



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

EDVALDO DE SOUSA QUEIRÓZ FILHO

**ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA E FINANCEIRA DA MODERNIZAÇÃO DO
PARQUE DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA DO MUNICÍPIO DE FORTALEZA:
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA COM TECNOLOGIA LED E IoT**

FORTALEZA

2026

EDVALDO DE SOUSA QUEIROZ FILHO

ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA E FINANCEIRA DA MODERNIZAÇÃO DO
PARQUE DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA DO MUNICÍPIO DE FORTALEZA: EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA COM TECNOLOGIA LED E IoT

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Silva Thé Pontes.

FORTALEZA

2026

EDVALDO DE SOUSA QUEIRÓZ FILHO

ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA E FINANCEIRA DA MODERNIZAÇÃO DO
PARQUE DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA DO MUNICÍPIO DE FORTALEZA: EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA COM TECNOLOGIA LED E IoT

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em: 24/02/2026.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ricardo Silva Thé Pontes (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. PhD Fernando Luiz Marcelo Antunes
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Victor de Paula Brandão Aguiar
Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA)

Prof. Dr. Edilson Mineiro Sá Junior
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

A Deus.

Aos meus pais,

A todos os familiares e sinceros amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus que iluminou o meu caminho durante esta caminhada.

Aos meus pais, por acreditarem em mim. Mãe, seu cuidado e dedicação foi que deram, em alguns momentos, a esperança para seguir. Pai, sua presença significou segurança e certeza de que não estou sozinho nesta caminhada.

Aos meus irmãos Edelman Queiróz e Ítalo Queiróz que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida.

À minha esposa, Laura Regina Santos Guimarães Queiróz, pelo amor, companheirismo e apoio incondicional ao longo desta caminhada, sempre me fortalecendo com carinho, incentivo e coragem, especialmente nos momentos mais desafiadores. Às minhas filhas, Ana Clara Guimarães Queiróz e Ana Rebeca Guimarães Queiróz, que, mesmo sem compreenderem plenamente a dimensão deste trabalho, foram fonte constante de inspiração, luz e motivação, impulsionando-me diariamente na busca por mais conhecimento e crescimento pessoal e profissional.

Ao Prof. Dr. Ricardo Silva Thé Pontes, pela paciência, incentivo e excelente orientação que tornaram possível a conclusão desta tese de mestrado. Aos professores participantes da banca examinadora, Prof. Dr. Edilson Mineiro Sá Junior, Prof. PhD. Fernando Luiz Marcelo Antunes e Prof. Dr. Victor de Paula Brandão Aguiar, pelas valiosas colaborações, sugestões e importantes contribuições para o aprimoramento desta pesquisa.

A todos os professores do curso, que foram tão importantes no desenvolvimento desta dissertação.

A todos aqueles que de alguma forma estiveram e estão próximos de mim, fazendo esta vida valer cada vez mais a pena.

“Deixo com vocês a paz, a minha paz lhes dou; não lhes dou a paz como o mundo dá. Que o coração de vocês não fique angustiado nem com medo.”

(Jesus Cristo)

RESUMO

A iluminação pública constitui um elemento estratégico para a segurança urbana, a mobilidade noturna e a qualidade de vida da população, além de contribuir diretamente para o desenvolvimento econômico das cidades. No Brasil, ela representa cerca de 3% do consumo de energia elétrica, sendo um dos maiores custos fixos das prefeituras. Com o aumento populacional e a urbanização, o parque de iluminação pública cresceu significativamente, mas ainda enfrenta desafios como consumo elevado de energia, manutenção cara e desigualdade na distribuição, principalmente em áreas periféricas. A substituição das luminárias convencionais por LEDs tem se mostrado a principal solução para esse cenário, pois oferece vantagens como maior durabilidade, economia de até 50% no consumo de energia, melhor reprodução de cores e redução na necessidade de manutenção. Além disso, a *Internet of Things* (IoT) permite a implementação de sistemas inteligentes para monitoramento em tempo real, ajuste da intensidade luminosa e diagnóstico de falhas, proporcionando ganhos em segurança pública e sustentabilidade ambiental. Esta dissertação visa analisar a viabilidade técnica e econômica da substituição progressiva das luminárias convencionais por LEDs no município de Fortaleza, além da implementação de um sistema de gestão energética inteligente com foco no monitoramento e gestão energética eficiente do parque de iluminação pública do município de Fortaleza. A pesquisa também avalia a implementação de um sistema de gestão energética baseado em IoT, considerando dados reais obtidos da concessionária ENEL-CE e relatórios da Secretaria da Conservação e Serviços Públicos de Fortaleza. São utilizados indicadores financeiros como *Payback*, TIR (Taxa Interna de Retorno) e VPL (Valor Presente Líquido) para a análise. A principal hipótese é que a modernização da iluminação pública com LEDs e IoT não só traz benefícios econômicos, mas também contribui para a inclusão social, segurança, governança digital e sustentabilidade urbana. Esta dissertação busca oferecer subsídios para políticas públicas mais eficazes e sustentáveis, alinhadas às diretrizes de energias renováveis e cidades inteligentes.

Palavras-chave: iluminação pública; eficiência energética; *internet of things*; sustentabilidade; energias renováveis; LED; *payback*; TIR; VPL.

ABSTRACT

Public lighting plays a crucial role in security, quality of life, and economic development in cities. In Brazil, it accounts for about 3% of electricity consumption, making it one of the largest fixed costs for local governments. With population growth and urbanization, the public lighting system has expanded significantly but still faces challenges such as high energy consumption, expensive maintenance, and inequality in distribution, particularly in peripheral areas. The replacement of conventional lamps with LEDs has proven to be the main solution to this scenario, as it offers advantages such as greater durability, energy savings of up to 50%, better color reproduction, and reduced maintenance needs. Furthermore, the Internet of Things (IoT) allows the implementation of intelligent systems for real-time monitoring, adjustment of light intensity, and fault diagnosis, providing improvements in public safety and environmental sustainability. This study aims to analyze the technical and economic feasibility of the progressive replacement of conventional lamps with LEDs in the municipality of Fortaleza, as well as the implementation of an intelligent energy management system focusing on efficient energy monitoring and management of the public lighting system in the city. The research also evaluates the implementation of an IoT-based energy management system, considering real data obtained from the ENEL-CE utility company and reports from the Fortaleza Department of Conservation and Public Services. Financial indicators such as Payback, IRR (Internal Rate of Return), and NPV (Net Present Value) are used for the analysis. The main hypothesis is that the modernization of public lighting with LEDs and IoT not only brings economic benefits but also contributes to social inclusion, security, digital governance, and urban sustainability. The study seeks to provide subsidies for more effective and sustainable public policies, aligned with the guidelines of renewable energy and smart cities.

Keywords: public lighting; energy efficiency; internet of things; sustainability; renewable energy; LED; payback; IRR; NPV.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01	– Evolução tecnológica dos parques de iluminação pública.....	14
Figura 02	– Subdivisão (SERs) município de Fortaleza.....	16
Figura 03	– Iluminação Pública com ausência de rede de média tensão.....	27
Figura 04	– Iluminação Pública com presença de rede de média tensão.....	27
Figura 05	– Configurações básicas para projetos de iluminação pública.....	28
Figura 06	– Posteação Unilateral.....	29
Figura 07	– Posteação bilateral alternada.....	29
Figura 08	– Posteação bilateral frente a frente.....	30
Figura 09	– Posteação canteiro central.....	30
Figura 10	– Posteação canteiro central de 3 a 6 metros.....	31
Figura 11	– Posteação canteiro central superior a 6 metros.....	31
Figura 12	– Posteação perpendicular em curvas.....	32
Figura 13	– Posteação em curvas com raios inferiores a 1.000 metros.....	32
Figura 14	– Posteação em curvas com raios superiores a 1.000 metros.....	33
Figura 15	– Posteação em aclives e declives.....	33
Figura 16	– Posteação para passagem de pedestres.....	34
Figura 17	– Posteação em passarelas.....	34
Figura 18	– Posteação para iluminação artística de monumentos.....	36
Figura 19	– Posteação para meio ambiente – Caso 01.....	37
Figura 20	– Posteação para meio ambiente – Caso 02.....	38
Figura 21	– Posteação para meio ambiente – Caso 03.....	38
Figura 22	– Projetos para iluminação pública e meio ambiente.....	40
Figura 23	– Curva de iluminância.....	41
Figura 24	– Curva de luminância.....	42
Figura 25	– Curva intensidade luminosa.....	43
Figura 26	– Curva de fluxo luminoso.....	43
Figura 27	– ESP8266.....	47
Figura 28	– Rede IoT de iluminação pública.....	82
Figura 29	– Arquitetura IoT parque de iluminação pública.....	82

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 01 – Evolução tarifária de energia com tributos ENEL-CE - Classe B4	53
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 01	– Bairros por SERs conforme numeração de mapa inserido na figura 2.....	17
Tabela 02	– Divisão dos pontos de IP segundo as SERs.....	18
Tabela 03	– Índice de Reprodução de Cores (IRC).....	25
Tabela 04	– Comparativo entre tecnologias de iluminação pública (VSHP, VMT e LED).....	25
Tabela 05	– Comparação econômico e operacional das tecnologias de iluminação pública (VSHP, VMT e LED).....	25
Tabela 06	– Evolução tarifária classe B4 - Valores (TE) + (TUSD) + (Impostos).....	52
Tabela 07	– Valores TUSD, TE e Impostos – setembro/2025.....	54
Tabela 08	– Tabela de Custos de Composições – SEINFRA.....	55
Tabela 09	– Resultados referente ao acréscimo de 25% de pontos em LED ao parque de iluminação pública de Fortaleza.....	70
Tabela 10	– Resultados referente ao acréscimo de 50% de pontos em LED ao parque de iluminação pública de Fortaleza.....	70
Tabela 11	– Resultados referente ao acréscimo de 75% de pontos em LED ao parque de iluminação pública de Fortaleza.....	71
Tabela 12	– Payback simples, VPL e TIR para acréscimo de 25% de pontos em LED ao parque de iluminação pública de Fortaleza.....	72
Tabela 13	– Payback simples, VPL e TIR para acréscimo de 50% de pontos em LED ao parque de iluminação pública de Fortaleza.....	73
Tabela 14	– Payback simples, VPL e TIR para acréscimo de 75% de pontos em LED ao parque de iluminação pública de Fortaleza.....	74
Tabela 15	– Análise LCC _A de 25% dos pontos do parque de iluminação pública de Fortaleza.....	77
Tabela 16	– Análise LCC _A de 50% dos pontos do parque de iluminação pública de Fortaleza.....	78
Tabela 17	– Análise LCC _A de 75% dos pontos do parque de iluminação pública de Fortaleza.....	78
Tabela 18	– Análise LCC _B para acréscimo de 25% de pontos em LED ao parque de iluminação pública de Fortaleza.....	78

Tabela 19	– Análise LCC_B para acréscimo de 50% de pontos em LED ao parque de iluminação pública de Fortaleza.....	79
Tabela 20	– Análise LCC_B para acréscimo de 75% de pontos em LED ao parque de iluminação pública de Fortaleza.....	79
Tabela 21	– (LCC_A vs LCC_B) e (CAE_A vs CAE_B) para acréscimo de 25% de pontos em LED ao parque de iluminação pública de Fortaleza.....	79
Tabela 22	– (LCC_A vs LCC_B) e (CAE_A vs CAE_B) para acréscimo de 50% de pontos em LED ao parque de iluminação pública de Fortaleza.....	80
Tabela 23	– (LCC_A vs LCC_B) e (CAE_A vs CAE_B) para acréscimo de 75% de pontos em LED ao parque de iluminação pública de Fortaleza.....	80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AHP	Analytic Hierarchy Process
CAE	Custo Anual Equivalente
DMOIP	Dispositivo de Monitoramento e Operação de Iluminação Pública
DMNIP	Dispositivo de Medição de Nível de Iluminação Pública
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GIP	Gerenciador de Iluminação Pública
IoT	<i>Internet of Things</i>
IDH	Índice de desenvolvimento Humano
IP	Iluminação Pública
LCC	Custo do Ciclo de Vida
LED	Diodo Emissor de Luz
LPWAN	Low Power Wide Area Network
MQEIP	Monitoramento da Qualidade de Energia de Iluminação Pública
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
PQAL	Power Quality Analyzer with LoRa
PIR	Passive Infrared
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
SCSP	Secretaria da Conservação e Serviços Públicos
SERs	Secretaria Regionais
TIR	Taxa Interna de Retorno
TE	Tarifa de Energia
TUSD	Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição
VPL	Valor Presente Líquido
LED	Diodo de emissor de luz
VSHP	Vapor de Sódio de Alta Pressão
VMT	Vapor Metálico

LISTA DE SÍMBOLOS

R\$	Reais
%	Porcentagem
kWh/mês	Quilo Watts hora por mês
W	Watts

SUMÁRIO

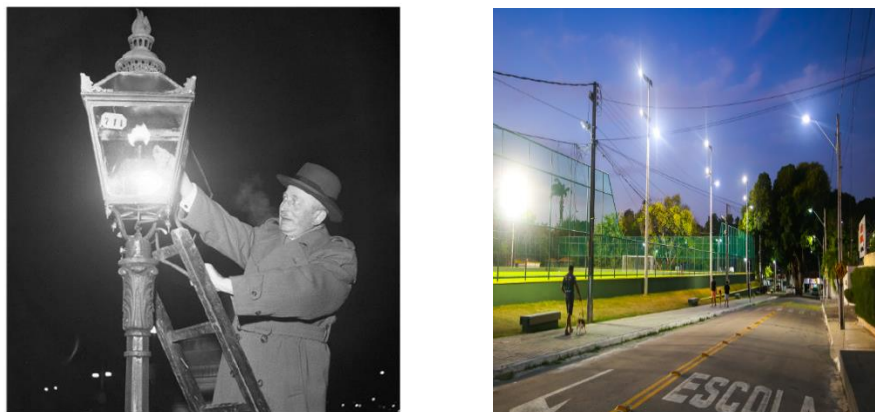
1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivo Geral	21
1.2	Objetivos Específicos	21
1.3	Apresentação dos capítulos	21
2	ESTADO D'ARTE – ILUMINAÇÃO PÚBLICA	24
3	METODOLOGIA	51
3.1	Determinação da quantidade de luminárias substituídas	56
3.2	Estimativa do investimento	56
3.3	Estimativa do consumo energético mensal	57
3.4	Estimativa de custo energético mensal por luminária	58
3.5	Estimativa de economia financeira e energética por luminária	58
3.6	Economia total mensal de substituição	59
3.7	Economia total anual de substituição	60
4	ESTUDO DE CASO: FORTALEZA	68
5	CONCLUSÃO	90
	REFERÊNCIAS	92

1 INTRODUÇÃO

A iluminação pública configura-se como um componente estratégico da infraestrutura urbana, contribuindo para a mobilidade noturna e para uma melhor utilização dos espaços coletivos. Sua relevância vai além de aspectos funcionais contribuindo para a redução de acidentes em vias públicas, fomento de atividades econômicas e sociais. No contexto técnico, apresenta níveis convidativos para ações voltadas a políticas de eficiência energética, modernização tecnológica e integração a sistemas inteligentes de gestão urbana, tornando-se elemento determinante para cidades sustentáveis e energeticamente eficientes.

Historicamente, os primeiros registros de iluminação pública datam da Antiguidade, com o uso de tochas e fogueiras em vias urbanas de cidades como Roma e Atenas; entretanto, foi somente a partir da Revolução Industrial que a iluminação urbana passou a se consolidar como parte das políticas públicas, inicialmente com sistemas a gás e, posteriormente, com a introdução da energia elétrica, promovendo transformações significativas na organização das cidades e nos hábitos sociais. Nesse contexto, segundo Godoy (2022, p.32), “a iluminação pública e urbana evoluiu de soluções rudimentares para sistemas tecnicamente estruturados, acompanhando o desenvolvimento das cidades e das tecnologias disponíveis”. No Brasil, a iluminação pública elétrica teve início no final do século XIX, acompanhando os processos de urbanização e modernização das principais capitais, sendo que, ao longo do tempo, ocorreram avanços tecnológicos importantes, segundo Bernardes (2020, p.46) “a utilização de lâmpadas incandescentes, vapor de mercúrio, vapor de sódio alta pressão e vapor metálico, até a consolidação das luminárias com tecnologia de diodo emissor de luz (LED), que apresentam maior eficiência energética e vida útil ampliada”. A evolução tecnológica dos sistemas de iluminação pública pode ser observada na Figura 01.

Figura 01 - Evolução tecnológica dos parques de iluminação pública.



Fonte: Prefeitura Municipal de Fortaleza (2024).

Nas últimas décadas, com o aumento populacional, a verticalização das cidades e o crescimento das áreas urbanizadas, o parque de iluminação pública das cidades brasileiras se expandiu significativamente. Essa expansão, no entanto, também trouxe desafios operacionais, financeiros e ambientais, sobretudo no que diz respeito ao consumo de energia, à manutenção da rede, à desigualdade na distribuição da iluminação e à obsolescência dos equipamentos. Conforme destacado por (Bernardes; Celeste, 2020, p.10), “a eficiência energética na iluminação pública urbana depende diretamente da modernização dos equipamentos e da gestão adequada dos sistemas”. Em muitas cidades, ainda predominam tecnologias ineficientes, com alto consumo energético, baixa durabilidade e elevado custo de manutenção. Nesse sentido, segundo (Kruger; Ramos, 2016, p.38), “observa-se que os sistemas tradicionais de iluminação pública apresentam limitações operacionais e elevados custos de manutenção, comprometendo a eficiência energética”. Além disso, problemas como falta de padronização, iluminação precária em áreas periféricas e ausência de gestão centralizada agravam a complexidade da operação do parque de iluminação pública, segundo (Clemente; Paiva; Júnior; Caixeta, 2018, p.122), “a gestão da iluminação pública requer planejamento integrado, padronização e monitoramento contínuo para garantir eficiência e qualidade do serviço”.

De acordo com Empresa de Pesquisa Energética (2023),

a iluminação pública responde por cerca de 3% do consumo total de energia elétrica no Brasil, representando um dos principais custos fixos das administrações municipais, o que torna imprescindíveis as ações de modernização e eficiência energética para viabilizar economicamente o serviço e melhorar sua qualidade.

A substituição de lâmpadas tradicionais por luminárias LED é atualmente a principal solução adotada para reverter esse cenário.

De acordo com (Cavalcanti; Leixo, 2021),

a tecnologia LED apresenta vantagens significativas, sendo sua vida útil muito superior, com economia de até 38,5% no consumo energético comparado a lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão ou metálico, além de melhor reprodução de cores, menor emissão de calor e redução drástica da necessidade de manutenção.

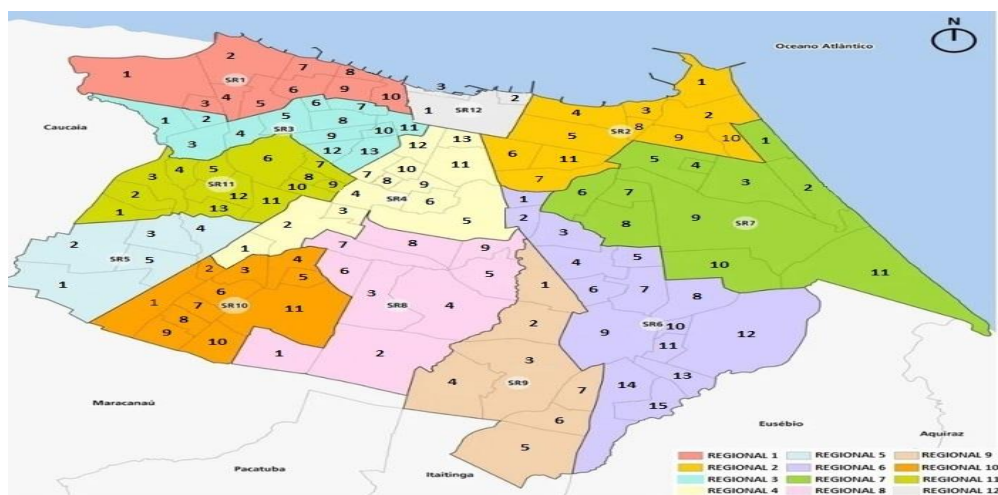
Além disso, por funcionarem em baixa tensão, os LEDs são compatíveis com sistemas autônomos, como postes alimentados por energia solar fotovoltaica, e com sistemas de controle inteligente via *internet of things* (IoT).

De acordo com Echevarría (2023),

a *internet of things* (IoT) permite a implementação de sistemas de gestão energética em tempo real, monitorando o funcionamento de cada ponto de luz, diagnosticando falhas, ajustando automaticamente a intensidade da iluminação e integrando informações com outras áreas da administração pública. Os resultados incluem não apenas economia financeira, mas também melhorias na segurança urbana, maior eficiência na prestação de serviços e redução nas emissões de gases de efeito estufa.

O município de Fortaleza possui aproximadamente 2.703.391 habitantes, distribuídos em 121 bairros e organizados administrativamente em doze Secretarias Executivas Regionais (SERs). Para ampliar os benefícios da iluminação pública, é necessário superar desafios relacionados à manutenção, eficiência energética e preservação da infraestrutura, sendo fundamental a adoção de tecnologias sustentáveis, como sistemas de telegestão e luminárias eficientes, que otimizam recursos, aumentam a confiabilidade do sistema, reduzem o consumo energético e auxiliam a segurança urbana e ampliação do acesso aos serviços públicos, embora algumas regiões já apresentem infraestrutura mais desenvolvida. Conforme Figura 02 e Tabela 01, temos a divisão do município referente as 12 regionais.

Figura 02 - Subdivisão (SERs) município de Fortaleza.



Fonte: Prefeitura Municipal de Fortaleza (2024).

Tabela 01 – Bairros por SERs conforme numeração de mapa inserido na figura 2.

SER I	SER II	SER III	SER IV
1. Vila Velha	1. Cais do Porto	1. Quintino Cunha	1. Vila Peri
2. Barra do Ceará	2. Vicente Pizon	2. Olavo Oliveira	2. Parangaba
3. Jardim Guanabara	3. Mucuripe	3. Antônio Bezerra	3. Itaoca
4. Jardim Iracema	4. Meireles	4. Padre Andrade	4. Montese
5. Floresta	5. Aldeota	5. Presidente Kennedy	5. Aeroporto
6. Alvaro Weyne	6. Joaquim Távora	6. Ellery	6. Vila União
7. Cristo Redentor	7. Tauape	7. Monte Castelo	7. Damas
8. Pirambu	8. Varjota	8. São Gerardo	8. Bom Futuro
9. Carlito Pamplona	9. Papicu	9. Parquelândia	9. Parreão
10. Jacarecanga	10. De Lourdes	10. Parque Araxá	10. Jardim America
-	11. Dionísio Torres	11. Farias Brito	11. Fátima
-	-	12. Amadeu Furtado	12. Benfica
-	-	13. Rodolfo Teófilo	13. José Bonifácio
SER V	SER VI	SER VII	SER VIII
1. Siqueira	1. Alto da Balança	1. Praia do Futuro I	1. Planalto Ayrton Senna
2. Granja Lisboa	2. Aerolândia	2. Praia do Futuro II	2. Pref. José Walter
3. Granja Portugal	3. Jardim das Oliveiras	3. Manuel Dias Branco	3. Parque Dois Irmãos
4. Bonsucesso	4. Cidade dos Func.	4. Cidade 2000	4. Passaré
5. Bom Jardim	5. Parque Manibura	5. Cocó	5. Boa Vista / Castelão
-	6. Parque Iracema	6. Salinas	6. Dende
-	7. Cambéba	7. Guararapes	7. Itaperi
-	8. José de Alencar	8. Eng. Luciano Cavalcante	8. Serrinha
-	9. Messejana	9. Edson Queiroz	9. Dias Macedo
-	10. Curió	10. Sapiranga/Coité	-
-	11. Guajeru	11. Sabiaguaba	-
-	12. Lagoa Redinda	-	-

SER V	SER VI	SER VII	SER VIII
-	13. Coaçu	-	-
-	14. Paupina	-	-
-	15. São Bento	-	-
SER IX	SER X	SER XI	SER XII
1. Cajazeiras	1. Canindezinho	1. Conj. Ceará II	1. Centro
2. Barroso	2. PQ. São José	2. Conj. Ceará I	2. Praia de Iracema
3. Jangurussu	3. Manoel Satiro	3. Genibaú	3. Moura Brasil
4. Conj. Palmeiras	4. Maraponga	4. Aufran Nunes	-
5. Pedras	5. Jardim Cearense	5. Dom Lustisa	-
6. Ancuri	6. Novo Mondubim	6. Pici	-
7. PQ. Santa Maria	7. Conj. Esperança	7. Bela Vista	-
-	8. PQ. Santa Rosa	8. Panamericano	-
-	9. PQ. Pres. Vargas	9. Couto Fernandes	-
-	10. Aracapé	10. Democrito Rocha	-
-	11. Mondubim	11. Joquei Clube	-
-	-	12. Henrique Jorge	-
-	-	13. João XXIII	-

Fonte: Adaptada de Prefeitura Municipal de Fortaleza (2025).

A infraestrutura de iluminação pública atual do município de Fortaleza conta com 210.898 pontos de iluminação distribuídos por todas as doze Secretarias Executivas Regionais (SERs), conforme apresentado na Tabela 02.

Tabela 02 - Divisão dos pontos de IP segundo as SERs.

(SERs)	Nº de Pontos de (IP)	VSHP	VMT	LED
I	17.453	332	14.916	2.205
II	22.402	181	10.265	11.948
III	14.850	442	11.305	3.103
IV	17.153	362	11.587	5.204
V	13.917	171	13.261	385
VI	24.413	1.798	20.311	2.274
VII	19.482	742	13.136	5.491

(SERs)	Nº de Pontos de (IP)	VSHP	VMT	LED
VIII	23.376	523	21.298	1.555
IX	16.067	404	14.871	792
X	15.775	320	14.324	1.131
XI	18.090	623	16.249	1.218
XII	7.920	61	4.687	3.162

Fonte: Adaptada de Prefeitura Municipal de Fortaleza (2025).

Em Fortaleza, apenas 18,24% da iluminação pública já possui eficientizações em tecnologia de LEDs. De acordo com dados disponibilizados pela Secretaria de Conservação de Serviços Públicos, encontram-se instaladas 38.468 luminárias LED, correspondendo a 6,26 MW de potência instalada e a um consumo estimado de 19,11 MWh/ano, já em contrapartida, ainda permanecem em operação 166.210 lâmpadas de vapor metálico (VMT), com 37,46 MW de potência instalada e consumo estimado de 165,15 MWh/ano, além de 5.959 lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão (VSHP), que totalizam 1,32 MW de potência instalada e consumo estimado de 5,92 MWh/ano. Assim, o consumo médio anual do sistema de iluminação pública do município é de aproximadamente 190,18 MWh/ano. Embora a modernização para a tecnologia LED represente um avanço significativo em termos de eficiência energética e qualidade luminotécnica, diversas áreas periféricas do município ainda enfrentam condições inadequadas de iluminação, em razão de manutenção deficiente, postes danificados e dificuldades de acesso para execução dos serviços, fatores que comprometem a uniformidade e a confiabilidade do sistema.

Neste contexto, a presente dissertação propõe analisar a viabilidade técnica, econômica e operacional da substituição progressiva das luminárias convencionais por luminárias LED no parque de iluminação pública do município de Fortaleza, com foco específico no impacto da ampliação e do uso dessa tecnologia. A abordagem adotada dialoga com estudos anteriores que investigaram a eficiência energética, os níveis luminotécnicos e os impactos econômicos da modernização da iluminação pública, como os trabalhos de Rabaza (2018, p.65), que demonstram ganhos expressivos em desempenho energético e redução de custos operacionais decorrentes da adoção de sistemas de iluminação eficientes.

Simultaneamente, a pesquisa investiga, como proposta complementar, a possível implementação de um sistema de monitoramento e gestão energética baseado em *internet of things* (IoT), visando ao monitoramento remoto, à manutenção preditiva e à operação automatizada da rede de iluminação pública. Essa perspectiva encontra respaldo em estudos

recentes que exploram a aplicação de tecnologias IoT em sistemas de iluminação urbana, destacando-se as contribuições de (Nalagandla; Pattanaik, 2023, p.07), (Sanchez-Sutil; Cano-Ortega, 2023, p.78), Jabbar et al. (2025, p.06) e Khemakhem et al. (2024, p.94), os quais evidenciam melhorias na confiabilidade, na eficiência operacional e na sustentabilidade da gestão da iluminação pública.

A análise desenvolvida considera dados reais referentes à iluminação pública do município de Fortaleza, adotando indicadores financeiros amplamente utilizados na literatura para a avaliação de investimentos em eficiência energética, tais como Payback, Taxa Interna de Retorno (TIR) e Valor Presente Líquido (VPL). Adicionalmente, incorpora-se a análise do Custo do Ciclo de Vida (LCC), que permite avaliar o custo total associado a cada alternativa tecnológica ao longo de todo o horizonte de estudo, englobando o investimento inicial, os custos operacionais com energia e manutenção, eventuais reposições e o valor residual ao final da vida útil considerada. Essa abordagem amplia a compreensão econômica do projeto, uma vez que possibilita comparar não apenas a rentabilidade do investimento, mas também o impacto financeiro acumulado ao longo do tempo.

Essa abordagem metodológica está alinhada a estudos semelhantes já consolidados na literatura, que analisam a viabilidade econômica e a eficiência de diferentes tecnologias de iluminação pública, a exemplo dos trabalhos de (Silva; Castro, 2017, p.125), (Pereira; Costa, 2019, p.475), Rabaza (2018, p.43) e Mohammad (2023, p.682), os quais utilizam métricas financeiras e análises de ciclo de vida para subsidiar decisões de modernização e gestão de sistemas de iluminação urbana.

A hipótese central desta dissertação é que a modernização da iluminação pública por meio da tecnologia LED represente um avanço relevante sob os aspectos tecnológico, econômico e ambiental, conforme já evidenciado em análises sobre a eficiência energética e a redução de custos operacionais em sistemas de iluminação urbana (Kruger; Ramos, 2016, p.43) e (Cavalcanti; Leixo, 2021, p.36). Aliada a esse processo, a proposta de implementação de um sistema de monitoramento e gestão eficiente baseado em *internet of things* (IoT) configura-se como uma estratégia estruturante para o aprimoramento da infraestrutura urbana, ao possibilitar maior controle operacional, otimização da manutenção e suporte à tomada de decisão (Clemente; Paiva; Júnior; Caixeta, 2018, p.108).

Nesse contexto, a literatura aponta que a adoção de sistemas de iluminação pública eficientes contribui não apenas para a redução do consumo energético, mas também para a melhoria da segurança pública e da qualidade de vida da população, além de gerar benefícios ambientais associados à sustentabilidade urbana (Bernardes; Celeste; Chaves, 2020, p.17) e

Shahzad (2018, p.690). Assim, a integração entre tecnologias LED e soluções digitais de gestão reforça o papel da iluminação pública como elemento estratégico no desenvolvimento de cidades mais eficientes, seguras e inteligentes Godoy (2022, p.25).

Adicionalmente, a integração de tecnologias digitais e sistemas inteligentes de gestão tem sido apontada como elemento fundamental para a consolidação do conceito de cidades inteligentes, permitindo maior controle operacional, governança digital e suporte à formulação de políticas públicas mais eficazes e sustentáveis (Clemente; Paiva; Júnior; Caixeta, 2018, p.117) e Echevarría (2023, p.60). Nesse sentido, a presente dissertação pretende contribuir para o debate técnico e institucional sobre a modernização da iluminação pública, alinhando-se às diretrizes contemporâneas de desenvolvimento urbano sustentável e às transformações tecnológicas do século XXI Godoy (2022, p. 44) e Shahzad (2018, p.684).

1.1 Objetivo geral

Analisar a viabilidade econômica da substituição progressiva das luminárias convencionais por luminárias LED e a proposta de sugestão de um sistema de monitoramento e gestão energética baseado em *internet of things* (IoT) na iluminação pública do município de Fortaleza.

1.2 Objetivos específicos

1. Avaliar a eficiência energética das tecnologias de iluminação pública, com ênfase na substituição por LEDs.
2. Proposta de sugestão de um sistema de monitoramento e gestão energética automatizado para iluminação pública do município de Fortaleza utilizando tecnologias de *internet of things* (IoT).
3. Modelar a viabilidade financeira do projeto após *retrofit* para iluminação em LED utilizando indicadores econômicos como *Payback*, VPL, TIR e LCC.

1.3 Apresentação de capítulos

Esta dissertação está estruturada de forma a proporcionar uma análise aprofundada sobre a modernização da iluminação pública na cidade de Fortaleza, com foco nas tecnologias de eficiência energética, como as luminárias LED, e na proposta de sugestão de um sistema de monitoramento e gestão energética automatizado por meio de sistemas baseados em *internet of things* (IoT). Cada capítulo foi desenvolvido para abordar um aspecto crucial dessa

transformação, desde o contexto histórico e a análise técnica até a avaliação dos impactos sociais, ambientais e econômicos.

CAPÍTULO 1 – Introdução

O capítulo introdutório destaca a iluminação pública como elemento essencial do desenvolvimento urbano. Aponta a necessidade de otimização do consumo energético e da modernização de sistemas convencionais, indicando a adoção de luminárias LED e tecnologias de gestão inteligente como alternativas viáveis para maior eficiência e sustentabilidade.

CAPÍTULO 2 – Estado da Arte

O capítulo apresenta estudo técnico, fundamentado em revisão bibliográfica, sobre iluminação pública. Aborda a evolução do cenário de iluminação pública quanto à eficiência e durabilidade, os avanços tecnológicos nos parques de iluminação pública e a aplicação de sistemas de automação voltados à gestão eficiente e à redução de custos operacionais.

CAPÍTULO 3 – Metodologia

Este capítulo apresenta a metodologia adotada para a análise do sistema de iluminação pública de Fortaleza, com base em dados do parque de iluminação, tarifas de energia, custos e composições de instalação de luminárias. São descritos os equacionamentos para estimativa do consumo energético em diferentes cenários de substituição por LED, bem como a análise do Custo do Ciclo de Vida (LCC), considerando investimento inicial, custos de energia e manutenção e valor residual. Adicionalmente, são aplicados os indicadores de Payback, Valor Presente Líquido (VPL) e Taxa Interna de Retorno (TIR) para a avaliação técnica e econômica das alternativas propostas.

CAPÍTULO 4 – Estudo de Caso: Iluminação Pública em Fortaleza

Este capítulo apresenta um estudo de caso realizado em Fortaleza (CE), com análise técnica e financeira da modernização total do parque de iluminação pública, por meio da simulação de substituição das luminárias para tecnologia em LED totalizando um montante referente ao *retrofit* do parque de iluminação pública em 25%, 50% e 75% do total instalado não efficientizado. Por fim, propõe-se como proposta de sugestão a aplicação de um sistema piloto de automação via IoT na Avenida Bezerra de Menezes, visando otimização do consumo do sistema de iluminação pública do local.

CAPÍTULO 5 – Conclusões

O capítulo conclui que a modernização da iluminação pública de Fortaleza, com luminárias LED e automação via IoT, pode ser tecnicamente viável contribuindo para a redução do consumo energético. Os resultados demonstram benefícios econômicos e sustentáveis, confirmando a relevância dessas estratégias para a gestão urbana municipal.

2 ESTADO D'ARTE – ILUMINAÇÃO PÚBLICA

A iluminação pública configura-se como um dos principais instrumentos de qualificação urbana, sendo elemento diretamente associado à mobilidade, à segurança e ao desenvolvimento das cidades. Segundo Godoy (2022, p.82), “a iluminação pública pode ser entendida como um serviço que agrega valor social e funcional às cidades”, assumindo papel que transcende o caráter técnico operacional. Sua evolução tecnológica tem possibilitado ganhos expressivos em termos de eficiência energética, durabilidade e desempenho luminotécnico, destacando a transição das lâmpadas convencionais para as luminárias LED.

A iluminação pública brasileira vem evoluindo tecnologicamente ao longo das décadas, começando com as tradicionais lâmpadas vapor de sódio de alta pressão (VSHP), seguidas pelas lâmpadas de vapor metálico (VMT) e, mais recentemente, pelos sistemas baseados em LED. Segundo (Bernardes; Celeste; Chaves, 2020, p.12), “o sistema de iluminação pública utilizado atualmente perdura desde 1960, período no qual as lâmpadas de (VSHP) e (VMT) passaram a iluminar as cidades brasileiras”. Embora amplamente utilizadas por décadas, essas tecnologias apresentam limitações, como elevada demanda de manutenção, baixo índice de reprodução de cor e com a presença de metais pesados, como o mercúrio, vale ressaltar que algumas lâmpadas de vapor metálico podem apresentar IRC superior ao de alguns sistemas LED.

Segundo (Bernardes; Celeste; Chaves, 2020, p.08),

a evolução da iluminação pública, das lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão (VSHP) e vapor metálico (VMT) até os sistemas LED. As VSHP apresentam eficiência entre 80 e 150 lm/W, vida útil de 15.000 a 24.000 horas e baixo índice de reprodução de cor. As VMT possuem melhor reprodução de cor, porém vida útil inferior, entre 8.000 e 12.000 horas. Já os sistemas LED apresentam eficiência entre 70 e 160 lm/W, vida útil de 40.000 a 90.000 horas e bom desempenho cromático, consolidando-se como a alternativa mais avançada e eficiente.

* **O Índice de Reprodução de Cores (IRC):** parâmetro fotométrico que expressa a capacidade de uma fonte luminosa de reproduzir fielmente as cores dos objetos em comparação com uma fonte de referência, sob as mesmas condições de iluminação. O IRC é expresso em uma escala de 0 a 100, na qual valores mais elevados indicam melhor fidelidade cromática. Fontes de luz com $IRC \geq 80$ são, em geral, consideradas adequadas para aplicações em ambientes urbanos e internos, enquanto valores superiores a $IRC \geq 90$ são recomendados para locais que exigem elevada precisão na percepção de cores. O índice é amplamente utilizado em projetos de iluminação para avaliar qualidade visual, conforto e segurança.

Essa evolução tecnológica favoreceu a implementação de projetos de *retrofit*, substituindo tecnologias antigas por sistemas mais eficientes, conforme Tabelas 02, 03 e 04.

Tabela 03 – Índice de Reprodução de Cores (IRC).

Grupo (NBR 5101)	Classe	IRC (%)	Amarelo (<2400K)	Branco quente (2400-2800K)	Branco morna (2400-2800K)	Branco neutra (3500-5000K)	Branco fria (>5000K)
1ª	Excelente	90–100		Incandescente (2800K)			
1B	Muito bom	80–89			Vapor metálico cerâmico (3000K)	Vapor metálico quartzo (5000K)	
2ª	Bom	60–79					
2B	Regular	40–59				Vapor de mercúrio (4500K)	
3	Regular	20–39	Vapor de sódio AP (2100K)				
4	Pobre	<20					

Fonte: Bernardes (2020) e ABNT NBR 5101:2024.

Tabela 04 – Comparativo entre tecnologias de iluminação pública (VSHP, VMT e LED).

Tecnologia	Eficiência (lm/W)	Vida útil (h)	IRC (Ra)	Classificação (NBR 5101)
VSAP	80 – 150	15.000 – 24.000	20 – 30	Grupo 3 (Baixa)
VMT	70 – 110	8.000 – 12.000	60 – 96	Grupo 1B a 2A
LED	70 – 160	40.000 – 90.000	70 – 90	Grupo 1B a 2A

Fonte: Bernardes (2020) e ABNT NBR 5101:2024

Tabela 05 – Comparação econômico e operacional das tecnologias de iluminação pública (VSHP, VMT e LED).

Tecnologia	Custo inicial	Manutenção	Consumo energético	Custo operacional
VSAP	Baixo	Alta frequência / Alto custo	Médio	Elevado
VMT	Médio	Alta frequência / Alto custo	Médio / Alto	Elevado
LED	Alto	Baixa frequência / Baixo custo	Baixo	Reduzido

Fonte: Bernardes (2020) e ABNT NBR 5101:2024

Segundo (Bernardes; Celeste; Chaves, 2020, p.05), “o *retrofit* nos sistemas de iluminação para lâmpadas de LED já é um grande avanço para a conservação dos recursos energéticos, com economias estimadas entre 40% e 50% no consumo de energia”. Além da durabilidade, os LEDs se destacam pela possibilidade de integração com tecnologias de

automação, como dimerização e sensores inteligentes, possibilitando uma gestão mais eficiente e segura do sistema.

Segundo (Kruger; Ramos, 2016, p.46) e (Bernardes; Celeste; Chaves, 2020, p.20),

a tecnologia dos LEDs mostra superioridade econômica, visto que, em condições equivalentes, o consumo energético associado à iluminação pública pode ser até 60% inferior ao observado em sistemas baseados em lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão e vapor metálico. Essa diferença reflete não apenas a maior eficiência luminosa dos LEDs, mas também sua durabilidade e menor necessidade de manutenção, tornando-os uma alternativa financeiramente mais vantajosa a médio e longo prazo.

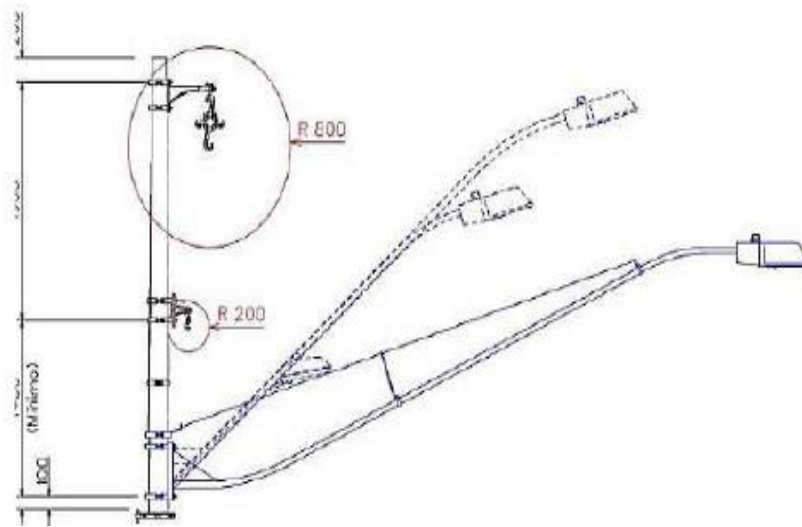
Portanto, a transição tecnológica das luminárias dos sistemas de iluminação pública se configura como não apenas viável, mas estrategicamente necessária para os municípios brasileiros.

A iluminação urbana deve ser planejada considerando as características das vias e o volume de tráfego, de modo a atender requisitos de segurança e conforto visual. Segundo Godoy (2022, p.24), “saber as características da via é fundamental para a definição das soluções”, uma vez que fatores como largura da pista de rolamento ou faixa de rodagem, a presença e circulação de pedestres, a classificação da via e os índices luminotécnicos orientam o dimensionamento adequado dos sistemas.

O desenvolvimento de projetos de iluminação pública exige a observância de critérios normativos e técnicos que assegurem a segurança viária, o conforto visual e a eficiência energética. Conforme destaca Finocchio (2014, p.49), “a classificação viária, em conjunto com a classificação dos municípios, pode ser utilizada especificamente para um bairro ou uma região da cidade”, o que possibilita adequar os sistemas de iluminação pública às características e aos diferentes usos do espaço urbano. Dessa forma, tornam-se viáveis a aplicação de técnicas específicas de projeto e a adoção de soluções luminotécnicas apropriadas para distintos trechos e situações pontuais da malha urbana.

Quando a rede de distribuição aérea não comporta rede de média tensão, é recomendável elevar a altura de montagem das luminárias para permitir maior vão entre postes, respeitando os afastamentos mínimos de segurança exigidos pela concessionária, conforme Figura 03.

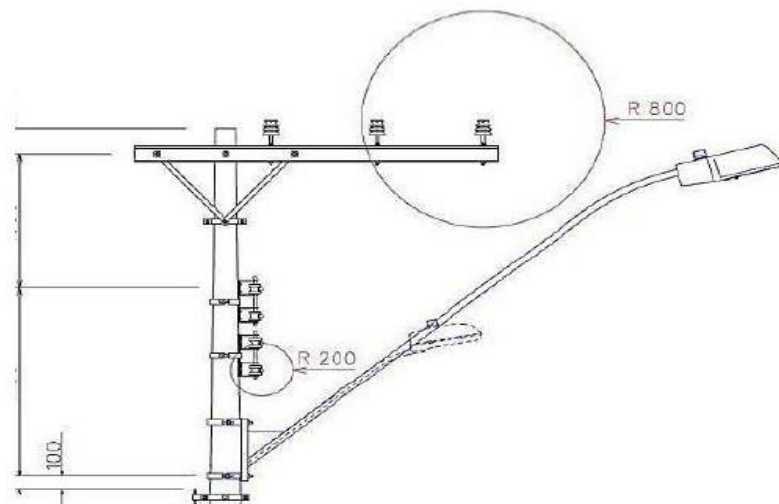
Figura 03 – Iluminação Pública com ausência de rede de média tensão.



Fonte: Finocchio (2014).

Quando a rede de distribuição aérea comporta rede de média tensão, é necessário afastamentos mínimos de segurança exigidos pela concessionária, conforme Figura 04.

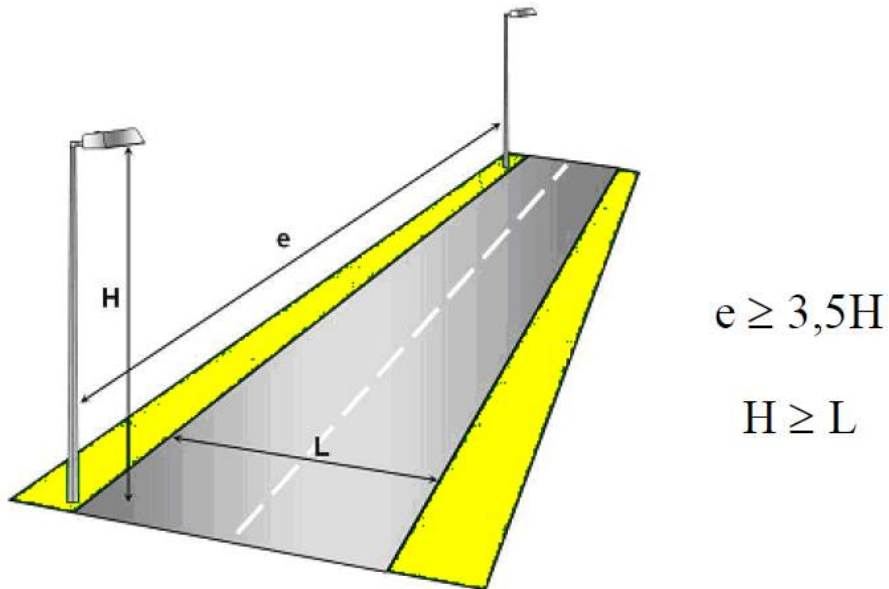
Figura 04 - Iluminação Pública com presença de rede de média tensão.



Fonte: Finocchio (2014).

Os projetos de iluminação pública devem atender critérios para implementação respeitando assim algumas premissas do tipo largura da via, altura do poste e espaçamento, conforme Figura 05.

Figura 05 – Configurações básicas para projetos de iluminação pública.



Fonte: Finocchio (2014).

Em que:

L – Largura da pista de rolamento (mais acostamento quando houver);

H – Altura de montagem da luminária

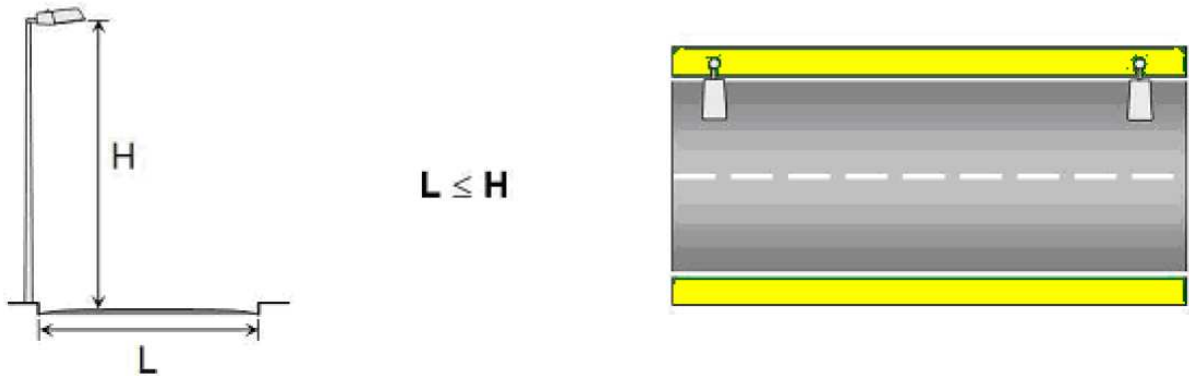
e – Espaçamento entre postes.

Segundo ABNT NBR 5101:2024,

o posicionamento dos postes de iluminação deve atender aos níveis mínimos de iluminância e uniformidade, considerando as características da via, o volume de tráfego e a circulação de pedestres, com ajuste do espaçamento quando necessário. A norma estabelece iluminância média de 5 a 10 lux para vias locais, 10 a 20 lux para coletoras e 20 a 30 lux para arteriais, com uniformidade entre 0,2 e 0,4, enquanto áreas com pedestres demandam entre 5 e 20 lux. Podem ser adotadas configurações como posteamento unilateral, bilateral ou em canteiro central, sendo a escolha condicionada à geometria da via; em canteiros centrais superiores a 6 m, recomenda-se o uso de braços duplos ou múltiplas luminárias.

A posteação unilateral deve ser utilizada quando a largura da pista for menor ou igual à altura de montagem da luminária, conforme Figura 06.

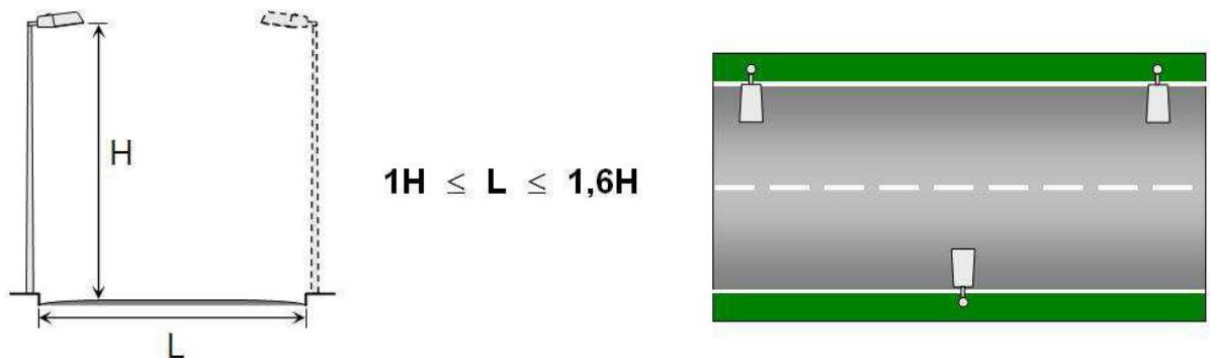
Figura 06 – Posteação Unilateral.



Fonte: Finocchio (2014).

A posteação bilateral alternada deve ser utilizada quando a largura da pista estiver entre 1 e 1,6 vezes a altura da montagem da luminária, conforme Figura 07.

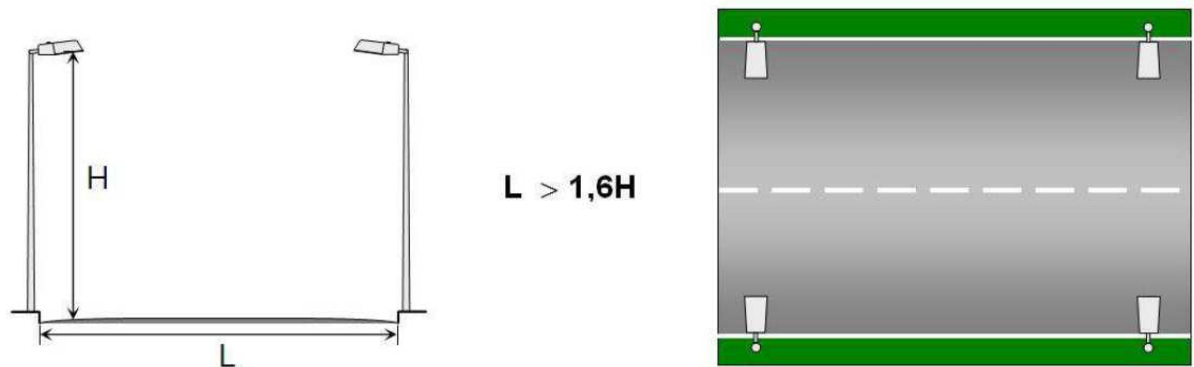
Figura 07 – Posteação bilateral alternada.



Fonte: Finocchio (2014).

A posteação bilateral frente a frente deve ser utilizada quando a largura da pista for 1,6 vezes maior que a altura de montagem da luminária, conforme Figura 08.

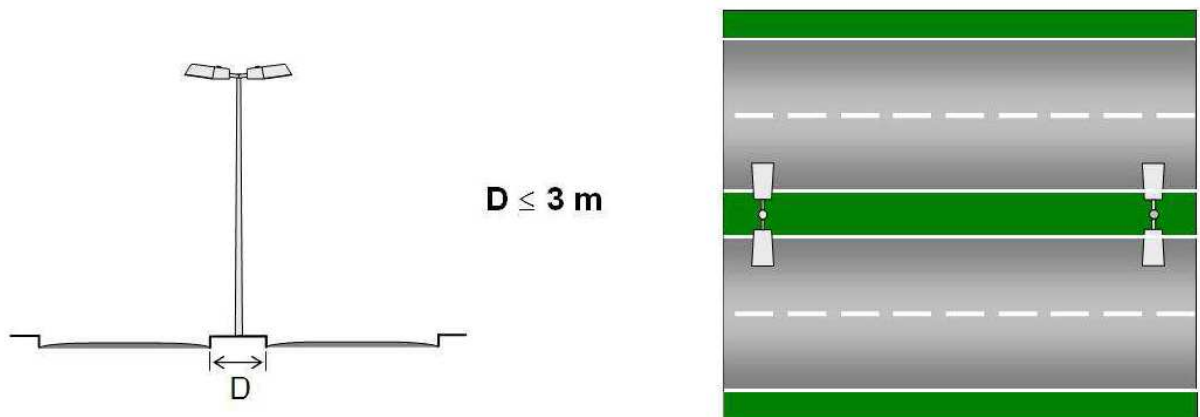
Figura 08 – Posteação bilateral frente a frente.



Fonte: Finocchio (2014).

A posteação no canteiro central deve ser utilizada com suporte quando a largura da pista for menor ou igual a altura de montagem e quando a largura do canteiro central (D) não ultrapassar 3 metros, conforme Figura 09.

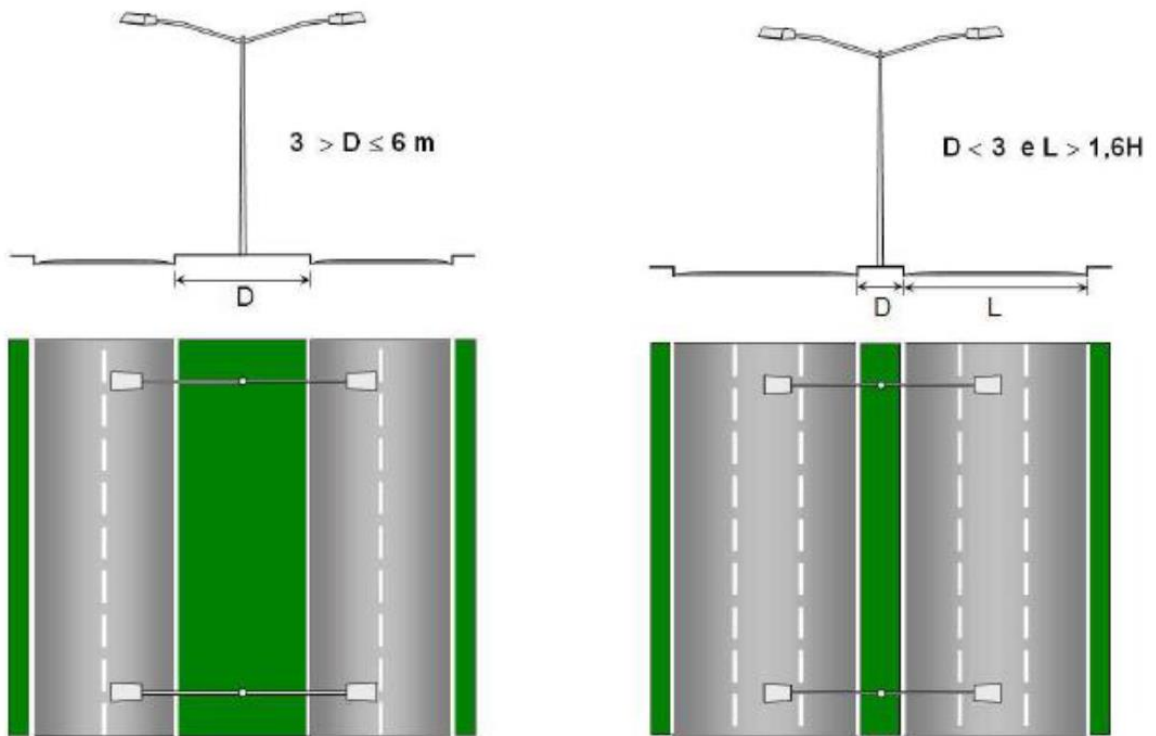
Figura 09 – Posteação canteiro central.



Fonte: Finocchio (2014).

Para canteiros centrais com largura entre 3 e até 6 metros, ou canteiro central com largura menor que 3 metros e largura de pista maior que 1,6 da altura de montagem, devem ser utilizadas as alternativas com postes e chicotes, conformes Figura 10.

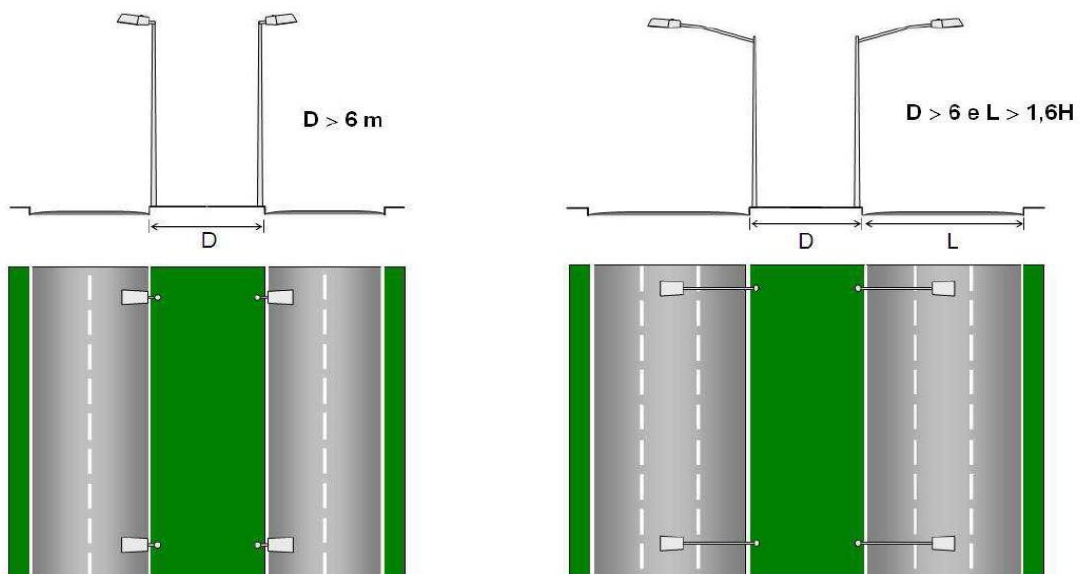
Figura 10 – Posteação canteiro central de 3 a 6 metros.



Fonte: Finocchio (2014).

Para canteiros centrais com largura igual ou maior que 6 metros, deve ser utilizado uma das alternativas apresentadas na Figura 11.

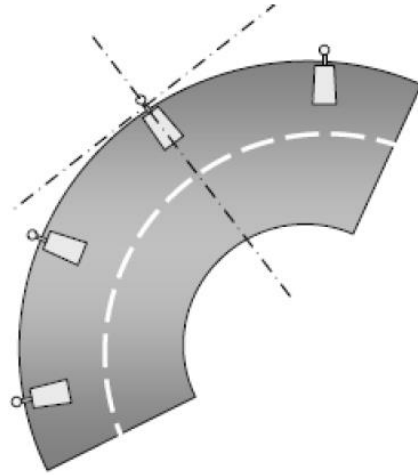
Figura 11 – Posteação canteiro central superior a 6 metros.



Fonte: Finocchio (2014).

A iluminação de curvas, as luminárias devem ser orientadas de modo que o eixo da mesma seja perpendicular ao raio de curvatura da pista, conforme Figura 12.

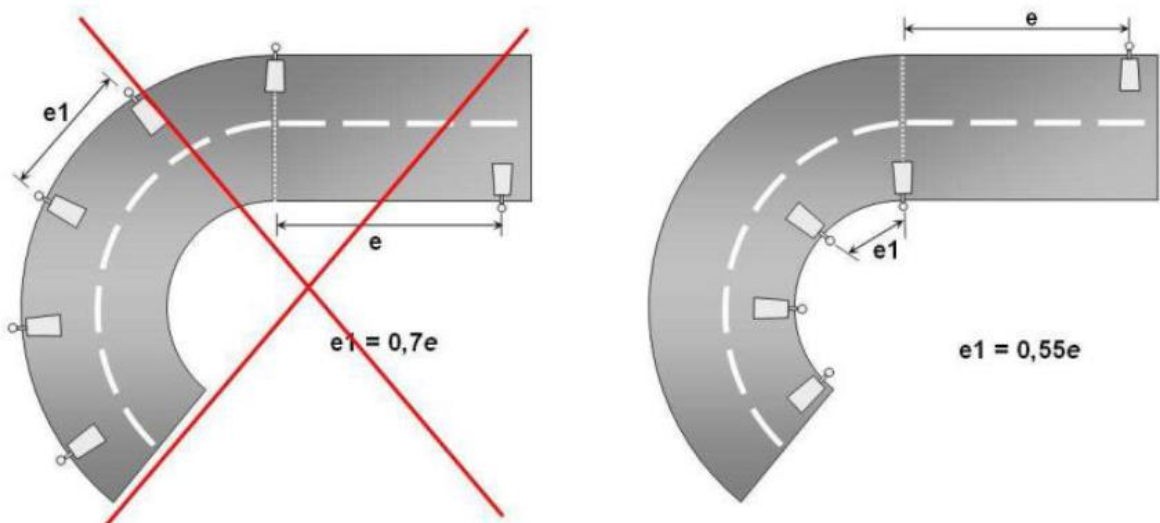
Figura 12 – Posteação perpendicular em curvas.



Fonte: Finocchio (2014).

As curvas inferiores a 1.000 metros e nas alças dos trevos, a posteação deve ser instalada no lado interno a fim de minimizar o risco de abalroamento dos postes, conforme Figura 13. Nestes casos, a altura de montagem pode ser reduzida.

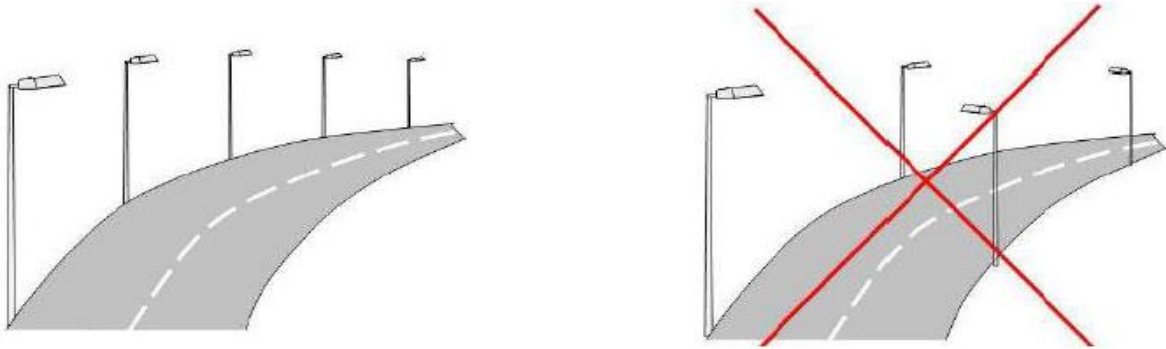
Figura 13 – Posteação em curvas com raios inferiores a 1.000 metros.



Fonte: Finocchio (2014).

As curvas com raio superior a 1000 metros devem ter posteação unilateral à esquerda, evitando-se a desorientação do motorista em relação à curvatura da pista, conforme apresentado na Figura 14.

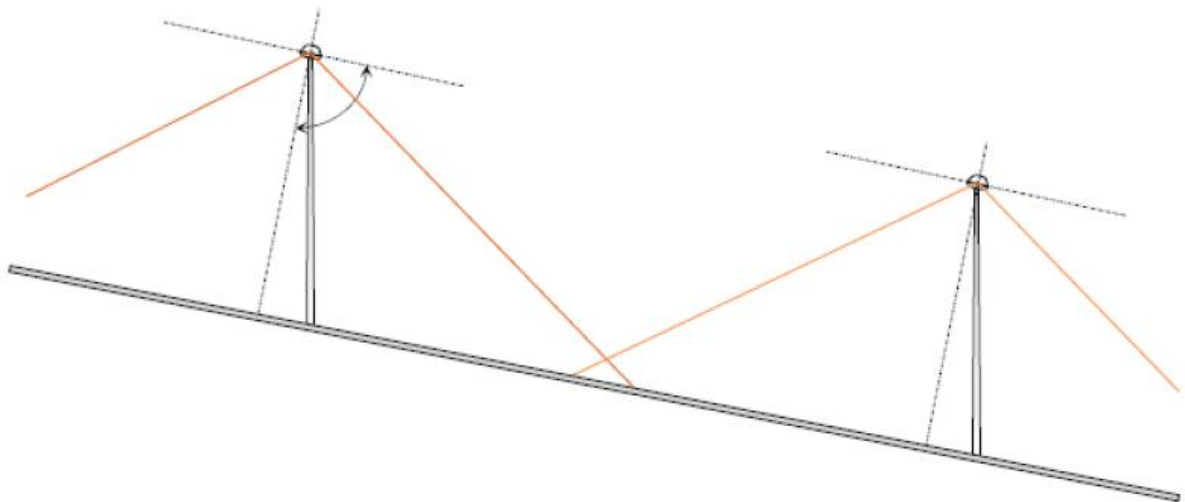
Figura 14 - Posteação em curvas com raios superiores a 1.000 metros.



Fonte: Finocchio (2014).

Os aclives e declives as luminárias devem ser orientadas acompanhando a inclinação da pista de rolamento, conforme Figura 15.

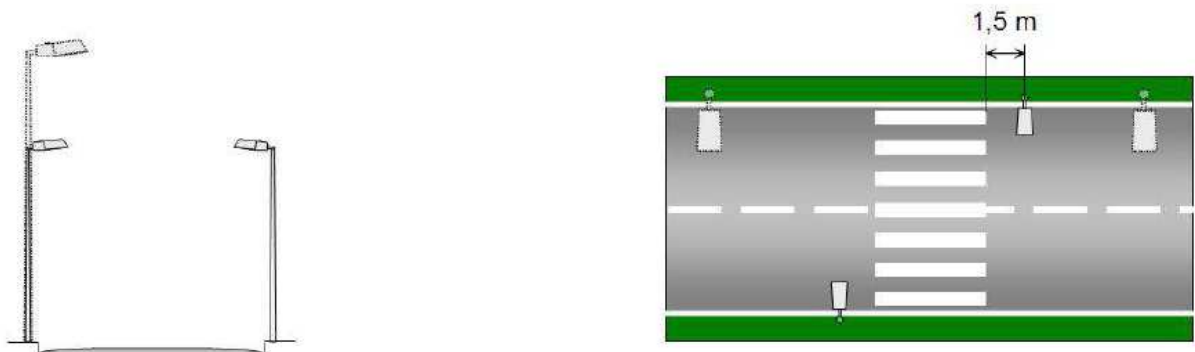
Figura 15 – Posteação em aclives e declives.



Fonte: Finocchio (2014).

A instalação de iluminação pública para passagem de pedestres deve ser feita com poste de aço de 5 metros. Em função das características da distribuição luminosa das luminárias, os postes devem ser defasados em 1,5 metros em relação ao início da faixa conforme apresentado na Figura 16.

Figura 16 – Posteação para passagem de pedestres.

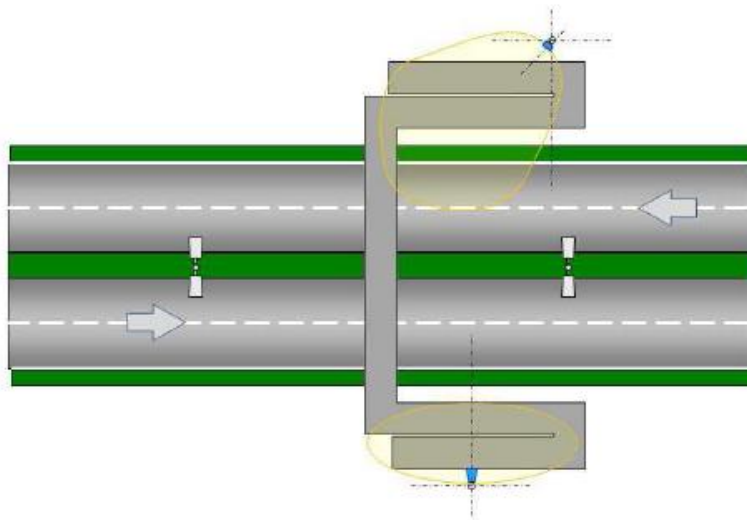


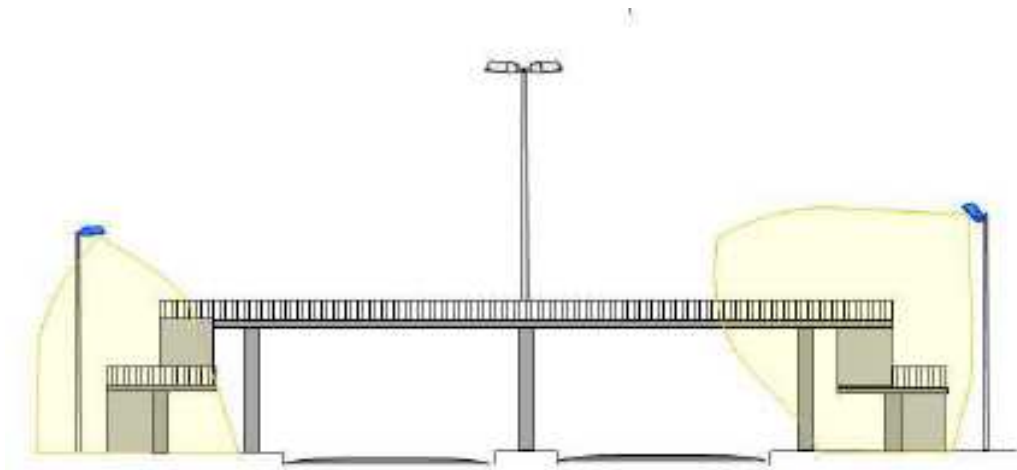
Fonte: Finocchio (2014).

A iluminação de passarelas deve ser feita de forma independente da estrutura utilizando-se postes de aço específicos de iluminação e luminárias ou projetores.

Quando forem utilizados projetores, deve-se observar para que a focalização não provoque ofuscamento ou comprometa o desempenho visual dos condutores de veículos. Para isso, os projetores devem ser focalizados de forma perpendicular ao fluxo de trânsito, conforme Figura 17.

Figura 17 – Posteação em passarelas.





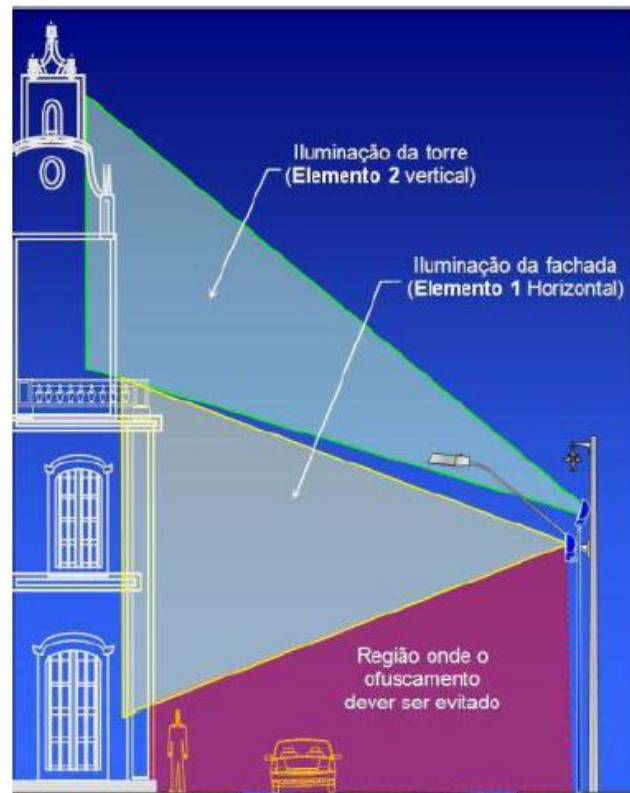
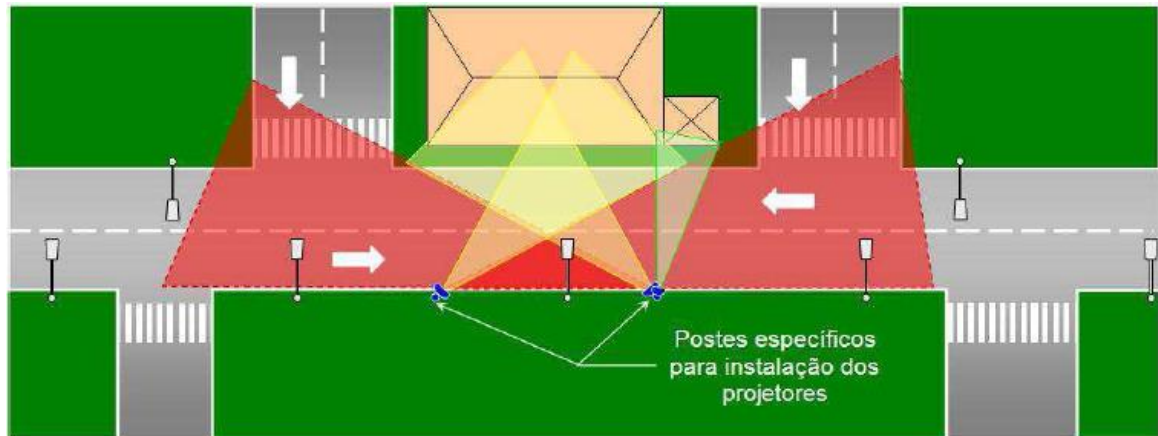
Fonte: Finocchio (2014).

A iluminação de fachadas de edifícios públicos e monumentos constitui elemento relevante do planejamento luminotécnico urbano, por proporcionar valorização visual, leitura noturna qualificada da paisagem e destaque do patrimônio edificado. Essa modalidade de iluminação deve ser concebida de forma a respeitar os princípios de segurança, conforto visual, eficiência energética e preservação da identidade arquitetônica, distinguindo-se da percepção diurna e conferindo nova ambiência ao espaço urbano no período noturno.

A implantação de projetos de iluminação arquitetural em fachadas e monumentos justifica-se por seus efeitos positivos sobre o ordenamento urbano, a orientação espacial dos usuários e a dinamização das atividades turísticas, culturais, comerciais e de lazer. Ademais, tais intervenções contribuem para o estabelecimento de marcos visuais de referência, para o aumento da atratividade dos espaços públicos e para a qualificação do uso noturno da cidade, conforme figura 18.

Projetos decorativos de fachadas e monumentos exigem atenção especial ao contraste, temperatura de cor e ângulo de incidência da luz. Segundo Finocchio (2014, p.19), “o excesso de contraste pode alterar o entendimento arquitetônico da edificação”.

Figura 18 – Posteação para iluminação artística de monumentos.



Fonte: Finocchio (2014).

A implantação da iluminação pública em áreas de expansão urbana deve considerar, de forma integrada, os aspectos ambientais e urbanísticos, especialmente no que se refere à interação entre os sistemas de iluminação e a arborização urbana. A disposição de postes, luminárias e redes elétricas deve ser compatibilizada com o porte, o crescimento e as características fisiológicas das espécies arbóreas. A inadequada compatibilização entre iluminação pública e vegetação pode gerar impactos ambientais diretos, como a necessidade de

podas frequentes e agressivas, o comprometimento do desenvolvimento das árvores, a supressão de copas e a interferência nos habitats de aves e insetos polinizadores.

Além disso, são observados impactos ambientais indiretos, a exemplo do aumento da poluição luminosa, da alteração do comportamento da fauna noturna, da desorientação de espécies sensíveis à luz artificial e da interferência nos ciclos biológicos naturais, como os ritmos circadianos. A utilização de equipamentos inadequados, com distribuição luminosa e espectro incompatíveis, pode ainda provocar ofuscamento, dispersão excessiva de fluxo luminoso e desperdício energético. Nesse contexto, o planejamento técnico adequado da iluminação pública contribui para a mitigação desses impactos, promovendo o uso racional da energia elétrica, a preservação dos ecossistemas urbanos e a integração sustentável entre infraestrutura, vegetação e meio ambiente.

Os diferentes tipos de braços e suportes de iluminação pública, com alturas e projeções variadas, possibilitam melhor adequação da posição das luminárias à arborização existente, reduzindo impactos sobre a vegetação. Em vias com intensa arborização, onde os braços convencionais não atendem às condições necessárias, recomenda-se a utilização de braço longo, cuja instalação, em vias com até 12 metros de largura, deve ser realizada de forma unilateral, conforme Figura 19.

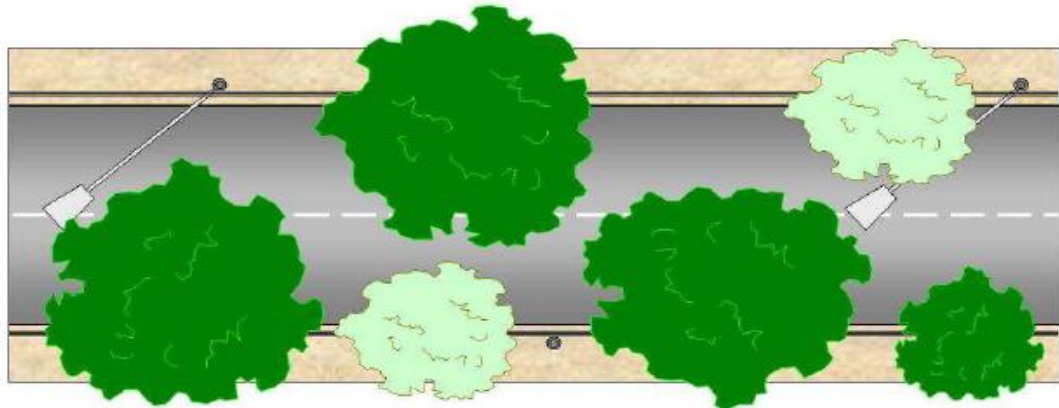
Figura 19 – Posteação para meio ambiente – Caso 01.



Fonte: Finocchio (2014).

Nas vias em que a largura igual ou inferior a 10 metros, o braço de iluminação pode ser instalado em ângulo, de modo a posicionar a luminária sobre o eixo da pista, garantindo melhor distribuição luminosa. Independentemente do tipo de posteação adotado, esse arranjo deve ser implantado de forma unilateral, conforme ilustrado na Figura 20.

Figura 20 – Posteação para meio ambiente – Caso 02.



Fonte: Finocchio (2014).

Para as vias em que a arborização interfere de forma significativa e não passível de correção no desempenho da iluminação pública, podem ser desenvolvidos projetos luminotécnicos específicos, com a utilização de luminárias convencionais, luminárias ornamentais ou projetores, desde que os passeios públicos apresentem dimensões adequadas para a implantação segura e eficiente desses equipamentos, conforme Figura 21.

Figura 21 – Posteação para meio ambiente – Caso 03.



Fonte: Finocchio (2014).

Segundo Finocchio (2014, p.63),

o objetivo de promover a desobstrução da iluminação pública e aprimorar a convivência entre os sistemas de iluminação e a arborização urbana, faz-se necessário o cálculo de variáveis que influenciam diretamente a interferência da vegetação no fluxo luminoso. Esse equacionamento considera, de forma integrada, os ângulos máximos de incidência da luz nos sentidos longitudinal e

transversal da via, a altura de montagem das luminárias e a distância entre os postes de iluminação e as árvores, permitindo avaliar tecnicamente situações de sombreamento e obstrução luminosa.

A compatibilização entre iluminação pública e arborização deve ser tratada como parte essencial do projeto. De acordo com Finocchio (2014, p.22), “a presença de árvores interfere diretamente na distribuição do fluxo luminoso, exigindo soluções técnicas que garantam a eficiência do sistema sem comprometer o meio urbano”. Nesse sentido, o uso de equações e critérios geométricos auxilia na tomada de decisão quanto ao posicionamento de postes, à escolha da altura de montagem e à definição de distâncias mínimas em relação à vegetação existente.

Atualmente, existem ferramentas de apoio ao planejamento, à implantação e à gestão da iluminação pública que podem ser aplicadas em diferentes contextos do espaço urbano. Essas ferramentas possibilitam, inicialmente, a adequação de sistemas existentes, nos quais a posteação e a arborização já se encontram implantadas, permitindo a definição técnica da linha de poda dos ramos que comprometem o desempenho luminotécnico.

Adicionalmente, tais instrumentos auxiliam na implantação de novos sistemas de iluminação em praças, vias e calçadões, contribuindo para a definição adequada da posição dos postes e de sua distância em relação às árvores existentes. No mesmo sentido, podem ser empregados na implantação de novas árvores em espaços públicos, orientando o posicionamento das espécies arbóreas em relação aos postes de iluminação já instalados, de modo a evitar obstruções futuras e preservar o desempenho luminotécnico ao longo da vida útil do sistema.

Nesse contexto, a equação 01 apresentada constitui uma das ferramentas disponíveis para a tomada de decisão técnica e para a implementação eficiente da iluminação pública, ao fornecer subsídios objetivos para o equacionamento entre infraestrutura luminosa e arborização urbana.

$$Z = H - (A \times D) \quad (01)$$

Em que:

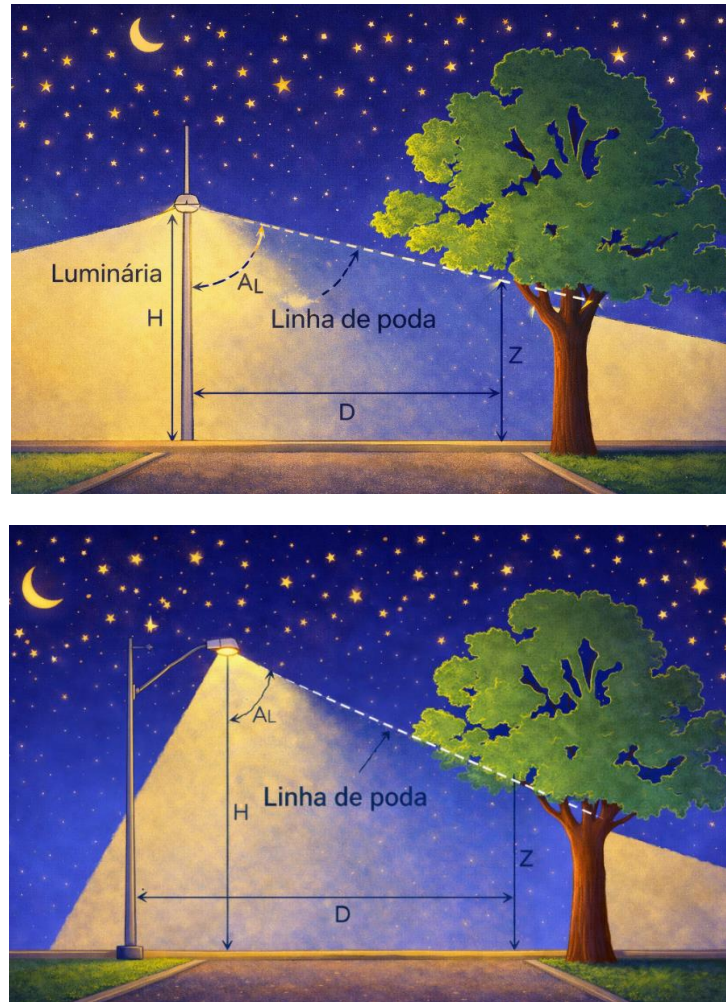
Z - Altura mínima de um galho

H - Altura de montagem da luminária

AL - $\cot 750 = 0,26$ (ângulo de máxima incidência de luz para o sentido longitudinal)

AT - $\cot 600 = 0,57$ (ângulo de máxima incidência de luz para o sentido transversal)
 D - Distância mínima do galho de menor altura

Figura 22 – Projetos para iluminação pública e meio ambiente.



Fonte: Finocchio (2014).

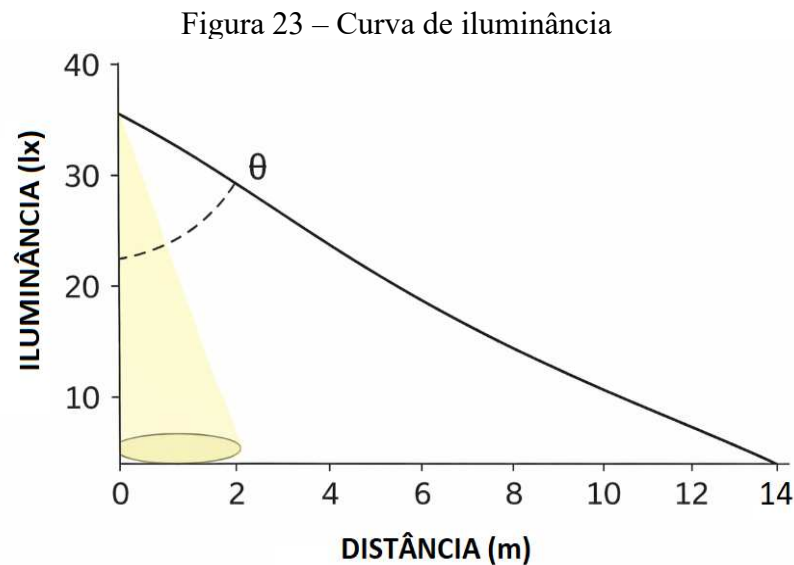
Outro aspecto relevante refere-se à distribuição das intensidades luminosas, que devem ser direcionadas de forma a garantir visibilidade rápida, precisa e confortável. De acordo com Godoy (2022, p.57), “a distribuição apropriada das intensidades luminosas das luminárias é um dos fatores essenciais de iluminação eficiente em vias”. A adoção de fotometrias adequadas, combinada à utilização de tecnologias modernas como o LED e sistemas de automação, permite maior eficiência energética, melhor desempenho e redução dos custos de manutenção, consolidando a iluminação pública como elemento estratégico do planejamento urbano.

A fotometria constitui base essencial para o dimensionamento e a análise dos sistemas de iluminação pública, uma vez que descreve como o fluxo luminoso é distribuído no espaço. Segundo Godoy (2022, p.67), “entender a fotometria é fundamental para a boa utilização das informações na tomada de decisões de projeto”. Conceitos como iluminância, luminância,

intensidade luminosa e fluxo luminoso, permitem quantificar e comparar o desempenho de diferentes fontes e luminárias, estabelecendo parâmetros técnicos indispensáveis para projetos de engenharia elétrica voltados à eficiência energética e ao conforto visual.

Segundo Godoy (2022, p.72), “as curvas fotométricas são ferramentas fundamentais para a análise e o dimensionamento de sistemas de iluminação, pois permitem representar o comportamento da luz emitida por uma fonte luminosa a partir de grandezas definidas segundo a sensibilidade do olho humano”. Entre as principais representações fotométricas, destacam-se as curvas de iluminância, luminância, intensidade luminosa e fluxo luminoso, amplamente empregadas em projetos luminotécnicos.

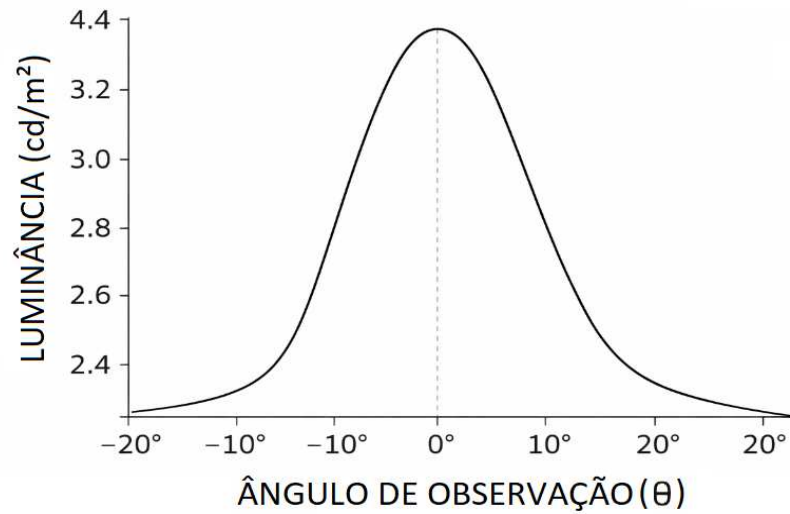
Segundo Godoy (2022, p.72), “a curva de iluminância representa a quantidade de fluxo luminoso que incide sobre uma superfície por unidade de área, sendo expressa em lux, e constitui parâmetro fundamental para a avaliação do desempenho funcional da iluminação”. Conforme Figura 23.



Fonte: Godoy (2022).

De acordo com Godoy (2022, p.73), “a curva de luminância é a grandeza fotométrica que melhor traduz a sensação visual do observador, pois está associada à luz refletida ou emitida por uma superfície na direção do olho humano, expressa na unidade candela por metro quadrado (cd/m^2)”. Conforme Figura 24.

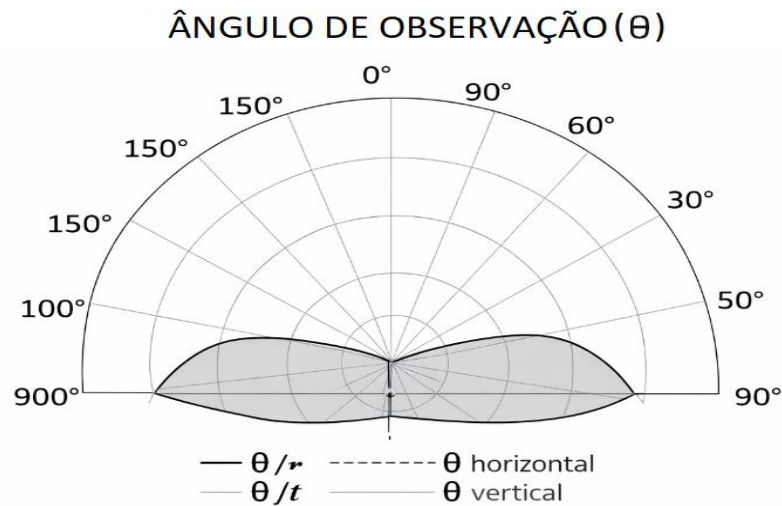
Figura 24 – Curva de luminância



Fonte: Godoy (2022).

Conforme Godoy (2022, p.74), “a intensidade luminosa corresponde ao fluxo luminoso emitido por uma fonte em uma determinada direção, por unidade de ângulo sólido, sendo expressa em candela (cd)”. Conforme Figura 25.

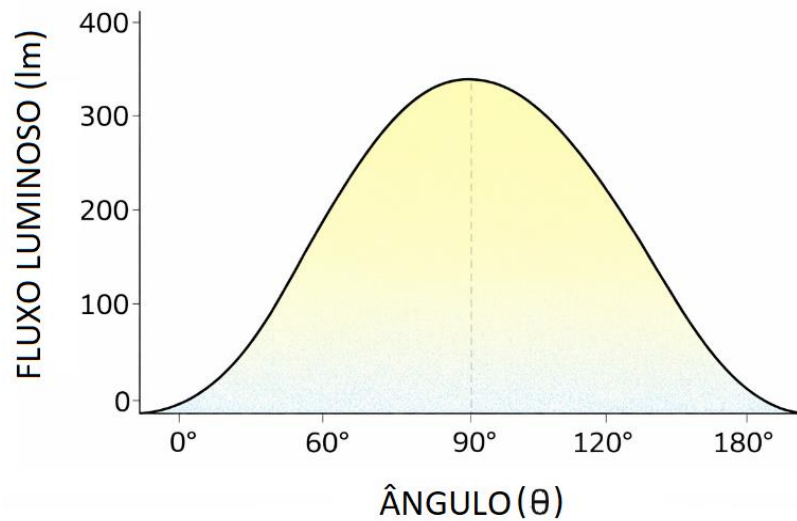
Figura 25 – Curva intensidade luminosa.



Fonte: Godoy (2022).

Segundo Godoy (2022, p.76), “a curva de fluxo luminoso corresponde à quantidade total de luz emitida por uma fonte luminosa, independentemente da direção, sendo expresso em lúmens (lm) e amplamente utilizado na avaliação da eficiência energética”. Conforme Figura 26.

Figura 26 – Curva de fluxo luminoso.



Fonte: Godoy (2022).

Além disso, a correta interpretação das curvas fotométricas possibilita a escolha adequada das luminárias e auxilia na definição das condições de montagem e operação. Segundo Godoy (2022, p.76), “as curvas fotométricas utilizam o conceito de fotometria absoluta”, o que assegura que cada conjunto luminária, LED e lente seja avaliado de forma específica.

No Brasil, programas como o PROCEL Reluz e o Programa de Eficiência Energética da Agência Nacional de Energia Elétrica têm incentivado municípios a investir na substituição de equipamentos obsoletos por soluções mais eficientes. De acordo com (Bernades; Celeste; Chaves, 2020, p.11), “a alternativa mais viável para revitalização do sistema de iluminação pública é o *retrofit* das lâmpadas tradicionais por lâmpadas LED”. Essa tecnologia se destaca pela maior durabilidade, menor consumo e pela possibilidade de integração a sistemas inteligentes de monitoramento.

O impacto do *retrofit* não se limita apenas à redução de consumo energético, mas trazem vantagens ambientais, como a ausência de mercúrio nas lâmpadas LED e a menor geração de resíduos ao longo do ciclo de vida útil. Conforme ressaltam Shahzad (2018, p.690), “as principais vantagens do uso de luminárias LED em comparação com as luminárias convencionais incluem a redução da emissão de carbono, bem como a ausência de mercúrio”. Isso demonstra a contribuição direta dessa tecnologia para as metas de sustentabilidade.

Além das lâmpadas LED, outras soluções complementares vêm sendo estudadas, como sistemas de dimerização, integração com fontes solares e monitoramento por microcontroladores. Tais recursos ampliam a capacidade de gerenciamento do sistema, otimizando a operação e reduzindo custos de manutenção. De acordo com (Clemente; Paiva;

Júnior; Caixeta, 2018, p.108), “a luminária de LED proporciona autonomia sobre o controle do sistema de iluminação pública”, reforçando o caráter estratégico dessa modernização para o planejamento urbano sustentável.

Paralelamente, observa-se a incorporação de sistemas de automação e controle, que permitem monitoramento remoto, manutenção preditiva e regulação do fluxo luminoso. Tais recursos contribuem para maior eficiência operacional e para a racionalização do consumo energético, representando avanços alinhados às diretrizes contemporâneas de sustentabilidade. Segundo Godoy (2022, p.44), “a modernização, por meio de tecnologias eficientes e sustentáveis, constitui passo fundamental para a construção de ambientes urbanos mais equilibrados e funcionais”.

A avaliação da eficiência energética em sistemas de iluminação pública é um tema recorrente, especialmente diante da necessidade de reduzir o consumo e melhorar a sustentabilidade das cidades. Segundo Rabaza (2018, p.46), “medições de iluminação, materiais de instalação, posição das luminárias e dados de consumo de eletricidade podem ser facilmente integrados aos sistemas de informação”, evidenciando a relevância do uso de ferramentas digitais no diagnóstico da situação atual dos sistemas urbanos de iluminação.

O uso de imagens aéreas obtidas por drones com sistemas de informação geográfica (GIS), permite medições de luminância em grandes áreas com precisão e rapidez. Segundo Rabaza (2018, p.64), “este método fornece dados valiosos para administradores municipais e urbanos, que necessitam conhecer o estado atual de suas instalações de iluminação pública”. Essa abordagem representa um avanço significativo em relação aos métodos tradicionais, que demandam maior tempo e recursos.

Outro aspecto de destaque é a aplicação do critério SLEEC (Street Lighting Energy Efficiency Criterion), desenvolvido como indicador para avaliar a eficiência das instalações. Como aponta Rabaza (2018, p.36), “quanto menor for o consumo, melhor será a classe energética da instalação de iluminação”. Tal métrica permite a classificação de diferentes sistemas de iluminação, facilitando a comparação e auxiliando gestores na escolha de alternativas mais eficientes.

O crescimento da demanda energética global, aliado às limitações das fontes convencionais, reforça a necessidade de soluções sustentáveis para sistemas de iluminação pública. Segundo (Nalagandla; Pattanaik, 2023, p. 1464), “quando comparadas às fontes não renováveis para a geração de eletricidade, as fontes renováveis, como solar e eólica, estão se tornando mais vantajosas”, destacando o potencial dessas fontes para substituir tecnologias obsoletas e reduzir impactos ambientais. No Brasil, esse movimento ganha ainda mais

relevância diante da composição da matriz elétrica nacional, que se destaca internacionalmente pela predominância de fontes renováveis.

Segundo Empresa de Pesquisa Energética (2023),

84,8% da eletricidade gerada no Brasil em 2022 teve origem em fontes renováveis, enquanto apenas 15,2% foram provenientes de fontes fósseis ou nucleares. Entre as fontes renováveis, a hidrelétrica representa 53,9% da geração elétrica, mantendo-se como base do sistema nacional. A energia eólica já corresponde a 11,5%, enquanto a solar fotovoltaica atinge 5,5%, sendo a fonte que mais cresce proporcionalmente, tanto em usinas centralizadas quanto em geração distribuída. Outras fontes renováveis, como biomassa e resíduos, somam 13,9%. Por outro lado, as fontes não renováveis incluem gás natural com 7,7%, carvão mineral com 3,5%, petróleo e derivados com 2,4% e nuclear com 1,6%, evidenciando a expressiva diferença entre a matriz elétrica brasileira e a média mundial, onde a participação de renováveis ainda não ultrapassa 30%.

Nesse cenário, a modernização dos sistemas de iluminação pública pode se beneficiar diretamente dessa matriz limpa e diversificada. A adoção de sistemas híbridos autônomos, que combinam geração solar e eólica com armazenamento em baterias, permitindo expandir a cobertura de iluminação para áreas remotas ou urbanas com infraestrutura deficitária, promovendo segurança e inclusão. Em áreas interligadas à rede, a substituição por luminárias LED associadas a sistemas de geração renovável e automação fortalece o compromisso com a eficiência energética.

A integração entre diferentes fontes renováveis possibilita compensar a variância natural da geração isolada, garantindo maior estabilidade. De acordo com (Nalagandala; Pattanaik, 2023, p. 1464), “um sistema de energia renovável híbrido é a combinação de duas ou mais fontes renováveis, logo o atendimento à demanda passa a ser de forma mais consistente e reduz a dependência da rede elétrica”. Essa abordagem ganha relevância em áreas urbanas, onde os custos da eletricidade são elevados e a confiabilidade do sistema é essencial para o suporte às atividades urbanas. Nessa perspectiva, os sistemas off-grid, que operam de forma independente da rede convencional, tornam-se uma solução viável, especialmente em locais remotos ou sujeitos a instabilidades no fornecimento. A integração com sistemas de armazenamento de energia, como baterias, permite que a energia gerada por fontes renováveis, como solar e eólica, seja acumulada e utilizada conforme a necessidade, garantindo autonomia durante períodos sem

insolação ou vento. Dessa forma, a iluminação pública pode manter sua operação ininterrupta, mesmo em condições adversas, fortalecendo a resiliência urbana e reduzindo a vulnerabilidade energética de áreas críticas.

Outro aspecto fundamental é a incorporação da *internet of things (IoT)* como ferramenta de monitoramento e acionamento. Conforme (Nalagandla; Pattanaik, 2023, p.1466), “a operação geral do sistema de IoT é monitorar os valores de tensão e corrente do sistema híbrido de energia renovável”, o que viabiliza o acompanhamento em tempo real do desempenho dos sistemas, aumenta a eficiência operacional e favorece ações preventivas de manutenção.

Nesse contexto, a escolha do microcontrolador ESP8266 justifica-se por sua capacidade de integrar sensores e dispositivos em redes IoT de forma eficiente e econômica. Trata-se de uma solução de baixo custo, com conectividade Wi-Fi embarcada, baixo consumo energético e ampla compatibilidade com plataformas de desenvolvimento, o que favorece sua aplicação em sistemas distribuídos de iluminação pública. Conforme (Nayyar; Puri, 2016, p.10), “o ESP8266 incorpora um microcontrolador com pilha de protocolo TCP/IP, permitindo sua utilização em aplicações embarcadas conectadas à internet”. Além disso, sua capacidade de processamento local e comunicação com sensores possibilita o monitoramento de grandezas elétricas, como tensão e corrente, contribuindo para a operação eficiente e para a manutenção preditiva do sistema.

Entretanto, considerando a extensão territorial dos sistemas de iluminação pública e a necessidade de comunicação em longas distâncias, a utilização do protocolo LoRa (Long Range) mostra-se tecnicamente adequada. Essa tecnologia permite a transmissão de dados a longas distâncias com baixo consumo de energia, sendo especialmente indicada para redes de sensores distribuídos em áreas urbanas e periurbanas. Diferentemente das redes Wi-Fi, que apresentam alcance limitado e maior consumo energético, o LoRa possibilita a comunicação eficiente entre dispositivos mesmo em locais com infraestrutura limitada, reduzindo custos operacionais e aumentando a escalabilidade do sistema.

Dessa forma, a integração entre o ESP8266 e o protocolo LoRa possibilita a construção de uma arquitetura de comunicação eficiente, na qual o microcontrolador atua no processamento e coleta de dados, enquanto o LoRa viabiliza a transmissão em longas distâncias. Essa combinação contribui para o desenvolvimento de sistemas de iluminação pública mais inteligentes, confiáveis e energeticamente eficientes, alinhados aos princípios de cidades inteligentes e à modernização da infraestrutura urbana.

O módulo pode ser programado diretamente por meio da IDE do Arduino, utilizando a linguagem C/C++, ou via plataformas como NodeMCU, que oferece suporte à linguagem Lua.

Conforme Figura 27 o ESP8266 possui GPIOs (General Purpose Input/Output), UART, SPI, I²C e ADC, além de conectividade Wi-Fi IEEE 802.11 b/g/n, operando em 2,4 GHz. Sua memória varia conforme o modelo (por exemplo, ESP-01, ESP-12E), podendo chegar a 4 MB de flash. Essa flexibilidade o torna ideal para aplicações em automação residencial, monitoramento remoto, controle de iluminação pública, entre outros. De acordo com Rao (2018, p.149), “o uso do ESP8266 em projetos IoT oferece não apenas economia de energia, mas também escalabilidade e confiabilidade para redes de sensores e atuadores”. A adoção crescente desse microcontrolador evidencia seu papel estratégico no avanço de soluções conectadas em cidades inteligentes. Conforme Figura 27.

Figura 27 – ESP8266



Fonte: Nayyar e Puri (2016).

A iluminação pública representa uma parcela significativa do consumo energético municipal e exerce papel central no desenvolvimento urbano sustentável. Segundo Salvia, (2019, p.855), “os sistemas de iluminação pública têm papel de destaque na promoção da qualidade de vida nos centros urbanos, atuando como instrumento de cidadania e contribuindo para o desenvolvimento social e econômico”. No entanto, observa-se que a gestão desse setor ainda carece de maior atenção, especialmente em países em desenvolvimento, onde a eficiência energética pode representar importante fonte de economia e de redução de impactos ambientais.

Para enfrentar esses desafios, diferentes práticas de eficiência energética vêm sendo aplicadas globalmente, como auditorias, *retrofit* de sistemas, uso de energias alternativas e telegestão. Segundo Salvia (2019, p.855), “programas de eficiência energética nesse campo são muito bem-vindos, pois existem várias opções de economia de energia, algumas das quais permitem reduções de até 50% no consumo de eletricidade”. Nesse contexto, a seleção das práticas mais adequadas exige metodologias que considerem múltiplos critérios técnicos, econômicos e ambientais.

O estudo analisado propõe a utilização do método *Analytic Hierarchy Process* (AHP) como ferramenta de apoio à tomada de decisão. Segundo Salvia (2019, p.857), “o método AHP

é uma das ferramentas de apoio à decisão mais populares devido à sua simplicidade e à possibilidade de ser utilizado por grupos de tomada de decisão”. Essa abordagem permite estruturar critérios hierárquicos e comparar alternativas de forma sistemática, garantindo maior consistência nas escolhas e alinhamento com os objetivos de sustentabilidade urbana.

Os resultados obtidos em três municípios brasileiros (Passo Fundo, Porto Alegre e Santa Maria) demonstraram que práticas como *retrofit* e gestão inteligente se destacam em termos de potencial de economia e viabilidade de implementação. Como ressalta Salvia (2019, p. 862), “as práticas recomendadas para o projeto de iluminação pública sustentável nas três cidades estudadas podem subsidiar a decisão dos governos locais”. Assim, a integração de métodos multicritério ao planejamento energético municipal mostra-se essencial para ampliar a eficiência, reduzir custos e contribuir com metas de sustentabilidade.

Além disso, o uso da *internet of things* (IoT) aplicada à iluminação pública tem potencial de ampliar a eficiência operacional. Por meio de sensores e sistemas de automação, é possível realizar monitoramento em tempo real, regular a intensidade luminosa conforme a demanda e prevenir falhas de forma proativa. Conforme destaca (Gore; Prasad; Ambhika, 2023, p. 13), “o IoT é uma tecnologia potente que tem o potencial de auxiliar diversos serviços em operações ambientais no seu nível mais alto de eficiência”. Dessa forma, o emprego de IoT em conjunto com sistemas híbridos representa um avanço significativo rumo a cidades inteligentes e energeticamente eficientes.

No campo técnico, a utilização de módulos como o ESP8266, integrados a microcontroladores, possibilita a conexão de sensores e a gestão integrada do sistema de iluminação. Esses dispositivos permitem não apenas o controle remoto das cargas, mas também a coleta e transmissão de dados de desempenho, viabilizando análises preditivas. Segundo (Gore; Prasad; Ambhika, 2023, p. 66), “a utilidade de soluções habilitadas por IoT para controlar e monitorar a produção e o consumo de energia podem acontecer em tempo real”. Esse cenário amplia a confiabilidade e a eficiência da operação, com impacto positivo na sustentabilidade.

Portanto, a convergência entre LEDs, energias renováveis e tecnologias digitais representa um caminho promissor para a eficiência energética em iluminação pública. Os resultados de simulações e projetos-piloto demonstram ganhos ambientais, econômicos e sociais, reforçando a importância de políticas públicas e investimentos voltados à inovação nesse setor. Assim, observa-se que a iluminação pública deixa de ser apenas uma demanda de infraestrutura e passa a configurar-se como vetor estratégico para a sustentabilidade urbana.

A modernização das cidades inteligentes depende fortemente da eficiência energética em sistemas de iluminação pública. Nesse contexto, o desenvolvimento de analisadores de qualidade de energia baseados em tecnologias de comunicação de longo alcance representa uma solução estratégica. Como afirmam (Sanchez-Sutil; Cano-Ortega, 2023, p.01), “as instalações de iluminação pública possuem um consumo significativo de energia elétrica”, justificando a necessidade de ferramentas de monitoramento contínuo que permitam reduzir custos e otimizar a gestão energética.

O dispositivo PQAL (Power Quality Analyser with LoRa) foi projetado para monitorar instalações em tempo real, utilizando sensores não invasivos e comunicação sem fio de longo alcance. Essa característica permite medições de até 100 A por fase, com elevada precisão, sem modificar a infraestrutura existente. Segundo (Sanchez-Sutil; Cano-Ortega, 2023, p.08), “medidas dessa magnitude trazem economia e eficiência energética após serem implementadas”, reforçando seu papel na sustentabilidade de redes urbanas de iluminação.

A adoção do PQAL também se mostra relevante frente às limitações das tecnologias tradicionais, como Wi-Fi e ZigBee, que apresentam menor cobertura e maior consumo energético. Segundo (Sanchez-Sutil; Cano-Ortega, 2023, p.03), “as redes LoRa são muito robustas em termos de critérios de segurança”, o que assegura maior confiabilidade em ambientes externos expostos a ataques cibernéticos.

Por fim, o caráter *open-source* do sistema amplia sua aplicabilidade, permitindo adaptações em diferentes contextos, como monitoramento de motores, geração renovável e sistemas residenciais. Conforme (Sanchez-Sutil; Cano-Ortega, 2023, p.06), “o PQAL é uma ferramenta muito versátil que pode ser adaptada às necessidades de cada aplicação”.

A evolução da iluminação pública está diretamente ligada ao avanço das tecnologias voltadas à eficiência energética e sustentabilidade. Os sistemas convencionais, como as lâmpadas de sódio de alta pressão (HPS), apresentam elevado consumo e baixa eficiência luminosa, desperdiçando cerca de 65 a 70% da energia em calor. Segundo Mohammad (2023, p.684), “as lâmpadas de sódio surgiram como uma das fontes mais difundidas, porém limitadas em termos de eficiência e capacidade de integração com dispositivos inteligentes”. Esse cenário impulsionou a substituição gradual por tecnologias mais avançadas, especialmente as luminárias LED.

A introdução dos LEDs trouxe ganhos significativos em eficiência, durabilidade e qualidade luminosa. Segundo Mohammad et al. (2023, p.687), “a tecnologia LED se demonstrou uma alternativa eficiente ao consumo elevado de energia, apresentando vida útil

entre 25.000 e 100.000 horas”. Além disso, sua flexibilidade permite integrar sistemas de automação, reduzindo custos operacionais e impactos ambientais.

Entre as estratégias de otimização, o sistema *part-night* destaca-se por regular a intensidade luminosa em períodos de menor tráfego. Segundo Mohammad (2023, p.679), “esse modelo permite reduzir entre 40 e 60% do consumo em comparação ao uso contínuo”. Embora apresente limitações por não considerar o fluxo dinâmico de pedestres e veículos, sua aplicação revela-se eficiente em contextos de menor densidade urbana.

Por sua vez, os sistemas inteligentes baseados em sensores de presença (PIR) e georreferenciamento (GPS) oferecem maior precisão no controle do consumo. Conforme Mohammad (2023, p.691), “a iluminação inteligente tem potencial para minimizar o desperdício de energia entre 35% e 65%, ajustando o fluxo luminoso conforme a demanda”. A integração desses recursos com redes de comunicação sem fio posiciona a iluminação pública como um eixo estratégico para a construção de cidades mais sustentáveis e resilientes.

Em síntese, a iluminação pública revela um cenário em plena transformação. Os sistemas estão deixando de ser infraestruturas passivas, consumidoras de energia, para se tornarem plataformas inteligentes de gestão urbana, integradas a diversos serviços públicos e alinhadas aos princípios da sustentabilidade. O futuro aponta para sistemas cada vez mais autônomos, modulares, conectados e sensíveis ao contexto urbano, consolidando a iluminação pública como um pilar fundamental da cidade do futuro.

3 METODOLOGIA

A eficiência energética em sistemas de iluminação pública é um aspecto essencial para a gestão urbana sustentável, pois integra conceitos como eficiência luminosa, luminância e iluminância para otimizar o consumo de energia, reduzir custos e minimizar os impactos ambientais. A modernização dos sistemas de iluminação, especialmente com a adoção de luminárias LED e tecnologias de controle inteligente, oferece uma solução eficaz para a redução do consumo energético. Além disso, a gestão eficaz desses sistemas envolve práticas como manutenção regular, substituição de lâmpadas ineficientes e a implementação de tecnologias de monitoramento remoto para ajustes em tempo real. Essas ações não só promovem um uso sustentável da energia, mas também melhoram a segurança e a qualidade de vida urbana, criando cidades mais eficientes e ambientalmente responsáveis.

No processo de análise dos dados referentes aos pontos de iluminação pública para esta dissertação, foram identificadas diversas luminárias instaladas no parque de iluminação, as quais apresentam potências nominais distintas conforme o tipo de tecnologia utilizada. Essas luminárias foram catalogadas e classificadas de acordo com seus modelos e características técnicas, abrangendo tecnologias de (VSHP), (VMT) e LED, cada uma com faixas específicas de potência e eficiência luminosa. Diante dessa variedade de equipamentos, adotou-se uma média de potência representativa de todas as luminárias inseridas no parque de iluminação para o cálculo do consumo energético total e para a comparação com os novos sistemas em LED. Essa abordagem metodológica permitiu estimar com maior precisão os ganhos de eficiência decorrentes da substituição tecnológica, evidenciando reduções expressivas no consumo de energia e nos custos de manutenção.

Segundo (SCSP, 2025),

atualmente, com base nos dados analisados de janeiro de 2020 até setembro de 2025, Fortaleza possui 210.898 pontos inseridos em seu parque de iluminação pública do município de Fortaleza, sendo estes dispostos em 166.210 pontos de iluminação em tecnologia de vapor metálico (VMT), totalizando um percentual de 78,81%, 5.959 pontos de iluminação em tecnologia de vapor de sódio de alta pressão (VSHP), correspondendo a aproximadamente 2,82%, e 38.468 pontos de iluminação em tecnologia LED já eficientizados, representando 18,24% do total.

O estudo focará na análise do acréscimo de 25%, 50% e 75% do *retrofit* total do parque ainda não eficientizado para tecnologias em LED.

O objetivo principal desta dissertação é determinar a viabilidade econômica da substituição da iluminação convencional de tecnologias de (VSHP) e (VMT) para tecnologias de luminárias em LED. Além disso, o objetivo complementar é apresentar uma proposta de sugestão para a implementação de um sistema de gestão energética inteligente baseado em IoT, abordando as principais estratégias e como elas poderiam impactar o parque de iluminação pública, promovendo melhorias na eficiência energética e na otimização do consumo. A dissertação também busca analisar as possíveis implicações dessa transição, considerando o impacto positivo na redução de custos e na sustentabilidade ambiental. Para isso, é necessário calcular e comparar o consumo de energia das luminárias existentes com o das luminárias LED substitutas, conforme apresentado na Equação 02.

$$CE = P \times D \times H \quad (02)$$

Sendo:

CE – Consumo energético mensal (kWh/mês);

P – Potência nominal do equipamento (kW);

D – Número de dias de utilização do equipamento (dias);

H – Média de horas diárias do equipamento em operação no sistema (h).

A equação 02 demonstra que o produto entre a variável (P) potência nominal do equipamento, o (D) número de dias de utilização e a (H) média de horas diárias em operação resultando assim no valor da energia consumida mensalmente pelo equipamento.

Os custos com energia elétrica também são apresentados. A Tabela 06 apresenta a evolução do aumento tarifário ao longo do período de 2020 a 2025.

Tabela 06 - Evolução tarifária classe B4 - Valores (TE) + (TUSD) + (Impostos).

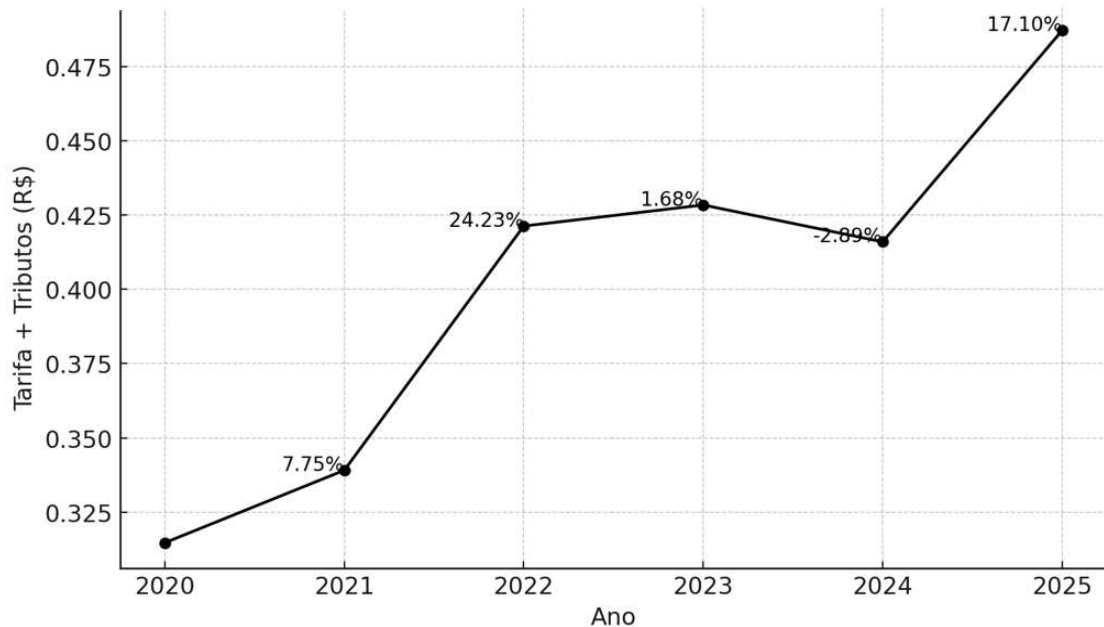
Ano	Itens da fatura	Unidade	Tarifa + Tributos (R\$)
2020	Energia Ativa Fornecida (TE + TUSD + Impostos)	kWh	0,31473
2021	Energia Ativa Fornecida (TE + TUSD + Impostos)	kWh	0,33911
2022	Energia Ativa Fornecida (TE + TUSD + Impostos)	kWh	0,42127
2023	Energia Ativa Fornecida (TE + TUSD + Impostos)	kWh	0,42835

Ano	Itens da fatura	Unidade	Tarifa + Tributos (R\$)
2024	Energia Ativa Fornecida (TE + TUSD + Impostos)	kWh	0,41595
2025	Energia Ativa Fornecida (TE + TUSD + Impostos)	kWh	0,48706

Fonte: Enel-CE (2025, com adaptações).

O gráfico 01 representa a evolução tarifária de energia com tributos praticados pela ENEL – CE referente a classe B4 relacionada a iluminação pública.

Gráfico 01 - Evolução tarifária de energia com tributos ENEL-CE – classe B4



Fonte: elaborado pelo autor.

O gráfico 01 apresentado ilustra a evolução da tarifa de energia elétrica acrescida de tributos no período de 2020 a 2025, evidenciando um comportamento oscilatório, porém com tendência geral de crescimento ao longo dos anos. Observa-se que, entre 2020 e 2021, ocorreu um aumento moderado, da ordem de 7,75%, seguido por um crescimento expressivo entre 2021 e 2022, quando a variação atingiu aproximadamente 24,23%, configurando o maior aumento percentual do período analisado.

No intervalo entre 2022 e 2023, verifica-se uma desaceleração do ritmo de crescimento, com incremento mais contido, em torno de 1,68%, indicando relativa estabilização do patamar tarifário. Em seguida, entre 2023 e 2024, observa-se uma redução pontual da tarifa, estimada em -2,89%, a qual pode ser atribuída principalmente à melhora das condições hidrológicas, que reduziu a necessidade de acionamento de usinas termelétricas de maior custo, bem como à

aplicação de bandeiras tarifárias mais favoráveis e a ajustes regulatórios nos encargos setoriais. Adicionalmente, esse comportamento pode ser interpretado como um ajuste após os aumentos expressivos registrados nos anos anteriores.

Entretanto, essa redução não se sustenta no período subsequente, sendo sucedida por um novo aumento significativo entre 2024 e 2025, da ordem de 17,10%, reforçando a tendência de elevação tarifária no longo prazo, apesar das flutuações anuais observadas.

Dessa forma, embora o comportamento das tarifas apresente oscilações anuais, a análise do período como um todo evidencia um crescimento acumulado relevante, resultando em uma média anual de aumento tarifário positiva. Esse cenário reflete a volatilidade dos custos do setor elétrico, influenciada por fatores hidrológicos, regulatórios e econômicos, e reforça a importância de estratégias de eficiência energética e mitigação de custos em sistemas com elevado consumo de energia elétrica.

Segue também demonstrativo de cálculos praticados em setembro de 2025 para aplicação das tarifas de energia elétrica para iluminação pública de classe B4, incluindo o TUSD e o TE, além dos impostos PIS/COFINS e impostos estaduais ICMS sobre energia elétrica, conforme apresentado pela Tabela 07.

Tabela 07 - Valores TUSD, TE e Impostos – setembro/2025.

Itens da fatura	Unidade	Preço unitário (R\$) com tributos	PIS COFINS	ICMS	Tarifa unitária (R\$)
Energia Ativa Fornecida (TE)	kWh	0,16818	4,72%	20,00%	0,13485
Energia Ativa Fornecida (TUSD)	kWh	0,31888	4,72%	20,00%	0,25568

Fonte: Enel-CE (2025, com adaptações).

Para analisar os indicadores econômicos, é necessário determinar o preço de aquisição e o custo de instalação dos novos equipamentos. Isso foi feito através de pesquisas em catálogos e consultas aos relatórios de composição de custos. Estes relatórios incluem preços de insumos, custos de composições, metodologias, cadernos técnicos e fichas de especificação técnica, conforme apresentado pela tabela 08.

Tabela 08 - Tabela de Custos de Composições – SEINFRA.

Descrição	Unidade	Preço (R\$)	Total (R\$)
Ajudante de eletricista	h	21,10	42,20
Eletricista	h	26,85	53,70
Total mão de obra			95,90
Luminária LED, corpo em alumínio (200–210 W)	UN	690,00	690,00
Total de materiais			690,00
Total geral			785,90

Fonte: Governo do Estado do Ceará - SEINFRA (2025, com adaptações).

A metodologia adotada nesta dissertação para análise dos resultados foi baseada em abordagem quantitativa, utilizando dados do parque de Iluminação Pública (IP) do município de Fortaleza. Inicialmente, foram coletadas informações sobre o número de pontos de luz, os tipos de luminárias utilizadas, os custos médios de consumo de energia elétrica e de manutenção, bem como o valor unitário dos equipamentos de tecnologia LED.

Através dos dados apresentados na tabela 1 referente ao parque de iluminação pública de Fortaleza, serão simulados três cenários de modernização. Esses cenários correspondem à substituição total do parque ainda não eficientizado em 25%, 50% e 75% das luminárias convencionais por luminárias com tecnologia LED. Para cada cenário, será estimado o investimento necessário para a execução da substituição, assim como o impacto na redução do consumo de energia elétrica e nos custos operacionais mensais e anuais, permitindo uma análise comparativa da viabilidade técnica e econômica da proposta.

A metodologia considera parâmetros técnicos como a potência das luminárias, o tempo médio de funcionamento diário, a tarifa vigente de energia elétrica para a classe B4 (Iluminação Pública), e o custo unitário de aquisição e instalação das luminárias LED. A partir desses dados, serão aplicadas equações específicas que permitem calcular o consumo energético mensal por tipo de luminária, os custos associados ao consumo e, por fim, a economia financeira gerada com a substituição.

O investimento e os benefícios econômicos decorrentes da modernização do parque de Iluminação Pública (IP) de Fortaleza seguem essas diretrizes, possibilitando uma análise comparativa entre os diferentes níveis de adoção da tecnologia LED. Essa abordagem permite projetar, com base técnica e financeira, a viabilidade da transição gradual para um sistema de iluminação mais eficiente, sustentável e economicamente vantajoso para o município.

3.1 Determinação da quantidade de luminárias substituídas

A proposta de modernização total do parque de iluminação pública de Fortaleza ainda não eficientizado contempla três cenários distintos de substituição das luminárias convencionais por modelos com tecnologia LED. Esses cenários consideram a substituição progressiva de 25%, 50% e 75% do total de pontos de luz existentes, permitindo avaliar de forma comparativa os investimentos e os ganhos energéticos em cada etapa. Através dos dados analisados no intervalo de janeiro de 2020 até setembro de 2025, o parque de iluminação pública é composto por 172.430 luminárias instaladas não eficientizadas. A partir desse dado de referência, foi aplicada uma metodologia para determinar a quantidade de luminárias LED a serem implementadas em cada cenário, conforme equações. 03, 04 e 05:

$$QL = 0,25 \times QT \quad (03)$$

$$QL = 0,5 \times QT \quad (04)$$

$$QL = 0,75 \times QT \quad (05)$$

Sendo:

QL – Quantidade de luminárias LED a ser instaladas (unid.);

QT – Total de pontos de iluminação existentes no parque (unid.).

Os valores 0,25, 0,50 e 0,75 representam os percentuais fixados para os cenários de análise, estabelecendo diferentes níveis de adoção da tecnologia LED no sistema de iluminação pública. Nessa equação, (QL) representa a quantidade de luminárias LED a serem instaladas, enquanto (QT) refere-se ao total de pontos de iluminação pública atualmente existentes não eficientizados no município de Fortaleza. A aplicação das equações permite quantificar de forma direta e proporcional a escala da substituição prevista em cada etapa do projeto, possibilitando uma avaliação técnica e econômica dos impactos em diferentes níveis de implementação.

3.2 Estimativa do investimento

Para estimar o investimento necessário na modernização do sistema de iluminação pública, foi considerado o custo unitário de substituição de luminárias de (VMT) e (VSHP), com potência média de 230 W, por luminárias com tecnologia LED, de 115 W. Esses valores foram definidos com base na média das potências nominais das luminárias, uma vez que o parque de iluminação pública apresenta uma grande diversidade de potências nominais,

variando para mais ou para menos de acordo com os diferentes pontos de iluminação da cidade. Dessa forma, essa premissa foi adotada para estabelecer um referencial de cálculo e fornecer uma base consistente para os resultados apresentados nesta dissertação. Esse custo unitário abrange não apenas a luminária LED em si, mas também todos os componentes complementares (como suportes, conectores e cabos, quando aplicáveis), além dos custos com mão de obra e serviços de instalação, a partir desse valor unitário, calculou-se o investimento total para cada cenário (25%, 50% e 75% de substituição), com base na quantidade de luminárias LED determinadas anteriormente. Conforme equação 06:

$$CAPEX = QL \times CL \quad (06)$$

Sendo:

CAPEX– Investimento inicial do *retrofit* (R\$);

QL – Quantidade de luminárias LED a ser instaladas (unid.);

CL – Custo unitário para instalação de luminária LED (R\$/LED).

A variável (CL) refere-se ao custo unitário por cada luminária LED verificado na tabela 4, estes custos incluem os valores de aquisição dos equipamentos, componentes elétricos e os custos com mão de obra e instalação. Essa equação permite estimar de forma objetiva o investimento total representado pela variável (IVT), sendo fundamental para a análise de viabilidade econômica do projeto.

3.3 Estimativa do consumo energético mensal

O consumo energético mensal (CE) de cada tipo de luminária foi calculado com base em parâmetros técnicos que consideram a potência do equipamento, o tempo médio diário de funcionamento e a quantidade de dias em operação no mês, como mostrado na equação 02.

Para fins deste estudo, serão adotadas as seguintes premissas, h=12horas/dia e D=30 dias/mês, refletindo o uso típico da iluminação pública. A potência das luminárias adotadas para esta dissertação utilizadas no parque de iluminação pública são de 230 W para os modelos convencionais em (VMT) e (VSHP) e 115W para os modelos com tecnologia LED. A aplicação da equação 02 permitirá calcular o consumo mensal médio individual de cada tipo de luminária, servindo de base para a estimativa dos custos energéticos e da economia gerada com a substituição.

3.4 Estimativa de custo energético mensal por luminária

A tarifação mensal de energia elétrica por luminária foi obtida com base no consumo energético mensal estimado para cada tipo de tecnologia (convencional e LED) e na tarifa de energia praticada para a classe B4 – Iluminação Pública, que engloba a Tarifa de Energia (TE), Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD) e tributos incidentes. Conforme equação 07:

$$TL = CE \times TE \quad (07)$$

Sendo:

TL – Tarifa aplicada por luminária (R\$)

CE – Consumo energético mensal (kWh/mês);

TE – Tarifa energética classe B4 – Iluminação Pública (R\$).

O (TL) representa a tarifação aplicada por luminária e (TE) corresponde à tarifa de energia elétrica aplicada à classe B4 – Iluminação Pública, fixada nos valores de referência da tabela 07. Essa tarifa engloba os encargos da Tarifa de Energia (TE), da Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD) e os tributos incidentes. Esses valores servem como base para os cálculos subsequentes de economia por luminária e da economia total estimada em cada cenário de substituição.

3.5 Estimativa de economia financeira e energética por luminária

A economia gerada mensalmente por ponto de iluminação substituído foi calculada com base na diferença entre a tarifação mensal de uma luminária convencional em (VMT) de 230 W e a tarifação mensal aplicada a uma luminária LED de 115 W, conforme os valores obtidos a partir da equação de custo energético. Conforme equação 08:

$$EL = TLC - TLL \quad (08)$$

Sendo:

EL – Ganho econômico por luminária (R\$/mês);

TLC – Consumo energético financeiro luminária convencional (R\$/mês);

TLL – Consumo energético financeiro luminária LED (R\$/mês).

A variável (EL) indica o ganho econômico por luminária, (TLC) é o valor mensal cobrado pela distribuidora referente ao consumo de uma luminária convencional e (TLL) é valor mensal cobrado pela distribuidora referente ao consumo de uma luminária LED. Essa

diferença entre os dois valores reflete o ganho econômico mensal obtido pela maior eficiência energética da tecnologia LED. Este valor será utilizado posteriormente na estimativa da economia total mensal e anual nos diferentes cenários simulados.

O resultado do equacionamento apontará que para cada luminária convencional substituída por uma luminária LED o município terá uma economia média para o consumo de energia elétrica. Essa metodologia permite mensurar, de forma direta, o ganho financeiro associado à eficiência energética da tecnologia LED, servindo de base para os cálculos de economia total mensal e anual ao longo dos diferentes cenários de substituição (25%, 50% e 75%).

3.6 Economia total mensal de substituição

A economia mensal total gerada pela substituição de luminárias convencionais por luminárias LED foi estimada com base no valor da economia unitária mensal por ponto substituído, já obtido na etapa anterior, e na quantidade de luminárias substituídas em cada cenário de modernização de 25%, 50% e 75% do parque de iluminação pública. Conforme equação 09:

$$EM = QL \times EL \quad (09)$$

Sendo:

EM – Valor total de ganho econômico mensal (R\$/mês);

QL – Quantidade de luminárias LED a ser instaladas (unid.);

EL – Ganho econômico por luminária (R\$/mês).

A variável (EM) representa o valor total economizado por mês. Essa equação permite estimar de forma direta o impacto financeiro mensal da substituição das luminárias convencionais por modelos LED. Os resultados encontrados servirão como base para o cálculo da economia anual nos cenários simulados.

Essa abordagem permite uma análise objetiva da economia mensal que o município de Fortaleza pode alcançar ao adotar, de forma progressiva, soluções de iluminação mais eficientes. Os resultados obtidos fundamentam decisões técnicas e financeiras para o planejamento urbano sustentável, além de fornecerem subsídios para a estimativa de retorno sobre o investimento ao longo do tempo.

3.7 Economia total anual de substituição

A economia anual total gerada das luminárias convencionais por luminárias com tecnologia LED foi determinada com base na economia mensal total de energia elétrica calculada para cada cenário. Para isso, considerou-se um período anual padrão de 12 meses, adotando a equação 10:

$$EA = 12 \times EM \quad (10)$$

Sendo:

EA – Valor total de ganho econômico anual (R\$/ano);

EM – Valor total de ganho econômico mensal (R\$/mês);

A variável (EA) representa o valor economizado ao longo de um ano. Considerando que o sistema de iluminação pública opera de forma contínua durante os 12 meses do ano, essa equação permite estimar o impacto financeiro acumulado da modernização. A aplicação dessa equação permite estimar, de forma direta, o valor acumulado de economia ao longo de um ano para cada percentual de substituição do parque de iluminação pública.

Essa metodologia demonstra o potencial de economia energética acumulada ao longo do tempo, reforçando a viabilidade econômica da modernização do sistema de iluminação pública com base na substituição por luminárias LED. Os resultados obtidos fornecem subsídios concretos para tomada de decisão por parte da administração pública, considerando tanto o retorno financeiro quanto os ganhos ambientais e operacionais associados à eficiência energética.

As equações apresentadas anteriormente serão aplicadas neste estudo com o objetivo de estimar os resultados projetados para a substituição de 25%, 50% e 75% das luminárias do parque de iluminação pública ainda não eficientizados do município de Fortaleza por tecnologia LED. A partir dessas equações, serão determinados o investimento inicial necessário para implementação da solução e a economia anual estimada com a redução dos custos de energia elétrica.

A próxima etapa corresponde à análise de viabilidade econômica, a qual utiliza dados quantitativos para fundamentar decisões relacionadas a novos investimentos ou à expansão de projetos. Nesse contexto, além dos indicadores tradicionais de rentabilidade, como Payback, Taxa Interna de Retorno (TIR) e Valor Presente Líquido (VPL), é incorporada a análise do Custo do Ciclo de Vida (LCC), que permite avaliar o custo total de uma alternativa ao longo de sua

vida útil. Enquanto o Payback, a TIR e o VPL são empregados para mensurar o retorno financeiro do investimento, considerando o valor do dinheiro no tempo, o LCC possibilita a comparação entre alternativas técnicas a partir do custo global, incluindo investimento inicial, custos de operação, manutenção e valor residual. De forma integrada, esses indicadores contribuem para a avaliação da sustentabilidade econômica do projeto, auxiliando na previsão de cenários, na identificação de riscos e na verificação da capacidade do empreendimento em cobrir suas obrigações financeiras e otimizar a relação entre investimentos, retornos, rendimentos e custos associados.

Segundo Silva (2019, p.122),

o payback corresponde ao período necessário para a recuperação do investimento inicial por meio da acumulação dos fluxos de caixa gerados pelo projeto, sendo tradicionalmente calculado sem considerar o valor do dinheiro no tempo, o que o torna um indicador voltado principalmente à liquidez e à redução do risco. Em sua forma aprimorada, o payback descontado incorpora uma taxa de desconto aos fluxos de caixa, trazendo-os a valor presente e proporcionando uma avaliação mais realista do tempo de retorno do capital investido, especialmente em projetos de médio e longo prazo.

Projetos são comparados pelo tempo de retorno, preferindo-se aqueles que recuperam o capital mais rapidamente, enquanto propostas que excedem o prazo máximo aceitável são descartadas.

Para o cálculo do payback simples, será utilizada metodologia conforme Eq. (11).

$$PB_S = \frac{CAPEX}{FC_t} \quad (11)$$

Sendo:

PB_S – Payback simples (ano);

$CAPEX$ – Investimento inicial do *retrofit* (R\$);

FC_t – Fluxo de caixa incremental no ano t (R\$/ano);

A avaliação desta dissertação utilizará a equação 11 para calcular o payback simples, foi adotada a média de vida útil do equipamento LED que é de 10 anos como tempo limite para retorno.

O Valor Presente Líquido (VPL) é uma técnica de análise de investimentos que calcula o valor presente dos fluxos de caixa futuros de um projeto, descontados pela taxa mínima de atratividade (TMA), representando o custo de oportunidade dos investidores. O VPL oferece uma análise mais completa ao incorporar o efeito do tempo sobre os fluxos de caixa. A decisão de aprovar ou rejeitar um projeto com base nos seguintes critérios, se o VPL for maior que zero, o projeto deve ser aprovado, pois gera uma taxa de retorno superior ao mínimo exigido, ou VPL sendo igual a zero, o projeto recupera exatamente o investimento inicial com uma taxa de retorno igual à TMA, sendo aceitável, mas se o VPL for menor que zero, o projeto deve ser rejeitado, pois proporciona uma taxa de retorno inferior ao mínimo exigido.

Para o cálculo do VPL, será utilizada metodologia conforme equação 12.

$$VPL = -CAPEX + \sum_{t=1}^N \frac{FC_t}{(1+i)^t} \quad (12)$$

Sendo:

VPL – Valor presente líquido (R\$);

CAPEX – Investimento inicial do *retrofit* (R\$);

FC_t – Fluxo de caixa incremental no ano t;

i – taxa de desconto anual

N – Horizonte de análise (anos);

Sendo FC_t o fluxo de caixa no período t , i é a taxa de desconto (TMA), n é o número de períodos, e CAPEX é o investimento inicial. O VPL, portanto, é crucial para avaliar a viabilidade financeira dos projetos e orientar a tomada de decisão do projeto.

A Taxa Interna de Retorno (TIR) é uma técnica de avaliação de investimentos que identifica a taxa de desconto que iguala o valor presente dos fluxos de entrada e saída de caixa, resultando em um Valor Presente Líquido (VPL) de zero. Representa a taxa de retorno gerada por um projeto sobre o capital investido. Se a TIR excede a taxa mínima de atratividade, o investimento é considerado lucrativo. A aprovação ou rejeição de um projeto com base na TIR com base nos seguintes critérios, se a TIR for maior que o custo de capital, o projeto deve ser aprovado, pois obteria uma taxa de retorno maior que o custo de capital, ou se a TIR for igual ao custo de capital, o projeto também seria aprovado, pois obteria uma taxa de retorno exatamente igual ao custo de capital, mas caso a TIR seja menor que o custo de capital, o projeto

deve ser rejeitado, pois obteria uma taxa de retorno menor que o custo de capital.

Para o cálculo do TIR, será utilizada metodologia conforme equação 13.

$$CAPEX = \sum_{t=1}^N \frac{FC_t}{(1 + TIR)^t} \quad (13)$$

Sendo:

FC_t – Fluxo de caixa incremental no ano t;

CAPEX – Investimento inicial do *retrofit* (R\$);

N – Horizonte de análise (anos);

TIR – Taxa interna de retorno (R\$);

Sendo FC_t o fluxo de caixa no período t , TIR é a taxa interna de retorno, n é o número de períodos, e $CAPEX$ é o investimento inicial. A TIR, portanto, é crucial para comparar e selecionar projetos baseados no retorno financeiro gerado.

A análise de viabilidade econômico-financeira dos sistemas de iluminação pública avaliados nesta dissertação também foi conduzida por meio da metodologia de Custo do Ciclo de Vida (LCC), instrumento consolidado para a avaliação comparativa de alternativas tecnológicas em projetos de infraestrutura urbana e energética. O LCC possibilita a mensuração integrada de todos os dispêndios econômicos associados a um ativo ao longo de sua vida útil, considerando não apenas o investimento inicial, mas também os custos recorrentes de operação, manutenção, eventuais reposições e a recuperação residual ao final do horizonte de análise. Tal abordagem permite superar limitações de análises baseadas exclusivamente em custos iniciais, oferecendo uma visão sistêmica e intertemporal do desempenho econômico das soluções avaliadas.

A presente dissertação, apresenta o LCC sendo aplicado aos cenários de iluminação pública para o *retrofit* com tecnologia LED, considerando diferentes percentuais de substituição (25%, 50% e 75%). A estrutura do LCC foi composta pelos seguintes elementos: o investimento inicial (CAPEX), que compreende os custos de aquisição e instalação das luminárias necessários à implantação ou modernização do sistema, os custos operacionais anuais (OPEX), englobando os gastos com energia elétrica, manutenção corretiva e preventiva, bem como custos associados à operação e à gestão do parque de iluminação, os custos de reposição, quando aplicáveis dentro do horizonte de análise, relacionados à substituição de componentes com vida útil inferior ao período considerado e o valor residual ao final do horizonte temporal, representando a recuperação financeira decorrente da sucata ou reciclagem dos equipamentos

instalados.

Todos os fluxos de caixa associados aos componentes do LCC foram convertidos para valor presente por meio da aplicação de uma taxa de desconto, adotada neste estudo como a taxa mínima de atratividade do capital. Tal taxa reflete o custo de oportunidade do investimento e a preferência temporal do capital, sendo representada pela taxa SELIC anual. A escolha da taxa SELIC justifica-se por se tratar de um indicador amplamente difundido e reconhecido no contexto econômico nacional, servindo como referência para diversas análises financeiras e decisões de investimento. Além disso, sua adoção permite a simulação de um cenário conservador, caracterizado como uma condição de maior rigor na avaliação econômica, uma vez que tende a representar um custo de capital mais elevado. Ressalta-se que, para projetos de infraestrutura dessa magnitude, poderiam ser consideradas taxas de financiamento mais atrativas, como aquelas praticadas por instituições de fomento, a exemplo do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) ou organismos internacionais como o Banco Mundial, que usualmente oferecem condições de crédito com taxas inferiores. Dessa forma, a utilização da taxa SELIC neste estudo configura-se como uma abordagem prudente, representando um cenário de “pior caso”, no qual a viabilidade econômica do projeto é testada sob condições mais restritivas. A formulação matemática do LCC em valor presente é expressa pela equação 14:

$$LCC = CAPEX_0 + \sum_{t=1}^N \frac{OPEX_t}{(1+i)^t} + \sum_k \frac{Reinvest_k}{(1+i)^{t_k}} - \frac{Valor\ Residual}{(1+i)^N} \quad (14)$$

Em que:

CAPEX – Investimento inicial do *retrofit* (R\$);

OPEX_t – custos operacionais no ano t

Reinvest_k – custos de reposição no instante t_k

Valor Residual – estimativa de recuperação financeira ao final do horizonte de análise

i – taxa de desconto anual

N – Horizonte de análise (anos);

O CAPEX corresponde ao investimento inicial no instante zero, OPEX_t representa os custos operacionais no ano t, Reinvest_k refere-se aos custos de reposição no instante t_k, Valor Residual é a estimativa de recuperação financeira ao final do horizonte de análise, i é a taxa de

desconto anual e N é o número de anos considerados. Essa formulação permite a consolidação de fluxos financeiros distribuídos no tempo em um único indicador monetário, viabilizando a comparação direta entre sistemas com estruturas de custos distintas.

Com o objetivo de facilitar a interpretação dos resultados e permitir uma comparação anualizada entre as alternativas analisadas, o LCC foi adicionalmente convertido em Custo Anual Equivalente (CAE). Esse indicador traduz o custo total em valor presente em uma despesa anual uniforme ao longo do horizonte de análise, conforme a equação 15:

$$CAE = LCC \times \frac{i \times (1 + i)^N}{(1 + i)^N - 1} \quad (15)$$

Em que:

CAE – Custo anual equivalente (R\$);

LCC – Custo do ciclo de vida (R\$);

i – taxa de desconto anual

N – Horizonte de análise (anos);

O Custo Anual Equivalente (CAE) é obtido a partir da conversão do custo total do sistema, expresso em valor presente por meio do Custo do Ciclo de Vida (LCC), em uma série uniforme de custos anuais equivalentes ao longo do horizonte de análise. O modelo matemático do CAE utiliza o fator de recuperação de capital, permitindo distribuir o valor presente do LCC em pagamentos anuais equivalentes, considerando o valor do dinheiro no tempo.

No que se refere à operacionalização prática dos cálculos, o custo com energia elétrica constitui o principal componente do OPEX em sistemas de iluminação pública, sendo diretamente influenciado pela potência instalada, pelo regime de operação e pela estrutura tarifária vigente. O gasto anual com energia foi estimado a partir da potência total do sistema, do número de horas de funcionamento anual e da tarifa média de energia elétrica.

Os custos operacionais (OPEX) foram tratados contemplando os custos de manutenção e de energia elétrica. A manutenção foi considerada como um componente recorrente do OPEX, estimada a partir do custo unitário de manutenção por ponto de iluminação, multiplicado pelo número total de pontos em operação, sendo adotado um reajuste anual de 10%, de modo a refletir a evolução dos custos de serviços ao longo do tempo. Já o custo energético foi calculado com base no consumo estimado do parque de iluminação e na tarifa de energia elétrica, assumindo-se um crescimento anual de 15%, compatível com o histórico de reajustes tarifários.

Essa abordagem confere maior aderência à realidade operacional dos sistemas de iluminação pública e contribui para a robustez dos resultados obtidos na análise do Custo do Ciclo de Vida (LCC).

Na Equação 14, referente ao LCC, a variável $Reinvest_k$ representa os custos de reposição ou reinvestimento associados a intervenções no instante t_k , como a substituição de luminárias ao longo do horizonte de análise. Contudo, essa variável foi desconsiderada e assumida como nula, uma vez que não foram coletados dados consistentes relativos a ciclos de substituição durante o período analisado. Segundo (PHILIPS, 2020; OSRAM, 2021), “considera-se que as luminárias LED utilizadas apresentam garantia média de 5 a 10 anos, conforme práticas adotadas por fabricantes e especificações técnicas do setor de iluminação”. Ressalta-se ainda que muitas dessas luminárias incorporam dispositivos de proteção contra surtos (DPS), que atuam na mitigação de sobretensões, contribuindo para o aumento da vida útil dos equipamentos. Dessa forma, adotou-se $Reinvest_k=0$, evitando a introdução de incertezas adicionais no modelo econômico e preservando a consistência metodológica da análise.

A dissertação demonstrará a viabilidade financeira da incorporação de 25 %, 50 % e 75 % de pontos com tecnologia LED ao parque de iluminação pública do município de Fortaleza, adotando como referência a taxa Selic de 15 % ao ano, conforme mantida pelo Comitê de Política Monetária (Copom) em setembro de 2025. A Selic é empregada como taxa de desconto por representar o custo de oportunidade do capital na economia brasileira, permitindo a atualização dos fluxos de caixa futuros a valor presente e a adequada incorporação do fator tempo e risco aos investimentos públicos.

A análise econômica para esta dissertação será conduzida por meio de indicadores tradicionais de rentabilidade, como *Payback* simples (PBS), Valor Presente Líquido (VPL) e Taxa Interna de Retorno (TIR), além da avaliação do Custo do Ciclo de Vida (LCC). O *Payback*, a (TIR) e o (VPL) permitirão mensurar o retorno financeiro do investimento incremental associado à modernização do sistema, enquanto o LCC será utilizado para comparar o custo global dos sistemas ao longo do horizonte analisado, considerando investimento inicial, custos operacionais, de manutenção e valor residual.

Os resultados serão avaliados considerando um horizonte de análise de 10 anos, o qual se justifica por representar um período compatível com a vida útil técnica e a garantia média das luminárias LED utilizadas em sistemas de iluminação pública, usualmente estimadas entre 50.000 e 100.000 horas de operação. Além disso, esse intervalo permite capturar de forma adequada os efeitos da redução de consumo energético e dos custos de manutenção ao longo do tempo, sem introduzir incertezas excessivas associadas a projeções de longo prazo. Dessa

forma, o horizonte de 10 anos proporciona um equilíbrio entre confiabilidade dos dados, previsibilidade econômica e aderência às condições reais de operação dos sistemas analisados.

4 ESTUDO DE CASO: FORTALEZA

O avanço da urbanização tem colocado desafios cada vez mais complexos para os centros urbanos, especialmente no que diz respeito ao consumo eficiente de energia e à sustentabilidade ambiental. A iluminação pública, elemento essencial para a segurança e mobilidade urbana, tem sido um dos principais setores afetados por esses desafios. Os sistemas tradicionais de iluminação, baseados em lâmpadas de vapor de sódio (VSHP) e vapor metálico (VMT), apresentam sérias limitações, como a baixa eficiência energética, o elevado custo operacional, a grande dispersão de calor e os riscos ambientais. Neste contexto, a substituição dessas luminárias por tecnologia LED surge como uma solução promissora, capaz de reduzir significativamente o consumo de energia e os custos operacionais, além de minimizar os impactos ambientais associados ao descarte inadequado de lâmpadas convencionais.

Adicionalmente, recomenda-se que o processo de substituição seja acompanhado por um plano de gestão e descarte ambientalmente adequado dos equipamentos retirados, especialmente das lâmpadas que contêm metais pesados, como o mercúrio. Nesse sentido, deve-se priorizar a destinação por meio de empresas licenciadas para tratamento de resíduos perigosos, com a adoção de práticas como logística reversa, reciclagem e descontaminação, em conformidade com a legislação ambiental vigente, contribuindo para a redução de impactos ambientais e para a promoção da sustentabilidade no ciclo de vida dos sistemas de iluminação pública.

Neste capítulo, são apresentados os resultados da análise de viabilidade econômica para a implementação de tecnologia LED no parque de iluminação pública do município de Fortaleza. A proposta considera a substituição das luminárias tradicionais por lâmpadas de LED, visando à melhoria na eficiência energética, à redução de custos com energia elétrica e à diminuição dos impactos ambientais. A análise leva em consideração três cenários de ampliação do uso de LED: acréscimo de 25%, 50% e 75% dos pontos de iluminação pública existentes, considerando as características e necessidades do município.

Para a realização desta análise, foi coletada uma série de dados relacionados aos custos de implementação de novos equipamentos, incluindo o custo de troca das luminárias e o impacto sobre o consumo energético. As tabelas 09, 10 e 11 detalham o investimento necessário para cada cenário proposto, levando em consideração as características do parque de iluminação pública de Fortaleza, como o tipo de luminária existente (lâmpadas de vapor metálico de 230 W) e as tarifas de energia elétrica aplicáveis à classe B4 (Iluminação Pública). A análise inclui a estimativa de consumo médio mensal das luminárias antigas e as luminárias de LED,

permitindo calcular as economias energéticas e os benefícios financeiros gerados pela substituição.

Os resultados apresentados nas Tabelas 09, 10 e 11 foram obtidos a partir da aplicação sequencial das equações propostas na metodologia, utilizando como base os dados do parque de iluminação pública ainda não eficientizado do município de Fortaleza. Inicialmente, foi determinado o total de pontos convencionais passíveis de substituição, correspondente às luminárias que ainda não utilizavam tecnologia LED. A partir desse total, aplicaram-se as Equações 03, 04 e 05, correspondentes aos cenários de retrofit de 25%, 50% e 75%, obtendo-se, assim, a quantidade de luminárias a serem eficientizadas em cada cenário analisado.

Em seguida, o custo de composição para substituição de cada luminária convencional de 230 W por uma luminária LED de 115 W foi definido com base nos valores apresentados na Tabela 08, que contempla os custos de materiais, mão de obra e instalação. Com esse custo unitário e com a quantidade de luminárias calculada em cada cenário, aplicou-se a Equação 06 para obtenção do investimento total necessário ao acréscimo de 25%, 50% e 75% de pontos em LED no parque de iluminação pública.

Posteriormente, foi estimado o consumo energético mensal de cada tipo de luminária por meio da Equação 02, considerando a potência nominal dos equipamentos, o tempo médio de operação diária de 12 horas e 30 dias de funcionamento por mês. Dessa forma, obteve-se o consumo médio mensal de uma luminária convencional de 230 W e de uma luminária LED de 115 W. Na sequência, para o cálculo do custo energético mensal por luminária, utilizou-se a Equação 07, adotando-se a tarifa de energia elétrica da classe B4 – Iluminação Pública referente ao ano de 2025, conforme os valores apresentados na Tabela 06, já contemplando TE, TUSD e tributos.

A diferença entre o custo mensal de faturamento da luminária convencional de 230 W e o custo mensal da luminária LED de 115 W foi calculada por meio da Equação 08, resultando na economia unitária mensal por ponto substituído. Em seguida, aplicou-se a Equação 09 para determinar a economia de custo energético mensal total em cada cenário, multiplicando-se a economia unitária pela quantidade de luminárias substituídas nos percentuais de 25%, 50% e 75%. Por fim, a Equação 10 foi utilizada para converter a economia mensal total em economia anual, considerando um período de 12 meses de operação.

Dessa forma, os valores apresentados nas Tabelas 09, 10 e 11 resultam diretamente da aplicação integrada das Equações 02 a 10, associadas aos dados de custo de composição, potência das luminárias e tarifação de energia elétrica do ano de 2025, permitindo quantificar de forma objetiva os investimentos necessários e os ganhos econômicos esperados com a

modernização progressiva do parque de iluminação pública por meio da tecnologia LED.

Tabela 09 – Resultados referente ao acréscimo de 25% de pontos em LED ao parque de iluminação pública de Fortaleza.

Item	Valor
Acréscimo de 25% de pontos em LED ao parque de iluminação pública	43.042 unidades
Custo de composição para troca de uma luminária de 230 W (VMT) para 115 W (LED)	R\$ 785,90
Investimento para acréscimo de 25% de LED ao parque de iluminação pública	R\$ 33.826.707,80
Consumo médio mensal de uma lâmpada com potência de 230 W (VMT)	82,8 kWh/mês
Consumo mensal de uma lâmpada de 115 W (LED)	41,4 kWh/mês
Tarifa cobrada para classe B4 - Iluminação pública (TE + TUSD + Tributos)	R\$ 0,48706
Custo energético de faturamento de uma lâmpada de 230 W (VMT)	R\$ 40,33/mês
Custo energético de faturamento de uma lâmpada de 115 W (LED)	R\$ 20,16/mês
Economia de custo energético de faturamento por troca de ponto de 230 W (VMT) para 115 W (LED)	R\$ 20,17/mês
Economia de custo energético de faturamento total para os 25% de pontos em LED acrescidos ao parque de iluminação pública	R\$ 868.157,14/mês
Economia de custo energético de faturamento total para os 25% de pontos em LED inseridos no parque de iluminação pública	R\$ 10.417.885,68/ano

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 10 – Resultados referente ao acréscimo de 50% de pontos em LED ao parque de iluminação pública de Fortaleza.

Item	Valor
Acréscimo de 50% de pontos em LED ao parque de iluminação pública	86.084 unidades
Custo de composição para troca de uma luminária de 230 W (VMT) para 115 W (LED)	R\$ 785,90
Investimento para acréscimo de 50% de LED ao parque de iluminação pública	R\$ 67.653.415,60
Consumo médio mensal de uma lâmpada com potência de 230 W (VMT)	82,8 kWh/mês

Item	Valor
Consumo mensal de uma lâmpada de 115 W (LED)	41,4 kWh/mês
Tarifa cobrada para classe B4 - Iluminação pública (TE + TUSD + Tributos)	R\$ 0,48706
Custo energético de faturamento de uma lâmpada de 230 W (VMT)	R\$ 40,33/mês
Custo energético de faturamento de uma lâmpada de 115 W (LED)	R\$ 20,16/mês
Economia de custo energético de faturamento por troca de ponto de 230 W (VMT) para 115 W (LED)	R\$ 20,17/mês
Economia de custo energético de faturamento total para os 75% de pontos em LED acrescentados ao parque de iluminação pública	R\$ 1.736.314,28/mês
Economia de custo energético de faturamento total para os 75% de pontos em LED inseridos no parque de iluminação pública	R\$ 20.804.781,12/ano

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 11 – Resultados referente ao acréscimo de 75% de pontos em LED ao parque de iluminação pública de Fortaleza.

Item	Valor
Acréscimo de 75% de pontos em LED ao parque de iluminação pública	129.126 unidades
Custo de composição para troca de uma luminária de 230 W (VMT) para 115 W (LED)	R\$ 785,90
Investimento para acréscimo de 75% de LED ao parque de iluminação pública	R\$ 101.480.123,40
Consumo médio mensal de uma lâmpada com potência de 230 W (VMT)	82,8 kWh/mês
Consumo mensal de uma lâmpada de 115 W (LED)	41,4 kWh/mês
Tarifa cobrada para classe B4 - Iluminação pública (TE + TUSD + Tributos)	R\$ 0,48706
Custo energético de faturamento de uma lâmpada de 230 W (VMT)	R\$ 40,33/mês
Custo energético de faturamento de uma lâmpada de 115 W (LED)	R\$ 20,16/mês
Economia de custo energético de faturamento por troca de ponto de 230 W (VMT) para 115 W (LED)	R\$ 20,17/mês
Economia de custo energético de faturamento total para os 75% de pontos em LED acrescentados ao parque de iluminação pública	R\$ 2.604.471,42/mês

Item	Valor
Economia de custo energético de faturamento total para os 75% de pontos em LED inseridos no parque de iluminação pública	R\$ 32.253.657,04/ano

Fonte: elaborado pelo autor.

Além dos custos iniciais de implementação, foram calculadas as economias mensais e anuais decorrentes da redução no consumo de energia elétrica, com base na eficiência das lâmpadas LED, que apresentam um consumo significativamente inferior às lâmpadas convencionais. Os resultados obtidos indicam uma economia substancial, que pode ser reinvestida em melhorias no sistema ou utilizada para compensar outros custos do município.

Para avaliar a viabilidade financeira de cada cenário, foram aplicados indicadores econômicos tradicionais, como o Payback, que mede o tempo necessário para recuperar o investimento inicial, a Taxa Interna de Retorno (TIR), que indica a rentabilidade do projeto, e o Valor Presente Líquido (VPL), que reflete o valor atual dos fluxos de caixa futuros do investimento. Esses indicadores são fundamentais para embasar a tomada de decisão sobre a expansão da iluminação pública com tecnologia LED, uma vez que fornecem uma visão clara sobre a sustentabilidade financeira do projeto ao longo do tempo.

A dissertação demonstrará a viabilidade financeira em adicionar 25%, 50% e 75% de pontos em tecnologia LED ao parque de iluminação pública de Fortaleza, utilizando como referência a taxa SELIC de 14,75% ao ano, conforme definida pelo COPOM em 06 de maio de 2025. Serão comparados a Taxa Interna de Retorno (TIR) e o Valor Presente Líquido (VPL), considerando um tempo de retorno de 5 anos, que corresponde à metade da vida útil das luminárias LED, que é de até 10 anos. A análise de viabilidade financeira será detalhada, conforme critérios apresentados nas tabelas 12, 13 e 14.

Tabela 12 – Payback simples, VPL e TIR para acréscimo de 25% de pontos em LED ao parque de iluminação pública de Fortaleza.

Ano	Investimento inicial	Fluxo de Caixa	Resultados de Investimento
0	- R\$ 33.826.707,80	R\$ 0,00	Payback: 04 anos
1	- R\$ 23.408.822,13	R\$ 10.417.885,68	Taxa SELIC: 15% a.a.
2	- R\$ 12.990.936,46	R\$ 10.417.885,68	TIR: 28%

Ano	Investimento inicial	Fluxo de Caixa	Resultados de Investimento
3	- R\$ 2.573.050,79	R\$ 10.417.885,68	VPL: R\$ 18.458.249,95
4	R\$ 7.844.834,88	R\$ 10.417.885,68	
5	R\$ 18.262.720,55	R\$ 10.402.390,56	
6	R\$ 18.262.720,55	R\$ 10.402.390,56	
7	R\$ 39.098.491,89	R\$ 10.402.390,56	
8	R\$ 49.516.377,56	R\$ 10.402.390,56	
9	R\$ 59.934.263,23	R\$ 10.402.390,56	
10	R\$ 70.352.148,90	R\$ 10.402.390,56	

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 13 – Payback simples, VPL e TIR para acréscimo de 50% de pontos em LED ao parque de iluminação pública de Fortaleza.

Ano	Investimento inicial	Fluxo de Caixa	Resultados de Investimento
0	- R\$ 67.653.415,60	R\$ 0,00	Payback: 04 anos
1	- R\$ 46.848.634,48	R\$ 20.804.781,12	Taxa SELIC: 15% a.a.
2	- R\$ 26.043.853,36	R\$ 20.804.781,12	TIR: 28%
3	- R\$ 5.239.072,24	R\$ 20.804.781,12	VPL: R\$ 36.760.967,15

Ano	Investimento inicial	Fluxo de Caixa	Resultados de Investimento
4	R\$ 15.565.708,88	R\$ 20.804.781,12	
5	R\$ 36.370.490,00	R\$ 20.804.781,12	
6	R\$ 57.175.271,12	R\$ 20.804.781,12	
7	R\$ 77.980.052,24	R\$ 20.804.781,12	
8	R\$ 119.589.614,48	R\$ 20.804.781,12	
9	R\$ 119.589.614,48	R\$ 20.804.781,12	
10	R\$ 140.394.395,60	R\$ 20.804.781,12	

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 14 – Payback simples, VPL e TIR para acréscimo de 75% de pontos em LED ao parque de iluminação pública de Fortaleza.

Ano	Investimento inicial	Fluxo de Caixa	Resultados de Investimento
0	- R\$ 101.480.123,40	R\$ 0,00	Payback: 04 anos
1	- R\$ 69.226.466,36	R\$ 32.253.657,04	Taxa SELIC: 15% a.a.
2	- R\$ 36.972.809,32	R\$ 32.253.657,04	TIR: 28%
3	- R\$ 4.719.152,28	R\$ 32.253.657,04	VPL: R\$ 60.393.518,62
4	R\$ 27.534.504,76	R\$ 32.253.657,04	

Ano	Investimento inicial	Fluxo de Caixa	Resultados de Investimento
5	R\$ 59.788.161,80	R\$ 32.253.657,04	
6	R\$ 92.041.818,84	R\$ 32.253.657,04	
7	R\$ 124.295.475,88	R\$ 32.253.657,04	
8	R\$ 156.549.132,92	R\$ 32.253.657,04	
9	R\$ 188.802.789,96	R\$ 32.253.657,04	
10	R\$ 221.056.447,00	R\$ 32.253.657,04	

Fonte: elaborado pelo autor.

A partir dos resultados apresentados nas Tabelas 12, 13 e 14, observa-se que o *Payback* permaneceu constante em aproximadamente 4 anos para os três cenários analisados (25%, 50% e 75%). Esse comportamento suscita o questionamento sobre a invariabilidade do *Payback* diante de diferentes escalas de investimento. De forma geral, o *Payback* não é, necessariamente, um indicador fixo, podendo variar conforme alterações nos custos de implantação, nas economias geradas e nas condições operacionais do sistema. Entretanto, no presente estudo, a manutenção do mesmo tempo de retorno está diretamente associada à proporcionalidade linear entre o investimento inicial e os fluxos de caixa gerados. Observa-se que, à medida que o número de luminárias substituídas aumenta, o investimento cresce na mesma proporção que a economia de energia, mantendo constante a relação entre custo e benefício.

Nos cenários analisados, tanto o investimento quanto a economia anual foram escalonados de forma proporcional, ou seja, o acréscimo de 25%, 50% e 75% de pontos em LED resultou em aumentos equivalentes nos custos e nas receitas (economia energética), o que matematicamente mantém o tempo de retorno praticamente inalterado. Dessa forma, o *Payback* tende a permanecer constante quando não há ganhos de escala, variações tarifárias diferenciadas, mudanças nos custos unitários ou efeitos operacionais adicionais.

Contudo, é importante destacar que, em condições reais, o *Payback* pode variar significativamente. Fatores como economia de escala na aquisição de equipamentos, redução de custos logísticos, variações tarifárias, custos de manutenção diferenciados, degradação dos equipamentos ao longo do tempo e possíveis incentivos regulatórios podem alterar essa relação. Além disso, a consideração de fluxos de caixa descontados, por meio do VPL e da TIR, evidencia que, embora o *Payback* seja semelhante, os ganhos financeiros absolutos são substancialmente maiores nos cenários com maior nível de retrofit.

Portanto, conclui-se que o *Payback* apresentado neste estudo não deve ser interpretado como uma constante universal, mas sim como um resultado específico das premissas adotadas, especialmente da proporcionalidade entre investimento e economia. A análise conjunta com indicadores como VPL e TIR torna-se essencial para uma avaliação mais robusta da viabilidade econômica do projeto, principalmente em cenários de expansão em larga escala.

A avaliação econômica comparativa entre o sistema de iluminação pública convencional (Sistema A) e o *retrofit* para tecnologia LED (Sistema B) foi conduzida por meio da metodologia de Custo do Ciclo de Vida (LCC), que permite mensurar, em valor presente, o custo total associado ao ativo ao longo de um horizonte temporal definido. O LCC foi estruturado considerando quatro componentes principais o investimento inicial (CAPEX), o (OPEX) custos operacionais de energia elétrica, custos de manutenção e valor residual ao final do horizonte de análise, representando a recuperação por sucata/reciclagem.

Adotou-se como horizonte de análise 10 anos, com taxa de desconto anual de 15% a.a., representativa da Taxa SELIC utilizada como taxa mínima de atratividade do capital. Para a energia elétrica, considerou-se uma tarifa média inicial em 2025 de R\$ 0,48706/kWh, com reajuste anual de 15%, refletindo uma trajetória de aumento médio do custo de energia ao longo do período. A carga horária de operação foi definida como 12 horas/dia, com 30 dias/mês durante 12 meses, totalizando 4.320 horas anuais. As potências médias adotadas foram de 0,230 kW por ponto para luminárias convencionais e 0,115 kW por ponto para luminárias LED. O custo anual de manutenção por ponto foi considerado como R\$ 14,45 para o sistema convencional e R\$ 9,90 para o sistema LED, ambos com reajuste anual de 10%, buscando representar correções contratuais e inflação setorial de serviços.

O valor residual ao final do horizonte (ano 10) foi tratado como sucata/recuperação, com R\$ 10,00 por ponto para o sistema convencional e R\$ 20,00 por ponto para o sistema LED, reconhecendo que, ao término do período analisado, a recuperação financeira tende a ser limitada e majoritariamente relacionada à reciclagem de materiais. O investimento inicial (CAPEX) do sistema convencional foi considerado nulo por tratar-se de infraestrutura já

existente, enquanto o retrofit LED incorporou os investimentos totais estimados para cada cenário (25%, 50% e 75% de pontos convertidos).

A modelagem do custo de energia em valor presente considerou o crescimento anual da tarifa ($g = 15\%$) e a taxa de desconto ($i = 15\%$). Nessa condição específica, em que $g = i$, o valor presente do gasto anual de energia torna-se matematicamente simplificado, resultando em uma série cujo valor presente equivale a uma multiplicação do custo do primeiro ano por um fator proporcional ao número de períodos. Já para a manutenção, como o reajuste anual (10%) é inferior à taxa de desconto (15%), o valor presente cresce menos intensamente, embora permaneça relevante como componente do custo total.

Os resultados evidenciam que o componente energia elétrica domina o LCC em ambos os sistemas, com maior intensidade no sistema convencional devido à maior potência por ponto. Mesmo com a inclusão do CAPEX do retrofit LED, os cenários analisados apresentam redução do custo total em valor presente para o sistema LED ao longo de 10 anos, com ganhos líquidos ($\Delta = LCC_a - LCC_b$) de aproximadamente R\$ 58,25 milhões (25%), R\$ 116,50 milhões (50%) e R\$ 174,75 milhões (75%). Observa-se, adicionalmente, que o valor residual possui impacto marginal frente aos custos de energia e manutenção, uma vez que é contabilizado apenas ao final do horizonte e ainda sofre desconto temporal. Por fim, verifica-se uma proporcionalidade aproximadamente linear entre os ganhos e a quantidade de pontos convertidos, o que reforça a consistência dos cenários e a sensibilidade do resultado ao número de luminárias que foi realizado o *retrofit* conforme Tabelas 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22 e 23.

Tabela 15 – Análise LCC_A de 25% dos pontos do parque de iluminação pública de Fortaleza.

Nº de pontos – 43.042 unidades
CAPEX (A) – R\$ 0,00
OPEX Energia (A) – R\$ 181.129.275,53
OPEX Manutenção (A) – R\$ 4.463.990,32
Valor Residual (A) – R\$ 106.393,24
LCC_A – R\$ 185.486.872,61

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 16 – Análise LCC_A de 50% dos pontos do parque de iluminação pública de Fortaleza.

Nº de pontos – 86.084 unidades
CAPEX (A) – R\$ 0,00
OPEX Energia (A) – R\$ 362.258.551,07
OPEX Manutenção (A) – R\$ 8.927.980,64
Valor Residual (A) – R\$ 212.786,48
LCC _A – R\$ 370.973.745,22
Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 17 – Análise LCC_A de 75% dos pontos do parque de iluminação pública de Fortaleza.

Nº de pontos – 129.126 unidades
CAPEX (A) – R\$ 0,00
OPEX Energia (A) – R\$ 543.387.826,60
OPEX Manutenção (A) – R\$ 13.391.970,95
Valor Residual (A) – R\$ 319.179,72
LCC _A – R\$ 556.460.617,83
Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 18 – Análise LCC_B para acréscimo de 25% de pontos em LED ao parque de iluminação pública de Fortaleza.

Nº de pontos – 43.042 unidades
CAPEX (B) – R\$ 33.826.707,80
OPEX Energia (B) – R\$ 90.564.637,77
OPEX Manutenção (B) – R\$ 3.058.373,99
Valor Residual (B) – R\$ 212.786,48
LCC _B – R\$ 127.236.933,07
Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 19 – Análise LCC_B para acréscimo de 50% de pontos em LED ao parque de iluminação pública de Fortaleza.

Nº de pontos – 86.084 unidades
CAPEX (B) – R\$ 67.653.415,60
OPEX Energia (B) – R\$ 181.129.275,53
OPEX Manutenção (B) – R\$ 6.116.747,98
Valor Residual (B) – R\$ 425.572,96
LCC _B – R\$ 254.473.866,15

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 20 – Análise LCC_B para acréscimo de 75% de pontos em LED ao parque de iluminação pública de Fortaleza.

Nº de pontos – 129.126 unidades
CAPEX (B) – R\$ 101.480.123,40
OPEX Energia (B) – R\$ 271.693.913,30
OPEX Manutenção (B) – R\$ 9.175.121,97
Valor Residual (B) – R\$ 638.359,45
LCC _B – R\$ 381.710.799,22

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 21 – (LCC_A vs LCC_B) e (CAE_A vs CAE_B) para acréscimo de 25% de pontos em LED ao parque de iluminação pública de Fortaleza.

Nº de pontos – 43.042 unidades
LCC _A – R\$ 185.486.872,61
LCC _B – R\$ 127.236.933,07
Δ (LCC _A - LCC _B) – R\$ 58.249.939,54
CAE (A) – R\$ 36.958.641,94 ano
CAE (B) – R\$ 25.352.221,34 ano
Economia Anual (A – B) – R\$ 11.606.420,59 ano

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 22 – (LCC_A vs LCC_B) e (CAE_A vs CAE_B) para acréscimo de 50% de pontos em LED ao parque de iluminação pública de Fortaleza.

Nº de pontos – 86.084 unidades
LCC_A – R\$ 370.973.745,22
LCC_B – R\$ 254.473.866,15
$\Delta (LCC_A - LCC_B)$ – R\$ 116.499.879,07
CAE (A) – R\$ 73.917.283,87 ano
CAE (B) – R\$ 50.704.442,69 ano
Economia Anual (A – B) – R\$ 23.212.841,19 ano

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 23 – (LCC_A vs LCC_B) e (CAE_A vs CAE_B) para acréscimo de 75% de pontos em LED ao parque de iluminação pública de Fortaleza.

Nº de pontos – 129.126 unidades
LCC_A – R\$ 556.460.617,83
LCC_B – R\$ 381.710.799,22
$\Delta (LCC_A - LCC_B)$ – R\$ 174.749.818,61
CAE (A) – R\$ 110.875.925,81 ano
CAE (B) – R\$ 76.056.664,03 ano
Economia Anual (A – B) – R\$ 34.819.261,78 ano

Fonte: elaborado pelo autor.

Os resultados do Custo do Ciclo de Vida (LCC), avaliados em horizonte de 10 anos e trazidos a valor presente por taxa de desconto de 15% a.a., indicam vantagem econômica consistente para o retrofit em LED (Sistema B) em relação ao sistema convencional (Sistema A), mesmo considerando investimento inicial elevado no retrofit. A inclusão do crescimento médio anual da tarifa de energia de 15% e do reajuste de manutenção de 10% reforça a dominância do componente energético no custo total, de modo que a redução de potência média por ponto (0,230 kW no convencional versus 0,115 kW no LED), associada ao regime operacional de 4.320 horas anuais, resulta em menor dispêndio acumulado para o Sistema B. No critério de Custo Anual Equivalente (CAE), o retrofit apresenta custos anuais equivalentes inferiores em todos os cenários, com economias aproximadas de R\$ 11,61 milhões/ano (25%), R\$ 23,21 milhões/ano (50%) e R\$ 34,82 milhões/ano (75%), mantendo proporcionalidade com o número de pontos convertidos. Observa-se ainda que o valor residual adotado como sucata/recuperação exerce impacto marginal frente aos custos de energia e manutenção, por

ocorrer apenas ao final do horizonte e sofrer desconto temporal. Assim, sob as premissas estabelecidas, a conversão para LED mostra-se tecnicamente alinhada à eficiência energética e economicamente vantajosa em termos de custo total ao longo do ciclo de vida analisado.

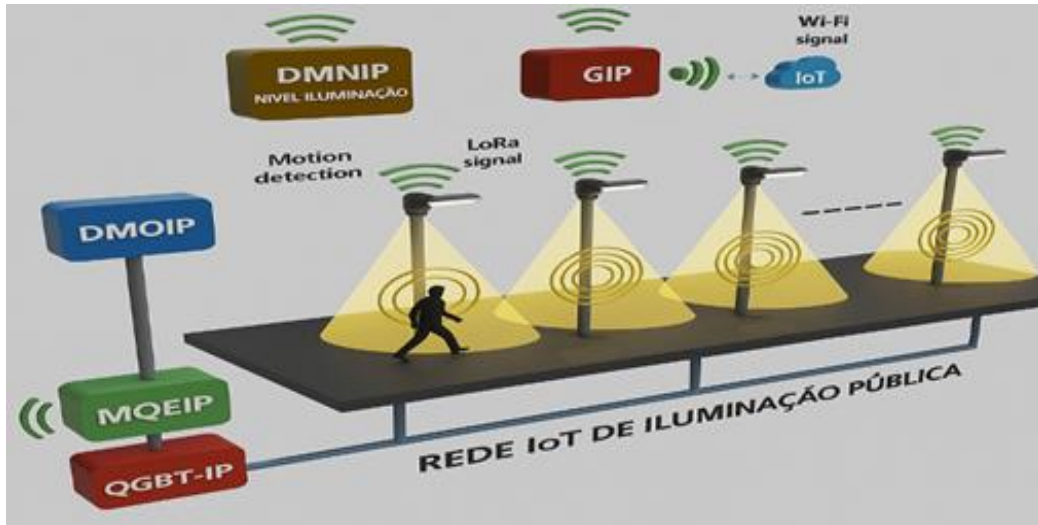
Esta dissertação também traz além do *retrofit* uma proposta de sugestão de desenvolvimento de um sistema de gestão de eficiência energética para o parque de iluminação pública do município de Fortaleza, com base em tecnologias de monitoramento através da *internet of things* (IoT). O sistema tem por objetivo o Monitoramento da Qualidade de Energia de Iluminação Pública (MQEIP), utilizando sensores inteligentes, redes de comunicação sem fio de longo alcance (LoRa) e plataformas de código aberto para permitir a gestão eficiente e em tempo real da iluminação pública, com baixos custos de instalação e manutenção.

A proposta central consiste no desenvolvimento de um analisador de consumo de energia baseado em LoRa, tecnologia de comunicação sem fio que se destaca pelo baixo consumo energético e pelo longo alcance, superando limitações comuns de outras tecnologias, como Wi-Fi, ZigBee e Bluetooth. A plataforma utiliza sensores não invasivos e arquitetura baseada em microcontroladores industriais, permitindo a medição de variáveis elétricas como tensão, corrente, potência ativa, reativa e aparente, fator de potência e nível de iluminação.

A arquitetura do sistema é composta por três dispositivos principais:

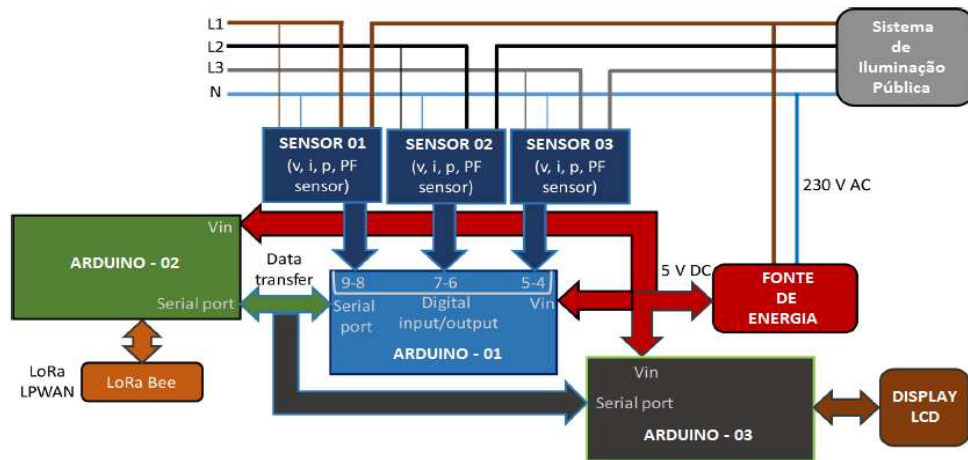
1. Gerenciador de Iluminação Pública (GIP): Responsável por centralizar as informações dos sensores e encaminhá-las à nuvem.
2. Dispositivo de Monitoramento e Operação para Iluminação Pública (DMOIP): Instalado em caixas de medições localizadas em postes, mede variáveis elétricas e permite ajustes no nível de iluminação.
3. Dispositivo de Medição de Nível de Iluminação (DMNIP): Avalia a intensidade luminosa do ambiente, auxiliando no controle automático.

Figura 28 - Rede IoT de iluminação pública.



Fonte: Sanchez-Sutil, F. e Cano-Ortega (2024, com adaptações).

Figura 29 - Arquitetura IoT parque de iluminação pública.



Fonte: Sanchez-Sutil, F. e Cano-Ortega (2024, com adaptações).

O (MQEIP) representa, portanto, uma solução moderna e modular para o monitoramento da qualidade de energia em sistemas de iluminação pública, com ênfase na precisão das medições e na comunicação remota via redes de baixa potência. Seu design modular permite rápida substituição e atualização de componentes, reduzindo custos de manutenção e prolongando a vida útil do sistema. A arquitetura é composta por dois microcontroladores independentes — Microcontrolador 01 e Microcontrolador 02 — que operam de forma coordenada. O primeiro realiza a coleta e o tratamento dos dados elétricos provenientes dos sensores, enquanto o segundo gerencia a comunicação via protocolo serial e

transmissão LoRa para o gerenciador remoto.

O módulo (MQEIP) é equipado com três sensores, um para cada fase (L1, L2 e L3), realizando medições sequenciais de modo a reduzir o consumo de energia e simplificar a instalação. O sistema também incorpora um display LCD (Arduino 03) para visualização local das medições, permitindo ao técnico de campo verificar instantaneamente o funcionamento dos dispositivos. A comunicação é realizada por meio do módulo LoRa Dragino Bee, integrante de redes LPWAN (Low Power Wide Area Network), ideal para aplicações urbanas de IoT devido ao seu longo alcance e baixo consumo energético.

A utilização dessas tecnologias possibilita o monitoramento remoto da iluminação pública em tempo real, com geração automática de relatórios, detecção de anomalias e suporte à tomada de decisões estratégicas. O *retrofit* das luminárias tradicionais por modelos em LED representa um passo fundamental na modernização do sistema. Além da eficiência energética, Segundo Sánchez-Sutil e Cano-Ortega (2023), “os LEDs apresentam vida útil até quatro vezes maior (entre 25.000 e 100.000 horas), reduzindo significativamente os gastos com manutenção e descarte de resíduos, e permitindo controle preciso da temperatura de cor da luz, adaptando-se melhor às diferentes condições urbanas”.

O verdadeiro potencial de transformação, contudo, emerge com a integração entre LEDs, automação IoT e sensores inteligentes. Por meio dessa automação, é possível ajustar automaticamente os níveis de luminosidade com base no fluxo de pedestres e veículos, detectar falhas operacionais de forma imediata e otimizar os ciclos de manutenção. Durante a noite, a intensidade luminosa pode ser reduzida gradualmente, conforme o tráfego diminui, apoiando a segurança e otimizando o consumo.

De acordo com (Sánchez-Sutil; Cano-Ortega, 2023, p. 02),

a integração de sensores inteligentes e comunicação LoRa em sistemas de iluminação pública permite o monitoramento em tempo real, o ajuste dinâmico da intensidade luminosa e a redução substancial do consumo energético, constituindo um elemento essencial para o desenvolvimento de cidades inteligentes

Khemakhem (2024, p.05) corroboram essa visão ao afirmarem que

os sistemas de iluminação pública baseados em IoT permitem o controle dinâmico da intensidade luminosa conforme o tráfego e as condições ambientais, promovendo economias energéticas significativas e contribuindo para a sustentabilidade urbana”.

Segundo Jabbar (2025, p.04),

a abordagem LoRaWAN-IoT para controle de postes de iluminação permite ativação de luz apenas quando há detecção de movimento, além de dimerização adaptativa, resultando em reduções de custo e emissões.

Esta dissertação evidencia que a combinação entre tecnologias LED, LoRa e sensores de movimento representa uma convergência entre eficiência energética e inovação digital, consolidando o conceito de iluminação pública inteligente. Trata-se de um avanço que transcende o simples *retrofit* de luminárias, viabilizando uma infraestrutura capaz de gerar dados, responder a estímulos ambientais e otimizar recursos públicos com base em decisões automatizadas.

Um exemplo de estratégia temporal proposta para o controle automático é dividido em quatro fases:

- Fase 1 (18h–21h): sem reduções na intensidade luminosa;
- Fase 2 (21h–23h): redução de 20%;
- Fase 3 (23h–4h): redução de 60%;
- Fase 4 (4h–6h): aumento gradual para 60%.

A definição da estratégia temporal de dimerização da iluminação pública foi estabelecida com base no comportamento típico de circulação urbana ao longo do período noturno, considerando padrões de mobilidade de veículos e pedestres, bem como critérios de eficiência energética e segurança viária, em conformidade com as diretrizes da ABNT NBR 5101:2024.

No intervalo compreendido entre 18h e 21h (Fase 1), optou-se por manter 100% da intensidade luminosa, uma vez que esse período corresponde ao horário de maior fluxo urbano, caracterizado pelo deslocamento da população após o expediente de trabalho, atividades comerciais em funcionamento e elevada circulação de veículos e pedestres. De acordo com a (ABNT NBR 5101, 2024), “níveis adequados de iluminância e uniformidade são fundamentais para garantir a segurança viária e a adequada percepção do ambiente, justificando a manutenção da iluminação plena nesse período crítico”.

Entre 21h e 23h (Fase 2), observa-se uma redução gradual no fluxo de pessoas e veículos, permitindo a aplicação de uma redução de 20% na intensidade luminosa sem comprometer os requisitos mínimos de iluminância estabelecidos pela norma. Essa redução controlada mantém

níveis de iluminação compatíveis com a segurança do tráfego e com a visibilidade dos usuários, atendendo aos critérios de desempenho luminotécnico previstos na ABNT NBR 5101:2024.

No período de 23h às 4h (Fase 3), ocorre o menor nível de atividade urbana, caracterizado por baixo fluxo de tráfego e reduzida circulação de pedestres. Nesse contexto, justifica-se a redução mais significativa, de 60% na intensidade luminosa, desde que sejam mantidos os níveis mínimos exigidos para a classe da via, conforme estabelecido na norma. A ABNT NBR 5101:2024 permite a adoção de estratégias de eficiência energética, desde que não haja comprometimento das condições mínimas de segurança e visibilidade, o que sustenta tecnicamente essa etapa da dimerização.

Por fim, no intervalo entre 4h e 6h (Fase 4), verifica-se o início do aumento progressivo da atividade urbana, com a retomada do deslocamento de trabalhadores e usuários do transporte público. Dessa forma, foi estabelecido um aumento gradual da intensidade luminosa até 60%, antecipando a necessidade de melhores condições de visibilidade. Essa estratégia está alinhada com os princípios da ABNT NBR 5101:2024, que recomenda a adequação dos níveis de iluminação às condições de uso da via, garantindo conforto visual e segurança aos usuários.

Dessa forma, a estratégia proposta baseia-se na adaptação dinâmica dos níveis de iluminação conforme o comportamento real da cidade ao longo da noite, respeitando os parâmetros técnicos da ABNT NBR 5101:2024 e promovendo simultaneamente eficiência energética, redução de custos operacionais e manutenção das condições adequadas de segurança e conforto visual.

A combinação dessas tecnologias de LED e sistema de monitoramento IoT tem potencial para revolucionar a gestão da iluminação pública em Fortaleza, proporcionando ganhos significativos em economia, sustentabilidade, segurança e qualidade de vida urbana.

Estima-se que o investimento apenas do *retrofit* na modernização do parque de iluminação pública sem a implementação do sistema de monitoramento IoT possa apresentar um retorno financeiro em aproximadamente quatro anos, considerando as projeções de economia resultantes da substituição das luminárias convencionais de (VMT) e (VSHP) por luminárias com tecnologia LED. Os resultados previstos apontam que, no cenário de 25% de *retrofit* do parque total ainda não eficientizado, gere uma economia anual podendo atingir aproximadamente R\$ 10.414.993,83; para 50% de modernização do parque ainda não eficientizado, o valor pode alcançar aproximadamente R\$ 20.829.866,68; e, para 75% de substituição do parque ainda não eficientizado, a economia anual estimada poderá chegar a R\$ 31.245.042,00. Esses valores demonstram que a adoção de luminárias LED representa uma estratégia economicamente viável e ambientalmente sustentável, capaz de reduzir

significativamente o consumo energético e os custos operacionais, ao mesmo tempo em que otimiza o desempenho e a eficiência do sistema de iluminação pública municipal.

Com o intuito de potencializar os efeitos da eficiência energética no parque de iluminação pública do município de Fortaleza e em consonância com o objetivo principal desta dissertação, propõe-se a sugestão de análise de um sistema de monitoramento inteligente (IoT) voltado à gestão e ao controle da iluminação pública municipal. O modelo sugerido é estruturado em duas competências complementares: a primeira, relacionada ao monitoramento do sistema de potência, permite o acompanhamento em tempo real do desempenho elétrico das luminárias; e a segunda, voltada à automação do sistema, propõe o controle adaptativo da intensidade luminosa de acordo com o fluxo de pedestres e veículos, garantindo maior eficiência operacional.

Para fins de estudo de caso e validação da proposta, foi selecionada como via piloto a Avenida Bezerra de Menezes, um dos principais corredores urbanos da cidade de Fortaleza, caracterizado pelo elevado fluxo viário e pela diversidade de uso do solo. A avenida conta com 832 pontos de iluminação pública, sendo 3 luminárias em LED, 6 em (VSHP) e 823 em (VMT). Essa configuração heterogênea reflete a realidade do parque de iluminação pública municipal, permitindo avaliar de forma abrangente os impactos da substituição tecnológica e a viabilidade da integração de sistemas inteligentes sob diferentes condições operacionais.

De acordo com o levantamento de tráfego veicular fornecido pela Autarquia Municipal de Trânsito e Cidadania de Fortaleza (AMC, 2025), a Avenida Bezerra de Menezes apresenta um Volume Médio Diário (VMD) expressivo, evidenciando seu papel como um dos principais eixos viários da cidade. No sentido oeste–leste, registram-se médias de 18.170 veículos/h no pico da manhã, 13.453 veículos/h no pico da noite e 8.722 veículos/h fora dos horários de pico. Já no sentido leste–oeste, observam-se valores de 12.213 veículos/h no pico da manhã, 16.533 veículos/h no pico da noite e 8.964 veículos/h fora de pico.

No cenário proposto para a implementação do sistema de monitoramento e gestão IoT, a primeira etapa consiste na realização de um *retrofit* completo das luminárias ao longo de toda a extensão da Avenida Bezerra de Menezes, substituindo-se os modelos convencionais em (VMT) e (VSHP) de 400 W por luminárias com tecnologia LED de 200 W. O investimento estimado para essa modernização é de aproximadamente R\$ 653.868,80, contemplando os custos de substituição e instalação dos novos equipamentos. A adoção da tecnologia LED possibilita uma redução significativa no consumo energético, projetando-se uma economia anual da ordem de R\$ 350.122,11, decorrente da maior eficiência luminosa e da menor demanda de potência das luminárias instaladas. Essa redução configura um ganho expressivo em termos

de desempenho operacional e custos recorrentes, resultando em um retorno financeiro estimado em cerca de quase dois anos, o que evidencia a viabilidade econômica e a sustentabilidade técnica da proposta de modernização.

A etapa dois da sugestão em análise consiste na proposta de aprimoramento tecnológico por meio da implementação de um sistema de gestão IoT, voltado ao monitoramento do sistema de potência elétrica do sistema de iluminação pública. A estimativa dos custos médios de implementação dos dispositivos e componentes necessários à operação do sistema. No que se refere ao monitoramento do sistema de potência, o custo unitário estimado é de R\$ 644,82, englobando sensores, microcontroladores, módulos LoRa, displays e materiais auxiliares. A implementação integral deste sistema de monitoramento ao longo da avenida demandará um investimento aproximado de R\$ 12.896,44, sendo os dispositivos instalados nas caixas de medição padrão ENEL, posicionadas no lado da carga.

O projeto prevê a implantação em 20 caixas de medição, que funcionarão como pontos de integração e supervisão dos dispositivos IoT instalados. A definição dessa quantidade foi realizada a partir do dimensionamento da carga total do sistema de iluminação pública, composto por 832 luminárias, sendo os circuitos divididos em unidades com aproximadamente 8.000 W cada, de forma a garantir que nenhuma caixa de medição ultrapasse o limite de potência instalada de 10.000 W. Esse critério assegura maior segurança operacional, evita sobrecargas e permite uma melhor organização da distribuição elétrica do sistema.

Essa infraestrutura possibilitará o gerenciamento remoto e o monitoramento em tempo real do desempenho das luminárias, permitindo acompanhar parâmetros elétricos, identificar anomalias e orientar intervenções corretivas e preventivas.

A etapa três da proposta de sugestão em análise refere-se à implementação do sistema de gestão e monitoramento IoT voltado à automação e ao controle adaptativo da iluminação pública, por meio da instalação de sensores de movimento ao longo de toda a Avenida Bezerra de Menezes. Essa etapa visa viabilizar o ajuste automático da intensidade luminosa, permitindo que os níveis de iluminação sejam modulados de acordo com o fluxo de pedestres e veículos em determinados horários como já descritos anteriormente, garantindo que a via seja iluminada de forma eficiente e proporcional à sua demanda real. Essa estratégia contribui diretamente para a eficiência energética, reduzindo o consumo em períodos de baixa circulação e promovendo o prolongamento da vida útil das luminárias, uma vez que diminui a necessidade de operação contínua em plena potência.

Considerando o custo médio de R\$ 450,00 por sensor, o investimento total estimado para essa fase é de aproximadamente R\$ 374.400,00, contemplando a instalação dos dispositivos em

todos os pontos de iluminação da via. A implementação dessa tecnologia representa um avanço significativo em direção à consolidação de uma infraestrutura urbana inteligente, alinhada aos princípios da sustentabilidade, da segurança pública e da modernização tecnológica da rede de iluminação de Fortaleza. Essa etapa fortalece a integração entre eficiência operacional e inovação, ampliando o potencial do sistema para futuras expansões em outras regiões do município.

A análise exclusiva da primeira etapa da sugestão proposta no que se refere ao *retrofit* das luminárias da Avenida Bezerra de Menezes, considerando a substituição dos modelos convencionais de 400 W em (VMT) por luminárias de 200 W com tecnologia LED, evidencia resultados expressivos em relação à redução de consumo e aos custos associados. As estimativas indicam que o consumo médio diário das luminárias convencionais, inicialmente de 4,8 kWh/dia, é reduzido para 2,4 kWh/dia após a modernização, representando uma diminuição de 50% no consumo de energia por ponto de iluminação. Essa redução equivale a um consumo anual de 864 kWh por luminária, resultando em uma economia média de aproximadamente R\$ 420,81 por luminária, considerando a tarifa média de R\$ 0,48706/kWh praticada pela distribuidora ENEL/CE em setembro de 2025.

Aplicada a toda a extensão da avenida, essa economia unitária gera um montante anual estimado de R\$ 350.122,10, evidenciando o impacto financeiro significativo da substituição tecnológica. Esses resultados reforçam a eficiência da modernização proposta, demonstrando que a adoção da tecnologia LED contribui diretamente para a redução dos custos operacionais da iluminação pública e promove maior eficiência no uso dos recursos energéticos ao longo da via.

No âmbito da terceira etapa da sugestão proposta, que trata da automação do sistema de iluminação pública, realizou-se uma análise específica do consumo energético decorrente da implementação de um sistema de controle adaptativo baseado em sensores de presença e estratégia de dimerização por faixas horárias.

A redução do consumo de 2,4 kWh/dia para 1,54 kWh/dia por ponto de iluminação foi obtida a partir da aplicação dos perfis de operação definidos ao longo do período noturno, considerando diferentes níveis de potência conforme o fluxo urbano. Inicialmente, considerase o consumo base de uma luminária LED de 115 W operando durante 12 horas contínuas em plena carga, resultando em aproximadamente 2,4 kWh/dia.

Com a adoção da estratégia de dimerização, esse consumo passa a ser ponderado conforme os níveis de operação em cada faixa horária:

- **Fase 1 (18h–21h):** 3 horas a 100% de potência → 0,345 kWh
- **Fase 2 (21h–23h):** 2 horas a 80% de potência → 0,184 kWh
- **Fase 3 (23h–4h):** 5 horas a 40% de potência → 0,230 kWh
- **Fase 4 (4h–6h):** 2 horas a 60% de potência → 0,138 kWh

Somando-se os consumos ponderados em cada período, obtém-se um consumo diário aproximado de 0,897 kWh equivalente em regime reduzido. No entanto, considerando a atuação dinâmica dos sensores de presença — que elevam temporariamente a potência para 100% em situações de detecção de movimento — foi adotado um fator de correção operacional, elevando o consumo final estimado para 1,54 kWh/dia por luminária.

Dessa forma, o consumo anual por ponto de iluminação passa a ser de aproximadamente 554 kWh, o que representa um custo anual estimado de R\$ 270,02 por luminária, considerando a tarifa vigente. Quando aplicado ao total de pontos da via, esse ganho de eficiência resulta em uma economia anual estimada de R\$ 224.661,68.

Os resultados obtidos ao longo das três etapas de sugestões propostas analisadas demonstram que a modernização do parque de iluminação pública, iniciando-se pelo *retrofit* das luminárias convencionais e avançando para a implementação de um sistema de monitoramento e automação baseado em IoT, apresenta forte potencial de redução de consumo energético e de custos operacionais, além de viabilidade econômica comprovada. A expressiva economia anual identificada nos diferentes cenários de substituição tecnológica, bem como o retorno financeiro projetado, confirma que a adoção de luminárias LED e de mecanismos inteligentes de controle representa uma estratégia tecnicamente sólida e alinhada às políticas de eficiência energética e sustentabilidade urbana.

Além disso, a aplicação da solução em uma via piloto de elevada relevância urbana, como a Avenida Bezerra de Menezes, evidencia a robustez da proposta e demonstra sua capacidade de responder às demandas reais de mobilidade, segurança e uso do espaço público. A integração entre LED, monitoramento em tempo real e controle adaptativo da luminosidade aponta para um modelo de iluminação pública orientado à inovação, capaz de sustentar futuras expansões em escala municipal e contribuir para a construção de uma infraestrutura urbana inteligente, mais resiliente, eficiente e adequada aos desafios energéticos contemporâneos.

5 CONCLUSÃO

A presente dissertação teve como objetivo principal analisar a viabilidade técnica e econômica da modernização do parque de iluminação pública do município de Fortaleza, integrando a substituição das luminárias convencionais em tecnologias de (VSHP) e (VMT) por luminárias em tecnologia LED e como proposta de sugestão a implementação de um sistema de monitoramento de gestão inteligente baseado em *internet of things* (IoT). Partindo de um diagnóstico detalhado da infraestrutura existente e da caracterização do parque de iluminação pública, constatou-se que o município apresenta um sistema heterogêneo e com elevado custo operacional anual. A análise realizada demonstrou que a modernização é uma medida necessária e estratégica para a sustentabilidade energética e fiscal da administração pública.

A avaliação da viabilidade de modernização do parque de iluminação com luminárias de tecnologias em LED integrada a uma proposta de sugestão de um sistema de monitoramento e gestão IoT, foi plenamente alcançado. Os resultados estimados comprovam que a substituição das luminárias convencionais por LED representa uma solução tecnicamente robusta e financeiramente vantajosa. As análises de consumo, estimativas de economia e projeções de retorno de investimento evidenciam que o *retrofit* do parque de iluminação pública é capaz de gerar reduções significativas nos custos anuais, ao mesmo tempo em que melhora a eficiência luminosa, a uniformidade e a confiabilidade do sistema.

No que se refere ao estudo de caso voltado ao *retrofit*, conclui-se que a tecnologia LED apresenta desempenho substancialmente superior às lâmpadas de vapor metálico (VMT) e vapor de sódio (VSHP). A redução de aproximadamente 50% no consumo energético por ponto de iluminação evidencia a relevância da modernização do parque de iluminação pública como instrumento de gestão eficiente de energia. As estimativas de economia anual, que variam entre R\$ 10,4 milhões e R\$ 31,2 milhões, a depender do cenário de *retrofit* analisado (25%, 50% ou 75%), demonstram o impacto positivo que uma política pública estruturada pode gerar para o município. Sob a ótica do Custo do Ciclo de Vida (LCC), os resultados indicam que, ao longo de um horizonte de 10 anos, o sistema convencional apresenta custos totais em valor presente de aproximadamente R\$ 185,5 milhões, R\$ 371,0 milhões e R\$ 556,5 milhões para os cenários de 25%, 50% e 75%, respectivamente. Em contraste, o sistema com tecnologia LED apresenta LCC significativamente inferior, da ordem de R\$ 127,2 milhões, R\$ 254,5 milhões e R\$ 381,7 milhões, resultando em economias acumuladas em valor presente de R\$ 58,2 milhões, R\$ 116,5 milhões e R\$ 174,7 milhões. Esses resultados reforçam que, apesar do maior investimento inicial, o retrofit LED constitui a alternativa economicamente mais eficiente no longo prazo,

consolidando-se como uma estratégia sustentável do ponto de vista energético e financeiro para a gestão da iluminação pública municipal.

A avaliação da viabilidade econômica, também foi atendida. Os cenários analisados indicam que o *retrofit* integral do parque apresenta retorno de investimento em cerca de quatro anos, o que confirma a atratividade financeira da proposta. Quando analisado o a proposta de sugestão referente ao estudo de caso da Avenida Bezerra de Menezes, o retorno se mostrou ainda mais rápido, reforçando que intervenções localizadas podem proporcionar resultados imediatos, tornando-se modelos de expansão para outras regiões do município. Assim, a modernização não apenas reduz custos, como também otimiza recursos públicos e contribui para o equilíbrio fiscal municipal.

A proposta de sugestão de um modelo de gestão inteligente, estruturado em monitoramento do sistema de potência e controle adaptativo via sensores de movimento, demonstrou forte aplicabilidade tanto operacional quanto financeira. As estimativas de consumo após a automação evidenciam reduções expressivas, com potencial de retorno em prazo inferior a dois anos, comprovando que a integração entre tecnologia em LED e sistema de monitoramento e gestão IoT representa uma evolução natural do conceito de eficiência energética para o conceito mais amplo de gestão inteligente da infraestrutura urbana.

A escolha da Avenida Bezerra de Menezes como projeto piloto mostrou-se acertada e alinhada aos princípios metodológicos adotados. O elevado Volume Médio Diário de Veículos (VMD), aliado à diversidade de usos e ao grande fluxo de pessoas, reforça a importância de uma iluminação pública eficiente, confiável e responsiva à dinâmica urbana. A análise dos custos energéticos e dos dados de mobilidade permitiu compreender de forma abrangente o impacto da iluminação no cotidiano urbano, especialmente no que se refere à segurança viária.

Os resultados estimados permitem concluir que a modernização do parque de iluminação pública, com adoção de LED e sistema de monitoramento e gestão de IoT, representa uma inovação estratégica para a cidade de Fortaleza. Além dos benefícios energéticos e financeiros.

Portanto, a dissertação demonstra que a transição para um sistema modernizado, eficiente e integrado atende plenamente aos objetivos inicialmente propostos e se configura como uma solução concreta, tecnicamente viável e economicamente justificável. Os resultados aqui apresentados reforçam a necessidade de políticas públicas voltadas à eficiência energética, inovação tecnológica e gestão integrada de infraestrutura, consolidando a iluminação pública como um componente fundamental da construção de cidades verdadeiramente inteligentes, seguras e sustentáveis.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução Normativa nº 1.000, de 7 de dezembro de 2021**. Brasília, DF: ANEEL, 2021. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br>. Acesso em: 17 set. 2025.

ARAÚJO, F. G. **A implementação de sistemas de iluminação pública com foco na eficiência energética: um estudo de caso em São Paulo**. 2021. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5101: Iluminação pública – Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

AUTARQUIA MUNICIPAL DE TRÂNSITO E CIDADANIA (AMC). **Levantamento de tráfego veicular – Avenida Bezerra de Menezes**. Fortaleza: AMC, set. 2025.

BERNARDES, Drielly Mazzarim; CELESTE, Wanderley Cardoso; CHAVES, Gisele de Lorena Diniz. Eficiência energética na iluminação pública urbana: revisão bibliográfica dos equipamentos e tecnologias. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 7, p. 1–21, 2020. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i7.3957>.

BRASIL. Lei nº 10.295, de 17 de outubro de 2001. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 18 out. 2001.

CAVALCANTI FILHO, José P.; LEIXO, José A.; et al. A economia de energia elétrica na iluminação pública com LED: estudo de caso em Recife-PE. **Revista REASE**, v. 7, n. 11, nov. 2021.

CLEMENTE, A. C.; PAIVA, C.; JÚNIOR, W. C. M.; CAIXETA, I. N. Gerenciamento de iluminação pública. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, v. 5, p. 107–147, 2018.

ECHEVARRÍA, Miguel. **Transformação digital na infraestrutura pública: oportunidades para governos locais da América Latina e Caribe**. Washington, DC: BID, 2023. Disponível em: <https://www.iadb.org/pt>. Acesso em: 03 nov. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Plano Nacional de Energia 2050: eficiência energética na iluminação pública**. Rio de Janeiro: EPE, 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br>. Acesso em: 03 nov. 2025.

FIGUEIREDO, L. S.; ANDRADE, M. A. **Iluminação pública: teoria e aplicações práticas**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBAM, 2018.

FINOCCHIO, Marco Antonio Ferreira. **Noções gerais de projetos de iluminação pública (IP)**. Cornélio Procópio: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2014.

FREITAS, T. M.; SANTOS, E. F. Impactos da iluminação pública na segurança urbana. **Revista Brasileira de Políticas Públicas**, v. 15, n. 4, p. 321–335, 2020.

GODOY, Plinio. **Conceitos de iluminação urbana**. São Paulo: O Setor Elétrico, 2022.

GODOY, Plinio. **Fotometria básica**. São Paulo: O Setor Elétrico, 2022.

GODOY, Plinio. **Iluminação pública e urbana**. São Paulo: O Setor Elétrico, 2022.

GORE, Santosh; DUTT, Ishita; PRASAD, D. Shyam; AMBHIKA, C. **Proceedings of the Second International Conference on Augmented Intelligence and Sustainable Systems**. In: ICAISS, 2023. IEEE, 2023.

JABBAR, S. et al. **LoRaWAN-IoT-based adaptive smart street lighting control system**. *Discover Internet of Things*, v. 5, n. 1, p. 1–12, 2025.

KHEMAKHEM, M. et al. IoT-based smart public street lighting for sustainable urban management. **Journal of Building Engineering**, v. 85, p. 110232, 2024.

KRUGER, Carlos; RAMOS, Luís Felipe. Iluminação pública e efficientização energética. **Revista Espaço Acadêmico**, n. 185, p. 37–49, 2016.

MOHAMMAD, Arshad et al. Economic and environmental impact of energy efficient design of smart lighting system. **Journal of the Institution of Engineers (India): Series B**, v. 104, n. 3, p. 679–692, 2023.

MOTTA, G. R. **Eficiência energética em iluminação pública**. Belo Horizonte: Érica, 2019.

NALAGANDLA, Rambabu; PATTANAIK, Balachandra. **IoT enabled hybrid renewable energy system for street light applications**. In: ICAISS, 2023.

NAYYAR, Anand; PURI, Vikram. **Smart farming: IoT based smart sensors agriculture stick**. IEEE, 2016.

OLIVEIRA, A. P.; GOMES, R. F. **Iluminação pública e sustentabilidade: abordagens tecnológicas**. *Revista Brasileira de Engenharia Sustentável*, v. 10, n. 2, p. 45–60, 2021.

OLIVEIRA, A. P. **Iluminação pública e sustentabilidade: abordagens tecnológicas e impactos ambientais**. Dissertação (Mestrado) – UFRJ, 2021.

OSRAM. **LED luminaires technical specifications and warranty conditions**. S. I.: s. n. 2021.

PEREIRA, R. M.; COSTA, L. H. Modelos de gestão e financiamento para iluminação pública. **Revista de Administração Pública**, v. 53, n. 3, p. 467–485, 2019.

PHILIPS LIGHTING. **Outdoor lighting luminaires – product specifications**. 2020.

RAO, V. V. S.; KODALI, R. K.; MANDAL, P. ESP8266 based smart irrigation system. **Procedia Computer Science**, v. 132, p. 145–150, 2018.

RABAZA, Ovidio et al. Experimental study of street lighting levels. **Sustainability**, v. 10, n. 12, p. 4365, 2018.

REA, M. S. **The IESNA lighting handbook**. 10. ed. Nova York: Illuminating Engineering Society, 2020.

SALVIA, Amanda L. et al. AHP aplicado à eficiência energética em iluminação pública. **Energy Policy**, v. 132, p. 854–864, 2019.

SANCHEZ-SUTIL, F.; CANO-ORTEGA, A. Monitoring public lighting using LoRa. **Internet of Things**, v. 22, p. 100711, 2023.

SCHIEL, R.; OLIVEIRA, F. **Tecnologias inteligentes em iluminação pública**. São Paulo: Alta Books, 2020.

SHAHZAD, Khurram et al. Ecological feasibility study for street lighting. **Journal of Cleaner Production**, v. 175, p. 683–695, 2018.

SILVA, J. P.; CASTRO, A. M. **Análise comparativa de tecnologias de iluminação pública**. Revista de Engenharia Elétrica, v. 35, n. 2, p. 123–134, 2017.

SILVA, M. T. **Avaliação da eficiência energética em projetos de iluminação pública**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.