: 15 mai. 2019

INTELLIGENT ENERGY EUROPE. **Guide for energy efficient street lighting installations.** European Commission-Executive Agency for Competitiveness & Innovation (EACI), 2007.

- JING, C.; SHU, D.; GU, D. **Design of streetlight monitoring and control system based on wireless sensor networks.** 2007 2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. IEEE, 2007. p. 57-62.
- KE, Z.; XIAO, C. **Research of Intelligent Street Light System Based on ZigBee.** 2016 International Conference on Industrial Informatics - Computing Technology, Intelligent Technology, Industrial Information Integration (ICIICII).
- KHADE, D. R. *et al.* **Intensity controller of LED street lights.** 2017 International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT).
- KHATAVKAR, N.; NAIK, A. A.; KADAM, B. **Energy efficient street light controller for smart cities.** 2017 International conference on Microelectronic Devices, Circuits and Systems (ICMDCS). IEEE, 2017. p. 1-6.
- KIM, J. T.; HWANG, T. **Feasibility Study on LED Street Lighting with Smart Dimming Systems in Wooi Stream, Seoul.** Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 16(2), 425–430. 2017.
- KINZEY, B. R.; MYER, M. **Demonstration Assessment of Light-Emitting Diode (LED) Roadway Lighting on Lija Loop in Portland, OR.** Pacific Northwest National Lab., 2009.
- KUUSIK, M.; VARJAS, T.; ROSIN, A. **Case study of smart city lighting system with motion detector and remote control.** 2016 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON)
- LAKSHMI, O. V.; NAIK, B. N.; RAJEYYAGIRI, S. **The development of road lighting intelligent control system based on wireless network control.** International Journal of Science and Applied Information Technology, p. 113-116, 2012.
- LAVRIC, A. *et al.* **A performance study of ZigBee wireless sensors network topologies for street lighting control systems.** 2012 International Conference on Selected Topics in Mobile and Wireless Networking. IEEE, 2012. p. 130-133.
- LECCESE, F.; LEONOWICZ, Z. **Intelligent wireless street lighting system.** 2012 11th International Conference on Environment and Electrical Engineering.
- LEE, J. D. *et al.* **Development of Zigbee based Street Light Control System.** 2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition.
- LI-JUN Q.; ZI-ZHENG, S.; FENG, J. **Intelligent streetlight energy-saving system based on LonWorks power line communication technology.** 2011 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT).
- LIAN, L.; LI, L. **Wireless dimming system for LED Street lamp based on ZigBee and GPRS.** 2012 3rd International Conference on System Science, Engineering Design and Manufacturing

LOKHANDE, H. N.; MARKANDE, S. D. **Adaptive Street Light Controlling For Smart Cities**. International Journal of Applied Engineering Research, v. 13, n. 10, p. 7719-7723, 2018.

LUMILEDS, P. **Technology White Paper: Understanding power LED lifetime analysis**.

Disponível em:

<http://www.climateactionprogramme.org/images/uploads/documents/Philips_Understanding_Power-LED-Lifetime-Analysis.pdf> Philips, 2007. Acesso em 25 jan. 2019.

MAGNO, M. *et al.* **A Low Cost, Highly Scalable Wireless Sensor Network Solution to Achieve Smart LED Light Control for Green Buildings**. 2015. IEEE Sensors Journal, 15(5), 2963–2973.

MARINO, F.; LECCESE, F.; PIZZUTI, S. **Adaptive street lighting predictive control**. 2017. Energy Procedia, v. 111, p. 790-799.

MATOS, R., *et al.* **Smart led lighting systems implementation in Lisbon metropolitan área**. 2016 CIRED Workshop.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES – MCTIC. **Fator médio: Inventários corporativos**. 2019. Disponível em:

<https://www.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/textogeral/emissao_corporativos.html>. Acesso em 15 abr. 2019

MUTMANSKY, M. *et al.* **Advanced Street Lighting Technologies Assessment Project: City of San Diego**. Clanton and Associates, Inc., Boulder, Colo, 2010.

OLIVO. **Luminárias Públicas Abertas: LP301 - LP303**. Disponível em:

<<http://www.olivosa.com.br/pt-br/produto/iluminacao-publica/luminarias-publicas-abertas/lp301-lp303-129>>. Acesso em 25 out. 2017.

PATTISON, P. M.; HANSEN, M.; TSAO, J. Y. **LED lighting efficacy: status and directions**. Comptes Rendus Physique, 19(3), 134-145, 2018.

PERERA, O.; MORTON, B.; PERFREMENT, T. **Life Cycle Costing: A Question of Value: a White Paper from IISD**. International institute for sustainable development, 2009.

PHILIPS. **SON-T 250W E E40 1SL**. 2017. Disponível em:

<<http://www.lighting.philips.com.br/prof/lampadas-e-tubos-convencionais/>>. Acesso em 15 mai. 2018.

PINTO, M. F. *et al.* **Sistema inteligente para monitoração, gerenciamento e controle de iluminação pública e análise de parâmetros da rede elétrica**. 2015. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Juiz de Fora UFJF.

PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA – PROCEL. **Resultados PROCEL**. 2017, ano base 2016. Disponível em:

<http://www.procelinfo.com.br/resultadosprocel2017/docs/rel_procel2017_web.pdf>. Acesso em 15 set. 2017.

PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA – PROCEL. **EQUIPAMENTOS SELO PROCEL**. 2018. Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View=%7BB70B5A3C-19EF-499D-B7BC-D6FF3BABE5FA%7D>>. Acesso em 08 fev. 2019.

PULUGURTHA, S. S. *et al.* **NC roadway lighting needs assessment, maintenance prioritization tool and performance measures**. North Carolina. Dept. of Transportation. Research and Analysis Group, 2013.

RYAN, W. J. **Procurement views of life cycle costing**. Proceedings of the Annual Symposium on Reliability. 1968.

RODRIGUES, P. **Manual de iluminação eficiente**. Procel – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. 1ª. Edição. Julho, 2002.

ROGÉRIO, D. M. P. **Manual do Painel de Preços**. Ministério Do Planejamento, Desenvolvimento E Gestão (MP). V. 1.2. 2018.

ROSITO, L. H. **Desenvolvimento da Iluminação Pública no Brasil**. Revista O Setor, 2009. Disponível em: <https://www.fne.org.br/upload/documentos/projetos/iluminacao-publica/desenvolvimento_i_p_no_brasil_-_luciano_haas_rosito.pdf>. Acesso em 22 set. 2017.

SÁ, N. J. O. **Comunicação em sistemas de iluminação pública inteligentes**. 2011. Dissertação de Mestrado. Universidade de Aveiro.

SALVIA, A. L., **Eficiência Energética Em Iluminação Pública Na Gestão Sustentável De Cidades: Estudo De Multicasos**. 2016. Universidade de Passo Fundo Faculdade de Engenharia e Arquitetura Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. 2016.

SANTANA, R. M. B. **Iluminação Pública: Uma Abordagem Gerencial**. 2010. 94 f. Dissertação (Mestrado em Regulação da Indústria de Energia) – Universidade Salvador Unifacs, Salvador, 2010.

SANTOS, C. R. A. **Iluminação Pública e Sustentabilidade Energética**. 2011. Dissertação (Mestrado Interligado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 2011.

SCHULZ NETO, W. **Iluminação Pública**. Série de Cadernos Técnicos da Agenda Parlamentar. CREA-PR, 2010. Disponível em: <<https://creajrpr.files.wordpress.com/2010/11/iluminac3a7c3a3o-pc3bablica.pdf>>. Acesso em: 03 out. 2017.

SHAHIDEHPOUR, M. *et al.* **Streetlights are getting smarter: Integrating an intelligent communications and control system to the current infrastructure**. IEEE Power and energy magazine, v. 13, n. 3, p. 67-80, 2015.

SOH, C. B. *et al.* **Intelligent Street Lighting for Smart Cities**. 2018 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT).

STOKER, P. et al. **Pedestrian safety and the built environment: a review of the risk factors.** *Journal of Planning Literature*, v. 30, n. 4, p. 377-392, 2015.

SWANSON, G.; CARLSON, C. **Cost-benefit Analysis of Energy Efficient Technologies Available for Use in Roadway Lighting.** Minnesota Department of Commerce-Division of Energy Resources, Chanhassen, MN, 2012.

TÄHKÄMÖ, L. *et al.* **Life cycle cost analysis of three renewed street lighting installations in Finland.** *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 17, n. 2, p. 154-164, 2012.

TÄHKÄMÖ, L.; HALONEN, L. **Life cycle assessment of road lighting luminaires: Comparison of light-emitting diode and high-pressure sodium technologies.** *Journal of Cleaner Production*, 93, 234–242, 2015.

TETRI E.; SARVARANTA A.; SYRI S. **Potential of new lighting technologies in reducing household lighting energy use and CO 2 emissions in Finland.** *Energy Efficiency*, v. 7, n. 4, p. 559-570, 2014.

THOMAS, L.; MARKUS, R. **Reliability and lifetime of LEDs.** Application Note No. AN006. Osram, 2018. Disponível em: <https://media.osram.info/im/img/osram-dam-2496614//AN006_Reliability_and_Lifetime_of_LEDs.pdf>. Acesso em 20 jan. 2019.

TOUBAL, A. *et al.* **Energy efficient street lighting control system using wireless sensor networks.** 2016 8th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC). IEEE, 2016. p. 919-924.

UNITED STATES AGENCY FOR INTERNATIONAL DEVELOPMENT - USAID; BUREAU OF ENERGY EFFICIENCY - BEE. **Energy Efficient Street Lighting Guidelines.** USAID ECO-III Project. Índia, 2010.

URGILES, M. V.; ARPI, P. E.; CHACON-TROYA, D. P. **Lighting control actuator design and development for a ZigBee network with a Web server mounted on Raspberry Pi.** 2015. IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE).

VIANI, F. *et al.* **Experimental validation of a wireless distributed system for smart public lighting management.** 2016 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2), 1–6, IEEE, 2016.

WANVIK, P. **Effects of Road Lighting: An Analysis Based on Dutch Accident Statistics 1987–2006.** *Accident Analysis & Prevention* 41 (1): 123–28, 2009.

WALLS, J; SMITH, M. R. **Life-cycle cost analysis in pavement design: in search of better investment decisions.** FHWA-SA-98-079. FHWA, U.S. Department of Transportation, 1998.

YOOMAK, S. *et al.* **Comparative study of lighting quality and power quality for LED and HPS luminaires in a roadway lighting system.** 2018. *Energy and Buildings*, 159.

ZOTOS, N. *et al.* **Case study of a dimmable outdoor lighting system with intelligent management and remote control.** 2012 International Conference on Telecommunications and Multimedia (TEMU). IEEE, 2012. p. 43-48.



UPF

UNIVERSIDADE
DE PASSO FUNDO

UPF Campus I - BR 285, São José
Passo Fundo - RS - CEP: 99052-900
(54) 3316 7000 - www.upf.br