

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**RODRIGO ALVES MARTINS PINHEIRO**

**ANÁLISE DOS IMPACTOS DA MODERNIZAÇÃO DA ILUMINAÇÃO  
PÚBLICA COM TECNOLOGIA LED:  
ESTUDO DE CASO DO MUNICÍPIO DE ITUIUTABA - MG**

Uberlândia – Minas Gerais

2026

RODRIGO ALVES MARTINS PINHEIRO

**ANÁLISE DOS IMPACTOS DA MODERNIZAÇÃO DA ILUMINAÇÃO  
PÚBLICA COM TECNOLOGIA LED:  
ESTUDO DE CASO DO MUNICÍPIO DE ITUIUTABA - MG**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

**Orientador:** Prof. Dr. Augusto Wohlgemuth Fleury Veloso da Silveira.

Uberlândia – Minas Gerais

2026

**ANÁLISE DOS IMPACTOS DA MODERNIZAÇÃO DA ILUMINAÇÃO  
PÚBLICA COM TECNOLOGIA LED:  
ESTUDO DE CASO DO MUNICÍPIO DE ITUIUTABA - MG**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Uberlândia, 13 de Março de 2026.

Banca Examinadora:

---

**Augusto Wohlgemuth Fleury Veloso da Silveira – Professor Doutor**

---

**Luciano Coutinho Gomes – Professor Doutor**

---

**Gustavo Brito de Lima – Professor Doutor**

## **AGRADECIMENTOS**

Antes de mais nada, agradeço a Deus, por ser o meu refúgio diante das adversidades que encontrei, e por me dar forças quando a vida pareceu perder o sentido.

À minha mãe, Elaine, e ao meu saudoso pai, Roni, por todo o apoio e incentivo, eu jamais teria chegado até aqui sem vocês dois.

Aos professores da Faculdade de Engenharia Elétrica, por todos os ensinamentos e conselhos ao longo da minha graduação.

Aos meus amigos e amigas, que estiveram comigo ao longo desta jornada, tanto dentro da UFU quanto fora. Desejo a todos vocês sucesso, onde quer que a vida os leve.

À Universidade Federal de Uberlândia como um todo, pelas oportunidades, auxílio, conexões, ferramentas, e principalmente por essa experiência maravilhosa, que levarei comigo por toda a vida.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	12
1.1	Contextualização e motivação	12
1.2	Definição do problema	12
1.3	Justificativa do estudo	13
1.4	Objetivos	14
1.4.1	Objetivos específicos	14
1.5	Organização do documento	15
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b>	16
2.1	Evolução da Iluminação Pública	16
2.1.1	Contexto histórico no Brasil	16
2.1.2	Desafios contemporâneos	17
2.2	Fundamentos da Luminotécnica	18
2.2.1	Grandezas fotométricas fundamentais	18
2.2.2	Parâmetros de qualidade luminosa	19
2.3	Tecnologias de Iluminação	21
2.3.1	Lâmpadas de descarga de alta intensidade (HID)	21
2.3.2	Tecnologia LED	22
2.3.3	Análise comparativa	24
2.4	Marco Regulatório Brasileiro	25
2.4.1	Normas técnicas aplicáveis	25
2.4.2	Regulamentação do setor elétrico	25
2.4.3	Programas governamentais	26
2.5	Análise da Viabilidade Econômica	28
2.5.1	Indicadores da viabilidade financeira	28
2.5.2	Análise de sensibilidade e cenários	29
2.6	Experiências de Modernização	31
2.6.1	Estudos de caso em municípios	31
2.6.2	Modelos de implementação	32
2.7	Sustentabilidade ambiental	34
2.7.1	Redução de emissões de gases de efeito estufa	34
2.7.2	Gestão de resíduos de lâmpadas	34

<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	35
3.1	Classificação da Pesquisa	35
3.2	Caracterização da Área de Estudo	36
3.2.1	O Município de Ituiutaba	36
3.2.2	Modernização implementada	36
3.3	Coleta de Dados e Dimensionamento	38
3.3.1	Dados do sistema convencional (antes da modernização)	38
3.3.2	Dados tarifários e custos	38
3.3.3	Dados do sistema LED (após a modernização)	39
3.4	Análise Financeira e Avaliação ambiental	40
3.4.1	Investimento inicial realizado	40
3.4.2	Projeção dos custos operacionais	40
3.4.3	Cálculo da redução das emissões de CO <sub>2</sub>	41
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E ANÁLISE</b>	42
4.1	Diagnóstico do Sistema Convencional Pré-Modernização	42
4.1.1	Caracterização geral (2021)	42
4.1.2	Custos operacionais e consumo energético (2021)	42
4.2	Diagnóstico do Sistema LED Pós-Modernização	45
4.2.1	Caracterização geral (2025)	45
4.2.2	Custos operacionais e consumo energético (2025)	46
4.3	Análise comparativa	48
4.4	Validação da Viabilidade Econômica	50
4.4.1	Investimento realizado	50
4.4.2	Economia efetiva e indicadores de viabilidade	50
4.5	Impactos Ambientais e Sociais	53
4.5.1	Redução das emissões dos gases de efeito estufa	53
4.5.2	Eliminação de resíduos perigosos	53
4.5.3	Síntese dos impactos	54
4.6	Discussão dos resultados	54
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b>	56
5.1	Conclusões Gerais	56

5.2	Atendimento aos Objetivos .....	57
5.2.1	Objetivo geral .....	57
5.2.2	Objetivos específicos .....	57
5.3	Recomendações para Outros Municípios .....	58
5.4	Sugestões para Trabalhos Futuros .....	59
5.5	Considerações Finais .....	60
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>61</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Comparação da eficácia luminosa típica entre tecnologias de iluminação .....	19
Figura 3.1 - Fluxograma de metodologia da pesquisa .....	35
Figura 3.2 - Cronologia da modernização (2021-2024) .....	37
Figura 4.1 - Trecho de 1km analisado na avenida Minas Gerais .....	46
Figura 4.2 - Comparação de custos operacionais mensais .....	49

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Comparação técnica entre tecnologias de iluminação .....	24
Tabela 3.1 - Cronologia do projeto Ituiutaba iluminada .....	36
Tabela 3.2 - Premissas da análise econômico-financeira .....	41
Tabela 4.1 - Base de cálculo do sistema convencional (2021) .....	43
Tabela 4.2 - Caracterização do sistema LED implantado (2025) .....	46
Tabela 4.3 - Base de cálculo do sistema LED (2025) .....	47
Tabela 4.4 - Comparação técnica das características: 2021 vs 2025 .....	48
Tabela 4.5 - Comparação técnica do consumo: 2021 vs 2024 .....	48
Tabela 4.6 - Economia efetiva real 2021 vs 2025 .....	50
Tabela 4.7 - Comparação técnica do consumo (15.300 pontos): 2021 vs 2025 .....	51
Tabela 4.8 - Economia efetiva com quantidade de pontos iguais (15.300): 2021 vs 2025 ...	52
Tabela 4.9 - Síntese dos impactos ambientais e sociais .....	54

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

B/C - Relação Benefício-Custo  
COFINS - Contribuição para Financiamento da Seguridade Social  
COSIP - Contribuição para Custeio do Serviço de Iluminação Pública  
HID - Descarga de Alta Intensidade (*High Intensity Discharge*)  
ICMS - Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços  
IRC - Índice de Reprodução de Cor  
LED - Diodo Emissor de Luz (*Light Emitting Diode*)  
MCTI - Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações  
PEE - Programa de Eficiência Energética  
PIS - Programa de Integração Social  
PPP - Parceria Público-Privada  
PROCEL - Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica  
TIR - Taxa Interna de Retorno  
VPL - Valor Presente Líquido  
cd - Candela  
cd/m<sup>2</sup> - Candela por metro quadrado  
E - Iluminância (lux)  
I<sub>0</sub> - Investimento inicial (R\$)  
i - Taxa de desconto (% a.a.)  
K - Kelvin  
kW - Quilowatt  
kWh - Quilowatt-hora  
lm - Lúmen  
lm/W - Lúmen por watt  
MWh - Megawatt-hora  
P - Potência (Watts)  
tCO<sub>2</sub> - Tonelada de CO<sub>2</sub>  
U<sub>0</sub> - Uniformidade global  
W - Watt  
Φ - Fluxo luminoso (lm)  
η - Eficácia luminosa (lm/W)

## RESUMO

Com uma demanda crescente por soluções sustentáveis e economicamente viáveis no setor de energia elétrica como um todo, e, tendo em vista que a iluminação pública representa uma parcela significativa do consumo de energia de um município, este trabalho busca avaliar os impactos causados pela substituição das lâmpadas tradicionais do sistema de iluminação pública por lâmpadas LED, as quais, graças ao avanço da tecnologia, apresentam ser soluções muito mais eficientes, duráveis e seguras, quando comparadas as lâmpadas de vapor de sódio e vapor de mercúrio, que são as mais convencionalmente utilizadas no setor de iluminação pública. Ao longo dessa pesquisa, os resultados obtidos demonstram como essa substituição pode trazer benefícios significativos para o município, como um menor consumo de energia, menor custo de manutenção, mais segurança e uma maior durabilidade.

**Palavras-Chave:** Iluminação Pública, LED, Eficiência, Ituiutaba.

## ABSTRACT

With the growing demand for sustainable and economically viable solutions in the electrical energy sector as a whole, and considering that public lighting represents a significant share of a municipality's energy consumption, this study aims to evaluate the impacts caused by the replacement of traditional public lighting lamps with LED lamps. Owing to technological advances, LED lamps have proven to be much more efficient, durable, and safer solutions when compared to sodium vapor and mercury vapor lamps, which are the most conventionally used technologies in public lighting systems. Throughout this research, the results obtained demonstrate how this replacement can provide significant benefits for the municipality, such as reduced energy consumption, lower maintenance costs, increased safety, and greater durability.

**Palavras-Chave:** Public Lighting, LED, Efficiency, Ituiutaba.

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização e motivação

A iluminação pública desempenha um papel fundamental na infraestrutura das cidades, garantindo segurança, mobilidade e qualidade de vida para a população. No Brasil, o sistema de iluminação pública representa uma parcela significativa do consumo energético, sendo responsável por aproximadamente 4,3% do consumo nacional de energia elétrica (MORAIS, 2022). As tecnologias mais empregadas ao longo dos anos para a iluminação pública se baseiam em lâmpadas de vapor de sódio e vapor de mercúrio, as quais não só apresentam eficiência energética limitada, mas também custos elevados de manutenção e operação (NOGUEIRA, 2013).

Diante de um cenário onde a demanda energética cresce constantemente e a necessidade de redução dos custos operacionais nos municípios brasileiros também aumenta, a modernização dos sistemas de iluminação pública surge como estratégia para a redução das despesas públicas. Nesse contexto, a tecnologia LED (Light Emitting Diode) apareceu como alternativa promissora, oferecendo eficiência luminosa maior, vida útil mais longa, e economia de energia significativa quando comparada às tecnologias convencionais (FRAGOSO et al., 2020). Estudos recentes demonstram que a substituição das luminárias tradicionais por luminárias LED pode resultar em uma redução de até 50% no consumo energético dos sistemas de iluminação pública (FRETTE et al., 2023).

A transição dos sistemas convencionais para a iluminação LED também tem sido adotada mundialmente como medida de eficiência energética e sustentabilidade urbana. No Brasil, diversos municípios já implementaram projetos de modernização nesse âmbito, e alcançaram resultados significativos em termos de economia energética e redução dos custos operacionais. Casos como o de Porto Alegre (RS), que adotou o modelo de Parceria Público-Privada (PPP) para implementação dos LEDs, Muniz Freire (ES), que teve um payback estimado em aproximadamente três anos, e Ituiutaba (MG), que substituiu integralmente as luminárias convencionais por LEDs entre os anos de 2021 e 2024, evidenciam a viabilidade técnica e econômica dessa tecnologia no cenário brasileiro (CORDEIRO, 2023; PAULA et al., 2025).

## 1.2 Definição do problema

As lâmpadas de vapor de sódio e vapor de mercúrio são amplamente utilizadas na iluminação pública brasileira. No entanto, elas apresentam limitações técnicas e operacionais

significativas. Além da baixa eficiência energética, essas tecnologias também são caracterizadas por uma vida útil reduzida, degradação fotométrica acelerada e pela necessidade frequente de manutenção, fatores estes que comprometem a qualidade do serviço prestado e conseqüentemente elevam os custos municipais (NOGUEIRA, 2013; FRETТА et al., 2023). Inspeções técnicas em sistemas já existentes identificam frequentemente problemas como a falta de manutenção adequada, luminárias danificadas e/ou inoperantes, e também má distribuição luminosa, o que resulta em desperdício energético e qualidade de iluminação inadequada (FRETТА et al., 2023).

Para os municípios brasileiros, especialmente aqueles de médio porte, os custos associados à iluminação pública representam uma parcela considerável do orçamento público. A combinação de consumo energético alto e tarifas elevadas de energia elétrica cria um cenário de insustentabilidade financeira que demanda soluções tecnológicas eficientes. Adicionalmente, a manutenção adequada dos sistemas convencionais demanda recursos humanos e financeiros significativos devido à substituição frequente das lâmpadas e reatores.

### **1.3 Justificativa do estudo**

A realização desse estudo se justifica por múltiplos aspectos de relevância técnica, econômica, ambiental e social. Sob a perspectiva técnica, uma avaliação detalhada, incluindo o dimensionamento conforme as normas brasileiras (ABNT NBR 5101:2018), é fundamental para garantir que o sistema proposto atenda aos requisitos adequados de iluminância, uniformidade e qualidade da luz.

Sob a perspectiva econômica, a modernização da iluminação pública requer um investimento significativo. Os gestores públicos necessitam de informações objetivas sobre o investimento inicial necessário, economia operacional esperada, período de retorno do investimento e a robustez da viabilidade econômica frente as variações de parâmetros-chave, como tarifas de energia, custos dos equipamentos e benefícios ambientais decorrentes da modernização. Logo, é necessário realizar uma avaliação criteriosa dos custos de investimento, da economia energética projetada e dos indicadores financeiros, a fim de fornecer os subsídios necessários para avaliar a atratividade do investimento e a sua robustez em frente as incertezas para a tomada de decisão por parte dos gestores públicos.

Do ponto de vista ambiental, a redução do consumo energético decorrente da modernização também contribui para a diminuição das emissões de gases de efeito estufa associadas à geração de energia elétrica, alinhando com os compromissos nacionais e internacionais de mitigação das mudanças climáticas. Adicionalmente, a ausência de

mercúrio nos LEDs também reduz os riscos ambientais e de saúde pública associados ao descarte inadequado desse material, um metal pesado e de elevada toxicidade ambiental

Sob o aspecto social, a melhoria da qualidade da iluminação pública contribui para o aumento da sensação de segurança da população, favorecendo a mobilidade urbana noturna e a utilização dos espaços públicos. Além disso, com a redução dos custos operacionais, os recursos municipais que antes iriam para o custeio da iluminação pública agora podem ser direcionados para outras áreas de investimento social.

Por fim, esse trabalho também contribui para a literatura técnico-científica, através do estudo de caso com dados reais de uma implementação já concluída, fornecendo validação empírica dos benefícios projetados em estudos prospectivos. A documentação detalhada da experiência de Ituiutaba também serve como referência para municípios similares e evidência concreta da viabilidade da modernização.

## **1.4 Objetivos**

Analisar os impactos técnicos, econômicos e ambientais da modernização do sistema de iluminação pública com tecnologia LED implementada no município de Ituiutaba, Minas Gerais, validando empiricamente os benefícios obtidos e fornecendo referências para outros municípios brasileiros.

### **1.4.1 Objetivos específicos**

Para alcançar o objetivo geral proposto, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Caracterizar o sistema de iluminação pública convencional existente em Ituiutaba antes da modernização, incluindo as tecnologias utilizadas, o consumo energético e os custos operacionais;
- Analisar comparativamente as características técnicas das tecnologias de iluminação convencional substituídas (vapor de mercúrio e vapor de sódio) e da tecnologia LED implementada, levando em consideração a eficácia luminosa, vida útil, qualidade da luz e os requisitos de manutenção;
- Caracterizar o sistema de iluminação pública LED implementado após a conclusão da modernização (dados de 2025), incluindo as especificações técnicas e o consumo energético;

- Levantar os dados referentes ao investimento realizado pela prefeitura na modernização do sistema;
- Avaliar os resultados econômicos efetivos da modernização, comparando os custos operacionais de antes e depois e calculando os indicadores de viabilidade com dados reais;
- Quantificar os benefícios ambientais efetivamente obtidos, incluindo a redução das emissões dos gases de efeito estufa e a eliminação do descarte de mercúrio;
- Validar os resultados obtidos em Ituiutaba mediante a comparação com os benefícios projetados na literatura técnico-científica;
- Apresentar recomendações para os outros municípios baseadas na experiência documentada de Ituiutaba.

### **1.5 Organização do documento**

Esse trabalho está organizado em cinco capítulos. O Capítulo 2 a seguir apresenta a revisão da literatura técnico-científica, abordando a evolução histórica dos sistemas de iluminação pública, fundamentos da luminotécnica, tecnologias de iluminação disponíveis, o marco regulatório brasileiro, os métodos de análise da viabilidade econômica e as experiências de modernização documentadas em outros municípios. O Capítulo 3 descreve os materiais e os métodos empregados neste trabalho, incluindo a classificação da pesquisa, caracterização da área de estudo, procedimentos da coleta de dados, dimensionamento do sistema LED, metodologia de análise econômico-financeira realizada e a avaliação da modernização no quesito ambiental. O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos, incluindo a caracterização dos sistemas de antes e depois da modernização, análise comparativa, validação da viabilidade econômica, avaliação dos impactos ambientais e a discussão dos resultados obtidos. O Capítulo 5 apresenta as conclusões gerais, atendimento aos objetivos, recomendações para os outros municípios e as sugestões para trabalhos futuros.

## **2. REVISÃO DA LITERATURA**

### **2.1 Evolução da Iluminação Pública**

#### **2.1.1 Contexto histórico no Brasil**

A iluminação pública no Brasil tem a sua origem datada no período colonial, inicialmente com o uso de lampiões a óleo de baleia e posteriormente lampiões a gás. O processo de eletrificação da iluminação pública se iniciou no final do século XIX, com a instalação das primeiras lâmpadas incandescentes em cidades como Rio de Janeiro e São Paulo. Durante grande parte do século XX, as lâmpadas incandescentes dominaram a iluminação pública brasileira. No entanto, sua baixa eficiência energética (aproximadamente 13 a 17 lm/W) e vida útil reduzida (cerca de 1.000 horas), motivaram a busca por tecnologias mais eficientes. Isso resultou na substituição progressiva das lâmpadas incandescentes por tecnologias de descarga de alta intensidade (HID) (NOGUEIRA, 2013).

As lâmpadas de vapor de mercúrio, amplamente instaladas entre 1950 e 1990, ofereceram na época um avanço significativo em relação às incandescentes, com uma eficácia luminosa de 40-60 lm/W e uma vida útil de 15.000-24.000 horas. Suas principais desvantagens quando comparadas as tecnologias mais recentes são: baixa eficiência energética, qualidade de luz limitada (IRC 40-60) e conteúdo de mercúrio (20-60 mg por lâmpada), o qual representa um risco ambiental.

As lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão, introduzidas a partir da década de 1970, ofereceram uma melhoria adicional em eficiência energética (80-140 lm/W) e também na vida útil (24.000-32.000 horas). Isso fez com que elas se tornassem a tecnologia predominante para a iluminação viária (MORAIS, 2022). Suas principais limitações quando comparadas as tecnologias mais recentes incluem: qualidade de luz deficiente (IRC 20-25, emissão monocromática amarelada), tempo de partida elevado (3-7 minutos) e conteúdo de mercúrio (10-20 mg por lâmpada).

A tecnologia LED (Light Emitting Diode) para iluminação pública se desenvolveu significativamente a partir da década de 2000, com a introdução dos LEDs brancos de alta potência. Avanços em materiais semicondutores, encapsulamento e sistemas ópticos resultaram em luminárias LED com eficácia superior a 120 lm/W, vida útil de 50.000-100.000 horas e uma qualidade de luz significativamente melhor (IRC > 70). A principal limitação dos LEDs era o custo significativamente mais elevado quando comparado as demais tecnologias, o que se tornou o fator chave que impediu a ampla adoção dessa tecnologia na iluminação

pública em seus primeiros anos. No entanto, com a popularização da tecnologia e a melhoria contínua da eficiência, os custos de produção caíram ao longo dos anos e a tecnologia se tornou economicamente viável para aplicações de iluminação pública. Hoje em dia ela se consolidou como a solução preferencial para os novos projetos e também para o retrofit dos sistemas já existentes, o que iniciou um processo de substituição das tecnologias convencionais em diversos países.

### **2.1.2 Desafios contemporâneos**

Os sistemas brasileiros de iluminação pública enfrentam múltiplos desafios. O legado da infraestrutura envelhecida, com a presença de tecnologias ineficientes instaladas há mais de 15 anos, resulta em um consumo energético elevado e em custos operacionais crescentes. Os municípios normalmente destinam de 3-5% dos seus orçamentos para o custeio da iluminação pública, o que representa uma despesa significativa em contexto das restrições fiscais (MORAIS, 2022).

A capacidade técnica e financeira limitada dos municípios de pequeno e médio porte muitas vezes dificulta a implementação de projetos de modernização. A ausência de cadastros atualizados do parque de iluminação, a falta de especificações técnicas adequadas e a dificuldade de acesso a financiamentos estão entre as principais barreiras encontradas. Adicionalmente, a qualidade variável dos equipamentos disponíveis no mercado brasileiro também demanda uma fiscalização e especificações rigorosas.

A pressão por uma maior sustentabilidade ambiental e eficiência energética, somada aos compromissos climáticos nacionais e internacionais, demandam uma redução do consumo de energia e das emissões de gases de efeito estufa. Nesse quesito, a modernização da iluminação pública entra como uma oportunidade de contribuição significativa para esses objetivos, além de contar com benefícios adicionais como a redução dos resíduos perigosos (mercúrio) e a melhoria da qualidade ambiental urbana.

Adicionalmente, as questões relacionadas à qualidade da iluminação, como por exemplo: a uniformidade inadequada, o ofuscamento excessivo e a má reprodução de cores, também impactam negativamente a segurança viária e a sensação de segurança da população. Estudos indicam que uma iluminação pública de qualidade contribui para a redução de acidentes de trânsito noturnos e de índices de criminalidade (FRAGOSO et al., 2020)

## 2.2 Fundamentos da Luminotécnica

### 2.2.1 Grandezas fotométricas fundamentais

A luminotécnica é fundamentada em grandezas físicas que quantificam a luz e a sua interação com o ambiente. O domínio dessas grandezas é essencial para um projeto de iluminação pública adequado. Dentre as grandezas fotométricas fundamentais estão:

**Fluxo Luminoso ( $\Phi$ ):** Representa a quantidade total de luz emitida por uma fonte luminosa, medida em lúmens (lm), é um parâmetro fundamental para o dimensionamento dos sistemas de iluminação. Ele representa a potência luminosa total radiada em todas as direções. Para as lâmpadas e luminárias, o fluxo luminoso nominal é especificado pelos fabricantes.

**Iluminância ( $E$ ):** É a densidade de fluxo luminoso incidente sobre uma determinada superfície, medida em lux (lx), onde  $1 \text{ lux} = 1 \text{ lúmen/m}^2$ . A iluminância é a grandeza mais comumente especificada em normas de iluminação, onde se estabelecem níveis mínimos para as suas diferentes aplicações. Matematicamente ela é interpretada como:

$$E = \frac{\Phi}{A} \quad (1)$$

Onde:  $E$  é a iluminância (lux),  $\Phi$  é o fluxo luminoso (lm) e  $A$  é a área ( $\text{m}^2$ ).

**Luminância ( $L$ ):** Representa a intensidade luminosa emitida ou refletida por uma superfície em determinada direção, medida em candela por metro quadrado ( $\text{cd/m}^2$ ). A luminância é a grandeza fotométrica que efetivamente estimula o sistema visual humano, sendo percebida como "brilho" da superfície, ela também é particularmente relevante para a iluminação viária, onde a visibilidade de objetos depende do contraste de luminância. A norma brasileira NBR 5101:2018 determina certos requisitos de luminância para as vias de tráfego motorizado de alta velocidade.

**Intensidade Luminosa ( $I$ ):** É o fluxo luminoso emitido por uma fonte em determinada direção, por unidade de ângulo sólido, medida em candela (cd). A distribuição de intensidade luminosa das luminárias é representada por curvas fotométricas (diagramas polares ou cartesianos).

**Eficácia Luminosa ( $\eta$ ):** Trata-se da relação entre o fluxo luminoso emitido e a potência elétrica consumida, medida em lúmens por watt ( $\text{lm/W}$ ). A eficácia luminosa é um indicador fundamental de eficiência energética de fontes luminosas e sistemas de iluminação.

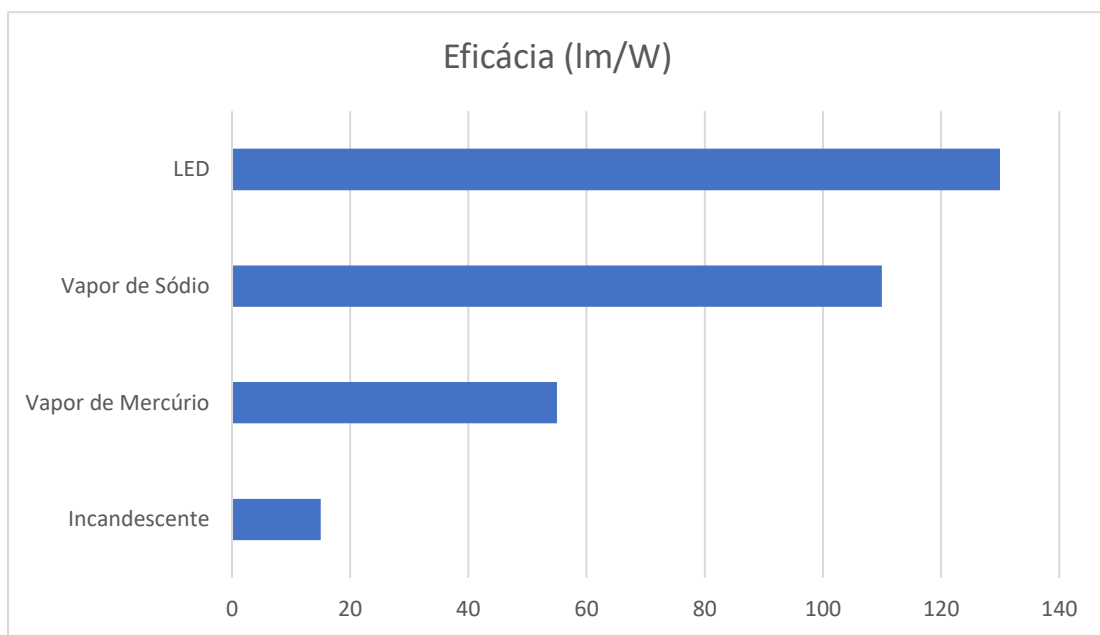
Matematicamente é interpretada como:

$$\eta = \frac{\Phi}{P} \quad (2)$$

Onde:  $\eta$  é a eficácia (lm/W),  $\Phi$  é o fluxo luminoso (lm) e  $P$  é a potência elétrica (W).

A Figura 2.1 apresenta comparação de eficácia luminosa entre diferentes tecnologias de iluminação.

**Figura 2.1** - Comparação da eficácia luminosa típica entre tecnologias de iluminação



**Fonte:** Elaboração própria

### 2.2.2 Parâmetros de qualidade luminosa

Além das grandezas fotométricas quantitativas, também existem certos parâmetros qualitativos que são fundamentais para garantir uma iluminação adequada, sendo eles:

**Temperatura de Cor Correlata (CCT):** A temperatura de cor correlata, medida em Kelvin (K), caracteriza a aparência cromática da luz emitida por uma determinada fonte luminosa. Fontes com CCT < 3.300 K são classificadas como "quentes" (tonalidade amarelada), entre 3.300-5.300 K elas são classificadas como "neutras" (branco neutro) e as de CCT > 5.300 K são classificadas como "frias" (tonalidade azulada). A NBR 5101:2018 recomenda CCT entre 3.000 K e 5.000 K para a iluminação pública, com preferência por temperaturas mais baixas em áreas residenciais para minimizar a poluição luminosa.

**Índice de Reprodução de Cor (IRC ou CRI):** O Índice de Reprodução de Cor (IRC), também denominado CRI (Color Rendering Index), quantifica a capacidade de uma fonte luminosa de reproduzir fielmente as cores de objetos quando comparado à luz natural, em uma escala de 0 a 100. Um IRC > 80 é considerado "bom", já um IRC > 90 é considerado "excelente". A NBR 5101:2018 estabelece um valor IRC mínimo de 60 para a iluminação pública, com recomendação de IRC  $\geq 70$  para áreas centrais e comerciais. Lâmpadas de vapor de sódio apresentam um IRC bem baixo (20-25), isso resulta em uma percepção de cores mais distorcida. Os LEDs por outro lado, normalmente apresentam um IRC > 70.

**Uniformidade de Iluminação:** A uniformidade de iluminação quantifica a distribuição da iluminância sobre a superfície que está sendo iluminada. A NBR 5101:2018 define matematicamente a uniformidade global de iluminação como:

$$U_o = \frac{E_{min}}{E_{med}} \quad (3)$$

Onde:  $U_o$  é a uniformidade global,  $E_{min}$  é a iluminância mínima (lux) e  $E_{med}$  é a iluminância média (lux).

A NBR 5101:2018 define o requisito de  $U_o \geq 0,40$  para as vias principais como forma de garantir uma distribuição adequada da luz, evitando áreas excessivamente escuras que possam comprometer a segurança e o conforto visual.

**Controle de Ofuscamento:** O ofuscamento é o efeito causado quando uma fonte luminosa excessivamente brilhante entra no campo de visão de uma pessoa, causando uma sensação de desconforto e também reduzindo a capacidade de visão. Na a iluminação viária, o ofuscamento é quantificado pelo Incremento de Limiar (TI - Threshold Increment), que representa o aumento percentual do limiar de contraste necessário para se perceber um objeto devido à presença de fontes luminosas excessivamente brilhantes. A NBR 5101:2018 estabelece que os valores máximos de TI em função da classificação das vias devem variar entre  $TI \leq 10\%$  ou  $TI \leq 15\%$ , dependendo da classe da via (vias principais e vias secundárias). Luminárias LED bem projetadas, com ópticas adequadas e controle de intensidade luminosa em ângulos elevados, apresentam um melhor desempenho em relação ao ofuscamento quando comparadas as luminárias convencionais abertas.

## 2.3 Tecnologias de Iluminação

### 2.3.1 Lâmpadas de descarga de alta intensidade (HID)

As lâmpadas HID (High Intensity Discharge) operam mediante uma descarga elétrica em gás ou em vapor metálico, contido em um tubo de descarga de quartzo ou cerâmica. A corrente elétrica excita os átomos do gás, os quais emitem radiação ao retornarem ao seu estado fundamental. As principais tecnologias HID utilizadas na iluminação pública são:

- **Vapor de Mercúrio de Alta Pressão (HPMV):** Primeira tecnologia HID amplamente adotada para a iluminação pública. Seu princípio de funcionamento se baseia na descarga elétrica em vapor de mercúrio a uma pressão de 1-10 atmosferas. Dentre as suas principais características estão: eficácia luminosa de 40-60 lm/W, vida útil de 9.000-24.000 horas, IRC de 40-60, emissão de luz branco-azulada (CCT  $\approx$  4.000-4.500 K), tempo de partida de 4-7 minutos e conteúdo de mercúrio de aproximadamente 20-60 mg por lâmpada. Atualmente essa tecnologia está em desuso, devido à sua baixa eficiência e aos impactos ambientais causados, sendo proibida em diversos países.
- **Vapor de Sódio de Alta Pressão (HPSV):** Tecnologia HID que possui uma maior eficiência energética, operando com descarga em vapor de sódio a uma pressão de 10-20 kPa. Dentre suas características principais estão: eficácia luminosa de 80-140 lm/W, vida útil de 24.000-32.000 horas, IRC muito baixo (20-25), emissão monocromática amarelada (CCT  $\approx$  2.000-2.200 K), tempo de partida de 3-5 minutos e conteúdo de mercúrio de 10-20 mg. A alta eficácia luminosa tornou essa tecnologia predominante na iluminação viária, apesar da qualidade de luz deficiente.
- **Vapor Metálico (MH):** Tecnologia HID que possui uma melhor qualidade de luz, operando com descarga em mistura de vapores metálicos (sódio, escândio, tálio, índio). Características: eficácia luminosa de 70-100 lm/W, vida útil de 10.000-20.000 horas, IRC de 65-85, emissão branca (CCT  $\approx$  3.000-4.500 K) e tempo de partida de 2-4 minutos. É utilizada principalmente em aplicações que demandam uma melhor reprodução de cores, como áreas comerciais, centros históricos e áreas esportivas.

Todas as tecnologias HID requerem um reator para limitar a corrente de descarga e fornecer uma tensão de partida elevada. Reatores eletromagnéticos convencionais apresentam perdas de aproximadamente 10-15% da potência nominal da lâmpada, reduzindo a eficiência do sistema. Já os reatores eletrônicos, de custo superior, reduzem as perdas para 5-8%.

### 2.3.2 Tecnologia LED

Os LEDs (Light Emitting Diodes) são dispositivos semicondutores que emitem luz quando são percorridos por uma corrente elétrica, esse fenômeno é conhecido como eletroluminescência. Ou seja, os LEDs convertem energia elétrica diretamente em luz visível, resultando em um processo significativamente mais eficiente.

O funcionamento dos LEDs se baseia na junção P-N dos materiais semicondutores. Quando polarizada diretamente, os elétrons da região N se recombinam com as lacunas da região P, liberando energia na forma de fótons. A cor (comprimento de onda) da luz emitida depende da composição química do material semicondutor: nitreto de gálio (GaN) emite luz azul, arseneto de gálio (GaAs) emite infravermelho. LEDs brancos para iluminação geral utilizam um LED azul (GaN) revestido com fósforo amarelo, resultando em luz branca pela combinação das emissões azul e amarela.

#### Características Técnicas das Luminárias LED:

- **Eficácia Luminosa:** Luminárias LED modernas de iluminação pública apresentam eficácia de 120-180 lm/W (sistema completo, incluindo driver), significativamente superior às tecnologias HID. A eficácia varia conforme a qualidade dos LEDs, a eficiência do driver eletrônico e as perdas ópticas.
- **Vida Útil:** As luminárias LED não falham abruptamente como as lâmpadas convencionais, mas apresentam depreciação gradual do seu fluxo luminoso. A vida útil é definida pela quantidade de tempo que se leva até atingir 70% do fluxo inicial (L70), tipicamente de 50.000-100.000 horas. Considerando um regime de 4.380 horas/ano (12h/dia), isso corresponde a aproximadamente 11-23 anos, reduzindo drasticamente a frequência de manutenção.
- **Qualidade da Luz:** LEDs brancos apresentam IRC tipicamente entre 70 e 85, significativamente superior ao vapor de sódio (20-25) e comparável ao vapor metálico. A temperatura de cor é ajustável conforme a aplicação, tipicamente de 3.000-5.000 K para iluminação pública. A distribuição espectral também é mais completa quando comparada as lâmpadas de descarga, resultando em uma melhor percepção de cores.
- **Controle Direcional:** Diferentemente das lâmpadas de descarga, que emitem luz em todas as direções, LEDs são fontes direcionais, emitindo luz em um ângulo sólido limitado (emissão em cone de  $\approx 120^\circ$ ), permitindo um controle melhor da distribuição

luminosa através de ópticas adequadas. Isso resulta em uma maior eficiência da utilização do fluxo luminoso, com menos emissão de luz para o céu (redução de poluição luminosa) e uma uniformidade melhor na área iluminada.

- **Partida Instantânea:** Os LEDs atingem 100% do fluxo luminoso instantaneamente, sem necessidade de tempo para aquecimento. Isso permite uma operação com sensores de presença ou de dimerização, sem comprometer a vida útil dos mesmos.
- **Dimerização:** A dimerização é o controle do fluxo luminoso emitido pelo LED, permitindo ajustar o brilho das luminárias em vez de apenas ligar/desligar as mesmas. Dessa forma, elas podem operar conforme a necessidade de luz no ambiente e sem afetar significativamente a sua eficácia ou vida útil. Isso gera uma economia energética adicional em horários de baixa demanda. Estudos demonstram uma economia adicional de 15-20% com a dimerização em certos horários na madrugada (FRAGOSO et al., 2020).

#### **Limitações:**

- **Custo Inicial:** Luminárias LED apresentam um custo inicial de 2-3 vezes maior que às tecnologias convencionais, o que constitui a principal barreira para a sua implementação. No entanto, o custo tem reduzido consistentemente ( $\approx$  10-15% ao ano) devido as economias de escala e aos avanços tecnológicos.
- **Sensibilidade Térmica:** O desempenho e a vida útil dos LEDs são afetados pela temperatura de junção. Logo, as luminárias devem incorporar dissipadores térmicos adequados para mantê-las a uma temperatura  $< 85^{\circ}\text{C}$ . Se não for feito de forma adequada, isso pode resultar em uma depreciação luminosa acelerada e em falhas prematuras no sistema.
- **Qualidade Variável:** O mercado brasileiro apresenta uma grande variação de qualidade de luminárias LED. Dentre os produtos disponíveis, os de baixa qualidade não conseguem atingir as especificações necessárias de eficácia, vida útil e manutenção de fluxo, o que compromete a viabilidade econômica do sistema. Logo, durante a aquisição dos produtos, especificações rigorosas e certificações (INMETRO, Procel) são essenciais para garantir um bom desempenho.

### 2.3.3 Análise comparativa

A Tabela 2.1 a seguir apresenta uma comparação consolidada entre as tecnologias de iluminação pública descritas anteriormente neste capítulo.

**Tabela 2.1** - Comparação técnica entre tecnologias de iluminação

Característica	Vapor de Mercúrio	Vapor de Sódio	Vapor Metálico	LED
Eficácia (lm/W)	40-60	80-140	70-100	120-180
Vida Útil (h)	15.000-24.000	24.000-32.000	10.000-20.000	50.000-100.000
IRC	40-60	20-25	65-85	70-85
CCT (K)	4.000-4.500	2.000-2.200	3.000-4.500	3.000-5.000
Tempo de Partida	4-7 min	3-5 min	2-4 min	Instantâneo
Dimerização	Não	Não	Limitada	Sim
Quantidade de Mercúrio (mg)	20-60	10-20	15-40	0
Custo Inicial	Baixo	Baixo	Médio	Alto
Custo Operacional	Alto	Médio	Médio-Alto	Baixo

**Fonte:** Elaboração própria

A análise comparativa acima demonstra a superioridade técnica da tecnologia LED em praticamente todos os parâmetros relevantes para a iluminação pública, com exceção do custo inicial de investimento. Com uma eficácia luminosa superior, vida útil de 2-5 vezes maior, a ausência de mercúrio e uma melhor qualidade de luz, obtêm-se custos operacionais significativamente menores e benefícios ambientais importantes. Com isso, o custo inicial elevado é compensado pela economia operacional, a resultando em períodos de payback tipicamente de 3 a 7 anos (PAULA et al., 2025; OLIVEIRA et al., 2021; CORDEIRO, 2023).

## 2.4 Marco Regulatório Brasileiro

### 2.4.1 Normas técnicas aplicáveis

O dimensionamento e a especificação dos sistemas de iluminação pública no Brasil são regulados por normas técnicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Dentre elas, a **ABNT NBR 5101:2018** é uma norma fundamental, sendo a responsável por estabelecer os requisitos para projeção, implantação e manutenção dos sistemas de iluminação pública. Ela também define a classificação das vias (V1 a V5), a qual se baseia em critérios de volume de tráfego, velocidade e complexidade visual. Para cada classe de via diferente são estabelecidos requisitos mínimos de iluminância média, uniformidade ( $U_0 \geq 0,40$ ), controle de ofuscamento ( $TI \leq 10-15\%$ ) e qualidade da luz ( $IRC \geq 60-70$ , CCT entre 3.000-5.000 K). Essa norma é considerada como uma referência obrigatória para projetos de iluminação pública no Brasil.

Outra norma de extrema importância para este estudo é a **ABNT NBR 16026:2012**. É ela que estabelece os requisitos específicos para os dispositivos eletrônicos que alimentam os módulos LED nas luminárias, incluindo o fator de potência  $\geq 0,92$ , a distorção harmônica total  $\leq 20\%$ , as características construtivas (grau de proteção IP65, resistência a impactos IK08, faixa de temperatura de  $-20^\circ\text{C}$  a  $+50^\circ\text{C}$ ) e os requisitos de segurança. A conformidade do projeto com essa norma é essencial pra garantir a qualidade e a durabilidade dos LEDs.

### 2.4.2 Regulamentação do setor elétrico

A regulamentação do setor elétrico brasileiro, sob a responsabilidade da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), estabelece condições para o fornecimento de energia elétrica e mecanismos de financiamento para a eficiência energética:

A **Emenda Constitucional nº 39 de 2002** instituiu a Contribuição para o Custeio do Serviço de Iluminação Pública (COSIP), permitindo aos municípios cobrar uma contribuição específica para o financiamento da iluminação pública. Essa contribuição é cobrada mensalmente nas faturas de energia elétrica dos consumidores do município e constitui a principal fonte de receita para o custeio desse serviço (BRASIL, 2002).

A **Resolução Normativa nº 414/2010 da ANEEL** estabelece as condições gerais de fornecimento de energia elétrica, incluindo a modalidade tarifária específica para a iluminação pública (Grupo B4a) e as responsabilidades das concessionárias e dos municípios. No entanto, em 2022 a REN 414/2010 foi revogada, e o seu conteúdo agora está consolidado e atualizado

pela **Resolução Normativa nº 1000/2021 da ANEEL**. A REN 1000/2021 substituiu a REN 414/2010 e outras normas porque ela reúne em um único documento as regras que antes estavam espalhadas, incluindo a própria REN 414/2010 e outras mais antigas. Isso faz parte de um movimento regulatório para desburocratizar e simplificar a regulamentação, com texto mais claro e compreensível para o público

### **2.4.3 Programas governamentais**

**PROCEL (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica)**. O PROCEL é um programa do Ministério de Minas e Energia que promove a eficiência energética através de várias ações, incluindo o desenvolvimento de normas técnicas, certificação de equipamentos eficientes (Selo Procel) e também a disseminação de informações técnicas (MME, 2023). No contexto da iluminação pública, o PROCEL desenvolve ações de:

- Capacitação técnica de gestores e profissionais municipais;
- Desenvolvimento e disseminação de metodologias para diagnóstico e projeção de sistemas eficientes;
- Promoção de boas práticas e estudos de caso;
- Articulação com outros programas e fontes de financiamento.

O PROCEL também possui um subprograma, que é o **PROCEL RELUZ (Programa Nacional de Iluminação Pública Eficiente)**, que oferece apoio técnico e financeiro para os municípios voltado especificamente para a iluminação pública. O principal objetivo do programa é promover a eficiência energética na iluminação pública, diminuindo a despesa municipal com a conta de energia elétrica e incentivando o uso de luminárias com Selo Procel, a fim de obter uma maior durabilidade e um menor índice de manutenção. Ele também busca valorizar os espaços urbanos, tornando vias, praças e ruas mais seguras e bem iluminadas para a população. Embora o programa tenha tido uma atuação limitada nos últimos anos devido as restrições orçamentárias, ele ainda se constituiu como um mecanismo importante de financiamento para os projetos de modernização (PROCEL RELUZ, 2025).

**PEE - Programa de Eficiência Energética das Concessionárias**. O programa de eficiência energética (PEE) foi instituído através da Lei nº 9.991/2000 e é regulamentado pelas resoluções da ANEEL. Ele obriga as concessionárias de energia elétrica a investirem um percentual da sua receita operacional líquida (atualmente 0,5%) em projetos de eficiência energética (BRASIL,

2000).

O PEE representa uma fonte importante de financiamento para os projetos de modernização da iluminação pública municipal. As concessionárias podem financiar totalmente ou parcialmente os projetos de substituição das luminárias ineficientes por luminárias LED, desde que seja demonstrada a viabilidade técnica e econômica da mudança e também o atendimento aos critérios estabelecidos pela ANEEL.

Os projetos de iluminação pública financiados via PEE normalmente seguem um modelo que:

- A concessionária financia os equipamentos (luminárias LED);
- O município arca com custos da instalação e infraestrutura;
- A economia energética obtida compensa o investimento municipal em período determinado.

Diversos municípios brasileiros têm utilizado o PEE como estratégia de modernização de iluminação pública, viabilizando projetos que, de outra forma, não seriam implementados devido as restrições orçamentárias.

## 2.5 Análise da Viabilidade Econômica

### 2.5.1 Indicadores da viabilidade financeira

A avaliação econômica dos projetos de modernização de iluminação pública utiliza indicadores consolidados de análise de investimentos, sendo eles:

**Valor Presente Líquido (VPL):** É a soma dos fluxos de caixa futuros descontados do valor presente, subtraído o investimento inicial. Matematicamente pode ser descrito como:

$$VPL = -I_0 + \sum \left( \frac{FC_t}{(1+i)^t} \right) \quad (4)$$

Onde:  $I_0$  é o investimento inicial,  $FC_t$  é o fluxo de caixa em um “ano t”,  $i$  é a taxa de desconto e t varia de 1 ao horizonte de análise. Um  $VPL > 0$  indica viabilidade econômica; quanto maior o VPL, mais atrativo é o investimento. Por outro lado, um  $VPL = 0$  indica que o projeto é indiferente (não cria nem destrói valor). Já um  $VPL < 0$  significa que o projeto não é viável (destrói valor). O VPL representa o valor econômico gerado pelo projeto.

**Taxa Interna de Retorno (TIR):** Essa é a taxa de desconto que torna o VPL igual a zero. Ela representa a rentabilidade intrínseca do projeto. Uma TIR superior à taxa de desconto (custo de oportunidade do capital) indica viabilidade. Matematicamente, a TIR é a taxa  $i$  que satisfaz:

$$0 = -I_0 + \sum \left( \frac{FC_t}{(1+TIR)^t} \right) \quad (5)$$

Com exceção da TIR, os demais elementos da equação 5 acima são os mesmos da anterior. A TIR é calculada numericamente (iteração). Para projetos de modernização da iluminação pública, valores de TIR entre 15% e 45% são típicos, indicando uma alta atratividade.

**Período de Payback:** É o tempo necessário para a recuperação do investimento inicial através dos fluxos de caixa gerados. O payback simples ignora o valor do dinheiro no tempo:

$$Payback\ Simples = \frac{Investimento\ Inicial}{Economia\ Anual\ Média} \quad (6)$$

Por outro lado, o payback descontado já considera o valor do dinheiro no tempo, sendo

o período em que o VPL acumulado se torna positivo. A diferença fundamental reside na consideração do custo de oportunidade: O payback simples é otimista, enquanto payback descontado é mais realista e conservador. Para projetos de longo prazo, o payback descontado fornece avaliação mais rigorosa da viabilidade temporal. Outros estudos documentam um payback aproximado de 3-7 anos para projetos de modernização da iluminação pública (PAULA et al., 2025; OLIVEIRA et al., 2021).

**Relação Benefício-Custo (B/C):** É a razão entre o valor presente (VP) dos benefícios (economia operacional) e o investimento inicial:

$$B/C = \frac{VP(\text{Benefícios})}{\text{Investimento Inicial}} \quad (7)$$

Um  $B/C > 1$  indica viabilidade para o projeto; quanto maior for o B/C, mais atrativo será o projeto. Relações de B/C entre 1,5 e 3,5 são as mais comuns em projetos de modernização como o proposto nesse trabalho.

### 2.5.2 Análise de sensibilidade e cenários

A análise de sensibilidade varia um parâmetro por vez enquanto mantém os demais constantes e recalcula os indicadores de viabilidade. Em seguida, gráficos "tornado" visualizam o impacto relativo de cada parâmetro no VPL. Por fim, cenários combinados (otimista, realista, pessimista) ajudam a avaliar a viabilidade do projeto em condições simultâneas (favoráveis ou desfavoráveis).

Estudos recentes demonstram que os projetos de modernização da iluminação pública dos municípios mantêm viabilidade mesmo em cenários pessimistas, evidenciando sua robustez econômica (CORDEIRO, 2023; OLIVEIRA et al., 2021).

No entanto, os projetos de modernização também apresentam incertezas quanto a parâmetros-chave que podem afetar a sua viabilidade econômica. Dentro desse aspecto, a análise de sensibilidade avalia o impacto das variações desses parâmetros nos indicadores de viabilidade, o que permite avaliar a robustez do projeto. Dentre as principais fontes de incerteza é possível citar:

- **Evolução Tarifária:** As tarifas de energia elétrica apresentam uma volatilidade significativa, influenciadas por condições hidrológicas, custos de geração térmica, investimentos em transmissão e distribuição de energia e políticas tarifárias. Aumentos

reais (acima da inflação) de 0% a 3% ao ano são cenários plausíveis. Uma maior evolução tarifária aumenta a economia operacional e melhora os indicadores de viabilidade. Um dos cenários estudados no Capítulo 4 deste trabalho se remete ao ano de 2021, que foi marcado por uma forte crise hídrica que elevou os custos do kWh à margens que superam até mesmo a média de 2025.

- **Custos de Equipamentos:** Os custos das luminárias LED têm apresentado redução de 10-15% ao ano devido as economias de escala e aos avanços tecnológicos. No entanto, as variações cambiais, condições de mercado e especificações técnicas resultam em incerteza. Graças a isso, em análises de sensibilidade são consideradas variações de  $\pm 20\%$ .
- **Taxa de Desconto:** Ela representa o custo de oportunidade do capital, refletindo o retorno que poderia ser obtido em investimentos alternativos de risco similar. Para projetos públicos municipais, taxas entre 8% e 12% ao ano são normais, refletindo a taxa básica de juros (SELIC) e as características dos projetos de infraestrutura. É importante ressaltar que a escolha da taxa afeta significativamente o VPL.

## 2.6 Experiências de Modernização

### 2.6.1 Estudos de caso em municípios

Além de Ituiutaba, diversos outros municípios brasileiros já implementaram projetos de modernização da iluminação pública com tecnologia LED, documentados na literatura técnico-científica. Como por exemplo:

**Muniz Freire, Espírito Santo:** Esse município realizou um estudo de viabilidade para a substituição das lâmpadas de vapor de sódio por lâmpadas LED em suas principais vias. O estudo deste caso demonstrou uma economia energética de mais de 50% e um período de payback estimado em aproximadamente 3 anos para o cenário de substituição completa. Esse caso evidencia que mesmo municípios de pequeno porte (Muniz Freire possui aproximadamente 20.000 habitantes) podem obter benefícios econômicos significativos com a modernização, desde que seja realizado um planejamento técnico adequado e uma negociação favorável dos custos dos equipamentos (PAULA et al., 2025).

**Rio de Janeiro, Rio de Janeiro:** Neste estudo foi analisado a economia adicional obtida através da dimerização (redução do fluxo luminoso) das luminárias LED em horários de baixa demanda, demonstrando uma economia energética adicional de 15% a 20% em relação ao sistema LED sem a dimerização. Essa experiência sugere que os sistemas de controle adaptativos também podem proporcionar uma economia adicional, embora haja um aumento do custo do investimento inicial (FRAGOSO et al., 2020).

**Rosana, São Paulo:** A análise feita em Rosana também demonstrou indicadores favoráveis, incluindo um VPL positivo e um TIR superior a 20% (OLIVEIRA et al., 2021).

A análise consolidada das experiências brasileiras demonstra padrões consistentes como:

- Redução do consumo energético em  $\geq 50\%$ ;
- Período de payback aproximado de 3 a 7 anos;
- VPL positivo em praticamente todos os casos;
- TIR entre 15% e 45%;
- Redução de 40% a 60% dos custos de manutenção;
- Melhoria da qualidade da iluminação.

## 2.6.2 Modelos de implementação

A literatura identifica três modelos principais de implementação desse tipo de projeto de modernização:

**Investimento Direto Municipal:** Nessa modalidade o município realiza o investimento com seus próprios recursos (orçamento ou COSIP), sendo o responsável pela aquisição dos equipamentos, contratação dos serviços de instalação e posterior operação e manutenção do sistema.

- **Vantagens:**
  - Autonomia total do município sobre as especificações técnicas e o cronograma;
  - Ausência de custos financeiros (juros de financiamento) e propriedade integral imediata.
- **Limitações:**
  - Requer uma disponibilidade de recursos à curto prazo;
  - É necessária capacidade técnica municipal para a especificação, licitação e fiscalização do projeto;
  - O risco tecnológico e operacional também é integralmente do município.

**Parceria Público-Privada (PPP):** Diferente da modalidade anterior, aqui, um parceiro privado realiza o investimento inicial, sendo remunerado através de pagamentos mensais feitos pelo município ao longo de um período aproximado de 15-20 anos.

- **Vantagens:**
  - Não requer um investimento inicial do município;
  - Os riscos são transferidos para o parceiro privado e também existe uma garantia de desempenho e manutenção durante todo o período contratual.
- **Limitações:**
  - O custo financeiro total é superior ao investimento direto (devido à remuneração do capital privado);
  - A complexidade de estruturação é maior e não há muita flexibilidade para alterações durante o período contratual;

Esse modelo tem sido utilizado com sucesso em municípios de médio e grande porte (CORDEIRO, 2023).

**Programa de Eficiência Energética (PEE):** Nesse modelo a concessionária financia totalmente ou parcialmente os equipamentos, cabendo ao município a instalação e a eventual contrapartida.

- **Vantagens:**

- Redução significativa do investimento municipal;
- Não gera endividamento;
- Apoio técnico da concessionária.

- **Limitações:**

- Disponibilidade de recursos limitada;
- Concorrência com outros projetos;
- Requisitos técnicos e de viabilidade estabelecidos pela ANEEL.

Diversos municípios brasileiros têm utilizado o PEE como estratégia de modernização, com resultados positivos. No entanto, a disponibilidade dos recursos é limitada, exigindo um planejamento antecipado e uma articulação com as concessionárias.

Por fim, a escolha de um desses modelos depende da capacidade técnica e financeira do município, da disponibilidade de recursos do PEE e das preferências quanto a transferência de riscos.

## **2.7 Sustentabilidade Ambiental**

### **2.7.1 Redução de emissões de gases de efeito estufa**

A modernização também proporciona benefícios ambientais importantes através da redução do consumo de energia elétrica. No Brasil, cada kWh economizado resulta na redução de emissões de CO<sub>2</sub>, calculada mediante o fator de emissão do Sistema Interligado Nacional (SIN) divulgado anualmente pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI). Esse fator depende do despacho termelétrico (MCTI, 2025).

Além da redução direta, a maior vida útil dos LEDs também reduz as emissões incorporadas (fabricação, transporte, instalação).

### **2.7.2 Gestão de resíduos de lâmpadas**

As lâmpadas de descarga contêm mercúrio (10-60 mg), um metal pesado de elevada toxicidade. A Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) classifica as lâmpadas contendo mercúrio como resíduos perigosos e exigindo uma logística reversa obrigatória. No entanto, a implementação efetiva dessa logística enfrenta diversos desafios, principalmente em municípios de pequeno e médio porte, onde a infraestrutura de coleta e destinação adequada dessas lâmpadas é limitada (BRASIL, 2010).

Embora as luminárias LED contenham componentes eletrônicos que requerem uma destinação adequada, ela não faz uso do mercúrio, eliminando o problema que as lâmpadas de descarga possuem e reduzindo substancialmente o risco ambiental. A maior vida útil dos LEDs em comparação às lâmpadas de descarga (50.000-100.000 h vs 15.000-32.000 h) também reduz a frequência de substituição em cerca de 60 a 85%, o que diminui a geração de resíduos.

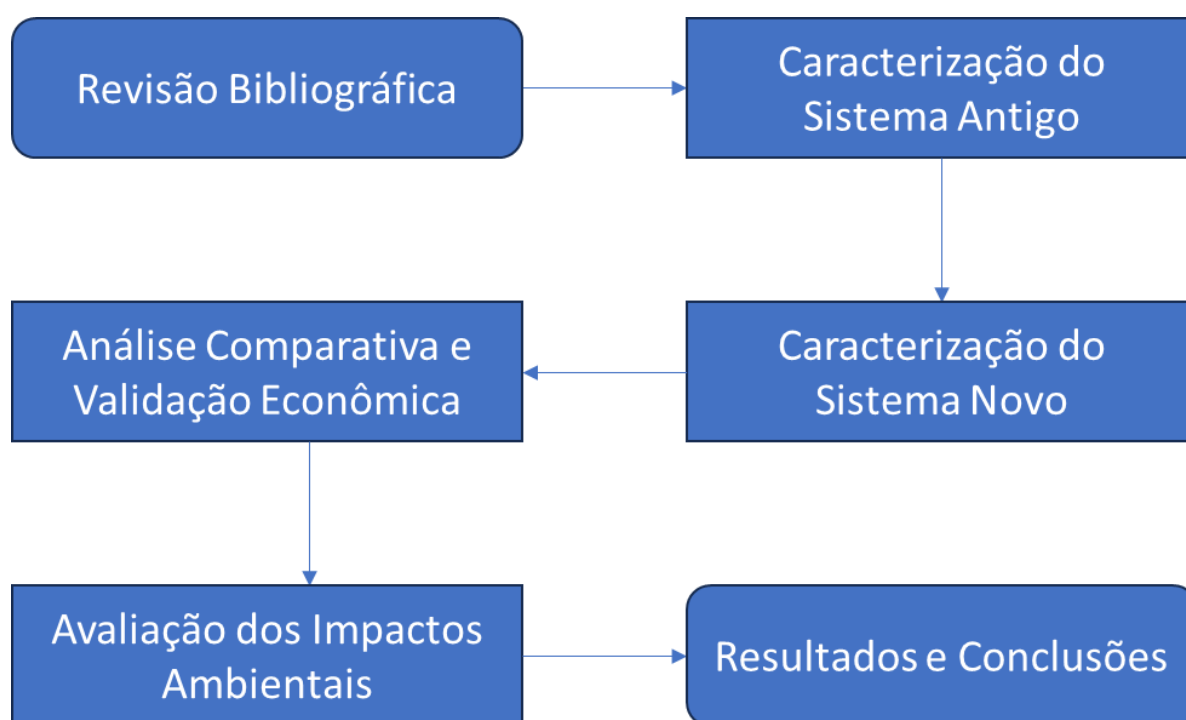
### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Classificação da Pesquisa

Essa pesquisa se classifica, quanto à sua natureza, como **pesquisa aplicada**, objetivando gerar conhecimentos para aplicação prática mediante a análise de um caso real de modernização da iluminação pública. Quanto aos objetivos, ela se caracteriza como **descritiva e explicativa**: descritiva por caracterizar detalhadamente os sistemas de antes e depois da modernização, e explicativa por analisar as relações de causa e efeito entre a modernização e os impactos observados. Quanto à abordagem do problema, a pesquisa se caracteriza como **quantitativa**, pois utiliza técnicas de coleta e análise de dados numéricos para avaliar objetivamente os impactos e a viabilidade do sistema implementado. Quanto aos procedimentos técnicos, ela se configura como **estudo de caso**, focando na experiência específica de Ituiutaba como unidade de análise.

A abordagem da pesquisa foi estruturada em cinco etapas: (1) Revisão bibliográfica; (2) Caracterização do sistema pré-modernização; (3) Caracterização do sistema LED após a modernização; (4) Análise comparativa e validação econômica; (5) Avaliação dos impactos ambientais. A Figura 3.1 abaixo apresenta o fluxograma metodológico.

**Figura 3.1** - Fluxograma de metodologia da pesquisa



**Fonte:** Elaboração própria

## 3.2 Caracterização da Área de Estudo

### 3.2.1 O Município de Ituiutaba

Ituiutaba se localiza na mesorregião do Triângulo Mineiro, estado de Minas Gerais, com coordenadas aproximadas 18°58'S, 49°28'W. O município possui uma área de 2.598 km<sup>2</sup>, sendo destes aproximadamente 27,34 km<sup>2</sup> urbanizados (IBGE, 2019), e uma população de aproximadamente 102.217 habitantes (IBGE, 2023), se caracterizando como município de médio porte. A população é majoritariamente urbana e o PIB per capita se situa em aproximadamente R\$ 35.883,95 (IBGE, 2021).

A infraestrutura urbana é relativamente desenvolvida, com esgotamento sanitário de aproximadamente 96,32%, seja por rede geral, rede pluvial ou fossa ligada à rede (IBGE, 2022). O fornecimento de energia é realizado pela Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), com tarifas do Grupo B4a para a Iluminação Pública.

### 3.2.2 Modernização implementada

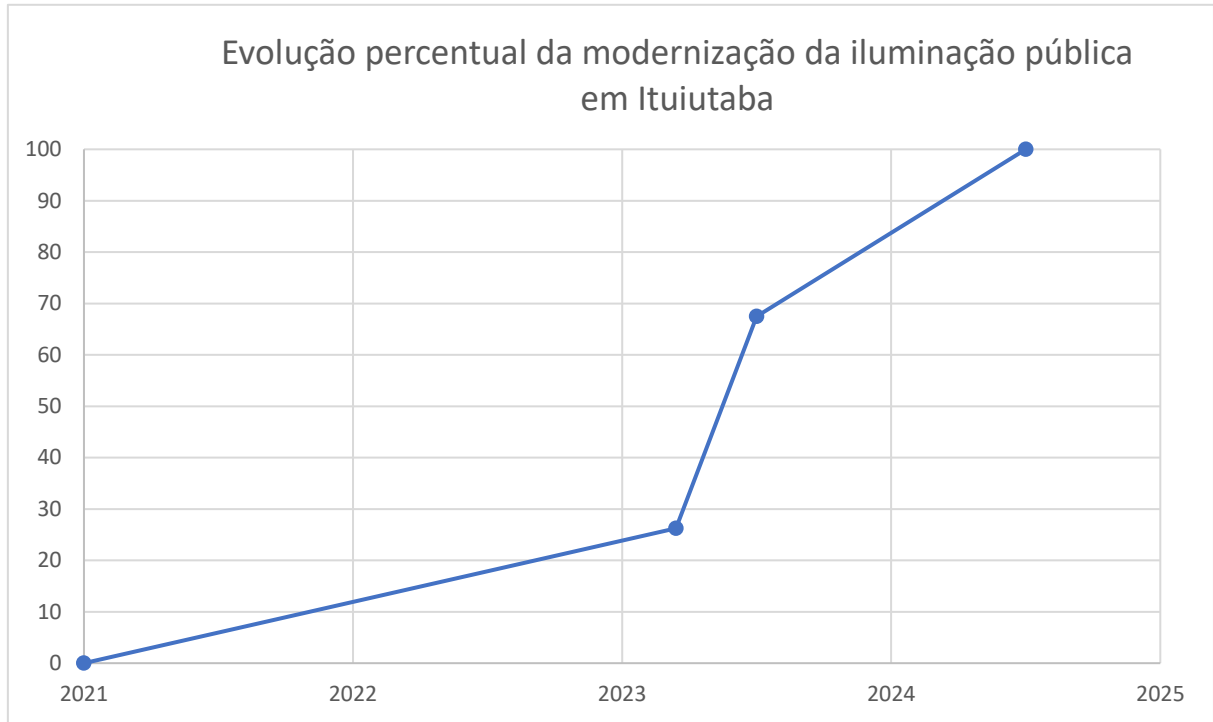
A Prefeitura Municipal de Ituiutaba implementou entre 2021 e 2024 o projeto Ituiutaba iluminada, realizando a modernização integral do sistema de iluminação pública da cidade, substituindo todas as luminárias convencionais (vapor de mercúrio e vapor de sódio) por luminárias LED. O projeto atendeu cerca de 15.300 pontos de iluminação que ainda não haviam sido beneficiados, além de instalar vários pontos novos (PREFEITURA MUNICIPAL DE ITUIUTABA, 2024).

A Tabela 3.1 e a figura 3.2 abaixo apresentam a cronologia de modernização do projeto.

**Tabela 3.1** - Cronologia do projeto Ituiutaba iluminada

Período	Etapa	Percentual Concluído	Observações
2021 - Fev/2023	Fase Inicial	~26%	Aproximadamente 21 bairros atendidos
Fev/2023 - Jun/2023	Aceleração	~67%	Mais de 33 novos bairros atendidos no mesmo ano
Jun/2023 - Jun/2024	Fase Final	~100%	Conclusão dos bairros restantes e finalização do projeto

**Fonte:** Elaboração própria

**Figura 3.2 - Cronologia da modernização (2021-2024)**

**Fonte:** Elaboração própria

Para os fins da análise comparativa, foram escolhidos dois períodos de referência neste estudo:

- **Sistema PRÉ-MODERNIZAÇÃO:** Dados de **2021**, ano com um índice ainda majoritário de presença das tecnologias convencionais;
- **Sistema PÓS-MODERNIZAÇÃO:** Dados de **2024/2025**, após a conclusão da modernização (Sistema 100% LED).

### 3.3 Coleta de Dados e Dimensionamento

#### 3.3.1 Dados do sistema convencional (antes da modernização)

Os dados referentes ao sistema anterior da cidade foram coletados das seguintes fontes:

1. **Portal da transparência municipal:** Dados de pagamento das despesas de iluminação pública referentes ao ano de 2021, incluindo custos com energia elétrica e manutenção.
2. **Levantamento retrospectivo:** Caracterização tecnológica baseada em registros municipais e fotografias de arquivo.
3. **Literatura técnica:** Especificações típicas de lâmpadas de vapor de mercúrio e sódio instaladas entre 1990 e 2015.

#### Limitações:

A ausência de um cadastro municipal detalhado do sistema de iluminação antes da modernização impõe certas limitações aos dados. Portanto, foram utilizadas **estimativas conservadoras baseadas em dados agregados e extrapolações fundamentadas** na densidade típica de pontos e características tecnológicas documentadas na literatura para outros municípios. (PAULA et al., 2025; OLIVEIRA et al., 2021)

Essa abordagem, de combinar os dados reais disponíveis com as estimativas fundamentadas também é consistente com as práticas documentadas para casos de estudo de viabilidade em municípios com certas limitações de dados (FRETТА et al., 2023).

#### 3.3.2 Dados tarifários e custos

A tarifa de energia elétrica da iluminação pública foi obtida no site da CEMIG (Grupo B4a - Rede de Distribuição), sendo o valor atual de R\$ 0,47221/kWh sem impostos. A tarifa efetiva, incluindo PIS (1,65%), COFINS (7,60%) e ICMS-MG (18%), foi calculada mediante a fórmula abaixo:

$$Tarifa\ Efetiva = Tarifa\ Base \times \left( \frac{(1 + PIS + COFINS)}{(1 - ICMS)} \right)$$

(8)

$$Tarifa\ Efetiva = 0,47221 \times \left( \frac{1,0925}{0,82} \right) = \mathbf{R\$ 0,629133445/kWh}$$

### 3.3.3 Dados do sistema LED (após a modernização)

Os dados referentes ao sistema atual da cidade foram coletados das seguintes fontes:

1. **Portal da transparência municipal:** Dados de pagamento das despesas com a iluminação pública referentes a 2025, permitindo comparação direta com 2021.
2. **Levantamento de campo (dezembro/2025):** Dados das despesas e caracterização das luminárias LED instaladas, incluindo os tipos, as potências, as fabricantes e o estado de conservação.

### 3.4 Análise Financeira e Avaliação ambiental

#### 3.4.1 Investimento inicial realizado

O investimento inicial feito pelo município para a substituição das luminárias foi de aproximadamente R\$10.973.713,81 (PREFEITURA MUNICIPAL DE ITUIUTABA, 2026).

Os custos unitários foram estimados baseados em cotações do mercado, licitações recentes de municípios similares e valores de referência da literatura. Os custos de instalação foram estimados em 20% do valor do custo dos equipamentos, o qual é um valor típico para outros projetos similares.

#### 3.4.2 Projeção dos custos operacionais

**Consumo Energético dos LEDs:** O custo de consumo energético dos LEDs foi calculado através da seguinte fórmula matemática:

$$E_{LED} = \sum \left( \frac{P_i \times N_i \times h}{1000} \right) \quad (9)$$

Onde:  $P_i$  é a potência de uma luminária do tipo  $i$  (W),  $N_i$  é o número dessas luminárias e  $h = 4.380$  horas/ano. Para os LEDs, não há perdas significativas em drivers (já contabilizadas na potência nominal).

**Manutenção dos LEDs:** Em caso de ausência de dados por parte da prefeitura, a manutenção corretiva foi estimada em uma margem de 1,5% do investimento inicial anualmente (é bem menor do que o sistema convencional devido à sua maior confiabilidade).

**Premissa de Substituição no Ano 11:** Considerando uma vida útil de 50.000 horas e um regime de 4.380 h/ano, as luminárias atingem L70 em aproximadamente 11,4 anos. No Ano 11 foi considerada uma substituição parcial estimada em 50% do valor do custo inicial dos equipamentos, considerando que parte das luminárias pode ter uma vida útil superior ao estimado e que a substituição será gradual.

A Tabela 3.2 a seguir sintetiza essas premissas adotadas.

**Tabela 3.2** - Premissas da análise econômico-financeira

Parâmetro	Valor adotado	Justificativa
Horizonte de Análise	15 anos	Superior à vida útil dos LEDs
Regime de Operação	4.380 h/ano	Funcionamento de 12 horas/dia
Vida Útil LED	50.000 horas	Especificação NBR 16026
Evolução Tarifária	+1% real a.a.	Cenário base conservador
Substituição Parcial	Ano 11	Após 50.000 horas

**Fonte:** Elaboração própria

### 3.4.3 Cálculo da redução das emissões de CO<sub>2</sub>

As emissões evitadas foram calculadas pela seguinte equação abaixo:

$$Emissões\ Evitadas\ (tCO_2/ano) = \Delta E\ (MWh/ano) \times FE\ (tCO_2/MWh) \quad (9)$$

Onde:  $\Delta E$  é a redução de consumo e  $FE$  é o fator de emissão do SIN (0,0289 tCO<sub>2</sub>/MWh, valor médio conforme MCTI, 2025).

As equivalências foram calculadas considerando a emissão média dos veículos de passeio (5 tCO<sub>2</sub>/ano) e o sequestro por árvores (0,15 tCO<sub>2</sub>/árvore em 20 anos).

## 4. RESULTADOS E ANÁLISE

### 4.1 Diagnóstico do Sistema Convencional Pré-Modernização

#### 4.1.1 Caracterização geral (2021)

Com base nos dados de 2021, o ano em que se iniciou a primeira fase do projeto de modernização, o sistema de iluminação pública de Ituiutaba era caracterizado por uma infraestrutura envelhecida e tecnologicamente defasada.

O parque de iluminação do município apresentava as seguintes características gerais:

- **Total estimado de pontos de iluminação no município:** ~15.300
- **Tecnologias predominantes:** Vapor de sódio (~80%), vapor de mercúrio (~15%), outras tecnologias (~5%).
- **Idade média das instalações:** > 10 anos

#### 4.1.2 Custos operacionais e consumo energético (2021)

Em 2021, segundo os dados do Portal da Transparência Municipal, a prefeitura de Ituiutaba despendeu aproximadamente **R\$5.827.323,1** ao longo do ano (média mensal de ~**R\$ 485.610,258**) com o custeio da iluminação pública (PREFEITURA MUNICIPAL DE ITUIUTABA, 2026). Distribuindo essa despesa pela população de 102.217 habitantes do município tem-se um custo per capita de aproximadamente **R\$ 4,750777/hab/mês**. Também vale a pena ressaltar que nesse valor informado está incluso somente as despesas energéticas da iluminação, não levando em consideração as manutenções e as substituições das luminárias (PREFEITURA MUNICIPAL DE ITUIUTABA, 2026).

Devido à ausência de informações referente ao custo do kWh na modalidade B4a de iluminação pública do ano de 2021, o custo foi calculado em cima do preço do kWh da modalidade B4a de 2025 (R\$0,629133445), considerando uma diferença de ~5% (levemente maior que a média de aumento anual de 1% considerada na Tabela 3.2). O valor resultante foi de aproximadamente **R\$0,597676773** para a bandeira verde, com os impostos e taxas já inclusos.

O ano de 2021 também foi marcado por uma crise hídrica, que fez com que as tarifas tivessem um incremento significativo ao longo do ano, passando rapidamente da bandeira amarela para a vermelha P1 e subsequentemente para vermelha P2. A seca foi tão grande que

foi necessário ser criada uma nova bandeira tarifária para suprir os custos energéticos, chamada de **bandeira de escassez hídrica**.

A Tabela 4.1 abaixo demonstra a base de cálculo do kWh para cada mês do ano de 2021 levando em consideração as bandeiras tarifárias vigentes na época (ANEEL, 2026).

**Tabela 4.1** – Base de cálculo do sistema convencional (2021)

Mês de Referência do Pagamento	Bandeira Vigente	Base de Cálculo
Janeiro	Amarela	R\$0,6155/kWh
Fevereiro	Amarela	R\$0,6155/kWh
Março	Amarela	R\$0,6155/kWh
Abril	Amarela	R\$0,6155/kWh
Maio	Vermelha P1	R\$0,6532/kWh
Junho	Vermelha P2 (Variação 1)	R\$0,6808/kWh
Julho	Vermelha P2 (Variação 2)	R\$0,7241/kWh
Agosto	Vermelha P2 (Variação 2)	R\$0,7241/kWh
Setembro	Escassez Hídrica	R\$0,7868/kWh
Outubro	Escassez Hídrica	R\$0,7868/kWh
Novembro	Escassez Hídrica	R\$0,7868/kWh
Dezembro	Escassez Hídrica	R\$0,7868/kWh

**Fonte:** Elaboração própria

O preço médio do kWh no ano de 2021 mediante as bandeiras vigentes na época foi de aproximadamente **R\$0,699341448**. Através desse valor é possível calcular o consumo médio do sistema antigo:

- **Consumo anual:**  $R\$5.827.323,1 \div R\$0,699341448/\text{kWh} = 8.332.586,493 \text{ kWh/ano}$
- **Consumo mensal:**  $8.332.586,493 \text{ kWh/ano} \div 12 = 694.382,2078 \text{ kWh/mês}$
- **Consumo específico:**  $8.332.586,493 \text{ kWh} \div 15.300 \text{ pontos} = 544,613 \text{ kWh/ponto/ano}$

Como mencionado anteriormente na seção 2.3.1 deste mesmo documento, reatores eletromagnéticos convencionais apresentam perdas de aproximadamente 10-15% da potência nominal da lâmpada. Para esta análise, foi considerado uma margem de perdas de 12% e um regime de funcionamento de 12 horas diárias (4.380h ao ano):

- **Potência total do sistema:**  $8.332.586,493 \text{ kWh/ano} \div 4.380 \text{ h/ano} = \sim 1.902,417 \text{ kW}$
- **Potência real instalada:**  $1.902,417 \text{ kW} \div 1,12 = \sim 1.698,5866 \text{ kW}$
- **Perda nos reatores (12%):**  $1.902,417 \text{ kW} - 1.698,5866 \text{ kW} = 203,830 \text{ kW}$

Os custos de manutenção e substituição das luminárias em 2021 foram de **R\$1.150.304,94** (PREFEITURA MUNICIPAL DE ITUIUTABA, 2026). Somado aos custos anteriores tem-se um custo total anual de:  $R\$5.827.323,1 + R\$1.150.304,94 = \mathbf{R\$6.977.628,04}$ .

## 4.2 Diagnóstico do Sistema LED Pós-Modernização

### 4.2.1 Caracterização geral (2025)

Durante o ano de 2025 o projeto de modernização já havia sido concluído, e o parque de iluminação do município apresentava as seguintes características:

- **Total estimado de pontos de iluminação no município:** ~18.000
- **Tecnologias predominantes:** LED (100%).
- **Idade média das instalações:** ~1 ano

Além da substituição total das luminárias antigas por luminárias LED, aproximadamente mais 2.700 novos pontos de iluminação foram instalados no município até o fim do projeto em junho de 2024, totalizando em cerca de 18.000 pontos totais. Levando em consideração o crescimento do município e os novos loteamentos que estão sendo construídos, essa quantidade é possivelmente ainda maior até o fim do ano de 2025.

Através do levantamento de campo realizado, também foi identificado uma densidade média aproximada de 30 - 35 pontos de iluminação por km nas vias do município, com vãos variando entre 28 a 42 metros dependendo da localidade.

Dentre as características técnicas comuns dos LEDs observados, encontram-se:

- **Grau de proteção:** IP66 (proteção total contra poeira e água)
- **Resistência a impactos:** IK08 (resistente a vandalismo)
- **Índice de Reprodução de Cor:**  $IRC \geq 70$  (boa reprodução de cores)
- **Temperatura de Cor Correlata:** CCT 3.000-4.000 K (luz branca neutra)
- **Fator de potência:**  $\geq 0,92$
- **Distorção Harmônica Total:** THD  $< 20\%$
- **Vida útil (L70):** 50.000 horas
- **Garantia:** 5 anos

A Figura 4.1 abaixo demonstra um dos trechos analisados durante a coleta de dados, sendo este na avenida Minas Gerais.

**Figura 4.1** – Trecho de 1km analisado na avenida Minas Gerais

**Fonte:** Elaboração própria

A Tabela 4.2 abaixo apresenta a distribuição estimada da potência das luminárias instaladas em função do tipo de via em que mais se encontravam presentes:

**Tabela 4.2** – Caracterização do sistema LED implantado (2025)

<b>Categoria Viária</b>	<b>Potências Predominantes Observadas Em Campo (W)</b>	<b>Fluxo (lm)</b>	<b>Eficácia (lm/W)</b>
V1 - Vias Principais	150	18.000	~120
V2 - Vias Coletoras	100	12.000	~120
V3/V4 - Vias Locais	60	7.200	~120

**Fonte:** Elaboração própria

#### 4.2.2 Custos operacionais e consumo energético (2025)

O custo energético da iluminação pública em 2025 foi de **R\$6.035.823,09** (média mensal de **~R\$502.985,257**), com custo per capita de aproximadamente **R\$4,920759/hab/mês**. A prefeitura do município também formou um novo contrato de prestação de serviços com a empresa São Bento Lighting Solutions, que se tornou a responsável pela preservação e expansão do novo sistema LED da cidade (PREFEITURA MUNICIPAL DE ITUIUTABA, 2026).

A Tabela 4.3 abaixo apresenta a base de cálculo do kWh para cada mês do ano de 2025 levando em consideração as bandeiras tarifárias vigentes na época (ANEEL, 2026).

**Tabela 4.3** – Base de cálculo do sistema LED (2025)

<b>Mês de Referência do Pagamento</b>	<b>Bandeira Vigente</b>	<b>Base de Cálculo</b>
Janeiro	Verde	R\$0,6291/kWh
Fevereiro	Verde	R\$0,6291/kWh
Março	Verde	R\$0,6291/kWh
Abril	Verde	R\$0,6291/kWh
Maio	Amarela	R\$0,6542/kWh
Junho	Vermelha P1	R\$0,6885/kWh
Julho	Vermelha P1	R\$0,6885/kWh
Agosto	Vermelha P2	R\$0,7340/kWh
Setembro	Vermelha P2	R\$0,7340/kWh
Outubro	Vermelha P1	R\$0,6885/kWh
Novembro	Vermelha P1	R\$0,6885/kWh
Dezembro	Amarela	R\$0,6542/kWh

**Fonte:** Elaboração própria

O preço médio do kWh no ano de 2025 mediante as bandeiras vigentes na época foi de aproximadamente **R\$0,670630681**. Através desse valor é possível calcular o consumo médio do sistema antigo:

- **Consumo anual:**  $R\$6.035.823,09 \div R\$0,670630681/kWh = 9.000.219,138 \text{ kWh/ano}$
- **Consumo mensal:**  $9.000.219,138 \text{ kWh/ano} \div 12 = 750.018,2615 \text{ kWh/mês}$
- **Consumo específico:**  $9.000.219,138 \text{ kWh} \div 18.000 \text{ pontos} = 500,012 \text{ kWh/ponto/ano}$

Diferente das lâmpadas de descarga, os drivers eletrônicos das lâmpadas LED possuem perdas negligenciáveis, já incluídas na potência nominal das mesmas. Logo:

- **Potência instalada:**  $9.000.219,138 \text{ kWh/ano} \div 4.380 \text{ h/ano} = \sim 2.054,8445 \text{ kW}$

Os custos de manutenção do sistema novo foram de aproximadamente **R\$200.335,99** no decorrer do ano (PREFEITURA MUNICIPAL DE ITUIUTABA, 2026), totalizando em um custo total anual de:  $R\$6.035.823,09 + R\$200.335,99 = \mathbf{R\$6.236.159,08}$ .

### 4.3 Análise Comparativa

A Tabela 4.4 abaixo apresenta a comparação consolidada das características técnicas dos sistemas de antes e depois da modernização.

**Tabela 4.4** – Comparação técnica das características: 2021 vs 2025

Parâmetro	Sistema Convencional (2021)	Sistema LED (2025)	Melhoria
Eficácia Média (lm/W)	~65	~120	85%
Vida Útil Média (h)	20.000	50.000	150%
IRC	25-60	70-75	25-180%
CCT (K)	2.000-4.200	3.000-4.000	Uniforme
Tempo de Partida	3-7 min	Instantâneo	-
Taxa de Falhas	~18-20%	<1%	95%
Mercurio (mg/lâmpada)	10-60	0	100%
Pontos Funcionais	~15.300	18.000	17,65%

**Fonte:** Elaboração própria.

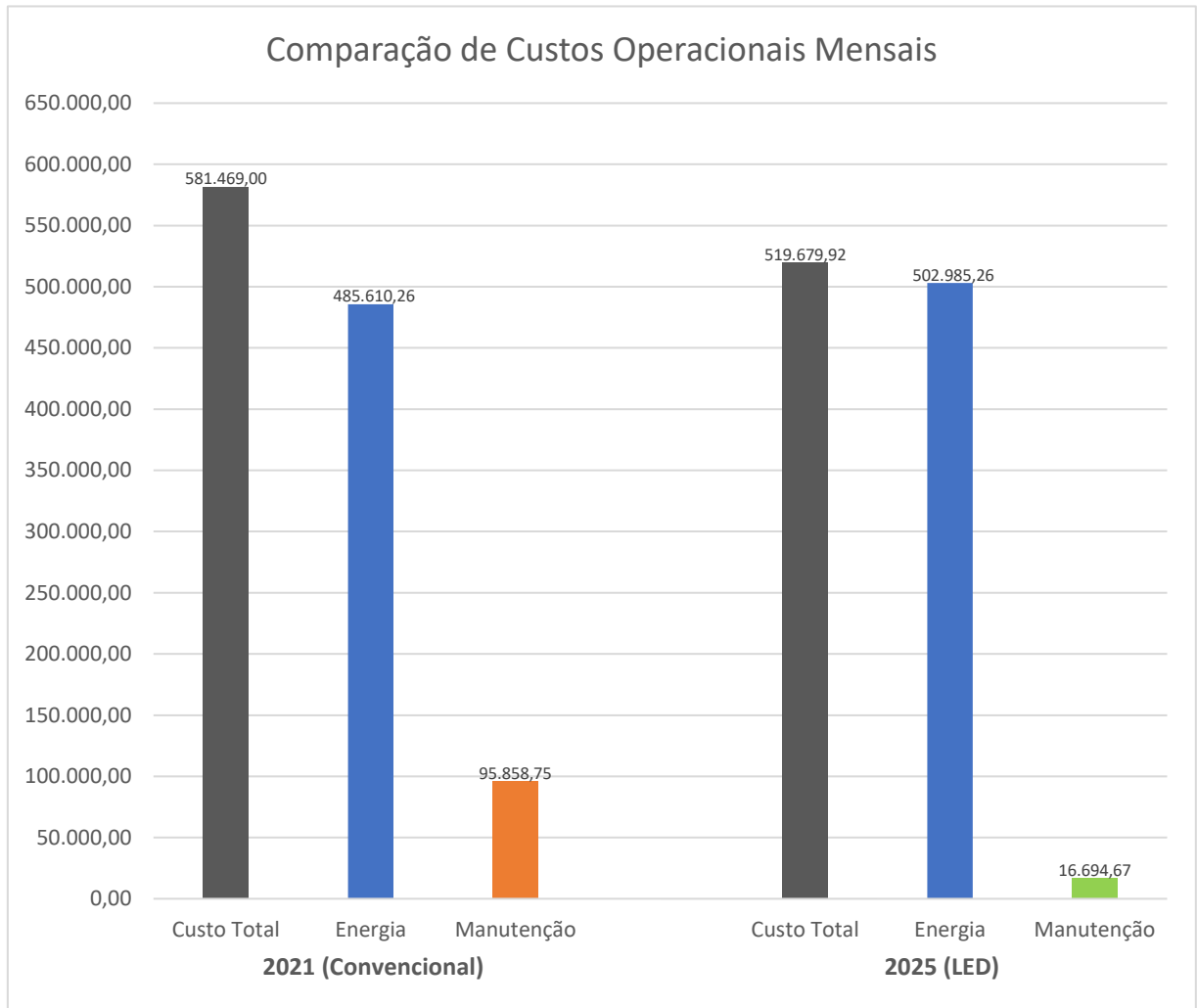
**Análise:** A modernização resultou em melhorias significativas em todos os parâmetros técnicos relevantes para a iluminação. Uma eficácia luminosa superior permite à luminária LED produzir a mesma quantidade de luz com menos potência elétrica. Uma vida útil maior reduz drasticamente a frequência de manutenção necessária, diminuindo os custos operacionais e inconvenientes à população. Por fim, a eliminação completa do uso de mercúrio reduz os riscos ambientais e de saúde pública (FRETTA et al., 2023).

A Tabela 4.5 abaixo apresenta a comparação detalhada do consumo e dos custos entre esses dois sistemas.

**Tabela 4.5** – Comparação técnica do consumo: 2021 vs 2025

Item	Antes (2021)	Depois (2025)	Varição Absoluta	Varição (%)
Pontos Funcionais	15.300	18.000	+ 2700	+ 17.647%
Consumo (MWh/ano)	8.332,586493	9.000,219138	+ 667,632645	+ 8,012%
Custo Energia (R\$/ano)	5.827.323,10	6.035.823,09	+ 208.499,99	+ 3.578%
Custo Manutenção (R\$/ano)	1.150.304,94	200.335,99	- 949.968,95	- 82.58%
Custo Anual Total (R\$/ano)	6.977.628,04	6.236.159,08	- 741.468,96	- 10.626%
Custo Mensal Total (R\$)	581.469,00	519.679,923	- 61.789,08	- 10.626%

**Fonte:** Elaboração própria.

**Figura 4.2 – Comparação de custos operacionais mensais**

**Fonte:** Elaboração própria

**ECONOMIA ANUAL EFETIVA: R\$741.468,96/ano (R\$61.789,08/mês)**

**Análise:** A modernização resultou em uma economia operacional de **10.626%**. Embora o percentual seja inferior à algumas reduções de  $\geq 50\%$  reportadas na literatura (PAULA et al., 2025; OLIVEIRA et al., 2021), este resultado também reflete um contexto mais complexo, pois a prefeitura de Ituiutaba necessitou instalar mais 2.700 novos pontos de iluminação devido a construção dos novos loteamentos no município, pontos antigos que estavam inoperantes e regiões que até então estavam mal iluminadas. Caso esses pontos adicionais tivessem sido instalados no sistema convencional antigo, utilizando também as tecnologias antigas (vapor de sódio, etc), a economia absoluta entre os dois sistemas (LED e convencional) teria sido bem maior. Esse cenário hipotético onde se considera a instalação das 2.700 luminárias adicionais no sistema antigo será explorado mais adiante na seção 4.4 deste documento.

## 4.4 Validação da Viabilidade Econômica

### 4.4.1 Investimento realizado

Como mencionado anteriormente na seção 3.4.1, até o presente momento, os valores publicados no Portal da Transparência Municipal referentes ao investimento realizado na modernização do sistema de iluminação pública foram de aproximadamente ~R\$10.973.713,81.

**Observação:** Dividindo o valor total pelos 18.000 pontos tem-se um investimento específico de ~R\$609,650/ponto.

### 4.4.2 Economia efetiva e indicadores de viabilidade

A Tabela 4.6 apresenta a economia efetiva medida e os indicadores de viabilidade econômica calculados com os dados reais de 2021 e 2025.

**Tabela 4.6** – Economia efetiva real: 2021 vs 2025

Indicador	Valor	Interpretação
Investimento Total	R\$ 10.973.713,81	Investimento realizado
Economia Anual	R\$ 741.468,96	Economia efetiva medida
Payback Simples	14,79 anos	Recuperação Lenta
Economia em 5 anos	R\$ 3.707.344,80	~0,337× o investimento
Economia em 10 anos	R\$ 7.414.689,60	~0,675× o investimento
Relação B/C (10 anos)	0,675	Retorno Ruim

**Fonte:** Elaboração própria.

**Análise:** O payback foi bem acima da margem típica de 3-7 anos documentada na literatura (PAULA et al., 2025; OLIVEIRA et al., 2021; CORDEIRO, 2023). O principal fator que causou essa disparidade foram os **2.700 novos pontos instalados no sistema novo**. Isso impacta diretamente a análise comparativa entre os dois anos analisados, já que os sistemas em questão não estão equiparados em quantidade de pontos. Ainda assim, **a modernização permanece economicamente viável**, gerando economia líquida de R\$741.468,96 anuais em um sistema **17.647% maior que o anterior**, além dos benefícios ambientais e sociais significativos não quantificados monetariamente (PAULA et al., 2025)

Outro fator importante a se destacar é a crise hídrica do ano de 2021, que como demonstrado anteriormente, impactou significativamente o custo do kWh ao longo do ano.

Considerando esse contexto, agora será feita uma segunda análise, utilizando a mesma quantidade de pontos para os dois anos analisados (15.300) e também a bandeira tarifária verde, sem acréscimos. O objetivo dessa abordagem é realizar uma análise mais “justa” entre os dois cenários.

Sistema convencional de 2021 com 15.300 pontos e bandeira verde:

- **Consumo anual:**  $544,6135 \text{ kWh/ponto/ano} \times 15.300 \text{ pontos} = \mathbf{8.332.586,5 \text{ kWh/ano}}$
- **Custo anual:**  $8.332.586,5 \text{ kWh/ano} \times \text{R}\$0,597676773/\text{kWh} = \mathbf{\text{R}\$4.980.193,410/\text{ano}}$
- **Potência total do sistema:**  $8.332.586,5 \text{ kWh/ano} \div 4.380 \text{ h/ano} = \sim \mathbf{1.902,417 \text{ kW}}$

Sistema LED de 2025 com 15.300 pontos e bandeira verde no ano:

- **Consumo anual:**  $500,012 \text{ kWh/ponto/ano} \times 15.300 \text{ pontos} = \mathbf{7.650.183,6 \text{ kWh/ano}}$
- **Custo anual:**  $7.650.183,6 \text{ kWh/ano} \times \text{R}\$0,629133445/\text{kWh} = \mathbf{\text{R}\$4.812.986,363/\text{ano}}$
- **Potência instalada:**  $7.650.183,6 \text{ kWh/ano} \div 4.380 \text{ h/ano} = \sim \mathbf{1.746,6172 \text{ kW}}$

Os custos de manutenção do ano de 2021 foram mantidos os mesmos nesta análise (**R\$1.150.304,94**). Já para o ano de 2025, sabendo que a potência instalada desse sistema ideal acima é **~15% menor**, os custos de manutenção também foram calculados com essa mesma base de redução ( $\text{R}\$200.335,99 \times 0,85$ ), totalizando em **R\$170.285,5915**.

Com menos LEDs instalados, o investimento total a ser feito também será menor. Com isso em mente, também foi descontado uma redução de 15% em cima do valor de investimento original, totalizando em um novo valor de **R\$9.327.656,7385**. A Tabela 4.7 abaixo apresenta a comparação detalhada do consumo e dos custos entre esses dois sistemas.

**Tabela 4.7** – Comparação técnica do consumo (15.300 pontos): 2021 vs 2025

Item	2021	2025	Varição Absoluta	Varição (%)
Pontos Funcionais	15.300	15.300	0	0%
Consumo (MWh/ano)	8.332,586493	7.650,183600	- 682,402893	- 8,19%
Custo Energia (R\$/ano)	4.980.193,410	4.812.986,363	-167.207,05	- 3,36%
Custo Manutenção (R\$/ano)	1.150.304,94	170.285,59	- 980.019,3485	- 85,2%
CUSTO TOTAL (R\$/ano)	6.130.498,35	4.983.271,953	-1.147.226,4	-18,71%
Custo Mensal (R\$)	510.874,862	415.272,662	-95.602,2	-18,71%

**Fonte:** Elaboração própria.

Fora a quantidade de pontos funcionais (0%), todas as demais variações (absolutas e percentuais) são **negativas**. Isso significa que para todos os itens analisados foi apresentado

uma **margem de economia** em 2025 quando comparado ao ano de 2021. Note também que mesmo com um aumento de 5% no preço do kWh em 2025 quando comparado com o ano de 2021, o custo energético ainda assim foi menor.

A Tabela 4.8 a seguir apresenta a economia efetiva medida e os indicadores de viabilidade econômica calculados considerando ambos os sistemas (2021 e 2025) com 15.300 pontos de iluminação totais.

**Tabela 4.8** – Economia efetiva com quantidade de pontos iguais (15.300): 2021 vs 2025

Indicador	Valor	Interpretação
Investimento Total	R\$9.327.656,7385	Investimento realizado
Economia Anual	R\$ 1.147.226,4	Economia efetiva medida
Payback Simples	8,13 anos	Tempo de recuperação do investimento inicial
Economia em 5 anos	R\$ 5.736.132	~0,614× o investimento
Economia em 10 anos	R\$ 11.472.264	~1,229 × o investimento
Relação B/C (10 anos)	1,229	Taxa de retorno dentro do tempo de vida útil dos LEDs

**Fonte:** Elaboração própria.

**Análise:** Note que com o reajuste da quantidade de pontos o payback agora está dentro da margem documentada na literatura (PAULA et al., 2025; OLIVEIRA et al., 2021; CORDEIRO, 2023). Isso comprova a viabilidade da modernização, uma vez que a economia do sistema novo irá pagar o seu próprio custo de investimento dentro do prazo de 11 anos do tempo de vida útil dos LEDs (50.000 horas), e também justifica o aumento do payback no cenário real.

## 4.5 Impactos Ambientais e Sociais

### 4.5.1 Redução das emissões dos gases de efeito estufa

A redução do consumo energético resulta na diminuição das emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) associadas à geração de energia elétrica. Tendo em mente que a maior parte dos 2.700 pontos de iluminação adicionais já estava planejada para ser instalada antes mesmo do início do projeto de modernização, foi utilizado como base para este cálculo o cenário da Tabela 4.7 com a quantidade de pontos iguais entre os dois sistemas.

Utilizando o fator de emissão médio do Sistema Interligado Nacional (SIN) de 0,0289 tCO<sub>2</sub>/MWh (MCTI, 2025) é possível calcular:

- **Consumo energético 2021 (15.300 pontos) = 8.332,586MWh**
- **Consumo energético 2025 (15.300 pontos) = 7.650,183MWh**
- **Economia de energia = 8.332,586MWh - 7.650,183MWh = 682,4028MWh**
- **Emissões Evitadas: 682,402893MWh × 0,0289 = 19,721 tCO<sub>2</sub>/ano**

#### Equivalências:

- **Veículos de passeio:** Considerando uma emissão média de 5 tCO<sub>2</sub>/ano por veículo, a redução equivale ao mesmo que **remover 3,9442 veículos** das ruas anualmente.
- **Árvores:** Considerando um sequestro de 0,15 tCO<sub>2</sub> por árvore em um intervalo de 20 anos, a redução equivale a **plantar 2.629 árvores** (equivalência em 20 anos).

### 4.5.2 Eliminação de resíduos perigosos

Lâmpadas de descarga de alta intensidade (vapor de mercúrio e vapor de sódio) contêm mercúrio metálico, que é classificado como resíduo perigoso pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) (BRASIL, 2010). A substituição integral do sistema por LED elimina completamente esse risco ambiental.

#### Cálculo de Mercúrio Eliminado:

- **Taxa de substituição anual (sistema convencional): ~21,9%**
- **Lâmpadas substituídas/ano: 15.300 × 0,219 = 3.350,7 lâmpadas/ano**
- **Conteúdo médio de mercúrio: ~20 mg/lâmpada**

**Mercúrio descartado anualmente: 3.350,7 × 20 mg = 67.014 mg = 67,014 kg/ano**

### 4.5.3 Síntese dos impactos

A economia real de **R\$ 741.468,96 anuais** na Tabela 4.5 representa recursos que podem ser realocados para outras áreas prioritárias do orçamento municipal, como saúde, educação e assistência social, ampliando o impacto social positivo do investimento. A Tabela 4.9 abaixo apresenta a compilação dos impactos sociais e ambientais causados pela modernização do sistema.

**Tabela 4.9** – Síntese dos impactos ambientais e sociais

Impacto	Quantificação	Equivalência/Benefício
Eliminação Hg	67,014 kg/ano	Resíduo perigoso eliminado
Melhoria IRC	30 → 72	+140% reprodução de cores
Pontos Funcionais	15.300 → 18.000	+ 17.647% de Cobertura
Vida Útil	20.000h → 50.000h	- 78% freq. manutenção

**Fonte:** Elaboração própria.

### 4.6 Discussão dos Resultados

Este estudo de caso documenta que mesmo com um aumento 17.647% (2.700 pontos) na quantidade de pontos de iluminação totais do município, a modernização LED ainda resultou em uma **redução de 10,626% nos custos operacionais**. Os principais achados são:

Cenário real:

1. **Redução dos Custos Reais:** R\$ 581.469,003 → R\$ 519.679,923/mês (-10,626%)
2. **Redução de Consumo:** 544,613 kWh/ponto/ano → 500,012 kWh/ponto/ano
3. **Melhoria de Qualidade Significativa:** + 2.700 novos pontos funcionais
4. **Benefícios Não Monetários Importantes:** Qualidade, segurança, ambiente

Como já mencionado anteriormente, o principal motivo que faz Ituiutaba divergir de vários outros casos documentados na literatura foi justamente o investimento feito para o incremento na quantidade total de pontos ao longo da modernização. Como demonstrado nas Tabelas 4.7 e 4.8, caso a quantidade total de pontos não houvesse sido incrementada, a redução dos custos, a redução do consumo e o payback seriam muito melhores.

### **Lições para Outros Municípios:**

1. **Comparação justa requer cenários similares:** Incrementos como o caso de Ituiutaba sempre irão impactar a análise comparativa entre os dois períodos analisados, já que os sistemas em questão não estão equiparados. Comparar sistemas com tamanhos diferentes pode causar uma falsa sensação de inviabilidade da modernização.
2. **Benefícios não monetários são relevantes:** Segurança, conforto e melhorias para o meio ambiente justificam os investimentos.
3. **Contratos formais podem aumentar custos registrados:** Mas melhoram a qualidade e previsibilidade do sistema. A viabilidade depende do contexto e cada município deve avaliar as suas próprias circunstâncias específicas.
4. **É necessário cuidado para não superdimensionar os LEDs:** Além do tempo de vida útil muito maior, outra vantagem dos LEDs é a sua eficiência energética, pois possuem uma taxa de conversão de energia elétrica em luz significativamente maior quando comparado as tecnologias convencionais. Logo, é necessário ser criterioso durante a instalação dos LEDs para não instalar uma potência maior do que o necessário e consequentemente gerar gastos energéticos adicionais que poderiam ser evitados. Para se ter uma ideia, uma lâmpada LED de 100 W produz uma quantidade de lumens igual ou até mesmo maior que uma lâmpada de vapor de sódio de 150 W.

## 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 5.1 Conclusões Gerais

Este trabalho apresentou um estudo de caso abrangente sobre a modernização do sistema de iluminação pública implementada no município de Ituiutaba, Minas Gerais, analisando os impactos técnicos, econômicos e ambientais da substituição integral das luminárias convencionais por tecnologia LED. Os resultados demonstram inequivocamente que a modernização **foi técnica, econômica e ambientalmente bem-sucedida**, confirmando empiricamente os benefícios projetados na literatura.

**Validação Técnica:** A comparação de antes e depois demonstrou que o sistema LED implementado proporciona uma iluminação de qualidade superior, com uma melhor uniformidade, melhor reprodução de cores (IRC 70-75 vs 25-60), partida instantânea e a eliminação do mercúrio. A eficácia luminosa também aumentou (120 vs 65 lm/W), resultando em uma eficiência energética maior das luminárias.

**Validação Econômica:** A análise com dados reais demonstrou uma viabilidade robusta: redução de 10.626% nos custos operacionais (economia de R\$741.468,96/ano), mesmo mediante o incremento da quantidade total de pontos de iluminação do município. Em um cenário onde a quantidade de pontos totais dos dois períodos analisados se mantém, o payback calculado foi de 8,13 anos e a relação benefício-custo é de 1,229:1 em 10 anos. Nesse cenário o investimento se paga em aproximadamente 8 anos, ainda dentro da margem de tempo de vida útil dos LEDs, gerando uma economia contínua significativa.

**Validação Ambiental:** Os benefícios incluem a eliminação de 67,014 kg/ano de descarte de mercúrio, contribuindo para compromissos climáticos e redução de resíduos perigosos.

**Validação Empírica:** Os resultados de Ituiutaba são consistentes com a literatura técnico-científica e validam empiricamente as projeções dos estudos prospectivos.

Por fim, a experiência de Ituiutaba **confirma que a modernização do sistema de iluminação com LED é um investimento altamente recomendável**, combinando o retorno financeiro excepcional, a melhoria da qualidade do serviço e a contribuição para uma maior sustentabilidade ambiental. Esse estudo de caso também fornece **evidências concretas** para outros municípios brasileiros de porte similar.

## 5.2 Atendimento aos Objetivos

### 5.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral de "**analisar os impactos técnicos, econômicos e ambientais da modernização implementada em Ituiutaba**" foi **plenamente alcançado**. O trabalho forneceu uma análise abrangente, documentando resultados reais e divergências em relação à literatura e outros fatores explicativos.

### 5.2.2 Objetivos específicos

- **Caracterização do sistema pré-modernização (2021):** Realizado. Cerca de 15.300 pontos, ~80% de vapor de sódio, ~15% de vapor de mercúrio e ~5% de outras tecnologias, com um consumo de 8.332,586493 MWh/ano e custos totais de R\$6.977.628,04/ano;
- **Comparação tecnológica:** Realizado. Foi demonstrada a superioridade dos LEDs na eficácia, na vida útil e no índice de reprodução de cor;
- **Caracterização do sistema pós-modernização (2025):** Realizado. Cerca de 18.000 pontos LED, com um consumo de 9.000,219138 MWh/ano e custos totais de R\$ 6.236.159,08/ano;
- **Levantamento de dados referentes ao investimento:** Realizado. O investimento realizado foi de aproximadamente R\$ 10.973.713,81 (R\$ 609,65/ponto);
- **Avaliação econômica:** Realizado. Foi demonstrada a viabilidade financeira em dois cenários diferentes, um levando em consideração a diferença da quantidade total de pontos entre os dois períodos analisados e outro considerando a mesma quantidade (15.300 pontos) para ambos os períodos;
- **Benefícios ambientais:** Realizado. Foram quantificadas reduções de 67,014 kg/ano de mercúrio. No cenário de pontos iguais entre os dois períodos também foi quantificado uma redução de 19,721 tCO<sub>2</sub>/ano;
- **Validação com a literatura:** Realizado. Embora houveram algumas divergências, os resultados obtidos ainda foram de acordo com os demais documentados na literatura;
- **Recomendações para outros municípios:** Realizado. Apresentadas na Seção 5.3.

### 5.3 Recomendações para Outros Municípios

Cada município precisa avaliar cuidadosamente as suas circunstâncias antes de iniciar o processo de modernização:

- **Estado do sistema existente:** Sistemas mais degradados e com uma taxa elevada de defeitos podem reduzir a economia aparente;
- **Modelo de manutenção:** A formalização de contratos de manutenção pode aumentar os custos registrados, mas também melhora a qualidade do sistema;
- **Capacidade de investimento:** Um investimento de R\$600-900/ponto requer recursos significativos. Caso o investimento seja muito grande para o município realizar a modernização de uma só vez, também é possível dividir o projeto em partes, de forma que a própria economia irá viabilizar o restante da modernização;
- **Normalizar comparações:** Tomando o caso de Ituiutaba como exemplo, é importante considerar a mesma qualidade do serviço durante a análise (pontos funcionais, níveis de iluminação) para ambos os períodos estudados, de forma a evitar resultados errados e alarmes falsos de inviabilidade;
- **Incluir benefícios não monetários:** A segurança, o conforto e os benefícios ambientais também são relevantes para decisão pública;
- **Análise de sensibilidade:** É de extrema importância avaliar o impacto das variações tarifárias e contratuais. Pois isso pode inviabilizar a modernização em cenários onde o município não possui uma margem de segurança adequada para variações nos custos;
- **Especificações rigorosas:** Eficácia  $\geq 120$  lm/W, vida útil  $\geq 50.000$ h, IRC  $\geq 70$ , IP66 e IK08;
- **Contratos claros:** Definir as responsabilidades de manutenção de forma clara, garantindo uma boa gestão, monitoramento e qualidade dos equipamentos;
- **Modelos de financiamento:** É importante encontrar o modelo que mais se adequa à realidade atual do município. Se houver recursos COSIP disponíveis pode-se considerar um investimento direto. O município também pode buscar financiamento da concessionária. PPPs transferem os riscos, mas podem aumentar os custos totais. Se necessário, uma implementação gradual também reduz impacto orçamentário.

#### 5.4 Sugestões Para Trabalhos Futuros

1. **Monitoramento de longo prazo:** Acompanhar os custos e o desempenho dos municípios a longo prazo contribui para validar as premissas de vida útil e manutenção;
2. **Análises e estudos de caso de outros municípios:** Replicar o estudo realizado em Ituiutaba para municípios similares, tanto dentro de Minas quanto fora;
3. **Análise dos modelos de financiamento:** Comparar os resultados obtidos de municípios que adotaram modelos de financiamento diferentes (Exemplo: PPPs vs investimento direto);
4. **Otimização dos sistemas LED e viabilidade da telegestão:** Realizar um estudo aprofundado sobre o potencial da dimerização e do controle adaptativo por meio de sistemas de telegestão. O objetivo seria avaliar se o incremento no investimento inicial para a aquisição de drivers inteligentes e de uma infraestrutura de comunicação que permite esse tipo de ajuste, é compensado pela redução adicional no consumo energético e nos custos operacionais;
5. **Percepção da população:** Levantar dados sobre o índice de satisfação e da percepção de segurança da população para os cenários de antes e depois da modernização.
6. **Impacto da modernização LED na qualidade da energia e distorção harmônica:** Realizar um estudo para medir os níveis de distorção harmônica total nos transformadores de distribuição após a implementação dos drivers LED. O objetivo desse estudo seria verificar a conformidade do sistema com os limites estabelecidos pelo PRODIST (Módulo 8 da ANEEL) e pela IEC 61000-3-2, avaliando possíveis impactos na rede.

## 5.5 Considerações Finais

A modernização da iluminação pública com LED representa um investimento estratégico para os municípios, mas os **resultados reais também podem divergir das projeções** graças a fatores contextuais complexos. A experiência de Ituiutaba demonstra que:

- **Benefícios técnicos e ambientais** confirmam a superioridade da tecnologia LED.
- **A viabilidade financeira depende fortemente do contexto** e pode ser limitada em certas situações específicas.
- **Benefícios não monetários também justificam os investimentos**, mesmo com um retorno financeiro limitado.
- **Análises realistas devem considerar a qualidade do serviço** e não apenas os custos nominais. Cenários onde há diferença na quantidade total dos elementos estudados, como o de Ituiutaba, onde o sistema de 2025 possui 2.700 pontos à mais que o de 2021, podem gerar resultados incorretos e apresentar uma falsa inviabilidade se não analisados de maneira correta.

A gestão pública também deve **ponderar múltiplos critérios** (financeiros, técnicos, ambientais e sociais) durante a tomada de decisão, reconhecendo que os **investimentos feitos na qualidade de vida urbana transcendem as análises puramente financeiras** e contribuem para a sustentabilidade e para o bem-estar da população.

Por fim, este trabalho espera ter fornecido uma documentação detalhada e uma análise crítica da experiência de Ituiutaba, contribuindo para a base de conhecimento referente a modernização da iluminação pública no Brasil e fornecendo uma referência realista para outros municípios.

## REFERÊNCIAS

- MORAIS, J. P. A. **Análise de viabilidade tecno-econômica para a substituição de luminárias convencionais por luminárias de LED em vias públicas**. 2022. 89 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas, Universidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade, 2022. Disponível em: <https://monografias.ufop.br/handle/35400000/3777>. Acesso em: 19 dez. 2025.
- NOGUEIRA, F. J. **Avaliação experimental de luminárias empregando LED para iluminação pública**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufjf.br/jspui/handle/ufjf/931>. Acesso em: 19 dez. 2025.
- FRAGOSO, A. P.; FORTES, M. Z.; MORAES, D. A. P. et al. **Análise da economia de energia com dimerização quando da aplicação da tecnologia LED na Iluminação Pública – Estudo de caso: Cidade do Rio de Janeiro**. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.48011/sbse.v1i1.2298>. Acesso em: 19 dez. 2025.
- FRETTA, M. A.; JUNIOR, P. R.; SAMPAIO, A. C. L. et al. **Análise pré-retrofit na substituição de sistemas de iluminação pública: um estudo de caso**. Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, v. 13, n. 11, p. 102-112, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2022.011.0009>. Acesso em: 21 dez. 2025.
- CORDEIRO, M. P. S. **Análise de viabilidade econômica de uma PPP de iluminação pública em LED: estudo de caso em Porto Alegre**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/268483>. Acesso em: 22 dez. 2025.
- PAULA, R. S.; CAMPOS, A. F.; PAGEL, U. R. et al. **Impactos da modernização da iluminação pública com LEDs em Muniz Freire-ES: eficiência energética no contexto de cidades inteligentes**. Revista de Gestão e Secretariado, v. 16, n. 1, p. 01-19, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.7769/gesec.v16i1.4585>. Acesso em: 22 dez. 2025.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5101: Iluminação pública – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2018. Acesso em: 23 dez. 2025.

OLIVEIRA, J. G. R.; PINTO, L. F.; OLIVEIRA, K. R. et al. **Análise econômica sobre a inovação do sistema de iluminação pública no município de Rosana**. Research, Society and Development, v. 10, n. 17, p. e254101725044, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i17.25044>. Acesso em: 21 dez. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16026: Dispositivo de controle eletrônico c.c. ou c.a. para módulos de LED — Requisitos de desempenho**. Rio de Janeiro, 2012. Acesso em: 23 dez. 2025.

BRASIL. **Emenda Constitucional nº 39**, de 19 de dezembro de 2002. Acrescenta o art. 149-A à Constituição Federal, instituindo contribuição para custeio do serviço de iluminação pública. Brasília: Diário Oficial da União, 2002. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/constituicao/emendas/emc/emc39.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/emendas/emc/emc39.htm). Acesso em: 20 dez. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa nº 1000**, de 7 de dezembro de 2021. Estabelece as regras de prestação do serviço público de distribuição de energia elétrica. Brasília: ANEEL, 2021. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.pdf>. Acesso em: 20 dez. 2025.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica – PROCEL**. Brasília: MME, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/procel>. Acesso em: 27 dez. 2025.

PROGRAMA DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procel Reluz – Iluminação Pública Eficiente e Sustentável**. Disponível em: <https://www.procel.gov.br/sites/dev/SitePages/Procel-Reluz.aspx>. Acesso em: 27 dez. 2025.

BRASIL. **Lei Nº 9.991**, de 24 de julho de 2000. Dispõe sobre realização de investimentos em pesquisa e desenvolvimento e em eficiência energética por parte das empresas concessionárias, permissionárias e autorizadas do setor de energia elétrica, e dá outras providências. Brasília: Diário Oficial da União, 2000. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l9991.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9991.htm). Acesso em: 20 dez. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Cidades: Ituiutaba**. 2023. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/ituiutaba>. Acesso em: 29 dez. 2025.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES. **MCTI publica fatores de emissão de CO2 da geração de energia elétrica no Brasil para 2025**. MCTI, 2025.

Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/noticias/2025/06/mcti-publica-fatores-de-emissao-de-co2-da-geracao-de-energia-eletrica-no-brasil-para-2025>.

Acesso em: 11 jan. 2026.

BRASIL. **Lei Nº 12.305**, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília: Diário Oficial da União, 2010. Disponível em:

[https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm). Acesso em: 20 dez. 2025.

PREFEITURA MUNICIPAL DE ITUIUTABA. **Portal da Transparência**. Ituiutaba, 2026.

Disponível em: <https://transparencia-ituiutaba.smarapd.com.br/#/>. Acesso em: 16 jan. 2026.

PREFEITURA MUNICIPAL DE ITUIUTABA. **Prefeitura de Ituiutaba conclui ações do Programa Ituiutaba Iluminada**. Ituiutaba, 2024. Disponível em:

<https://www.ituiutaba.mg.gov.br/?pag=T1RVPU9EZz1PV0k9T1RrPU9UUT1OMIE9T0dNPU9XST1PR1U9T0dNPU9HWT1PV009T1dZPQ==&id=13736>. Acesso em: 18 jan. 2026.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Bandeiras tarifárias – Acionamento**.

Dados Abertos ANEEL. Disponível em: <https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/bandeiras-tarifarias/resource/0591b8f6-fe54-437b-b72b-1aa2efd46e42>. Acesso em: 18 jan. 2026.