UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Bruno Moreira de Paula

Análise do Potencial de Economia de Energia com a Aplicação de Telegestão na Iluminação Pública do Campus da UFJF

Juiz de Fora
2026

Bruno Moreira de Paula

Análise do Potencial de Economia de Energia com a Aplicação de Telegestão na Iluminação Pública do Campus da UFJF

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora, na área de eficiência de energia, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Israel Filipe Lopes

Juiz de Fora

2026

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração
automática da Biblioteca Universitária da UFJF,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Paula, Bruno Moreira de.
Análise do Potencial de Economia de Energia com a Aplicação de Telegestão na Iluminação Pública do Campus da UFJF / Bruno Moreira de Paula. -- 2026.
54 f. : il.

Orientador: Israel Filipe Lopes
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, 2026.

1. Iluminação Pública.. 2. Telegestão. 3. Eficiência Energética. I. Lopes, Israel Filipe, orient. II. Título.

Bruno Moreira de Paula

Análise do Potencial de Economia de Energia com a Aplicação de Telegestão na Iluminação Pública do Campus da UFJF

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora, na área de eficiência de energia, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovado em: 20 de janeiro de 2026.

BANCA EXAMINADORA

_____

Prof. Dr. Israel Filipe Lopes –
Orientador
Universidade Federal de Juiz de Fora

_____

Prof. Dr. Cristiano Gomes Casagrande
Universidade Federal de Juiz de Fora

AGRADECIMENTO

Agradeço, primeiramente, à minha família, por ser minha base em todos os momentos. À minha mãe, por nunca deixar que eu desistisse, mesmo nas fases mais difíceis do curso, sempre me motivando a seguir em frente com suas palavras de apoio e carinho. Ao meu pai, por todo o suporte e incentivo, por acreditar em mim e me oferecer as condições necessárias para que eu pudesse me dedicar aos estudos.

À Universidade Federal de Juiz de Fora, por ter me proporcionado experiências únicas, aprendizados valiosos e momentos que levarei comigo por toda a vida.

Aos meus grandes amigos Afonso Henrique e Nathan Telles, por estarem sempre ao meu lado durante essa caminhada acadêmica, me incentivando e acreditando no meu potencial, mesmo quando eu duvidava de mim.

Agradeço também a toda a equipe do local onde realizei meu estágio, onde conheci pessoas excelentes que, além de me proporcionarem a oportunidade de estagiar ao seu lado, foram responsáveis por me apresentar o tema deste Trabalho de Conclusão de Curso, o que me fez redescobrir a paixão pela engenharia. Ademais, essa experiência contribuiu para ampliar minha visão quanto a novas oportunidades de atuação e de empreendedorismo na área da engenharia elétrica, cujos ensinamentos tenho levado comigo desde então.

Agradeço ainda a todos que, de alguma forma, contribuíram direta ou indiretamente para essa jornada, cada gesto, conversa ou conselho fez a diferença.

Por fim, deixo um agradecimento especial ao professor Israel Filipe Lopes, meu orientador, por sua paciência, compreensão e dedicação. Mesmo com uma rotina repleta de compromissos, sempre demonstrou empatia, respeitou meu tempo e compreendeu que a vida acadêmica é feita de altos e baixos.

A todos vocês, minha mais sincera gratidão.

“Muitas coisas não ousamos empreender por parecerem difíceis, entretanto, são difíceis porque não ousamos empreendê-las” – Sêneca

RESUMO

A iluminação pública representa um serviço essencial para a sociedade, sendo responsável por uma parcela significativa do consumo de energia elétrica das administrações públicas. Nesse contexto, a adoção de tecnologias que promovam maior eficiência energética torna-se fundamental, especialmente em ambientes com padrões de uso variáveis. A telegestão aplicada à iluminação pública surge como uma alternativa capaz de ampliar os benefícios da tecnologia LED, possibilitando o monitoramento, controle, e a aplicação de estratégias de dimerização das luminárias.

O presente estudo tem como objetivo analisar o potencial de economia de energia elétrica proporcionado pela aplicação de sistemas de telegestão na iluminação pública do campus da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). A metodologia baseia-se na comparação entre um cenário de referência, com operação contínua das luminárias em potência nominal, e cenários alternativos que consideram a variação temporal e espacial da circulação de usuários, respeitando as diretrizes da ABNT NBR 5101. Os resultados indicam que a aplicação de estratégias de dimerização, especialmente aquelas associadas à setorização do campus, pode gerar reduções significativas no consumo de energia elétrica sem comprometer os requisitos mínimos de segurança e conforto visual, evidenciando o potencial da telegestão como ferramenta de eficiência energética.

Palavras-chave: Iluminação pública; Telegestão; Dimerização; Eficiência energética; Economia de energia.

ABSTRACT

Public lighting is an essential service for society, representing a significant share of the electricity consumption of public administrations. In this context, the adoption of technologies that promote greater energy efficiency becomes fundamental, especially in environments with variable usage patterns. The application of telemanagement systems to public lighting emerges as an alternative capable of enhancing the benefits of LED technology, enabling monitoring, control, and the implementation of luminaire dimming strategies.

This study aims to analyze the potential for energy savings provided by the application of telemanagement systems in the public lighting of the campus of the Federal University of Juiz de Fora (UFJF). The methodology is based on the comparison between a reference scenario, in which luminaires operate continuously at nominal power, and alternative scenarios that consider temporal and spatial variations in user circulation, in accordance with the guidelines established by ABNT NBR 5101. The results indicate that the application of dimming strategies, especially those associated with campus zoning, can lead to significant reductions in electricity consumption without compromising minimum safety and visual comfort requirements, highlighting the potential of telemanagement as an energy efficiency tool.

Keywords: Street lighting; Telemanagement; Dimming; Energy efficiency; Energy savings.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Troca de luminária de Vapor de Sódio por LED no anel viário da UFJF 17
Figura 2 - Representação conceitual de uma Smart Cities 18
Figura 3 - Belo Horizonte SMART City Program 20
Figura 4 - Centro de Controle Operacional da iluminação pública de Palhoça 23
Figura 5 - Rede de comunicação integrada da iluminação pública 23
Figura 6 - Representação do controle de dimerização via PWM 26
Figura 7 - Dimerização 0-10V e 1-10V 27
Figura 8 - Forma de Onda do Triac 28
Figura 9 - Campus UFJF 32
Figura 10 - Luminária SL VITTA V9.3 33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificações Técnicas da Luminária SL VITTA – 200 34
Tabela 2 - Parâmetros para determinação da classe de iluminação C 38
Tabela 3 - Requisitos de iluminação para a classe de iluminação C 38
Tabela 4 - Iluminância Estimada 41
Tabela 5 - Intensidade Luminosa do Cenário 2 42
Tabela 6 - Intensidade Luminosa do Cenário 3 43
Tabela 7 - Intensidade luminosa por Setor no Cenário de Dimerização Setorizada 45
Tabela 8 - Resultado de consumo e economia por cenário 50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BH LAB	Laboratório de Inovação de Belo Horizonte
CCO	Centro de Controle Operacional
CU	Coeficiente de Utilização
Em	Iluminância Média
FM	Fator de Manutenção
IEC	International Electrotehnicak Commission
IEEE	Institute of Eletrical and Electronics Engineers
IK	Índice de Proteção contra Impactos Mecânicos
Iot	Internet of Things (Internet das Coisas)
IP	Iluminação Pública
IP66	Grau de Proteção
IRC	Índice de Reprodução de Cor
ISO	International Organization for Standardization
LED	Light Emitting Diode
LDR	Light Dependent Resistor
lm	Lúmen
lm/W	Lúmen por Watt
L70	Vida útil (70% do fluxo luminoso)
NBR	Norma Brasileira
NIMO	Núcleo de Iluminação
PJF	Prefeitura de Juiz de Fora
PPP	Parceria Pública-Privada
PWM	Pulse Width Modulation
TCC	Temperatura de Cor Correlata
UFJF	Universidade Federal de Juiz de Fora
U0	Uniformidade Geral
Vp	Valor de Ponderação
Vps	Soma dos Valores de Ponderação

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES 9
LISTA DE TABELAS 10
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS 11
1 INTRODUÇÃO 14
1.1 OBJETIVO 15
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO 15
2 SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA E TELEGESTÃO 16
2.1 ILUMINAÇÃO LED 16
2.2 SMART CITIES E SMART GRID 17
2.3 CIDADES INTELIGENTES 19
2.3.1 BELO HORIZONTE – MG 19
2.3.2 CURITIBA – PR 20
2.3.3 UBERLÂNDIA – MG 21
2.3.4 PALHOÇA - SC 21
2.4 SISTEMA DE TELEGESTÃO 24
2.4.1 TÉCNICAS DE DIMERIZAÇÃO 25
2.4.2 COMUNICAÇÃO COM FIO 29
2.4.3 COMUNICAÇÃO SEM FIO 29
2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO 30
3 CARACTERISTICAS DO CAMPUS E DEFINIÇÃO DE CENÁRIOS 31
3.1 CARACTERISTICAS DO CAMPUS DA UFJF 31
3.2 CARACTERÍSITICAS DAS LUMINÁRIAS 32
3.3 DIRETRIZES NORMATIVAS APLICÁVEIS (NBR 5101:2024) 35
3.3.1 CLASSIFICAÇÃO DAS VIAS SEGUNDO A NBR 5101:2024 35
3.3.2 ADEQUAÇÃO DO CAMPUS ÀS CLASSES DA NORMA 37
3.3.3 RELAÇÃO ENTRE DIMERIZAÇÃO E ATENDIMENTO NORMATIVO 41
3.4 CENÁRIOS DE DIMERIZAÇÃO 41
3.4.1 DEFINIÇÃO DE CENÁRIOS 41

4 ANALISE DOS CENÁRIOS E ESTIMATIVA DE ECONOMIA 46
4.1 METODOLOGIA DE CÁLCULO DA ECONOMIA 46
4.1.1 POTÊNCIA INSTALADA CONSIDERADA 46
4.1.2 PERÍODO DE OPERAÇÃO DA ILUMINAÇÃO 47
4.1.3 MODELO DE DIMERIZAÇÃO ADOTADO 47
4.1.4 CÁLCULO DO CONSUMO DE ENERGIA 48
4.1.5 DETERMINAÇÃO DA ECONOMIA DE ENERGIA 48
4.1.6 CONSIDERAÇÕES SOBRE INCERTEZAS 48
4.2 CENÁRIO DE REFERÊNCIA 49
4.3 CONSUMO E ECONOMIA POR CENÁRIO DE DIMERIZAÇÃO 49
4.3.1 CONSUMO DE ENERGIA NO CENÁRIO DE REFERÊNCIA 50
4.3.2 CONSUMO E ECONOMIA NOS CENÁRIOS DE DIMERIZAÇÃO 50
4.3.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS CENÁRIOS ANALISADOS 50
4.3.4 SÍNTESE DOS RESULTADOS 51
4.4 ANÁLISE COMPARATIVA E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS 51
5 CONCLUSÃO 53
5.1 TRABALHOS FUTUROS 53
REFERÊNCIAS 54

1 INTRODUÇÃO

A iluminação pública constitui um serviço essencial para o funcionamento adequado dos espaços urbanos, estando diretamente associada à segurança e à qualidade de vida das pessoas. Em ambientes de grande circulação, como o campus universitário, a iluminação desempenha um papel ainda mais relevante, uma vez que atende simultaneamente a requisitos de segurança viária, circulação de pedestres e permanência de pessoas em diferentes períodos do dia. De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas, os sistemas de iluminação pública devem garantir condições adequadas de visibilidade e conforto visual, respeitando critérios mínimos estabelecidos em norma específica (ABNT NBR 5101:2024).

No Brasil, a iluminação pública representa uma parcela significativa do consumo de energia elétrica, refletindo diretamente nos custos operacionais das administrações públicas (CREA-PR, 2016). Nesse contexto, a busca por soluções que promovam maior eficiência energética, sem comprometer os níveis mínimos de segurança e conforto visual, tem se tornado cada vez mais necessário. A modernização dos sistemas de iluminação, associado ao uso de tecnologias mais eficientes, surge como uma estratégia fundamental para a redução do consumo energético e para a otimização da gestão desses sistemas.

A substituição de tecnologias convencionais por luminárias LED tem se consolidado como uma das principais iniciativas nesse processo, devido à maior eficiência luminosa, maior vida útil e maior flexibilidade de controle oferecida por essa tecnologia. Entretanto, a simples adoção de luminárias mais eficientes nem sempre garante a maximização do potencial de economia de energia, especialmente em locais onde a demanda por iluminação varia ao longo do tempo e do espaço.

Nesse cenário, os sistemas de telegestão aplicados à iluminação pública destacam-se como uma solução capaz de ampliar os benefícios da tecnologia LED. Por meio do monitoramento e do controle remoto das luminárias, a telegestão possibilita a implementação de estratégias de dimerização, permitindo a adequação dos níveis de iluminação às condições reais de uso do ambiente, como horários de maior ou menor circulação de usuários. Além disso, esses sistemas contribuem para a melhoria da operação e manutenção da rede de iluminação, ao facilitar a identificação de falhas e o acompanhamento do desempenho do sistema.

Diante dessas possibilidades, torna-se relevante avaliar o impacto da aplicação da telegestão não apenas do ponto de vista tecnológico, mas também sob a ótica da eficiência energética. Assim, este trabalho propõe a análise do potencial de economia de energia elétrica decorrente da adoção de estratégias de dimerização viabilizadas por sistemas de telegestão na

iluminação pública do campus da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). Para isso, são considerados diferentes cenários de operação, definidos a partir dos padrões de circulação e uso do campus, respeitando as diretrizes normativas aplicáveis à iluminação pública.

Ao focar na estimativa de economia de energia associada à variação temporal e espacial da iluminação, este estudo busca contribuir para a discussão sobre o uso racional da energia elétrica em instituições públicas, demonstrando como soluções de controle inteligente podem ser aplicadas de forma planejada e tecnicamente viável em ambientes complexos como um campus universitário.

1.1 OBJETIVO

O objetivo do trabalho é analisar a viabilidade técnica e os benefícios da implementação de um sistema de telegestão na iluminação pública do campus da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), com foco na otimização do consumo de energia elétrica. Para isso, são avaliadas estratégias de dimerização das luminárias, visando à redução do consumo energético e dos custos operacionais, bem como à manutenção dos níveis adequados de segurança e eficiência do sistema de iluminação.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O pressente trabalho está organizado da seguinte forma.

No Capítulo 2 – Sistemas de Iluminação Pública e Telegestão são apresentados os conceitos fundamentais relacionados aos sistemas de iluminação pública e a telegestão abordando aspectos tecnológicos e funcionais dessas soluções.

No Capítulo 3 – Características do Campus e Definição de Cenários é descrito o contexto do campus da UFJF, bem como as diretrizes normativas aplicáveis e a definição dos cenários de dimerização analisados.

No Capítulo 4 – Análise de Cenários e Estimativa de Economia é apresentada a metologia de cálculo e a estimativa da economia de energia elétrica obtida com a aplicação dos cenários propostos, incluindo a análise e discussão dos resultados.

Por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões do trabalho e sugestões para estudos futuros.

2 SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA E TELEGESTÃO

Este capítulo apresenta os conceitos fundamentais que embasam o estudo de caso sobre a implementação de telegestão voltada para eficiência energética no campus da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). Nele serão abordados o funcionamento das luminárias LED, o conceito de telegestão, as técnicas de dimerização e a relevância das cidades inteligentes, relacionando esses temas ao objetivo de reduzir o consumo energético no campus.

2.1 ILUMINAÇÃO LED

As lâmpadas predominantes na Iluminação Pública (IP) incluem lâmpadas a vapor de mercúrio, vapor de sódio, vapor metálico e LED. Sendo a primeira uma tecnologia mais antiga, enquanto a última corresponde à solução mais moderna e eficiente, apresentando uma série de vantagens em relação às outras fontes luminosas.

A iluminação por LED funciona por meio do fenômeno da eletroluminescência, no qual a aplicação de uma corrente elétrica nos terminais do dispositivo faz com que ele emita luz. Nesse tipo de iluminação, o Diodo Emissor de Luz é o componente responsável por converter a energia elétrica em radiação visível. Essa tecnologia oferece uma série de benefícios, entre eles a reprodução mais fiel das cores, a vida útil prolongada e a redução significativa da necessidade de manutenção. Além disso, os LEDs possuem elevada eficiência óptica, o que melhora a qualidade da iluminação em espaços públicos. Somam-se a esses pontos a diminuição das emissões de gases poluentes, a ausência de metais tóxicos e a capacidade de dimerização, tornando o LED uma solução mais sustentável e ambientalmente adequada para a iluminação urbana.

Diante dessas vantagens, a iluminação com luminárias LED se apresenta como base desse estudo, especialmente porque a maioria das luminárias do campus da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) já utiliza essa tecnologia. No campus, foram instaladas luminárias LED de 200 W, com eficiência luminosa de 162 lúmens por watt (lm/W), o que significa que produzem uma grande quantidade de luz com baixo consumo de energia. Esse cenário já representa um avanço significativo. Contudo, com a implementação da telegestão, espera-se reduzir ainda mais o consumo energético por meio do ajuste do fluxo luminoso dessas luminárias.

A Figura 1 ilustra a substituição das luminárias convencionais de Vapor de Sódio do campus da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) por luminárias baseadas em tecnologia LED, evidenciando o processo de modernização do sistema de iluminação.

Figura 1 - Troca de luminária de Vapor de Sódio por LED no anel viário da UFJF



Fonte: (Prefeitura de Juiz de Fora, 2025)

2.2 SMART CITIES E SMART GRID

O conceito de “Smart Cities” emergiu nas últimas décadas como resposta aos desafios urbanos derivados da digitalização, do crescimento populacional e da necessidade de serviços mais eficientes. A cidade passa a ser entendida como um ambiente estruturado pela conectividade e pela circulação de informações, no qual infraestrutura física e sistemas computacionais convergem para aprimorar a qualidade de vida da população (CLEMENTE et *al.*, 2021). Essa visão parte do princípio de que o uso estratégico da tecnologia é capaz de solucionar problemas complexos, integrando dados provenientes de diferentes fontes para apoiar decisões em tempo real e otimizar processos urbanos (ULLAH, 2017).

A construção desse ecossistema inteligente envolve a adoção de sensores distribuídos, redes de comunicação de baixa energia e plataformas analíticas avançadas. Tecnologias baseadas em inteligência artificial, machine learning e deep learning permitem monitorar fenômenos urbanos, prever cenários e automatizar operações de maneira eficiente (SERBAN, 2020). A abrangência das aplicações é ampla, englobando setores como saneamento, mobilidade, segurança pública, monitoramento ambiental, gestão de resíduos, abastecimento de

água, IP e distribuição de energia elétrica. Esse conjunto de sistemas forma uma estrutura integrada que funciona de maneira coordenada, apoiando governança, planejamento urbano e sustentabilidade (IWASA, 2025).

No campo energético, a ideia de cidades inteligentes encontra um paralelo direto no conceito de Smart Grids, que representam a modernização das redes elétricas tradicionais por meio de tecnologias digitais, comunicação bidirecional e automação. Essa abordagem visa ampliar a confiabilidade do sistema, aumentar sua eficiência e permitir uma gestão mais inteligente do fluxo de energia. Essa infraestrutura possibilita o monitoramento contínuo da rede, a detecção rápida de falhas, controle de cargas, integração de fontes renováveis e o uso de medidores inteligentes, configurando um sistema mais resiliente, seguro e alinhado com as demandas contemporâneas.

Assim, Smart Cities e Smart Grids devem ser compreendidas como elementos interdependentes. A transformação do ambiente urbano exige redes de energia capazes de sustentar soluções avançadas de automação, enquanto a modernização do sistema elétrico se beneficia da digitalização das cidades e da crescente disponibilidade de dados. A convergência entre esses dois conceitos fornece as bases para ambientes urbanos mais eficientes, sustentáveis e tecnologicamente preparados para atender às necessidades da sociedade moderna.

A Figura 2 ilustra diferentes áreas de aplicação do conceito de Smart Cities, destacando seu potencial de integração com soluções tecnológicas.

Figura 2 - Representação conceitual de uma Smart Cities



Fonte: (CIVILIZAÇÃO ENGENHARIA, 2019)

2.3 CIDADES INTELIGENTES

Diversas localidades que adotaram sistemas de telegestão na IP serão consideradas ao longo deste estudo, englobando tanto aplicações centrais quanto iniciativas complementares. A inclusão desses exemplos, especialmente no contexto nacional, permite evidenciar a expansão e a importância dessa tecnologia, que vem ganhando destaque mundialmente por seu potencial de otimizar recursos, aprimorar serviços urbanos e fortalecer a gestão inteligente da infraestrutura pública.

2.3.1 BELO HORIZONTE – MG

Destacando-se como um caso relevante de cidade inteligente no Brasil, Belo Horizonte demonstra como a tecnologia pode transformar a IP e trazer benefícios econômicos, sociais e ambientais. A capital mineira ocupa a quarta posição no ranking Connected Smart Cities (Urban Systems, 2024), destacando-se pela modernização de seu sistema de iluminação pública. Cerca de 182 mil luminárias foram substituídas por LEDs, alcançando quase 100% de cobertura. Além disso, 32,8 mil luminárias são controladas por sistemas de telegestão, permitindo ajustar o brilho e monitorar o consumo em tempo real. Essa tecnologia, contribui para a redução de custos operacionais, maior eficiência energética e menor impacto ambiental, além de melhorar a segurança pública com iluminação mais confiável.

A telegestão em Belo Horizonte utiliza tecnologias baseadas em Internet das Coisas (IoT), permitindo a gestão remota e detecção de falhas em tempo real, o que otimiza a manutenção do sistema. A cidade também criou o BH LAB, um laboratório de inovação que testa tecnologias como a IoT para melhorar a gestão urbana. No contexto da telegestão, o BH LAB tem explorado soluções para integrar a iluminação pública com outros sistemas inteligentes, como sensores de tráfego e monitoramento ambiental, fortalecendo a infraestrutura de cidade inteligente. Essa iniciativa posiciona Belo Horizonte como referência no Brasil, especialmente pela escala de sua implementação e pela integração com políticas de inovação urbana (Portal Belo Horizonte, 2019).

A figura 3 apresenta ações desenvolvidas pelo município de Belo Horizonte com foco na modernização urbana, por meio do programa Belo Horizonte SMART, que envolve diferentes áreas da administração municipal, integrando políticas públicas e promovendo a transformação da cidade.

Figura 3 - Belo Horizonte SMART City Program



Fonte: (Portal Belo Horizonte, 2019)

2.3.2 CURITIBA – PR

Curitiba destaca-se no cenário nacional de cidades inteligentes, ocupando a segunda colocação no ranking Connected Smart Cities (Urban Systems, 2024). A cidade investiu na implementação do sistema de telegestão nas principais vias com iluminação pública por meio de uma Parceria Público-Privada (PPP), em locais estratégicos que demandam maior eficiência no controle e na manutenção do sistema. De acordo com dados da Prefeitura de Curitiba (2021), cerca de 46.114 luminárias já contam com esse sistema, o que corresponde a aproximadamente 29,35% do total do parque de iluminação da cidade.

O sistema de telegestão permite o controle remoto 24 horas por dia, 7 dias por semana, por meio do Centro de Controle Operacional (CCO) da concessionária, com funcionalidades como dimerização do fluxo luminoso, medição do consumo de energia e identificação imediata

de falhas, o que otimiza a manutenção em comparação com pontos sem telegestão, que dependem de chamados de munícipes ou rondas motorizadas. Além disso, o sistema é integrado a uma base de dados centralizada, com relatórios acessíveis em tempo real ao poder público e protegidos por criptografia de alto nível.

Essas iniciativas reforçam a posição de Curitiba como referência em gestão urbana inteligente, integrando a IP a tecnologias de Internet das Coisas (IoT) e contribuindo para a redução de custos operacionais, maior eficiência energética e melhoria da segurança nas vias principais.

2.3.3 UBERLÂNDIA – MG

Em Uberlândia, o sistema de telegestão abrange aproximadamente 25% do parque de iluminação, com 26.521 pontos monitorados, conforme o balanço da parceria com a ENGIE (Prefeitura de Uberlândia, 2024). Essa iniciativa, parte de uma PPP firmada em 2020 com vigência de 20 anos, modernizou 95.852 pontos de luz com tecnologia LED até outubro de 2024, resultando em uma economia de 61,73% nos gastos com energia elétrica, equivalente a R$ 14 milhões anuais. Essa tecnologia permite o controle remoto das luminárias por meio de uma plataforma integrada ao CCO, garantindo monitoramento em tempo real e uma gestão mais eficiente do sistema urbano. A telegestão, baseada em tecnologias de IoT, possibilita funcionalidades como dimerização do fluxo luminoso e identificação imediata de falhas, otimizando a manutenção e reduzindo custos operacionais. A cidade se beneficia com respostas rápidas a falhas, redução no consumo de energia e economia nos gastos públicos, resultado da PPP. A iniciativa contribui para a redução de emissões de gases de efeito estufa e está alinhada à norma ABNT NBR 5101, reforçando a sustentabilidade urbana. Uberlândia foi reconhecida como a 1ª no ranking “Cidades com Serviços Inteligentes” em 2021, 2022 e 2024 (Conexis Brasil Digital/Teleco), destacando-se pela telegestão e outras inovações, como semáforos inteligentes, e como a 30ª no ranking Connected Smart Cities (Urban Systems, 2024), consolidando sua posição como referência em cidades inteligentes no Brasil.

2.3.4 PALHOÇA - SC

O município de Palhoça, em Santa Catarina, tornou-se uma referência ao implementar um amplo projeto de modernização do parque luminotécnico, associado a um sistema de telegestão totalmente integrado. O processo teve início com a publicação de um Procedimento de Manifestação de Interesse, que permitiu à prefeitura receber propostas técnicas para

estruturar uma concessão pública voltada à atualização tecnológica da iluminação do município. A partir desse estudo preliminar, foi realizada uma licitação que resultou na contratação de uma empresa concessionária responsável pela modernização e operação do sistema por 25 anos.

O projeto implantado contempla a substituição integral das luminárias convencionais por luminárias LED dotadas de dispositivos eletrônicos de controle individual. Cada ponto de luz passou a se comunicar com um CCO por meio de uma plataforma de telegestão, formando uma malha de comunicação distribuída por toda a cidade. Essa rede permite monitoramento remoto em tempo real, envio de comandos, detecção de falhas, gestão energética e coleta de dados georreferenciados, características essenciais para o funcionamento de uma cidade inteligente (LOSSO et al., 2021).

Além dos ganhos diretos em eficiência energética, manutenção e qualidade da iluminação, Palhoça passou a explorar usos complementares dessa infraestrutura. A rede de telegestão se tornou também um meio de comunicação para dispositivos ambientais, possibilitando a instalação de sensores terrestres e marítimos capazes de monitorar variáveis como temperatura, salinidade, precipitação, velocidade dos ventos e pH da água. Essa integração transformou o sistema de iluminação pública em uma plataforma de coleta de informações territoriais, permitindo análises mesoclimáticas detalhadas e contribuindo para o monitoramento ambiental e oceânico da região.

O uso de luminárias inteligentes como pontos de transmissão de dados reduz custos relacionados à implantação de infraestrutura exclusiva para sensores e amplia a capacidade do município de gerar informações em tempo real. Com isso, órgãos ambientais e setores de planejamento urbano podem trabalhar com dados precisos e localizados, dispensando a dependência de estações meteorológicas distantes ou comunicação via satélite. Essa estratégia está alinhada às diretrizes de cidades inteligentes estabelecidas pela NBR ISO 37122, que incentiva o uso de redes integradas para tomada de decisão e gestão territorial.

Assim, o projeto de Palhoça demonstra como a modernização da iluminação pública, quando associada à telegestão, vai além da simples troca de luminárias. Trata-se da criação de uma infraestrutura tecnológica capaz de apoiar políticas públicas, melhorar o monitoramento ambiental, contribuir para pesquisas climatológicas e elevar o nível de eficiência urbana. O modelo aplicado no município evidencia o potencial da telegestão como ferramenta estratégica para cidades que buscam inovação, sustentabilidade e gestão inteligente do espaço urbano.

A figura 4 representa o centro de monitoramento urbano do município de Palhoça, no qual são integradas informações provenientes de diferentes sistemas da cidade, permitindo o acompanhamento e a gestão em tempo real. De forma complementar, a figura 5 ilustra a

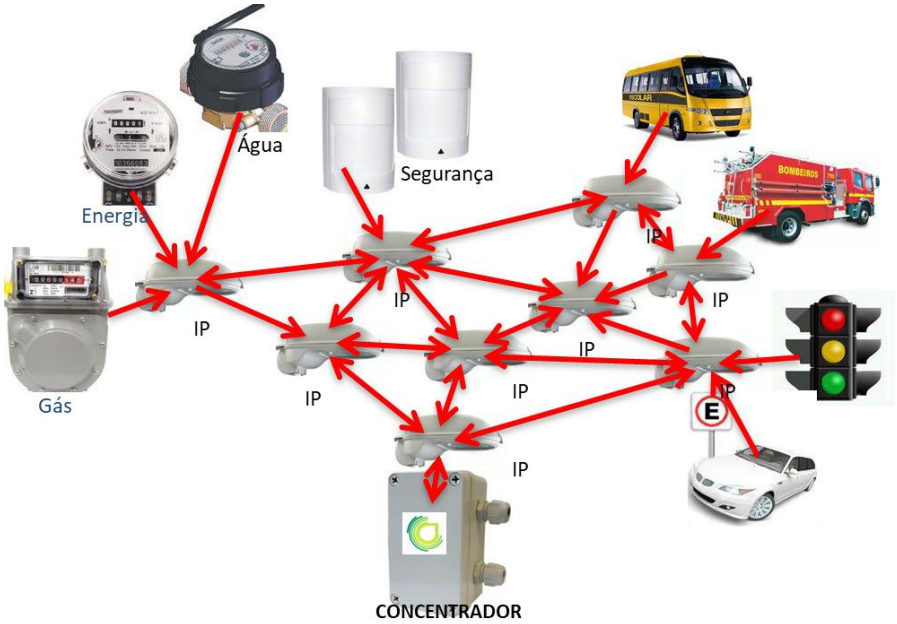
arquitetura de integração entre a iluminação pública e outros serviços urbanos, evidenciando o uso da infraestrutura de iluminação como elemento estratégico para a comunicação, o controle e a centralização de dados no contexto das Smart Cities.

Figura 4 - Centro de Controle Operacional da iluminação pública de Palhoça



Fonte: (QLUZ, 2021)

Figura 5 - Rede de comunicação integrada da iluminação pública



Fonte: (Losso et al., 2021)

2.4 SISTEMA DE TELEGESTÃO

A telegestão aplicada à Iluminação Pública consiste em um conjunto de tecnologias que permite acompanhar e controlar o funcionamento dos pontos de luz instalados na cidade. Esse recurso moderniza a operação do sistema, reduz gastos e melhora o uso da energia, ao possibilitar ações como ligar, desligar e ajustar o fluxo luminoso de forma remota. Além disso, o sistema identifica falhas imediatamente e registra com precisão o consumo elétrico, o que contribui para uma manutenção mais rápida e eficiente.

Mais do que apenas um comando remoto, a telegestão integra automação e inteligência no controle da iluminação de ruas, parques, praças e espaços públicos. Dessa forma, apoia a segurança urbana, amplia a confiabilidade do serviço e se alinha às iniciativas de cidades inteligentes, permitindo que a IP se torne parte de uma infraestrutura conectada e acessível pela internet.

O funcionamento da telegestão depende da combinação de equipamentos eletrônicos e softwares especializados. Esses dispositivos coletam dados como localização, condições elétricas, temperatura e status dos componentes, ao mesmo tempo em que exercem funções antes atribuídas às fotocélulas tradicionais. A plataforma central organiza essas informações e oferece ao operador uma visão completa do parque de iluminação, permitindo análises, ajustes e emissão de relatórios.

Para viabilizar essa comunicação, utiliza-se um gateway ou concentrador, responsável por interligar os dispositivos de campo aos servidores onde o sistema de gestão processa todas as informações. Já o software de gerenciamento atua como o “centro de comando”, possibilitando monitoramento e controle via navegador web ou por dispositivos móveis (ZANELLA et al., 2014).

A telegestão é a tecnologia que possibilita o controle remoto de dispositivos como luminárias, permitindo o acionamento, desligamento ou ajuste do nível de luminosidade de forma automática e eficiente. Essa tecnologia se baseia na telemetria, que consiste na coleta e no envio de dados de medição das luminárias para um sistema central, possibilitando o monitoramento contínuo de seu desempenho e consumo de energia. Em conjunto, a telemetria e a telegestão tornam a iluminação "inteligente", otimizando o consumo de energia e a operação dos sistemas de iluminação pública.

Nesta seção, apresenta-se um panorama completo das principais tecnologias e fundamentos utilizados na implementação de sistemas de telegestão. O conteúdo abrange desde

a forma como cada ponto de luz se comunica individualmente até os métodos que permitem a troca de informações entre diferentes luminárias.

2.4.1 TÉCNICAS DE DIMERIZAÇÃO

A dimerização é o processo de ajustar a intensidade luminosa de forma controlada, permitindo reduzir o consumo de energia sem comprometer a segurança ou o conforto visual. Em sistemas modernos de iluminação pública e corporativa, essa técnica é aplicada de maneira automática e inteligente, adaptando o nível de luz às necessidades de cada momento.

Por exemplo, é possível manter a iluminação em intensidade total durante períodos de maior circulação de pessoas e veículos, e reduzi-la em horários de baixa movimentação, como na madrugada. Essa redução pode chegar a 50% ou mais, o que representa economia significativa e contribui para o aumento da vida útil das luminárias.

O controle de dimerização pode ser implementado por diferentes métodos, como a utilização de horários pré-programados, que realizam ajustes automáticos da intensidade luminosa com base em uma programação fixa, reduzindo o nível de iluminação após determinado horário, ou por meio de sensores do tipo Light Dependent Resistor (LDR), que monitoram a luz ambiente e adaptam a intensidade de forma dinâmica, assegurando eficiência energética e evitando desperdício.

2.4.1.1 DIMERIZAÇÃO POR PWM

A dimerização por Modulação por Largura de Pulso (PWM) é uma técnica amplamente utilizada para ajustar o brilho de luminárias LED por meio do controle preciso da corrente elétrica aplicada. O princípio consiste em alternar rapidamente o sinal de controle aplicado ao LED entre os estados ligado e desligado, em uma frequência suficientemente alta para que o olho humano perceba a luz como contínua, sem cintilação (Lumos Controls, 2021).

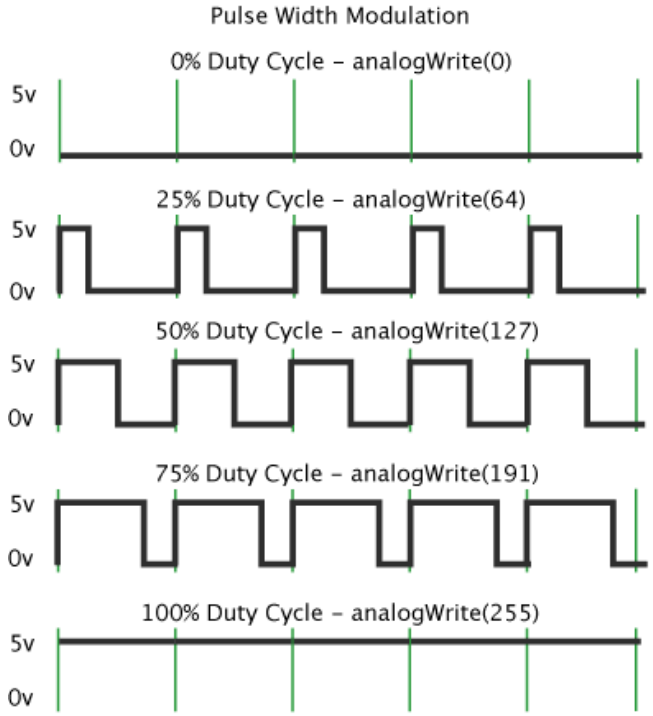
O controle da intensidade luminosa é obtido variando-se o ciclo de trabalho do sinal PWM, que corresponde à proporção do tempo em que a tensão permanece no nível alto durante um ciclo completo. Por exemplo, um ciclo de trabalho de 50% indica que o sinal PWM permanece em nível alto durante metade do período e em nível baixo durante a outra metade. No entanto, isso não significa necessariamente que o LED esteja completamente desligado durante o intervalo em nível baixo, uma vez que o comportamento da corrente depende do modo de condução do conversor e das características do circuito. Assim, a redução do brilho ocorre

devido à diminuição do valor médio da corrente no LED ao longo do tempo, resultando também em menor consumo de energia.

Essa técnica permite ajustar o fluxo luminoso de maneira eficiente e precisa, possibilitando a economia energética sem comprometer a qualidade da iluminação. A forma de onda típica do sinal PWM apresenta níveis de tensão alternados entre 0 V e um valor máximo, geralmente 5 V, sendo o tempo em que a tensão permanece alta determinante para o valor médio da corrente e, consequentemente, para o nível de brilho emitido pelo LED.

A figura 6 ilustra o princípio de funcionamento da dimerização por Modulação por Largura de Pulso (PWM), evidenciando a relação entre o ciclo de trabalho e o nível de intensidade luminosa emitido pelo LED.

Figura 6 - Representação do controle de dimerização via PWM



Fonte: (Adaptado de M. P. Jaiswal et al., 2019)

2.4.1.2 DIMERIZAÇÃO DALI

A dimerização por meio do protocolo DALI (Digital Addressable Lighting Interface) é realizada através de comunicação digital entre um controlador e as luminárias. Essa interface opera a uma taxa de transmissão de 1.200 bits por segundo, utilizando o método de codificação Manchester, no qual cada bit é representado por uma transição de nível lógico no meio do intervalo de tempo. Nesse esquema, o bit “1” é definido por um nível lógico baixo seguido de um nível lógico alto, enquanto o bit “0” apresenta o padrão inverso (ADAM, 2019).

A transmissão de dados é feita por um par diferencial de cabos, responsável por enviar todas as informações necessárias para o controle e configuração das luminárias. Cada unidade conectada ao sistema possui um endereço único, o que possibilita o gerenciamento individual ou em grupos de até 64 luminárias em um único canal de comunicação. Esse recurso proporciona maior flexibilidade e precisão no controle da iluminação, permitindo ajustes personalizados e otimização do consumo energético.

2.4.1.3 DIMERIZAÇÃO DE 0-10V

A dimerização 0–10 V é um método analógico de controle de intensidade luminosa amplamente utilizado em sistemas de iluminação, seguindo as diretrizes estabelecidas pela norma ANSI C137.1-2019. Nesse padrão, o ajuste do fluxo luminoso é realizado por meio da aplicação de um sinal de tensão contínua na faixa de 0 a 10V ao driver da luminária. A relação é proporcional onde 10 V correspondem à intensidade máxima de luz e 0 V representam o desligamento completo do equipamento. Trata-se de uma solução simples e eficaz, empregada em diferentes tipos de luminárias e contextos de aplicação.

Em algumas instalações, adota-se a variação 1–10 V, que mantém a luminária sempre ligada, sendo 1 V o valor correspondente à menor intensidade luminosa possível. Essa configuração pode operar no modo “current sink”, no qual o driver da luminária fornece uma tensão de 10 V e o controlador drena a corrente para reduzir a tensão ao nível desejado, ou no modo “current source”, onde o controlador atua como fonte de tensão e a corrente flui no sentido oposto.

A figura 7 apresenta uma representação esquemática dos métodos de dimerização 0–10 V e 1–10 V, indicando os valores de tensão correspondentes aos níveis mínimo e máximo de iluminação

Figura 7 - Dimerização 0-10V e 1-10V



Fonte: (Lumos Controls, 2021)

2.4.1.4 TRIAC

O TRIAC é um dispositivo semicondutor utilizado para controlar o corte de tensão em circuitos de corrente alternada (CA), permitindo a regulação da tensão RMS aplicada à carga e, consequentemente, a dimerização de luminárias. Seu funcionamento pode ser configurado em duas modalidades principais: corte na fase de avanço e corte na fase de atraso.

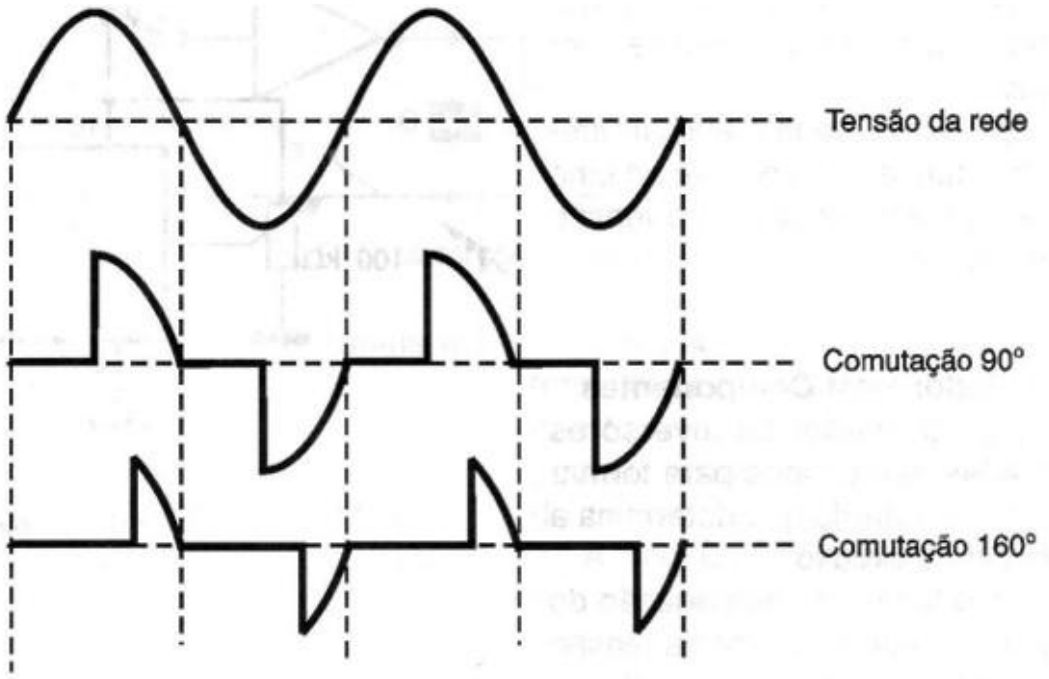
Na fase de avanço, o TRIAC é acionado no início do semiciclo positivo da forma de onda de CA, conduzindo uma fração ajustável do sinal para a carga. Já na fase de atraso, a condução é iniciada na parte final do semiciclo, permitindo também o controle da porção de energia fornecida.

O comportamento do TRIAC pode ser comparado ao de um interruptor eletrônico, no qual o tempo de disparo define a quantidade de energia entregue à carga. Tempos de disparo maiores reduzem o fluxo de energia, diminuindo o brilho da lâmpada, enquanto tempos menores aumentam a luminosidade. No entanto, acionamentos rápidos podem gerar perdas energéticas e interferências eletromagnéticas.

Uma limitação relevante desse método é justamente a geração dessas interferências, que podem afetar o desempenho e a vida útil de equipamentos eletrônicos próximos ao dimmer, representando um fator a ser considerado no projeto do sistema de iluminação.

A figura 8 representa a forma de onda da tensão em um circuito controlado por TRIAC.

Figura 8 - Forma de Onda do Triac



Fonte: (Newton C. Braga, s.d.)

2.4.2 COMUNICAÇÃO COM FIO

Nos sistemas de telegestão aplicados à iluminação pública, a comunicação com fio constitui uma abordagem tradicional para a troca de informações entre as luminárias e os centros de controle. Essa comunicação pode ser realizada por meio de cabeamento dedicado, como redes Ethernet e barramentos industriais (por exemplo, RS-485), ou ainda pela própria rede elétrica, utilizando a tecnologia de comunicação por linha de potência (Power Line Communication – PLC).

As soluções com fio apresentam como principal vantagem a elevada confiabilidade e estabilidade na transmissão de dados, sendo menos suscetíveis a interferências externas quando comparadas às tecnologias sem fio. Em sistemas de iluminação pública, o uso de PLC tem sido amplamente estudado por permitir a utilização da infraestrutura elétrica existente para a comunicação entre os dispositivos, reduzindo a necessidade de novos meios físicos de transmissão (BERNADES et al., 2025).

Entretanto, essas tecnologias apresentam limitações relevantes em ambientes extensos e heterogêneos, como campus univesritário. A dependência da qualidade da rede elétrica, a complexidade de manutenção e os custos associados à adaptação da infraestrutura podem comprometer a flexibilidade e a escalabilidade do sistema, especialmente quando se busca a aplicação de estratégias dinâmicas de controle e monitoramento.

2.4.3 COMUNICAÇÃO SEM FIO

As tecnologias de comunicação sem fio têm assumido papel de destaque nos sistemas de telegestão da iluminação pública, principalmente devido à sua flexibilidade, facilidade de implantação e menor dependência de intervenções físicas na infraestrutura. Entre as soluções mais utilizadas destacam-se as redes celulares, as tecnologias de longo alcance e baixo consumo energético (LPWAN) e as redes locais sem fio, como o Wi-Fi.

Estudos apontam que a integração de sistemas de iluminação pública com tecnologias sem fio possibilita o monitoramento em tempo real, a aplicação de estratégias de dimerização e a otimização da operação, contribuindo significativamente para a eficiência energética e a gestão urbana inteligente. Redes celulares e LPWAN são amplamente empregadas em aplicações de grande escala, porém implicam custos recorrentes com serviços de telecomunicações e maior dependência de operadoras externas.

No contexto do campus da Universidade Federal de Juiz de Fora, a adoção de uma solução baseada em Wi-Fi apresenta vantagens técnicas e econômicas. O campus dispõe de

infraestrutura de rede sem fio já implantada, o que viabiliza a integração dos dispositivos de telegestão sem a necessidade de investimentos adicionais em comunicação. Além disso, por se tratar de uma área delimitada e com alta concentração de luminárias, o Wi-Fi atende adequadamente às demandas de transmissão de dados necessárias para as funções de monitoramento e controle propostas neste trabalho, conforme observado em aplicações similares descritas na literatura.

2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

A partir da análise das tecnologias de iluminação pública, dos sistemas de telegestão, observa-se que a integração entre controle inteligente e infraestrutura de comunicação adequada constitui um elemento fundamental para a promoção da eficiência energética. A literatura aponta que a aplicação de sistemas inteligentes de iluminação, especialmente quando associada à tecnologia LED e ao controle adaptativo da luminosidade, apresenta elevado potencial de redução do consumo de energia elétrica e de melhoria da gestão operacional.

No caso específico do campus da UFJF, a utilização de estratégias de dimerização aliadas a um sistema de telegestão suportado por comunicação sem fio via Wi-Fi mostra-se tecnicamente viável e coerente com a infraestrutura existente. Com base nesses fundamentos teóricos, o Capítulo 3 contextualiza a aplicação dessas tecnologias no ambiente do campus, definindo os cenários de dimerização adotados. No Capítulo 4, são apresentados os cálculos e a análise do potencial de economia de energia elétrica resultante da aplicação dessas estratégias, evidenciando os benefícios da telegestão como ferramenta de eficiência energética

3 CARACTERISTICAS DO CAMPUS E DEFINIÇÃO DE CENÁRIOS

Este capítulo apresenta a metodologia adotada para avaliar o potencial de economia de energia decorrente da aplicação de um sistema de telegestão associado à dimerização de luminárias LED no campus da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). O estudo de caso foi conduzido a partir do levantamento das luminárias instaladas, da definição de um sistema teórico de telegestão e da simulação de diferentes cenários de dimerização, com o objetivo de estimar a redução no consumo de energia elétrica.

3.1 CARACTERISTICAS DO CAMPUS DA UFJF

O campus da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) possui uma área extensa, distribuída em um conjunto de edificações acadêmicas e administrativas, interligadas por um sistema viário amplo composto por vias gerais e ruas internas, com circulação significativa de pedestres durante os períodos de aula, e de um espaço aberto ao fluxo externo de veículos, especialmente no anel viário que contorna toda a área central do campus.

O acesso ao campus ocorre pelos portões Sul e Norte, responsáveis por receber uma grande parte do fluxo diário de estudantes, servidores e usuários externos. A circulação interna é estruturada por um anel viário principal, que funciona como eixo distribuidor do tráfego e conecta os principais setores, e por vias secundárias, que conduzem aos departamentos, estacionamentos e centros de convivência.

O anel viário apresenta as características de uma via de circulação geral: recebe fluxo contínuo de veículos, inclusive de não usuários da instituição, e apresenta registros de congestionamento nos horários de pico, especialmente entre 17h e 19h. Já as vias internas possuem menor volume de tráfego motorizado, sendo utilizadas por pedestres e por veículos em baixa velocidade.

A iluminação do campus é distribuída em postes com luminárias instaladas predominantemente a 12 metros de altura, abrangendo tanto o anel viário quanto as vias internas. Estimativas baseadas em plantas da instituição e realizando observações no campus, indicam aproximadamente 180 luminárias no anel viário e cerca de 900 distribuídas pelas vias internas e setores departamentais, totalizando aproximadamente 1080 pontos de luz. A maioria das luminárias é composta por modelos LED de alta potência, implantadas em substituição às lâmpadas de vapor de sódio, como parte do processo contínuo de modernização da infraestrutura do campus.

A caracterização do campus é fundamental para a definição dos cenários de dimerização, uma vez que a intensidade de circulação, a função de cada via e os horários de ocupação influenciam diretamente a variação do fluxo luminoso. O campus apresenta uma variação significativa de movimento ao longo do dia, com maior circulação nos turnos da manhã e no início da noite, e uma redução expressiva durante a madrugada, quando há menor fluxo de pessoas. Esse comportamento reforça a relevância da adoção de estratégias adaptativas de controle da iluminação.

A figura 9 mostra a vista aérea do campus da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), destacando sua organização espacial e o sistema viário.

Figura 9 - Campus UFJF



Fonte: (Google Earth, 2025)

3.2 CARACTERÍSITICAS DAS LUMINÁRIAS

Para fundamentar este estudo, foi realizado um levantamento das luminárias atualmente instaladas no campus da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). O processo de modernização do sistema de iluminação inicia-se em um projeto institucional mais amplo, iniciado em 2012, que tem como objetivo a substituição gradual das tecnologias convencionais por sistemas de iluminação mais eficientes e sustentáveis.

Essa modernização contou com o Apoio do Núcleo de Iluminação (NIMO) da UFJF e com a Prefeitura de Juiz de Fora (PJF). No âmbito dessa cooperação, destaca-se o programa Brilha JF, por meio do qual a Prefeitura assumiu a manutenção da iluminação pública do

campus e promoveu mais recentemente, a ampliação da tecnologia LED para áreas externas de grande circulação, como o anel viário, que anteriormente não estava contemplado nas substituições realizadas internamente pela Universidade.

Como resultado dessa inciativa conjunta, as antigas luminárias de vapor de sódio, com potências elevadas, foram substituídas por luminárias LED, proporcionando ganhos expressivos em eficiência energética, qualidade luminosa e redução de custos operacionais. Apresentando uma vida útil maior com menor necessidade de manutenção.

As luminárias atualmente instaladas são da marca LEDSTAR, modelo Street-Light Vitta V9.3, cada uma com potência nominal de 200 W e eficácia luminosa de 160 lm/W, garantindo elevada performance energética. Esses dispositivos foram projetados para atender aos requisitos da NBR 5101:2024, assegurando níveis adequados de iluminância, uniformidade e conforto visual, conforme as categorias de vias presentes no campus.

Outro aspecto relevante é a compatibilidade nativa dessas luminárias com sistemas de telegestão, o que possibilita o controle remoto e a operação inteligente do parque de iluminação. Essa funcionalidade representa um diferencial tecnológico significativo, pois permite a adoção de estratégias avançadas de eficiência energética, como a dimerização programada e o monitoramento em tempo real, alinhando-se aos princípios de Cidades Inteligentes e Sustentabilidade Urbana.

A figura 10 mostra a luminária LED modelo Street-Light Vitta V9.3 instalada no campus da UFJF.

Figura 10 - Luminária SL VITTA V9.3



Fonte: (LEDSTAR, 2025)

A Tabela 1 apresenta as principais especificações técnicas da luminária utilizada no estudo, evidenciando características de desempenho e durabilidade que são fundamentais para a implementação do sistema de telegestão no campus.

Tabela 1 - Especificações Técnicas da Luminária SL VITTA – 200

Modelo	SL VITTA – 200
Potência Nominal	200 W
Proteção Contra Surto	10 kV / 12 kA (IEEE C62.41.2; IEC 61643-11 Classe II) Ligação em série com a carga
Tomada	7 Pinos ANSI C136.41 (Próprio para relé ou telegestão)
Pronta para Telegestão	Sim
Fluxo Luminoso Total	28.546 lm
Eficácia Luminosa	Até 162 lm/W
Classificação Fotométrica	TIPO II MÉDIA
Equivalência	Lâmpada HID 300 W
Índice de Reprodução de Cor (IRC)	>70
Temperatura de Cor (TCC)	4.000 K / 5.000 K
Expectativa de Vida Útil da Lâmpada (L70)	>100.000 h
Expectativa de Vida Útil da Luminária	>100.000 h
Grau de Proteção	IP66
Impacto Mecânico	IK09
Proteção Contra Choques Elétrico	Classe I
Material da Luminária	Alumínio Injetado
Material da Lente	Policarbonato
Fixação	Braço Horizontal de 30 mm até 63 mm de Diâmetro (Ajuste de ângulo nativo no produto de -5°, 0 ou 5°)
Torque de Fixação	8 N.m (Para braços abaixo de 30mm é necessário um adaptador)
Cor da Luminária	Cinza Munsell N6,5 (Outras cores opcionais)
Dimerização	0 – 10 V
Garantia	5 anos
Versão	9.3

Fonte: (LEDSTAR, 2025)

3.3 DIRETRIZES NORMATIVAS APLICÁVEIS (NBR 5101:2024)

As definições de cenários de dimerização adotadas neste estudo respeitaram os limites mínimos de iluminância estabelecidos pela NBR 5101:2024, que regula os níveis de iluminação para vias urbanas, rodovias e espaços públicos.

A norma classifica as vias de acordo com sua função, fluxo de usuários e velocidade predominante, definindo categorias que orientam os valores mínimos de iluminância média (Em) e luminância para cada tipo de via, considerando função e velocidade.

Este estudo incorpora cálculos fotométricos preliminares para verificar, quantitativamente, a viabilidade de redução do fluxo luminoso das luminárias SL VITTA -200, que apresentam um fluxo luminoso total de 28.546 lm, eficácia luminosa de 162 lm/W, fotometria Tipo II Média e controle por dimerização 0-10V.

A iluminância média inicial fornecida por cada ponto de luz foi estimada conforme:

$$E_{init} = \frac{\Phi_0 . CU}{A} \tag{3.1}$$

em que

Φ_0 = 28.546 lm é o fluxo luminoso nominal da luminária,

CU = 0,60 é o coeficiente de utilização TIPO II típico para fotometria em vias urbanas,

A = 210 m² representa a área associada a cada ponto de luz (considerando 30m de espaçamento e 7 m de largura iluminada).

Assim:

$$E_{init} = \frac{28.546 \,.\, 0{,}60}{210} \approx 81{,}56\ lx \tag{3.2}$$

Aplicando o fator de manutenção de FM = 0,80, obtém-se a iluminância média efetiva usada para fins normativos:

$$E_{ef} = 81{,}56 \,.\, 0{,}80 \approx 65{,}25\ lx \tag{3.3}$$

Esse valor serve como referência para avaliar o limite admissível de dimerização sem comprometer o atendimento da norma.

3.3.1 CLASSIFICAÇÃO DAS VIAS SEGUNDO A NBR 5101:2024

A ABNT NBR 5101:2024 estabelece critérios para a classificação das vias com o objetivo de definir os requisitos luminotécnicos adequados para segurança, visibilidade e conforto dos usuários. A norma organiza as vias em três grupos, de acordo com o tipo predominante de uso e as condições de tráfego.

3.3.1.1 VIAS M – VIAS DE TRÁFEGO MOTORIZADAS

A vias classificadas como M são destinadas ao tráfego exclusivo de veículos motorizados, sem a presença pedestres ou ciclistas, caracterizando-se por maiores velocidades operacionais e maior exigência de visibilidade longitudinal. Sendo classificadas de M1 a M6, sendo as vias classificadas como M1 sendo mais rigorosas em termos de requisitos luminotécnicos.

A definição da classe M de uma via considera parâmetros como velocidade, volume de tráfego e nível de risco viário. Em geral, essas vias apresentam velocidades médias mais elevadas, tipicamente entre 40 km/h e 80 km/h, e desempenham papel relevante na conexão entre diferentes regiões do sistema viário urbano ou periurbano.

3.3.1.2 VIAS C – VIAS DE CIRCULAÇÃO MISTA

As vias de classe C correspondem a ambientes onde há coexistência e potencial conflito entre veículos, pedestres e ciclistas. Essas vias são comuns em áreas urbanas com tráfego calmo, comum em áreas internas de instituições, zonas comerciais, e locais com grande número de travessias.

As classes variam de C0 a C5, sendo definidas a partir de critérios como intensidade do fluxo de pedestres, velocidades reduzidas de circulação veicular, frequência de conflitos e necessidade de maior uniformidade luminosa. Nesses casos, a norma prioriza requisitos baseados em iluminância, uniformidade e controle do ofuscamento, de forma a aumentar a segurança dos diferentes usuários da via.

3.3.1.3 VIAS P – VIAS PREDOMINANTEMENTE PEDONAIS

As vias de classe P são destinadas majoritariamente à circulação de pedestres, abrangendo calçadas, passeios, calçadões, ciclovias, praças e áreas de convivências. Sendo classificadas de P1 a P6, de acordo com o nível de uso, a importância do espaço e as exigências de segurança e conforto visual.

Para essas vias, a ABNT NBR 5101:2024 estabelece requisitos específicos baseados principalmente em iluminância mínima e uniformidade, podendo incluir também critérios relacionados à iluminância vertical, especialmente em locais onde o reconhecimento de pessoas, obstáculos e a sensação de segurança sejam fatores relevantes.

3.3.2 ADEQUAÇÃO DO CAMPUS ÀS CLASSES DA NORMA

Considerando as características operacionais e de uso do sistema viário do campus da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), realizou-se o enquadramento das vias de acordo com as classes de iluminação estabelecidas pela NBR 5101:2024. Esse enquadramento tem como objetivo assegurar condições adequadas de segurança visual, especialmente em locais com interação entre diferentes usuários da via, como veículos motorizados, pedestres e ciclistas.

De acordo com a NBR 5101:2024, as classes de iluminação C são aplicadas às chamadas áreas de conflito, definidas como trechos viários onde há interseção entre fluxos de veículos, pedestres, mudanças na geometria da via, redução de velocidade, acessos e presença de estacionamento lateral.

A norma estabelece um método objetivo para a determinação da classe de iluminação C, baseado na avaliação de parâmetros operacionais e geométricos da via. Para cada parâmetro é atribuído um valor de ponderação (Vp), conforme apresentado na Tabela 2 – Parâmetros para determinação da classe de iluminação C.

A soma dos valores de ponderação selecionados resulta no valor VPS, utilizado para a determinação da classe de iluminação C por meio da seguinte expressão normativa:

$$Classe\ de\ Iluminação\ C = 6 - Vps \tag{3.4}$$

De acordo com a norma:

- Se o resultado for inferior a 0, a classe adotada deve ser C0;
- Se o resultado for superior a 5, a classe adotada deve ser C5;
- Caso o resultado não seja um número inteiro, deve-se adotar o próximo número inteiro inferior.

Uma vez determinada a classe C, os requisitos mínimos de iluminância, uniformidade e controle de ofuscamento devem ser atendidos conforme a Tabela 3 – Requisitos de iluminação para a classe de iluminação C, garantindo condições adequadas de segurança visual nas áreas analisadas.

Esse procedimento fundamenta tecnicamente o enquadramento das vias do campus da UFJF às classes normativas da ABNT NBR 5101:2024 e respalda as decisões de projeto e de estratégias de dimerização adotadas neste trabalho.

Tabela 2 - Parâmetros para determinação da classe de iluminação C

Parâmetros	**Opções**	**Valor de ponderação Vp**	**Vp selecionado**
Velocidade	Muito alta > 60km/h	3	
	40km/h < alta ≤ 60km/h	2	
	30km/h < moderada ≤ 40km/h	1	
	Baixa ≤ 30km/h	0	
Volume de tráfego	Muito alta > 1200/h	1	
	Alto 600/h a 1200/h	0,5	
	Moderado 300/h a 600/h	0	
	Baixo 150/h a 300/h	-0,5	
	Muito baixo < 150/h	-1	
Composição do tráfego	Misto com alto percentual de não motorizado	2	
	Misto	1	
	Motorizado Apenas	0	
Separação das faixas de direção	Não	1	
	Sim	0	
Luminância ambiente	Alta	1	
	Moderada	0	
	Baixa	-1	
Sinalização e controle de tráfego	Moderados ou bons	0	
	Ruim	0,5	
Soma dos valores de ponderação			*Vps*

Fonte: (NBR 5101, 2024)

Tabela 3 - Requisitos de iluminação para a classe de iluminação C

Classes de iluminação	**Iluminância**		**Incremento de limiar**
	$E_{méd}$ ≥ (lx) (mínimo mantido)	**U0 (E) ≥**	**f_{TI}(%) ≤**
C0	50	0,38	14
C1	30	0,38	14
C2	20	0,28	14
C3	15	0,18	15
C4	10	0,18	16
C5	7,5	0,18	16

Fonte: (NBR 5101, 2024)

3.3.2.1 ANEL VIÁRIO DO CAMPUS

O anel viário do campus, embora exerça a função de circulação perimetral, apresenta diversas características típicas de áreas de conflito. Ao longo de toda a sua extensão, observa-se a coexistência de tráfego veicular, pedestres e ciclistas, o que eleva o potencial de interferências e riscos viários. Destacam-se, ainda, a presença de numerosas faixas de travessia de pedestres distribuídas ao longo do anel viário, o estacionamento lateral contínuo, que intensifica os conflitos entre usuários, e a redução significativa da velocidade nas regiões de acesso aos departamentos e portões de acesso ao campus.

Essas condições caracterizam o anel viário como uma área com elevado potencial de conflitos entre veículos, pedestres e ciclistas, enquadrando-o de forma coerente na Classe C, conforme os critérios estabelecidos pela NBR 5101:2024.

Aplicando o método normativo ao anel viário do campus da UFJF, foram atribuídos os valores de ponderação (Vp) aos parâmetros avaliados, de acordo com as condições observadas em campo:

- Velocidade: Vp = 2 (velocidade alta);
- Volume de tráfego: Vp = 1 (tráfego alto);
- Composição do tráfego: Vp = 1 (tráfego misto);
- Separação das faixas: Vp = 0 (faixas separadas);
- Luminância ambiente: Vp = 0 (luminância ambiente moderada);
- Sinalização e controle de tráfego: Vp = 0 (condições moderadas ou boas).

A soma dos valores de ponderação resulta em:

$$Vps = 2 + 1 + 1 + 0 + 0 + 0 = 4 \tag{3.5}$$

Aplicando-se a expressão normativa para determinação da classe de iluminação C:

$$Classe\ C = 6 - Vps \tag{3.6}$$

$$Classe\ C = 6 - 4 = 2 \tag{3.7}$$

Conforme estabelecido pela NBR 5101:2024, o anel viário do campus da UFJF é classificado como Classe C2, devendo atender a uma iluminância média mínima de 20 lx.

3.3.2.2 VIAS DE ACESSO AOS DEPARTAMENTOS

As vias internas de acesso aos departamentos do campus apresentam fluxo veicular reduzido, sendo utilizadas majoritariamente por estudantes e funcionários com a finalidade exclusiva de acesso às edificações acadêmicas e administrativas. Nessas vias, as velocidades praticadas são naturalmente baixas, e a circulação de pedestres é predominante.

Dessa forma, essas vias também se caracterizam como áreas de conflito, enquadrando-se na Classe C, porém associadas a classes de menor exigência luminotécnica, compatíveis com ambientes de baixa velocidade e circulação local.

Aplicando o método normativo nas vias de acesso aos departamentos do campus da UFJF, foram atribuídos os valores de ponderação (Vp) aos parâmetros avaliados, de acordo com as condições observadas em campo:

- Velocidade: Vp = 0 (velocidade baixa);
- Volume de tráfego: Vp = -0,5 (tráfego baixo);
- Composição do tráfego: Vp = 2 (tráfego misto, com alto percentual de não motorizados);
- Separação das faixas: Vp = 0 (faixas separadas);
- Luminância ambiente: Vp = 0 (luminância ambiente moderada);
- Sinalização e controle de tráfego: Vp = 0 (condições moderadas ou boas).

A soma dos valores de ponderação resulta em:

$$Vps = 0 + 2 - 0{,}5 + 0 + 0 + 0 = 1{,}5 \tag{3.8}$$

Aplicando-se a expressão normativa para determinação da classe de iluminação C:

$$Classe\ C = 6 - Vps \tag{3.9}$$

$$Classe\ C = 6 - 1{,}5 = 4{,}5 \tag{3.10}$$

Conforme estabelecido pela NBR 5101:2024, quando o resultado não é um número inteiro, deve-se adotar o próximo número inteiro inferior. Dessa forma, as vias de acesso aos departamentos do campus da UFJF são classificadas como Classe C4, devendo atender a uma iluminância média mínima de 10 lx.

3.3.3 RELAÇÃO ENTRE DIMERIZAÇÃO E ATENDIMENTO NORMATIVO

Como a iluminância média efetiva calculada anteriormente $E_{ef} \approx 65{,}25$ lx, os níveis resultantes após dimerização *f* são determinados por.

$$E(f) = E_{ef}.f \tag{3.11}$$

Sendo assim os principais percentuais avaliados foram:

Tabela 4 - Iluminância Estimada

Intensidade da luminária	**Fração *f***	**Iluminância Estimada**
100%	1,00	65,25 lx
80%	0,80	52,20 lx
75%	0,75	48,94 lx
60%	0,60	39,15 lx
50%	0,50	32,63 lx
40%	0,40	26,10 lx
30%	0,30	19,58 lx

Fonte: Elaborada pelo autor

3.4 CENÁRIOS DE DIMERIZAÇÃO

A dimerização é uma técnica que consiste no ajuste da intensidade luminosa das luminárias LED, permitindo economia de energia sem comprometer a segurança ou a funcionalidade do sistema de iluminação. Essa técnica é essencial para estratégias de gestão inteligente de iluminação, especialmente em ambientes como o campus da UFJF, onde os padrões de circulação variam significativamente ao longo da noite.

3.4.1 DEFINIÇÃO DE CENÁRIOS

Para avaliar o potencial de economia energética, foram definidos três cenários de dimerização aplicados ao período noturno de funcionamento das luminárias, compreendido entre 18h e 5 h (11 horas diárias). Esses cenários consideram os horários de maior e menor movimentação no campus.

3.4.1.1 CENÁRIO 1 – OPERAÇÃO SEM DIMERIZAÇÃO

Este cenário representa a condição de operação atual, sem qualquer forma de controle inteligente ou redução de fluxo luminoso. Objetivo é estabelecer a linha de base energética para comparação com os demais cenários.

Nesse cenário todas as luminárias operam em 100% da potência nominal durante todo o período noturno. Essa condição é típica dos sistemas convencionas sem telegestão, nos quais a iluminação permanece constante independente do fluxo de pedestres, veículos, clima ou horário.

Embora ofereça um nível máximo de iluminação e uniformidade, esta estratégia apresenta elevado consumo de energia e não considera a variação real da demanda luminosa ao longo da noite, resultando em operação ineficiente.

Foi usado apenas como base para qualificar os ganhos obtidos pelos cenários de dimerização propostos a seguir.

3.4.1.2 CENÁRIO 2 - DIMERIZAÇÃO UNIFORME POR HORÁRIO

Nesse cenário, aplica-se uma estratégia simples de dimerização, em que todas luminárias do campus recebem o mesmo nível de redução luminosa, independente do setor ou da intensidade do tráfego local.

A dimerização é baseada apenas no comportamento geral de circulação no campus, utilizando três períodos distintos:

- 18h às 22h: Horário de maior circulação;
- 22h às 00h: Início da redução do fluxo;
- 00h às 06h: Horário com baixa circulação.

Tabela 5 - Intensidade Luminosa do Cenário 2

Período	Intensidade
18h-22h	100%
22h-00h	75%
00h-06h	50%

Fonte: Elaborada pelo autor

A redução escolhida procura conciliar economia e segurança:

- O período de 18h a 22h mantém o nível máximo devido à grande movimentação de alunos e veículos no campus, procurando manter um excelente nível de iluminação e segurança da via;
- A partir das 22h, o movimento de alunos e de veículos cai significativamente, justificando uma redução para 70% do nível de intensidade das luminárias;
- Durante a madrugada, a circulação é mínima, permitindo as luminárias operarem com 50% de intensidade, sem comprometer a visibilidade essencial para pedestres e veículos eventuais.

Este cenário já proporciona economia relevante, mas ainda não otimiza a iluminação conforme a função de cada via.

3.4.1.3 CENÁRIO 3 – DIMERIZAÇÃO MAIS AGRESSIVA

Este cenário assume um caráter mais orientado à eficiência energética, utilizando reduções mais expressivas, mantendo ainda assim níveis compatíveis com a NBR 5101:2018 para vias de baixo fluxo noturno.

Ele é adequando para áreas onde o campus possui controle de segurança, patrulhamento e videomonitoramento, fatores que permitem operar com níveis reduzidos sem comprometer a segurança no campus.

Tabela 6 - Intensidade Luminosa do Cenário 3

Período	**Intensidade**
18h-22h	80%
22h-00h	60%
00h-06h	40%

Fonte: Elaborada pelo autor

Nesse cenário, a redução para 60% da intensidade luminosa mantém níveis adequados de iluminação para a circulação moderada de alunos após o encerramento das atividades noturnas. Posteriormente, durante a madrugada, a operação em 40% da intensidade atende às exigências de vias classificadas como C2 e C4, que apresentam baixo fluxo de usuários e permitem iluminâncias menores em horários de pouca utilização. Estudos de percepção visual indicam que reduções abaixo de 50% ainda são aceitáveis em ambientes controlados e com velocidades reduzidas.

Esse cenário representa uma estratégia mais agressiva de diminuição dos custos de operação, porém sem diferenciar a função luminosa entre os distintos setores do campus.

3.4.1.4 CENÁRIO 4 – DIMERIZAÇÃO SETORIZADA COM CRITÉRIO DE FLUXO

Este cenário adota uma abordagem mais realista e compatível com sistemas avançados de telegestão, ajustando a intensidade luminosa conforme a demanda específica de cada área do campus da UFJF. Diferentemente dos cenários anteriores, que aplicaram reduções uniformes, a dimerização setorizada considera o fluxo de veículos e pedestres, a função de cada via e os requisitos mínimos estabelecidos pela NBR 5101:2024.

O campus possui um anel viário principal que funciona como eixo de circulação geral, utilizado tanto pela comunidade acadêmica quanto por moradores da região. Este setor apresenta tráfego intenso nos horários de pico, inclusive com registro de congestionamentos nas entradas e saídas. Já as vias internas, destinadas prioritariamente ao acesso de alunos aos departamentos, possuem circulação mais reduzida e velocidades menores, permitindo níveis de iluminância mais baixos sem comprometer a segurança.

Os períodos foram mantidos conforme os cenários anteriores:

- Período 1 – 18h às 22h: Maior fluxo de pedestres e veículos, especialmente no anel viário da UFJF
- Período 2 – 22h às 00h: Redução significativa da circulação após o encerramento das atividades acadêmicas.
- Período 3 – 00h às 06h: Ocupação mínima do campus e baixíssima movimentação no anel viário.

Tabela 7 - Intensidade luminosa por Setor no Cenário de Dimerização Setorizada

Setor	18h-22h	22h-00h	00h-06h
Anel Viário	100%	75%	50%
Vias de Acesso	80%	60%	40%

Fonte: Elaborado pelo Autor

A definição desses níveis foi baseada em dois critérios principais: o atendimento às classes de iluminação estabelecidas pela NBR 5101:2024 e o comportamento real do fluxo de pedestres e veículos no campus. De acordo com a norma, o anel viário pode ser enquadrado como classe C2, exigindo níveis mais elevados de iluminação e uniformidade, o que torna reduções acima de 50% potencialmente prejudiciais à visibilidade, especialmente em horários com algum tráfego residual. Já as vias internas se enquadram nas classes C4, que permitem reduções mais acentuadas devido ao menor nível de exigência luminotécnica. Completando a análise do fluxo real, verificou-se que durante a madrugada a circulação interna é praticamente inexistente, justificando reduções de até 40% sem comprometer a segurança, enquanto o anel viário ainda pode registrar tráfego eventual, motivo pelo qual sua redução foi limitada a 50%.

Essa abordagem permite melhorar a eficiência energética sem comprometer a função luminotécnica de cada setor. Além disso, o sistema de telegestão possibilita ajustes dinâmicos e monitoramento contínuo, garantindo que os níveis adotados permaneçam dentro dos limites operacionais e normativos.

4 ANALISE DOS CENÁRIOS E ESTIMATIVA DE ECONOMIA

Este capítulo apresenta a estimativa de economia de energia elétrica decorrente da implementação de um sistema de telegestão com dimerização no campus da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). Com base nos cenários de dimerização definidos no Capítulo 3, foi realizado o cálculo do consumo de energia elétrica antes e após a aplicação dessas técnicas, possibilitando a análise dos benefícios obtidos em termos de redução de custos operacionais e ganhos em sustentabilidade energética.

4.1 METODOLOGIA DE CÁLCULO DA ECONOMIA

A estimativa de economia de energia elétrica apresentada neste estudo se baseia na comparação entre o cenário de referência, no qual as luminárias operam continuamente em sua potência nominal, e cenários alternativos, nos quais são adotadas estratégias de dimerização por meio de sistemas de telegestão. Essas estratégias consideram os padrões de uso e circulação nas vias internas do campus da UFJF, permitindo avaliar a redução do consumo energético decorrente da adequação dos níveis de iluminação às condições reais de operação.

A metodologia adotada tem caráter quantitativo e comparativo. O foco da análise é a redução do consumo de energia elétrica (kWh), sem considerar, nesta etapa, os custos de implantação do sistema de telegestão, uma vez que o objetivo principal do trabalho é avaliar o potencial de economia energética associado à aplicação de estratégias de controle adaptativo da iluminação.

4.1.1 POTÊNCIA INSTALADA CONSIDERADA

Para fins de cálculo, considerou-se que o sistema de iluminação do campus é composto por aproximadamente 1080 luminárias LED, distribuídas entre o anel viário principal e as vias internas. Todas as luminárias foram consideradas com potência nominal de 200 W, valor compatível com luminárias LED utilizadas em postes de aproximadamente 12 metros de altura, comuns em vias de circulação veicular e áreas abertas de grande porte.

A potência total instalada do sistema, operando em plena carga, é dada por:

$$P_{total} = N \,.\, P_{lum} \tag{4.1}$$

Em que N representa o número total de luminárias e P_{lum} a potência nominal de cada luminária. Dessa forma, a potência instalada considerada no cenário de referência é de aproximadamente 216 kW.

4.1.2 PERÍODO DE OPERAÇÃO DA ILUMINAÇÃO

Nesse estudo foi adotado um tempo médio de funcionamento de 12 horas diárias, correspondente ao período noturno. Para melhor representar a variação do uso do campus ao longo da noite, esse intervalo foi subdividido em três períodos distintos:

- Período 1: 18h às 22h (4 horas), caracterizado por maior circulação de alunos, servidores e veículos;
- Período 2: 22h às 0h (2 horas), com redução progressiva do fluxo;
- Período 3: 0h às 6h (6 horas), período de baixa ocupação do campus.

Essa segmentação temporal permite avaliar de forma mais realista o impacto da dimerização em função da demanda efetiva de iluminação.

4.1.3 MODELO DE DIMERIZAÇÃO ADOTADO

Neste estudo, adotou-se um modelo linear simplificado de dimerização, no qual a redução percentual do fluxo luminoso emitido por uma luminária é aproximada por uma redução proporcional da potência elétrica consumida. Assim, para fins de análise energética, considera-se que uma luminária operando a 50% do fluxo luminoso, consome aproximadamente 50% de sua potência nominal.

Ressalta-se que, em sistemas de iluminação baseados em tecnologia LED, a relação entre fluxo luminoso e potência elétrica não é rigorosamente linear, em razão das características dos diodos emissores de luz, do comportamento do driver eletrônico e dos efeitos térmicos. Ainda assim, medições experimentais disponíveis na literatura indicam que, ao longo de grande parte da faixa de dimerização, tanto o fluxo luminoso quanto a potência ativa diminuem de forma correlata, o que torna a aproximação linear adequada para análises comparativas de consumo energético (SIKORA et al., 2018).

Dessa forma, o modelo adotado visa simplificar os cálculos e permitir a comparação consistente entre diferentes cenários de operação, não tendo como objetivo representar com exatidão o comportamento detalhado das luminárias LED, mas fornecer uma aproximação tecnicamente fundamentada para a análise proposta.

4.1.4 CÁLCULO DO CONSUMO DE ENERGIA

O consumo diário de energia elétrica foi calculado a partir da soma do consumo em cada período de operação, conforme a expressão:

$$E_{diário} = \sum_{i=1}^{n} (P_i \times t_i) \quad (4.2)$$

Onde P_i representa a potência média do sistema no período i, considerando os níveis de dimerização aplicados, e t_i o tempo de duração desse período.

O consumo anual de energia foi obtido pela multiplicação do consumo diário por 365 dias, assumindo operação contínua da iluminação ao longo do ano.

4.1.5 DETERMINAÇÃO DA ECONOMIA DE ENERGIA

A economia de energia elétrica foi determinada pela diferença entre o consumo do cenário de referência e o consumo de cada cenário de dimerização, conforme:

$$Economia = E_{ref} - E_{cenário} \quad (4.3)$$

Além da economia absoluta, expressa em kWh, foi calculada a economia percentual, permitindo a comparação direta do desempenho energético entre os diferentes cenários analisados.

4.1.6 CONSIDERAÇÕES SOBRE INCERTEZAS

Ressalta-se que os valores de quantidade de luminárias utilizados neste estudo são estimativas baseadas em informações públicas e observações em campo, não correspondendo a um inventário oficial completo do campus. Dessa forma, os resultados apresentados devem ser interpretados como estimativas do potencial de economia de energia, e não como valores exatos de consumo real.

Com o objetivo de avaliar a robustez dos resultados frente a essas incertezas, foi realizada uma análise de sensibilidade, considerando variações na quantidade total de luminárias, permitindo verificar o impacto dessas variações nos resultados de consumo e economia estimados.

4.2 CENÁRIO DE REFERÊNCIA

O cenário de referência representa a condição atual de operação do sistema de iluminação do campus da UFJF, servindo como base para a comparação com os cenários de dimerização analisados neste estudo. Nesse cenário, considera-se que todas as luminárias operam continuamente em sua potência nominal, sem qualquer tipo de controle adaptativo ou redução de fluxo luminoso ao longo do período noturno.

Para efeito de cálculo, foi adotado que o sistema é composto por 1080 luminárias LED sendo aproximadamente 180 luminárias no anel viário e cerca de 900 distribuídas pelas vias internas e setores departamentais, cada uma com potência nominal de 200 W, resultando em uma potência instalada total de aproximadamente 216 kW. Assume-se que a iluminação permanece ligada por 12 horas diárias, correspondentes ao período noturno típico de operação da iluminação pública.

Dessa forma, o consumo diário de energia elétrica no cenário de referência é obtido a partir da operação contínua do sistema em plena carga ao longo de todo o período considerado. O consumo anual é calculado pela extrapolação desse valor para 365 dias, assumindo operação regular ao longo do ano.

A adoção desse cenário de referência permite estabelecer uma base consistente para a avaliação do impacto energético da telegestão, possibilitando a quantificação da economia de energia obtida por meio da aplicação dos diferentes cenários de dimerização definidos no Capítulo 3.

4.3 CONSUMO E ECONOMIA POR CENÁRIO DE DIMERIZAÇÃO

Com base na metodologia apresentada na Seção 4.1 e no cenário de referência definido na Seção 4.2, foram calculados o consumo de energia elétrica e a economia associada à aplicação de diferentes cenários de dimerização viabilizados por sistemas de telegestão. Os resultados consideram a operação diária da iluminação por 12 horas, distribuídas conforme os períodos definidos, e a potência nominal das luminárias.

Os cenários analisados incluem estratégias de dimerização uniformes e progressivas, bem como um cenário com dimerização setorizada, no qual são adotados níveis distintos de fluxo luminoso para o anel viário e para as vias internas do campus, de acordo com o padrão de circulação de cada área.

4.3.1 CONSUMO DE ENERGIA NO CENÁRIO DE REFERÊNCIA

No cenário de referência, em que todas as luminárias operam continuamente a 100% de sua potência nominal durante todo o período noturno, o sistema apresenta o maior consumo energético dentre os cenários analisados. Esse valor é utilizado como base para a comparação com os cenários de dimerização, permitindo a quantificação direta das economias obtidas.

4.3.2 CONSUMO E ECONOMIA NOS CENÁRIOS DE DIMERIZAÇÃO

A Tabela 8 apresenta o consumo diário e anual de energia elétrica para cada cenário analisado, bem como a economia absoluta e percentual em relação ao cenário de referência.

Tabela 8 - Resultado de consumo e economia por cenário

Cenário	Consumo Diário (kWh)	Consumo Anual (kWh)	Economia (%)
Referência (Sem Dimerização)	2.592,00	946.080	0
Dimerizada (Uniforme)	1.836,00	670.140	29,17
Dimerizada (Agressiva)	1.468,80	536.112	43,33
Dimerizada (Setorizada)	1.530,00	558.450	40,97

Fonte: Elaborado pelo Autor

Os resultados demonstram que a aplicação de dimerização ao longo do período noturno proporciona reduções significativas no consumo de energia elétrica. Observa-se que os cenários com reduções progressivas ao longo da noite apresentam economias expressivas quando comparados ao cenário com operação uniforme, evidenciando a importância da adequação do nível de iluminação à demanda real de uso do campus.

4.3.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS CENÁRIOS ANALISADOS

Entre os cenários avaliados, a dimerização setorizada apresentou o melhor desempenho energético, pois permite manter níveis mais elevados de iluminação no anel viário, área de maior circulação de pessoas, ao mesmo tempo que promove uma redução mais acentuada da iluminação nas vias internas durante os períodos de menor circulação.

Essa abordagem permite maximizar a economia de energia sem comprometer os requisitos mínimos de segurança e conforto visual, alinhando-se aos princípios da iluminação adaptativa recomendados por normas técnicas e boas práticas de eficiência energética.

Os cenários de dimerização uniforme e agressiva também tiveram reduções relevantes no consumo de energia elétrica. Entretanto, apresentam menor flexibilidade para se adaptar às diferentes condições de uso do campus. Embora a dimerização agressiva tenha obtido o maior percentual de economia energética, o cenário de dimerização setorizada alcançou um percentual bastante próximo ao dessa estratégia, mostrando-se mais vantajoso quando considerada sua maior flexibilidade operacional. Dessa forma, a aplicação da dimerização agressiva se torna menos relevante, sobretudo em função de sua limitada capacidade de adaptação às variações de uso do sistema de iluminação.

4.3.4 SÍNTESE DOS RESULTADOS

De forma geral, os resultados obtidos evidenciam que a adoção de um sistema de telegestão associado à dimerização da iluminação pública no campus da UFJF possui elevado potencial de redução do consumo de energia elétrica. As economias observadas variam conforme a estratégia adotada, sendo mais expressivas nos cenários que consideram simultaneamente a variação temporal e espacial da demanda por iluminação.

Esses resultados reforçam a viabilidade técnica da telegestão como ferramenta de eficiência energética, justificando sua aplicação em ambientes complexos como o campus da UFJF, onde os padrões de uso apresentam grande variação ao longo do tempo e entre diferentes áreas.

4.4 ANÁLISE COMPARATIVA E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A análise comparativa dos resultados obtidos evidencia que a adoção de estratégias de dimerização associadas a sistemas de telegestão pode proporcionar reduções expressivas no consumo de energia elétrica do sistema de iluminação do campus da UFJF. As diferenças observadas entre os cenários analisados estão diretamente relacionadas à forma como os níveis de iluminação são ajustados em função do tempo e da demanda real de uso das vias.

Os cenários com dimerização uniforme, nos quais a redução do fluxo luminoso é aplicada de forma igual a todas as luminárias, apresentam economias relevantes quando comparados ao cenário de referência. No entanto, essa abordagem não considera as particularidades de cada área do campus, tratando vias com diferentes funções e níveis de circulação de maneira homogênea, o que limita o potencial máximo de economia.

Por outro lado, os cenários com dimerização progressiva ao longo da noite demonstram desempenho energético superior, uma vez que exploram a redução natural do fluxo de usuários

nos períodos mais avançados do horário noturno. Esse comportamento está alinhado com a dinâmica típica de funcionamento do campus da UFJF, que apresenta maior ocupação nos horários iniciais da noite e uso reduzido durante a madrugada.

O melhor desempenho energético é observado no cenário de dimerização setorizada, no qual são adotados níveis diferenciados de iluminação para o anel viário e para as vias internas. Essa estratégia permite preservar níveis mais elevados de iluminação em áreas críticas para a segurança viária e circulação de veículos, ao mesmo tempo em que aplica reduções mais intensas em áreas de menor risco e menor fluxo, especialmente durante o período de baixa ocupação do campus.

Do ponto de vista normativo, os níveis de dimerização adotados nos cenários analisados permanecem compatíveis com as diretrizes estabelecidas pela ABNT NBR 5101:2024, uma vez que consideram a função das vias e os períodos de maior e menor circulação. Dessa forma, a economia de energia obtida não ocorre à custa da segurança ou do conforto visual, mas sim por meio de uma gestão mais eficiente e racional do sistema de iluminação.

Cabe destacar que os valores apresentados representam estimativas do potencial de economia, uma vez que o estudo se baseia em dados aproximados de quantidade de luminárias e em um modelo linear de redução de potência. Ainda assim, a análise de sensibilidade realizada indica que, mesmo com variações nesses parâmetros, a hierarquia de desempenho entre os cenários se mantém, reforçando a robustez das conclusões obtidas.

Além da redução do consumo de energia elétrica, a adoção de estratégias de telegestão e dimerização contribui indiretamente para a redução das emissões de gases de efeito estufa associadas à geração de energia. Embora o presente estudo não tenha como objetivo principal a quantificação das emissões de carbono, a diminuição do consumo energético implica menor demanda por geração elétrica, resultando em emissões evitadas de CO_2. Considerando fatores médios de emissão da matriz elétrica brasileira, predominantemente renovável, a economia de energia observada nos cenários analisados pode ser associada a um impacto ambiental positivo adicional, reforçando os benefícios da telegestão não apenas sob o aspecto energético, mas também ambiental.

Em síntese, os resultados demonstram que a telegestão, quando associada a estratégias de dimerização bem definidas e alinhadas ao padrão de uso do espaço, constitui uma ferramenta eficaz para a promoção da eficiência energética em ambientes complexos como no campus da UFJF. A adoção de abordagens setorizadas e adaptativas mostra-se tecnicamente mais adequada do que estratégias uniformes, por permitir maior flexibilidade operacional e maior potencial de redução do consumo de energia elétrica.

5 CONCLUSÃO

A telegestão aplicada aos sistemas de iluminação pública se apresenta como uma ferramenta relevante para a promoção da eficiência energética e da sustentabilidade, ao permitir a adequação dos níveis de iluminação às condições reais de uso. Neste contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar o potencial de economia de energia elétrica proporcionado pela adoção de estratégias de dimerização viabilizadas por sistemas de telegestão no campus da Universidade Federal de Juiz de Fora.

A metodologia adotada se baseou na comparação entre um cenário de referência, com operação contínua das luminárias em potência nominal, e cenários alternativos com aplicação de dimerização em diferentes períodos e setores do campus, respeitando as diretrizes normativas da ABNT NBR 5101. Os resultados indicam que estratégias de controle adaptativo podem proporcionar reduções significativas no consumo de energia elétrica, sem comprometer os requisitos mínimos de segurança e conforto visual.

Também se observou que os cenários que consideram a setorização do campus e a variação dos níveis de iluminação ao longo da noite apresentam melhor desempenho energético em relação às estratégias de dimerização uniforme. Apesar das simplificações adotadas, os resultados demonstram que a telegestão possui elevado potencial para a otimização da operação da iluminação e para a redução do consumo energético no campus da UFJF, reforçando a relevância de soluções inteligentes de controle em instituições públicas.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros, destacam-se:

- Levantamento detalhado e georreferenciado do inventário de luminárias do campus, permitindo maior precisão nos cálculos de consumo e economia de energia.
- Simulações luminotécnicas utilizando softwares especializados, a fim de avaliar com maior rigor o impacto da dimerização nos níveis de iluminância.
- Avaliação econômica da implantação de sistemas de telegestão, incluindo análise de custos, viabilidade financeira e tempo de retorno do investimento.
- Implementação piloto de um sistema de telegestão em setores específicos do campus para validação prática dos cenários propostos.
- Estimativa mais precisa do consumo de energia das luminárias em função da redução do fluxo luminoso, a partir de ensaios experimentais, bem como de modelos teóricos aplicados aos diferentes níveis de dimerização.

REFERÊNCIAS

ABNT. NBR 5101: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2024.

ADAM, G. DALI LED driver control system for lighting operations based on Raspberry Pi and kernel modules. *Electronics*, Basel, v. 8, n. 9, art. 1021, 2019. DOI: 10.3390/electronics8091021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2079-9292/8/9/1021>. Acesso em: 22 set. 2025.

BERNADES, D. M.; CELESTE, W. C.; CHAVES, G. L. D. Energy efficiency in urban public lighting: literature review of equipment and technologies. Research, Society and Development, [S. l.], v. 9, n. 7, p. e606973957, 2020. DOI: 10.33448/rsd-v9i7.3957. Disponível em: <https://rsdjournal.org/rsd/article/view/3957>. Acesso em: 22 set. 2025.

BRAGA, Newton C. Medidas em circuitos com tiristores INS575. Newton C Braga, [s.d.]. Disponível em: <https://www.newtoncbraga.com.br/testando-compontentes/18464-medidas-em-circuitos-com-tiristores-ins575.html>. Acesso em: 10 ago. 2025.

CIVILIZAÇÃO ENGENHEIRA**.** Smart Cities: resolvendo problemas urbanos com tecnologia. 2019. Disponível em: <https://civilizacaoengenheira.wordpress.com/2019/05/09/smart-cities-resolvendo-problemas-urbanos-com-tecnologia/>. Acesso em: 10 jun. 2025.

CLEMENTE, A. J.; PERINI, M. R. C.; SANTOS, D. A. C.; MARTINEZ, I. N.; ROSA, C. S.; GAVRON, T. M. Smart cities: uma revisão de escopo no campo das ciências sociais (2015–2020). Revista Brasileira de Informação Bibliográfica em Ciências Sociais, n. 96, 2021. Disponível em: <https://bibanpocs.emnuvens.com.br/revista/article/view/146>. Acesso em: 10 jun. 2025.

CREA-PR**.** Iluminação pública*.* 2016. Disponível em: <https://www.crea-pr.org.br/ws/wp-content/uploads/2016/12/iluminacao-publica.pdf>. Acesso em: 8 jun. 2025.

ENGIE BRASIL. Parceria entre Uberlândia e ENGIE na iluminação pública garante redução em mais de 60% nos gastos com energia elétrica. 2023. Disponível em: <https://www.engie.com.br/imprensa/press-releases/parceria-entre-uberlandia-e-engie-na-iluminacao-publica-garante-reducao-em-mais-de-60-nos-gastos-com-energia-eletrica/>. Acesso em: 20 jun. 2025.

IWASA, F. T. Planejando smart cities: uma revisão bibliométrica sobre planejamento estratégico de cidades inteligentes. Revista Brasileira em Tecnologia da Informação, v. 6, n. 2, p. 66–83, 2025. Disponível em: <https://www.fateccampinas.com.br/rbti/index.php/fatec/article/view/138>. Acesso em: 10 jun. 2025.

JAISWAL, M. P.; KUMAR, V.; KUMAR, A. Power Saving Techniques for LED Drivers. Disponível em: <https://www.researchgate.net/figure/arious-duty-cycle-PWM-signals_fig1_332574596>. Acesso em: 10 jul. 2025.

LEDSTAR**.** Luminária pública LED 200W LEDSTAR VITTA V93. Disponível em: <https://ledstar.com.br/produto/luminaria-publica-led-200w-ledstar-vitta-v93/>. Acesso em: 10 ago. 2025

LOSSO, Alfeu; QUADRO, Mário; VITOR, Adriano; VERSAGE, Rogério. Cidades Inteligentes: Análise de um mesoclima utilizando a telegestão da iluminação pública no município de Palhoça, Santa Catarina - Brasil. Estrabão, *[S. l.]*, v. 2, n. 1, p. 180–187, 2021. DOI: 10.53455/re.v2i.37. Disponível em: <https://revista.estrabao.press/index.php/estrabao/article/view/37/39>. Acesso em: 25 jun. 2025.

LUMOS CONTROLS. Lighting control protocols: DALI, 0–10V, DMX, PWM — what is your choice? 2021. Disponível em: <https://lumoscontrols.com/resources/lighting-control-protocols-dali-0-10v-dmx-pwm-what-is-your-choice/>. Acesso em: 02 ago. 2025.

PORTAL BELO HORIZONTE**.** Cidade inteligente. Belo Horizonte, 20 ago. 2019. Disponível em: <https://portalbelohorizonte.com.br/negocios/cidade-inteligente>. Acesso em: 12 jun. 2025.

PREFEITURA DE JUIZ DE FORA**.** Brilha, UFJF! PJF inicia implantação de luminárias LED no Anel Viário da UFJF. Juiz de Fora, 21 nov. 2024. Disponível em: <https://www.pjf.mg.gov.br/noticias/view.php?idnoticia2=84948&modo=link2>. Acesso em: 10 jun. 2025.

PREFEITURA MUNICIPAL DE CURITIBA. Relatório de projetos de iluminação pública. Curitiba, 2021. Disponível em: <https://mid.curitiba.pr.gov.br/>. Acesso em: 12 jun. 2025.

PREFEITURA MUNICIPAL DE UBERLÂNDIA. Uberlândia é a 1ª do Brasil no ranking "Cidades com Serviços Inteligentes" pelo segundo ano consecutivo. 2022. Disponível em: <https://www.uberlandia.mg.gov.br/2022/12/16/uberlandia-e-a-1a-do-brasil-no-ranking-cidades-com-servicos-inteligentes-pelo-segundo-ano-consecutivo/ >. Acesso em: 20 jun. 2025.

SERBAN, A. C. et al. Artificial intelligence for smart renewable energy sector in Europe: smart energy infrastructures for next generation smart cities. *IEEE Access*, v. 8, p. 77364–77377, 2020.

SIKORA, R.; MARKIEWICZ, P.; PABJAŃCZYK, W. The active power losses in the road lighting installation with dimmable LED luminaires. *Sustainability*, Basel, v. 10, n. 12, p. 4742, 2018. DOI: 10.3390/su10124742. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/10/12/4742>. Acesso em: 22 set. 2025.

ULLAH, R. et al. Energy and congestion-aware routing metric for smart grid AMI networks in smart city. *IEEE Access*, v. 5, p. 13799–13810, 2017.

URBAN SYSTEMS**.** Connected Smart Cities – Ranking CSC Brasil. 2024. Disponível em: <https://conteudo.urbansystems.com.br/csc_urban_atual>. Acesso em: 12 jun. 2025.

ZANELLA, A.; BUI, N.; CASTELLANI, A.; VANGELISTA, L.; ZORZI, M. Internet of Things for smart cities. IEEE Internet of Things Journal, v. 1, n. 1, p. 22–32, 2014. Disponível em: < https://ieeexplore.ieee.org/document/6740844>. Acesso em: 23 nov. 2025.