

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA – CCET
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA – DEEE
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA, VIABILIDADE
ECONÔMICA E AMBIENTAL DO USO DA TECNOLOGIA LED**

CARLOS CÉSAR SILVA DE SOUSA

São Luís – MA, Brasil.

2018

CARLOS CÉSAR SILVA DE SOUSA

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA, VIABILIDADE
ECONÔMICA E AMBIENTAL DO USO DA TECNOLOGIA LED**

Monografia submetida ao curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Maranhão como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Diniz Penha

São Luís – MA, Brasil

2018

Sousa, Carlos César Silva de.

Análise da eficiência energética, viabilidade econômica e ambiental do uso da tecnologia LED / Carlos César Silva de Sousa. - 2018.

83 f.

Orientador(a): Fernando Diniz Penha.

Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica,

Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2018.

Monografia (Graduação) – Universidade Federal do Maranhão, Curso de Engenharia Elétrica, 2018.

1. Eficiência Energética. 2. Iluminação Pública. 3.LED. 4. Viabilidade Econômica. I. Penha, Fernando Diniz.

CARLOS CÉSAR SILVA DE SOUSA

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA, VIABILIDADE
ECONÔMICA E AMBIENTAL DO USO DA TECNOLOGIA LED**

Monografia apresentada à Universidade
Federal do Maranhão como requisito parcial
para obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Elétrica.

Aprovada em: 14 / 02 / 2019

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Fernando Diniz da Penha
(Orientador. DEEE-UFMA)



Prof. Dr. Angel Fernando Torrico Cáceres
(DEEE-UFMA)



Prof. Me. Patryckson Marinho Santos
(DEEE-UFMA)

Dedico este trabalho a minha mãe Laura Sousa (in memoriam), com todo o meu amor. Também aos meus familiares e amigos pelo apoio nos momentos difíceis.

Agradecimentos

A Deus em primeiro lugar, por me guiar e me dá coragem nos momentos difíceis da minha vida, não me deixando desistir dos meus objetivos.

A minha mãe Laura Sousa por ser minha fonte inspiradora (in memoriam) e atualmente ao meu filho Lauro Sousa por manter a esperança viva em tudo que faço e por fazer a minha vida ter um sentido maior.

Também agradeço ao professor Dr. Fernando Diniz Penha, pelas diretrizes e apoio fornecidos durante a orientação. Ao Mestrando André Luís Costa Carneiro pelo suporte e disponibilização dos dados para elaboração deste trabalho. Aos demais professores da graduação em Engenharia Elétrica da UFMA pelos ensinamentos.

Por fim, agradeço a todos os meus familiares e amigos, que, de alguma forma me ajudaram nessa jornada.

*“Se você quer descobrir os segredos do Universo,
pense em termos de energia, frequência e vibração”*

Nikola Tesla

Resumo

Este trabalho apresenta uma análise comparativa entre o atual sistema com luminárias LED e o antigo sistema com lâmpadas de Vapor Sódio em alta pressão na Avenida Panaquatira em São José de Ribamar- MA. Medindo a eficiência Energética e verificando de forma simplificada a viabilidade econômica e ambiental do uso de Luminárias LED na intenção de validação do atual sistema. Foi realizado um levantamento das vantagens e desvantagens do emprego de luminárias LED em sistemas de iluminação pública para os municípios na atualidade, bem como para o meio ambiente e para a saúde dos cidadãos.

Palavras-chave: Iluminação Pública, Viabilidade Econômica, Eficiência Energética, LED.

Abstract

In this work, initially, it is evaluated the public lighting development and the applied technologies, together the technical information and energy consumption. Subsequently, a comparative analysis is presented between the current system with LED luminaires and the old system with high pressure sodium lamps of Panaquatira Avenue in São José de Ribamar, Maranhão. Verifying in a simplified way the economic and environmental feasibility of using LED luminaires in the intention of validating the current system. Following, it is survey of the advantages and disadvantages of the use of LED luminaires in municipal public lighting systems, as well as for the environment and the health of citizens.

Keywords: Public Lighting, Economic viability, Energy Efficiency, LED.

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Evolução das Tecnologias Usadas na Iluminação Pública no Brasil. Fonte [10].	7
Figura 2.2 – Partes Constituintes do Olho Humano. Fonte [01].	9
Figura 2.3 – Densidade de Cones e Bastonetes em Torno da Retina. Fonte [5].	9
Figura 2.4 – Curvas de Sensibilidade Espectral do Olho Humano e Curvas Espectrais do LED e HPS. Fonte adaptado de [12].	10
Figura 2.5 – Diferença entre Iluminância e Luminância. Fonte [5].	16
Figura 2.6 – Temperatura de Cor e as Diferentes Percepções de Cores Relacionadas. Fonte [5].	17
Figura 2.7 – Comparativo entre Duas Fontes Luminosas com Diferentes IRCs. Fonte [16].	18
Figura 2.8 – Topologias de Posteamto de Iluminação Pública. Fonte [24].	25
Figura 3.1 – Características Mecânicas de uma Lâmpada de Vapor de Mercúrio Comum em Sistemas de Iluminação Pública. Fonte [11].	28
Figura 3.2 – Lâmpada de Vapor de Sódio Tubular, Comumente Utilizada em Sistemas de Iluminação Pública. Fonte [11].	29
Figura 3.3 – Lâmpada a Multivapor Metálico Comumente Utilizada em Sistemas de Iluminação Pública. Fonte [11].	30
Figura 3.4 – Reator Externo para Lâmpada a Vapor de Mercúrio. Fonte [16].	31
Figura 3.5 – Reatores Internos. Fonte [16].	31
Figura 3.6 – Exemplo de Relés Fotoelétricos. Fonte: Retirado de [16].	33
Figura 3.7 – Da Esquerda Para a Direita está Exemplificado o Aumento na Eficiência Luminosa das Luminárias. Conjunto Óptico Eficiente. Fonte [16].	33
Figura 3.8 – Estrutura de uma Luminária LED para Iluminação Pública. Fonte [11].	36
Figura 3.9 – Princípio de Funcionamento de um LED. Fonte [9].	37
Figura 3.10 – Partes Construtivas de um LED de Potência. Fonte [9].	38
Figura 3.11 – Dois Tipos de LED: LED HP (a esquerda) e LED HB (a direita). Fonte [11].	39
Figura 3.12 – Variação da Distribuição Espectral da Radiação Emitida por um LED. fonte [32].	40
Figura 3.13 – Efeito da Temperatura de Junção na Vida Útil de um LED. Fonte [32].	40
Figura 3.14 – Projeção no Custo de Luminárias LED. Fonte [5].	44
Figura 4.1 – Representação da Avenida Panaquatira. Fonte [35].	46

Figura 4.2 – Representação de Trechos da Avenida Panaquatira. Fonte [35].....	46
Figura 4.3 – Luminária Pública BRP371 A LED87-3S/NW 86W DME NEMA KTL. Fonte [36].	48
Figura 4.4 – Luminária Pública BRP394 A LED174/NW 129W DM NEMA. Fonte [36]. ...	48
Figura A.1 – Luminária Pública BRP371 A LED87-3S/NW 86W DME NEMA KTL. Fonte Própria.....	59
Figura A.2 – Luminária Pública BRP394 A LED174/NW 129W DM NEMA. Fonte Própria.....	59
Figura A.3 – Luminária Pública BRP371 A LED87-3S/NW 86W no trecho AB. Fonte Própria.	60
Figura A.4 – Luminária Pública BRP394 A LED174/NW 129W no trecho BC. Fonte Própria	60
Figura A.5 – Luminária Pública BRP394 129W no trecho CD (duplicado). Fonte Própria...61	
Figura A.6 – Luminária Pública BRP394 129W no trecho DE. Fonte Própria.....	61

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Substituição da Tecnologia Vapor de Mercúrio por Vapor de Sódio na IP no Brasil. Fonte: Adaptado de [10]..	7
Tabela 2.2 – Eficácia Luminosa para Condições Fotópica e Escotópica de Diferentes Fontes Luminosas. Fonte [13].....	11
Tabela 2.3 – Índice de Reprodução de Cor para Diferentes Fontes de Luz. Fonte [9].....	18
Tabela 2.4 – Tipo de Tráfego Motorizado e de Pedestres. Fonte: Adaptado de [14].....	24
Tabela 2.5 – Classes de Iluminação Para Cada Tipo de Via. Fonte: Adaptado de [14].....	24
Tabela 2.6 – Requisitos Mínimos de Iluminância Média, Uniformidade e Luminância Média Para Cada Classe de Iluminação. Fonte: Adaptado de [14].	25
Tabela 3.1 – Graus de Proteção. Fonte adaptado de [29].	35
Tabela 3.2 – Comparação das Características Fundamentais dos Principais tipos de Lâmpadas. Fonte [33]..	41
Tabela 3.3 – Comparação entre Características Elétricas das Lâmpadas Vapor de Sódio e LED. Adaptado de [12]..	42
Tabela 4.1 – Descrição do Sistema de Iluminação Anterior da Avenida Panaquatira.Fonte Própria.	47
Tabela 4.2 – Especificação Técnica e Características da Luminária Pública BRP371 A LED87-3S/NW 86W DME NEMA KTL. Adaptado de [36].	49
Tabela 4.3 – Especificação Técnica e Características da Luminária Pública BRP394 A LED174/NW 129W DM NEMA. Adaptado de [36].....	49
Tabela 4.4 – Demanda de Potência Ativa do Sistema Antigo da Avenida Panaquatira com Luminárias Convencionais Existentes. Fonte Própria.	50
Tabela 4.5 – Demanda de Potência Ativa do Sistema Atual da Avenida Panaquatira com Luminárias LED. Fonte Própria.	50
Tabela 4.6 – Estimativa do Consumo de Energia Elétrica do Sistema Antigo e do Sistema Atual. Fonte Própria	51
Tabela 4.7 – Valor Estimado Total das Luminárias na Avenida Panaquatira. Fonte Própria.	52
Tabela 4.8 – Comparação da emissão de CO2 na Avenida Panaquatira. Fonte Própria.	53
Tabela 4.9 – Quantidade de Mercúrio em Lâmpadas de Descarga em Alta Pressão. Fonte [23].	54

Lista de siglas e abreviaturas

ABNT	: Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	: Agência Nacional de Energia Elétrica
COPEL	: Companhia paranaense de energia
CEMAR	: Companhia energética do maranhão
EPE	: Empresa de Pesquisa Energética
GEM	: Gestão Energética Municipal
IBGE	: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEEE	: Institute of Electrical and Electronics Engineers
IRC	: Índice de Reprodução de Cor
LED	: Light Emitting Diodo - Diodo Emissor de Luz
MA	: Maranhão
MME	: Ministério de Minas e Energia
MWh	: Megawatt-hora
NBR	: Norma Brasileira Regulamentar
PPP	: parceria público privada
PC-LEDS	: Phosphor converted LEDS
HB-LEDS	: High Brightness LEDS
HP-LEDS	: High Power LEDS
PEE	: Programa de Eficiência Energética
PROCEL	: Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
PROPEE	: Procedimentos do Programa de Eficiência Energética
RELUZ	: Programa Nacional de Iluminação Pública e Sinalização Semafórica Eficiente

Lista de Símbolos

Cos	: Cosseno
E	: Iluminância
E _{min}	: Iluminância mínima
FP	: Fator de Potência
k	: Kelvin
Km	: Quilômetro
KW	: Quilowatt
KWh	: Quilowatt-hora
lm	: Lúmen
lm/m ²	: Lumens por metro quadrado
lm/W	: Lumens por Watt
m	: Metro
m ²	: Metro quadrado
n°	: Número
P	: Potência ativa
S	: Potência Aparente
THD	: Taxa de Distorção Harmônica
THDi	: Taxa de Distorção Harmônica em Corrente
U _{min}	: Fator de Uniformidade mínimo
Φ	: Fluxo Luminoso
%	: Percentual
°C	: Grau Celsius

SUMÁRIO

	Página
1	Introdução..... 1
1.1	Contextualização..... 1
1.2	Formulação do Problema 2
1.3	Objetivos 3
1.3.1	Objetivo Geral 3
1.3.2	Objetivos Específicos 3
1.4	Justificativa 3
1.5	Metodologia 4
1.6	Estrutura do Trabalho 4
2	Iluminação Pública no Brasil 6
2.1	Conceitos Utilizadas em Iluminação 8
2.1.1	A Estrutura do Olho Humano (Visão Fotópica, Escotópica e Mesópica) 8
2.1.2	Fluxo Luminoso ϕ (lúmens) 11
2.1.3	Intensidade Luminosa I (candela) 12
2.1.4	Iluminância ou Iluminamento E (lux) 12
2.1.5	Fator de Uniformidade..... 13
2.1.6	Vida Mediana e Vida Útil..... 13
2.1.7	Ofuscamento 13
2.1.8	Distorção Harmônica Total 14
2.1.9	Fator de Potência 14
2.1.10	Luminância L (cd/m^2)..... 15
2.1.11	Eficácia Luminosa η 16
2.1.12	Temperatura de Cor Correlata (TCC)..... 16
2.1.13	Índice de Reprodução de Cor (IRC) 17
2.2	Iluminação Pública e Eficiência Energética..... 18
2.2.1	Procel Reluz..... 18
2.2.2	Programa de Eficiência Energética – PEE 20
2.3	Gestão Energética Municipal 20

2.3.1	Tipos de Administração Energética Municipal	21
2.4	Projeto de Iluminação Pública	22
2.4.1	Classificação das Vias e Nível de Tráfego	23
2.4.2	Níveis de Iluminância e Fatores de Uniformidade	25
2.4.3	Topologias de Postejamento de Iluminação Pública	25
3	Principais Componentes da Iluminação Pública	27
3.1	Lâmpadas de Descarga em Alta pressão	27
3.1.1	Lâmpadas de Vapor de Mercúrio em Alta Pressão	27
3.1.2	Lâmpada de Vapor de Sódio em Alta Pressão	28
3.1.3	Lâmpada a Multivapores Metálicos	29
3.2	Equipamentos Auxiliares	30
3.2.1	Reatores	30
3.2.2	Ignitores	32
3.2.3	Relé Fotoelétrico	32
3.2.4	Dispositivos de Proteção	33
3.3	Luminárias	33
3.3.1	Rendimento Luminotécnico	34
3.3.2	Grau de Proteção	34
3.4	Sistema de Fixação: Braços e Suportes.....	35
3.5	Luminárias LEDs para Iluminação Pública.	36
3.5.1	LEDS orientados à Iluminação Pública.....	37
3.5.2	Dissipadores de Calor.....	39
3.5.3	Drivers para Acionamento de Luminárias LEDS.....	40
3.6	Análise Comparativa entre Luminárias LED e Luminárias Convencionais.	41
3.7	Vantagens e Desvantagens da Tecnologia LED.	42
4	Estudo de Caso	45
4.1	Classificação do Cenário de Estudo.....	45
4.2	Análise de Viabilidade Econômica	47
4.2.1	Levantamento do Sistema Anteriormente Instalado com Lâmpadas de Vapor de Sódio em Alta Pressão.....	47
4.2.2	Descrição e Detalhamento das Novas Luminárias LEDs Instaladas na Via.	48

4.2.3	Estimativa da Demanda e Consumo de Energia Elétrica dos Sistemas Anterior e Atual.....	50
4.2.4	Payback Simples.....	Erro! Indicador não definido.
4.3	Análise Ambiental	53
4.3.1	Emissões de CO2.....	53
4.3.2	A Poluição Ambiental	54
4.3.3	Destinação Final e Reciclagem.....	55
5	Conclusão.....	57
5.1	Conclusões	57
5.2	Trabalhos Futuros	58
	Apêndice	57
	Apêndice A	57
	Referências	62

1 Introdução

1.1 Contextualização

No Brasil a preocupação com a eficiência energética remota a década de 1970, como consequência das crises energéticas do petróleo, pois havia uma grande dependência de importação do mesmo, posteriormente, ganhou maior relevância no racionamento de energia elétrica ocorrido no início do anos 2000, fruto de variações pluviométricas e da falta de investimento no setor, diminuindo a confiabilidade do sistema [1], e nesta década tornou-se matéria prioritária após o período de estiagem em 2014 e principalmente com a crescente preocupação com o meio ambiente em âmbito global no que diz respeito à sustentabilidade na produção e no uso de energia.

Ressaltamos que apesar da matriz energética brasileira ter uma parcela considerável de energias renováveis a forte dependência da fonte hidráulica que é responsável pela geração da maior parte da energia elétrica nacional, nos deixam vulneráveis em relação a fatores climáticos desfavoráveis. A vista disso impactando fortemente na disponibilidade, pois cria uma incompatibilidade entre geração e consumo [2].

Levando-se em consideração esses aspectos, na busca por eficiência e sustentabilidade, empresas, órgãos governamentais e sociedade têm buscado alternativas através de projetos visando oportunidades de melhorias nos equipamentos e nos processos [3]. Portanto, com o crescente aumento no consumo de energia elétrica é necessária uma diversificação da matriz energética e a criação de novas fontes geradoras afim de manter a confiabilidade do sistema e minimizar os problemas com fatores hidrológicos. Todavia, a criação de novas fontes geradoras envolve questões relacionadas acerca da preservação do meio ambiente e a impactos socioeconômicos.

De acordo com a Eletrobrás, a iluminação pública representa 4,5% da demanda e 3% do consumo no Brasil e sabe-se ainda que o pico de demanda de iluminação pública coincide com os horários de pico do sistema elétrico brasileiro [4]. Ainda convém lembrar que o sistema elétrico é dimensionado para atender a demanda no horário de pico e fora destes horários, a sua

capacidade é subutilizada, portanto, ficando claro a relação direta entre diminuir a demanda nos horários de ponta e os gastos com a expansão da capacidade dos sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica [5].

Assim, em conformidade com o IBD em [6], a iluminação pública atualmente representa o segundo maior item orçamentário de uma parcela significativa dos municípios brasileiros, ficando atrás apenas dos gastos com folha de pagamento. À vista disso, atrair o capital privado, principalmente sob forma de Parcerias Público Privadas (PPP), tem possibilitado as prefeituras de não onerar suas dotações orçamentárias para realizar tais investimentos nesse processo de modernização.

Finalmente, os projetos de eficiência energética no setor de iluminação pública tal como o uso de tecnologia LED têm um papel importante para a redução de emissões de CO₂, além de oferecer benefícios na qualidade de iluminação e no orçamento municipal a longo prazo. Além disso, segundo Rodrigues em [7], a tecnologia LED (Light Emitting Diode), no atual estágio tecnológico, torna-se possível sua implementação em grande quantidade, pois, além de estar em desenvolvimento constante, apresenta enorme durabilidade e um crescimento contínuo de eficiência com base naquilo que é capaz de fornecer.

1.2 Formulação do Problema

A iluminação pública tem sido foco na maioria dos municípios brasileiros, que buscam alternativas de tornar seus parques de IP economicamente viáveis e, ao mesmo tempo tenha uma responsabilidade socioambiental. Propiciando visibilidade e segurança nas vias para pedestres e automóveis, dando mais qualidade de vida à população e possibilitando o crescimento do comércio e do turismo.

Nessa busca por soluções que maximize os benefícios dos investimentos, reduzindo os custos e impactos ambientais, no processo de gestão dos parques de IP dos municípios, procura-se investigar através de um estudo comparativo das duas tecnologias utilizadas na iluminação pública da Avenida Panaquatira em períodos diferentes, afim de avaliarmos se há viabilidade tanto econômica como ambiental.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

- Descreve-se aqui um estudo acerca da utilização da tecnologia LED em Sistemas de Iluminação Pública, bem como caracterização das vantagens e desvantagens em comparação ao sistema instalado anteriormente na Avenida em Estudo. Levando-se em consideração nessa análise estudos de viabilidade com base em fatores técnicos, econômicos e ambientais.

1.3.2 Objetivos Específicos

A proposta deste trabalho, com o propósito de organizar a apresentação da metodologia aplicada e proporcionar sua adequada compreensão, busca-se atingir os seguintes objetivos específicos:

- Conhecer e apresentar as principais tecnologias aplicadas nos Sistemas de Iluminação Pública;
- Conhecer e estudar as principais características e tecnologias aplicadas na implantação das Luminárias LED nos Sistemas de Iluminação Pública;
- Realizar levantamento dos pontos de iluminação da Avenida em Estudo e comparar com os dados antes da implantação da iluminação com Luminárias LED;
- Apresentar um estudo comparativo da substituição de luminárias convencionais (vapor de sódio em alta pressão), antes existentes no local do estudo, por luminárias LED, atual sistema e verificar através da análise custo x benefício os impactos financeiros e ambientais.

1.4 Justificativa

Atualmente a orientação de estudos e análises sobre a ótica dos impactos da implantação de novas tecnologias na iluminação pública, vem configurando-se como uma condição necessária para verificar a validade dos modelos atualmente adotados, principalmente

com Iluminação a LED, em foco na atualidade. Dessa forma, o presente trabalho traz um estudo comparativo entre iluminação anterior com lâmpadas de Vapor de sódio em alta pressão e a atual sistema com Luminárias LED. Por consequência, estudos com essa temática são de um panorama atual e com expectativas crescentes, devido aos inúmeros projetos em desenvolvimento em muitos municípios do país.

1.5 Metodologia

Neste trabalho, inicialmente, se fez necessária uma revisão bibliográfica acerca das principais tecnologias empregadas nos sistemas de iluminação pública para embasar o estudo comparativo entre as duas tecnologias orientadas neste estudo.

Posteriormente, foi realizado o levantamento de dados da Avenida Panaquatira no município de São Jose de Ribamar - MA, a fim de se conhecer suas características, para posteriormente, fazer uma análise econômica e ambiental simplificada do sistema existente com Luminárias LED e o sistema anterior, com lâmpadas de vapor de sódio em alta pressão.

1.6 Estrutura do Trabalho

Esta monografia, incluindo este introdutório, apresenta cinco capítulos organizados como segue:

- O Capítulo 2 é destinado a expor um breve histórico da iluminação pública no cenário nacional. Apresentando conceitos da área de iluminação e luminotécnica, suas grandezas. Apresenta ainda uma breve explanação das normas nacionais e legislação sobre iluminação pública.
- No Capítulo 3 descreve os principais componentes que constituem um sistema de iluminação pública. É discutido o emprego da tecnologia LED em iluminação pública, descrevendo suas principais características fazendo uma rápida comparação com as tecnologias anteriormente instalada com lâmpadas de vapor de sódio em alta pressão.
- O Capítulo 4 traz o acompanhamento do projeto aplicado na iluminação pública empregando luminárias LED na Avenida Panaquatira localizada no município de São José de Ribamar - MA. É feita uma comparação entre o

antigo sistema empregando lâmpadas de vapor de sódio em alta pressão e o atual empregando luminárias LED, através de uma análise econômica e ambiental, mostrando a economia efetuada pelo novo sistema de iluminação e os cálculos de payback das novas luminárias LED, bem como os benefícios ambientais do novo sistema.

- O Capítulo 5 encerra o presente trabalho apresentando alguns comentários finais de avaliação e análise crítica, no qual as conclusões obtidas referem-se aos objetivos propostos neste estudo.

2 Iluminação Pública no Brasil

Em 1879, a primeira instalação de iluminação elétrica permanente brasileira foi implantada, na Estação Central da Estrada de Ferro Dom Pedro II, (atual Central do Brasil, Rio de Janeiro). Convém lembrar que foi Dom Pedro II que conceder a Thomaz Edison o privilégio de introduzir sua invenção no país. Tal sistema era composto de um locomóvel de 7 CV, dois dínamos Gramme e seis lâmpadas de arco, que substituíram os 46 bicos de gás que iluminavam o local antes da implantação [8].

Então, na década de 1880 surgem na cidade de Campos, Rio de Janeiro e na cidade de Porto Alegre, no Rio Grande do Sul, os primeiros serviços públicos de iluminação. Em 1889, era inaugurada em Juiz de Fora, Minas Gerais, a usina hidrelétrica de Marmelos, a primeira usina hidrelétrica de grande porte que é considerada o marco zero na história da energia elétrica no Brasil e na América Latina [9].

Conforme citado por Casagrande em [9], as lâmpadas incandescentes predominaram no cenário da iluminação pública brasileira do início do século XX até por volta da década de 1950, quando iniciou-se a substituição por lâmpadas fluorescentes e, a partir da década seguinte, com a utilização em maior escala das lâmpadas de descarga em alta pressão.

Com a criação, do PROCEL, Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica, no ano de 1985, diversas ações em eficiência energética passaram a ser implementadas, em articulações entre os governos e as concessionárias de energia elétrica. Primeiramente com a troca de lâmpadas incandescentes e mistas por lâmpadas vapor de mercúrio em alta pressão e, posteriormente, com a criação do programa PROCEL RELUZ, em 2000, quando houve incentivos a substituição das lâmpadas vapor de mercúrio por vapor de sódio, devido a elevada eficácia luminosa e vida útil das mesmas, que acabou por torna-la a tecnologia mais difundida para IP no país atualmente [3].

De acordo com a Figura 2.1 e Tabela 2.1, podemos observar que apesar de os dados mais recentes datarem do ano de 2008, sobre os tipos e quantidades de lâmpadas de iluminação pública instaladas nos sistemas de iluminação pública no Brasil, dados do PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica, e mesmo que não tenha informações mais atualizadas da participação de luminárias LED, esses dados resumem a substituição da

tecnologia vapor de mercúrio por vapor de sódio e demonstram a ordem de grandeza do parque de iluminação pública do país [10].

Tabela 2.1 – Substituição da Tecnologia Vapor de Mercúrio por Vapor de Sódio na IP no Brasil.
Fonte: Adaptado de [10].

Ano	1995	1999	2004	2008
Número de pontos (milhões)	8,8	11,3	13,4	14,7
Potência instalada (GW)	1,74	1,9	2,22	2,42
Consumo de energia (TWh/ano)	7,64	8,31	9,73	10,6
Vapor de mercúrio	81%	71%	47%	32%
Vapor de sódio	7%	16%	46%	63%

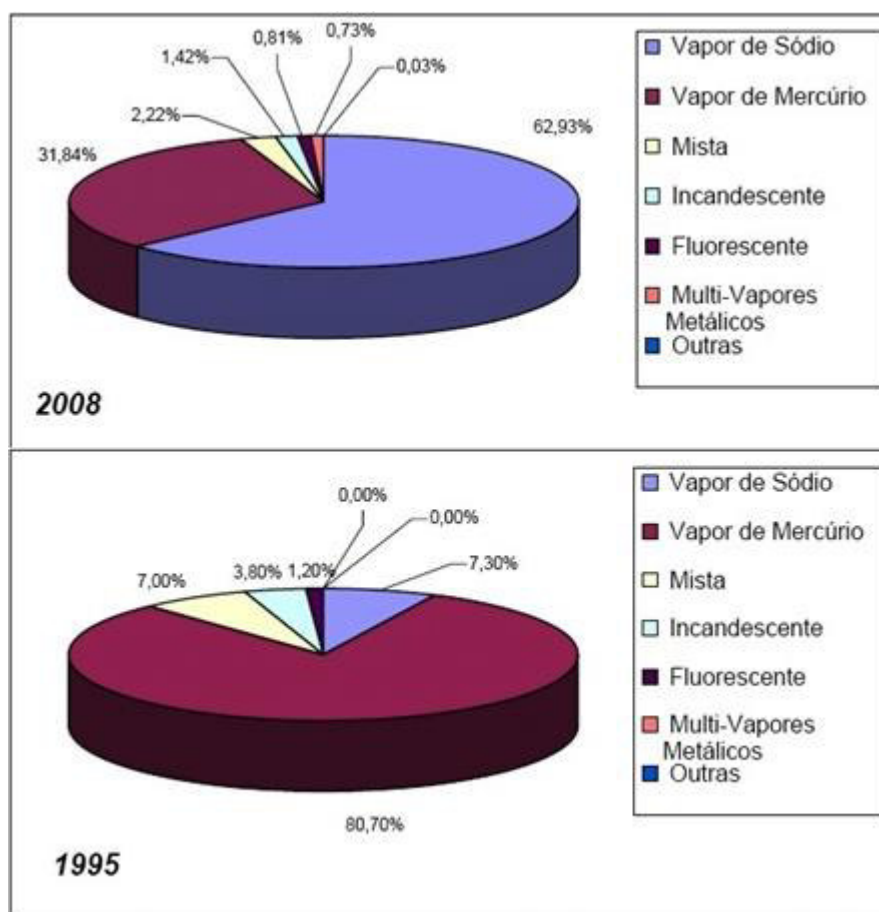


Figura 2.1 – Evolução das Tecnologias Usadas na Iluminação Pública no Brasil. Fonte [10].

Atualmente, a iluminação pública no Brasil se vê diante da possibilidade de se modernizar com tecnologias ainda mais eficientes, assim como observado em 2008, onde as lâmpadas de vapor de sódio em alta pressão, devido sua elevada eficácia luminosa e longa vida

útil, foi a escolhida para substituir as demais tecnologias que já se encontram defasadas, incentivada principalmente através de investimentos do governo no programa RELUZ [11]. Desta maneira, provavelmente nas próximas décadas as mesmas serão substituídas por iluminação de estado sólido, na qual se incluem os LEDs que já se mostram muito mais vantajosos no que tange a eficácia luminosa e longa vida útil em relação as lâmpadas de vapor de sódio em alta pressão.

2.1 Conceitos Utilizados em Iluminação.

A seguir serão apresentados alguns conceitos luminotécnicos necessários para a compreensão dos demais capítulos deste trabalho. Inicialmente discute-se o funcionamento da resposta visual humana diante de diferentes condições de luminosidade e, posteriormente, é feita uma revisão das principais grandezas usadas no estudo da iluminação para os sistemas de iluminação pública.

2.1.1 A Estrutura do Olho Humano (Visão Fotópica, Escotópica e Mesópica).

O olho tem formato elipsoidal, com 23 mm de diâmetro aproximadamente é envolto pela esclera (camada de pele exterior resistente e opaca à luz). Sob a mesma, composta de vasos sanguíneos e nervos encontramos a coroide. Na parte frontal encontramos a córnea, (cartilaginosa e transparente), logo abaixo controlando a exposição do interior do olho à luz encontramos a íris. Logo atrás encontramos o cristalino, lente biconvexa situada atrás da íris. Revestindo o interior do olho com fibras nervosas que se espalham desde o nervo ótico, na parte mais interna está a retina. Meios transparentes preenchem o restante do olho: humor aquoso, entre a córnea e o cristalino; humor vítreo, substância gelatinosa que preenche entre o cristalino e a retina [5]. Conforme ilustrado na Figura 2.2.

O olho tem duas células de detecção de luz primárias da retina (fotorreceptores), conhecidos como bastonetes e cones [12], de acordo com a figura 2.3. Os cones são menos sensíveis à luz e estão localizados em maior densidade na região central da retina e se dividem em cones sensíveis a faixa espectral verde, azul e vermelho. Já os bastonetes têm sensibilidade muito maior do que os cones, porém, não são sensíveis às cores. (luminância menor que 0,003 cd / m²) [9].

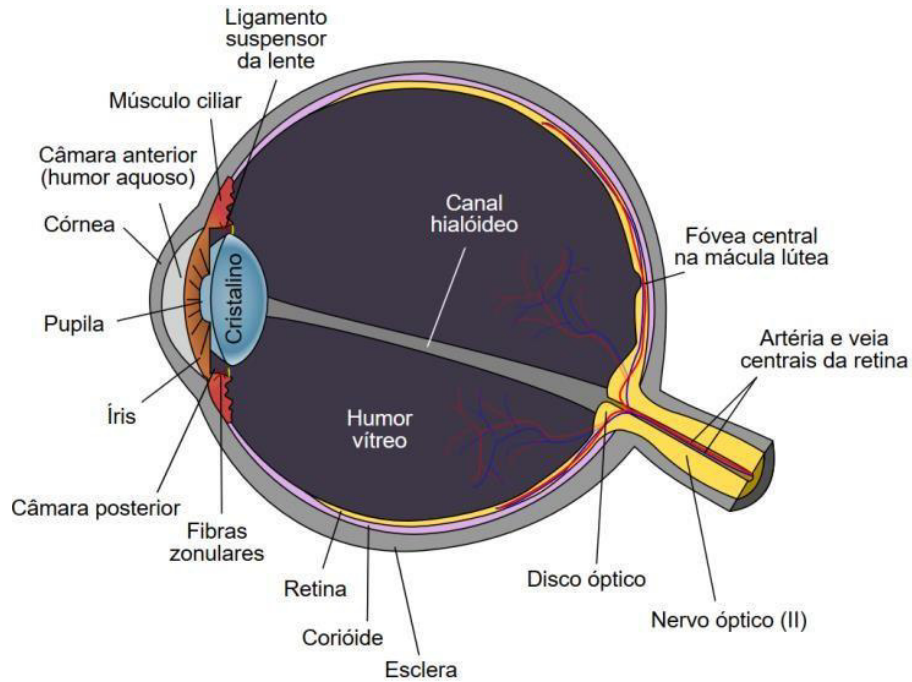


Figura 2.2 – Partes Constituintes do Olho Humano. Fonte [01].

Como citado por Casagrande em [9], existe ainda um terceiro tipo de células fotorreceptoras, que, no entanto, não contribuem diretamente para a visão, são células ganglionares presentes na retina que têm a função de atuar no mecanismo do sono, sincronizando o relógio biológico ao ciclo solar. Essas células reagem à luz convertendo a radiação eletromagnética em sinais nervosos que são enviados ao cérebro, estimulando assim a produção de determinados hormônios durante o dia e à noite, contribuindo em diversas funções do organismo.

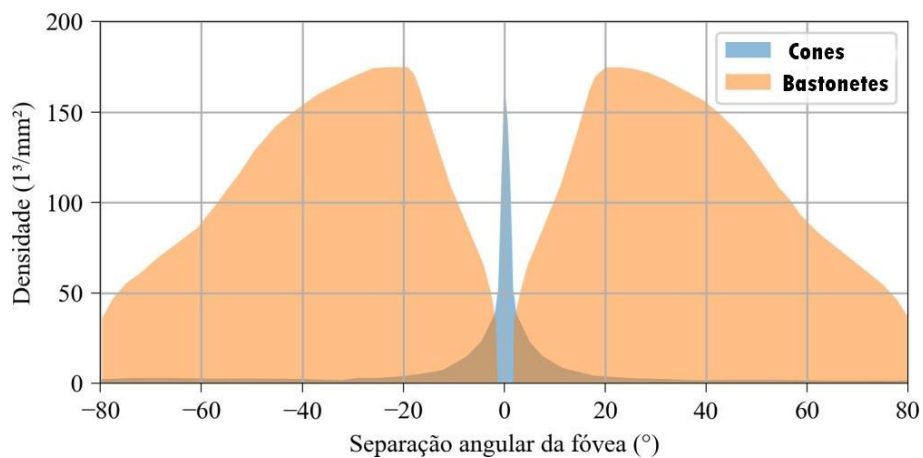


Figura 2.3 – Densidade de Cones e Bastonetes em Torno da Retina. Fonte [5].

Assim na condição fotópica, luminância (acima de 3 cd/m²), a pupila se contrai e a formação da imagem ocorre na região central da retina (fóvea), estimulando os cones, enquanto que na condição escotópica, luminância (abaixo de 0,003 cd/m²), por sua vez, levam à dilatação da pupila e aumentam, conseqüentemente, a área de formação da imagem, estimulando os bastonetes [5]. Por fim, a faixa intermediária entre a condição fotópica e escotópica é chamada de condição mesópica, onde ambas as células contribuem para a formação das imagens.

O reconhecimento de objetos à frente do sujeito relaciona-se à função fotópica e, por isso, a definição de fluxo luminoso é baseada na resposta fotópica do olho, enquanto a percepção espacial, relaciona-se aos estímulos de ambas as áreas da retina, central e periférica, no período noturno [5]. Portanto, como mostra a Figura 2.4, a recomendação que ambos os espectros de sensibilidade fotópica e escotópica sejam levados em consideração, ou seja, que também se utilize a condição mesópica na iluminação de rodovias e espaços públicos.

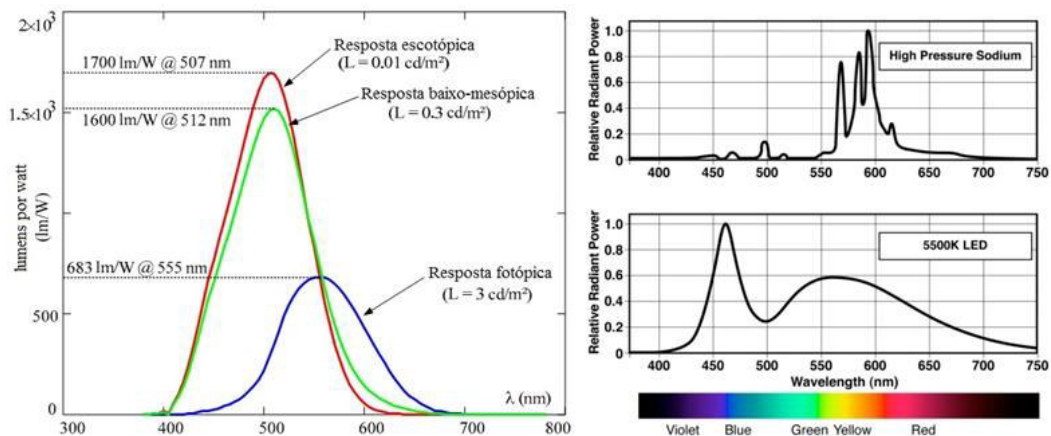


Figura 2.4 – Curvas de Sensibilidade Espectral do Olho Humano e Curvas Espectrais do LED e HPS.

Fonte adaptado de [12].

Ao comparar as curvas de sensibilidade espectral da visão humana com as curvas de distribuição espectral de LEDs brancos de potência e HPS (vapor de sódio em alta pressão) na Figura 2.4 acima, observa-se que os LEDs apresentam uma composição espectral mais compatível com a visão humana em condições escotópica (baixa luminosidade), enquanto, o espectro das lâmpadas HPS não coincide com a maior sensibilidade da visão humana nessas condições.

Conclui-se que nas aplicações de iluminação pública, onde os níveis de luminância são baixos, a resposta mesópica baixa, ou mesmo a escotópica, podem representar melhor a

realidade da sensibilização do olho humano, assim, a relação de eficácia luminosa das fontes de luz (lm/W) deve considerar o nível de iluminação [7]. Portanto o que torna uma fonte de luz eficaz para iluminação pública é a emissão de luz em comprimentos de onda na faixa fotópica e escotópica.

Observamos na Tabela 2.2 um levantamento da eficácia luminosa quando do fluxo definido nas condições fotópica e escotópica para alguns tipos de fonte de luz no estudo realizado por Rodrigues et al. em [13].

Tabela 2.2 – Eficácia Luminosa para Condições Fotópica e Escotópica de Diferentes Fontes Luminosas. Fonte [13].

Fonte de Luz	Fotópica lm/W	Escotópica lm/W
Incandescente	14,7	20,3
Fluorescente (3500 K)	84,9	115,9
Sódio em Alta Pressão	126,9	80,5
Sódio em Baixa Pressão	180,0	40,8
Mercúrio em Alta Pressão	52,3	66,8
Multi-Vapores Metálicos	107,0	181,0
LED (Branco Frio)	93,3	156,0

2.1.2 Fluxo Luminoso ϕ (lúmens)

O fluxo luminoso é a quantidade total de luz emitida por uma fonte dentro da faixa de comprimento de onda entre 380 nm e 780 nm, ou seja, toda a radiação emitida que sensibiliza o olho humano [3]. Sua unidade é o lúmen (lm). Sua definição é dada pela equação (1):

$$\phi = kn \int_{380}^{780} Vn(\lambda) \cdot J(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

Onde a constante kn e a distribuição $Vn(\lambda)$ são dependentes do regime de operação do sistema visual. Para o regime fotópico, kn vale 683 lm/W, enquanto para o regime escotópico, kn vale 1.699 lm/W. Esta constante quantifica a magnitude do pico da sensibilidade visual em cada regime de operação [3]. Como em cada condição células diferentes do olho humano são consideradas, os valores são distintos. A função $J(\lambda)$ (dada em W/nm) é a distribuição espectral de potência da fonte luminosa e só depende desta. Os limites de integração correspondem à limitação de sensibilidade da visão humana, ou seja, o intervalo do espectro visível (380 a 780 nm) [9].

2.1.3 Intensidade Luminosa I (candela)

A intensidade luminosa (I) é definida matematicamente como o limite da razão entre o fluxo luminoso (ϕ) através de um ângulo sólido (ω) em torno de uma direção e o valor desse ângulo sólido, quando este tende para zero [9]. Sua unidade, no SI, é a candela (cd). Sua definição é dada pela equação (2).

$$I_{\alpha} = \lim_{\omega \rightarrow 0} \left(\frac{\phi}{\omega} \right) = \frac{d\phi}{d\omega} \quad (2)$$

Na definição acima, I_{α} representa a intensidade luminosa em candelas (cd) na direção de propagação α , ϕ é o fluxo luminoso (lm) e ω é o ângulo sólido, medido em esterradiano ou esferorradiano (sr) [9,11]. Para medição desta grandeza vetorial, a fonte de luz é considerada puntiforme, sendo, portanto, recomendado que a distância de medição seja no mínimo cinco vezes maior que o comprimento da fonte [11].

2.1.4 Iluminância ou Iluminamento E (lux)

Iluminância é o fluxo luminoso incidente por unidade de área iluminada ou ainda iluminância E é o limite da razão entre o fluxo luminoso ($d\phi$) incidente num elemento de superfície que contém o ponto dado, pela área deste elemento, quando esta área tende para zero (dA) [11]. É a componente perpendicular do fluxo luminoso incidente em uma superfície por unidade de área. Por definição sua unidade de medida é o lúmen por metro ao quadrado (lm/m²) ou lux. Nesta equação 3, ϕ é o fluxo luminoso, enquanto A é área da superfície que, por sua vez, tende a zero.

$$E = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta \phi}{\Delta A} \right) = \frac{d\phi}{dA} \quad (3)$$

Os valores de Iluminância adequados a diferentes atividades e tipos de ambientes são fixados por normas, na NBR 5101 –Iluminação Pública, fixa os valores médios mínimos para Iluminância das vias públicas e também para a sua uniformidade [14]. A medição de Iluminância é feita facilmente por meio de um luxímetro.

2.1.5 Fator de Uniformidade

O fator de uniformidade (U) é a relação entre o menor valor de Iluminância (E_{min}) em uma área considerada e o valor da Iluminância média ($E_{média}$) nessa mesma área, expresso pela Equação (4) [15]. O mesmo resulta em um valor adimensional variando entre zero e a unidade, que indica como está a distribuição da luminosidade na superfície aferida [16]. Diferenças acentuadas entre os dois índices diminui a segurança das áreas de circulação nas vias públicas devido o desempenho visual ficar prejudicado.

$$U = \frac{E_{min}}{E_{média}} \quad (4)$$

O posicionamento das fontes luminosas pode gerar o chamado efeito “zebrado”, áreas mais claras e outras mais escuras, nas vias públicas. Decorrente de uma uniformidade Longitudinal ruim, parâmetro esse, que corresponde a relação entre os valores mínimo e máximo de iluminação, junto a superfície da via, medidos ao longo de uma reta paralela ao eixo de iluminação [17].

2.1.6 Vida Mediana e Vida Útil

Para efeito de comparação entre fontes de luz de diferentes tecnologias, utiliza-se o tempo de vida, parâmetro que se refere ao tempo de funcionamento de uma lâmpada até que deixe de operar em condições normais.

A Vida Mediana é o tempo após o qual 50% das lâmpadas de uma determinada amostragem, submetidas a um ensaio de vida, deixam de funcionar. Enquanto a Vida Útil corresponde ao tempo de duração em horas até que, com a depreciação, seu fluxo luminoso chegue a 70% do inicial [16].

2.1.7 Ofuscamento

Considera-se ofuscamento o fenômeno de desconforto visual de um observador, resultante de uma fonte luminosa de luz mais intensa do que a luminosidade geral. Na iluminação pública este fenômeno tem maior proporção no início da noite, no acionamento das fontes luminosas, repercutindo diretamente sobre a segurança do tráfego [17].

2.1.8 Distorção Harmônica Total

A taxa de distorção harmônica total (Total Harmonic Distortion – THD) representa a relação entre a soma dos valores eficazes dos componentes harmônicos de uma forma de onda pelo valor eficaz da componente fundamental [16].

Na iluminação pública, equipamentos eletrônicos com elevado THDi (distorção harmônica da corrente absorvida por uma carga não linear) tendem a lançar componentes harmônicas na rede, que distorcem as formas de onda da corrente do sistema elétrico. Estas harmônicas prejudicam a qualidade do sistema elétrico e interferem no correto funcionamento de outros equipamentos conectados à rede. A THDi pode ser obtida pela equação (5):

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{j=2}^n I_j^2}}{I_1} \quad THDi (\%) = 100 \times THDi \quad (5)$$

Onde:

I_j : Valor eficaz da componente harmônica da corrente absorvida pela carga;

I_1 : Componente fundamental da corrente, com frequência de 60Hz;

$THDi$: Distorção Harmônica total da corrente, em percentual.

2.1.9 Fator de Potência

Fator de Potência (FP) é a razão entre potência ativa (P) e potência aparente (S). Conforme a equação (6). Seu resultado, expresso num número adimensional entre zero e um, indica que quanto mais próximo do valor unitário mais eficiente é o circuito (equipamento, instalações, etc.), pois a energia consumida está sendo transformada em trabalho com baixo índice de perdas [16].

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{U_1 * I_1 * \cos \varphi}{U * I} \quad (6)$$

U_1 e I_1 são os valores eficazes das componentes fundamentais da tensão e corrente, respectivamente, de um circuito. U e I são os valores eficazes totais da tensão e corrente. Quando as tensões e correntes do sistema elétrico podem ser consideradas senoidais puras, seus

valores eficazes totais são iguais aos de suas componentes fundamentais o FP é dado pela equação (7) [18].

$$FP = \cos \varphi \quad (7)$$

Quando as tensões e correntes do sistema elétrico não são senoidais puras, devido a imersão de harmônicas na rede, o resultado do fator de potência passa a considerar essa contribuição. Para imersão de THDi, pode ser aplicado a equação (8) no cálculo do fator de potência. A harmônica desta natureza considera apenas as distorções na forma de onda da corrente, desprezando a da tensão [16].

$$FP = \frac{\cos \varphi}{\sqrt{1+THDi^2}} \quad (8)$$

Caso a corrente absorvida pela carga de iluminação seja uma senoide pura, o THDi será nulo, portanto, o fator de potência se mantém como o resultado do cosseno do ângulo de defasamento entre tensão e corrente ($\cos \varphi$) [16].

2.1.10 Luminância L (cd/m²)

Por definição, a luminância é a razão entre a intensidade luminosa e a área a partir da qual irradia, até alcançar os olhos do observador. Para ser mais preciso, considera-se não toda a área da superfície iluminada, mas a área aparente vista pelo observador. Entende-se a área aparente como a área projetada num plano perpendicular à direção de observação, ou seja, a área efetivamente vista pelo observador [3]. Esta grandeza traduz a sensação de claridade que uma determinada superfície iluminada (ou iluminante) transmite [11]. A luminância é matematicamente expressa pela equação (9):

$$E = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta I}{\Delta A \cdot \cos \alpha} \right) = \frac{dI}{dA \cdot \cos \alpha} \quad (9)$$

Onde A é a área da superfície iluminada, α o ângulo da direção de observação, I é a intensidade luminosa irradiada pela superfície e l é a luminância, dada em cd/m^2 . A iluminância corresponde à luz incidente na superfície, enquanto que a luminância corresponde à luz que efetivamente chega até os nossos olhos a partir da superfície [9].

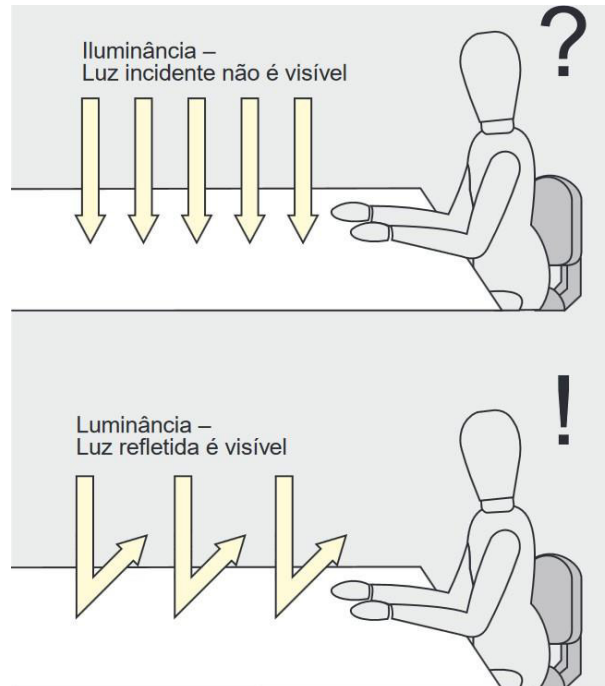


Figura 2.5 – Diferença entre Iluminância e Luminância. Fonte [5].

2.1.11 Eficácia Luminosa η

A razão entre o fluxo luminoso ϕ irradiado por uma fonte de luz e sua potência consumida P é definida como eficácia luminosa η e pode ser vista na equação (10) [11]. A eficácia luminosa permite avaliar a eficiência de uma determinada fonte de luz em converter energia em luz, bem como comparar fontes de luz entre si.

$$\eta = \frac{\phi}{P} \quad (10)$$

A eficácia luminosa é expressa em lm/W. É uma grandeza bastante relevante no processo de comparação entre fontes luminosas, uma vez que indica as fontes mais eficientes na conversão de energia elétrica em luz [9].

2.1.12 Temperatura de Cor Correlata (TCC)

É um parâmetro relacionado com a sensação de conforto que uma lâmpada proporciona em um determinado ambiente. Quanto maior for o valor de temperatura da cor de uma fonte luminosa, mais branca será a luz emitida pela mesma. Ao contrário, quanto mais baixo for a temperatura da cor da fonte de luz, mais amarelada esta será. As fontes luminosas artificiais podem variar entre 2000K, muito quente, até mais de 10000K, muito fria [16].

A temperatura de cor correlata (TCC) indica qual seria a temperatura de um corpo negro que emitiria uma luz de cor similar à da fonte analisada. Sua unidade no SI é o kelvin (K). Embora seja medida em kelvin, a temperatura de cor correlata de uma fonte luminosa não tem qualquer relação com a temperatura física desta fonte luminosa. O fato de ser medida em kelvins justifica-se por se tratar de uma analogia com a cor da luz emitida pelo corpo negro quando aquecido a uma determinada temperatura [11]. A figura 2.6 ilustra diferentes TCCs.



Figura 2.6 – Temperatura de Cor e as Diferentes Percepções de Cores Relacionadas. Fonte [5].

Fontes de luz que apresentam uma baixa temperatura de cor (3.000K ou menos) emitem uma luz de cor amarelada, sendo usualmente chamada de luz quente. Já fontes de luz que possuem uma alta temperatura de cor (6.000K ou mais), apresentam uma luz mais branca (tendendo para um tom azulado) denominada de luz fria. Essas características são muito importantes na escolha do tipo de lâmpada adequado para um projeto, em função da sensação psicológica que se deseja criar no ambiente em questão. Além disso, fontes de luz com alta temperatura de cor correlata causam maior sensação de luminosidade em ambientes com baixo nível de luminância. Devido a esta característica fontes de luz branca são mais eficientes que fontes de luz amarela quando aplicadas em iluminação pública [5,11].

2.1.13 Índice de Reprodução de Cor (IRC)

Definido como a medida de cor real de uma superfície e sua aparência a ser iluminada pela fonte artificial, é quantificado de 0 a 100. Uma fonte luminosa com IRC de 100% é a que apresenta as cores de um objeto com a máxima fidelidade possível [16]. Como pode ser observado na Figura 2.7, onde é ilustrado duas fontes com IRC diferentes.



Figura 2.7 – Comparativo entre Duas Fontes Luminosas com Diferentes IRCs. Fonte [16].

O IRC é um valor percentual relativo à percepção de reprodução de cor, baseado em testes comparativos com cores padrões e um iluminador padrão que pode ser um radiador integral, ou seja, que emite todos os comprimentos de onda do espectro visível, um corpo negro ideal ou a luz do sol [9]. A Tabela 2.3 mostra o índice de reprodução de cor para diferentes fontes de luz.

Tabela 2.3 – Índice de Reprodução de Cor para Diferentes Fontes de Luz. Fonte [9].

Fonte de Luz	IRC (%)
Incandescente	100
Florescente compacta	80
Vapor Metálico	70
Mista	50
Mercúrio	40
Sódio	25
LED	70 a 90

2.2 Iluminação Pública e Eficiência Energética

O financiamento de projetos em eficiência energética voltados para a iluminação pública, assim como as revisões de normas técnicas, adequando os equipamentos no mercado brasileiro tem propiciado o desenvolvimento de projetos eficientes e culminando com a redução no consumo de energia na iluminação pública.

2.2.1 Procel Reluz

O Procel Reluz, Programa Nacional de Iluminação Pública e Sinalização Semafórica eficientes, no que tange a Iluminação pública, busca estimular, por meio de uma linha de

financiamento, o desenvolvimento de sistemas eficientes de iluminação pública, além da valorização noturna dos espaços públicos urbanos [19]. Contribuindo na redução do consumo de energia elétrica e melhoria nas condições de segurança nas vias públicas e na qualidade de vida dos cidadãos.

O Procel Reluz foi criado pelo governo federal em parceria com a Eletrobrás nos anos 2000. Tem como premissas modernizar e maximizar a eficiência energética dos sistemas de iluminação pública, promovendo a racionalização da produção e uso da energia elétrica assegurando a redução global de custos e investimentos no âmbito nacional. Os projetos cobertos pelo Procel Reluz buscam atribuir níveis de iluminância compatíveis com os ambientes de acordo com as normas técnicas brasileiras de iluminação pública de forma eficaz.

De acordo com o Procel em [19], até 2012, o programa incentivava a substituição de lâmpadas incandescentes, mistas e a vapor de mercúrio por lâmpadas a vapor de sódio a alta pressão ou a vapor metálico. A partir de 2016, suportado pela Lei no 13.280/2016, foca na iluminação pública a LED, por ter grande eficácia e durabilidade em comparação com as anteriores.

Como possuímos municípios com alto grau de diversidade que impossibilita um modelo generalizado para viabilizar projetos na área de iluminação pública, a Chamada Pública do Procel Reluz 2017 busca desenvolver e testar modelos replicáveis que se apliquem à variedade dos municípios brasileiros.

A Chamada Pública do Procel Reluz 2017, específica para seleção de projetos de eficiência energética em iluminação pública viária com tecnologia LED, aprovado pelo Comitê Gestor de Eficiência Energética (CGEE), teve um investimento de aproximadamente R\$ 17,5 milhões, tendo como foco principal: incentivar as prefeituras a apresentar propostas de projetos para a modernização dos seus parques de iluminação pública, com a tecnologia LED, a fim de desenvolver a capacidade em modelar e operacionalizar, propostas para acessar fontes de recursos para seus projetos [19].

2.2.2 Programa de Eficiência Energética – PEE

O Programa de Eficiência Energética – PEE é executado pelas distribuidoras de energia elétrica e coordenado pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL.

Estabelecido a partir da Lei nº 9.991/2000, juntamente com a complementação da Lei nº 13.206/2016, onde as Empresas concessionárias ou permissionárias de distribuição de energia devem aplicar o percentual mínimo de 0,5% da Receita Operacional Líquida (ROL) em Programas de Eficiência Energética (PEE), desse valor montante, 20% dos recursos devem ser destinados à eficiência energética para aplicação no Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (Procel) [20].

Tendo como objetivo promover o uso eficiente da energia elétrica em todos os setores da economia, por meio de projetos que demonstrem a importância e a viabilidade econômica da melhoria da eficiência energética de equipamentos, processos e usos finais de energia [21]. Dessa forma, maximizando os benefícios públicos da energia economizada e da demanda evitada, promovendo a transformação do mercado de eficiência energética, estimulando o desenvolvimento de novas tecnologias e a criação de hábitos e práticas racionais de uso da energia elétrica.

Na Iluminação Pública, o PEE tem por finalidade apoiar projetos com foco no uso de lâmpadas e equipamentos mais eficientes nos sistemas de iluminação pública das prefeituras municipais. Tais projetos se obedecido aos critérios estabelecidos pelo programa têm total cobertura mediante os recursos advindos do PEE, que se dá através das Chamadas Públicas de projetos da distribuidora responsável pela região da qual o município está incluso [21].

2.3 Gestão Energética Municipal

A Gestão Energética Municipal (GEM) consiste num conjunto de fundamentos, normas e ações, que visam balizar o uso da energia elétrica e controlar o seu desempenho e respectiva eficiência.

Com a transferência dos Ativos da Iluminação pública para a gestão municipal determinada pela resolução da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), Nº 414/2010, conforme o Art. 218 da resolução que determina que a distribuidora deve transferir, sem ônus, o sistema de iluminação pública registrado como Ativo Imobilizado em Serviço – AIS (as luminárias, lâmpadas, relés fotoelétricos e fotoeletrônicos, reatores, braços de sustentação da

luminária, eletrodutos, caixas de passagem e condutores exclusivos para iluminação pública) ao Poder Público Municipal. A partir de então ficando na responsabilidade das prefeituras os serviços de elaboração de projeto, implantação, expansão, operação e manutenção das instalações de iluminação pública, sejam estes realizados diretamente ou sob regime de concessão ou permissão [22].

Esta decisão acarretou um aumento nas despesas dos municípios, uma vez que ficaram incumbidos de arcar com os custos de operação e manutenção, e também de expansão e melhoria dos ativos da iluminação pública [23]. Para remuneração do consumo, as tarifas são reguladas em B4a, quando os ativos pertencerem ao Poder Público Municipal, e B4b, quando os ativos ainda pertencerem à distribuidora. Sendo a tarifa B4b cerca de 9,5% superior à tarifa B4a com a finalidade de remunerar os serviços de operação e manutenção [22].

2.3.1 Tipos de Administração Energética Municipal

Para se adequarem à exigência da Aneel os municípios estão utilizando dois modelos de gestão: a administração própria e a terceirização dos serviços [23].

Na **administração própria**: Os municípios terão que criar novos departamentos, muitas vezes aumentando o número de funcionários, e adquirir equipamentos e materiais para a prestação de serviços de operação e manutenção.

Na **terceirização dos serviços**: Os municípios deverão ter em seu quadro funcionários especializados para dirigir, orientar e planejar a atuação da empresa contratada, que ficará responsável pela operacionalização da manutenção, modificação e ampliações necessárias.

O processo licitatório para a contratação das empresas especializadas deve ser realizado obedecendo a Lei Federal 8.666/1993. A contratação pode ser realizada através de uma das três opções relacionadas a seguir: Contrato de prestação de serviços; Contrato de concessão comum; Contrato de concessão Parceria Público-Privada (PPP) [23].

Na forma de **Contrato de Prestação de Serviços**: o município é responsável pelos pagamentos dos serviços prestados, e as empresas especializadas, pelo fornecimento de material, mão de obra e veículos necessários à prestação dos serviços para a manutenção dos pontos de iluminação pública.

Na forma de **Contrato de Concessão Comum**: É o contrato administrativo que tem por objeto a execução de um serviço público transferido pela Administração para que outrem o execute por sua conta e risco, mediante tarifa paga pelo usuário ou por previsão contratual

através de outra forma de remuneração complementar, acessória, alternativa ou decorrente de projetos associados.

Na forma de **Contrato de Concessão Parceria Público-Privada (PPP)**: A Parceria Público-Privada (PPP) é um contrato de prestação de obras ou serviços não inferiores a R\$ 20 milhões, com duração mínima de 5 e no máximo 35 anos, firmado entre a empresa privada e os governos federal, estadual ou municipal [23].

Podendo ser de dois tipos:

- **Concessão Patrocinada**: As tarifas cobradas dos usuários da concessão não são suficientes para pagar os investimentos feitos pelo parceiro privado. Assim, o poder público complementa a remuneração da empresa por meio de contribuições regulares, isto é, o pagamento do valor mais imposto e encargos.
- **Concessão Administrativa**: Quando não é possível ou conveniente cobrar do usuário pelo serviço de interesse público prestado pelo parceiro privado. Neste caso, a remuneração da empresa é integralmente feita pelo poder público.

2.4 Projeto de Iluminação Pública

Um projeto de iluminação pública, para garantir a funcionalidade do sistema, deve atender as diretrizes especificadas pela norma vigente ABNT NBR 5101/2012, Iluminação Pública – Procedimento. Conforme esta norma:

A distribuição apropriada das intensidades luminosas das luminárias é um dos fatores essenciais de iluminação eficiente em vias. As intensidades emitidas pelas luminárias são controladas direcionalmente e distribuídas de acordo com a necessidade para visibilidade rápida, precisa e confortável. Distribuições de intensidades são, geralmente, projetadas para uma faixa típica de condições, as quais incluem altura de montagem de luminárias, posição transversal de luminárias, espaçamento, posicionamento, largura das vias a serem efetivamente iluminadas, porcentagem do fluxo luminoso na pista e áreas adjacentes, mantida a eficiência do sistema [14].

No projeto ou readequação de um sistema outros normas conforme explicitados em [23], podem ser solicitadas:

- ABNT IEC/TS 62504: 2013 - Termos e definições para LEDs e os módulos de LED de iluminação geral

- NBR IEC 62031: 2013 - Módulos de LED para iluminação em geral - Especificações de segurança
- NBR 16026: 2012 – Dispositivo de controle eletrônico C.C. ou C.A. para módulos de LED – Requisitos de desempenho
- NBR IEC 62722-2-1: 2016 - Desempenho de luminárias - parte 2-1: Requisitos particulares para luminárias LED
- NBR 5181: 2013 - Sistemas de iluminação de túneis - requisitos
- NBR 15129: 2012 - Luminárias para iluminação pública — Requisitos particulares
- NBR IEC 60598-1: 2010 - Luminárias - parte 1: Requisitos gerais e ensaios
- ABNT NBR 5123:2016 – Relé fotoelétrico e tomada para iluminação – Especificação e método de ensaio
- ABNT NBR 5461:1991 – Iluminação
- ABNT NBR 13593:2011 – Reator e ignitor para lâmpada a vapor de sódio a alta pressão – Especificações e ensaios
- ABNT NBR 14744:2001 – Poste de aço para a iluminação
- ABNT NBR IEC 60529: 2017 – Graus de proteção para invólucros de equipamentos elétricos (código IP)
- Lei nº 9503 de 23 de setembro de 1997 – Código de Trânsito Brasileiro

O seguimento dos padrões fornecidos resulta em padronização, proteção e melhor qualidade do sistema.

2.4.1 Classificação das Vias e Nível de Tráfego

A norma ABNT NBR 5101 para iluminação pública preconiza que as vias públicas sejam iluminadas de acordo com a classificação do tipo de via e fluxo de veículos, fixando critérios para uma qualidade mínima na iluminação pública com a intenção de garantir segurança satisfatória no tráfego de pedestres e veículos.

A classificação das vias segue as disposições do Código de Trânsito Brasileiro e também deve ser levar em consideração, as Tabelas 2.4 e 2.5 abaixo, conforme adaptação da NBR 5101.

A Tabela 2.4 define a classificação do volume de tráfego de veículos motorizados e de pedestres em vias públicas, enquanto que a Tabela 2.5 define as classes de iluminação para cada tipo de via.

Tabela 2.4 – Tipo de Tráfego Motorizado e de Pedestres. Fonte: Adaptado de [14].

Classificação	Tipo de tráfego	
	Motorizado*	Pedestres
Leve (L)	150 a 500	Ocupação em ruas residenciais médias
Médio (M)	501 a 1 200	Ocupação em ruas comerciais secundárias
Intenso (I)	Acima de 1 200	Ocupação em ruas comerciais principais

Valor máximo das médias horárias obtidas nos períodos compreendidos entre 18 h e 21 h. Valores para velocidades regulamentadas por lei.
 *Para vias com tráfego menor do que 150 veículos por hora, consideram-se as exigências mínimas do grupo leve (L)

Tabela 2.5 – Classes de Iluminação Para Cada Tipo de Via. Fonte: Adaptado de [14]

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

2.4.2 Níveis de Iluminância e Fatores de Uniformidade

O nível de Iluminância e fator de Uniformidade mínimo para cada tipo de via é obtido na ABNT NBR 5101 e apresentado na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 – Requisitos Mínimos de Iluminância Média, Uniformidade e Luminância Média Para Cada Classe de Iluminação. Fonte: Adaptado de [14].

Classe de iluminação	Iluminância média mínima (E _{med} , min lux)	Fator de uniformidade mínimo (U _o = min/E _{med})	Luminância Média Mínima (L _{med} , min cd/m ²)
V1	40	0,4	2,00
V2	20	0,3	1,50
V3	15	0,2	1,00
V4	10	0,2	0,75
V5	5	0,2	0,50

2.4.3 Topologias de Postejamento de Iluminação Pública

Além dos valores luminotécnicos requeridos para a via, a distribuição dos pontos deve observar os custos envolvidos no projeto e a diversidade construtiva do local: quaisquer componentes que possam interferir na montagem do sistema de iluminação [16].

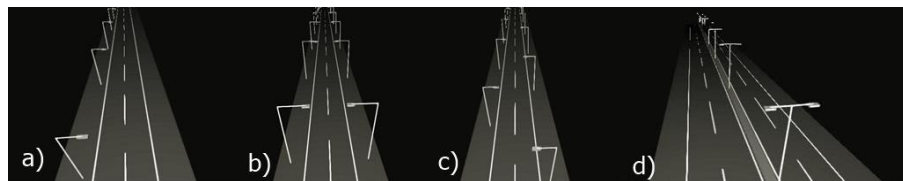


Figura 2.8 – Topologias de Postejamento de Iluminação Pública. Fonte [24].

Seguindo os critérios estabelecidos por COPEL em [16], ilustrado na Figura 2.8, os tipos mais comuns de disposição dos postes de iluminação pública são:

- Postejamento Unilateral:** Neste arranjo postes são colocados todos em uma das laterais da via com espaçamento aproximadamente igual, normalmente são aplicados em vias coletoras e locais com largura máxima da pista de rodagem de 9 metros com tráfego motorizado leve ou médio.

- b) **Posteamento Bilateral com Centros Oposto:** Neste arranjo, as luminárias estão distribuídas pelos dois lados da via, onde cada uma das luminárias de um lado está confrontando uma luminária correspondente, no outro lado da via. É utilizada em vias de tráfego intenso em com pista de rolamento de largura de até 18 metros.
- c) **Posteamento Bilateral Com Centros Alternados:** A distribuição das luminárias é feita pelas duas laterais da via, objetivando que estejam dispostas de maneira que as luminárias do lado oposto da via estejam posicionadas exatamente na direção do centro do vão entre estas luminárias, mantendo uma distância padrão aproximada entre uma luminária de um lado da via e as outras duas luminárias mais próximas do lado oposto. Utilizado em vias com tráfego motorizado intenso e com largura de pista de rodagem de até 16 metros.
- d) **Posteamento Central Duplo:** utiliza duas luminárias instaladas em um único apoio, utilizado em vias que possuem canteiro central. Pode ser usado quando a largura das pistas for maior ou igual à altura de montagem e quando a largura do canteiro central não ultrapassar 3 metros.

3 Principais Componentes da Iluminação Pública

Os sistemas de iluminação pública são caracterizados por todo o conjunto que propicia e compõe o conjunto de iluminação [8]. Desde as lâmpadas incandescentes até aos LEDs, vários tipos de lâmpadas foram sendo desenvolvidas para uso nos sistemas de iluminação, melhorando a sua eficiência e outras características luminotécnicas [25]. A seguir serão apresentados os principais componentes existentes nos sistemas de iluminação pública.

3.1 Lâmpadas de Descarga em Alta pressão

A lâmpada é o principal componente dos sistemas de iluminação pública, esta transforma energia elétrica em energia luminosa e/ou energia térmica. A potência e o fluxo luminoso nominal da lâmpada são os dados que caracterizam o sistema de iluminação pública, porém, todos os outros componentes do sistema devem atuar de forma integrada que seja efetivamente aproveitado todo o fluxo luminoso que é produzido pela lâmpada [8].

Atualmente, as lâmpadas de descarga em alta pressão são as mais utilizadas nos sistemas de iluminação pública [9]. Neste tipo de lâmpada o fluxo luminoso é produzido, direta ou indiretamente, pela passagem de corrente elétrica através de uma mistura gasosa composta de gases inertes e vapores metálicos. Essa mistura de gases é confinada em um invólucro translúcido, chamado de tubo de descarga, que contém em suas extremidades eletrodos que são responsáveis pela interface entre a descarga e o circuito elétrico de alimentação [9,11]. A seguir são apresentados os tipos de lâmpadas de descargas mais utilizados nos sistemas de iluminação pública.

3.1.1 Lâmpadas de Vapor de Mercúrio em Alta Pressão

Tem o seu princípio de funcionamento baseado na produção de luz através da excitação de gases provocada por corrente elétrica [16].

Consiste de um arco de tubo de quartzo com eletrodos de tungstênio em cada extremidade. O arco de tubo contém uma quantidade pequena de mercúrio em uma atmosfera de argônio. Um eletrodo de partida em série com um resistor limitador de corrente é localizado perto de um dos eletrodos principais. O tubo é encaixado com um vidro revestido de fósforo, enquanto o espaço entre o tubo e o vidro é preenchido com um gás inerte [5]. Quando a tensão

é aplicada entre os principais eletrodos, a diferença na tensão entre o eletrodo de partida e um dos eletrodos principais ioniza o gás no tubo. Quando a corrente começa a fluir, um resistor em série com o eletrodo de partida limita a corrente. Depois que a ionização começa, uma descarga entre os eletrodos principais torna-se possível e a corrente circula entre os eletrodos principais, removendo o eletrodo de partida e o resistor do circuito. O mercúrio se vaporiza, produzindo luz que, ao passar pelo revestimento de fósforo, tem seu índice de reprodução de cor melhorado [7].

Após a partida, as lâmpadas de vapor de mercúrio em alta pressão apresentam uma alta condutância, sendo necessária a utilização de reatores para limitar a corrente elétrica de alimentação [16]. A tensão de ignição é muito afetada pela temperatura ambiente, uma vez que os diversos gases existentes no tubo de descarga apresentam diferentes variações da pressão com a temperatura. Observa-se um aumento da tensão de ignição com a diminuição da temperatura ambiente [9]. Figura 3.1 indica o modelo.

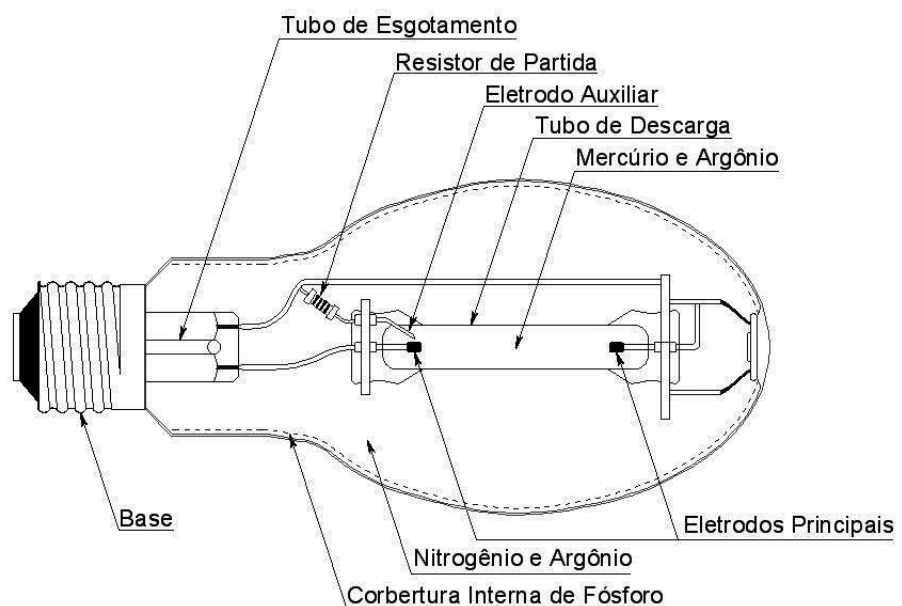


Figura 3.1 – Características Mecânicas de uma Lâmpada de Vapor de Mercúrio Comum em Sistemas de Iluminação Pública. Fonte [11].

3.1.2 Lâmpada de Vapor de Sódio em Alta Pressão

Tem princípio de funcionamento similar ao das lâmpadas de vapor de mercúrio, porém tendo como diferença básica a adição de sódio [16].

Neste tipo de lâmpada, uma pequena quantidade de sódio misturada com mercúrio é colocada numa cápsula de vidro contendo xénon no seu interior. Durante o processo de aquecimento da lâmpada, o sódio e mercúrio vaporizam-se gradualmente, fazendo com que a lâmpada emita uma luz ténue e, à medida que a pressão vai aumentando, a intensidade de luz vai igualmente aumentando, até estabilizar. Quanto maior for a potência da lâmpada, maior será a temperatura no seu interior e quanto maior for a temperatura, maior será a pressão do vapor e menor a resistência elétrica da lâmpada [25]. A figura 3.2 mostra o modelo.

Suas características físicas exigem que na sua partida seja necessário um pulso de alta tensão com duração de poucos microssegundos, chamado de pulso de ignição. Este pulso de curta duração é suficiente para causar a ionização do gás [7]. A combinação de espectro amplo, alta eficácia e vida útil longa, torna essa tecnologia muito atrativa para diversas aplicações. Atualmente, são largamente empregadas em sistemas de iluminação pública, o lado negativo é o seu baixo IRC e a cor amarelada da luz emitida.

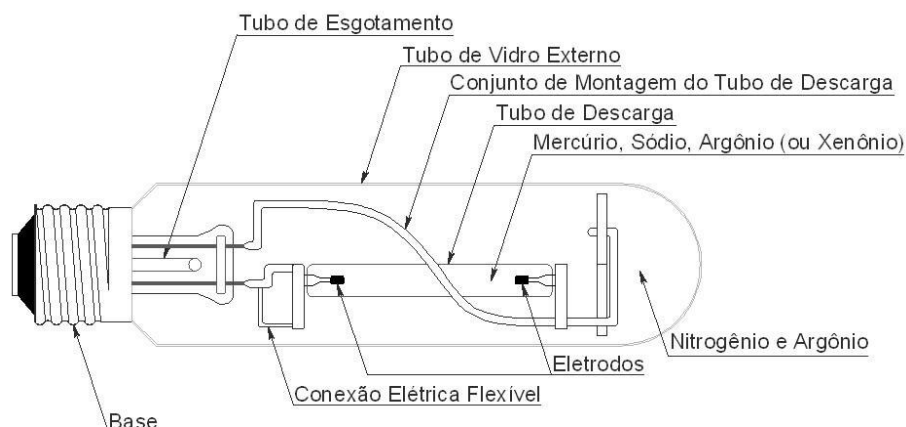


Figura 3.2 – Lâmpada de Vapor de Sódio Tubular, Comumente Utilizada em Sistemas de Iluminação Pública. Fonte [11].

3.1.3 Lâmpada a Multivapores Metálicos

Este tipo de lâmpada é uma evolução da lâmpada a vapor de mercúrio e fisicamente é similar a uma lâmpada de vapor de sódio. Devido a temperaturas e pressão altas, os sais de haleto metálicos no tubo se dissociam no calor do plasma em íons de metal e iodo. Os íons de metal emitem fótons no espectro visível quando atingidos por fótons de luz ultravioleta. Controlando a composição química dos sais, torna-se possível alterar as características da luz emitida [11]. Para acender, uma lâmpada de haleto metálico pode demorar de 1 a 15 minutos.

Em sua partida, um resistor limita a corrente e assim que a temperatura de operação é atingida, o resistor é curto-circuitado e uma tensão é aplicada no tubo [7].

Devido ao seu Índice de Reprodução de Cores alto, são utilizadas em aplicações fotográficas, bem como iluminação de campos esportivos. Algumas desvantagens dessa tecnologia são a emissão de luz ultravioleta e a possibilidade de explosão [5]. A figura 3.3 ilustra o modelo da lâmpada.

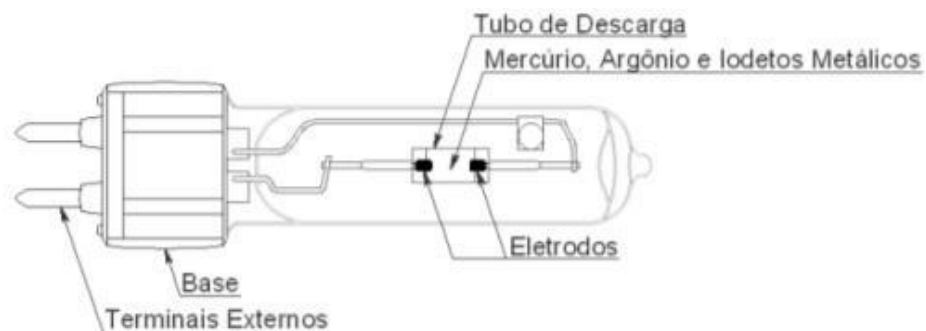


Figura 3.3 – Lâmpada a Multivapor Metálico Comumente Utilizada em Sistemas de Iluminação Pública.

Fonte [11].

3.2 Equipamentos Auxiliares

3.2.1 Reatores

Como a grande maioria das lâmpadas utilizadas em iluminação pública são as de descarga, os reatores são equipamentos fundamentais destes sistemas. O reator é um dispositivo externo a lâmpada, que possui impedância positiva, a fim de estabilizar a corrente no ponto de operação nominal [11].

Após a ignição, a lâmpada de descarga apresenta uma impedância dinâmica (derivada da tensão em relação à corrente) negativa. Ou seja, à medida que a corrente que circula pela lâmpada tem seu valor aumentado, a tensão em seus eletrodos diminui. Os reatores mais utilizados são os eletromagnéticos. Esses equipamentos são de baixo custo, robustos, recicláveis, têm longa vida útil, elevado fator de potência e os modelos mais atuais possuem eficiência acima de 90%. Entretanto, possuem elevado peso e volume, ruído audível, efeito estroboscópico, sensibilidade a variações de tensão da rede elétrica de alimentação e não são dimerizáveis [7].



Figura 3.4 – Reator Externo para Lâmpada a Vapor de Mercúrio. Fonte [16].

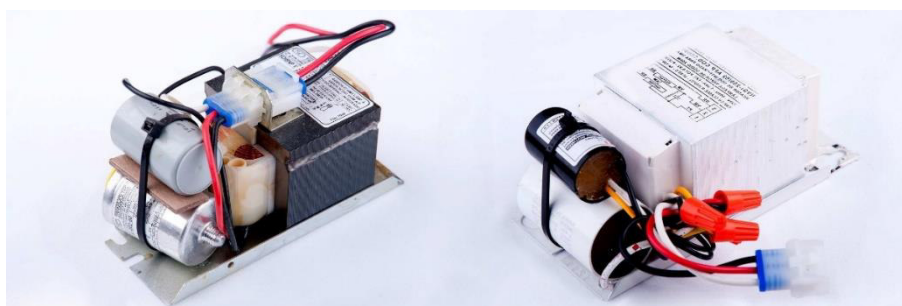


Figura 3.5 – Reatores Internos. Fonte [16].

Já os reatores eletrônicos para lâmpadas de descarga em alta pressão possuem maior eficiência, menor peso e volume, ausência de flicker e efeito estroboscópico e possibilidade de incorporar dimerização. Adicionalmente, podem estender a vida útil das lâmpadas e promover melhor estabilidade luminosa ao longo da vida útil do bulbo [7]. Apesar de todas estas vantagens, existem poucos reatores eletrônicos para lâmpadas de descarga em alta pressão no mercado. Um dos fatores que mais contribuem para isso é a ocorrência do fenômeno da ressonância acústica, que afeta todos os tipos de lâmpadas de descarga em alta pressão quando alimentadas com frequências acima de alguns poucos quilohertz [11]. A ocorrência desse fenômeno ocasiona instabilidade no arco de descarga, podendo produzir cintilação luminosa, mudança de cor, desgaste dos eletrodos, extinção do arco de descarga, ou em casos extremos, a quebra do tubo de descarga.

3.2.2 Ignitores

É um dispositivo utilizado para acionar lâmpadas de vapor de sódio e de multivapores metálicos. Funcionam gerando pulsos de alta tensão, na ordem de quilovolts, para que sejam ionizados os gases existentes no tubo de descarga, fazendo com que se estabeleça uma corrente no seu interior, sendo que o pulso de tensão necessário para a ignição da lâmpada é proporcional ao tamanho do tubo de descarga e a potência da lâmpada em questão[7].

3.2.3 Relé Fotoelétrico

Também conhecido como fotocélulas, são utilizados para controlar o acendimento e o desligamento das lâmpadas de forma automática de acordo com a luminosidade do ambiente. Podem controlar o acendimento de um ponto individual ou de um grupo de lâmpadas. Seu princípio de funcionamento basicamente consiste na abertura e fechamento de um contato elétrico, como já dito, de acordo com a luminosidade do ambiente [7]. Para acionamento dos circuitos de iluminação, existem equipamentos disponíveis que utilizam como referência horários pré-determinados, movimento ou nível de Iluminância.

Os princípios de funcionamento dos relés podem ser térmicos, que se baseiam na detecção de corrente elétrica produzida através da deformação de lâminas bimetálicas; magnéticos, que alterna a posição de seus polos através da força gerada por um campo magnético (mecanismo denominado chave eletromecânica) que, por sua vez, é gerado quando uma corrente originada pela sensibilização de uma fotocélula flui em sua bobina; e/ou eletrônicos, que também se utiliza de chave eletromecânica, porém com a corrente utilizada para sensibilizá-la proveniente de circuitos eletrônicos [16]. Baixo custo de produção e durabilidade razoável levam os relés com acionamentos magnéticos e eletrônicos a serem mais comercializados e utilizados nos sistemas de iluminação pública.

Os tipos de controle de iluminação pública mais aplicados no Brasil são: comando individual, comando em grupo. No primeiro caso o relé foto controlador controla o liga e desliga de uma só lâmpada, estando sempre energizado e conectado à rede, sendo a maneira mais econômica de se ligar a iluminação pública. Já no segundo tipo, o comando é realizado em duas ou mais lâmpadas [26].



Figura 3.6 – Exemplo de Relés Fotoelétricos. Fonte: Retirado de [16].

3.2.4 Dispositivos de Proteção

O disjuntor tem a função de proteger o circuito contra sobrecargas e curto-circuito, enquanto o para-raios tem a função de proteger o circuito contra surtos de tensão, normalmente de origem atmosférica [11].

3.3 Luminárias

As luminárias exercem três funções básicas para o sistema de iluminação pública: prover meios para instalação da mesma e dos componentes elétricos; distribuir o fluxo luminoso proveniente da lâmpada e manter as condições ambientais adequadas para operação dos componentes [9]. As luminárias são equipamentos responsáveis por abrigar a lâmpada, protegendo-a de variações de clima e agentes externos [27]. Composta por um conjunto óptico (refletor e difusor), que tem a função de direcionar o fluxo luminoso emitido pelas lâmpadas para iluminar apenas as áreas de interesse, reduzindo, assim, a poluição luminosa causada pela dispersão de luminosidade, conforme ilustrado na Figura 3.7.

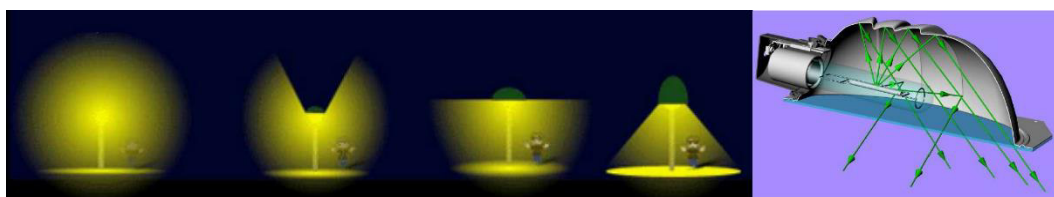


Figura 3.7 – Da Esquerda Para a Direita está Exemplificado o Aumento na Eficiência Luminosa das Luminárias. Conjunto Óptico Eficiente. Fonte [16].

Os requisitos particulares para as luminárias destinadas à iluminação pública, são regidos pela norma nacional NBR 15129 [28]. Características importantes que devem ser analisadas são o seu rendimento luminotécnico, a distribuição fotométrica, o grau de proteção, a resistência elétrica, a resistência mecânica, a segurança elétrica, entre outras características [9].

3.3.1 Rendimento Luminotécnico

O rendimento luminotécnico da luminária é determinado pela razão do fluxo total emitido, medido em condições específicas, para o fluxo luminoso total das lâmpadas individuais que se encontram dentro da luminária determinando a proporção do fluxo luminoso total da lâmpada que a luminária consegue emitir, e quanto é perdido dentro da própria luminária [27]. Um dos fatores mais importantes é a quantidade de fluxo luminoso que efetivamente atinge a área a ser iluminada, o que está relacionado com a distribuição fotométrica da luminária.

3.3.2 Grau de Proteção

As luminárias são classificadas de acordo com o tipo de proteção contra a penetração de pó, objetos sólidos e umidade. O grau de proteção é indicado pelas letras *IP* (*Ingress Protection*) seguidas de dois algarismos: o primeiro indica o grau de proteção contra o ingresso de corpos estranhos e poeira e o segundo algarismo indica o grau de vedação contra a penetração de água [27]. É um código que representa a capacidade de proteção, por meio de um invólucro, contra a entrada de sólidos e água no seu interior, tendo sua proteção sido verificada em ensaios.

Nas luminárias LED, instaladas em ambientes com uma atmosfera mais "agressiva", é importante considerar o *Índice de Proteção (IP)* contra poeira e umidade, indicado pelo fabricante, pois as partes metálicas, como os contatos elétricos e os circuitos e componentes eletrônicos, em especial o driver de alimentação e os LEDs, podem sofrer danos com a umidade ou perda de performance com a poeira ou qualquer outro resíduo sólido, que também podem causar algum dano funcional, conforme o tipo de material em suspensão no ar. Por isso, as luminárias LED necessitam de proteção, que deverá ser mais rigorosa conforme riscos de danos aos quais estarão submetidas, visando minimizar as falhas e a necessidade de manutenção [29].

Na tabela 3.1, no primeiro bloco é registrada a proteção contra sólidos faixa numérica de 0 a 6 e no segundo bloco contra líquidos faixa numérica de 0 a 9. Ao lado do número, é

descrita a situação. A combinação de um número da proteção contra sólidos e um número da proteção contra líquidos, representa o grau de proteção da luminária.

Tabela 3.1 – Graus de Proteção. Fonte adaptado de [29].

GRAU DE PROTEÇÃO DE EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS	
1º Dígito	Descrição
0	Não protegido
1	Protegido contra objetos sólidos de dimensão maior que 50 mm
2	Protegido contra objetos sólidos de dimensão maior que 12,5 mm
3	Protegido contra objetos sólidos de dimensão maior que 2,5 mm
4	Protegido contra objetos sólidos de dimensão maior que 1,0 mm
5	Protegido contra ingresso de poeira
6	Totalmente protegido contra o ingresso de poeira
2º Dígito	Descrição
0	Não protegido
1	Protegido contra queda vertical de gotas de água
2	Protegido contra queda de gotas com inclinação de 15° com a vertical
3	Protegido contra água aspergida
4	Protegido contra projeções de água
5	Protegido contra jatos de água
6	Protegido contra jatos potentes de água
7	Sob determinadas condições de tempo e pressão, não há ingresso de água
8	Adequado à submersão contínua sob condições específicas
9	Protegido contra jato de água de alta pressão e alta temperatura

O driver de alimentação geralmente utiliza tecnologia de fonte chaveada, funcionando em uma frequência alta de comutação do circuito que converte uma alta tensão DC (AC retificada) em uma tensão mais baixa para os LEDs, com corrente estável. Normalmente, a luminária de iluminação pública tem potência alta e trabalha quente, principalmente devido ao calor gerado pelos LEDs, irradiado por um elemento dissipador, que pode ser inclusive o próprio corpo da luminária [29].

3.4 Sistema de Fixação: Braços e Suportes

São os braços ou suportes que têm a função de sustentar as luminárias e servir de eletroduto para a fiação necessária que conecta o ponto de iluminação à rede elétrica. Com relação a adequada distribuição da luminosidade, o ângulo de fixação da luminária é de

fundamental importância, pois pode comprometer o conjunto óptico. Além disso, os braços ou suportes, devem ser suficientemente resistentes mecanicamente para suportar o peso das luminárias e também os esforços provocados por variações climáticas e agentes externos [16]. Atualmente, existem inúmeras possibilidades de construção de braços e suportes para iluminação pública, variando a escolha de acordo com a necessidade do local de instalação.

Normalmente, a iluminação pública é instalada em postes da rede aérea existente da concessionária local. Porém, em projetos específicos de iluminação pública com rede de distribuição subterrânea, são utilizados postes de aço ou concreto especialmente desenvolvidos para este fim. Ao contrário dos postes utilizados em redes de distribuição aérea, estes postes possuem resistência mecânica dimensionada apenas para os esforços provenientes das luminárias e projetores [27].

3.5 Luminárias LEDs para Iluminação Pública.

A estrutura simplificada de uma luminária LED aplicada em iluminação pública é composta basicamente por quatro partes: LEDs, Driver, lentes e dissipadores de calor. Ilustrada na Figura 3.8.

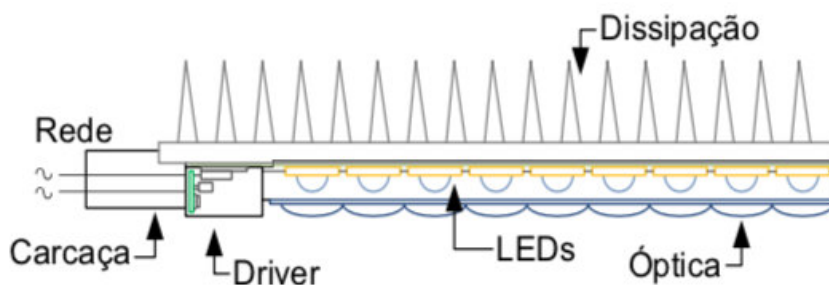


Figura 3.8 – Estrutura de uma Luminária LED para Iluminação Pública. Fonte [11].

Os LEDs são responsáveis pela emissão de fluxo luminoso, enquanto, o driver controla a corrente de alimentação e a dimerização, caso seja utilizado, a Lente tem o papel de direcionar, concentra e distribui o fluxo luminoso e por fim o dissipador de calor auxilia na dissipação de calor produzida por efeito joule nos componentes da luminária [30].

3.5.1 LEDES orientados à Iluminação Pública.

LED é um dispositivo semiconductor que gera luz de forma eficiente quando polarizado, nestes materiais, a luz é emitida através da recombinação de elétrons e lacunas em excesso que são produzidos por injeção de corrente com pequenas perdas de energia. Este fenômeno é conhecido como eletroluminescência e é a base de funcionamento de todos os LEDs [7]. Segundo a organização internacional IEC - International Electrotechnical Commission é definido como “dispositivo de estado sólido que contém uma junção p-n, que emite radiação óptica quando excitado por uma corrente elétrica” [31].

O LED é um diodo semiconductor, ou seja, é constituído por uma junção p-n de semicondutores dopados. Esta região de fronteira é conhecida como região de depleção. Quando uma junção semicondutora é polarizada diretamente, o campo elétrico gerado em seu interior entrega energia suficiente para que ocorra a condução de corrente elétrica que só pode acontecer em uma direção [7].

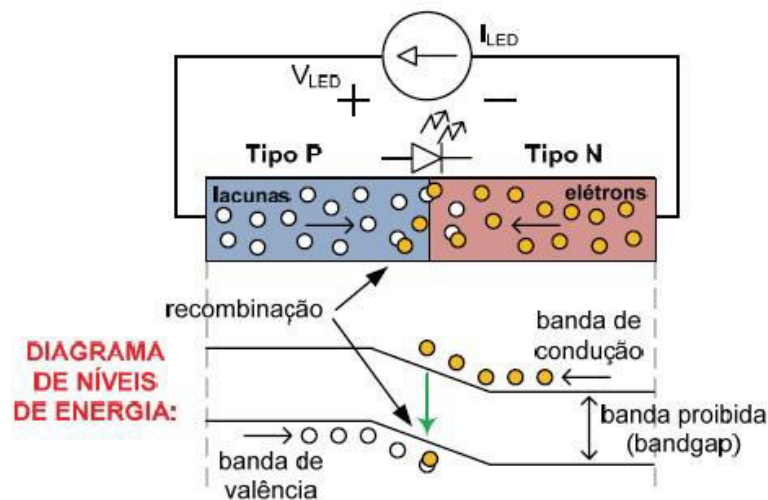


Figura 3.9 – Princípio de Funcionamento de um LED. Fonte [9].

Quando este cristal é percorrido por uma corrente elétrica no sentido de polarização direta, um fluxo de elétrons se estabelece da região N para a região P, indo em direção ao sentido de maior potencial do campo elétrico, enquanto surge também um movimento aparente de lacunas da região P para a região N. Se um elétron adquire energia suficiente para passar da região N para a região P, a partícula passa de um nível de energia superior (banda de condução) para um nível de energia inferior (banda de valência) e recombina-se com uma lacuna na região

P [9]. Nessa recombinação que ocorre na junção semicondutora, o elétron perde energia na forma de um fóton, ocorrendo a emissão de luz. O comprimento de onda do fóton emitido, que está relacionado à cor da luz emitida, é dado pela diferença entre os níveis de energia (bandgap), que depende do material semicondutor [7]. Conforme ilustrado na Figura 3.9.

De acordo com Rodrigues em [7], ao receber energia suficiente para poder saltar da região N para região P, a recombinação, que é a captura de um elétron livre por uma lacuna, pode acontecer de forma radiante ou não radiante.

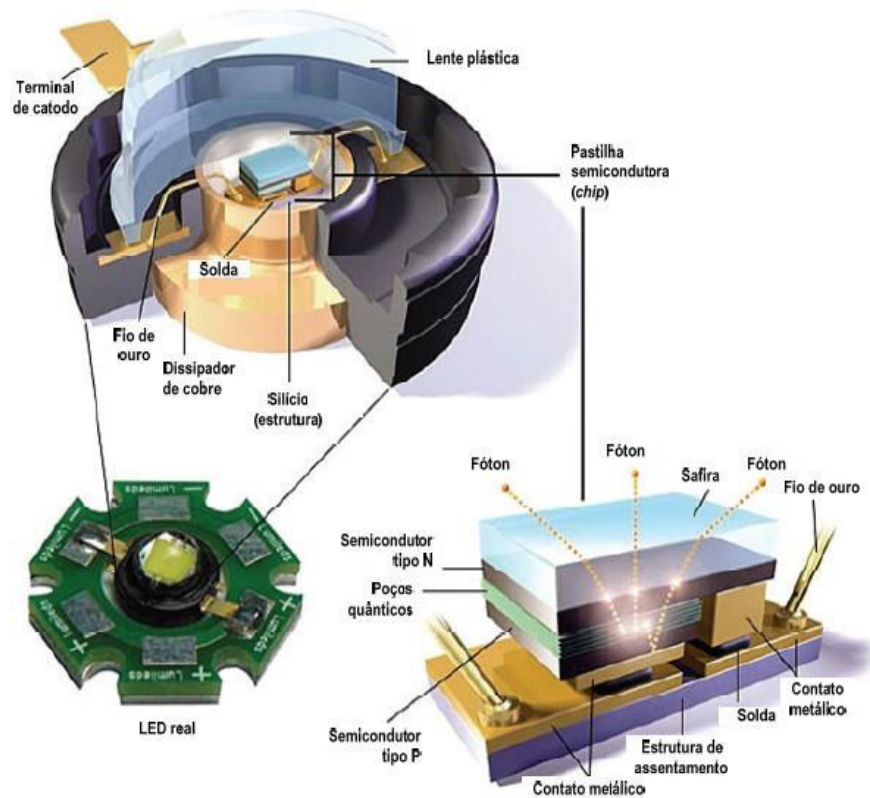


Figura 3.10 – Partes Construtivas de um LED de Potência. Fonte [9].

Conforme ilustrado na Figura 3.10, nos LEDs de potência para extrair o máximo de luz e permitir a dissipação de calor no chip, o mesmo é envolvido em um encapsulamento plástico e assentado sobre um dissipador térmico de cobre ou alumínio, conectado aos terminais do dispositivo através de finos fios metálicos [9]. Segundo Casagrande em [9], para maximizar a extração de luz da pastilha semicondutora, são utilizadas diversas camadas de materiais sobre o chip, que é constituído de um material de índice de refração muito maior do que o do ar utilizando-se camadas de materiais de índice de refração menor que o do semicondutor, numa

geometria adequada, a luz produzida sofre sucessivas refrações que melhoram a eficiência da extração luminosa do LED.

Os LEDs aplicados em iluminação pública estão em dois grupos: HP-LEDs (de potência) e HB-LEDs (alto brilho), ilustrados na Figura 2.19. HP-LEDs, trabalham em elevados níveis de potência com correntes nominais de 300 mA até 1,5 A, enquanto, os HB-LEDs trabalham em baixos níveis de potência com correntes nominais típicas de 20 mA [11]. Os HP-LEDs são os mais indicados para iluminação pública por possuírem maior fluxo luminoso e eficácia luminosa. Ilustrados na Figura 3.11.



Figura 3.11 – Dois Tipos de LED: LED HP (a esquerda) e LED HB (a direita). Fonte [11].

3.5.2 Dissipadores de Calor.

Segundo Rodrigues et al. em [32], o comportamento óptico do LED é influenciado pela variação da temperatura, porque a quantidade de luz emitida cai com o aumento de temperatura da junção, pois a elevação da temperatura provoca o aumento da quantidade de recombinações não radiantes. Além da variação do fluxo luminoso, pode causar alterações na cor da luz emitida pelo LED, uma vez que o comprimento de onda da radiação emitida pelo LED é inversamente proporcional a energia do gap [11]. Como ilustrado nas Figuras 3.12 e 3.13.

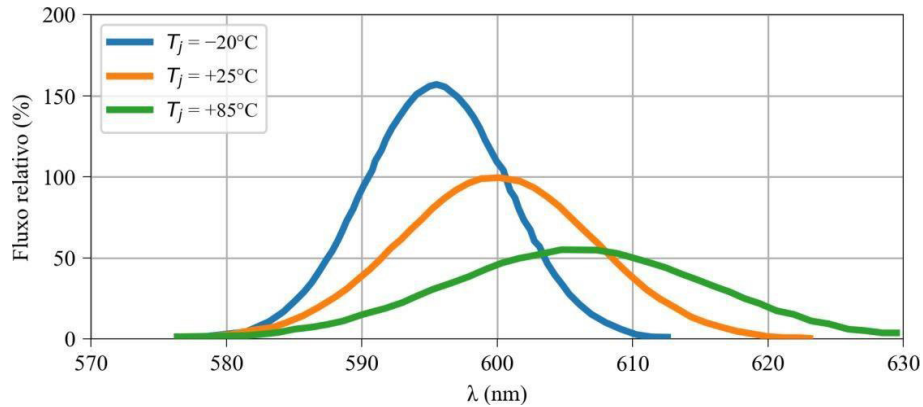


Figura 3.12 – Variação da Distribuição Espectral da Radiação Emitida por um LED. Fonte [32].

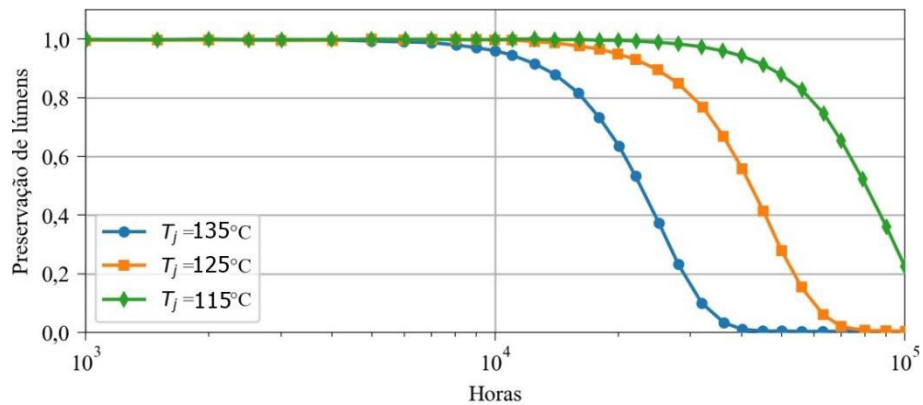


Figura 3.13 – Efeito da Temperatura de Junção na Vida Útil de um LED. Fonte [32].

A estrutura de dissipação térmica é vital para o bom funcionamento de um dispositivo empregando LEDs, por dois fatores: A redução de fluxo luminoso com o aumento da temperatura da junção semicondutora, e o segundo é a degradação geral do dispositivo quando operado em temperaturas elevadas, o que implica na redução da sua vida útil [7]. O dissipador de calor geralmente compõe a estrutura da carcaça que tem uma forma aerodinâmica para dissipar de forma mais rápida e eficaz possível para o ambiente esse calor para que não prejudique a vida útil dos LEDs. É estimado que de 15% a 30% da potência de entrada é convertida em luz, sendo 70% a 85% convertida em calor nos LEDs de Potência [9].

3.5.3 Drivers para Acionamento de Luminárias LEDs

As luminárias LED necessitam de um dispositivo eletrônico para adequar o nível da corrente de alimentação do conjunto de LEDs. Estes dispositivos são conhecidos como drivers e podem além de prover o correto funcionamento dos LEDs, incorporar uma série de outras

funcionalidades à luminária (como dimerização, telecomunicação etc.). O driver deve ser robusto e confiável o bastante para que a luminária possa atingir o tempo de vida esperado do conjunto de LEDs. De maneira geral, os drivers são conversores eletrônicos de potência que têm por finalidade acionar os LEDs em uma corrente definida, de valor médio constante e adequado para não causar aceleração da depreciação do fluxo luminoso emitido pelos LEDs. Fazem a interface entre a rede elétrica, de baixa frequência e tensão senoidal, e a carga formada por um ou mais arranjos de LEDs, associados de maneira adequada (paralelo, série, série-paralelo, matricialmente etc.) [11].

Existem basicamente duas famílias de drivers para LEDs: as que empregam circuitos passivos e as que empregam circuitos ativos. A desvantagem dos drivers passivos é que por trabalharem em baixa frequência (na frequência da rede), apresentam volume bem maior do que o dos drivers ativos [7].

3.6 Análise Comparativa entre Luminárias LED e Luminárias Convencionais.

A Tabela 3.2 apresenta uma análise comparativa entre as luminárias convencionais e as luminárias LEDs. São considerados apenas os aspectos principais, expondo valores máximos e mínimos presentes nos catálogos, que variam de fabricante para fabricante.

Tabela 3.2 – Comparação das Características Fundamentais dos Principais tipos de Lâmpadas.

Fonte [33].

Tipo de Lâmpada	Eficácia luminosa (lm/W)	Vida útil (h)	IRC (%)	Temperatura da cor (K)
Vapor de mercúrio	46 - 55	9.000 - 15.000	40 - 55	3.900 - 4.300
Vapor metálico	82 - 104	8.000 - 12.000	65 - 85	3.000 - 4.200
Vapor de sódio	80 - 150	18.000 - 32.000	22	1.950 - 2.800
LED	35 - 130	50.000 - 100.000	75 - 95	5.000 - 6.500

Com base no estudo realizado por Nogueira et al. em [12], de um projeto piloto de instalação de 44 luminárias LED em substituição a luminárias Vapor de Sódio em alta pressão. As luminárias LED escolhidas, comparadas com as luminárias com lâmpadas de vapor de sódio anteriores, apresentaram características elétricas superiores, tanto em qualidade de energia, quanto em economia, conforme na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Comparação entre Características Elétricas das Lâmpadas Vapor de Sódio e LED.

Adaptado de [12].

Tipo de Lâmpada	Luminárias LED	Luminária com Lâmpada de Vapor de Sódio
Tensão de Entrada (V)	220	220
Corrente de Entrada (A)	0,714	1,40
Potência Total de Entrada (W)	157	280 (lâmpada + reator)
Fator de Potência	0,97	0,893
THDi (%)	10,2	21,88
Potência Instalada (44 luminárias)	6,9	12,39

3.7 Vantagens e Desvantagens da Tecnologia LED.

As principais Vantagens do LED são: excelente rendimento luminoso, alta durabilidade, temperatura de cor entre 2700 K e 6500 K, baixo consumo de energia e manutenção reduzida [5]. Abaixo é detalhado os benefícios multivariados do uso dessa tecnologia [25].

Os benefícios são de natureza:

Econômicos:

- Poupança entre 30% a 70%, dependendo da aplicação da lâmpada;
- Dispensa de utilização de Reator, eliminando as perdas de potência decorrentes dele;
- Tempo de vida útil longo;
- Manutenção baixa;
- 5 anos de garantia.

Segurança:

- Lâmpada segura, com os índices de proteção correspondentes;
- Anti-explosiva, dado que não gera incandescência por aquecimento de filamentos;
- Calor emitido inferior a 80°C;
- Compatibilidade eletromagnética;

- Elevada resistência a choques e vibrações;
- Peso reduzido.

Elétricos e luminosos:

- Acende instantaneamente;
- Redução de 10% dos harmônicos produzidos;
- Fator de potência superior a 92%;
- Boa eficácia luminosa e IRC;
- Adequado para utilização em interiores e exteriores;
- Admite a possibilidade de regulação de fluxo luminoso;
- Irradiação de cores intensas com uma enorme eficiência;
- Funciona em corrente contínua sem necessidade de converter a tensão para 220 V/AC, evita-se o inversor e a perda de potência no mesmo;
- Possibilidade de criar diferentes tonalidades de luz (verde, azul, amarelo, vermelho – sistema RGB);
- Possível fazer dimerização da sua intensidade.

Ecológicos:

- Baixas emissões de raios UV;
- Contribuição para a diminuição de emissões de CO₂, consequência dos seus baixos consumos energéticos;
- Vantagens ambientais e de gestão de resíduos.

As desvantagens dos LEDs, estão relacionadas ao alto preço de compra e a desconfiança no mercado com produtos de má qualidade [25]. Apesar do alto custo projeções apontam que este se reduzirá consideravelmente até 2020, como demonstra a Figura 3.14, viabilizando progressivamente sua utilização em sistemas de iluminação pública [5].

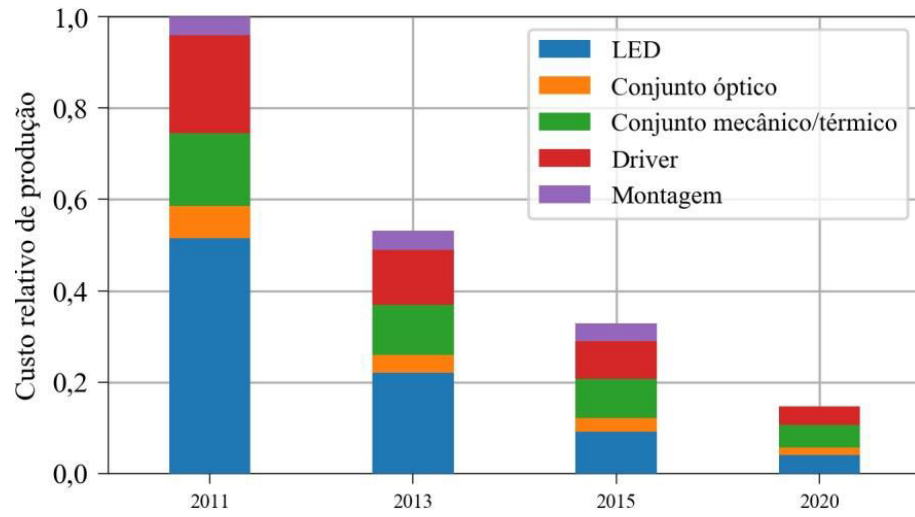


Figura 3.14 – Projeção no Custo de Luminárias LED. Fonte [5].

4 Estudo de Caso

O estudo de caso é direcionado ao município de São José de Ribamar, que atualmente vem implantando medidas para combater o desperdício de energia elétrica, tornando mais eficientes os sistemas regidos pelo município a longo prazo, através de uma PPP que está atualmente em processo de substituição de toda a malha de iluminação pública por luminárias LED.

São José de Ribamar é um município brasileiro no estado do Maranhão. Localizado na Ilha de São Luís, juntamente com outros 3 municípios: São Luís, Raposa e Paço do Lumiar. Segundo dados do IBGE, a população estimada no ano de 2018 é de 176.321 habitantes. Com Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM) de 0.708, no senso de 2010. Este índice, medido na escala de zero a um, trata-se da análise de indicadores fundamentais para o diagnóstico do grau de desenvolvimento de um território: sociocultural, ambiental, econômica e político institucional [17,34].

Em 2016, foi publicada a assinatura do contrato do segmento de Iluminação Pública celebrado entre a SJR Iluminação do Futuro SPE S.A. e a Secretaria Municipal de Obras, Habitação, Serviços Públicos e Urbanismo – SEMOSP do Município de São José de Ribamar para Concessão Administrativa para modernização, otimização e expansão, operação e manutenção da infraestrutura da rede de iluminação pública do Município de São José de Ribamar. Atualmente há projetos de retrofit das lâmpadas destinadas a iluminação pública por luminárias a LED [33].

4.1 Classificação do Cenário de Estudo

A Avenida Panaquatira, via definida como cenário de estudo, comporta-se como uma via radial no município de São Jose de Ribamar. Sua origem se dá a 2 Km do término da MA-201, e se estende por aproximadamente 7,7 Km até Praia de Panaquatira. Conforme ilustrado na Figura 4.1. Nesta avenida encontram-se instalados comércios medianos e é rota para se deslocar a vários bairros, praias, etc.

De acordo com a NBR 5101, esta Avenida classifica-se como uma via urbana V3, devido a existência de construções as suas margens, pela presença de tráfego motorizado e por

pedestres. Uma via aberta a circulação pública na área urbana, caracterizada principalmente pela existência de imóveis em boa parte de sua extensão.

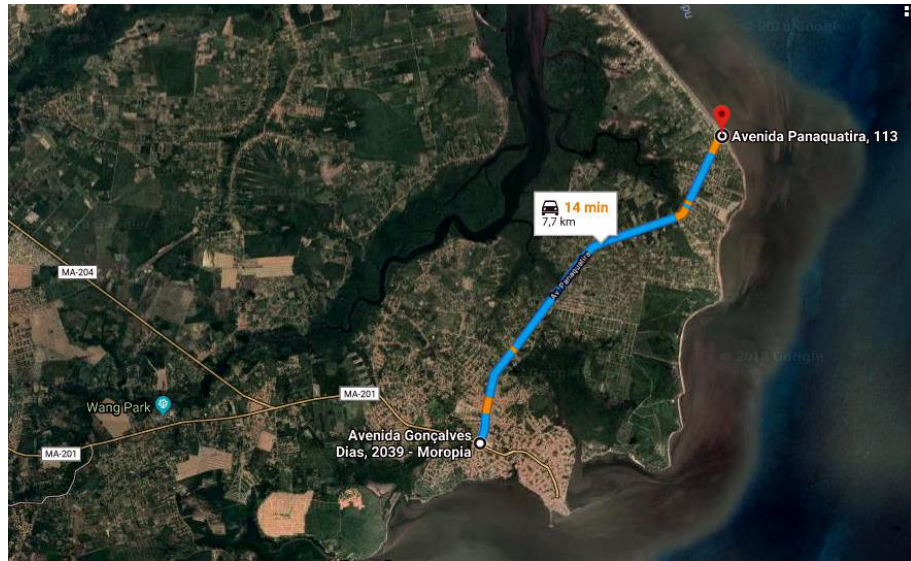


Figura 4.1 – Representação da Avenida Panaquatira. Fonte [35].

A Via pode ser dividida em três trechos principais, o trecho AC, que parte da MA-201 e se estende por até 5,8 Km, de pista única e posteamto unilateral. O trecho CD inicia a partir do fim do primeiro trecho e se estende por 1,7 Km e, é o único trecho já duplicado da via, com posteamto central duplo, e o trecho DE que possui aproximadamente 0,2 km de pista única e posteamto unilateral. Conforme a figura 4.2 e também ilustrados nas Figuras no apêndice A.

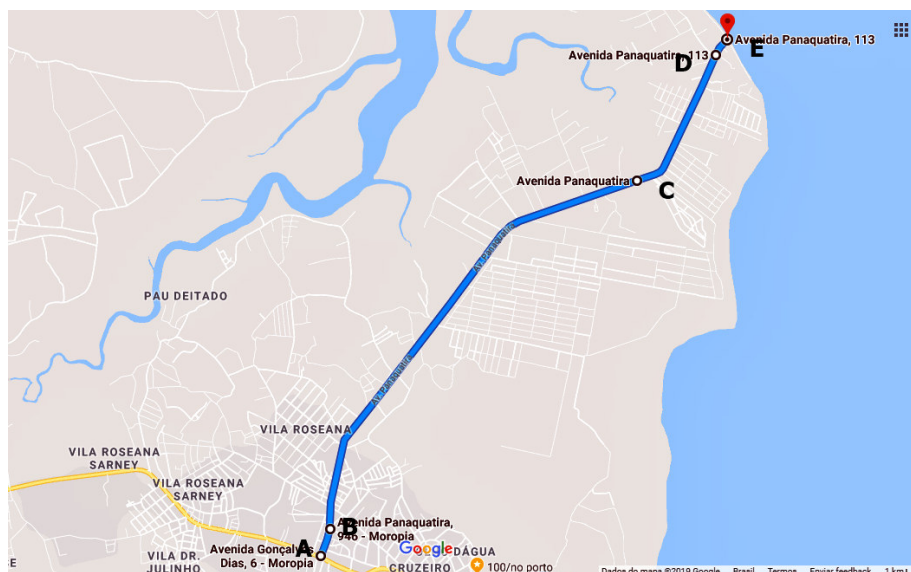


Figura 4.2 – Representação de Trechos da Avenida Panaquatira. Fonte [35].

4.2 Análise de Viabilidade Econômica

Para validar a viabilidade do investimento, existem vários modelos econômicos que podem ser aplicados, entre os quais podemos citar: método do valor presente líquido, método da taxa interna de retorno e payback simples. No presente trabalho utilizaremos apenas o payback simples. A análise proporciona a avaliar se a econômica proposta cobrirá o investimento, ou seja, se existe viabilidade econômica.

4.2.1 Levantamento do Sistema Anteriormente Instalado com Lâmpadas de Vapor de Sódio em Alta Pressão.

O processo de levantamento das informações foi realizado através de visitas ao local registrando a quantidade dos pontos luminosos do sistema anterior de iluminação artificial da Avenida Panaquatira. Os dados obtidos sobre as tecnologias empregadas foram obtidos através da equipe técnica responsável, enquanto que as perdas do reator são de acordo com a norma ABNT NBR 13593 – Reator e ignitor para lâmpada a vapor de sódio a alta pressão — Especificação e ensaios.

No início da Avenida no Trecho AB com extensão de 0,3 Km por conter uma praça paralela com iluminação própria, haviam 9 pontos de iluminação com lâmpadas de 100W, nos demais trechos haviam lâmpadas de 250 W. Destes 131 pontos com posteamento unilateral (1 luminária) e 84 com posteamento centralizado (2 luminárias) no trecho duplicado. Totalizando 224 pontos e 308 Luminárias. Conforme mostra a Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Descrição do Sistema de Iluminação Anterior da Avenida Panaquatira.

Fonte: própria.

Tipo de Lâmpada	Potência Nominal (W)	Perdas no Reator (W)	Pontos de Iluminação	Quantidade de Luminárias
Vapor de Sódio	250	30	131 (simples) 84 (duplo)	299
Vapor de Sódio	100	17	09 (simples)	09
Total de luminárias				308

Como podemos observar todos os pontos de iluminação utilizavam lâmpadas de Vapor de Sódio em Alta Pressão, totalizando 308 Lâmpadas que foram substituídas por Luminárias LED.

4.2.2 Descrição e Detalhamento das Novas Luminárias LEDs Instaladas na Via.

Considerando a substituição direta das luminárias convencionais (retrofit) e buscando manter as condições do projeto luminotécnico original, assegurando que tenham características técnicas iguais ou superiores as existentes, os modelos adotados estão descritos abaixo.

Para a substituição das luminárias convencionais com potência de 100W, foi escolhida a luminária pública LED da linha Philips GreenVision Xtreme de modelo BRP371 A LED87-3S/NW 86W DME NEMA KTL de 86W. Conforme a Figura 4.3 e Figura A.1



Figura 4.3 – Luminária Pública BRP371 A LED87-3S/NW 86W DME NEMA KTL. Fonte [36].



Figura 4.4 – Luminária Pública BRP394 A LED174/NW 129W DM NEMA. Fonte [36].

Para a substituição das luminárias convencionais com potência de 250 W, foi escolhida a luminária pública LED da linha Philips GreenVision Xtreme de modelo BRP394 A LED174/NW 129W DM NEMA de 129 W. Conforme a Figura 4.4 e Figura A.2.

Tabela 4.2 – Especificação Técnica e Características da Luminária Pública BRP371 A LED87-3S/NW 86W DME NEMA KTL. Adaptado de [36].

Luminária Pública BRP371 A LED87-3S/NW 86W DME NEMA KTL	
Potência	86 W
Eficiência luminosa	101.16 lm/W
Vida útil	65.000 horas (70% manutenção do fluxo luminoso @ Ta=35°C)
Fator de potência	> 0,95
IRC	> 70
Classificações	IP66, IK09, Classe I
Garantia	5 Anos
Preço Unitário	R\$ 730,00 reais

As Tabelas 4.2 e 4.3 mostram os principais dados técnicos das atuais Luminárias LED instaladas na Avenida em Estudo. Obtidos dos dados de placa e do catálogo da Philips Lighting em [36], enquanto que os preços das luminárias foram obtidos junto a empresa responsável pela iluminação pública de São José de Ribamar.

Tabela 4.3 – Especificação Técnica e Características da Luminária Pública BRP394 A LED174/NW 129W DM NEMA. Adaptado de [36].

Luminária Pública BRP394 A LED174/NW 129W DM NEMA	
Potência	129W
Eficiência luminosa	134.88 lm/W
Vida útil	65.000 horas (70% manutenção do fluxo luminoso @ Ta=35°C)
Fator de potência	> 0,95 (potência nominal)
IRC	> 70
Classificações	IP66, IK08, Classe I
Garantia	5 Anos
Preço Unitário	R\$ 866,00 reais

4.2.3 Estimativa da Demanda e Consumo de Energia Elétrica dos Sistemas Anterior e Atual.

A tabela 4.4 apresenta os dados de potência do sistema convencional existente antes da implantação com Luminárias LED. Nesse sistema contendo 308 luminárias de Vapor de Sódio em Alta pressão, o cálculo da demanda é realizado através da equação (11).

$$P_{Total} kW = \frac{Q_{Lamp} * (P_{Nom} + P_{reator})}{1000} \quad (11)$$

Tabela 4.4 – Demanda de Potência Ativa do Sistema Antigo da Avenida Panaquatira com Luminárias Convencionais Existentes. Fonte própria.

Tipo de lâmpada	Quantidade	Potência Nominal (W)	Perdas no reator (W)	Potência Total (kW)
Vapor de Sódio	299	250	30	83,72
Vapor de Sódio	09	100	17	1,053
Carga instalada (kW)				84,773

A tabela 4.5 apresenta a estimativa de potência do sistema atual com luminárias LED. O cálculo da demanda de potência ativa é realizado através da equação (12).

$$P_{Total} kW = \frac{Q_{Lumin} * (P_{Nom})}{1000} \quad (12)$$

Tabela 4.5 – Demanda de Potência Ativa do Sistema Atual da Avenida Panaquatira com Luminárias LED. Fonte própria.

Modelo da Luminária	Quantidade	Potência Nominal (W)	Potência total (kW)
BRP394 A LED174/NW 129W DM NEMA	299	129	38,571
BRP371 A LED87-3S/NW 86W DME NEMA KTL	09	86	0,774
Carga instalada (kW)			39,345

Esses dados mostram que, em relação ao sistema com luminárias convencionais existentes, o sistema atual com luminárias LEDs demanda 53,59 % menos potência, ou seja, uma significativa redução. Seguindo esse mesmo raciocínio, é possível estimar também a redução do consumo de energia elétrica entre os sistemas, como apresentado na tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Estimativa do Consumo de Energia Elétrica do Sistema Antigo e do Sistema Atual

Tipo de Luminária	Potência Instalada (kW)	Horas/Dia (horas)	kWh (Dia)	kWh (Mês)	MWh (Ano)
Luminárias convencionais	84,773	12	1017,276	30518,28	371,30574
Luminárias LED	39,345	12	472,14	14164,2	172,3311

$$C_{\text{sódio}} MWh = \frac{P_{\text{Inst}} kW * 12 \text{ horas} * 365 \text{ dias}}{1000} \quad (13)$$

$$C_{\text{LED}} MWh = \frac{P_{\text{Inst}} kW * 12 \text{ horas} * 365 \text{ dias}}{1000} \quad (14)$$

$$EC_{\text{Anual}} MWh = (C_{\text{sódio}} MWh - C_{\text{LED}} MWh) \quad (15)$$

Utilizando as equações (13) e (14) e os dados da Tabela 4.6, obtemos as estimativas de consumo diário é baseada no funcionamento durante 12 horas, período estimado entre 6 horas da tarde as 6 horas da manhã. O consumo mensal é a multiplicação dessa estimativa por 30 e o anual por 365.

Como a potência demandada pelas luminárias LEDs é menor do que as luminárias convencionais, utilizando a equação (15), considerando as 308 Luminárias, com a substituição obtém-se uma economia de consumo de energia ativa em torno de 16354,08 kWh por mês ou 198,97464 MWh por ano.

4.2.4 Payback Simples

A ANEEL fixa o valor da tarifa de energia que deve ser cobrada na fatura atualmente através da Resolução Homologatória Aneel N° 2.438/2018. Onde estipula o valor de R\$ 0,36081/kWh para a tarifa da Classe de Iluminação Pública B4a. Dessa forma considerando os

dados de demanda obtidos na seção 4.2.3, podemos estimar o valor gasto através de uma multiplicação da tarifa pelo consumo mensal de cada um dos sistemas.

Os dados estimados no subitem 4.2.3 apontam uma redução de 16354,08 kWh por mês no consumo de energia ativa com o sistema com luminárias LED em operação, considerando a atual tarifa aplicada de R\$ 0,36081/kWh tem-se uma economia de R\$ 5.900,72 por mês. Do mesmo modo, anualmente, com uma redução no consumo de energia de 198,97464 MWh, tem-se uma economia de R\$ 71.792,04 por ano, conforme a equação (16).

$$EC_{\text{Anual}} = EC_{\text{Anual}}MWh * 10^3T \quad (16)$$

Em adição, pode-se calcular de forma simplificada o tempo de recuperação do capital investido para a instalação das novas Luminárias. Considerando o custo com a mão de obra no valor de R\$ 170,00 por luminária instalada, temos um $C_{M\text{ obra}}$ de R\$ 52.360,00 investido em mão de obra e a substituição é feita de forma retrofit. Os dados da tabela 4.7 estimam o valor aproximado das luminárias do projeto, valendo-se da equação (17), temos o Investimento Total.

Tabela 4.7 – Valor Estimado Total das Luminárias na Avenida Panaquatira. Fonte Própria.

Modelo da Luminária	Quantidade	Preço unitário (R\$)
BRP394 A LED174/NW 129W DM NEMA	299	866,00
BRP371 A LED87-3S/NW 86W DME NEMA KTL	09	730,00
Preço Total das Luminárias (R\$)		265.504,00

Temos na equação (17) que Inv_{total} é o Investimento Total que é dado pelo somatório $P_{T\text{ luminarias}} + C_{M\text{ obra}}$ que são respectivamente, o preço total das luminárias (R\$) e Custo Total investido em mão de obra (R\$). Conforme o método adotado por Nogueira et al. em [14].

$$Inv_{\text{total}} = P_{T\text{ luminarias}} + C_{M\text{ obra}} \quad (17)$$

Na equação (16) temos o EC_{Anual} que é a Economia de Custo Anual obtida pela implantação da iluminação empregando LEDs. Enquanto que $C_{\text{sódio}}MWh$ e $C_{\text{LED}}MWh$ são os Consumos Anuais dos sistemas de iluminação e T é o valor da tarifa de iluminação.

Por fim, o Payback simplificado, que é o tempo de recuperação do capital investido. É calculado conforme a equação (18).

$$\text{Payback} = \frac{\text{Inv}_{\text{total}}}{\text{EC}_{\text{Anual}}} \quad (18)$$

$$\text{Payback} = \frac{\text{R\$ } 265.504,00 + \text{R\$ } 52.360,00}{\text{R\$ } 71.792,04} = 4,427566 \text{ anos}$$

Observamos dessa forma que o atual sistema instalado com luminárias LEDs, passa a ter um retorno financeiro após 4 anos e 5 meses. Mostrando-se viável economicamente, pois está dentro do tempo de garantia de 5 anos, e também dentro da vida útil do sistema, que é de aproximadamente 15 anos.

4.3 Análise Ambiental

Atualmente todo grande projeto, além de ser viável economicamente é necessário incorporar os conceitos de desenvolvimento sustentável. Nos tópicos abaixo serão analisados a quantidade de emissão de toneladas de CO₂ evitados com o sistema atual e também como o LED se sobressai em questões relacionadas a elementos químicos tóxicos em sua composição em comparação as lâmpadas de alta descarga.

4.3.1 Emissões de CO₂

O primeiro fator analisado é as emissões de CO₂, uma vez que a sua redução é prioritária nos programas de eficiência do país. Desta forma é possível calcular a contribuição anual de emissões de CO₂ devido ao consumo de energia na iluminação pública, multiplicando o consumo anual pela taxa de emissão, sendo que o fator utilizado nesse cálculo é do ano de 2017 (Fator Médio Anual (tCO₂/MWh) =0,0927) disponível em [37].

Tabela 4.8 – Comparação da emissão de CO₂ na Avenida Panaquatira. Fonte própria.

Tipo de Luminária	Fator Médio Anual (tCO₂/MWh)	MWh (Ano)	Emissão de tCO₂
Luminárias convencionais	0,0927	371,30574	34,42
Luminárias LED	0,0927	172,3311	15,97
Quantidade de tCO₂ evitadas anualmente pelo novo Sistema LED			18,45

Assim, conforme a Tabela 4.8 a não emissão de CO₂ foi de aproximadamente 18,45 tCO₂ por ano após o uso de iluminação LED na avenida em estudo. Em termos ecológicos, a solução LED garante uma emissão anual inferior a 16 toneladas de CO₂ face ao sistema anterior, que produzia cerca de 34 toneladas de CO₂, sendo por isso uma solução mais adequada para atingir as metas de redução dos gases de efeito estufa.

4.3.2 A Poluição Ambiental

Conforme o Artigo 225 da Constituição Federal que estabelece que “todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações”.

Diante disto, merecem cuidados especiais os procedimentos de manuseio, acondicionamento, transporte, armazenagem e destinação final, em função das suas características peculiares e dos riscos que apresentam [3]. Sabe-se que as lâmpadas de descarga de alta pressão, contêm elementos químicos tóxicos, como o mercúrio, o cádmio e o chumbo, considerados altamente prejudiciais à saúde pública e ao meio ambiente [23], também produzem radiação ultravioleta danosa aos materiais componentes das luminárias reduzindo sua vida útil. Entretanto, esta situação tem um prognóstico de mudanças como o advento do LED, que demonstra várias vantagens técnico-econômicas interessantes frente às lâmpadas de descarga [23]. A média da quantidade de Mercúrio nas principais tecnologias utilizadas na iluminação pública nacional é mostrada na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Quantidade de Mercúrio em Lâmpadas de Descarga em Alta Pressão. Fonte [23].

LÂMPADAS USADAS NA ILUMINAÇÃO PÚBLICA			
Lâmpadas contendo Mercúrio	Varição de potências	Quantidade média de mercúrio	Variações das médias de mercúrio por potência
Mista	160 W a 500 W	0,017 g	0,011 g a 0,045 g
Vapor de Mercúrio	80 W a 1.000 W	0,032 g	0,013 g a 0,080 g
Vapor de Sódio	70 W a 1.000 W	0,019 g	0,015 g a 0,030 g
Vapor Metálico	35 W a 2.000 W	0,045 g	0,010 g a 0,170 g

No caso, do processo de descarte das lâmpadas de iluminação pública, o risco de contaminação por mercúrio está associado à possibilidade de sua quebra. Sendo crime

ambiental (Lei de Crimes Ambientais - Lei 9.605/98) causar poluição que resulte em danos ao meio ambiente ou à saúde humana, seja pelo lançamento, processamento, armazenamento ou transporte de resíduos sólidos, em desacordo com as exigências estabelecidas em leis ou regulamentos. O manejo de grandes quantidades dessas lâmpadas pode causar a contaminação das pessoas envolvidas na sua manipulação [3], deve haver, também, uma precaução especial com a disposição final dos resíduos das lâmpadas, pois quando estas são dispostas em aterros sanitários convencionais, o mercúrio contido nelas pode escapar e contaminar o solo e as águas superficiais e subterrâneas[23].

O Ministério do Trabalho (MT), através da NR-15, e a Organização Mundial de Saúde (OMS) estabelecem, igualmente, como limite de tolerância biológica para o ser humano, a taxa de 33 µg de Hg/g de creatinina urinária e 0,04 mg de Hg/m³ de ar no ambiente, considerando 48 horas/semana de trabalho.

Em contrapartida a produção de luminárias e lâmpadas LED cumpre integralmente a diretiva europeia de Restrição de Substâncias Perigosas (RoHS), que limita o uso de chumbo, mercúrio e outros materiais perigosos em equipamentos elétricos e eletrônicos e de acordo com a Norma ABNT NBR 10.004/04, por não mercúrio as lâmpadas LED não são classificadas como resíduo perigoso [23].

4.3.3 Destinação Final e Reciclagem

Devido à sua longa vida útil, as lâmpadas a LED exigem trocas menos frequentes que outros tipos, gerando uma quantidade menor de produtos descartados, produzindo, conseqüentemente, menos resíduos ao longo do tempo. O impacto ambiental do descarte de lâmpadas LED pode ser ainda menor se for realizada a reciclagem dos vários componentes que formam o equipamento. Como mais de 95% da lâmpada LED é reciclável, fica bem claro que o LED pode reduzir drasticamente os impactos ambientais gerados pelo descarte de lâmpadas e outros equipamentos associados [23].

Na reciclagem de lâmpadas com mercúrio, o objetivo principal é a recuperação deste material e de outros elementos nelas contidos para posterior reutilização, evitando a contaminação do solo. O alumínio, o vidro e o pó de fósforo podem ser reaproveitados tanto na construção de novas lâmpadas, quanto na produção de outros produtos. O restante do material descontaminado, não passível de reciclagem, pode ser disposto em aterro de lixo comum [23].

A execução e o controle de todas as etapas do processo relacionado ao descarte ambiental e socialmente correto das lâmpadas inservíveis ao uso vão trazer como benefício ao gerador do resíduo perigoso a garantia da não agressão ao meio ambiente, à saúde pública e aos próprios trabalhadores envolvidos [23].

Podemos concluir que conforme o censo demográfico do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2014) em [34], aproximadamente 85% da população brasileira é urbana, fato esse que influencia no excesso de consumo de matéria e energia com correspondente geração de resíduos em uma concentração que não há possibilidade de regeneração natural do sistema ecológico local, por isso, se faz necessário, o desenvolvimento de políticas para otimizar a qualidade de vida na cidade. Inclusive com o consumo de forma sustentável e responsável de energia de forma cada vez mais eficaz.

5 Conclusão

No presente capítulo são apresentadas as conclusões provenientes do trabalho desenvolvido, bem como sugestões de temas a serem abordados em trabalhos futuros.

5.1 Conclusões

O gerenciamento de energia tem ganhado notoriedade no cenário nacional com o surgimento da tecnologia LED permitindo diminuição de gastos e ganho de eficiência a longo prazo. Vários fatores estão contribuindo para que sistemas mais sustentáveis e eficientes sejam implantados na iluminação pública: Dentre os quais podemos citar: programas governamentais: PROCEL RELUZ e PROPEE da ANEEL; Aplicação da resolução normativa nº414/2010 da ANEEL e a revisão da norma NBR 5101/2012, posteriormente temos a portaria nº 20/2017 do INMETRO, que faz uma avaliação de conformidade e regulamentação técnica da qualidade das luminárias certificando as que atendam requisitos mínimos de desempenho e segurança e finalmente as GEM no modelo de PPP (Parceria Público Privada),viabilizando muitos projetos nos parques de iluminação pública municipais.

Assim, analisando os dados e os resultados presentes no capítulo 4, concluímos que a substituição de lâmpadas de vapor de sódio em alta pressão por luminárias LED na avenida Panaquatira, considerando incluso a mão de obra para a instalação tem um potencial de economia de R\$ 71.792,04 anuais com a troca dos 224 pontos de iluminação e o tempo de retorno realizado através de payback simplificado do investimento será de 4 anos e 5 meses, dentro do período de garantia dos 5 anos estipulado pelo fornecedor escolhido pela empresa e dentro da vida útil do sistema de 15 anos ou 65 mil horas. Mostrando que há Viabilidade Econômica.

No entanto, observou-se que no estudo em questão consideramos apenas a iluminação na Avenida Panaquatira, que faz parte do projeto de substituição por iluminação a LED de todo o parque com 21 mil pontos do município de São José de Ribamar [38]. Assim ficando claro que há um grande potencial de economia, visto que as luminárias têm um preço relativamente menor em projetos de grandes proporções, viabilizando economicamente todo projeto.

No que tange a sustentabilidade, podemos observar que as luminárias LED se sobressaem pelo alto nível de reciclagem atrelado sua longa vida útil e a ausência de mercúrio, em sua composição, que ajuda produzindo menos lixo tóxico. Outro fato a observar é a grande redução de emissão de tCO₂ contribuído para as metas de redução almejadas pelo país.

Comparando as duas tecnologias a iluminação a LED se mostra promissora superando a tecnologia vapor de sódio em alta pressão em muitos requisitos, como exemplos temos: na qualidade da iluminação por ter IRC alto aumenta a segurança nas vias públicas; na eficiência da lâmpada (lm/W) que impacta na redução de demanda e no consumo de energia elétrica; na vida útil que reduz os custos de manutenção; no descarte reduzindo a quantidade de mercúrio descartado no meio ambiente;

Assim observamos que a substituição de tecnologias defasadas por iluminação mais eficiente como a LED será adotada provavelmente nos próximos anos na maior parte dos sistemas de iluminação municipais. Frente aos grandes benefícios atrelados tanto econômico com socioambientais dessa tecnologia.

Concluimos que a PPP entre a Prefeitura e a SJR Iluminação do Futuro SPE S.A. que detém concessão por prazo de 15 anos, com valor de contrato de R\$127.486.914,72 e investimento estimado em igual valor no parque de iluminação de São Jose de Ribamar [38], tem grande potencial não apenas em reduzir as despesas das contas pagas com iluminação pública, mas também gerando retorno para investimentos em outros setores e despertando o consumo de forma sustentável e eficiente dos Ribamarenses.

5.2 Trabalhos Futuros

Algumas possibilidades de trabalhos futuros incluem:

Uma análise completa dos benefícios após a implantação de todo o sistema com Luminárias LED no parque de iluminação pública de São José de Ribamar.

Uma análise simulada do processo de telegestão no sistema com Luminárias LED nessa avenida.

Apêndice

Apêndice A

Fotografias das Luminárias LED e de trechos da Avenida Panaquatira em Estudo.



Figura A.1 – Luminária Pública BRP371 A LED87-3S/NW 86W DME NEMA KTL. Fonte Própria.



Figura A.2 – Luminária Pública BRP394 A LED174/NW 129W DM NEMA. Fonte Própria.



Figura A.3 – Luminária Pública BRP371 A LED87-3S/NW 86W no trecho AB. Fonte Própria.



Figura A.4 – Luminária Pública BRP394 A LED174/NW 129W no trecho BC. Fonte Própria.



Figura A.5 – Luminária Pública BRP394 129W no trecho CD (duplicado). Fonte Própria.



Figura A.6 – Luminária Pública BRP394 129W no trecho DE. Fonte Própria.

Referências

- [1] C. A. P. Dantas e F. K. Junior, “Iluminação Pública e Eficiência Energética”.2015. [Online]. Disponível em: <https://www.osetoreletrico.com.br/iluminacao-publica-e-eficiencia-energetica>. Acesso em: 20 ago. 2018.
- [2] Balanço Energético Nacional, “BEN (Ano Base 2017),” 2018. [Online]. Disponível em:<http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-303/topico-419/BEN2018.pdf>. Acesso em: 07 Nov. 2018.
- [3] R. E. Ascurra, “Eficiência Elétrica em Iluminação Pública Utilizando Tecnologia LED: um Estudo de Caso,” Dissertação (Especialização em Engenharia de Edificações e Ambiental), Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, BR, 2013.
- [4] R. A. Barbosa, “Gestão e o Uso Eficiente de Energia Elétrica nos Sistemas de Iluminação Pública,” Mestrado em Energia, Instituto de Eletrotécnica e Energia, Escola Politécnica, Faculdade de Economia e administração e Instituto de Física da Universidade de São Paulo, São Paulo, BR, 2000.
- [5] L. F. Pinto, "Avaliação dos Impactos da Tecnologia LED e Técnicas de Gestão de Iluminação Pública em Redes de Distribuição," Dissertação de mestrado em Engenharia Elétrica, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, BR, 2018.
- [6] Instituto Brasileiro de Desenvolvimento - IBD, "Estudo de viabilidade Técnica e Econômica - Modernização, Otimização, Expansão, Operação e Manutenção em Infraestrutura de iluminação pública do Município de Governador Celso Ramos/SC," Curitiba, p.68, 2017. [Online]. Disponível em: http://static.fecam.net.br/uploads/1415/arquivos/1109961_01_Estudo_de_Viabilidade_Tecnica_final.pdf. Acesso em: 30 set. 2018.
- [7] C. R. B. Rodrigues, "Contribuições ao Uso de Diodos Emissores de Luz em Iluminação Pública," Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, BR, 2012.
- [8] L. L. F. da Silva, “Iluminação Pública no Brasil: Aspectos Energéticos e Institucionais,” Dissertação de mestrado em Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, BR, 2006.
- [9] C. G. Casagrande, “Desafios da Iluminação Pública no Brasil e Nova Técnica de Projetos Luminotécnicos Fundamentada na Fotometria Mesópica,” Tese de Doutorado, Programa

de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, BR, 2016.

- [10] Associação Brasileira de Empresas de Serviços de Pública - ABRASI, "Dados do Setor/Cadastro Nacional de Pontos de Iluminação Pública," [Online]. Disponível em: <http://www.abrasi.org.br/iluminacao-urbana/2/dados-do-setor>. Acesso em: 13 Out. 2018.
- [11] F. J. Nogueira, "Avaliação Experimental de Luminárias Empregando LEDs Orientadas à Iluminação Pública," Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, BR, 2013.
- [12] F. J. Nogueira, E. Silva, M. F. C. Campos, T. R. A. Carreira, L. H. Gouveia, C. G. Casagrande e H. A. C. Braga, "Projeto Piloto de Iluminação Pública Empregando LEDs em Substituição a Lâmpadas de Vapor de Sódio em Alta Pressão," *em XX Congresso Brasileiro de Automática*, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2014.
- [13] C. R. B. S. Rodrigues et al. "Um Estudo Comparativo de Sistemas de Iluminação Pública: Estado Sólido e Lâmpadas de Vapor de Sódio em Alta Pressão," in *EEE/IAS International Conference on Industry Applications – INDUSCON*, São Paulo, SP, 2010.
- [14] NBR 5101 - *Iluminação Pública – Procedimento*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2012.
- [15] Companhia Energetica de Brasilia - CEB, "Especificações e Homologação de Luminárias LED", 2016. [Online]. Disponível em: <http://www.ceb.com.br/index.php/component/phocadownload/category/48-normas-tecnicas-iluminacao-publica?download=912:ntip-1-01-especificcoes-e-homologacao-de-luminaria-de-led>. Acesso em: 19 Out. 2018.
- [16] Companhia Paranaense de Energia - COPEL. Manual de Iluminação Pública. 2012. [Online]. Disponível em: <http://www.copel.com/hpcopel/root/pagcopel2.nsf/0/f5f8db1e97503339032574f1005c8ff9?OpenDocument>. Acesso em: 17 Out. 2018.
- [17] F. Rodrigues, "Eficiência Energética Aplicada em Sistemas de Iluminação Pública – Estudo de Caso na Cidade de Garopaba – SC," Monografia (Especialista em Eficiência Energética Aplicada aos Processos Produtivos), Universidade Federal de Santa Maria, RS, BR, 2017.
- [18] G. M Soares, "Sistema Inteligente de Iluminação de Estado Sólido com Controle Remoto e Análise de Parâmetros da Rede Elétrica," Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, BR, 2014.

- [19] Procel, “Resultados Procel 2018 - Ano base 2017,” Procel, 2018. Disponível em: http://www.procelinfo.com.br/resultadosprocel2018/docs/Procel_rel_2018_web.pdf. Acesso em 10 Nov. 2018.
- [20] J. Assunção e A. Schutze. "Panorama e Desafios da Eficiência Energética no Brasil". (NAPC/PUC-Rio). 2017.[Online]. Disponível em: <https://climatepolicyinitiative.org/publication/panorama-e-desafios-da-eficiencia-energetica-no-brasil>. Acesso em: 03 Nov. 2018.
- [21] Ministerio de Minas e Energieia - MME. “Iluminação Pública Municipal. Programas e Políticas Públicas Orientações para Gestores Municipais,” 2018. Disponível em: http://www.mme.gov.br/documents/10584/0/Livreto+Ilumina%C3%A7%C3%A3o+P%C3%BAblica_2018_02_19.pdf. Acesso em 12 Nov. 2018.
- [22] E.H.S. Bezerra, " Desafios e Alternativas para Assunção da Gestão dos Ativos de Iluminação Pública nos Municípios de Pequeno e Médio Porte do Estado do Ceará", *Revista Especialize*, vol. 01, nº 11, Julho 2006. [Online]. Disponível em: <https://www.ipog.edu.br/revista-especialize-online/edicao-n11-2016>. Acesso em: 14 set. 2018
- [23] Centrais Elétricas Brasileiras - ELETROBRAS, “Guia Orientativo de Iluminação com a Tecnologia LED,” 2018. [Online]. Disponível em: <http://www.cepel.br/lumis/portal/file/fileDownload.jsp?fileId=21CF889061C2726E016302D8893C2F02>. Acesso em 09 nov.2018.
- [24] M. R. A. Pereira, “Estudo de Iluminação Eficiente para a Rodovia Duca Serra na. Cidade de Macapá-Ap”, Monografia (graduação) , Universidade Federal do Amapá, Macapá, BR, 2017.
- [25] D. M. O. Pinto, "Sistemas de Controlo de Iluminação Pública,” Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Faculdade de Ciências e tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra, PT, 2016.
- [26] M. V. Lomelino, " Estudo do Impacto do Desempenho de Relés fotocontroladores sobre o Consumo da Iluminação Pública" Dissertação de Mestrado em Engenharia de Energia, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, BR, 2016.
- [27] D. O. Almeida, “Gestão Eficiente de Sistemas de Iluminação Pública,” Monografia (Especialização Lato Sensu em Projetos Luminotécnicos),Universidade Cruzeiro do Sul, SP, BR, 2012.
- [28] NBR 15129 - *Luminárias para iluminação pública - Requisitos particulares*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2012.

- [29] NBR IEC 60529- *Graus de proteção providos por invólucros*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2017.
- [30] J. M. Novicki e R. Martinez, "Leds para Iluminação Pública," 2008. [Online]. Disponível em:
http://www.iar.unicamp.br/lab/luz/ld/Arquitetural/Ilumina%E7%E3o%20P%FAblica/Pesquisa/LEDs_para_iluminacao_publica.pdf. Acesso em: 15 set. 2018.
- [31] C. B. P. de Mendonça, "Eficiência energética Através do uso da Tecnologia LED em Iluminação Pública: Desafios e Oportunidades," Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, BR, 2016.
- [32] F. J. Nogueira, E. S. Silva, C. R. B. S. Rodrigues, M. F. C. Campos, D. P. Pinto e H. A. C. Braga, "Influência da Temperatura no Desempenho de Luminárias LED," in *International Conference on Industry Applications (IEEE/IAS 10th INDUSCON)*, Fortaleza, CE, 2012.
- [33] R. P. Sales, "LED, O Novo Paradigma da Iluminação Pública," Dissertação (Mestrado) Instituto de Engenharia do Paraná, Curitiba, BR, 2011
- [34] Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, "Pesquisa por Cidades, panorama," 2018. [Online]. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ma/sao-jose-de-ribamar/panorama>. Acesso em 07 nov.2018.
- [35] Google Maps, "Av. Panaquatira, São José de Ribamar - MA, 65110-000," 2018. [Online]. Disponível em: <https://www.google.com.br/maps/@-2.5259937,-44.0632668,14z>. Acesso em: 25 Set. 2018
- [36] Philips Lighting, "Catálogo de Luminarias Outdoor," 2017. [Online]. Disponível em: <http://www.lighting.philips.com.br/prof>. Acesso em: 15 Set. 2018
- [37] Ministro da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações - MCTIC, "Emissões co2- Inventarios Corporativos," 2018. [Online]. Disponível em: https://www.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/arquivos/emissoes_co2/Inventarios-Corporativos_2018.xlsx. Acesso em 29 nov.2018.
- [38] G Naves, "Iluminação Pública (São José de Ribamar) - Radar PPP," 2018. [Online]. Disponível em: <https://www.radarppp.com/resumo-de-contratos-de-ppps/iluminacao-publica-sao-jose-de-ribamar>. Acesso em: 06 Nov. 2018

