



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO CAMPUS RIO VERDE**

**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA APLICADA
E SUSTENTABILIDADE**

**ESTUDO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM ILUMINAÇÃO
PÚBLICA COM TECNOLOGIA LED DIMERIZÁVEL INTEGRADO A
SISTEMA DE TELEGESTÃO**

Orientador: Prof. Dr. João Areis Ferreira Barbosa Júnior

Discente: Bhrunna Tacauana Ribeiro

RIO VERDE - GO

ABRIL – 2024

BHRUNNA TACAUANA RIBEIRO

**ESTUDO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM ILUMINAÇÃO
PÚBLICA COM TECNOLOGIA LED DIMERIZÁVEL
INTEGRADO A SISTEMA DE TELEGESTÃO**

Dissertação apresentada à banca examinadora como parte das exigências para obtenção do título de MESTRE em ENGENHARIA APLICADA E SUSTENTABILIDADE, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde - Área de concentração (Engenharia Aplicada e Sustentabilidade).

Orientador: Prof. Dr. João Areis Ferreira Barbosa Júnior

RIO VERDE - GO

ABRIL - 2024

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano

RB575e Ribeiro, Bhrunna Tacauana
 Estudo de Eficiência Energética em Iluminação
 Pública com Tecnologia LED Dimerizável Integrado a
 Sistema de Telegestão / Bhrunna Tacauana Ribeiro;
 orientador João Areis Ferreira Barbosa Junior; co-
 orientador Geraldo Andrade De Oliveira. -- Rio
 Verde, 2024.
 109 p.

 Dissertação (Mestrado em Mestrado em Programa de
 Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e
 Sustentabilidade) -- Instituto Federal Goiano,
 Campus Rio Verde, 2024.

 1. Eficiência Energética. 2. Retrofit. 3. LED. 4.
 Iluminação Pública. 5. Telegerenciamento. I. Junior,
 João Areis Ferreira Barbosa , orient. II. De
 Oliveira, Geraldo Andrade , co-orient. III. Título.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Documentos 22/2024 - SREPG/CMPR/CPG-RV/DPGPI-RV/CMPRV/IFGOIANO

ESTUDO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM ILUMINAÇÃO PÚBLICA COM TECNOLOGIA LED DIMERIZÁVEL INTEGRADO A SISTEMA DE
TELEGESTÃO

Autora: Bhrunna Tacauana Ribeiro

Orientador: Prof. Dr. João Areis Ferreira Barbosa Júnior

TITULAÇÃO: Mestre em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade - Área de Concentração Engenharia Aplicada e
Sustentabilidade

APROVADO em 16 de abril de 2024.

Prof. Dr. Cristiano Gomes Casagrande
Avaliador Externo - Universidade
Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Geraldo Andrade de
Oliveira
Avaliador Interno - IFGOIANO / Rio
Verde

Prof. Dr. João Areis Ferreira Barbosa Júnior
Presidente da banca - IFGOIANO / Rio Verde

Documento assinado eletronicamente por:

- Cristiano Gomes Casagrande, Cristiano Gomes Casagrande - Professor Avaliador de Banca - Universidade Federal de Juiz de Fora (21195755000169), em 16/04/2024 11:36:53.
- Geraldo Andrade de Oliveira, Geraldo Andrade de Oliveira - Professor Avaliador de Banca - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - Ifg (1), em 16/04/2024 11:18:33.
- Joao Areis Ferreira Barbosa Junior, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 16/04/2024 11:09:40.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 01/04/2024. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 588541
Código de Autenticação: 8b342ee0c4





SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Ata nº 41/2024 - SREPG/CMPR/CPG-RV/DPGPI-RV/CMPRV/IFGOIANO

PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Unidade do IF Goiano:	Campus Rio Verde	
Programa de Pós-Graduação:	Engenharia Aplicada e Sustentabilidade	
Defesa de:	Dissertação	Defesa de número: 75
Data: 16/04/2024	Hora de início: 08:30h	Hora de encerramento: 12:00h
Matrícula do discente:	2021202331440003	
Nome do discente:	Bhrunna Tacuana Ribeiro	
Título do trabalho:	ESTUDO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM ILUMINAÇÃO PÚBLICA COM TECNOLOGIA LED DIMERIZÁVEL INTEGRADO A SISTEMA DE TELEGESTÃO	
Orientador:	João Areis Ferreira Barbosa Júnior	
Área de concentração:	Engenharia Aplicada e Sustentabilidade	
Linha de Pesquisa:	Eficiência Energética e Sustentabilidade	
Projeto de pesquisa de vinculação	ESTUDO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM ILUMINAÇÃO PÚBLICA COM TECNOLOGIA LED DIMERIZÁVEL INTEGRADO A SISTEMA DE TELEGESTÃO	
Titulação:	Mestre em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade	

Nesta data, reuniram-se os componentes da Banca Examinadora, Prof. Dr. João Areis Ferreira Barbosa Júnior (Presidente da banca), Prof. Dr. Geraldo Andrade de Oliveira (Avaliador Interno) e Prof. Dr. Cristiano Gomes Casagrande (Avaliador Externo) sob a presidência do primeiro, em sessão pública realizada de forma online, para procederem a avaliação da defesa de dissertação, em nível de Mestrado, de autoria de BHRUNNA TACAUANA RIBEIRO, discente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade do Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde. A sessão foi aberta pelo presidente da Banca Examinadora, João Areis Ferreira Barbosa Júnior, que fez a apresentação formal dos membros da Banca. A palavra, a seguir, foi concedida o(a) autor (a) da dissertação para, em 40 min., proceder à apresentação de seu trabalho. Terminada a apresentação, cada membro da banca arguiu o(a) examinado(a), tendo-se adotado o sistema de diálogo sequencial. Terminada a fase de arguição, procedeu-se a avaliação da defesa. Tendo-se em vista as normas que regulamentam o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade, e procedidas às correções recomendadas, a dissertação foi APROVADA, considerando-se integralmente cumprido este requisito para fins de obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA APLICADA E SUSTENTABILIDADE**. A conclusão do curso dar-se-á quando da entrega na secretaria do PPGEAS da versão definitiva da dissertação, com as devidas correções. Assim sendo, esta ata perderá a validade se não cumprida essa condição, em até **60** (sessenta) dias da sua ocorrência. A Banca Examinadora recomendou a publicação dos artigos científicos oriundos dessa Tese em periódicos de circulação nacional e/ou internacional, após procedida as modificações sugeridas. Cumpridas as formalidades da pauta, a presidência da mesa encerrou esta sessão de defesa de dissertação de mestrado, e foi lavrada a presente Ata, que, após lida e achada conforme, será assinada pelos membros da Banca Examinadora.

Decisão da banca: Aprovada

Esta defesa é parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna do IFGoiano.

Documento assinado eletronicamente por:

- Cristiano Gomes Casagrande, Cristiano Gomes Casagrande - Professor Avaliador de Banca - Universidade Federal de Juiz de Fora (21195755000169), em 16/04/2024 11:38:21.
- Geraldo Andrade de Oliveira, Geraldo Andrade de Oliveira - Professor Avaliador de Banca - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - Ifg (1), em 16/04/2024 11:18:46.
- Joao Areis Ferreira Barbosa Junior, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 16/04/2024 11:14:57.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 01/04/2024. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 588536
Código de Autenticação: 1b088a9b3e



INSTITUTO FEDERAL GOIANO

Campus Rio Verde

Rodovia Sul Goiana, Km 01, Zona Rural, 01, Zona Rural, RIO VERDE / GO, CEP 75901-970

(64) 3624-1000

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

Tese (doutorado)

Dissertação (mestrado)

Monografia (especialização)

TCC (graduação)

Artigo científico

Capítulo de livro

Livro

Trabalho apresentado em evento

Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

Matrícula:

Título do trabalho:

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: Não Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: / /

O documento está sujeito a registro de patente? Sim Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? Sim Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Documento assinado digitalmente
 **BHRUNNA TACAUANA RIBEIRO**
Data: 21/05/2024 22:43:04-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Local

Data

Ciente e de acordo:

Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

João Areis F. Barbosa Jr.

João Areis F. Barbosa Jr.
Gerente de Extensão
IF Goiano - Campus Rio Verde
Portaria nº 077 de 05 de abril de 2020

Assinado de forma digital por João Areis
Ferreira Barbosa Júnior

Dados: 2024.06.24 15:19:59 -03'00'

Assinatura do(a) orientador(a)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus por ser base das minhas conquistas e a minha família pelo apoio, carinho e amor.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, pelas bênçãos e por nunca me desamparar, mesmo em momentos mais difíceis da vida.

Agradeço a minha família, em especial a minha mãe, Aurelina de Jesus Ribeiro pelo amor e carinho.

Agradeço ao meu querido esposo, Caio Vilela Azevedo pelo incentivo para que eu pudesse alcançar meus objetivos.

Agradeço ao Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia Goiano, pela oportunidade de cursar o Mestrado Profissional em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade, agradeço à instituição e aos professores pela contribuição para meu crescimento profissional e pessoal.

Agradeço ao meu orientador, Professor João Areis Ferreira Barbosa Jr, pela disponibilidade, dedicação, paciência e orientação.

Agradeço a Prefeitura Municipal de Jataí, em especial a Secretaria de Obras do município em nome do Secretário de Obras, Tales Augusto Machado e a todos os meus colegas de trabalho.

Agradeço aos meus colegas de curso, pois mesmo distantes, residindo em diferentes cidades, conseguimos nos unir em prol da ciência e da pesquisa.

Por fim, agradeço a todos que contribuíram, direta e indiretamente para que este trabalho pudesse acontecer.

“Disse Deus: haja luz, e houve luz.
Deus viu que a luz era boa, e
separou a luz das trevas.”
(BÍBLIA, Gênesis, 1:3-4).

BIOGRAFIA DO AUTOR

Bhrunna Tacauana Ribeiro, natural de Ipameri, Goiás, nascida em 16 de março de 1990, filha de Aurelina de Jesus Ribeiro e Geraldo Vagner Ribeiro. Bacharela em Engenharia Elétrica pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás (IFG) no ano de 2015. Especialista pelo Instituto de Graduação e Pós Graduação (IPOG) do curso *Lato Sensu* em Master em Lighting Design no ano de 2022. Em 2021 ingressou no Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade na linha de pesquisa “Eficiência Energética e Sustentabilidade”.

RESUMO

Diante da crescente demanda por energia elétrica e da dependência de combustíveis fósseis, reconhecidos como fontes finitas e principais emissores de gases poluentes, torna-se cada vez mais urgente explorar alternativas para reduzir o uso dos recursos naturais, mitigar os impactos ambientais e promover uma utilização mais racional da energia elétrica. Nesse contexto, a busca por soluções eficientes no consumo de energia elétrica é um desafio premente. Considerando as faturas elevadas de consumo de eletricidade para Iluminação Pública, soluções que possam reduzir esses custos são de extrema importância para a municipalidade. A substituição da iluminação convencional por tecnologia LED já é uma realidade em muitos municípios brasileiros, especialmente por meio de iniciativas do governo federal através de programas de conservação de energia elétrica voltados para esse fim. A efficientização da Iluminação Pública demonstra-se extremamente vantajosa, com grande potencial para a redução do consumo de energia elétrica, além de melhorar a qualidade da iluminação, proporcionando melhores índices de iluminância e índices de reprodução de cores. Sistemas de telegestão surgem como elementos inovadores no cenário urbano para o controle remoto de luminárias públicas, dimerização e diagnóstico do sistema. A presente dissertação propôs um estudo de eficiência energética na Iluminação Pública no município de Jataí – GO. Realizou-se uma análise através da substituição da tecnologia convencional por LED, onde foi verificada a economia gerada e os custos de implantação das novas luminárias. Além disso, avaliou-se uma proposta de dimerização para as luminárias de maior consumo nas vias públicas do município, que ainda operam com luminárias de vapor de sódio em seu parque de iluminação. Embora os resultados tenham sido satisfatórios em termos energéticos, é importante notar que o implemento do sistema de telegestão ainda implica em um custo de aquisição elevado.

Palavras-chave: Retrofit, Eficiência Energética, LED, Iluminação Pública, Telegerenciamento.

ABSTRACT

Given the growing demand for electrical energy and dependence on fossil fuels, recognized as finite sources and main emitters of polluting gases, it is becoming increasingly urgent to explore alternatives to reduce the use of natural resources, mitigate environmental impacts and promote better use. more rational use of electrical energy. In this context, the search for efficient solutions in electricity consumption is a pressing challenge. Considering the high electricity consumption bills for public lighting, solutions that can reduce these costs are extremely important for the municipality. The replacement of conventional lighting with LED technology is already a reality in many Brazilian municipalities, especially through federal government initiatives through electricity conservation programs aimed at this purpose. The efficiency of public lighting proves to be extremely advantageous, with great potential for reducing electrical energy consumption, in addition to improving the quality of lighting, providing better illuminance indices and color reproduction indices. Telemangement systems appear as innovative elements in the urban scenario for the remote control of public lighting, dimming and system diagnosis. This dissertation proposed a study of energy efficiency in public lighting in the municipality of Jataí – GO. An analysis was carried out by replacing conventional technology with LED, where the savings generated and the costs of implementing the new luminaires were verified. Furthermore, a dimming proposal was evaluated for the highest consumption luminaires on public roads in the municipality, which still operate with sodium vapor luminaires in their lighting park. Although the results were satisfactory in energy terms, it is important to note that implementing the remote management system still involves a high acquisition cost.

Keywords: Retrofit, Energy Efficiency, LED, Public Lighting, Telemangement.

SUMÁRIO

Resumo.....	x
Abstract.....	xi
Lista de Figuras.....	xiv
Lista de Tabelas.....	xvi
Lista de Abreviaturas.....	xv
Lista de Símbolos.....	xvi
1. INTRODUÇÃO GERAL.....	19
1.1 Revisão de Literatura.....	21
<i>1.1.1 Luz.....</i>	<i>21</i>
<i>1.1.2 Sistema Visual Humano.....</i>	<i>22</i>
<i>1.1.3 Ciclo Circadiano.....</i>	<i>23</i>
<i>1.1.4 Conceitos de Iluminação.....</i>	<i>25</i>
<i>1.1.4.1 Fluxo luminoso.....</i>	<i>25</i>
<i>1.1.4.1 Intensidade luminosa.....</i>	<i>26</i>
<i>1.1.4.1 Iluminância.....</i>	<i>27</i>
<i>1.1.4.1 Luminância.....</i>	<i>28</i>
<i>1.1.4.1 Eficácia luminosa.....</i>	<i>29</i>
<i>1.1.4.1 Temperatura de cor.....</i>	<i>29</i>
<i>1.1.4.1 IRC.....</i>	<i>30</i>
<i>1.1.5 História da Iluminação Pública.....</i>	<i>31</i>
<i>1.1.6 Sistema de Iluminação Pública.....</i>	<i>34</i>
<i>1.1.7 Tecnologia LED.....</i>	<i>35</i>
<i>1.1.8 Luminária Pública LED.....</i>	<i>37</i>
<i>1.1.9 Telegestão na Iluminação Pública.....</i>	<i>39</i>
2. OBJETIVOS.....	42
2.1 Objetivo Geral.....	42
2.2 Objetivos Específicos.....	42
3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	42
4. CAPÍTULO 1 – ARTIGO 1.....	49
4.1 Introdução.....	51
4.2 Material e Método.....	53

4.2.1 Parque de Iluminação Pública do Estado de Goiás.....	54
4.2.2 Contextualização do Parque de Iluminação Pública de Jataí.....	55
4.2.3 Mapeamento das Vias.....	57
4.2.4 Classificação das Vias.....	61
4.2.5 Estudo Luminotécnico.....	63
4.3 Resultados e Discussões.....	65
4.3.1 Avaliação dos Indicadores da Iluminação Artificial Viária.....	65
4.3.2 Avaliação Luminotécnica.....	67
4.3.3 Análise Energética.....	72
4.3.4 Análise Econômica.....	73
4.4 Conclusões.....	75
4.5 Referências Bibliográficas.....	76
5. CAPÍTULO 2 – ARTIGO 2.....	80
5.1 Introdução.....	82
5.2 Material e Método.....	83
5.2.1 Informações da Iluminação Pública de Jataí – GO.....	84
5.2.2 Classificação Viária.....	86
5.2.3 Estudo Luminotécnico.....	89
5.2.3 Dimerização Dinâmica.....	95
5.3 Resultados e Discussões.....	98
5.3.1 Desempenho Energético com a Aplicação do Retrofit.....	98
5.3.2 Desempenho Energético com a Aplicação da Dimerização.....	100
5.3.3 Avaliação Econômica.....	102
5.4 Conclusões.....	104
5.5 Referências Bibliográficas.....	105
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	107

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Espectro Eletromagnético.....	22
Figura 1.2 – Olho Humano.....	22
Figura 1.3 – Ciclo Circadiano.....	24
Figura 1.4 – Fluxo Luminoso.....	25
Figura 1.5 – Ângulo Sólido e Fluxo luminoso.....	26
Figura 1.6 – Iluminância.....	28
Figura 1.7 – Temperatura de Cor Correlatada.....	30
Figura 1.8 – Índice de Reprodução de Cores.....	30
Figura 1.9 – Acendedor de Lâmpião.....	32
Figura 1.10 – Usina Hidrelétrica de Marmelos.....	33
Figura 1.11 – Partes Constituintes do LED.....	37
Figura 1.12 – Elementos da Luminária Pública LED.....	38
Figura 1.13 – Atributos na Telegestão na IP.....	41
Figura 4.1 – Panorama Geral do Parque de Iluminação Pública de Jataí GO.....	56
Figura 4.2 – Descrição das Lâmpadas Vapor de Sódio.....	57
Figura 4.3 – Localização das Avenidas no Google Earth.....	58
Figura 4.4 – Av. Marechal Rondon com Luminárias de Vapor de Sódio de 250W.....	59
Figura 4.5 – Av. Rio Claro com Luminárias de Vapor de Sódio de 150W.....	59
Figura 4.6 – Desenho realizado no software AutoCad da Av. Marechal Rondon.....	60
Figura 4.7 – Desenho realizado no software AutoCad da Av. Rio Claro.....	60
Figura 4.8 – Linhas de Isolux da Luminância da Pista de Rodagem da Av. Rio Claro com Tecnologia de Sódio.....	68
Figura 4.9 – Linhas de Isolux da Iluminância da Pista de Rodagem da Av. Rio Claro com Tecnologia de Sódio.....	69
Figura 4.10 – Linhas de Isolux da Iluminância da Pista de Rodagem da Av. Rio Claro com Tecnologia de LED.....	69
Figura 4.11 – Linhas de Isolux da Luminância da Pista de Rodagem da Av. Rio Claro com Tecnologia de LED.....	69
Figura 4.12 – Antes e Depois do Retrofit da Av. Marechal Rondon.....	71
Figura 4.13 – Antes e Depois do Retrofit da Av. Rio Claro.....	71
Figura 4.14 – Consumo de Energia.....	73

Figura 4.15 – Tempo de Retorno do Investimento.....	75
Figura 5.1 – Panorama Geral do Parque de Iluminação Pública de Jataí GO.....	84
Figura 5.2 – Distribuição das Luminárias em Jataí GO.....	85
Figura 5.3 – Classe de Iluminação da Via.....	86
Figura 5.4 – Classe de Iluminação do Passeio.....	87
Figura 5.5 – Curva Fotométrica.....	91
Figura 5.6 – Identificação das Vias V1/P2.....	92
Figura 5.7 – Identificação das Vias V2/P2.....	93
Figura 5.8 – Identificação das Vias V3/P3.....	93
Figura 5.9 – Identificação das Vias V4/P4.....	94
Figura 5.10 – Identificação das Vias V5/P4.....	94
Figura 5.11 – Desempenho Energético das Vias.....	100
Figura 5.12 – Desempenho Energético das Tecnologias Estudadas.....	102
Figura 5.13 – Estudo de Payback Simples.....	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Parque de IP de Goiás.....	54
Tabela 4.2 – Dados das Vias de Estudo.....	59
Tabela 4.3 – Tráfego Motorizado.....	61
Tabela 4.4 – Tráfego de Pedestre.....	61
Tabela 4.5 – Classe de Iluminação para Cada Tipo de Via.....	62
Tabela 4.6 – Classe de Iluminação para cada Tipo de Passeio.....	62
Tabela 4.7 – Classificação Viária.....	63
Tabela 4.8 – Requisitos Luminotécnicos Conforme Especificado pela NBR 5101/2018.....	63
Tabela 4.9 – Cenário de Simulação para Dialux Evo.....	64
Tabela 4.10 – Análise Comparativa dos Indicadores da Iluminação Convencional e LED.....	66
Tabela 4.11 – Dados Obtidos Atráves da Simulação Luminotécnica no DIALux Evo.....	68
Tabela 4.12 – Estimativa do Consumo de Eletricidade.....	72
Tabela 4.13 – Descrição Orçamentária.....	74
Tabela 4.14 – Economia Financeira após o Retrofit.....	74
Tabela 5.1 – Quantidade de Lâmpadas Vapor de Sódio.....	85
Tabela 5.2 – Tráfego Motorizado.....	87
Tabela 5.3 – Tráfego de Pedestre.....	88
Tabela 5.4 – Parâmetros das Vias.....	88
Tabela 5.5 – Requisitos de Iluminância, Luminância e Uniformidade da vias.....	90
Tabela 5.6 – Requisitos de Iluminância e Uniformidade do Passeio.....	90
Tabela 5.7 – Especificações das Luminárias.....	91
Tabela 5.8 – Classificação das Vias Tipo para Dimerização.....	95
Tabela 5.9 – Avaliação das Variáveis em Diferentes Cenários.....	96
Tabela 5.10 – Descrição dos Cenários.....	98
Tabela 5.11 – Informação da Tecnologia Convencional.....	99
Tabela 5.12 – Informação da Tecnologia LED.....	82
Tabela 5.13 – Desempenho Energético das Vias.....	101
Tabela 5.14 – Custeio com Iluminação Pública.....	103
Tabela 5.15 – Valores para Implantação do Retrofit e Telegestão.....	103

LISTA DE ABREVIATURAS

ABCIP	- Associação Brasileira das Concessionárias Privadas de Iluminação Pública
ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	- Agência Nacional de Energia Elétrica
ANSI	- Instituto Nacional Americano de Padrões
CO ₂	- Dióxido de Carbono
EPE	- Empresa de Pesquisa Energética
HPS	- High Pressure Sodium
INMETRO	- Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
IoT	- Internet das Coisas
IP	- Iluminação Pública
IR	- Infravermelha
IRC	- Índice de Reprodução de Cor
LED	- Diodo Emissor de Luz
LNP	- Lesão Nervosa Periférica
MME	- Ministério de Minas e Energia
NBR	- Norma Brasileira
NEMA	- National Electrical Manufacturers Association
NSQ	- Núcleo Supraquiasmático
PPP	- Parceria Público-Privada
PROCEL	- Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
TCC	- Temperatura de Cor Correlata
TCT	- Termo de Cooperação Técnica
TIC	- Informação e Continuação
UV	- Ultra violeta

LISTA DE SÍMBOLOS

I	- Intensidade luminosa
ϕ	- Fluxo luminoso
$d\omega$	- Variação do ângulo
ω	- Ângulo sólido
E	- Iluminância
$d\phi$	- Variação do fluxo luminoso
dS	- Variação de área
L	- Luminância
dI	- Intensidade Luminosa
L_{med}	- Luminância média da via
U_L	- Uniformidade longitudinal da via
U_O	- Uniformidade global da via
$E_{med,min}$	- Iluminância média, mínima
U	- Uniformidade da iluminância
E_{med}	- Iluminância média
U	- Uniformidade mínima

1 INTRODUÇÃO GERAL

Com o aumento contínuo da demanda por energia elétrica e a dependência dos combustíveis fósseis, amplamente reconhecidos como fontes de energia finitas e principais causadores de poluição atmosférica, torna-se essencial explorar alternativas para reduzir o consumo de recursos naturais, minimizar os impactos ambientais e incentivar uma utilização mais eficiente da energia elétrica. (Freitas *et al.*, 2015).

De acordo com a EPE (Empresa de Pesquisa Energética), em 2023, a energia hidráulica, proveniente de usinas hidrelétricas de grande, pequeno porte e centrais geradoras hidrelétricas, foi responsável por 63,1% da produção total de energia elétrica em 2022. Enquanto isso, as outras fontes energéticas contribuíram com 36,9%. Entre essas fontes, merecem destaque a energia eólica e a geração termelétrica a partir de gás natural e biomassa. (EPE, 2023).

Nesse contexto, em 2022, o consumo de energia elétrica no Brasil totalizou 509 TWh, representando um aumento de aproximadamente 2,4% em relação ao ano anterior. Observou-se também que, em comparação com 2021, o consumo de energia por classe cresceu em seis das oito categorias, com exceção das classes rural e consumo próprio. Quanto à Iluminação Pública, registrou-se um consumo de 14.358 GWh em 2022, equivalente a 2,8% do consumo total de energia elétrica do país (EPE, 2023).

Outrossim, promover a eficiência energética implica aplicar conhecimentos nos domínios da engenharia, economia e administração aos sistemas energéticos. Dada a diversidade e complexidade desses sistemas, é benéfico introduzir técnicas e metodologias para estabelecer objetivos e estratégias visando aprimorar o desempenho energético e minimizar as perdas nos processos de transporte, armazenamento e distribuição de energia. (ELECTRO *et al.*, 2012).

Assim, o emprego de luminárias mais eficientes na Iluminação Pública tem o potencial de resultar em uma redução significativa no consumo de energia elétrica. Para alcançar esse objetivo, é essencial efetuar a efficientização desses sistemas, garantindo que atendam aos requisitos mínimos estabelecidos pelas normas regulamentadoras em vigor, como a ABNT NBR 5101/2018, entre outras (Carneiro, 2018).

Na esteira desse pensamento, vale destacar que Iluminação Pública desempenha um papel de extrema importância para a sociedade, destacando a relevância de um estudo

aprofundado sobre esse tema (Casagrande, 2016). Podemos ressaltar os principais motivos pelos quais as cidades devem adotar luminárias de tecnologia LED em áreas urbanas, incluindo em reduzir o desperdício de energia elétrica, aprimorar a qualidade da iluminação das vias e a atmosfera nos espaços públicos urbanos, além de otimizar a utilização dos recursos municipais para este propósito (Muse, 2019).

Nota-se que a aplicação da telegestão na Iluminação Pública oferece eficácia no gerenciamento e controle dos processos, permitindo a dimerização de luminárias LED e contribuindo de maneira efetiva para a eficiência energética.

Quanto aos custos associados à iluminação pública, esses representam um ônus significativo para os municípios, tornando crucial a busca por soluções que reduzam as despesas com energia elétrica. Esta busca não apenas visa benefícios econômicos, mas também aprimoramentos na qualidade da iluminação e uma gestão mais eficiente do uso de eletricidade, através da adoção de produtos modernos e eficientes.

Destaca-se que a eficiência energética na iluminação pública é uma realidade, e os custos de manutenção e operação dos ativos aumentam à medida que um município se expande com novos empreendimentos e loteamentos, o que torna desafiador gerenciá-lo. Torna-se essencial buscar soluções satisfatórias na infraestrutura da iluminação pública, não apenas para reduzir o consumo de eletricidade, mas também para obter um melhor controle dos ativos de iluminação.

1.1 Revisão de Literatura

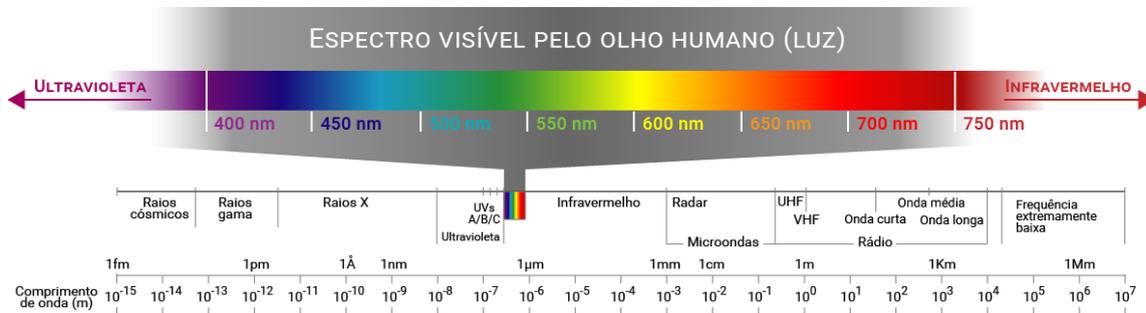
A revisão de literatura apresentada, aborda diversos aspectos relacionados à iluminação, começando com conceitos fundamentais de luz, incluindo fluxo luminoso, intensidade luminosa, iluminância, luminância, eficiência luminosa, temperatura de cor e índice de reprodução de cor (IRC). A história da iluminação pública é traçada considerando avanços contemporâneos, com destaque para a tecnologia LED como uma revolução no setor, bem como são discutidos os benefícios e desafios da telegestão na Iluminação Pública. Os artigos sobre “A eficiência energética na iluminação pública com o emprego de luminária de tecnologia led: estudo de caso no município de Jataí – GO”, e “A análise da eficiência energética na iluminação pública através da dimerização dinâmica: estudo de caso no município de Jataí- GO”, compõe os dois capítulos desta revisão de literatura. Destarte os artigos incluem introdução, metodologia, análise dos resultados, discussão, conclusões e referências bibliográficas, fornecendo uma visão abrangente sobre a aplicação dessas tecnologias em Jataí- GO, evidenciando melhorias em desempenho energético e viabilidade econômica.

1.1.1 Luz

De acordo com Young e Freedman (2016), a luz visível se manifesta como uma forma de energia radiante, apresentando-se na forma de ondas eletromagnéticas em frequências específicas, as quais têm a capacidade de sensibilizar o olho humano.

Conforme Bona (2010), a luz visível é percebida em uma estreita faixa do espectro eletromagnético. Bastos (2011) ressalta que o espectro eletromagnético compreende uma variedade de radiações, que são fenômenos vibratórios com velocidade de propagação constante, diferenciando-se entre si por sua frequência e comprimento de onda.

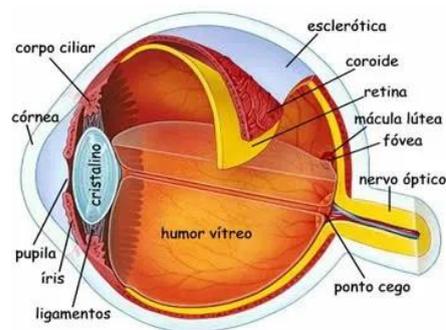
A percepção visual e sensorial humana ocorre dentro do intervalo de comprimento de onda de 380 nm a 780 nm, representando respectivamente o limite máximo da radiação ultravioleta e o limite mínimo da radiação infravermelha (Muse, 2019). Na Figura 1.1, é possível observar o espectro eletromagnético, onde as radiações perceptíveis ao olho humano se concentram em uma estreita faixa, conforme consta:

Figura 1.1 – Espectro Eletromagnético.

Fonte: Adaptado de Bigoni (2020).

1.1.2 .Sistema Visual Humano

O olho humano é um sistema óptico composto por uma estrutura quase esférica e transparente, com um diâmetro de aproximadamente 25 mm, que varia de pessoa para pessoa e conforme a direção, podendo ser transversal horizontal, transversal vertical e anteroposterior (Helene *et al.*, 2023). O olho é um órgão extremamente complexo, como ilustrado na figura 1.2, constituído por um conjunto de lentes, músculos, nervos, células sensoriais e fluidos lacrimais (Casagrande, 2016).

Figura 1.2 – Olho Humano.

Fonte: Cavalcante (2016).

Para a formação da imagem, a luz é recepcionada pelos olhos, captada e transformada na retina e interpretada pelo cérebro. O funcionamento do sistema neuro visual é diretamente ligado à eficiência na captação simultânea e simétrica das imagens retinianas, com a transformação da imagem recebida na retina através de um processo químico elétrico em

pulso que sofrem a condução ao cérebro por vias específicas visuais (Sonoda, 2023).

Na retina, encontram-se dois tipos de células fotossensíveis, chamadas cones e bastonetes, responsáveis por transformar o estímulo luminoso em impulsos elétricos, em um processo conhecido como fototransdução (Coelho, 2021).

Conforme Ferreira *et al.* (2024), os cones e bastonetes são células fotossensíveis essenciais para a visão humana. Os cones estão localizados na porção central da fóvea, enquanto os bastonetes encontram-se na região periférica da retina (Sonoda, 2023).

A visão frontal, cuja imagem se forma na fóvea, permite observar detalhes essenciais. Essa precisão é devida não apenas à alta densidade de cones nessa região, mas também ao fato de que cada cone possui uma conexão única com o nervo óptico. Isso transmite a informação para o cérebro de maneira que dois estímulos em locais diferentes sejam percebidos como sinais independentes. Os bastonetes, células mais sensíveis à luz do que os cones, são essenciais para a visão com pouca luz, mas não nos permitem distinguir cores. Isso explica nossa dificuldade em identificar cores quando a luminosidade é reduzida (Helene, 2023).

1.2.3 Ciclo Circadiano

Os efeitos da luz sobre os sistemas biológicos são estudados há bastante tempo. A luz que entra no olho humano não é responsável apenas pela formação de imagens para promover a visão, mas também por diversos efeitos biológicos não visuais, conhecidos como efeitos não- fotópicos, que incluem a regulação do relógio biológico e influenciam o estado de alerta, cognição e humor (Dias *et al.*, 2019).

Quando se trata da luz percebida pelos olhos, Vanbonnel (2005) argumenta que pesquisas médicas e biológicas têm consistentemente demonstrado que a luz, além de ter um efeito visual, exerce uma importante influência biológica não visual sobre o corpo humano. Isso implica que uma boa iluminação pode ter um impacto positivo na saúde, bem-estar, estado de alerta e qualidade do sono. Atualmente, compreende-se que os efeitos biológicos da iluminação são influenciados pela quantidade de luz, bem como pela sua distribuição espectral e espacial. Para quantificar esses efeitos, é necessário medir todos esses parâmetros (Dias *et al.*, 2014).

A luz natural está intrinsecamente ligada a processos biológicos e à regulação temporal, sendo mediada pela produção hormonal, como a melatonina, cuja secreção é influenciada pelo ciclo claro-escuro do ambiente (Tamura *et al.*, 2016). Estudos também associam a melatonina

ao tratamento de condições médicas como obesidade, câncer, insônia, enxaqueca, Alzheimer, entre outras (Pereira *et al.*, 2013).

A sincronização do organismo ao ambiente é conhecida como ciclo circadiano. De acordo com Darè (2020), sua principal função é regular o ritmo diário de luz e escuridão, além das funções corporais ao longo de um ciclo de aproximadamente 24 horas. A Figura 1.3 apresenta o diagrama completo do ciclo circadiano.

Figura 1.3 – Ciclo Circadiano.



Fonte: Adaptado de Darè (2020).

De acordo com Maierová (2018), a maioria das criaturas está sujeita a ciclos de luz e escuridão de 24 horas, aos quais se adaptaram através do desenvolvimento de ritmos biológicos. Nos mamíferos, esses ritmos são gerados e regulados pelo relógio biológico do corpo, localizado no NSQ (Núcleo Supraquiasmático), na região do hipotálamo do cérebro.

A colocação sobre o relógio biológico endógeno aponta que o mesmo é responsável por determinar as flutuações circadianas em diversos sistemas fisiológicos, desempenha um papel crucial na regulação do organismo humano. Ele influencia a atividade cerebral, a frequência respiratória, a atividade cardiovascular e os sistemas digestivo e endócrino, promovendo a liberação de hormônios como o hormônio de crescimento, hormônio estimulante da tireoide, cortisol, aldosterona, hormônio adrenocorticotrófico e corticosterona (Volcov *et al.*, 2021).

Conforme Maierová (2018), a luz da manhã desempenha um papel essencial na adequada sincronização do relógio biológico interno dos seres humanos. Ela auxilia na

prevenção de novos atrasos na fase do sono ou vigília em indivíduos cuja fase de sono já está atrasada, conhecidos como 'tardios', problema frequente na maioria das sociedades desenvolvidas.

A escuridão durante a noite também é destacada por Maierová (2018) como importante. Para evitar a interferência da luz das ruas que penetra nas salas de estar e nos quartos em áreas urbanas, muitas vezes são utilizadas cortinas de escurecimento total, especialmente com o uso de tecido blackout. No entanto, essas cortinas também bloqueiam o acesso à luz da manhã, considerada importante no processo do ritmo biológico.

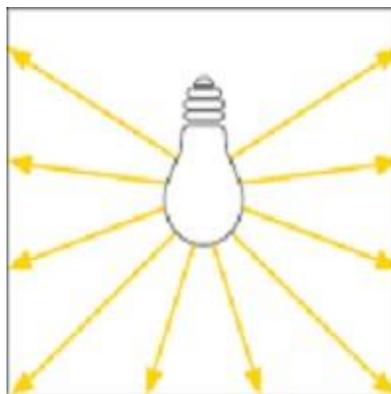
1.1.4 Conceitos de Iluminação

A Luminotécnica é uma disciplina que se dedica ao estudo da iluminação gerada por fontes artificiais, com o objetivo de otimizar suas características qualitativas e quantitativas. Isso envolve adequar o uso da iluminação à percepção visual, à eficiência energética e aos requisitos estéticos (Costa, 2013). A seguir, serão apresentadas algumas definições dessas grandezas.

1.1.4.1 Fluxo luminoso

O fluxo luminoso consiste na quantidade total de potência da radiação emitida em todas as direções por uma fonte de luz, causando estímulo ao olho humano (Galvão *et al*, 2020). Ele é expresso em *lúmen* (lm), do latim, fogo, sendo uma unidade fotométrica (Gerrini, 2010). O fluxo luminoso pode ser observado na Figura 1.4.

Figura 1.4 – Fluxo Luminoso.



Fonte: Adaptado de Leggu (2018).

De acordo com Marchi (2019), o fluxo luminoso é uma grandeza fotométrica derivada da intensidade luminosa e expressa pela Equação (1.1).

$$\phi = \int I \cdot d\omega \quad (1.1)$$

Onde,

I = Intensidade luminosa (cd);

ϕ = Fluxo luminoso (lúmen);

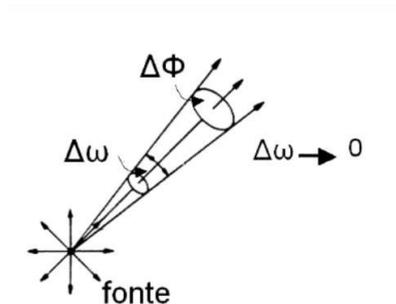
$d\omega$ = Variação do ângulo (ω), que tem sua unidade em esterradiano (sr) e é definido com o ângulo de um cone.

1.1.4.2 Intensidade luminosa

A intensidade luminosa pode ser definida pelo fluxo luminoso em uma direção específica e é expressa em candelas (cd) (Costa, 2013).

De acordo com Marchi (2019), a fonte luminosa não emite luz de maneira uniforme em todas as direções, portanto, é necessário medir os valores dos lúmens nas direções projetadas. Os vetores ou direções, cujo comprimento representa a intensidade luminosa, indicam a potência da radiação luminosa em uma dada direção. Assim, a intensidade luminosa também pode ser representada como um vetor, conforme ilustrado na figura 1.5.

Figura 1.5 – Ângulo Sólido e Fluxo Luminoso.



Fonte: Adaptado de Marchi (2019).

A Equação (1.2) determina a intensidade luminosa.

$$I = \frac{d\phi}{d\omega} \quad (1.2)$$

Onde,

I = Intensidade luminosa (cd);

ϕ = Fluxo luminoso (lúmen);

ω = Ângulo sólido (ω), medido em esterradiano ou esferorradiano.

1.1.4.3 Iluminância

A iluminância é a quantidade de luz em uma determinada superfície, ou seja, a densidade superficial de fluxo luminoso em um ponto nesta superfície. A iluminância é expressa em *lux*, do latim, luz, como sendo o fluxo luminoso unitário sobre uma área unitária de superfície, em metros quadrados (Gerrini, 2010). A equação dessa grandeza luminotécnica é expressa pela Equação (1.3).

$$E = \frac{d\phi}{dS} \quad (1.3)$$

Onde,

E = Iluminância (lux);

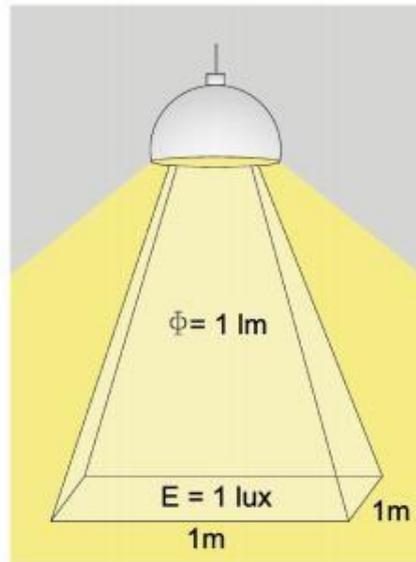
$d\phi$ = Variação do fluxo luminoso;

dS = Variação de área (m²).

De acordo com Marchi (2019), a iluminância representa a densidade de luz necessária para realizar uma determinada tarefa visual. É uma unidade fundamental na área de

luminotécnica, frequentemente utilizada para indicar o nível de iluminação necessário em diversas aplicações. Trata-se de uma medida essencial para o dimensionamento de projetos luminotécnicos, uma vez que deve ser adaptada às necessidades específicas de cada ambiente (Moura, 2015). A Figura 1.6 ilustra o conceito de iluminância.

Figura 1.6 – Iluminância.



Fonte: Proinova (2018).

1.1.4.4 Luminância

Conforme Ribeiro *et al.* (2012), a luminância é um dos conceitos mais abstratos na área de luminotécnica, pois é por meio dela que a visão se torna possível. Tregenza *et al.* (2015) destacam que a energia luminosa é captada pelas células fotossensíveis do olho, que transmitem a informação ao cérebro, permitindo a percepção da luz pelo olho humano. Portanto, a sensação de brilho percebida pelo observador é referida como luminância (Silva, 2015).

A luminância diz respeito à quantidade de energia luminosa emitida por uma superfície em uma direção específica. Sua unidade é a candela por metro quadrado (cd/m^2), também chamada de *nit*, derivada do latim, claridade (Guerrini, 2010). A luminância é representada pela Equação (1.4).

$$L = \frac{dI}{dS} \quad (1.4)$$

Onde,

L = Luminância (cd/m^2);

dI = Intensidade luminosa (cd);

dS = Variação de área (m^2).

1.1.4.5 Eficácia luminosa

É a relação entre o fluxo luminoso em lúmens produzido e a potência elétrica consumida, medida em Watt, sendo expressa em lm/W . Essa relação permite converter a potência elétrica em potência luminosa de uma determinada fonte de luz. A eficácia luminosa das fontes de luz está diretamente ligada à eficiência energética dos dispositivos utilizados em projetos luminotécnicos, tais como lâmpadas, luminárias e equipamentos auxiliares, como reatores, fontes e transformadores (Costa, 2013).

1.1.4.6 Temperatura de cor

Quando mencionamos luz quente ou luz fria, não estamos nos referindo à quantidade de calor dissipada pela luz devido ao efeito joule, mas sim ao tom de cor que ela empresta ao ambiente. A luz quente é associada a tons mais avermelhados e proporciona uma sensação de relaxamento intensificado. Por outro lado, a luz fria é relacionada a tons mais claros, gerando uma sensação de maior atividade (Camelo *et al.*, 2010).

A Temperatura de Cor Correlata (TCC) é uma especificação que descreve o tom de cor predominante, abrangendo tanto a dimensão quente (tons de amarelo e vermelho) quanto a fria (tons de azul). Fontes de luz com uma classificação de TCC abaixo de 3.200 K geralmente são percebidas como tendo uma aparência quente, enquanto aquelas com uma TCC acima de 5.000 K são tipicamente percebidas como tendo uma aparência fria. Temperaturas de cor intermediárias são consideradas neutras (Tamura *et al.*, 2018). A Figura 1.7 ilustra as diferentes temperaturas de cor.

Figura 1.7 – Temperatura de Cor Correlatada.



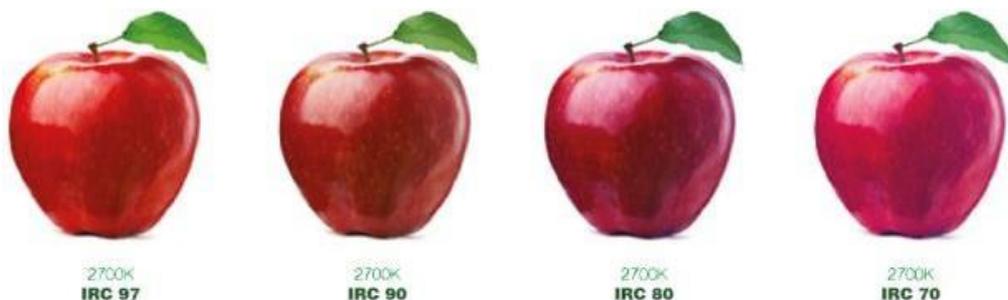
Fonte: Luz Iluminação (2022).

Nos últimos 15 anos, a importância da temperatura de cor das fontes de luz tem ganhado destaque científico devido à correlação entre o aumento da exposição das pessoas a diferentes fontes de luz, como lâmpadas e equipamentos eletrônicos, e distúrbios psicológicos, bem como a privação de luz natural. Há cada vez mais evidências de que a cor da luz emitida por uma fonte luminosa, seja ela amarelada, branca ou azulada, interfere diretamente no ciclo circadiano das pessoas (Medeiros, 2018).

1.1.4.7 IRC

Conforme Fonseca *et al.* (2013), o Índice de Reprodução de Cor (IRC) refere-se à capacidade de uma fonte de luz reproduzir as cores com fidelidade, e seu valor pode variar em uma escala que vai de 0 a 100. A Figura 1.8 ilustra a fidelidade da cor percebida pelo olho humano sob a influência de diferentes variações de IRC.

Figura 1.8 – Índice de Reprodução de Cores.



Fonte: Luz Iluminação (2022).

Segundo Feldman (2014), o índice de reprodução de cor mantém uma relação direta com a capacidade de uma fonte de luz em reproduzir as cores de forma semelhante à luz natural. Idealmente, a luz artificial deve se aproximar ao máximo das características da luz natural, que possui um índice de reprodução de cor fixado em 100, ao qual o olho humano está naturalmente adaptado. A percepção mais precisa das cores é obtida quando um objeto é iluminado pela luz natural.

1.1.5 História da Iluminação Pública

Conforme Carvalho *et al.* (2017), a finalidade da Iluminação Pública tem evoluído à medida que os sistemas de iluminação artificial são aprimorados. Santos (2005) identifica três fases distintas: na primeira fase, que vai até o advento da eletricidade, a iluminação tinha como principal objetivo proporcionar segurança; na segunda fase, do final do século XIX até os anos 80, a iluminação pública priorizava a funcionalidade do sistema, com foco maior no trânsito veicular, muitas vezes relegando os espaços públicos destinados à circulação de pedestres a um segundo plano. Na terceira fase, no final do século XX, a iluminação urbana passou a ser vista como um elemento de valorização da paisagem, tornando-se um componente significativo do movimento de *city marketing* urbano, contribuindo para criar a identidade do espaço urbano.

No Brasil, o início da Iluminação Pública remonta ao século XVIII, quando o governo instalou aproximadamente 100 luminárias a óleo de azeite em postes na cidade do Rio de Janeiro, em 1794. Anteriormente, a iluminação noturna era precária e limitava-se às luzes vindas de candeeiros, lamparinas ou velas colocadas nas janelas das edificações. Nas ruas, a única fonte de iluminação existente era de natureza religiosa, proveniente de oratórios. A falta de iluminação adequada obrigava os cidadãos a recolherem-se cedo para dentro de suas casas, fechando as portas e evitando saídas noturnas (Costa *et al.*, 2013).

Ainda, no final do século XVIII e início do século XIX, a iluminação das ruas era realizada por meio de lampiões a gás ou óleo de azeite, extraídos principalmente de baleias, lobos marinhos, cocos e mamona. Os lampiões eram fixados nas fachadas das edificações ou em postes distribuídos ao longo das ruas. Nesse contexto histórico, surgiu uma profissão muito comum chamada de “acendedor de lampião”, conforme retratado na Figura 1.9. Os acendedores de lampião eram responsáveis por acender os lampiões ao entardecer, apagá-los ao amanhecer e realizar as devidas manutenções (Carneiro, 2018).

Figura 1.9 – Acendedor de Lampião.



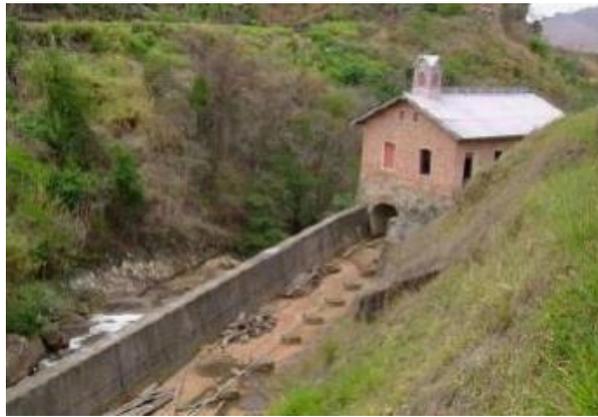
Fonte: Carneiro (2018).

Um momento crucial para a iluminação artificial ocorreu em 1879, quando Thomas Alva Edison inventou a lâmpada elétrica incandescente. Embora a ideia da lâmpada incandescente já existisse desde 1841, durante muitos anos enfrentou-se dificuldades para encontrar um material adequado para o filamento. Após extensas pesquisas, foi descoberto que o filamento de carbono, contido dentro de um bulbo de vácuo, conferia maior durabilidade ao produto, possibilitando a produção em massa das lâmpadas incandescentes. Essas lâmpadas logo se tornaram populares em todo o mundo, demonstrando serem superiores às lâmpadas de arco voltaico e às lâmpadas a gás (Sousa, 2013).

Em 1876, durante uma visita à Exposição de Filadélfia, D. Pedro II ficou impressionado com a energia elétrica, o que o levou a autorizar a introdução das invenções de Thomas Alva Edison no Brasil. Em 1879, foi inaugurada a iluminação elétrica na 11ª Estação Central da Estrada de Ferro D. Pedro II, localizada no Centro do Rio de Janeiro. Essa iluminação era composta por apenas seis lâmpadas Jablockhov, que eram acionadas pela energia elétrica gerada por dois dínamos (Froes, 2006).

A primeira usina construída foi a hidrelétrica de Marmelos, ilustrada na Figura 1.10, projetada para fornecer "força e luz", termo comum para descrever os serviços de força motriz e iluminação providos pela energia elétrica. A construção dessa usina, realizada pelo industrial Bernardo Mascarenhas, é considerada o marco inicial na história da energia elétrica no Brasil e na América Latina. Sua inauguração ocorreu em 1889, às margens do rio Paraibuna, em Juiz de Fora (MG). Portanto, um dos primeiros serviços elétricos fornecidos foi destinado à iluminação pública (Froes, 2006).

Figura 1.10 – Usina Hidrelétrica de Marmelos.



Fonte: Casagrande (2016).

Cidades como o Rio de Janeiro já apresentavam uma evolução de aproximadamente 10.000 pontos de iluminação por década já na metade do século XX. Outras grandes cidades do país também passaram por um processo semelhante de evolução da Iluminação Pública, o qual foi acompanhado por planos de expansão (Casagrande, 2016).

No final do século XX, a Iluminação Pública passou por uma inovação, substituindo as lâmpadas incandescentes por lâmpadas fluorescentes de maior eficiência. Em 1953, em caráter experimental, foram substituídas dez lâmpadas incandescentes por lâmpadas de vapor de mercúrio de fabricação nacional na Avenida Beira-Mar, no Rio de Janeiro. Essas 12 lâmpadas eram altamente eficientes para a época, possuíam uma vida útil mais longa e proporcionavam uma luz agradável ao olho humano (Froes, 2006).

Entre os anos 1980 e 1990, as lâmpadas de vapor de sódio foram introduzidas na Iluminação Pública, substituindo as lâmpadas de vapor de mercúrio. Com a criação do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), em 1985 pelo governo federal, diversas ações de eficiência energética foram implementadas entre os governos e as concessionárias que, até então, detinham os ativos de iluminação pública. No início do programa, lâmpadas incandescentes e mistas foram trocadas por lâmpadas de vapor de mercúrio em alta pressão.

No bojo das reflexões aqui desenvolvidas, ressalta-se que no ano de 2000, por meio do PROCEL RELUZ em cooperação com o Ministério de Minas e Energia (MME), mais de 2 milhões de pontos de Iluminação Pública foram modernizados em mais de 1300 municípios brasileiros (ELETROBRAS, 2015). Embora as lâmpadas de vapor de sódio tenham sido predominantemente utilizadas na iluminação pública nacional, uma grande transformação tem

sido observada no setor atualmente, com a introdução da tecnologia LED. Essa tecnologia tem como objetivo modernizar o sistema, proporcionando luminárias mais eficientes e inovadoras.

1.1.6 Sistema de Iluminação Pública

A Iluminação Pública desempenha um papel fundamental nas cidades, pois aumenta os níveis de visibilidade durante a noite, contribuindo para a segurança e bem-estar das pessoas que circulam nesses espaços. Além de impactar na segurança, a iluminação pública também pode influenciar na saúde e no conforto dos indivíduos, ao mesmo tempo em que pode causar poluição luminosa (Muse, 2019).

Segundo Resende (2014), uma boa iluminação não significa necessariamente uma iluminação excessiva, pelo contrário, é aquela que é eficiente em termos energéticos, não produz excesso de informações visuais, não superaquece os ambientes e não prejudica a acuidade visual dos usuários. Portanto, é essencial projetar a Iluminação Pública de acordo com as normativas técnicas para atender aos objetivos específicos desse serviço público.

A escolha das fontes de luz deve considerar a reprodução de cores, aspecto muitas vezes negligenciado, pois a identificação de obstáculos ou pessoas não é o único critério relevante, conforme destaca Santos (2005).

Diante desse contexto, a identidade urbana é influenciada pelos elementos naturais e artificiais da cidade, bem como pelos aspectos sociais, culturais e históricos da população. Por isso, ao iluminar elementos urbanos, é importante destacar a identidade local, utilizando contrastes e cores para criar impressões subjetivas, conforme aponta Lima (2018).

O projeto de iluminação urbana deve considerar diversos elementos históricos, econômicos, sociais e políticos, unindo arquitetura e paisagem para criar uma ambiência que represente a cultura local (Lima, 2018).

A ambiência noturna pode ser criada por meio da iluminância, temperatura de cor, destaque de monumentos e ordenação do espaço, promovendo o entendimento do ambiente durante a noite e fortalecendo o vínculo dos usuários com o espaço urbano (Moisinho, 2010).

Ainda se observa que um número crescente de municípios tem considerado a iluminação como uma ferramenta de desenvolvimento urbano, utilizando-a como estratégia para atrair turistas e promover o turismo noturno (Giordano, 2017).

Segundo a Resolução Normativa 414/2010 da ANEEL, a Iluminação Pública é um serviço público cujo objetivo é prover claridade nos logradouros públicos, incluindo ruas, praças, avenidas, túneis, jardins, entre outros (ANEEL, 2010).

Nos últimos anos, a Iluminação Pública tem passado por grandes transformações e desafios, incluindo a transferência dos ativos para os municípios, tornando-os responsáveis pela gestão, operação e manutenção do sistema, conforme determinado pela REN 414/2010 da ANEEL (ANEEL, 2010).

Nesse contexto, o custeio da iluminação pública representa uma despesa significativa para os municípios, comprometendo parte da arrecadação de tributos como IPTU, ISSQN e ITBI, além das taxas de serviços, com o objetivo de garantir a qualidade desse serviço essencial (Branco, 2017).

1.1.7 Tecnologia LED

Os LEDs representam uma tecnologia recente na área da iluminação e são considerados uma verdadeira revolução tecnológica devido à sua eficiência energética em comparação com as fontes de iluminação convencionais. A adoção de LEDs na iluminação pública pode ser vista como uma escolha sustentável devido a três características principais: alta eficiência, longa vida útil e capacidade de reciclagem (Hui *et al.*, 2010).

Inicialmente, nos anos 1960, os LEDs eram empregados apenas em sinalização ou como indicadores luminosos em dispositivos eletrônicos, devido à sua luz monocromática e baixa intensidade. No entanto, no final da década de 1990, foram desenvolvidos LEDs de alto brilho e LEDs brancos de alta potência, o que possibilitou sua utilização também para Iluminação Pública (Casagrande, 2016).

Nessa abordagem, com a ascensão do LED no mercado global, houve uma significativa transformação na maneira de selecionar luminárias, uma vez que essa tecnologia passou a oferecer uma série de benefícios. Entre esses benefícios estão a baixa emissão de calor, o baixo consumo de energia, a ausência de radiação ultravioleta (UV) e infravermelha (IR), a capacidade de direcionar a luz diretamente para a área desejada, longa vida útil, baixa emissão de CO₂ em comparação com as fontes convencionais e a ausência de mercúrio e materiais pesados em seu processo de fabricação (Bigoni, 2020).

Como ressaltado por Anonni (2020), as lâmpadas de LED têm uma ampla gama de aplicações, incluindo Iluminação Pública, onde a frequência de substituição das lâmpadas e o consumo de energia são aspectos importantes. Além disso, elas têm sido cada vez mais utilizadas em ambientes industriais e, mais recentemente, em residências. O número de

lâmpadas de LED destinadas a uso domiciliar e em outros tipos de estabelecimentos tem crescido rapidamente nos últimos anos, substituindo as lâmpadas fluorescentes (Dezombak *et al.*, 2019). Um exemplo significativo desse uso em larga escala pode ser observado no estudo de Pagden *et al.* (2020), que mostra que algumas cidades na Inglaterra reduziram seu consumo de energia com iluminação pública em até 43,7% após a substituição por luminárias de LED.

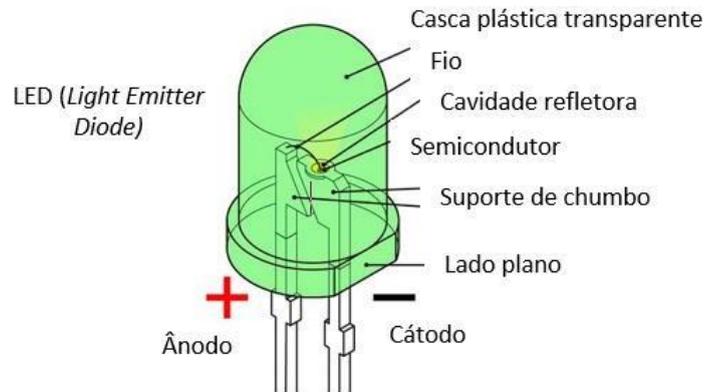
Ainda vale considerar que a aplicação do LED não se limita apenas à iluminação, seu uso com propósitos terapêuticos tem sido amplamente expandido ao longo dos anos (Dias *et al.*, 2009). Conforme destacado por Araújo *et al.* (2019), o LED é empregado em práticas clínicas para promover melhorias nos processos de cicatrização em indivíduos vítimas de queimaduras. O estudo conduzido por Soldera *et al.*, (2023) demonstra que o LED apresenta resultados promissores no processo de pós-lesão nervosa periférica (LNP), contribuindo para o reparo muscular e dos nervos, e consequentemente, avanços na reabilitação do paciente.

Na indústria avícola, o LED tem demonstrado melhorias na resposta imune das aves, bem como nas características reprodutivas, como a qualidade dos ovos produzidos, como evidenciado no estudo de Nunes *et al.* (2017). Nesse estudo, poedeiras comerciais foram submetidas a iluminação artificial utilizando fitas de LED vermelho em substituição às lâmpadas fluorescentes. Em frangos de corte, observou-se que quando expostos a comprimentos de onda na faixa azul e verde, as aves apresentaram comportamentos digestivos e de conforto mais significativos, além de permanecerem mais calmas quando expostas a comprimentos de onda na faixa branca (Lucena *et al.*, 2020).

Conforme destacado por Pinheiro *et al.* (2019), a luz é um dos principais fatores que influenciam o desenvolvimento de plantas cultivadas *in vitro*. No entanto, o crescimento das plantas não é apenas afetado pela presença ou ausência de luz, mas também pela variação na qualidade da luz. Em um estudo conduzido por Nadal *et al.* (2023), observou-se que as orquídeas do tipo *cattleya walkeriana* responderam de maneira positiva a diferentes comprimentos de onda da luz, resultando em melhorias no desempenho e na produção.

O funcionamento do LED é fundamentado na conversão de energia elétrica em radiação, que pode abranger o espectro visível ou infravermelho da luz, conforme ressaltado por Oliveira *et al.* (2019). Os Diodos Emissores de Luz (LED - *Light Emitter Diode*), são fontes luminosas construídas com base em materiais semicondutores, caracterizados por sua notável durabilidade e eficiência, como descrito por Lorenz (2015). A Figura 1.11 ilustra as componentes constituintes do LED.

Figura 1.11 – Partes Constituintes do LED.



Fonte: Adaptado de Oliveira (2019).

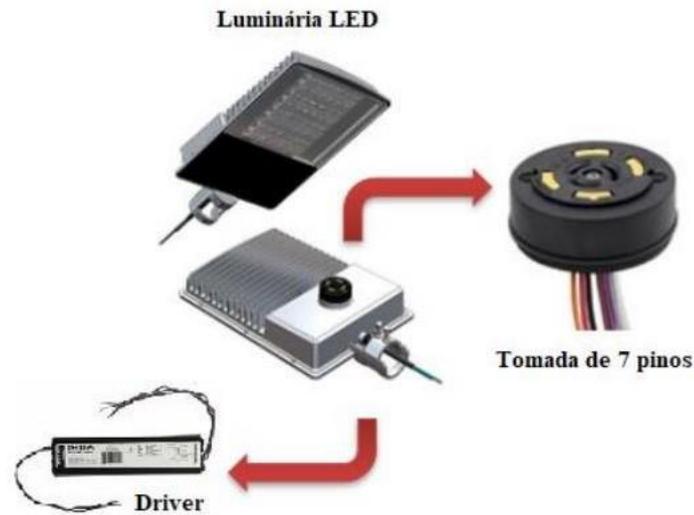
A lâmpada de LED é caracterizada pelo seu elemento fundamental, o diodo emissor de luz (LED), o que lhe confere o nome alternativo de lâmpada eletrônica, conforme destacado por Galvão *et al.* (2020). O diodo LED é um dispositivo semicondutor que possui a capacidade de converter energia elétrica em energia luminosa, distinguindo-se das demais lâmpadas por não empregar filamentos metálicos, radiação ou descarga de gases.

Estruturalmente, é composto por um ânodo e um cátodo, sendo um componente bipolar. Quando polarizado diretamente, ocorre a recombinação de lacunas e elétrons, demandando a liberação da energia armazenada pelos elétrons na forma de luz, em decorrência da passagem da corrente elétrica na junção, conforme explicado por Galvão *et al.*, (2020).

1.1.8 Luminária pública LED

As luminárias de LED se distinguem das luminárias tradicionais pela presença de módulos de LED incorporados à própria estrutura da luminária, além dos equipamentos e acessórios necessários ao funcionamento da fonte luminosa. Essa diferença é destacada por Muse (2019), que ressalta como uma característica relevante o fato de o próprio módulo de LED atuar como um dispositivo ótico responsável pela distribuição do fluxo luminoso, eliminando a necessidade de refletores e outros componentes do sistema ótico presentes nas luminárias convencionais. Na Figura 1.12, é apresentado um esquema dos elementos básicos que compõem a luminária pública de LED, incluindo o driver e a tomada de 7 pinos.

Figura 1.12 – Elementos da Luminária Pública LED.



Fonte: Adaptado ABCIP (2023).

O LED opera com baixa tensão e corrente elétrica, o que impede sua conexão direta à rede elétrica convencional. Por isso, requer um dispositivo de controle e alimentação, conhecido como driver, que desempenha diversas funções essenciais. Segundo Muse (2019), o driver é responsável por fornecer uma tensão ou corrente constante ao LED, de acordo com as especificações da lâmpada e sua aplicação. Além disso, o driver atua como um isolante entre o sistema de iluminação LED e a rede elétrica, reduzindo o risco de choques elétricos e minimizando flutuações de tensão.

Quando necessário, os drivers podem operar com dois protocolos de controle para regular o fluxo da luminária: DALI e 1-10V (em alguns casos, 0 a 10V). No contexto da Iluminação Pública no Brasil, o protocolo mais amplamente utilizado é o 1-10V, que segue um padrão aberto regulamentado pela IEC 60929. Trata-se de um protocolo analógico e unidirecional, no qual a variação do sinal de tensão contínua entre 1 e 10V resulta em uma correspondente variação de fluxo luminoso.

A prática mais comum no Brasil é a utilização de tomadas para relés fotocontroladores, as quais são normatizadas pela NBR 5123. É crucial, nesse contexto, que os equipamentos estejam preparados e possuam terminais de conexão padronizados para garantir a compatibilidade do sistema, além de serem passíveis de substituição por outros dispositivos com características semelhantes. Para a iluminação pública, a norma ANSI C136.41 permite uma conexão rápida dos equipamentos por meio de um sistema de giro e

bloqueio. Atualmente, o padrão mais difundido, devido à sua versatilidade, é o NEMA ANSI C136.41 de 7 contatos (ABCIP, 2023).

1.1.9 Telegestão na Iluminação Pública

Como um novo paradigma, as cidades inteligentes (*smart city*) surgem com o propósito de otimizar dinamicamente o ambiente urbano e melhorar a qualidade de vida dos habitantes, conforme destacado por Sookhak *et al.* (2019). Esse conceito visa proporcionar sustentabilidade e reduzir os impactos negativos sobre o meio ambiente, conforme mencionado por Rao *et al.* (2022). Esses princípios dependem da aplicação eficiente de competências técnicas, inovações tecnológicas e do uso de dados em tempo real, como ressaltado por Bhushan *et al.* (2020).

Uma das definições de cidade inteligente corresponde ao ambiente onde a Tecnologia da Informação e Comunicação (TIC) é integrada à infraestrutura, arquitetura, objetos e pessoas, com o objetivo de aprimorar processos e abordar questões sociais, econômicas e ambientais, conforme indicado por Romani *et al.* (2023). Essa integração permite que dispositivos inteligentes se conectem à infraestrutura já existente, promovendo uma maior eficiência e qualidade de vida urbana.

No âmbito das cidades inteligentes, a integração da iluminação pública com avanços tecnológicos, como o 5G e a Internet das Coisas (IoT), desempenha um papel crucial. Nesse cenário, a infraestrutura de iluminação pública se converte em um elemento central para comunicação e coleta de dados em tempo real. Soluções integradas e inovadoras, como sistemas de iluminação adaptativa, que ajustam a luminosidade de acordo com a detecção de pessoas, surgem como exemplos promissores. Essas iniciativas visam não apenas promover a eficiência energética, mas também melhorar a segurança urbana (Oliveira; Ramos, 2023).

Com a adoção da tecnologia LED na Iluminação Pública, surge a oportunidade de implementar sistemas de telegestão ou telegerenciamento, o que viabiliza a criação de sistemas inteligentes de Iluminação Pública ("*smart lighting*"). A utilização de luminárias que incorporam a tecnologia LED, combinada com tecnologias que permitem o telegerenciamento de luminárias e componentes relacionados à Iluminação Pública, pode representar um impacto econômico significativo para o setor (Casagrande, 2016).

Segundo Losso *et al.* (2021), além dos benefícios de eficiência energética

proporcionados pela telegestão, há a possibilidade de instalar um dispositivo eletrônico em cada poste da cidade, comunicando-se com a Central de Controle e Operação, criando uma rede de informações precisa e georreferenciada. De forma geral, o sistema de telegestão tem a capacidade de analisar o funcionamento de cada luminária, processar os dados coletados e realizar diversos tipos de controle, seja de forma autônoma ou não (Carloto, 2020).

Gerenciar um parque de Iluminação Pública é um desafio que cresce com sua extensão. Os sistemas de controle de iluminação por telegestão representam um avanço significativo no setor, pois suas capacidades de monitoramento remoto e controle adaptativo das luminárias permitem uma gestão mais refinada da Iluminação Pública. Isso resulta em maior eficiência energética, redução dos custos de manutenção e adaptação dos equipamentos de acordo com as necessidades específicas de cada localidade (Muse, 2019).

Em 2023, a ABCIP (Associação Brasileira das Concessionárias de Iluminação Pública) lançou a 2ª edição do guia para especificação técnica de telegestão em iluminação pública. Este guia inclui especificações técnicas destinadas a auxiliar o poder público municipal e os estruturadores de projetos de Parceria Público-Privada (PPP) de Iluminação Pública na tomada de decisões, abrangendo desde a concepção de projetos e plataformas de gestão de iluminação pública até a implantação de acessórios para cidades inteligentes.

Conforme indicado pela ABCIP (2023), a iluminação pública tem sido reconhecida como a principal infraestrutura para a implementação do conceito de cidades inteligentes, uma vez que sua distribuição abrange vastas áreas geográficas nas cidades. Dessa forma, cada ponto de iluminação tem o potencial de se tornar um ponto de conectividade. Quanto ao controle inteligente da iluminação, existem diversas tecnologias disponíveis, cada uma com diferentes níveis de funcionalidades e complexidade.

a) Sistemas convencionais de controle:

Relés fotocontroladores;

Chaves magnéticas.

b) Sistemas de Controle (Telegestão):

Equipamento de telecomando;

Drivers;

Conectividade.

Conforme mencionado pela ABCIP (2023), os elementos de uma solução de telegestão

podem variar de acordo com a arquitetura proposta, podendo incluir equipamentos do sistema convencional, como equipamentos de telecomando, aplicação de controle da telegestão e conectividade. Os principais atributos de um Sistema de Telegestão de IP pode ser conferido na Figura 1.13.

Figura 1.13– Atributos da Telegestão na IP.



Fonte: Adaptado ABCIP (2023).

Uma das opções previstas no artigo 468, inciso III, da Resolução Normativa nº 1.000/2021 para medir o consumo dos pontos de iluminação pública sem a intervenção da distribuidora é a utilização dos dados de consumo registrados pelos dispositivos do sistema de gestão da iluminação pública, instalados pelo próprio município, popularmente conhecidos como "telegestão de IP". A adoção desses sistemas de gestão tem sido cada vez mais frequente nos últimos anos, o que motivou o INMETRO a iniciar amplas discussões sobre a necessidade de regulamentação metrológica desses dispositivos.

Nesse contexto, a Portaria nº 221/2022 passou a abranger os sistemas de iluminação pública na regulamentação técnica metrológica do INMETRO. Segundo o INMETRO, reconheceu-se a importância de garantir a igualdade entre os instrumentos de medição de energia elétrica (medidores), os sistemas de medição e os sistemas de iluminação pública, além da necessidade de estabelecer o controle metrológico legal dos sistemas de iluminação pública.

A Nota Técnica de número 58/2022 da ANEEL ressalta que a adoção de sistemas de gestão de Iluminação Pública possibilita a implementação de medidas para otimizar o consumo, como a dimerização e o acionamento remoto das lâmpadas. Assim, além de proporcionar uma medição mais precisa em comparação com os métodos tradicionais de estimativa, a utilização desses sistemas de gestão promove a eficiência energética, resultando em benefícios para todo o sistema elétrico.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Realizar uma pesquisa sobre eficiência energética na Iluminação Pública na cidade de Jataí - GO.

2.2 Objetivos específicos

- Conduzir uma análise e implantação de eficiência energética, econômica e luminotécnica nas avenidas Rio Claro e Marechal Rondon, em Jataí, através da substituição de luminárias convencionais por luminárias de tecnologia LED.
- Analisar a viabilidade econômica e energética da implementação da dimerização dinâmica em luminárias de tecnologia LED na cidade de Jataí - GO.

3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCIP, Associação Brasileira das Concessionárias de Iluminação Pública (2023). Telegestão em Iluminação Pública. Disponível em: https://www.associacaoabcip.com.br/_files/ugd/9d5550_df8c50a3c433453783b0c7d730b162a5.pdf Acesso: 13/01/2024.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5101: **Iluminação Pública**. São Paulo, 2018.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). **Resolução Normativa nº 414, de 9 de setembro de 2010**.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). **Nota Técnica nº 0058/2022, de 8**

Setembro de 2022.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). **Resolução Normativa nº1000/2021, de 7 Dezembro de 2021.**

ANONNI, R. **Resíduos de lâmpadas de LED:** Desmonte, caracterização e desempenho da integração de lixiviação, precipitação e ultrafiltração na recuperação de metais. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2020.

ARAÚJO, M, J; MARTINS, G, B. Utilização do diodo emissor de luz (LED) na cicatrização de queimaduras: revisão sistemática da literatura. **Revista Pesquisa em Fisioterapia.** v. 9, nº 1, pag. 108 – 119, fev. 2019.

BASTOS, F. C. **Análise da política de banimento de lâmpadas incandescentes do mercado brasileiro.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: 2011.

BHUSHAN, B; KHAMPARIA, A; SAGAYAM, K, M; SHARMA, S, K; AHAD, M, A; DEBNHAT, N, C. Blockchain for smart cities: A review of architectures, integration trends and future research directions. **Sustainable city and Society.** v. 61, 102360, out. 2020.

BIGONI, S. **O comportamento de luminárias LED utilizadas em instalações no setor comercial e a sua relação com a temperatura ambiente e umidade relativa do ar.** Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2020.

BONA, J. **Estudo de diferentes tecnologias, métodos e processos para eficiência energética de sistemas de iluminação aviários.** Dissertação de Mestrado. Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento. Curitiba: 2010.

BRANCO, J, C. A Contribuição de Iluminação Pública: uma análise segundo o Ordenado Jurídico/Tributário Brasileiro. **Revista Interdisciplinar de Direito .** v 12. n 2, p. 365 - 377, fev. 2017.

CARLOTO, F, G. **Sistema de telegestão para iluminação pública usando comunicação Lorawan.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria: 2020.

CAMELO, G; MONTEIRO, B; FALEIRO, M; LINCOLN, R; AGOSTINHO, J; OLIVEIRA, A; LEITE, L. Luminotécnica – Eficiência Energética. **Revista Exacta.** v.3, n. 2, p. 30 – 35, 2010.

CARNEIRO, A. L. **Gestão da qualidade aplicada a implantação de tecnologia LED na iluminação pública.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Maranhão. São Luiz: 2018.

CARVALHO, F, S. TREVISAN, S, M. Sustentabilidade e Eficácia Energética em Iluminação Viária: Método de Medição. **Revista Intellectus.** v 1, n 38, p. 122 – 135, 2017.

CASAGRANDE, C. G. **Desafios da iluminação pública no Brasil e nova técnica de projetos luminotécnicos fundamentada na fotometria mesópica.** Tese de Doutorado. Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora: 2016.

CAVALCANTE, K, C. “Defeitos na Visão Humana”. Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilestola.uol.com.br/fisica/defeitos-na-visao-humana.htm>. Acesso: 02/06/2024.

COELHO, A, L, M, B. Aspectos sobre a visão humana em uma abordagem interdisciplinar no ensino médio. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 38, n. 2, p. 1096 – 1112, ago. 2021.

COSTA, G. J. C., ROIZENBLAT, I., SIQUEIRA, M. C. e DAVID, R. M. “ Panorama e conceito sobre iluminação residencial, comercial e pública”. **Iluminação Eficiente – Iniciativas da Eletrobras Procel e Parceiros**. Vasconcellos, L. E. M e Limberger, M. A. C (Organizadores). Eletrobras Procel. Rio de Janeiro, 2013.

COSTA, G. J. C. **Iluminação econômica: cálculo e avaliação**. 4. ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2013.

DARÈ, A. As Relações Terapêuticas da Iluminação. O conforto luminoso através da fibra ótica. **Convergências – Revista de Investigação e Ensino das Artes**. v. 25, p. 23-34, mai.2020.

DEZOMBAK, R; ANTONOPOULOS, C; DILLON, H, E. Equilibrando a inovação tecnológica com a minimização da carga de resíduos: uma análise da indústria global de iluminação. **Gestão de Resíduos**. v. 92, p. 68 – 74, abr. 2019.

DIAS, M, V; SCARAZZATO, P, S; MOSCHIM, E; BARBOSA, F, R. Iluminação e saúde humana: estado da arte em dispositivos de medição de luz no nível dos olhos. **Pós. Revista do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da FAUUSP**. v. 21, n. 36, p. 210-227, dez. 2014.

DIAS, I, F, L; SIQUEIRA, C, P, C, M; FILHO, D, O, T; DUARTE, J, L; LAURETO, E; LIMA, F, M; SILVA, F, P; CASTRO, V, A, B; KASHIMOTO, R, K; DURANTE, H. **Semina. Ciências Exatas e Tecnológicas**. v. 3, n. 1, p. 33 – 40, jun. 2009.

DIAS, M, V; MOTAMED, A; SCARAZZATO, P, S; SCARTEZZINI, J, L. Dispositivo vestível para medição da iluminância pupilar. **Ambiente Construído**. v. 19, n. 2, p. 129 – 143, jun. 2019.

ELECTRO, UNIFEI, EXCEN & FUPAI (2012). Eficiência energética: fundamentos e aplicações. Campinas. Disponível em: https://www.voltimum.com.br/sites/www.voltimum.com.br/files/pdflibrary/01_livro_eficiencia_energetica.pdf. Acesso: 13/02/ 2021.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. “**Anuário estatístico de energia elétrica 2023. Ano base 2022**”. 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>. Acesso em 21/02/2024.

FELDMAN, Daniel Coelho, Índice de Reprodução de Cor. **Revista Lume Arquitetura**, n.º. 70,p. 66-71, 2014. Disponível em: https://www.lumearquitectura.com.br/lume/Upload/file/pdf/Ed_70/ed_70%20At%20-%20IRC.pdf. Acesso: 11/12/2023.

FERREIRA, F, H; RAUEN, F; MESQUITA, A; CATELLI, F. Uma proposta interdisciplinar

- acerca da formação da imagem no olho humano. **Scientia Cum Industria**. v. 12, p. 1-5, mar. 2024.
- FONSECA, I, C, L; ROSA, L, P; FELDMAN, D; FREITAS, M, A; LORENZO, A; KRAUSE, C, B. Proposta para avaliação do sistema de iluminação artificial de edificações residenciais, em LEDs, segundo o método de densidade de potência instalada proposto RTQ-C. **Cadernos PROARQ**. n° 20, p. 183 – 196, jul. 2013.
- FREITAS, J, C; SANTOS, J, A; CÂNDIDO, S, M; RAMOS, D, P. Energias Renováveis, Clima e Mudanças Climáticas. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**. v. 4, p. 317 – 329, dez 2015.
- FRÕES DA SILVA, L. L. **Iluminação Pública no Brasil: Aspectos Energéticos e Institucionais**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: Coppe/UFRJ 2006.
- GIORDANO, E. *Outdoor lighting design as a tool for tourist development: the case of Valladolid*. **European Planning Studie**. v. 26 p. 55 – 74, ago. 2017.
- GUERRINI, D. P. Iluminação: teoria e projeto. 2. ed. São Paulo: Érica, 2010.
- HELENE, O; FERNANDES, I, S; MARTINS, T, G, S. Difração e o olho humano. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. v. 45, fev. 2023.
- HUI, S, Y, R; LI, S, N; TAO, X, H; CHEN, W. A Novel Passive Off-line Lighting Emitting Diode (LED) Driver with Long Lifetime. **25° Conferência e Exposição Anual de Eletrônica de Potência Aplicada (APEC) da IEEE**. p. 594 – 600, 2010.
- INMETRO: Regulamentação técnica metrológica consolidada para sistemas de medição ou medidores de energia elétrica ativa e/ou reativa, eletrônicos, monofásicos e polifásicos e sistemas de iluminação pública. Portaria n° 221, Abril 2022.
- LIMA, M. A integração do Plano Diretor de Iluminação com o Plano Diretor: estudo de caso Cingapura e Putrajaya. **Paisagem e Ambiente**. n. 41, p. 11 – 34, abril. 2018.
- LORENZ, K; MARQUES, J, G; MONTEIRO, T; Diodos Emissores de Luz e Iluminação. **Gazeta de Física**. v. 39, n. 1, p. 50 – 54, 2015.
- LOSSO, A, L; QUADROS, M, F, L; VITOR, A; VERSAGE, R, S. Cidades inteligentes: Análise de um mesoclima utilizando a telegestão da iluminação pública no município da Palhoça – Santa Catarina, Brasil. **Estrabão**. v. 2, pag. 180 – 187, 2021.
- LUCENA, A, C; PANDORFI, H; ALMEIDA, G, L, P; GUISELINI, C; ARAÚJO, J, E, M; RODRIGUES, T, P, N, S, R. Comportamento de frangos de corte submetidos a diferentes espectro de luz e iluminâncias. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 24, n. 6, p. 415-421, mar. 2020.
- MAIEROVÁ, L. "Public Lighting, Public Health," 2018 VII. Lighting Conference of the Visegrad Countries (Lumen V4), Trebic, Czech Republic, 2018, pp. 1-5, doi:

10.1109/LUMENV.2018.8521032. Disponível em:
<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8521032&isnumber=8520961>.
 Acesso: 03/02/2024.

LUZ ILUMINAÇÃO.Tudo Sobre Temperatur de Cor e IRC. Luziluminação, 2022.
 Disponível em: <https://luziluminacao.com.br/tudo-sobre-temperatura-de-cor-e-irc/>. Acesso:
 13/03/2024.

MARCHI, B, Z. Avaliação de sistemas de iluminação externa considerando a visão mesópica.Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora: 2019.

MEDEIROS, M, F, M. **Influência da temperatura de cor da luz no desempenho e sensações de alunos em baixa latitude**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal: 2018.

MOISINHO, F, E, F. **Patrimônio cultural e iluminação urbana: Diretrizes de intervenção luminotécnica no centro histórico de São Cristóvão**. Dissertação de Mestrado. Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo: 2010.

MOURA, M. **Iluminação de cenários utilizando a tecnologia LED**. Tese de Doutorado. Universidade Federal Fluminense. Niterói: 2015.

MUSE, L. P. **Iluminação Pública no contexto das Cidades Inteligentes: matriz multicritério para aplicação LED da IoT no Brasil**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: 2019.

NADAL, M, C; MACHADO, N, B; SANTOS, C, S; FLORES, J, H, N; DÓRIA, J; PASQUAL, M. Impacto da luz monocromática no desenvolvimento in vitro de *Cattleya walkerian* e efeitos na aclimatização. **Ornamental Horticulture**. v. 29, n. 2, p. 238 – 248, jun. 2023.

NUNES, K, C; GARCIA, R, G; NAAS, I, A; EYNG, C; CALDARA, F; SGAVIOLI, S; ROMBOLA, L, G; Iluminação artificial com fitas de LED em substituição à lâmpada fluorescente para poedeiras comerciais. **Archivos de Zootecnica**. v. 66, n. 253, p. 1 – 5, jan. 2017.

OLIVEIRA, I, N; RAMOS, J, A, P; SILVA, W, L; CHAVES, V, D; MELO, C, A, O. Estudo das propriedades do Diodo Emissor de Luz (LED) para a determinação da constante de Planck numa maquete automatizada com o auxílio da plataforma Arduino. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. v. 42, jul. 2019.

OLIVEIRA, K, C, F; RAMOS, H, R. Cidades inteligentes: desafios e oportunidades na itegração da iluminação pública e a tecnologia 5G. **Revista de Tecnologia & Gestão Sustentável**. v. 2, n. 7, pag. 59-71, 2023.

RAO, P, M; DEEBAK, B, D. Security and privacy issues in smart cities/industries: technologies, applications, and challenges. **Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing**. v. 14, pag. 10517-10553, fev. 2022.

PAGDEN, M; NGAHANE, K; AMIN, M, S, R. Mudando a cor da noite nas ruas urbanas – LED Sistema de iluminação noturno. **Ciências do Planejamento Socioeconômico**. v. 69, fev. 2019.

PINHEIRO, M, V, M; SCHMIDT, D; DIEHL, M, I; SANTOS, J; THIESEN, L, A; AZEVEDO, G, C, V; HOLZ, E. Propagação in vitro de cultivares de alpinia em diferentes fontes de luz. **Horticultura Ornamental**. v. 25, n. 1, p. 49 – 54, dez. 2018.

Proinova. Índice do Recinto. Proinova, 2018. Disponível em: <https://pro-inova.com/tag/indice-do-recinto/>. Acesso: 15/01/2024.

RESENDE, D, C, C; JÚNIOR, O, L. Fundamentos para projetos luminotécnicos comerciais: enfoque em livrarias. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**. v. 9, n. 1, p. 01 – 21, jul. 2014.

RIBEIRO, Ana Cristina Cota et al. O Emprego da tecnologia LED na iluminação pública. **Revista E-Xacta**, vol. 5, n. 1, pag. 111-132, Belo Horizonte, 2012.

ROMANI, G, F; PINOCHET, L, H, C; PARDIM, V, I; SOUZA, C, A. A segurança como fator-chave para a cidade inteligente, a confiança dos cidadãos e o uso de tecnologias. **Revista de Administração Pública**. v. 57, n. 2, pag. 1-27, Jan. 2023.

SANTOS, E, R. **A Iluminação Pública como elemento de composição da paisagem urbana**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Curitiba: 2005.

SILVA, C, G, M. **Avaliação da utilização das lâmpadas LED em laboratórios de análises: uma visão psicofísica nos laboratórios de Química e Biologia do Instituto Federal de São Paulo**. Tesede Doutorado. Universidade de São Paulo. São Paulo. 2015.

SOLDERA, C, B; GREGIO, V, A; ANDREO, L; MALAVAZZI, T, C, S; SILVA, F, R; DEANA, A, M; FERNANDES, K, P, S; FERRARI, R, A, M. Fotobiomodulação com LED induz melhora na funcionalidade da marcha em ratos após lesão nervosa periférica. **Conscientiae Saúde**. v. 21, n. 1, p. 1 - 12, dez. 2023.

SONODA, R, T. Saúde Neuro Visual e a Aprendizagem. Recima21 – **Revista Multidisciplinar**. v. 4, n. 1, pag. 1-9, jan. 2023.

SOOKHAK, M; TANG, H; HE, YING; YU, F, R. Security and Privacy of Smart Cities: A Survey, Research Issues and Challenges. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**. v. 21, n. 2, pag. 1718-1743, ago. 2019.

SOUSA, A. C. G. **Os engenheiros no fim do século XIX: ações e ideias**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2013.

SOUZA, Edivaldo. Fluxo Luminoso / Capacidade Luminosa. Leggu, 2018. Disponível em: <https://www.leggu.com.br/fluxo-luminoso/#page-content>. Acesso: 23/02/2024.

TAMURA, C, A; KRUGER, E, L. Estudo piloto em câmara climática: efeito da luz natural em aspecto de saúde e bem-estar não relacionados a visão. **Ambiente Construído**. v. 16, n.2, p. 149 – 168, jun. 2016.

TREGENZA, P.; LOE, D. Projeto de iluminação. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

VOLCOV, C, F; PINHEIRO, E, M; TSUNEMI, M, H; AMARAL, F, G; AVELARI, A, F, M; HOCKING, J; COCAL, K, P. Estudo quase experimental dos efeitos da iluminação no repouso, atividade e melatonina em mulheres no pós – parto. **Revista Brasileira de Enfermagem**. v. 74, n. 06, p. 1-8, jan. 2021.

YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. Física VOL IV: ótica e física moderna. 14. ed. São Paulo: *Pearson Education do Brasil*, 2016.

4 CAPÍTULO 1 – ARTIGO 1

ESTUDO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA ILUMINAÇÃO PÚBLICA COM O EMPREGO DE LUMINÁRIA DE TECNOLOGIA LED: ESTUDO DE CASO NO MUNICÍPIO DE JATAÍ – GO

(Artigo a ser submetido à revista Paranoá / Qualis - A3)

RESUMO

Este estudo apresenta uma análise comparativa realizada no município de Jataí, Goiás, através da implementação de um projeto de eficiência energética na iluminação pública. O projeto envolveu a substituição de luminárias convencionais de vapor de sódio por luminárias de tecnologia LED (Diodo Emissor de Luz) em duas vias importantes da cidade, sendo elas, Avenida Rio Claro e Avenida Marechal Rondon, totalizando 124 luminárias públicas. Isso resultou em uma melhoria na eficiência energética de cerca de 53%, o que corresponde a uma redução anual de 62.691 kWh. A adoção de luminárias mais eficientes proporcionou melhor desempenho em termos de indicadores de iluminação artificial, como um índice de reprodução de cor (IRC) superior na tecnologia LED, maior eficiência energética das luminárias e ajustes nos níveis de iluminância e luminâncias nas vias. Na Av. Rio Claro, por exemplo, a iluminância na via aumentou de 19,08 lux para 29,19 lux e a luminância que antes do retrofit era de 1,19 cd/m² passou para níveis de 1,89 cd/m² com o uso da tecnologia LED, resultando em ambientes mais seguros e melhor iluminação para os transeuntes. Um estudo de viabilidade financeira demonstrou que a tecnologia LED é uma alternativa economicamente viável, com um período de retorno do investimento (payback) de 39 meses. As contribuições deste estudo destacam a importância das políticas públicas na Iluminação Pública, visando a redução do consumo de energia elétrica e uma gestão mais sustentável dos recursos energéticos.

Palavras-chave: Eficientização, Retrofit, Luminária Pública, Luminotécnica.

ABSTRACT

This study presents a comparative analysis carried out in the municipality of Jataí, Goiás, through the implementation of an energy efficiency project in public lighting. The project involved replacing conventional sodium vapor luminaires with LED (Light Emitting Diode) technology luminaires on two important roads in the city, Avenida Rio Claro and Avenida Marechal Rondon, totaling 124 public luminaires. This resulted in an improvement in energy efficiency of around 53%, which corresponds to an annual reduction of 62,691 kWh. The adoption of more efficient luminaires provided better performance in terms of artificial lighting indicators, such as a higher color rendering index (CRI) in LED technology, greater energy efficiency of luminaires and adjustments in illuminance and luminance levels on the roads. On Av. Rio Claro, for example, the illuminance on the road increased from 19.08 lux to 29.19 lux and the luminance, which before the retrofit was 1.19 cd/m², increased to levels of 1.89 cd/m² with the use of LED technology, resulting in safer environments and better lighting for passersby. A financial feasibility study demonstrated that LED technology is an economically viable alternative, with a payback period of 39 months. The contributions of this study highlight the importance of public policies in public lighting, aiming to reduce electricity consumption and more sustainable management of energy resources.

Keywords: Efficiency, Retrofit, Public Lighting, Lighting Technics.

4.1 Introdução

O aumento da população e a tendência de urbanização têm sido evidentes nos últimos anos. As projeções apontam que as cidades em todo o mundo terão um acréscimo de 2,2 bilhões de habitantes até 2050. Estima-se que a população urbana aumente de 56% do total global em 2021 para 68% em 2050. (UNITED NATIONAL, 2022).

Com o aumento da população nos centros urbanos, há uma crescente demanda por energia elétrica para garantir a segurança e a prestação de serviços públicos. Além disso, diante da escassez crescente e do aumento dos preços dos combustíveis fósseis, torna-se imperativo adotar uma gestão mais eficiente da energia (Dizon *et al.*, 2021).

A intensidade energética, ou eficiência energética, é uma medida que pode abordar simultaneamente as contradições entre o crescimento econômico e a redução de emissões, geralmente expressa como o consumo de energia por unidade do Produto Interno Bruto (PIB). Apesar de a eficiência energética poder acarretar custos iniciais, a intervenção política se faz necessária devido a fatores como uma alta taxa de desconto, que pode dificultar a adoção de medidas de eficiência energética (Zhang *et al.*, 2019).

Entre 2010 e 2020, registrou-se uma aceleração na melhoria da intensidade energética em 1,7% ao ano, resultando em uma redução das emissões de CO₂ provenientes da queima de combustíveis em 6 Gt de CO₂ por ano até 2020. Apesar dos indícios iniciais de recuperação, observaram-se melhorias modestas na intensidade energética global, abaixo de 1% ao ano, entre 2020 e 2021. As tecnologias energeticamente eficientes desempenham um papel crucial na contenção do crescimento do consumo de energia, contribuindo significativamente para a redução do uso de combustíveis fósseis e das emissões em todos os setores da economia (IEA, 2022).

Em 2021, tanto o consumo de energia para iluminação quanto as emissões decorrentes aumentaram, após a redução da atividade comercial em 2020. No entanto, devido aos avanços na eficiência energética dos produtos de iluminação, espera-se que o consumo seja reduzido, apesar do aumento na quantidade de iluminação utilizada nos edifícios. Neste ano, foram registrados progressos significativos na adoção da tecnologia LED (*Light Emitting Diode*), bem como nos ganhos de eficiência luminosa. Com a iluminação LED representando mais de 50% do mercado global, muitos países estão gradualmente eliminando a iluminação fluorescente em favor do LED como principal tecnologia de iluminação (IEA, 2022).

Segundo Allwyn *et al.* (2021), a popularidade das lâmpadas HPS (High Pressure

Sodium) na iluminação pública se deve a sua alta eficiência energética. Contudo, com o crescente consumo de energia elétrica e preocupações com o meio ambiente, têm-se buscado alternativas mais eficientes, assim, o emprego de luminárias de tecnologia LED no cenário da iluminação pública, vem se mostrando uma excelente opção em substituição das lâmpadas HPS existentes.

Ainda, conforme observado por Allwyn *et al.* (2021), as lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão tornaram-se populares na Iluminação Pública devido à sua alta eficiência energética. No entanto, diante do aumento do consumo de energia elétrica e das preocupações ambientais, têm surgido demandas por alternativas mais eficientes. Nesse contexto, a adoção de luminárias com tecnologia LED na Iluminação Pública emerge como uma excelente opção para substituir as lâmpadas vapor de sódio existente.

Em 2022, o consumo total de energia elétrica no Brasil atingiu 509 TWh, representando um aumento de cerca de 2,4% em relação ao ano anterior. Embora a distribuição regional ainda esteja concentrada no Sudeste, houve modificações significativas nas diversas regiões ao longo do ano. O consumo de energia elétrica destinado à iluminação pública totalizou 14.358 GWh em 2022, o que equivale a 2,8% do consumo total de energia elétrica no país. A classe industrial permanece como a principal consumidora de energia, com aproximadamente 184.383 GWh. (EPE, 2023).

Segundo Araújo *et al.* (2020), o Brasil possui aproximadamente 16 milhões de pontos de Iluminação Pública em seu parque, dos quais 96,72% ainda utilizam tecnologias com alto consumo energético.

Souza *et al.* (2022) ressalta que, apesar dos programas de eficiência energética da Iluminação Pública, como o RELUZ do Programa Nacional de Conservação de Energia da Eletrobras, Procel, o país ainda apresenta um grande potencial de eficiência. Para alcançar uma gestão mais eficiente dos recursos energéticos e otimizar o uso dos recursos públicos, são necessárias implementações de eficiência na Iluminação Pública.

Este artigo tem como foco de estudo o município de Jataí, localizado no sudoeste do estado de Goiás. Atualmente, Jataí possui um parque de iluminação composto por aproximadamente 17 mil unidades de luminárias, com um consumo médio estimado em 920.000 kWh (Equatorial, 2023). A principal contribuição deste estudo reside na exposição dos resultados derivados da análise de eficiência da Iluminação Pública conduzida em duas vias significativas de Jataí. Destaca-se a economia alcançada no consumo de energia elétrica, aprimoramento na qualidade da iluminação por meio da adoção de produtos de melhor desempenho e a viabilidade financeira decorrente dessas medidas.

4.2 Material e Método

A metodologia utilizada para a elaboração deste artigo envolve uma análise detalhada dos resultados obtidos por meio de um estudo comparativo, abordando aspectos quantitativos e qualitativos da iluminação pública de duas vias localizadas no município de Jataí, estado de Goiás. Essas duas vias foram selecionadas com base na sua inclusão na chamada pública do Procel Reluz 2019, a qual contemplou um total de 5 vias no município de Jataí com melhorias na Iluminação Pública.

O projeto realizado em Jataí teve uma duração aproximada de dois anos, iniciando com a assinatura do Termo de Cooperação Técnica (TCT) - PRF nº 039/2020, entre o município e a Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (Eletrobras) em março de 2020 e encerrando em abril de 2022. O processo de execução do projeto envolveu várias etapas, inicialmente com o mapeamento de dados das vias no local para obter informações precisas para a elaboração do projeto gráfico. Em seguida, foi desenvolvido o projeto luminotécnico, seguido pela delimitação do escopo do projeto, cotação de mercado para estimativa de orçamento, licitação de materiais e mão de obra, execução da obra e finalização do TCT.

No estudo de caso em Jataí, foi conduzida uma análise comparativa entre a iluminação convencional, utilizando lâmpadas de vapor de sódio, e as luminárias LED. Nesse estudo comparativo, foram avaliados o consumo energético de ambas as tecnologias e a economia resultante da efficientização.

O estudo teve início com uma inspeção *in loco* para identificar as tecnologias presentes e avaliar as características das vias, incluindo dimensões como passeios e pista de rodagem, além de verificar a distância entre os postes e as especificações dos braços extensores. Essa etapa permitiu obter dados técnicos das vias existentes, essenciais para conduzir o estudo luminotécnico.

Durante o estudo, foram comparados diversos indicadores qualitativos e quantitativos da iluminação, tais como fluxo luminoso emitido pelas fontes, IRC (Índice de Reprodução de Cor), vida útil, temperatura de cor de correlatada (TCC), eficiência energética, e análise luminotécnica utilizando o software Dialux Evo. Por meio desse software, foi possível analisar o comportamento da iluminância, uniformidade e luminância das vias estudadas com o uso das duas tecnologias.

4.2.1 Parque de Iluminação Pública do Estado de Goiás

Com base nos dados fornecidos pela Equatorial Energia, a concessionária atual do estado de Goiás, o parque de Iluminação Pública do estado compreende aproximadamente 1.018.887 pontos de iluminação, abrangendo uma variedade de tecnologias. Na Tabela 4.1, são apresentadas as características dos pontos de IP existentes (EQUATORIAL, 2023).

Tabela 4.1 – Parque de IP de Goiás.

Tipo de Tecnologia	Quantidade	Participação (%)
Fluorescente	28.411	2,79%
Halógenas	420	0,04%
Incandescente	1.823	0,18%
LED	227.375	22,32%
Vapor de Mercúrio	86.540	8,49%
Vapor de Sódio	627.328	61,57%
Multi-Vapor Metálico	42.793	4,20%
Mista	4.111	0,40%
Outras	86	0,01%
Total	1.018.887	100,00%

Fonte: Adaptado da EQUATORIAL (2023).

Com base nos dados fornecidos pela Equatorial Energia, constatou-se que o parque de Iluminação Pública do estado de Goiás carece de iniciativas de modernização, uma vez que as lâmpadas convencionais ainda predominam, totalizando 77,68% do total de pontos de IP no estado. Dentro desse montante, as lâmpadas de vapor de sódio destacam-se com o número mais expressivo, totalizando 627 mil unidades.

A potência total instalada do parque de IP do estado de Goiás é de cerca de 127.050,258 kW, sem considerar os equipamentos auxiliares como relés fotoelétricos e os reatores, equipamentos essenciais para o funcionamento das tecnologias convencionais e que possuem um consumo estimado de 15% a mais do total consumido de um sistema convencional. As lâmpadas de sódio são as que apresentam o maior consumo dentre o total apresentado pela concessionária, próximo de 80.476,66 kW, o que corresponde a 63,34% do total da energia consumida, sendo seguida pelas luminárias de LED, que tem uma participação de 16,49% no cenário, correspondendo a uma potência total de aproximadamente de 20.949,16 kW.

Neste contexto, fica evidente que existe um grande potencial de efficientização no Parque de IP do estado de Goiás. A eficiência energética de uma instalação implica em uma utilização racional da energia o que, por sua vez, possui uma consequência direta na redução do consumo energético. Para a IP este aspecto revela-se de extrema importância em especial para as autarquias, pois ao nível financeiro, o que os municípios pretendem é encontrar soluções que reduzam os custos associados a IP (Bovolenta *et al.*, 2020).

Rudnicki (2020) ressalta que em um projeto energeticamente eficiente, necessita-se observar vários parâmetros, destacando-se a qualidade da iluminação, a quantidade de iluminação, a eficácia dos equipamentos e o tipo de controle empregados.

Ainda, avaliando os dados obtidos pela concessionária de energia de Goiás, é perceptível grande número de produtos que empregam em sua composição o mercúrio. Dentre as lâmpadas convencionais tem-se as fluorescentes tubulares, vapor de sódio a baixa e alta pressão, vapor de mercúrio, mista, vapor metálico e lâmpadas fluorescentes compactas. (Pultrini *et al.*, 2016).

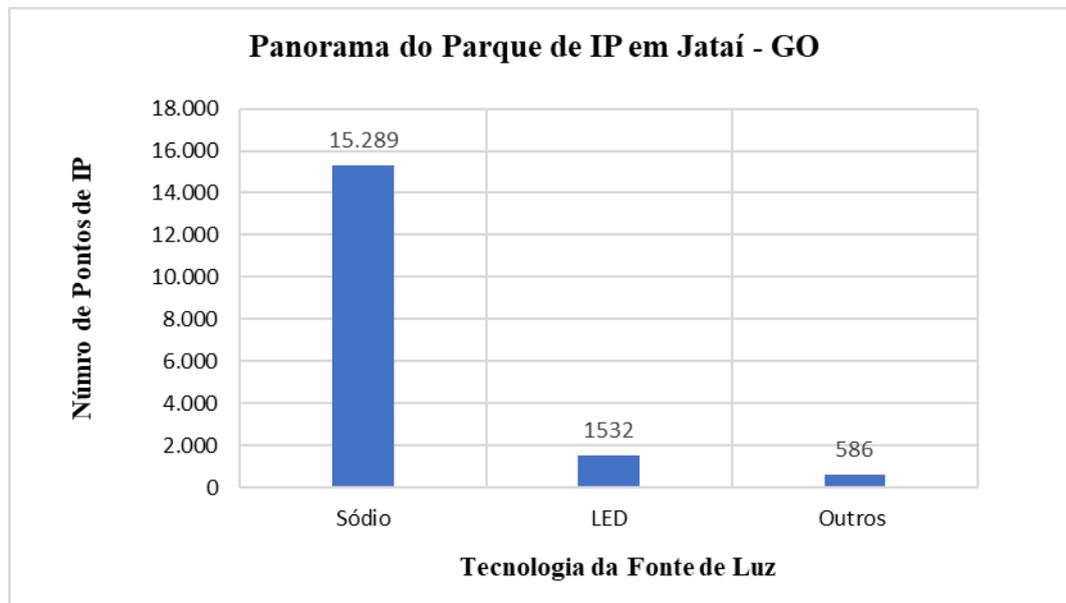
Segundo Dos Santos (2017), a preocupação com a questão ambiental também torna o gerenciamento de resíduos de lâmpadas um processo de extrema importância na preservação da qualidade da saúde e do meio ambiente. A gestão de lâmpadas de descarga, seja no manuseio para transporte, sua instalação e retirada para substituição, armazenamento e descarte, ou seja, da fabricação até a disposição final, têm sido um constante desafio colocado aos profissionais da área e aos municípios que são responsáveis por administrar a IP das suas cidades.

Consoante Rodrigues (2019) afirma que a gestão ambiental e a eficiência energética são assuntos preponderantes na atualidade, pois ambas buscam a utilização racional dos recursos, visando à sustentabilidade.

4.2.2 Contextualização do Parque de Iluminação Pública de Jataí

Com base no recadastramento conduzido pela Equatorial Energia, a qual assumiu a concessão do estado de Goiás em janeiro de 2023, o último levantamento indica que o município de Jataí possui um total de 17.407 pontos IP. Esses pontos estão distribuídos entre diversas tecnologias utilizadas em vias públicas, praças, parques, monumentos e fachadas de edifícios públicos. A seguir, na Figura 4.1 apresenta-se um panorama do parque de iluminação pública na cidade de Jataí.

Figura 4.1 – Panorama Geral do Parque de Iluminação Pública de Jataí GO.



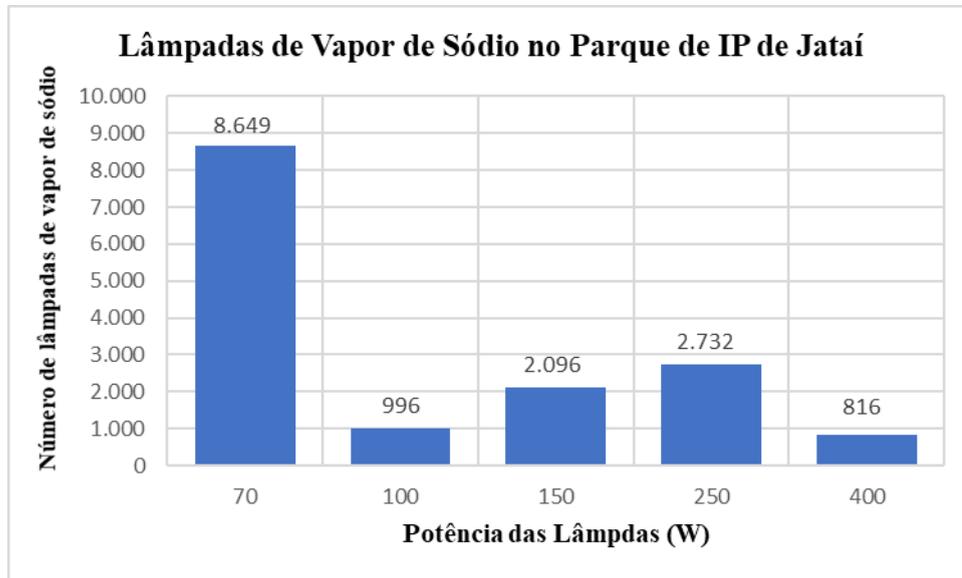
Fonte: Do autor.

Por meio da Figura 4.1, é possível constatar que a tecnologia predominante no cenário de Iluminação Pública em Jataí ainda é a iluminação convencional, representada pelo uso significativo das lâmpadas de vapor de sódio, que correspondem a uma parcela expressiva de 92%. Em contraste, as luminárias com tecnologia LED aparecem de forma discreta, contribuindo com pouco mais de 8% do total.

No Brasil, há uma predominância de lâmpadas de baixa eficiência na iluminação pública, sendo as lâmpadas de vapor de sódio amplamente utilizadas na maioria dos municípios. Portanto, a substituição das luminárias de baixa eficiência por luminárias de alto rendimento, como as luminárias de LED, é uma alternativa viável (Gomes *et al.*, 2019).

Na Figura 4.2, observamos que as lâmpadas de vapor de sódio de 70W são as mais numerosas, totalizando 8.649 unidades, o que representa aproximadamente 57% do total das lâmpadas de vapor de sódio e 58% do total de lâmpadas utilizadas no município de Jataí.

Figura 4.2 – Descrição das Lâmpadas Vapor de Sódio.



Fonte: Do autor.

Embora as lâmpadas de vapor de sódio de 70W representem um número maior, é importante observar que as lâmpadas que mais consomem energia elétrica no parque de iluminação pública de Jataí são aquelas com potência de 250W. Este grupo de lâmpadas consome cerca de 28,57% da energia total, enquanto as lâmpadas de 70W representam 27,14%. Em seguida, as lâmpadas de 150W e 400W correspondem a aproximadamente 13,46% e 15,35%, respectivamente. É relevante ressaltar que os equipamentos auxiliares, como reatores e relés fotoelétricos, também contribuem significativamente para o consumo de energia elétrica, representando cerca de 11,88% do consumo total de energia elétrica na iluminação pública (EQUATORIAL, 2023).

4.2.3 Mapeamento das Vias

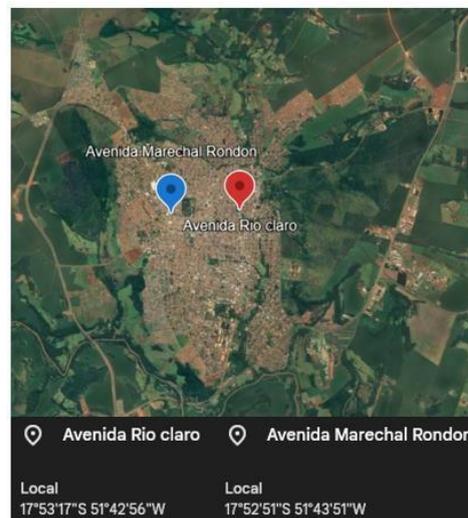
No âmbito da eficiência energética na Iluminação Pública do município de Jataí, os estudos tiveram início em 2018. Nesse período, foram eficientizadas as duas principais avenidas da cidade, sendo a Avenida Goiás e Avenida Veriano de Oliveira Lima, vias estas contempladas com iluminação LED.

No projeto realizado no município de Jataí, abordado neste artigo, foram empregados recursos provenientes do governo federal por meio da 2ª chamada pública do Procel Reluz de 2019. Jataí foi o único representante do Centro-Oeste a ser contemplado nesse programa, juntamente com outros 77 municípios brasileiros em diversos estados do país (PROCEL, 2021). O Procel Reluz tem como objetivo promover a melhoria da iluminação pública em vias e praças. Em Jataí, cinco avenidas foram beneficiadas, totalizando 334 pontos de eficiência energética.

Para tanto, a seleção das vias para o retrofit na iluminação foi determinada pelos gestores municipais, incluindo o prefeito, o secretário de obras e os engenheiros envolvidos. Essa escolha levou em consideração a importância de cada via e seu potencial de economia energética.

Para o escopo deste estudo, as vias selecionadas foram a Avenida Rio Claro e a Avenida Marechal Rondon. A escolha da Avenida Rio Claro, dentre as cinco vias eficientizadas, deve-se ao fato de seu arranjo ser bilateral frontal, com luminárias de 150W, sendo a única entre as cinco vias com essas características. A Avenida Marechal Rondon foi escolhida devido à sua maior extensão entre as cinco vias, embora seu arranjo seja semelhante às demais, sendo unilateral e com luminárias de 250W, idênticas às das outras 3 vias eficientizadas. A identificação e as coordenadas das vias podem ser observadas na Figura 4.3.

Figura 4.3 – Localização das Avenidas no Google Earth.



Fonte: Adaptado Google Earth, (2023).

Durante o levantamento *in loco*, foi realizada uma inspeção visual das vias, complementada pelo uso do Google Earth e do mapa georreferenciado fornecido pela Equatorial Energia, o que possibilitou verificar alguns dados importantes no estudo, conforme observado na tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Dados da Vias de Estudo.

Identificação	Trecho avaliado	N° de Luminárias	Potência Unitária (W)	Arranjo
Av. Rio Claro	978 metros	59	150	Bilateral Frontal
Av. Marechal Rondon	2550 metros	65	250	Unilateral

Fonte: Adaptado da EQUATORIAL (2023).

As Figuras 4.4 e 4.5 apresentam as vias de estudo e suas respectivas luminárias antes da efficientização das vias.

Figura 4.4 – Av. Marechal Rondon com Luminárias de Vapor de Sódio de 250W.



Fonte: Do autor.

Figura 4.5 – Av. Rio Claro com Luminárias de Vapor de Sódio de 150W.



Fonte: Do autor

Após a inspeção realizada nas vias, elaborou-se um projeto gráfico contendo as informações levantadas em campo. Esse projeto gráfico foi desenvolvido no software AutoCAD, conforme ilustrado nas Figuras 4.6 e 4.7. Nas imagens a seguir, é possível visualizar o trecho completo da via e uma parte desse trecho com as indicações de cotas, número do poste e tipo do poste.

Figura 4.6 – Desenho Realizado no Software AutoCad da Av. Marechal Rondon



Fonte: Do autor.

Figura 4.7 – Desenho Realizado no Software AutoCad da Av. Rio Claro.



Fonte: Do autor.

4.2.4 Classificação das Vias

Para realizar a classificação viária foi necessário recorrer à norma técnica vigente de iluminação pública, que estabelece os requisitos mínimos para iluminação de vias públicas e que proporciona a segurança aos tráfegos de pedestres e veículos.

A NBR 5101/2018 determina padrões mínimos de, luminância, iluminância e uniformidade para cada classificação de via. As vias de maior velocidade e tráfego intenso demandam maior, luminância, iluminância e uniformidade, ao passo que as vias locais permitem menores parâmetros luminotécnicos. As Tabelas 4.3 e 4.4 apresentam os padrões para vias de trânsito e vias de pedestre, respectivamente, adota-se como padrões mínimos para a configuração de iluminação das vias de uma cidade.

Tabela 4.3 – Tráfego Motorizado.

Classificação	Volume de tráfego noturno ^a de veículos por hora, em ambos os sentidos, em pista única ^b
Leve (L)	150 a 500
Médio (M)	501 a 1.200
Intenso (I)	Acima de 1.200

^a Valor máximo das médias horárias obtidas nos períodos compreendidos entre 18 h e 21 h.

^b Valores para velocidades regulamentadas por lei.

Notas: Para vias com tráfego menor do que 150 veículos por hora, consideram-se as exigências mínimas do grupo leve (L) e, para vias com tráfego muito intenso, superior a 2.400 veículos por hora, consideram-se as exigências máximas do grupo do tráfego intenso (I).

Fonte: Adaptado da NBR 5101/2018.

Tabela 4.4 – Tráfego de Pedestre.

Classificação	Pedestre cruzando vias com tráfego motorizado ^a
Sem tráfego (S)	Como vias arteriais
Leve (L)	Como nas vias residenciais médias
Médio (M)	Como nas vias comerciais secundárias
Intenso (I)	Como nas vias comerciais principais

^a O projetista deve levar em conta esta tabela, para fins de elaboração de projeto

Fonte: Adaptado da NBR 5101/2018.

Conforme orienta a NBR 5101 as recomendações de iluminação estão divididas em classe de V1 a V5 para veículos e P1 a P4 para pedestres. As tabelas 4.5 e 4.6 apresentam as

informações de classe de iluminação.

Tabela 4.5– Classe de Iluminação para Cada Tipo de Via.

Descrição	Classe de Iluminação	
Vias de trânsito rápido; vias de alta velocidade de tráfego, com separação de pistas, sem cruzamento em nível e com controle de acesso, vias de trânsito rápido em geral; Auto estradas	Volum de tráfego Intenso	V1
	Volum de tráfego médio	V2
Vias arteriais; vias de alta velocidade de tráfego com separação de pistas, vias de mão dupla, com cruzamentos de travessia de pedestre eventuais em pontos bem definidos; vias rurais de mão dupla com separação de canteiro ou obstáculo	Volum de tráfego Intenso	V1
	Volum de tráfego médio	V2
Vias coletoras; vias de tráfego importante; vias radiais e urbanas de interligação entre bairros, com tráfego de pedestre elevado	Volum de tráfego Intenso	V2
	Volum de tráfego médio	V3
	Volum de tráfego leve	V4
Vias locais; vias de conexão menos importante; vias de acesso residencial	Volum de tráfego médio	V4
	Volum de tráfego leve	V5

Fonte: Adaptado da NBR 5101/2018.

Tabela 4.6– Classe de Iluminação para Cada Tipo de Passeio.

Descrição da via	Classe de Iluminação
Vias de uso noturno intenso por pedestre (por exemplo, calçadas, passeios de zonas comerciais)	P1
Vias de grande tráfego noturno de pedestre (por exemplo, passeios de avenida, praças, áreas de lazer)	P2
Vias de uso noturno moderado por pedestre (por exemplo, passeios, acostamentos)	P3
Vias de pouco uso de pedestre (por exemplo, passeios de bairros residenciais)	P4

Fonte: Adaptado da NBR 5101/2018.

Como vimos, de acordo com NBR 5101, as classes são selecionadas de acordo com a função da via, da densidade e complexidade do tráfego, da separação do tráfego e da existência de facilidades para o controle do tráfego, como os sinais. Sendo assim, as vias foram classificadas conforme apresentado na tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Classificação Viária.

Classificação Viária		
Nome da Via	Classe de iluminação da via e passeio	
	Veículos	Pedestre
Av. Rio Claro	V2	P3
Av. Marechal Rondon	V3	P3

Fonte: Do autor.

4.2.5 Estudo Luminotécnico

A NBR 5101 estabelece requisitos mínimos de luminância, iluminância média e uniformidade para cada tipo de classificação viária, conforme pode ser observado na tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Requisitos Luminotécnicos Conforme Especificado pela NBR 5101/2018.

Requisitos luminotécnicos da NBR 5101/2018					
Identificação: Av. Marechal Rondon V3/P3	O "x" localiza a posição do poste de IP		L_{med}	$E_{med, \min}$	$U = (E_{min}/E_{med})$
Requisitos mínimos de Iluminância média (E _{med}) e Uniformidade (U):	Passeio 1	X	-	5	0,2
	Passeio 2	-	-	5	0,2
	Pista de rodagem 1	-	1	15	0,2
Identificação: Av. Rio Claro – V2/P3	O "x" localiza a posição do poste de IP		L_{med}	$E_{med, \min}$	$U = (E_{min}/E_{med})$
Requisitos mínimos de Iluminância média (E _{med}) e Uniformidade (U):	Passeio 1	X	-	5	0,2
	Passeio 2	X	-	5	0,2
	Pista de rodagem 1	-	1,5	20	0,3
	Pista de rodagem 2	-	1,5	20	0,3

Fonte: Adaptado da NBR 5101/2018.

Como ferramenta de apoio para os experimentos deste estudo, foi empregado software de cálculo e modelagem DIALux Evo. Este software permitiu através da curva fotométrica das luminárias disponibilizadas pelos fabricantes, realizar simulações luminotécnicas.

O DIALux evo é um dos softwares universal de luminotécnica desenvolvida pela DIAL, permitindo diversas simulações a de respeito de iluminação, além de seu acesso ser facilitado. Sua grande aceitação ocorre principalmente por ser gratuito, por estar disponível em aproximadamente 25 idiomas e por contar com as parcerias que possibilitam a utilização do software com diferentes catálogos de luminárias dos principais fabricantes. (Moraes *et al.*, 2020).

O programa pode ser associado ao BIM, em que o modelo criado no software anterior pode ser exportado na forma de IFC para o DIALux, a fim de ser realizado o cálculo lumínico (Wong *et al.*, 2019).

Para realizar o estudo luminotécnico para cada via em questão, foi necessário elaborar um cenário de simulação, conforme pode ser verificado na tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Cenário de Simulação para Dialux Evo.

Cenário para simulação no Dialux Evo			
<i>Classificação viária: V3/P3</i>			
Identificação da via	Av. Marechal Rondon	Arranjo dos postes	Unilateral
Distância entre postes	35	Dist. poste ao meio-fio 1	0,5
Comprimento braço	3	Pendor ponto luz 1	2,4
Altura do ponto de luz	8	Ângulo incl. do braço 1	3°
Largura do Passeio 01	3	Nº luminárias / ponto 1	1
Largura do Passeio 02	3	Largura da Pista	12
<i>Classificação viária: V2/P3</i>			
Identificação da via	Av. Rio Claro	Arranjo dos postes	Bilateral Frontal
Distância entre postes	35	Dist. poste ao meio-fio 1	0,5
Comprimento braço	3	Pendor ponto luz 1	2,4
Altura do ponto de luz	8	Ângulo incl. do braço 1	0°
Largura do Passeio 01	3	Nº luminárias / ponto 1	1
Largura do Passeio 02	3	Largura da Pista 01	9
Largura do Canteiro Central	1	Largura da Pista 02	9

Fonte: Do autor.

As luminárias ofertadas em processo licitatório para efficientização da IP das vias em estudo são da fabricante Unicoba, modelo SL DURA-96 aplicado na Av. Rio Claro e modelo SL DURA-115 implementado na Av. Marechal Rondon. Com a curva fotométrica disponibilizada pela fabricante, foi possível verificar se as luminárias propostas atenderiam ou não aos requisitos mínimos estabelecidos pela NBR 5101.

Após a simulação das curvas fotométricas, verificou-se que as luminárias LED adquiridas em processo licitatório satisfizeram as condições recomendadas pela NBR 5101 de, luminância, iluminância e uniformidade as quais foram implementadas no parque de iluminação do município de Jataí. A seguir serão apresentados os resultados deste estudo.

4.3 Resultados e Discussões

Para se alcançar os resultados de efficientização energética na Iluminação Pública, foi realizado um estudo comparativo entre a iluminação antes do retrofit e após o retrofit. Foi avaliado o desempenho energético, viabilidade econômica e estudo de indicadores da iluminação artificial que serão apresentados a seguir.

4.3.1 Avaliação dos Indicadores da Iluminação Artificial Viária

A eficiência dos sistemas de iluminação artificial pode ser avaliada pelo uso de indicadores de desempenho. Estes indicadores são entendidos como valores referenciais que auxiliam o projetista em relação ao desempenho da iluminação que se deseja obter (Moraes *et al.*, 2018). Através de dados obtidos através do *datasheet* dos produtos em estudo, na tabela 5.9 é possível observar alguns indicadores, como fluxo luminoso, temperatura de cor, índice de reprodução de cores, eficiência energética e vida útil das luminárias.

Os dados foram coletados e comparados para as duas tecnologias. Na tabela 5.9, é possível notar a quantidade de fluxo luminoso emitido pelas lâmpadas de vapor de sódio na Av. Marechal Rondon e Av. Rio Claro, sendo superior às luminárias de LED. Apesar da emissão maior de fluxo luminoso pela fonte de luz convencional, as luminárias LED demonstram uma maior eficiência energética.

Na Tabela 4.10, fica evidente que as luminárias que empregam LED são superiores às lâmpadas de descarga de formato ovoide ou tubular. No estudo, na Av. Marechal Rondon, a

luminária LED selecionada para a modernização apresenta uma eficiência luminosa de 152 lm/W, o que implica que 1W consumido é capaz de gerar 152 lúmens, ao contrário da lâmpada de vapor de sódio que requer 1,39W para produzir os mesmos 152 lúmens. A eficácia luminosa é um dado relevante do ponto de vista econômico e deve ser levado em consideração no momento da escolha das luminárias.

Outra análise realizada foi sobre a vida útil das duas tecnologias, enfatizando o LED como extremamente durável. Enquanto o sistema convencional tem uma vida mediana de 32.000 horas, a tecnologia LED possui uma longevidade de 90.000 horas. As luminárias com uma expectativa de vida mais longa também são economicamente vantajosas, uma vez que o número de manutenções ao longo da vida útil da luminária será menor até o final do ciclo completo de uso.

Tabela 4.10 – Análise Comparativa dos Indicadores da Iluminação Convencional e LED.

Análise comparativa dos indicadores							
Tecnologia	Identificação	Potência Nominal (W)	Fluxo Luminoso (lm)	Eficiência energética (lm/W)	IRC	Vida útil (L70) horas	TCC
Convencional	Av. Marechal Rondon	250W	27500	110	< 25	32.000	2.000K
	Av. Rio Claro	150W	16050	107	< 25	32.000	2.000K
LED	Av. Marechal Rondon	115W	17472	152	> 70	90.000	4.000K
	Av. Rio Claro	96W	14291	149	> 70	90.000	4.000K

Fonte: Do autor.

Conforme destacado por Kruger (2016), quanto maior a temperatura de cor, a luz tende a ser mais branca, semelhante à luz do dia, sendo, portanto, mais utilizada em locais de trabalho e para iluminação pública viária.

Segundo Nascimento (2019), a temperatura de cor influencia a estimulação circadiana e a supressão da melatonina em seres humanos. Temperaturas de cor mais baixas têm um efeito menor na supressão da melatonina do que as mais altas, ou seja, apresentam efeitos cronobiológicos menores. Além disso, de acordo com Nascimento (2019), temperaturas de cor mais elevadas estimulam a atividade mental, bem como o sistema nervoso simpático e parassimpático. A sonolência tende a ser mais prevalente em condições de iluminação com temperatura de cor de 3.000K em comparação com 5.000K. Portanto, a temperatura de cor é um parâmetro crucial a ser considerado ao pensar na qualidade de sistemas de iluminação (Fardin *et al.*, 2021).

A temperatura de cor é um tema que continua gerando muitas discussões, principalmente devido aos potenciais efeitos prejudiciais do espectro azul. No entanto, é importante observar a variedade de opções disponíveis na tecnologia LED, que pode oferecer uma ampla gama de temperaturas de cor para determinadas atividades. Embora a NBR 5101/2018, normativas para Iluminação Pública não estabeleça um limite específico para a Temperatura de Cor Correlata (TCC), o PROCEL, no seu rol de produtos não aceita luminárias com temperatura de cor superiores a 5.000K.

De acordo com o (INMETRO, 2022), o Índice de Reprodução de Cor Geral (Ra), que é uma medida do Índice de Reprodução de Cores (IRC), deve ser igual ou superior a 70 ($Ra \geq 70$). A tecnologia LED possibilita que as pessoas visualizem o ambiente ao seu redor com uma alta fidelidade às cores originais em comparação com a tecnologia convencional, que utiliza lâmpadas de vapor de sódio.

O Índice de Reprodução de Cor (IRC) é um fator essencial na busca por uma reprodução precisa das cores. De acordo com a tabela 5.9, a tecnologia convencional com a lâmpada de vapor de sódio, o IRC geralmente é baixo, alcançando valores inferiores a 25. Por outro lado, a tecnologia LED frequentemente apresenta um IRC superior a 70. Quando o IRC se aproxima de 100, as cores são reproduzidas de forma muito próxima à realidade, permitindo que os usuários das vias públicas e passeios percebam com maior precisão o ambiente ao seu redor.

4.3.2 Avaliação Luminotécnica

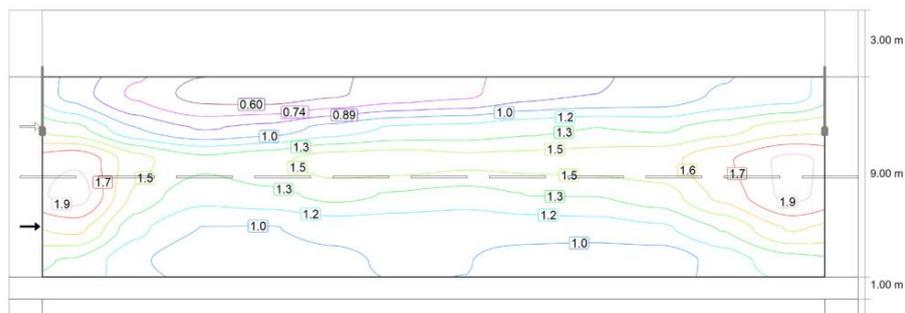
A norma NBR 5101/2018 estabelece os requisitos mínimos de luminância, iluminância e uniformidade, como já mencionado na Tabela 4.8, dados essenciais para serem comparados com os resultados da simulação luminotécnica realizada no software DIALux Evo, conforme expresso na Tabela 4.11 e algumas simulações nas figuras 4.8, 4.9, 4.10 e 4.11.

Tabela 4.11 – Dados Obtidos Atráves da Simulação Luminotécnica no DIALux Evo.

Estudo Luminotécnico						
Av. Marechal Rondon – V3/P3						
Simulação no DIALux Evo						
Dados da via						
Variável	LED			Convencional		
	L _{med} (cd/m ²)	E _{med,mín} (lux)	U = (E _{min} /E _{med})	L _{med} (cd/m ²)	E _{med,mín} (lux)	U = (E _{min} /E _{med})
Passeio 1	-	14,71	0,21	-	5,16	0,7
Passeio 2	-	8,47	0,57	-	23,41	0,4
Pista de rodagem 1	1,57	23,45	0,49	1,80	26,35	0,23

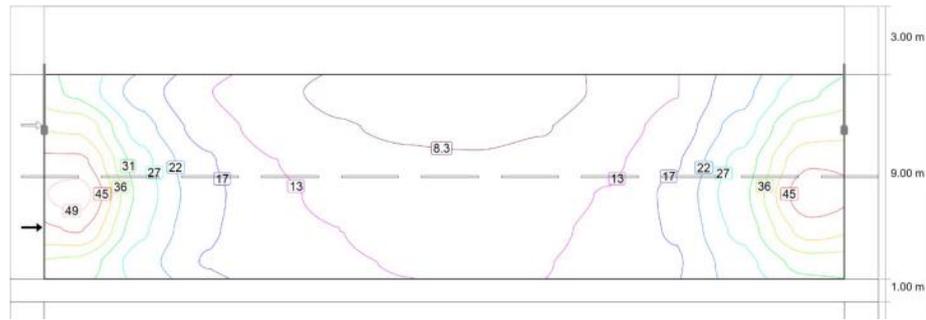
Av. Rio Claro – V2/P3						
Simulação no DIALux Evo						
Dados da via						
Variável	LED			Convencional		
	L _{med} (cd/m ²)	E _{med,mín} (lux)	U = (E _{min} /E _{med})	L _{med} (cd/m ²)	E _{med,mín} (lux)	U = (E _{min} /E _{med})
Passeio 1	-	13,37	0,35	-	10,3	0,37
Passeio 2	-	13,37	0,35	-	10,3	0,37
Pista de rodagem 1	1,89	29,19	0,48	1,19	19,08	0,31
Pista de rodagem 2	1,89	29,19	0,48	1,19	19,08	0,31

Fonte: Do autor.

Figura 4.8 – Linhas de Isolux da Luminância da Pista de Rodagem da Av. Rio Claro com Tecnologia de Sódio.

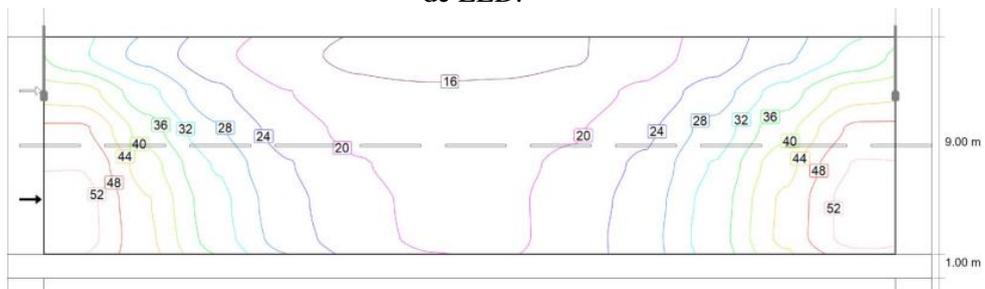
Fonte: Do autor.

Figura 4.9– Linhas de Isolux da Iluminância da Pista de Rodagem da Av. Rio Claro com Tecnologia de Sódio.



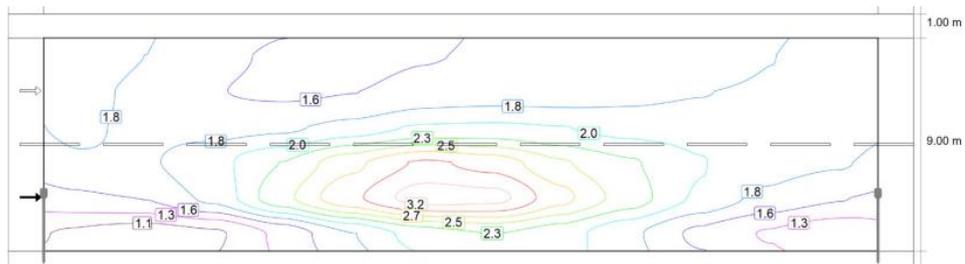
Fonte: Do autor.

Figura 4.10 – Linhas de Isolux da Iluminância da Pista de Rodagem da Av. Rio Claro com Tecnologia de LED.



Fonte: Do autor.

Figura 4.11 – Linhas de Isolux da Luminância da Pista de Rodagem da Av. Rio Claro com Tecnologia de LED.



Fonte: Do autor.

Ao analisar os resultados das simulações realizadas no software DIALux Evo com as duas tecnologias de fonte de luz, fica evidente na Tabela 5.10 que a iluminância da pista de rodagem na Avenida Marechal Rondon apresenta um desempenho superior quando se utiliza a lâmpada de vapor de sódio de 250W. A luminária LED de 115W registrou um valor de 23,45 lux, enquanto a tecnologia convencional alcançou 26,35 lux. Apesar de o resultado ser maior para a tecnologia convencional, ambas as luminárias atendem aos requisitos mínimos estabelecidos pela NBR 5101/2018.

Ao observar a luminância da Av. Marechal Rondon, nota-se uma superioridade nos níveis de iluminação. Enquanto a lâmpada de sódio apresenta uma luminância de 1,80 cd/m², a

tecnologia LED oferece um valor de 1,57 cd/m². Os resultados da simulação indicam que ambas as tecnologias atendem aos requisitos normativos de iluminação, embora a tecnologia convencional de sódio apresente melhores resultados.

Como evidenciado previamente na Tabela 5.9, as lâmpadas convencionais exibem um fluxo luminoso superior em comparação com as luminárias LED substituídas. No entanto, na Avenida Marechal Rondon, percebe-se que uma maior iluminância na pista de rodagem não se traduz necessariamente em um melhor desempenho, já que o excesso de iluminação pode ser considerado um desperdício de energia. Segundo as observações de Silva (2023), o excesso de iluminação artificial, também é conhecido como poluição luminosa, emite níveis de brilho além do necessário, interferindo no ciclo natural da noite e transformando a beleza noturna em uma paisagem cinzenta e monótona.

Na Avenida Rio Claro, foi notório que o retrofit desempenhou um papel essencial na correção do subdimensionamento da iluminância e luminância da pista de rodagem. Através da simulação luminotécnica, ficou comprovada a necessidade de aprimorar os índices de iluminância e luminância da via em análise. Com o projeto de remodelagem, a via atingiu 29,19 lux, superando o valor anterior de 19,08 lux. Ao avaliar os valores de luminância, a lâmpada de sódio alcançou 1,19 cd/m², enquanto a tecnologia LED se destacou com um valor de 1,89 cd/m².

A iluminação possui como função permitir que os indivíduos vejam o que precisam ver, sem desconforto, desde a leitura, as cores, contribuição para percepção e a caracterização do espaço, proporcionando economia, controle e manutenção (Darè, 2020). É importante notar que o conforto visual depende do atendimento a algumas condições de iluminação, como a intensidade, uniformidade das densidades luminosas, uniformidade temporal da luz e eliminação do ofuscamento (Bortolan *et al.*, 2019).

Nas Figuras 4.12 e 4.13, apresentamos a representação da via antes e após a efficientização. É evidente visualmente que a via está significativamente mais iluminada com a tecnologia LED, uma observação que também é corroborada pelas simulações realizadas, exceto pelos valores de iluminância e luminância da pista de rodagem na Av. Marechal Rondon, onde os valores são mais altos com a tecnologia convencional. Na Avenida Rio Claro, além da melhoria nos valores de iluminância e luminância, há uma clara percepção visual de uma reprodução de cores aprimorada com a tecnologia LED, como por exemplo, uma melhor percepção das cores do canteiro central, onde é possível distinguir a cor da grama.

Podemos destacar ainda nas Figuras 4.12 e 4.13 que, ao fazer a comparação das

imagens, é importante considerar que a tecnologia convencional ilustrada neste artigo está em operação há anos, onde nas manutenções se substitui apenas a lâmpada ou reator. Isso significa que as lâmpadas e luminárias estão sujeitas ao desgaste ao longo do tempo, já fadigadas, muitas delas precisando de limpeza no refrator, o que pode prejudicar a emissão de luz. Para uma comparação equitativa entre as Figuras 4.12 e 4.13, o ideal seria comparar luminárias novas de ambas as tecnologias.

O que se constata neste estudo é que a tecnologia LED proporciona vantagens adicionais além da economia gerada, como um melhor Índice de Reprodução de Cor, uma vida útil mais longa dos produtos LED e uma variedade de opções de temperatura de cor. Esses indicadores servem como diretrizes para que o município se atente à aquisição dos produtos a serem implantados.

Figura 4.12 – Antes e Depois do Retrofit da Av. Marechal Rondon.



Fonte: Do autor.

Figura 4.13 – Antes e Depois do Retrofit da Av. Rio Claro.



Fonte: Do autor.

A iluminação está sendo cada vez mais compreendida como um fator fundamental para

assegurar a sensação de segurança aos indivíduos. Em diversos estudos científicos predominam relatos contínuos acerca da influência da iluminação como destaque de percursos e fortalecedor da sensação de segurança (Bertuzzi, 2021).

Em um estudo realizado por Cardoso (2019), voltado à percepção de segurança das mulheres em relação ao espaço urbano e à Iluminação Pública, mostrou que sombras marcantes e o forte contraste entre zonas claras e escuras geram desconforto e dificuldade de adaptação visual, aumentando a sensação de insegurança. Ainda, de acordo com esse estudo, a sensação de insegurança pode ser reduzida quando a iluminação na região é satisfatória. Essa condição estaria relacionada à visibilidade condicionada pela iluminação, possibilitando o aumento da percepção de segurança e a melhora de resposta de um indivíduo sobre potenciais riscos.

Uma iluminação condizente ao espaço público possibilita a prática noturna do comércio, da cultura e do lazer, além de garantir segurança aos indivíduos que ali transitam, incentivando a vitalidade do meio urbano (Bertuzzi, 2021).

4.3.3 Análise Energética

A resolução n° 2.590 de 2019 da ANEEL estabelece que o tempo a ser considerado para o consumo diário para fins de faturamento da energia elétrica destinada à iluminação pública no município de Jataí, passou a ser um período de 11 horas e 27 minutos. (ANEEL, 2019).

A seguir, na Tabela 4.12 é possível verificar o consumo estimado de energia elétrica durante o dia, mês e ano com emprego das duas tecnologias nas respectivas vias de estudo.

Tabela 4.12 – Estimativa do Consumo de Eletricidade.

Estimativa de consumo de energia elétrica								
Tecnologia	Qtd.	Potência Unitária (W)	Equipamentos Auxiliares (W)		Tempo (horas)	kWh (Dia)	kWh (Mês)	kWh (Ano)
			Reator	Relé Foto elétrico				
Vapor de Sódio	65	250	30	1,2	11,45	209,28	6.278,49	75.341,92
	59	150	22	1,2	11,45	117,01	3.510,16	42.121,89
LED	65	115	0	1,2	11,45	86,48	2.594,46	31.133,47
	59	96	0	1,2	11,45	65,66	1.969,90	23.638,85

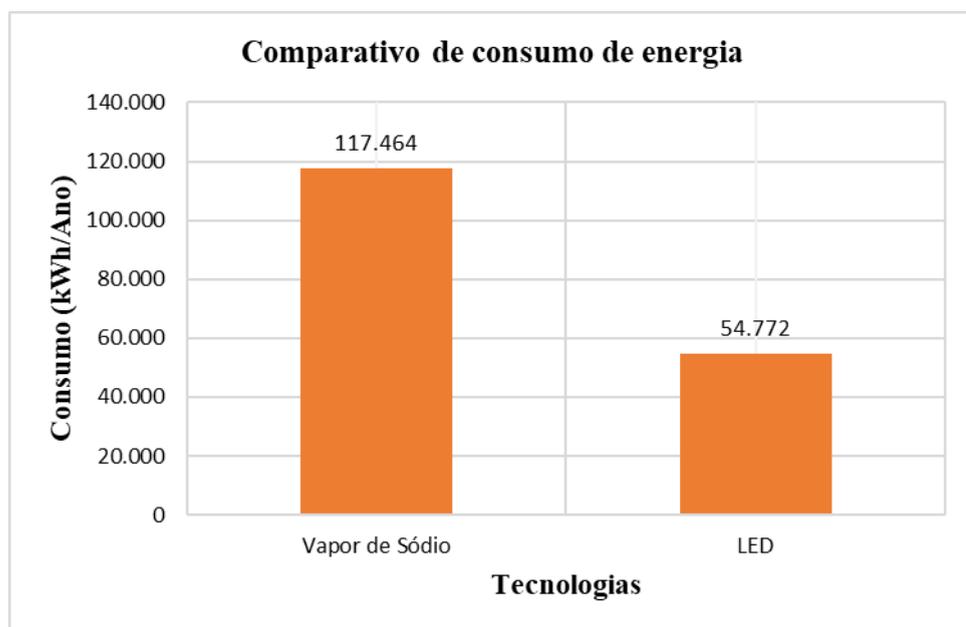
Fonte: Do autor.

Após a modernização do sistema de iluminação pública das vias em análise, constatou-se que na Avenida Marechal Rondon, a economia no consumo de energia elétrica ao longo de um ano foi de 44.208 kWh. Isso equivale a uma economia de aproximadamente 58,68% em comparação com o sistema convencional anteriormente instalado.

A modernização da iluminação na Avenida Rio Claro foi significativa, embora menor do que na Avenida Marechal Rondon. No estudo, registrou-se uma redução anual de 18.483 kWh, equivalente a aproximadamente 43,88% em comparação com o sistema convencional anteriormente instalado, que utilizava lâmpadas de vapor de sódio de 150W.

Na Figura 4.14, apresenta-se o consumo de energia de cada tecnologia ao longo de um ano, evidenciando uma economia total de 53,37%.

Figura 4.14 – Consumo de Energia.



Fonte: Do autor.

4.3.4 Análise Econômica

Para a análise de viabilidade econômica foram levantados os valores gastos para a execução do projeto de eficiência energética nas vias em estudo. Abaixo, segue a tabela 4.13 que ilustra os custos do projeto implementado, incluindo os valores de materiais e de serviços.

Tabela 4.13 – Descrição Orçamentária.

Descrição Orçamentária				
Modelo da Luminária	Unidades	Custo Unitário	Custo unitário da Mão de Obra	Custo Total (R\$)
SL DURA-115	65	R\$ 530,00	R\$ 180,00	R\$ 46.150,00
SL DURA-96	59	R\$ 560,00	R\$ 180,00	R\$ 43.660,00
Recurso total utilizado				R\$ 89.810,00

Fonte: Do autor.

O *payback* é o método mais usado para avaliar investimentos de eficiência energética. Consiste simplesmente na determinação do número de períodos necessários para recuperar o capital investido, ignorando as consequências além do período de recuperação e o valor do dinheiro no tempo (Almeida, 2019).

Aplicando-se uma tarifa de R\$ 0,44363 kWh, valor este utilizado na atual fatura de energia elétrica do município de Jataí, obteve-se um valor economizado durante o período de um dia e mês conforme pode ser observado na tabela 4.14.

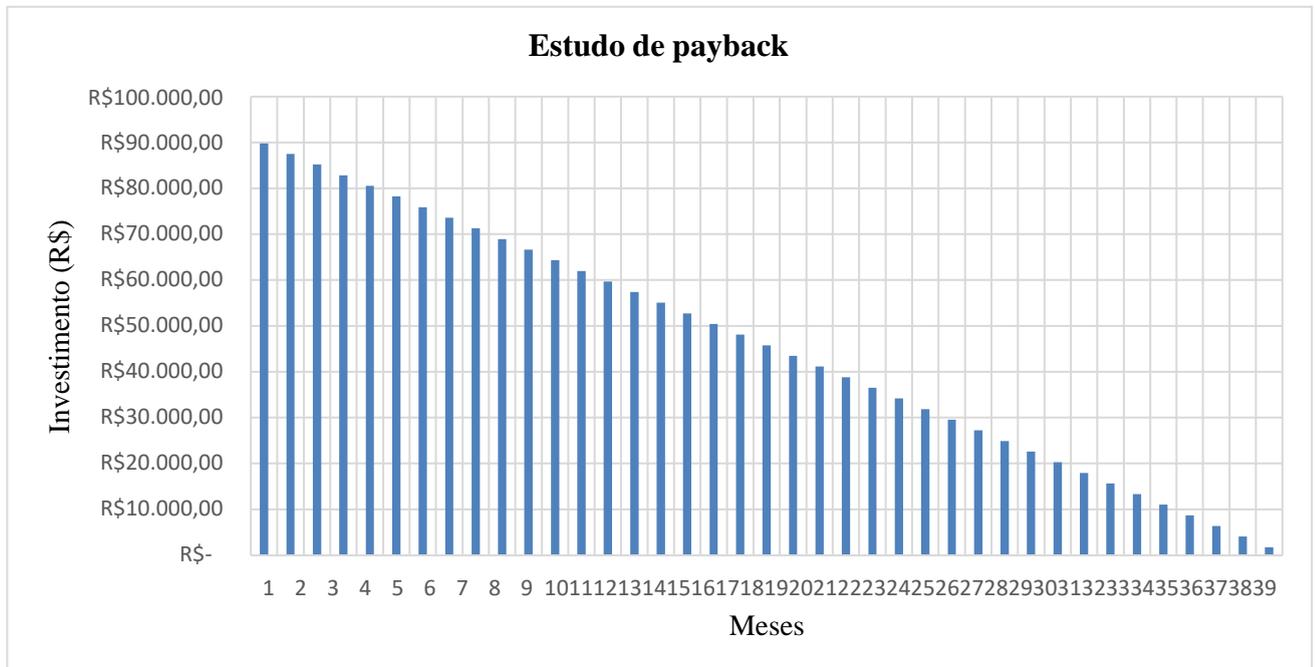
Tabela 4.14 – Economia Financeira após o Retrofit.

Economia Financeira					
Modelo da Luminária	Identificação	Consumo (kWh) dia (Economia)	Tarifa Uniária (R\$)	Valor economizado por dia (R\$)	Valor economizado por mês (R\$)
SL DURA-115	Av. Marechal Rondon	122,8	0,44363	R\$ 54,48	R\$ 1.634,35
SL DURA-96	Av. Rio Claro	51,34	0,44363	R\$ 22,78	R\$ 683,30
<i>Total Economizado</i>				<i>R\$ 77,26</i>	<i>R\$ 2.317,65</i>

Fonte: Do autor.

Na Tabela 4.14, temos a coluna de consumo de kWh / dia, sendo a diferença entre o consumo gerado durante o dia pela tecnologia convencional e a tecnologia LED.

Ao avaliar o recurso investido nesse projeto de eficiência energética à longo prazo, pode-se afirmar que o investimento inicial de R\$ 89.810,00 será definitivamente compensado financeiramente ao longo de 3 anos e 3 meses aproximadamente, conforme pode ser observado na Figura 4.15.

Figura 4.15 – Tempo de Retorno do Investimento.

Fonte: Do autor.

Stutz (2018) informa em seu estudo que metodologias mais complexas podem ser utilizadas para análise financeira de investimentos. Todavia, deve-se considerar as incertezas do valor da tarifa de energia, bem como a variação dos valores de moeda, como as flutuações do kWh em cada mês devido à sazonalidade da matriz energética brasileira e por alterações nas tributações federais e estaduais na conta de energia elétrica. Desta forma percebe-se então que o tempo de retorno pode sofrer alterações.

Yoomak (2018), em seu estudo sobre a iluminação pública realizado na Tailândia apontou através de simulação uma economia gerada de 40% considerando a substituição de tecnologias com retorno financeiro de aproximadamente 42 meses. Implementar equipamentos com a tecnologia LED no parque de iluminação pública oferece inúmeras vantagens, não apenas financeira como vimos, mas também é considerada uma escolha ecológica devido a longa vida do LED, alta eficiência e composição do material livre de mercúrio. (Shahzad *et al.*, 2018).

4.4 Conclusões

Pode-se concluir que o cenário atual de iluminação pública no município de Jataí - GO

requer investimentos de eficiência energética, uma vez observado que 92% do parque de iluminação existente é composto pelo sistema convencional, na sua grande maioria com lâmpadas de vapor de sódio.

Por meio do estudo realizado nas vias, observa-se que a troca de tecnologias é vantajosa em termos econômicos e energéticos. Apesar dos valores de consumo não serem medidos *in loco* para se ter um valor mais próximo da realidade, percebe-se através dos estudos baseado em estimativas conforme adotado pela concessionária Equatorial, uma redução no consumo de eletricidade de 53%.

Os resultados mostram que o retorno do investimento ocorrerá em até 3 anos e 6 meses, indicando uma viabilidade econômica no projeto executado. Ainda podemos ressaltar que as luminárias instaladas possuem uma expectativa de vida de 90.000 horas (L70), permitindo um número menor de manutenções. Cabe aqui registrar que a durabilidade dos produtos estão estritamente relacionadas com a qualidade de energia elétrica do sistema, bem como a instalação dos produtos, sendo condicionante que podem ocasionar na redução da vida útil e a queima dos componentes internos, como o driver ou até mesmo o LED.

No estudo luminotécnico realizado, ficou claro que a tecnologia LED atendeu aos requisitos normativos em ambas as vias avaliadas. No entanto, o mesmo não ocorreu com a tecnologia convencional na Av. Rio Claro, onde os produtos operavam com níveis de iluminância e luminância inferiores ao estipulado pela norma, podendo ocasionar em prejuízo como a sensação de insegurança e a falta de visibilidade aos transeuntes.

Os ganhos com a eficiência da IP pode ser notado no aspecto visual dos cenários das vias, com melhores índices de reprodução de cores, cumprimento com os requisitos mínimos normativos e a sensação de maior segurança do espaço público.

4.5 Referências Bibliográficas

AIE - International Energy Agency, **Efficient Energy, Paris**: IEA, 2022. Disponível em <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency>. Acesso: 28 out. 2022.

AIE - International Energy Agency, **Lighting, Paris**: IEA, 2022. Disponível em <https://www.iea.org/reports/lighting>. Acesso: 28 out. 2022.

ALLWYN, G, R.; AL ABRI, R.; MALIK, A.; AL-HINAI, A. Análise da substituição da lâmpada HPS por lâmpada LED e estimativa de custos para instalação de sistema fotovoltaico/ bateria para iluminação pública em Omã. **Energies**. v. 14, p. 7697, 17 nov.2021.

ALMEIDA, C. R. **Proposta de melhoria no desempenho energético: estudo de caso em uma instituição de ensino básico e superior em Itajubá.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá. Rio de Janeiro: 2019.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). **Resolução Homologatória nº 2.590, de 13 de Agosto de 2019.**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5101:** Iluminação Pública - Procedimentos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ARAÚJO, J.F.; SILVA, L.L.; OLIVEIRA, L.B.; FORTES, M.Z.; BORBA, B.S.M.C.; COLOMBINI, A.C. Assessment of the Technological Update of Public Lighting in Brazil. **IEEE Latin America Transactions**, v. 18, p.985-991, 6 jun. 2020.

CARDOSO, V, L; RENNÓ, S, A. Iluminação e segurança pública: uma investigação sobre a relação entre design e criminalidade urbana pela perspectiva feminina. **Estudos em Design**. v. 27, n. 3, p. 130 – 146, 2019.

BERTUZZI, F, B. A influência da iluminação pública na segurança urbana noturna. **Revista Paisagem e Ambiente**. v. 32, n. 48, p. 1 – 13, set. 2021.

BOVOLENTA, P; BERTOLINI, G, R, F. A eficiência energética aplicada na iluminação pública. **Revista de Competitividade e Sustentabilidade**. v. 7, p. 39-49. 29 fev. 2020.

BORTOLAN, G, M, Z; FERRERIRA, M, G, G; TEZZA, R. Conforto e Desconforto: Revisão de Conceitos e Elaboração de um modelo de conforto visual. **Revista HFD**. v. 8, n. 15, p. 67-84, mar. 2019.

DARÈ, A. Iluminação & Público Sênior: o significado da luz na promoção do conforto qualidade de vida. **Convergências – Revista de Investigação e Ensino das Artes**. v. 26, p. 167-179, nov.2020.

DOS SANTOS, R, A; ARVELLOS L, F, R; FERRERIRA, A, F; DE CARVALHO J, T. Procedimentos de segurança para o manuseio correto e consciente de lâmpadas de vapor. **Revista Teccen**. v. 10, p. 03-12 .dez 2017.

DIZON, E; PRANGGONO, B. Iluminação pública inteligente em Smart City: um estudo de caso de Shefeld. **Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing**. v. 10, n. 13,p. 2045-2060, 9 fev. 2021.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. “*Anuário estatístico de energia elétrica 2021. Ano base 2020*”. 2021.

FARDIN, M, P; MARQUES, J, C; CÓ, M, A. IDSIP – Proposta de Indicadores de Desempenho em Sistemas de Iluminação Pública. **Revista Ifes Ciência**. v. 7, p. 01 – 12. set. 2021.

GOMES, A, C.; SILVA, T, M, F.; RODRIGUES, T, L, C.; CORTES, R, C.; SORIANO, F, R.; ROCHA, A, N. Procel – Reluz – Iluminação pública e sinalização semafórica eficientes. **CEEL**. v. 15, p. 334, 29 nov. 2019.

INMETRO. **PORTARIA Nº 62, DE 17 DE FEVEREIRO DE 2022** Disponível em:http://www.inmetro.gov.br/legislacao/detalhe.asp?seq_classe=1&seq_ato=2921. Acesso: 28/06/2023.

KRUGER, C; RAMOS, L, F. Iluminação Pública e Eficientização Energética. **Revista Espaço Acadêmico**. n. 185, p. 37 – 49. out. 2016.

MORAES, J, S; ALCOJOR, A, M; BITTENCOURT, L, S. Análise de indicadores de desempenho da iluminação artificial em ambientes residenciais. **Parc Pesquisa em Arquitetura e Construção**. v. 9, p. 35 – 46. marc 2020.

NASCIMENTO, Gúli. A saúde vista com outros olhos: Iluminação Hospitalar. **Revista Sustinere**. v. 7, p – 401 – 413. dez. 2019.

PROCEL. Programa Nacional de Conservação de Energia. PROCEL. Resultados 2021: ano base 2020. Brasil: PROCEL, 2021. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View=%7B5A08CAF0-06D1-4FFE-B335-95D83F8DFB98%7D&Team=¶ms=itemID=%7B692C8EE2-0F26-4806-9A14-19F19B11DF76%7D;&UIPartUID=%7B05734935-6950-4E3F-A182-629352E9EB18%7D>. Acesso: 01/11/2022.

PULTRINI, M, H, O; SILVA, S, R, C, M. A Realidade do Gerenciamento de Resíduos de Lâmpadas que Contenham Mercúrio no Setor de Comércio de Materiais Elétricos no Município de Cuiabá/MT. **Engineering and Science**.v. 2, p. 74-80. nov. 2016.

RODRIGUES, S, F; VAZQUEZ, G, H; MORAIS, J, S. Substituição de lâmpadas fluorescentes por light emitting diode (LED) em um instituição de ensino: preocupação ambiental, energética e econômica. **Eng. Sanit. Ambient**. v. 24, p. 799-808. ago 2019.

RUDNICKI, L; SCHMIDT, A, O. Avaliação da melhoria na classificação energética e viabilidade financeira de retrofit na iluminação de um prédio público. **Revista de Competitividade e Sustentabilidade**. v. 7, p. 50-57. 29 fev. 2020.

SILVA, F, C, E; IACHEL, G. Do céu iluminado ao céu estrelado: Planetários como ferramenta de conscientização sobre a poluição luminosa. **Vitruvian Cogitationes**. v. 4, p. 222 – 232, dez. 2023.

SOUZA, A, C, B; FORTES, M, Z; SANTOS, M, T; MEDINA, V, P. Potencial de efficientização dos sistemas de iluminação pública. **Revista de Tecnologia Aplicada**.v.10, p. 18-32, 31 mar. 2022.

SHAHZAD, K; CUCEK, L; SAGIR, M; ALI, N; RASHID, M, I; NIZAMI, A, S; AL TURAIF, H, A; ISMAIL, I,M,I. Um estudo de viabilidade ecológica para o desenvolvimento de um sistema de iluminação viária sustentável. **Journal of Cleaner**

Production. v. 175, p. 683-695, 20 fev. 2018.

STUTZ, P, V, S; SOUZA, J, C, A; YAMAGUCHI, N, U; REZENDE, L, C, S, H; IMAI, H, E. Sistema led: uma alternativa sustentável para iluminação pública. **Eiclopédia Biosfera.** v. 15, p. 1508. dez 2018.

United National. World Urbanization Prospects 2018, New York, 2022. Disponível em: <https://population.un.org/wup/Publications/>. Acesso: 10/01/2024.

WONG, M, O; DU, J; ZHANG, Z, Q; LIU, Y, Q; CHEN, S, M; LEE, S, H. Uma abordagem de projeto de iluminação interativa baseada na experiência usando BIM e VR: Um estudo de caso. **Ciência da Terra e Ambiental.** 2019.

YOOMAK, S.; JETTANASEN, C.; NGAOPITAKKUL, A.; BUNJONGJIT, S; LEELAJINDAKRAIRERK, M. Estudo comparativo da qualidade de iluminação e qualidade de energia para luminárias LED e HPS em um sistema de iluminação viária. **Energy and Buildings.** v. 159, p.542-557. 15 jan. 2018.

ZHANG, P; SHI, X, P; SUN, Y, P; CUI, J; SHAO, S. As províncias da China atingiram suas metas de redução de intensidade energética? Reavaliação com base em dados de iluminação noturna. **Energy Policy.** v. 128, p. 276-283. 07 jan. 2019.

5 CAPÍTULO 2 – ARTIGO 2

ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA ILUMINAÇÃO PÚBLICA ATRAVÉS DA DIMERIZAÇÃO DINÂMICA: ESTUDO DE CASO NO MUNICÍPIO DE JATAÍ

(Artigo a ser submetido à revista Ambiente Construído / Qualis - A3)

RESUMO

Neste estudo, é apresentada uma pesquisa direcionada para aprimorar a eficiência energética do sistema de iluminação pública em Jataí - GO. O foco da pesquisa foi a substituição das lâmpadas de vapor de sódio por tecnologia LED, juntamente com uma proposta de controle de dimerização dinâmica. Foi conduzida uma análise nas vias com maior consumo de energia, onde o sistema de iluminação foi mapeado e a classe de iluminação foi avaliada. Para o estudo de modelagem e simulação foi utilizando o software Dialux Evo. Apesar dos custos iniciais elevados associados à implantação da telegestão, os resultados da pesquisa ressaltaram que a substituição de tecnologias, aliada à implementação da dimerização dinâmica, tem o potencial de reduzir o consumo de energia elétrica do sistema de iluminação pública. Conforme indicado pelo estudo, a economia mensal de energia pode atingir 481.201 kWh, equivalente a uma redução de 66% nas faturas de energia do município para o grupo de luminárias avaliadas. Um estudo de viabilidade econômica também foi conduzido, revelando que o retorno do investimento ocorreu em 71 meses.

Palavras-chave: Eficientização, LED, Luminária Pública, Luminotécnica.

ABSTRACT

In this study, research aimed at improving the energy efficiency of the public lighting system in Jataí - GO is presented. The focus of the research was the replacement of sodium vapor lamps with LED technology, together with a proposal for dynamic dimming control. An analysis was conducted on the roads with the highest energy consumption, where the lighting system was mapped and the lighting class was evaluated. For the modeling and simulation study, the Dialux Evo software was used. Despite the high initial costs associated with the implementation of telemanagement, the research results highlighted that the replacement of technologies, combined with the implementation of dynamic dimming, has the potential to reduce the electrical energy consumption of the public lighting system. As indicated by the study, monthly energy savings can reach 481,201 kWh, equivalent to a 66% reduction in the municipality's energy bills for the group of luminaires evaluated. An economic feasibility study was also conducted, revealing that the return on investment occurred in 71 months.

Keywords: Efficiency, LED, Public Lamp, Lighting technology

5.1 Introdução

É indiscutível que a Iluminação Pública (IP) se tornou vital para a qualidade de vida da sociedade, especialmente nos centros urbanos. Ela desempenha um papel fundamental na segurança dos cidadãos, na prevenção da criminalidade, no estímulo ao turismo e ao comércio, na promoção do lazer noturno e na valorização estética do ambiente urbano, tornando visíveis paisagens, edifícios, monumentos e outros elementos durante a noite (Araújo *et al.*, 2020).

O avanço da iluminação pública inteligente com sistemas de controle é um tema de considerável interesse para pesquisadores em todo o mundo. A implementação de uma rede de controle de iluminação representa uma significativa modernização para a infraestrutura de iluminação urbana. Ao adotar um sistema de controle, pode-se alcançar soluções eficazes que promovem tanto a segurança quanto a sustentabilidade (Omar *et al.*, 2022).

A evolução dos sistemas inteligentes de iluminação pública oferece perspectivas promissoras para aprimorar a gestão do sistema de IP. Além de focar em reduzir o consumo de energia e melhorar a qualidade do serviço de iluminação, os investimentos tecnológicos na infraestrutura da rede podem ser justificados pela capacidade de criar uma plataforma de suporte para o desenvolvimento de uma variedade de serviços (Leite *et al.*, 2023).

Uma definição de cidade inteligente envolve a integração da Tecnologia da Informação e Comunicação (TIC) com a infraestrutura, arquitetura, objetos e pessoas, visando aprimorar processos e enfrentar desafios sociais, econômicos e ambientais. Nesse contexto, dispositivos inteligentes se conectam à infraestrutura existente para otimizar a qualidade de vida e a produtividade nas cidades (Romani, 2023).

Com o crescimento e a densificação das cidades, surge a demanda por uma infraestrutura de comunicação mais sólida e eficaz. A integração do 5G e da IoT (Internet das Coisas) na Iluminação Pública apresenta oportunidades para o desenvolvimento de serviços urbanos inovadores. Por exemplo, sistemas de iluminação adaptativa podem ser implantados para ajustar automaticamente a intensidade da luz conforme a presença de pessoas, resultando em economia de energia e promovendo a sustentabilidade (Oliveira *et al.*, 2023).

Conforme destacado por Abreu (2023), a gestão inteligente da iluminação pública, também conhecida como telegestão, é um dos indicadores de Cidades Inteligentes, conforme mencionado na Norma ISO 37122:2019. A implantação da telegestão é uma das alternativas previstas no artigo 468, inciso III, da Resolução Normativa nº 1.000/2021 para a medição do consumo dos pontos de iluminação pública sem medição por parte da distribuidora. Os dados de

consumo obtidos pelos dispositivos de telegestão de IP, instalados pelo Município, podem ser utilizados para o faturamento da iluminação pública.

Segundo a Nota Técnica nº 58/2022 da ANEEL, o emprego de sistemas de gestão de iluminação pública permite a implementação de medidas para aumentar a eficiência do consumo, como a dimerização e o acionamento remoto das lâmpadas. Dessa forma, além de proporcionar maior precisão em relação ao método convencional de estimativa, o uso desses sistemas viabiliza a eficiência energética, beneficiando todo o sistema elétrico.

Considerando que o sistema de IP atual da cidade de Jataí é predominantemente composto por iluminação convencional, com uma grande quantidade de lâmpadas de vapor de sódio, propõe-se um projeto de eficiência energética. O objetivo é investigar a redução no consumo de energia elétrica através da implementação da tecnologia led e dimerização dinâmica em um grupo de luminárias que operam com luminárias de vapor de sódio no parque atual de Jataí.

5.2 Material e Método

Para o estudo de caso foi escolhido o município de Jataí, localizado no estado de Goiás. Atualmente o parque de iluminação pública do município detém um total de aproximadamente 17.407 pontos de luz, distribuídos entre vias públicas, parques, praças entre outros. Uma pequena parte das praças e parques conta com medição individualizada, ou seja, um sistema de medição próprio, diferentemente das vias públicas, cujo consumo é estimado.

Os dados referentes ao número de pontos e às especificações da iluminação em Jataí foram adquiridos por meio de informações fornecidas pela concessionária de energia, complementadas com dados obtidos da Prefeitura Municipal de Jataí e levantamentos realizados *in loco*.

Esta pesquisa abrange uma análise quantitativa com o propósito de avaliar a eficiência energética empregada no conjunto de luminárias de vapor de sódio presentes nas vias de Jataí. Esse objetivo será alcançado por meio da substituição de tecnologias, combinada com a implementação de dimerização dinâmica. Também foi realizado um estudo de viabilidade econômica proveniente do retrofit e do emprego do sistema de telegestão.

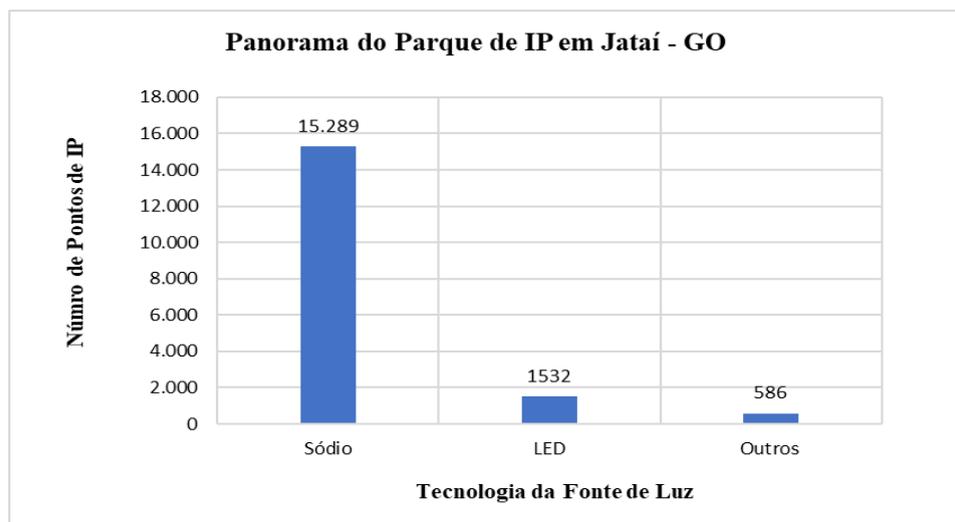
Inicialmente, foi realizado o levantamento das características das vias já equipadas com tecnologia de vapor de sódio no município de Jataí, como demonstrado abaixo.

5.2.1 Informações da Iluminação Pública de Jataí - GO

Após uma análise detalhada, foi identificado um total de 17.407 unidades de luminárias públicas distribuídas em várias tecnologias ao longo das vias, praças, parques, monumentos e fachadas de edifícios públicos na cidade de Jataí. Esse levantamento proporciona uma visão completa do sistema de iluminação pública na região.

Com base na Figura 5.1, é notório que a tecnologia predominante continua sendo a iluminação convencional, com um uso significativo de lâmpadas de vapor de sódio, representando aproximadamente 88% do total das tecnologias empregadas, totalizando 15.289 pontos. Por outro lado, as luminárias com tecnologia LED, com 1.531 unidades, estão presentes de forma mais modesta no cenário municipal, representando um pouco mais de 9%. Também é possível observar a presença de outras tecnologias, como as lâmpadas de vapor de mercúrio, vapor metálico, fluorescente, mista e halógenas, correspondendo a 586 unidades, o que representa 3% do total.

Figura 5.1 – Panorama Geral do Parque de Iluminação Pública de Jataí GO.



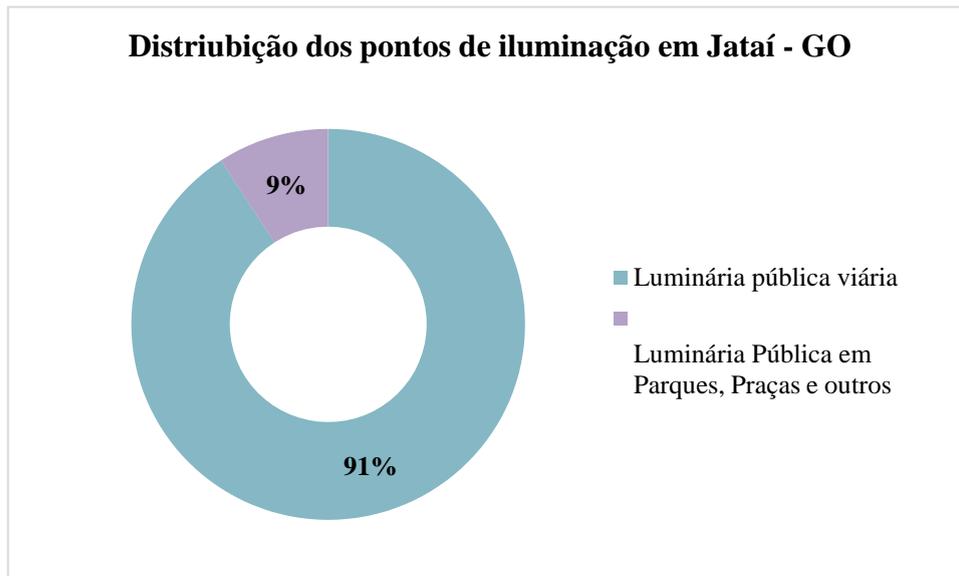
Fonte: Do autor.

No Brasil, ainda é comum encontrar uma grande quantidade de lâmpadas de baixa eficiência na iluminação pública, com predominância das lâmpadas de vapor de sódio na maioria dos municípios brasileiros. Portanto, a substituição das luminárias de baixa eficiência por luminárias de alto rendimento, como as de tecnologia LED, é uma medida viável e recomendada (Gomes *et al.*, 2019).

Na Figura 5.2, pode-se notar que o número de luminárias operantes presentes nas vias

públicas de Jataí totaliza 15.811 unidades, enquanto nas áreas de iluminação de praças, parques, monumentos, canteiros centrais e fachadas de edifícios públicos, somam-se um total de 1.594 unidades.

Figura 5.2 – Distribuição das Luminárias em Jataí - GO.



Fonte: Do autor.

As lâmpadas de vapor de sódio serão o foco deste estudo, dado que são as tecnologias mais numerosas e consomem mais eletricidade no parque de iluminação de Jataí. Notavelmente, as luminárias que utilizam lâmpadas de 70W são as mais prevalentes, totalizando 8.649 unidades, representando 56,57% do total de lâmpadas de vapor de sódio e 50% do total de lâmpadas empregadas em Jataí. Os detalhes quantitativos e de potência das lâmpadas de vapor de sódio no município de Jataí podem ser observados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Quantidade de lâmpadas vapor de sódio.

Descrição das lâmpdas vapor de sódio	
Potência das lâmpadas de vapor de sódio	Unidades
70W	8.649
100W	996
150W	2.096
250W	2.732
400W	816

Fonte: Do autor.

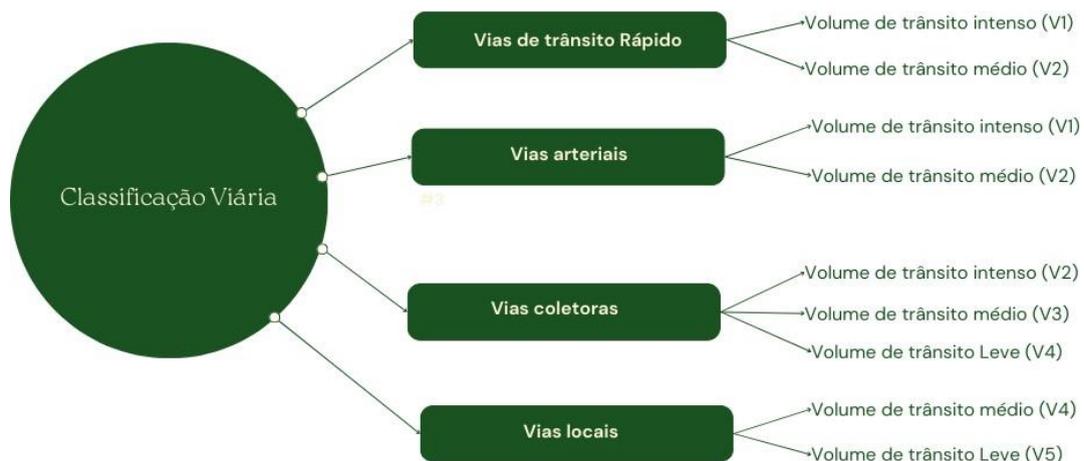
O número total de lâmpadas de vapor de sódio é de 15.289 unidades, das quais 499 são utilizadas em praças e parques do município.

Com base no cenário descrito, as luminárias analisadas neste estudo são aquelas que utilizam vapor de sódio na iluminação viária, totalizando 14.790 unidades distribuídas em várias tipologias de vias no município. As luminárias utilizadas em parques, praças, monumentos e fachadas não serão objeto de avaliação neste estudo.

5.2.2 Classificação Viária

No estudo, primeiramente, as vias foram caracterizadas de acordo com as diretrizes estabelecidas pela NBR 5101/2018, que divide a classe de iluminação de V1 a V5 para veículos e de P1 a P4 para pedestres. A classificação das vias será conduzida conforme ilustrado nas Figuras 5.3 e 5.4, permitindo a determinação da classe de iluminação tanto para a via quanto para o passeio.

Figura 5.3 – Classe de Iluminação da Via.



Fonte: Adaptado da NBR 5101/2018.

Figura 5.4 – Classe de Iluminação do Passeio.

Fonte: Adaptado da NBR 5101/2018.

Para determinar o volume de tráfego motorizado e tráfego de pedestre foi adotado como referência as tabelas 5.2 e 5.3, conforme orientações da NBR 5101/2018, padrões mínimos para a configuração de iluminação das vias da cidade.

Tabela 5.2 – Tráfego Motorizado.

Classificação	Volume de tráfego noturno ^a de veículos por hora, em ambos os sentidos, em pista única ^b
Leve (L)	150 a 500
Médio (M)	501 a 1.200
Intenso (I)	Acima de 1.200

^a Valor máximo das médias horárias obtidas nos períodos compreendidos entre 18 h e 21 h.

^b Valores para velocidades regulamentadas por lei.

Notas: Para vias com tráfego menor do que 150 veículos por hora, consideram-se as exigências mínimas do grupo leve (L) e, para vias com tráfego muito intenso, superior a 2.400 veículos por hora, consideram-se as exigências máximas do grupo do tráfego intenso (I).

Fonte: Adaptado da NBR 5101/2018.

Tabela 5.3 – Tráfego de Pedestre.

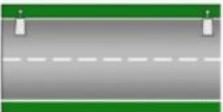
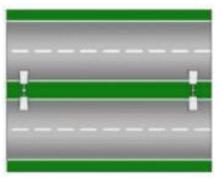
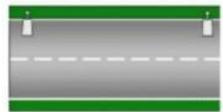
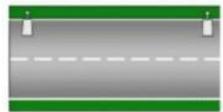
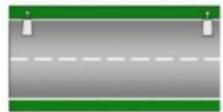
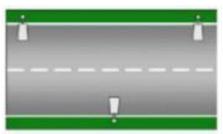
Classificação	Pedestre cruzando vias com tráfego motorizado ^a
Sem tráfego (S)	Como vias arteriais
Leve (L)	Como nas vias residenciais médias
Médio (M)	Como nas vias comerciais secundárias
Intenso (I)	Como nas vias comerciais principais

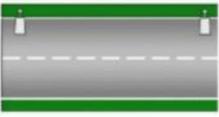
^a O projetista deve levar em conta esta tabela, para fins de elaboração de projeto

Fonte: Adaptado da NBR 5101/2018.

Seguindo as diretrizes normativas, foram obtidas as classificações das vias no município de Jataí, categorizadas de acordo com o perfil de cada via, como pode ser visto na Tabela 5.4. É relevante salientar que as vias objeto de estudo são todas as vias do município que utilizam lâmpadas de vapor de sódio, com exceção das vias que já contam com iluminação LED.

Tabela 5.4 – Parâmetros das Vias.

Descrição das Vias						
Identificação	Classificação	Arranjo dos Postes	Pista de Rodagem	Canteiro Central	Passeio 01 e 02	Distância entre postes
Unilateral						
Via A	V1/P2		10m	-	3m	37m
Canteiro Central						
Via B	V1/P2		2x8,5m	0,5m	3m	37m
Unilateral						
Via C	V2/P2		10m	-	3m	42m
Via D	V2/P2		10m	-	3m	40m
Via E	V3/P3		9m	-	3m	36m
Bilateral Alternado						
Via F	V3/P3		2x9,0m	2m	3m	36m

Via G	V4/P3	Unilateral	12m	-	2m	36m
Via H	V4/P4		10m	-	2m	40m
Via I	V5/P4		10m	-	2m	42m
Via J	V5/P4		7m	-	2m	42m

Fonte: Do autor.

5.2.3 Estudo Luminotécnico

De posse da classificação da iluminação das vias e como ferramenta de apoio para os experimentos deste estudo, foi empregado software de cálculo e modelagem DIALux Evo. Este software permitiu através da curva fotométrica das luminárias disponibilizadas pelos fabricantes, realizar simulações luminotécnicas.

O DIALux evo é um dos softwares universal de luminotécnica desenvolvida pela DIAL, permitindo diversas simulações a de respeito de iluminação, além de seu acesso ser facilitado. Sua grande aceitação ocorre principalmente por ser gratuito, por estar disponível em aproximadamente 25 idiomas e por contar com as parcerias que possibilitam a utilização do software com diferentes catálogos de luminárias dos principais fabricantes (Moraes *et al.*, 2020).

O programa pode ser associado ao BIM, em que o modelo criado no software anterior pode ser exportado na forma de IFC para o DIALux, a fim de ser realizado o cálculo lumínico (Wong *et al.*, 2019).

Neste programa foi possível verificar os níveis de iluminância, uniformidade e luminância das vias em estudo. Para o estudo luminotécnico foram adotados modelos de luminárias presentes no rol de produtos disponibilizados pelo Procel (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica) e que atendessem aos requisitos mínimos da NBR 5101/2018.

As orientações normativas consideradas para o cálculo luminotécnico estão apresentadas na Tabela 5.5, onde temos em estudo as seguintes variáveis:

- Luminância média da via – L_{med} ;
- Uniformidade longitudinal da via – U_L ;

- Uniformidade global da via – U_o ;
- Iluminância – $E_{med,min}$;
- Uniformidade da iluminância – U ;

Tabela 5.5 – Requisitos de Iluminância, Luminância e Uniformidade da Vias.

Classe da Iluminação	L_{med}	U_L	U_o	$E_{med,min}$	U
V1	2	0,7	0,4	30	0,4
V2	1,5	0,7	0,4	20	0,3
V3	1	0,7	0,4	15	0,2
V4	0,75	0,6	0,4	10	0,2
V5	0,5	0,6	0,4	5	0,2

Fonte: Adaptado da NBR 5101/2018.

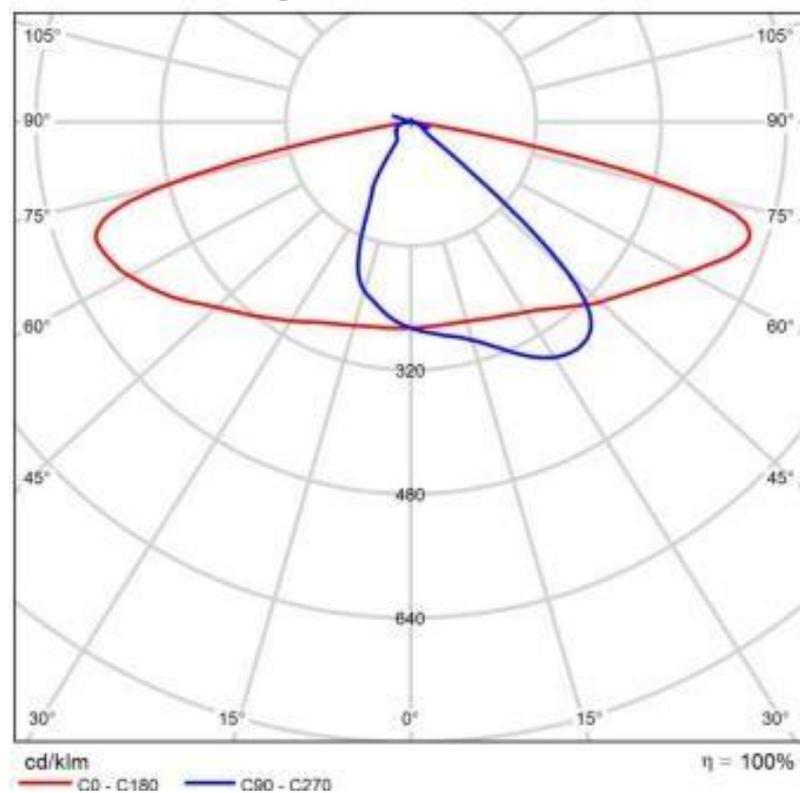
Para cada classe de iluminação das vias para o tráfego de pedestre será adotado níveis de iluminância média (E_{med}) e uniformidade mínima (U), requisitos estabelecidos pela NBR 5101, conforme apresentado na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Requisitos de Iluminância e uniformidade do passeio.

Classe da Iluminação	E_{med}	U
P1	20	0,3
P2	10	0,25
P3	5	0,2
P4	3	0,2

Fonte: Adaptado da NBR 5101/2018.

Para realizar a simulação luminotécnica, foram inseridas no software DIALux Evo as curvas fotométricas de cada luminária utilizada nas vias em estudo. Na Figura 5.5, é apresentada a curva fotométrica empregada na via A.

Figura 5.5 – Curva Fotométrica.

Fonte: Procel (2024).

Após a simulação de todas as vias no software DIALux Evo, os resultados foram compilados na Tabela 5.7, na qual é possível verificar os modelos de luminárias adotados

Tabela 5.7 – Especificações das Luminárias.

Descrição das Luminárias aplicadas nas vias				
Identificação	Pot. (W)	Fluxo Luminoso (lm)	Eficiência Luminosa (lm/W)	Modelo / Marca
Via A	152,7	25761	168,7	BRP 483 LED 255 / PHILIPS
Via B	152,7	25761	168,7	BRP 483 LED 255 / PHILIPS
Via C	121,7	21784	179,0	BRP 483 LED 216 / PHILIPS
Via D	121,7	21784	179,0	BRP 483 LED 216 / PHILIPS
Via E	67,2	12480	185,71	BRP 482 LED 126 / PHILIPS
Via F	67,2	12480	185,71	BRP 482 LED 126 / PHILIPS

Via G	54,7	10233	187,07	BRP 482 LED 104 / PHILIPS
Via H	54,7	10233	187,07	BRP 482 LED 104 / PHILIPS
Via I	34,1	6069,4	177,99	BRP 481 LED 060 / PHILIPS
Via J	34,1	6069,4	177,99	BRP 481 LED 060 / PHILIPS

Fonte: Do autor.

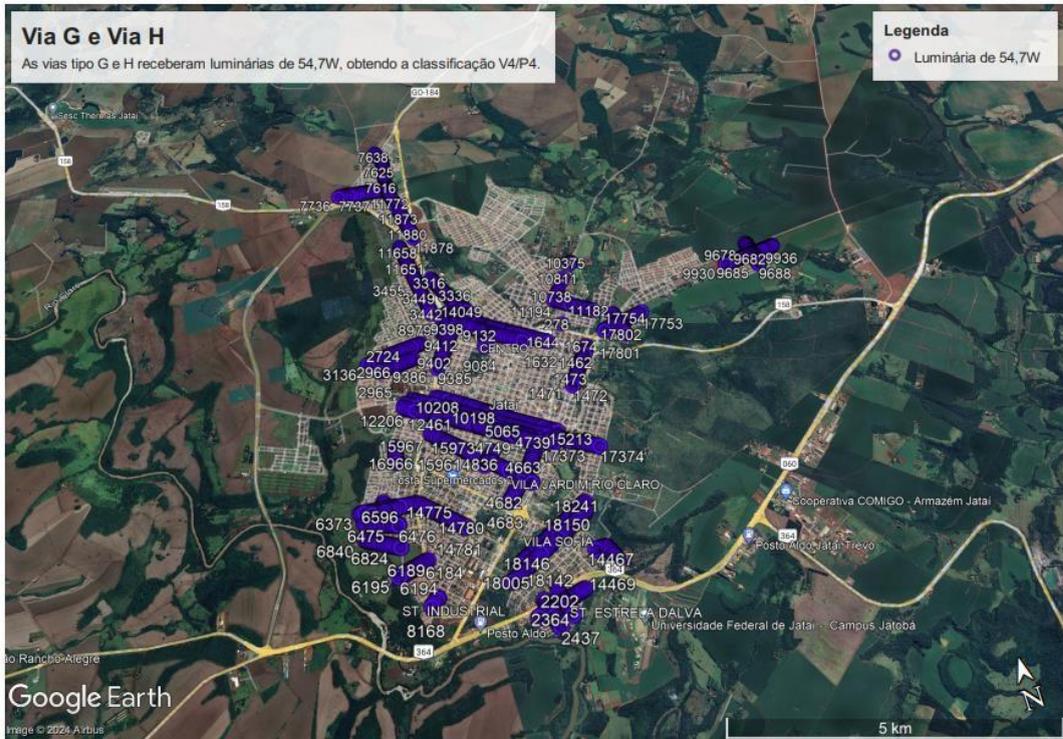
Após as simulações luminotécnicas e já a com a definição dos produtos selecionados, foi elaborado um mapa contendo os pontos de iluminação pública que irá receber o *retrofit*. Os mapas estão indicados nas Figuras 5.6, 5.7, 5.8, 5.9 e 5.10, contendo informações de cada ponto de iluminação nas vias de estudo, bem como a classe de iluminação e potência a ser instalada.

Figura 5.6 – Identificação das Vias V1/P2.



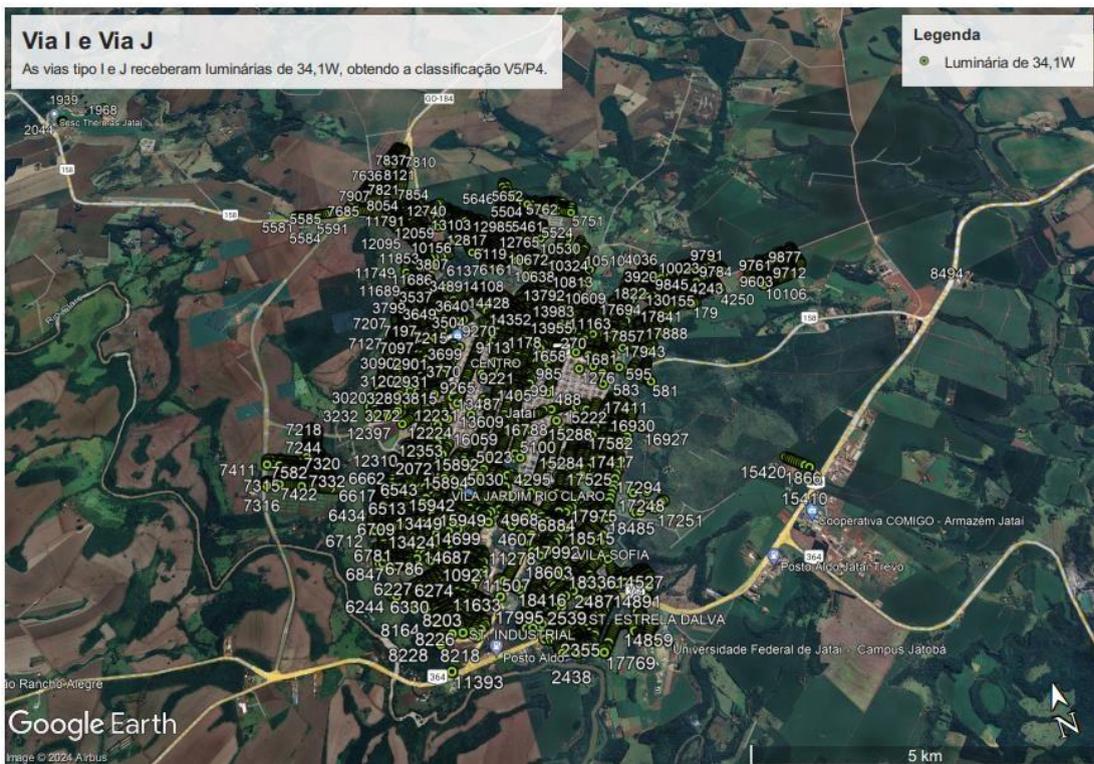
Fonte: Adaptado da Prefeitura Municipal de Jataí (2024).

Tabela 5.9 – Identificação das vias V4/P4.



Fonte: Adaptado da Prefeitura Municipal de Jataí (2024).

Figura 5.10 – Identificação das vias V5/P4.



Fonte: Adaptado da Prefeitura Municipal de Jataí (2024).

5.2.4 *Dimerização Dinâmica*

Segundo Takahashi (2022), as lâmpadas inteligentes contam com LEDs dimerizáveis, permitindo a regulagem da sua intensidade luminosa. Com a classe de iluminação da via e definição das luminárias para cada via tipo, foi possível realizar a dimerização através do software DIALux Evo.

Atualmente, a NBR 5101/2018 não fornece diretrizes específicas para o controle de luminárias por meio da dimerização dinâmica em vias públicas. Sendo assim, no processo de classificação das vias, é possível observar que a classificação pode ser determinada com base na descrição da via e no fluxo de tráfego de veículos, que pode variar de intenso, médio ou leve. Considerando que em certos períodos da noite o fluxo de veículos é reduzido, é possível que o tráfego seja classificado de intenso para médio ou leve.

Portanto, para este estudo de caso, será considerada uma classe de iluminação para a via com alternância, capaz de variar a partir de sua classificação inicial. Nesse contexto, as vias assumirão diferentes classes ao longo do seu uso, conforme detalhado na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 – Classificação das Vias Tipo para Dimerização.

Identificação da Via	Classificação Inicial	Classificação Variável
Via A	V1/P2	V2/P4
Via B	V1/P2	
Via C	V2/P2	V4/P4
Via D	V2/P2	
Via E	V3/P3	
Via F	V3/P3	
Via G	V4/P3	V5/P4
Via H	V4/P4	
Via I	V5/P4	
Via J	V5/P4	

Fonte: Do autor.

Conforme indicado na tabela 6.8, as vias tipo I e J não sofrerão alteração em sua classificação. Permanecerão com a mesma classificação, pois estão no limite da classe de iluminação, que é V5/P4.

A análise das variáveis pode ser visualizada na Tabela 5.9, que apresenta os cenários

pré-estabelecidos com os horários programados e as porcentagens de dimerização para cada luminária.

Tabela 5.9 – Avaliação das Variáveis em Diferentes Cenários.

AVALIAÇÃO DOS CENÁRIOS													
VIA A													
Descrição	Classe de Iluminação	Via					Passeio			Pot. (W)	Fluxo Luminoso	Dimerização	horário
		L _{med}	U _L	U _O	E _{med,min}	U	Passeio	E _{med}	U				
Cenário 01	V1/P2	2,51	0,8	0,5	36,49	0,4	P1	20,6	0,5	152,7	25761	100%	18:00 - 21:00
							P2	20,5	0,6				
Cenário 02	V1/P2	2,26	0,8	0,5	32,84	0,4	P1	18,54	0,5	137,43	23184,9	90%	21:00 - 00:00
							P2	18,45	0,6				
Cenário 03	V2/P2	1,51	0,8	0,5	21,89	0,4	P1	12,36	0,5	91,62	15456,6	60%	00:00 - 06:00
							P2	12,3	0,6				
VIA B													
Descrição	Classe da Iluminação	Via (2x)					Passeio			Pot. (W)	Fluxo Luminoso	Dimerização	horário
		L _{med}	U _L	U _O	E _{med,min}	U	Passeio	E _{med}	U				
Cenário 01	V1/P2	3,22	0,8	0,5	43,73	0,5	P1	31,04	0,6	152,7	25761	100%	18:00 - 21:00
							P2	31,04	0,6				
Cenário 02	V1/P2	2,25	0,8	0,5	30,61	0,4	P1	21,73	0,6	106,89	18032,7	70%	21:00 - 00:00
							P2	21,73	0,6				
Cenário 03	V2/P2	1,61	0,8	0,5	21,87	0,4	P1	15,52	0,6	76,35	12880,5	50%	00:00 - 06:00
							P2	15,52	0,6				
VIA C													
Descrição	Classe da Iluminação	Via					Passeio			Pot. (W)	Fluxo Luminoso	Dimerização	horário
		L _{med}	U _L	U _O	E _{med,min}	U	Passeio	E _{med}	U				
Cenário 01	V2/P2	1,91	0,5	0,7	27,28	0,4	P1	14,99	0,6	121,7	21784	100%	18:00 - 21:00
							P2	15,38	0,5				
Cenário 02	V3/P3	1,15	0,5	0,7	27,28	0,4	P1	8,99	0,6	73,02	13070,4	60%	21:00 - 00:00
							P2	9,23	0,5				
Cenário 03	V4/P3	0,76	0,5	0,7	10,91	0,4	P1	6	0,6	48,68	8713,6	40%	00:00 - 06:00
							P2	6	0,5				
VIA D													
Descrição	Classe da Iluminação	Via					Passeio			Pot. (W)	Fluxo Luminoso	Dimerização	horário
		L _{med}	U _L	U _O	E _{med,min}	U	Passeio	E _{med}	U				
Cenário 01	V2/P2	2,1	0,5	0,7	30,26	0,4	P1	13,72	0,3	121,7	21784	100%	18:00 - 21:00
							P2	15,7	0,5				
Cenário 02	V2/P3	1,47	0,5	0,7	21,18	0,4	P1	9,6	0,6	85,19	15248,8	70%	21:00 - 00:00
							P2	10,99	0,5				
Cenário 03	V4/P3	0,84	0,5	0,7	12,1	0,4	P1	5,49	0,6	48,68	8713,6	40%	00:00 - 06:00
							P2	5,49	0,5				
VIA E													

Descrição	Classe da Iluminação	Via					Passeio			Pot. (W)	Fluxo Luminoso	Dimerização	horário
		L _{med}	U _L	U _O	E _{med,min}	U	Passeio	E _{med}	U				
Cenário 01	V3/P3	1,36	0,8	0,5	19,31	0,4	P1	12,19	0,7	67,2	12480	100%	18:00 - 21:00
							P2	9,74	0,5				
Cenário 02	V3/P3	1,09	0,8	0,5	15,45	0,4	P1	9,75	0,6	53,76	9984	80%	21:00 - 00:00
							P2	7,79	0,5				
Cenário 03	V4/P3	0,82	0,8	0,5	11,59	0,4	P1	7,31	0,6	40,32	7488	60%	00:00 - 06:00
							P2	5,84	0,5				
VIA F													
Descrição	Classe da Iluminação	Via (2x)					Passeio			Pot. (W)	Fluxo Luminoso	Dimerização	horário
		L _{med}	U _L	U _O	E _{med,min}	U	Passeio	E _{med}	U				
Cenário 01	V3/P3	1,62	0,7	0,4	22,82	0,3	P1	9,61	0,5	67,2	12480	100%	18:00 - 21:00
							P2	9,61	0,5				
Cenário 02	V3/P3	1,13	0,7	0,4	15,97	0,3	P1	6,73	0,5	47,04	8736	70%	21:00 - 00:00
							P2	6,73	0,5				
Cenário 03	V4/P4	0,81	0,7	0,4	11,41	0,3	P1	4,81	0,5	33,6	6240	50%	00:00 - 06:00
							P2	4,81	0,5				
VIA G													
Descrição	Classe da Iluminação	Via					Passeio			Pot. (W)	Fluxo Luminoso	Dimerização	horário
		L _{med}	U _L	U _O	E _{med,min}	U	Passeio	E _{med}	U				
Cenário 01	V4/P3	0,94	0,7	0,4	13,84	0,4	P1	5,71	0,5	54,7	10233	100%	18:00 - 21:00
							P2	7,61	0,7				
Cenário 02	V4/P4	0,75	0,7	0,4	11,07	0,4	P1	4,57	0,5	43,76	8186,4	80%	21:00 - 00:00
							P2	6,09	0,7				
Cenário 03	V5/P4	0,56	0,7	0,4	8,3	0,4	P1	3,43	0,5	32,82	6139,8	60%	00:00 - 06:00
							P2	4,57	0,7				
VIA H													
Descrição	Classe da Iluminação	Via					Passeio			Pot. (W)	Fluxo Luminoso	Dimerização	horário
		L _{med}	U _L	U _O	E _{med,min}	U	Passeio	E _{med}	U				
Cenário 01	V4/P4	1,42	0,7	0,4	14,22	0,4	P1	9,22	0,4	54,7	10233	100%	18:00 - 21:00
							P2	7,33	0,7				
Cenário 02	V4/P4	1,14	0,7	0,4	11,38	0,4	P1	7,38	0,4	43,76	8186,4	80%	21:00 - 00:00
							P2	5,86	0,7				
Cenário 03	V5/P4	0,71	0,7	0,4	7,11	0,4	P1	4,61	0,4	27,35	5116,5	50%	00:00 - 06:00
							P2	3,67	0,7				
VIA I													
Descrição	Classe da Iluminação	Via					Passeio			Pot. (W)	Fluxo Luminoso	Dimerização	horário
		L _{med}	U _L	U _O	E _{med,min}	U	Passeio	E _{med}	U				
Cenário 01	V5/P4	0,62	0,7	0,4	8,1	0,3	P1	4,91	0,3	34,1	6069,4	100%	18:00 - 21:00
							P2	3,95	0,4				
Cenário 02	V5/P4	0,56	0,7	0,4	7,29	0,3	P1	4,42	0,3	30,69	5462,46	90%	21:00 - 00:00
							P2	3,56	0,4				
Cenário 03	V5/P4	0,5	0,7	0,4	6,48	0,3	P1	3,93	0,3	27,28	4855,52	80%	00:00 - 06:00
							P2	3,16	0,4				
VIA J													

Descrição	Classe da Iluminação	Via					Passeio			Pot. (W)	Fluxo Luminoso	Dimerização	horário
		L_{med}	U_L	U_o	$E_{med,min}$	U	Passeio	E_{med}	U				
Cenário 01	V5/P4	0,73	0,7	0,5	8,58	0,3	P1	4,91	0,3	34,1	6069,4	100%	18:00 - 21:00
							P2	7,44	0,4				
Cenário 02	V5/P4	0,58	0,7	0,5	6,86	0,3	P1	3,93	0,3	27,28	4855,52	80%	21:00 - 00:00
							P2	5,95	0,4				
Cenário 03	V5/P4	0,51	0,7	0,5	6,01	0,3	P1	3,44	0,3	23,87	4248,58	70%	00:00 - 06:00
							P2	5,21	0,4				

Fonte: Do autor.

Conforme observado, foram utilizados três cenários distintos, como demonstrado na tabela 5.10. A soma dos três cenários resulta em 12 horas de operação das luminárias públicas LED.

Tabela 5.10 – Descrição dos cenários

Cenários	Horário de operação	Dimerização dinâmica	Identificação das vias
Cenário 01	06:00 – 21:00	100%	Aplicado em todas as Vias
		90%	Via A, Via I
Cenário 02	21:00 – 00:00	80%	Via E, Via G, Via H, Via J
		70%	Via B, Via F, Via D
		60%	Via C
		80%	Via I
Cenário 03	00:00 – 06:00	70%	Via J
		60%	Via A, Via E, Via G
		50%	Via B, Via F, Via H
		40%	Via C, Via D

Fonte: Do autor.

5.3 Resultados e Discussão

5.3.1 Desempenho Energético com a Aplicação do Retrofit

As Tabelas 5.11 e 5.12 exibem os dados relativos à tecnologia convencional e ao LED. Para calcular o consumo de eletricidade, foi utilizado o preço da tarifa de R\$ 0,44363 (kWh), conforme classe tarifária (B4).

Tabela 5.11 – Informações da Tecnologia Convencional.

Dados da Tecnologia Convencional						
Potência (W)	Potência do Reator (W)	N° de Luminárias	Potência Unitária(W)	Consumo (kWh)	Consumo (kWh) Mensal	Consumo (R\$)
70	14	8649	84,00	726,52	249558,25	R\$ 110.711,52
100	17	996	117,00	116,53	40028,74	R\$ 17.757,95
150	22	1967	172,00	338,32	116214,29	R\$ 51.556,15
250	30	2576	280,00	721,28	247759,68	R\$ 109.913,63
400	38	602	438,00	263,68	90572,71	R\$ 40.180,77

Fonte: Do autor.

Tabela 5.12 – Informações da Tecnologia LED.

Dados da Tecnologia LED					
Potência (W)	N° de Luminárias	Consumo (kWh)	Consumo (kWh) Mensal	Consumo (R\$)	
152,7	1098	167,66	57592,79	R\$	25.549,89
152,7	580	88,57	30422,42	R\$	13.496,30
121,7	1755	213,58	73365,93	R\$	32.547,33
121,7	915	111,36	38250,61	R\$	16.969,12
67,2	1257	84,47	29015,58	R\$	12.872,18
67,2	75	5,04	1731,24	R\$	768,03
54,7	930	50,87	17474,19	R\$	7.752,07
54,7	659	36,05	12382,25	R\$	5.493,14
34,1	2966	101,14	34741,80	R\$	15.412,50
34,1	4555	155,33	53354,31	R\$	23.669,57

Fonte: Do autor.

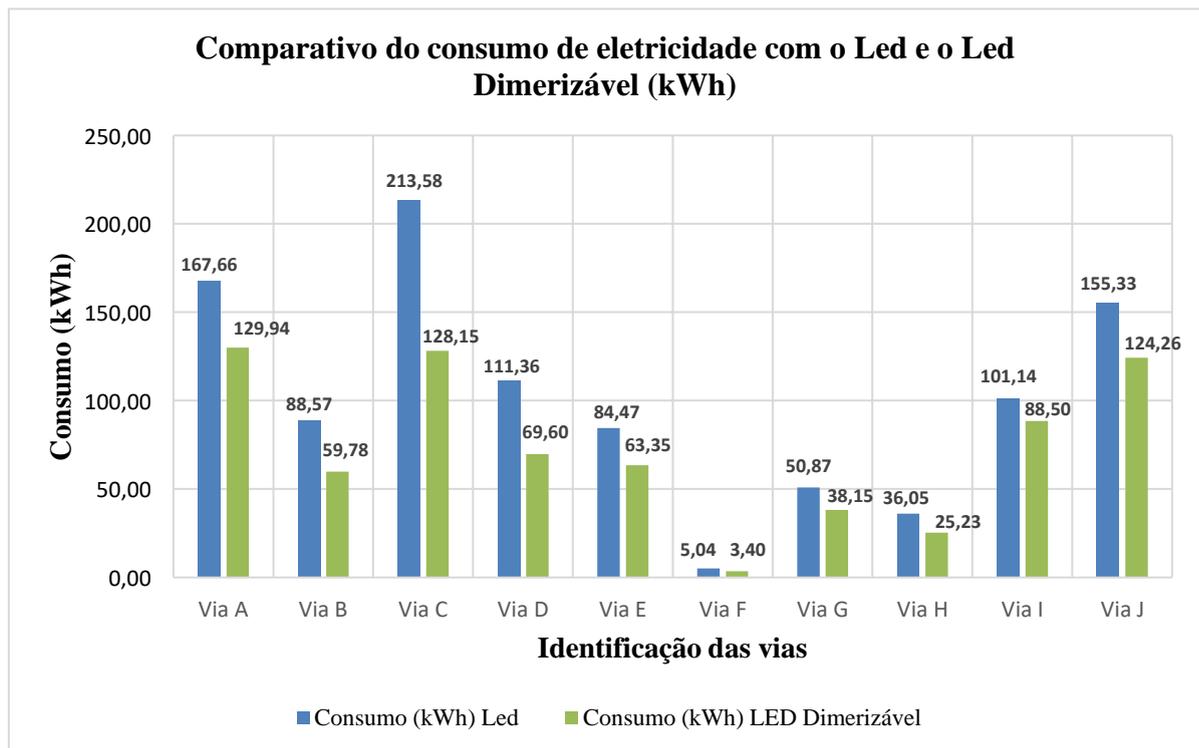
A substituição das tecnologias, de vapor de sódio para LED, gerou uma economia de 53% no consumo de energia no grupo de luminárias em estudo, composto por 14.790 pontos de iluminação convencional distribuídos pelas vias públicas no município de Jataí. Além disso, foi observada uma economia mensal de R\$ 175.589,14 nesse grupo de luminárias, o que equivale a uma economia anual no custeio do município na fatura de energia de R\$ 2.107.078,60.

5.3.2 Desempenho Energético com a Aplicação da Dimerização

A aplicação da telegestão possibilita a manipulação remota das luminárias públicas, incluindo a capacidade de dimerização. Este estudo permitiu a avaliação dos benefícios energéticos ao implementar a tecnologia LED em conjunto com a economia de energia proporcionada pela dimerização dinâmica.

Na Figura 5.11, é exibido o desempenho energético alcançado em cada tipo de via analisada, destacando as maiores reduções de consumo nas vias dos tipos C e D.

Figura 5.11 – Desempenho Energético das Vias.



Fonte: Do autor.

Na Tabela 5.13 estão listados os valores absolutos reduzidos, com destaque para a via tipo J, que mesmo sem aplicar alternância de classe, gerou uma economia de 11%. Isso ocorre porque todas as luminárias, quando submetidas aos índices normativos, são sobredimensionadas, operando sempre acima do exigido normativamente, permitindo assim uma faixa de dimerização.

Tabela 5.13 – Desempenho Energético das Vias.

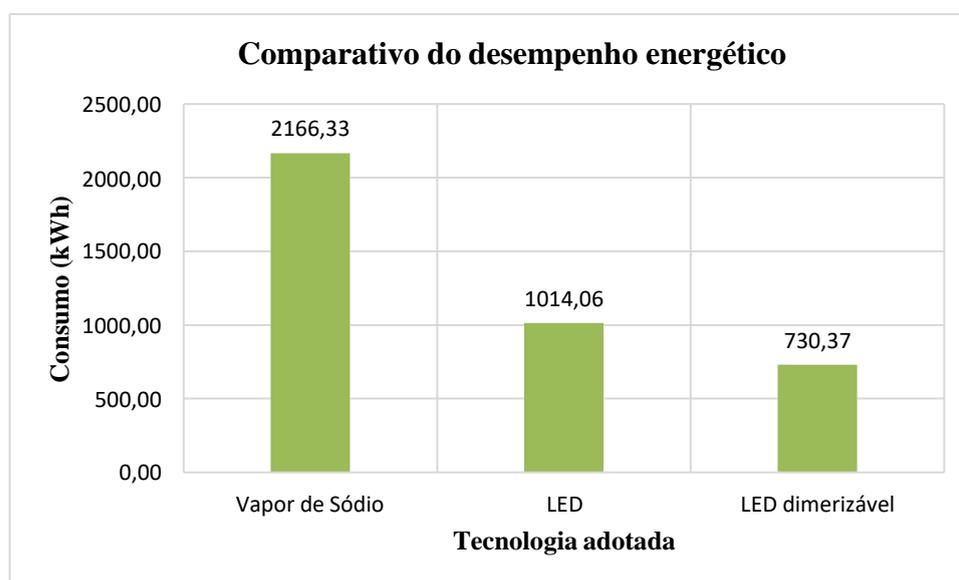
Identificação da via	Consumo (kWh) Led	Consumo (kWh) Led Dimerizável	Número de luminárias	Economia gerada (kWh)	Porcentagem
Via A	167,66	129,94	1.098	37,72	13%
Via B	88,57	59,78	580	28,78	10%
Via C	213,58	128,15	1.755	85,43	30%
Via D	111,36	69,6	915	41,76	15%
Via E	84,47	63,35	1.257	21,12	7%
Via F	5,04	3,4	75	1,64	1%
Via G	50,87	38,15	930	12,72	4%
Via H	36,05	25,23	659	10,81	4%
Via I	101,14	88,5	2.966	12,64	4%
Via J	155,33	124,26	4.555	31,07	11%

Fonte: Do autor.

A maior redução de consumo foi observada na via C, alcançando uma redução de 30%, seguida pela via D, com 15%, e por fim a via A, com 13%. Esses resultados destacam a influência positiva da dimerização, especialmente em vias com classes de iluminação mais elevadas. É importante ressaltar que os resultados podem variar dependendo da luminária considerada para o estudo e da alternância de classe ao longo do uso, sendo esses fatores essenciais para uma eficiente gestão energética.

Após análise realizada, constatou-se que a implementação da dimerização nas vias avaliadas resultou em uma redução significativa de 28% em comparação com as luminárias de LED não dimerizadas. Isso equivale a uma economia mensal de aproximadamente 102.130,70 kWh e implica em um valor de economia anual nos custos da fatura de energia para iluminação pública de R\$ 454.622,90

A seguir, na Figura 5.12, é possível observar que o consumo do grupo de luminárias de vapor de sódio é de 2.166 kWh, enquanto o consumo para o LED dimerizável é de 730,37 kWh. Isso representa uma economia de 66%, considerando a substituição de tecnologias para LED associado ao uso da dimerização.

Figura 5.12 – Desempenho Energético das Tecnologias Estudadas.

Fonte: Do autor.

5.3.3 Avaliação Econômica

O conjunto de luminárias examinadas neste artigo consiste em 14.790 pontos de iluminação de vapor de sódio, com potências variando de 70W a 400W, resultando em um consumo para o município de R\$ 330.120,02.

É crucial ressaltar que esta análise foi conduzida especificamente no grupo de luminárias de vapor de sódio utilizadas em vias públicas. Portanto, é importante reconhecer que ainda existem luminárias convencionais instaladas em parques e praças que precisam ter suas tecnologias substituídas e dimerizadas. Dessa forma, o presente estudo não aborda esse grupo.

Adicionalmente, há luminárias no parque de iluminação pública do município que já estão equipadas com tecnologia LED e podem ser consideradas para uma nova proposta de retrofit, incluindo a possibilidade de dimerização.

Aplicando-se uma tarifa de R\$ 0,44363 kWh, valor este utilizado na atual fatura de energia elétrica do município de Jataí, obteve-se um valor economizado durante o período de um dia e mês conforme pode ser observado na Tabela 6.14

Com base na análise realizada, tornou-se evidente que a troca de tecnologia é a abordagem mais vantajosa para o município. Ao considerar a implementação do sistema de telegerenciamento nas luminárias avaliadas, essa economia pode ser aumentada, podendo chegar a uma economia anual de R\$ 2.561.701,50. Abaixo estão os custos médios mensais com grupo de luminárias avaliadas.

Tabela 5.14 – Custeio com Iluminação Pública.

Identificação	Valor da tarifa (R\$/kWh)	Período considerado por dia de funcionamento (horas)	Consumo kWh / mês	Consumo R\$/mês	
Vapor de Sódio	0,44363	11,45	744134	R\$	330.120,02
LED	0,44363	11,45	348331	R\$	154.530,14
LED dimerizável	0,44363	12	262933	R\$	116.644,89

Fonte: Do autor.

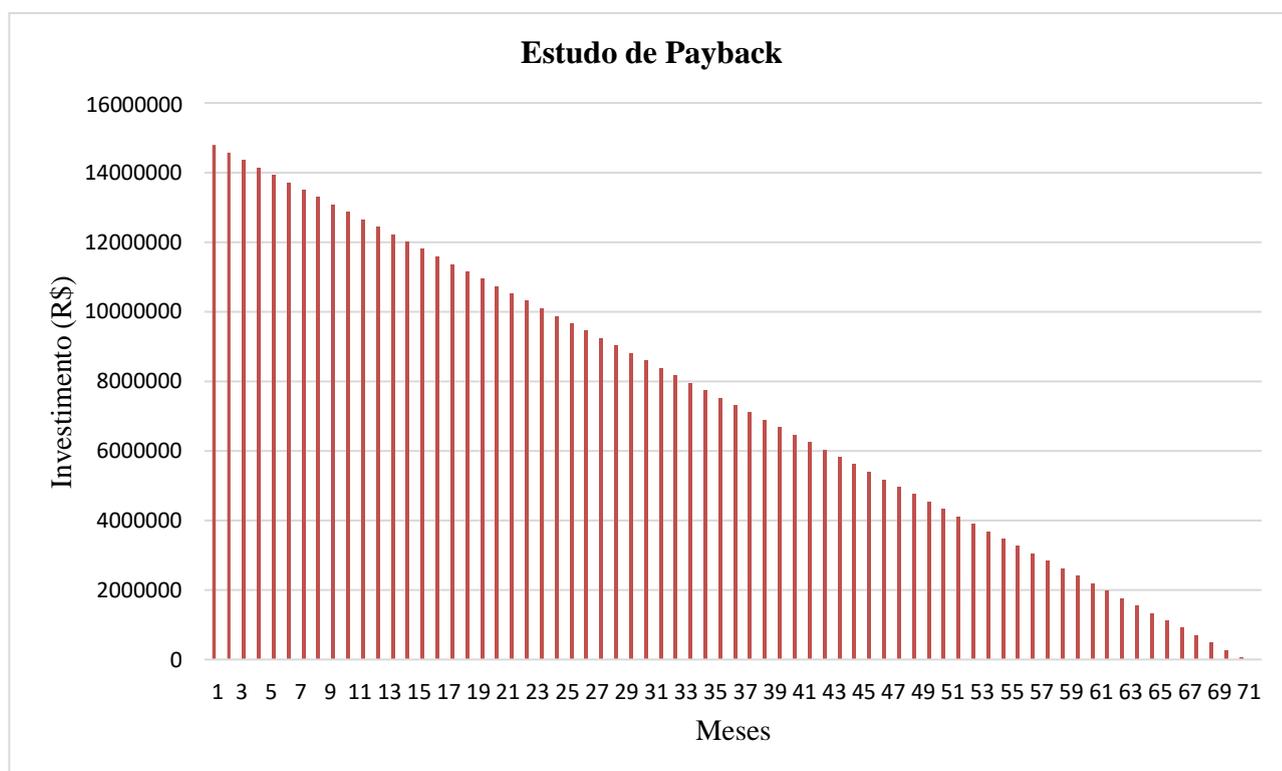
Os custos associados à implementação da telegestão ainda são elevados, como pode ser observado na tabela 5.15, onde o custo médio por ponto telegestável é de R\$ 286,85. Esses valores foram obtidos por meio de um processo licitatório ao qual o município de Jataí realizou no ano de 2024. Na tabelas abaixo são apresentados os valores por ponto para se implantar a telegestão na iluminação pública

Tabela 5.15 – Valores para Implementação do Retrofit e Telegestão.

Investimento para aquisição de luminárias LED e Telegestão				
Descrição dos serviços	Custo Unitário (R\$)	N° de Luminárias	Custo Total (R\$)	
Luminária e Mão de Obra	R\$ 713,27	14790	R\$	10.549.263,30
Sistema de Telegestão	R\$ 286,85	14.790	R\$	4.242.511,50

Fonte: Do autor.

O *payback* é o método mais utilizado para avaliar investimentos em eficiência energética. Consiste simplesmente na determinação do número de períodos necessários para recuperar o capital investido, sem levar em consideração as consequências além do período de recuperação e o valor do dinheiro no tempo (Almeida, 2019). A Figura 5.13 apresenta o estudo de *payback* simples.

Tabela 5.13 – Estudo de Payback Simples.

Fonte: Do autor.

Com base nos dados apresentados, fica evidente que o custo para implementar um sistema de telegestão ainda é alto, sendo que o *payback* será efetivamente compensado em um período de 71 meses, isso equivale a aproximadamente 5 anos e 11 meses.

Tendo em vista que as luminárias LED e os controladores aplicados no sistema de telegestão possuem uma garantia mínima do fabricante de 5 anos e considerando que a vida útil desses produtos seja superior ao 60 meses, a implementação do retrofit associado a telegestão pode ser considerado uma opção viável.

No entanto, é fundamental destacar que a telegestão não se limita apenas à dimerização de luminárias, ela também possibilita um controle mais eficiente do parque de iluminação pública. Além disso, permite melhorar o controle do faturamento junto à concessionária de energia, que atualmente se baseia em estimativas, além de facilitar as equipes de campo nas manutenções, uma vez que possibilita o controle em tempo real das luminárias.

5.4 Conclusões

A substituição das luminárias convencionais de vapor de sódio pela tecnologia LED,

combinada com a implantação da dimerização, pode resultar em economias ainda maiores, chegando até 66%, conforme demonstrado no estudo.

Em certas vias analisadas, foram observados ganhos energéticos expressivos com a dimerização dinâmica, como por exemplo na via tipo D, que alcançou uma economia de 30%, variando de V2/P2 para V4/P3 ao aplicar uma dimerização de 40%.

Os melhores desempenhos energéticos ficaram a cargo das vias de maior classe de iluminação, que proporcionalmente possuem uma maior potência. Apesar de algumas vias apresentarem um potencial limitado de dimerização, como a via J, que devido à sua classificação como V5/P4 não alternância de classe de iluminação, ainda assim registrou ganhos energéticos de 11% ao aplicar uma dimerização de 70% durante o uso.

Uma análise mais aprofundada sobre a classificação das vias com base no fluxo de veículos em horários específicos pode ser empregada como uma ferramenta de caracterização para a classificação da iluminação e otimização energética. Isso permite aproveitar ao máximo o potencial de economia, especialmente em vias como V1 e V2, que demandam níveis mais elevados de iluminância, luminância e uniformidade.

A versão atual da NBR 5101 não abrange as novas perspectivas que surgiram com o avanço do controle e gestão dos sistemas de iluminação pública, especialmente aqueles baseados na tecnologia LED com a possibilidade de dimerização e alternância da classe de iluminação. Este estudo de caso destaca a importância de uma abordagem integrada e responsiva às demandas contemporâneas dos parques de iluminação urbana.

O investimento em sistemas telegerenciáveis tem custos elevados, o que torna sua aquisição insustentável do ponto de vista econômico. No entanto, sua implementação é o ponto de partida para o desenvolvimento de cidades inteligentes.

5.5 Referências Bibliografia

ABREU, J. P. M. de; MARCHIORI, F. F. Ferramentas de avaliação de desempenho de cidades inteligentes: uma análise da norma ISO 37122:2019. **Pesquisa em Arquitetura e Construção**. v. 14, n. 00, p. e023002, 2023.

ALMEIDA, C. R. **Proposta de melhoria no desempenho energético: estudo de caso em uma instituição de ensino básico e superior em Itajubá**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá. Rio de Janeiro: 2019.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). Nota Técnica nº 0058/2022, de 8 Setembro de 2022.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). Resolução Normativa nº 1000/2021, de 7 Dezembro de 2021.

ARAÚJO, J.F.; SILVA, L.L.; OLIVEIRA, L.B.; FORTES, M.Z.; BORBA, B.S.M.C.; COLOMBINI, A.C. Assessment of the Technological Update of Public Lighting in Brazil. *IEEE Latin America Transactions*, v. 18, p.985-991, 6 jun. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5101**: Iluminação Pública - Procedimentos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

GOMES, A, C.; SILVA, T, M, F.; RODRIGUES, T, L, C.; CORTES, R, C.; SORIANO, F,R.; ROCHA, A, N. Procel – Reluz – Iluminação pública e sinalização semafórica eficientes. *CEEL*. v. 15, p. 334, 29 nov. 2019.

LEITE, A, C, D; KURAHASSIM, L, F, T; As potencialidades da iluminação pública no contexto das cidades inteligentes. *Brazilian Journal of Development*. v. 9, n. 5, p. 14508 – 14520, mai. 2023.

MORAES, J, S; ALCOJOR, A, M; BITTENCOURT, L, S. Análise de indicadores de desempenho da iluminação artificial em ambientes residenciais. *Parc Pesquisa em Arquitetura e Construção*. v. 9, p. 35 – 46. marc 2020.

OLIVEIRA, K, C, F; RAMOS, H, R. Cidades inteligentes: desafios e oportunidades de integração da iluminação pública e a tecnologia 5G. *Revista de Tecnologia & Gestão Sustentável*. v. 3, n. 7, p. 59-71, 2023.

OMAR, A; ALMAEENI, S; ATTIA, H; TAKRURI, M; ALTUNAIJI, A; SANDULEANU, M; SHUBAIR, R; ASHHAB, M, S; ALI, M, A; HEBISI, G, A. Smart City: Recent Advances in Intelligent Street Lighting Systems Based on IoT. *Journal of Sensors*. v. 2022, p. 1-10, nov. 2022.

ROMANI, G, F; PINOCHET, L, H, C; PARDIN, V, I; SOUZA, C, A. A segurança como fator-chave para a cidade inteligente, a confiança dos cidadãos e o uso de tecnologias. *Revista de Administração Pública*. v. 57, n. 2, p. 1-27, jan. 2023.

TAKAHASHI, G, B; ROSSI, F, Q; OLIVEIRA, A, M. Uso Consciente da Dimerização e da Temperatura de Cor na Automação de Lâmpadas Inteligentes. *Sociedade Brasileira de Automática*. v. 3, n. 1, p. 3293 – 3300, out. 2022.

WONG, M, O; DU, J; ZHANG, Z, Q; LIU, Y, Q; CHEN, S, M; LEE, S, H. Uma abordagem de projeto de iluminação interativa baseada na experiência usando BIM e VR: **Um estudo de caso**. *Ciência da Terra e Ambiental*. 2019.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A otimização da iluminação pública emergiu como uma medida de extrema relevância em muitos municípios brasileiros, proporcionando viabilidade econômica por meio da redução do consumo de eletricidade e aprimorando os padrões de iluminação em vias, praças, parques, monumentos, fachadas e áreas de paisagismo.

A introdução de sistemas de telegestão na iluminação pública pode impulsionar a sustentabilidade, segurança e eficiência, marcando o início do desenvolvimento de cidades inteligentes ao aprimorar a infraestrutura já existente nos ambientes urbanos.

A implementação da dimerização na iluminação pública se apresenta como uma estratégia inovadora para promover a eficiência energética. Como demonstrado no estudo destacado, a integração desse método, aliado ao uso da tecnologia LED, pode gerar uma economia considerável, alcançando valores próximos a 66%.

Todavia, como observado no estudo conduzido, a telegestão ainda requer um investimento considerável, com um período de retorno próximo de 71 meses, o que sugere uma viabilidade econômica quando associada ao retrofit. No entanto, devemos destacar que a telegestão não se limita apenas à dimerização, ela desempenha um papel crucial no eficiente controle da gestão municipal em relação a esses ativos de iluminação.

Considerando que a NBR 5101 de 2018 ainda está em revisão, sendo a norma específica para iluminação pública viária que não contempla as novas perspectivas decorrentes do avanço no controle e gestão dos sistemas de iluminação pública, especialmente aqueles baseados em tecnologia LED, que viabilizam a dimerização e a alteração da classe de iluminação, nesse contexto, para futuras pesquisas, a aplicação de diversos cenários com diferentes níveis de dimerização pode levar a resultados ainda mais significativos em relação à eficiência energética.

Como uma perspectiva para futuras investigações, seria interessante realizar um estudo detalhado sobre reduzir o horário de funcionamento do parque de iluminação pública no decorrer do ano, visto que quanto menor o tempo de operação das luminárias, maior será a economia de energia gerada.

Destarte, é esperado que futuras pesquisas sejam conduzidas para explorar ainda mais a dimerização dinâmica visando aprimorar a eficiência energética da iluminação pública.