ISSN: 2675-7222

SAS
South American Sciences

SELEÇÃO DE MATERIAIS PARA SISTEMA DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA RESILIENTE PARA ÀS CONDIÇÕES CLIMÁTICAS DA AMAZÔNIA

MATERIAL SELECTION FOR A PUBLIC LIGHTING SYSTEM RESILIENT TO AMAZON CLIMATE CONDITIONS

https://doi.org/10.63330/sasciencesv6n2-340

Submetido em: 13/10/2026 e Publicado em: 26/11/2026

SAS: e26570

Paulo Daniel da Silva Pedreiro
Formando em Engenharia Elétrica
Centro Universitário FAMETRO
E-mail: paulo77dani@gmail.com

Layse Oliveira Batista
Mestranda em Clima e Ambiente (INPA/UEA), orientadora do presente trabalho
Centro Universitário FAMETRO
E-mail: layse.batista@fametro.edu.br

Izaque Francisco da Costa
Engenheiro Eletricista
E-mail: costa.izaque@ufam.edu.br

Resumo

O presente trabalho teve como objetivo analisar critérios técnicos e ambientais para a seleção de materiais aplicáveis a sistemas de iluminação pública resilientes às condições climáticas da Amazônia, considerando durabilidade, resistência aos agentes ambientais, eficiência energética e sustentabilidade ao longo do ciclo de vida dos componentes. A pesquisa fundamentou-se nas particularidades climáticas da região amazônica, caracterizada por elevada umidade relativa do ar, temperaturas elevadas, precipitações frequentes e intensa exposição à radiação solar, condições que podem favorecer processos de corrosão e degradação dos materiais empregados na infraestrutura de iluminação pública. A investigação adotou uma abordagem qualitativa e quantitativa, de caráter exploratório e descritivo, fundamentada em pesquisa bibliográfica, documental e análise comparativa de um cenário composto por 100 pontos de iluminação pública no bairro Tancredo Neves, em Manaus/AM. Foram consideradas tecnologias de vapor de sódio (70 W), vapor metálico (150 W) e LED (45 W), relacionando suas características técnicas aos requisitos de durabilidade e adequação ambiental dos componentes. Os resultados demonstraram que a luminária LED de 45 W apresentou **redução de potência nominal de 35,7% em comparação à tecnologia de vapor de sódio de 70 W e de 70,0% em relação à de vapor metálico de 150 W**. Ressalta-se que esses percentuais representam diferenças entre potências nominais, não constituindo, isoladamente, comprovação de redução equivalente

no consumo real de energia elétrica, que depende das horas de funcionamento, das perdas nos dispositivos auxiliares e das condições efetivas de operação. A análise econômica apresentou economia financeira anual estimada em R$ 28.897,50 e período de retorno do investimento de aproximadamente 19,5 meses, enquanto a estimativa ambiental indicou redução potencial de 8.847 kg de CO_2 por ano, resultados condicionados às premissas de cálculo adotadas. A análise bibliográfica e documental permitiu identificar mecanismos de degradação e sistematizar critérios de seleção relacionados à resistência à corrosão, estabilidade térmica, proteção contra umidade e radiação ultravioleta, resistência mecânica e durabilidade. Concluiu-se que a seleção de materiais para sistemas de iluminação pública na Amazônia deve integrar requisitos técnicos, ambientais e operacionais, considerando não apenas a eficiência energética e o custo inicial, mas também a confiabilidade e a vida útil dos componentes, de modo a subsidiar soluções mais resilientes e sustentáveis.

Palavras-chave: Amazônia; Eficiência energética; Iluminação pública; Resiliência climática; Seleção de materiais.

Abstract

The present study aimed to analyze technical and environmental criteria for selecting materials suitable for public lighting systems resilient to the climatic conditions of the Amazon region, considering durability, resistance to environmental agents, energy efficiency, and sustainability throughout the life cycle of the components. The research was based on the specific climatic characteristics of the Amazon region, characterized by high relative humidity, elevated temperatures, frequent rainfall, and intense exposure to solar radiation, conditions that may contribute to corrosion and degradation processes affecting materials used in public lighting infrastructure. The investigation adopted a qualitative and quantitative approach, with an exploratory and descriptive design, supported by bibliographic and documentary research and a comparative analysis of a scenario comprising 100 public lighting points in the Tancredo Neves neighborhood, Manaus, Amazonas, Brazil. High-pressure sodium (70 W), metal halide (150 W), and LED (45 W) technologies were considered, relating their technical characteristics to component durability and environmental suitability requirements. The results showed that the 45 W LED luminaire presented a **35.7% reduction in nominal power compared to the 70 W high-pressure sodium technology and a 70.0% reduction compared to the 150 W metal halide technology**. These percentages represent differences in nominal power ratings and do not, by themselves, demonstrate equivalent reductions in actual electricity consumption, which depends on operating hours, auxiliary equipment losses, and actual operating conditions. The economic analysis indicated estimated annual financial savings of BRL 28,897.50 and an investment payback period of approximately 19.5 months, while the environmental estimate suggested a potential reduction of 8,847 kg of CO_2 per year, subject to the assumptions adopted in the calculations. The

bibliographic and documentary analysis enabled the identification of degradation mechanisms and the systematization of material selection criteria related to corrosion resistance, thermal stability, protection against moisture and ultraviolet radiation, mechanical strength, and durability. It was concluded that material selection for public lighting systems in the Amazon region should integrate technical, environmental, and operational requirements, considering not only energy efficiency and initial costs but also component reliability and service life, thereby supporting the development of more resilient and sustainable solutions.

Keywords: Amazon region; Climate resilience; Energy efficiency; Material selection; Public lighting.

1 INTRODUÇÃO

A iluminação pública constitui um componente essencial da infraestrutura urbana, desempenhando papel relevante na segurança, na mobilidade e na utilização dos espaços públicos durante o período noturno. Além de atender às necessidades de visibilidade das vias, sua eficiência depende da capacidade dos equipamentos e materiais de manterem desempenho satisfatório ao longo do tempo, especialmente quando submetidos continuamente às condições ambientais externas. Nesse contexto, Manaus, principal centro urbano da Amazônia brasileira e com população superior a dois milhões de habitantes, apresenta demanda significativa por serviços de infraestrutura, entre os quais se insere a iluminação pública (IBGE, 2022).

As particularidades climáticas da região tornam essa infraestrutura especialmente suscetível às condições de exposição ambiental. Temperaturas elevadas, alta umidade relativa do ar, precipitações frequentes e intensa incidência de radiação solar podem interferir no comportamento dos materiais empregados em luminárias, postes, braços, suportes, cabos, conectores e sistemas de vedação. Dessa forma, garantir a continuidade e a qualidade da iluminação pública em Manaus envolve desafios que ultrapassam o fornecimento e o consumo de energia, exigindo atenção à resistência, à durabilidade e à adequação dos materiais às condições ambientais amazônicas.

Nesse contexto, a modernização da iluminação pública deve considerar não apenas a redução do consumo energético, mas também a capacidade dos equipamentos de conservar seu desempenho durante a vida útil. A tecnologia LED ampliou as possibilidades de eficiência, durabilidade e melhor aproveitamento da energia em comparação com tecnologias tradicionais de iluminação. Entretanto, esses benefícios estão relacionados às condições de funcionamento dos dispositivos e às propriedades dos materiais que compõem as luminárias. O desenvolvimento dos LEDs está diretamente associado aos avanços dos materiais semicondutores e ao aprimoramento de seu desempenho, demonstrando a importância das características materiais para a evolução das tecnologias de iluminação (Schubert, 2018).

Essa relação torna-se particularmente relevante na Amazônia, onde o ambiente pode impor condições severas aos sistemas instalados em áreas externas. Luminárias, postes, braços, suportes, cabos, conectores, sistemas de vedação e componentes eletrônicos permanecem sujeitos a fatores que podem favorecer corrosão, deterioração de revestimentos, perda de propriedades de materiais poliméricos e comprometimento das conexões e da vedação. Além disso, temperaturas de operação inadequadas podem afetar a confiabilidade dos sistemas LED, fazendo com que o gerenciamento térmico e as características construtivas das luminárias sejam elementos importantes para a manutenção de seu desempenho (Iaronka; Bender; Marchesan, 2015).

A seleção inadequada dos materiais pode, portanto, reduzir a vida útil dos equipamentos e aumentar a necessidade de intervenções corretivas, substituições e aquisição de novos componentes. Essa situação produz consequências econômicas para a administração pública e também ambientais, devido ao maior consumo de matérias-primas, transporte, manutenção e geração de resíduos. A avaliação das tecnologias de iluminação sob a perspectiva do ciclo de vida demonstra que seus impactos não se concentram exclusivamente no consumo de energia durante a operação, sendo necessário considerar outras etapas associadas aos equipamentos e componentes utilizados na infraestrutura (Tähkämö; Halonen, 2015).

Dessa forma, pensar em eficiência para a iluminação pública de Manaus exige uma abordagem que associe desempenho energético à resistência dos materiais empregados. Uma solução tecnologicamente eficiente pode perder parte de suas vantagens quando componentes apresentam deterioração precoce em razão de sua baixa compatibilidade com o ambiente de instalação. A durabilidade assume, nesse sentido, importância técnica, econômica e ambiental, uma vez que componentes com maior vida útil podem reduzir a frequência de manutenção e substituição. A análise do ciclo de vida permite justamente ampliar a avaliação das tecnologias de iluminação, incorporando impactos relacionados à fabricação, utilização, manutenção e destinação dos componentes (Abdul Hadi et al., 2013).

Assim, este trabalho insere-se na necessidade de compreender a iluminação pública amazônica a partir da relação entre ambiente, materiais e desempenho. A caracterização das condições climáticas regionais permite reconhecer os agentes potencialmente associados à deterioração dos componentes, enquanto a identificação dos mecanismos de degradação fornece subsídios para escolhas mais adequadas. A partir dessa compreensão, torna-se possível propor critérios técnicos e ambientais para orientar a seleção de materiais destinados a luminárias, postes, suportes, cabos, conectores e sistemas de vedação, contribuindo para sistemas de iluminação pública mais resilientes, eficientes, duráveis e sustentáveis para a realidade da Amazônia.

2 ILUMINAÇÃO PÚBLICA E CONDIÇÕES AMBIENTAIS DA AMAZÔNIA

2.1 SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA E SEUS COMPONENTES

Os sistemas de iluminação pública constituem uma infraestrutura destinada a proporcionar condições adequadas de visibilidade em vias, praças e demais espaços de circulação coletiva durante o período noturno. Sua composição envolve fontes luminosas, luminárias, sistemas ópticos, estruturas de sustentação, dispositivos elétricos e elementos responsáveis pela alimentação e pelo controle da iluminação. O desempenho do conjunto depende da integração entre esses componentes e de sua adequação às características do ambiente, considerando aspectos como distribuição luminosa, segurança, conforto visual, eficiência e condições específicas de aplicação em espaços externos (DiLaura et al., 2011).

A compreensão da iluminação pública como um sistema integrado permite superar uma análise centrada exclusivamente na fonte luminosa. O desempenho satisfatório depende da compatibilidade entre componentes elétricos, mecânicos e estruturais, uma vez que a falha de um único elemento pode comprometer a operação do conjunto. Essa questão torna-se especialmente relevante na Amazônia, onde os equipamentos permanecem expostos continuamente a condições ambientais potencialmente agressivas. Nesse cenário, luminárias, postes, suportes, cabos, conectores e sistemas de vedação precisam ser analisados de forma conjunta, considerando não apenas sua função individual, mas sua contribuição para a confiabilidade da infraestrutura.

A modernização desses sistemas tem sido marcada pela crescente utilização de luminárias LED associadas a dispositivos de controle e monitoramento. Essa configuração permite integrar fonte luminosa, componentes eletrônicos, sensores e mecanismos de gerenciamento, ampliando as possibilidades de controle operacional e redução do consumo energético. A incorporação dessas tecnologias transforma a luminária em um equipamento mais complexo, no qual diferentes componentes precisam atuar de maneira coordenada para assegurar desempenho e continuidade do serviço, especialmente quando instalados permanentemente em ambientes externos sujeitos a diferentes condições de exposição (Juntunen et al., 2015).

Essa evolução tecnológica amplia, simultaneamente, as exigências relacionadas à seleção e à proteção dos componentes. Quanto maior a presença de circuitos eletrônicos, sensores e dispositivos de controle, maior se torna a importância dos invólucros, conexões, materiais estruturais e elementos de vedação para preservar a integridade do sistema. Nas condições amazônicas, essa questão assume caráter estratégico, pois fatores ambientais, especialmente temperatura e umidade, podem interferir nas condições de funcionamento e no desempenho das luminárias LED. Dessa forma, a seleção dos componentes deve considerar não apenas sua eficiência, mas também sua capacidade de manter desempenho adequado diante das condições ambientais às quais o sistema de iluminação pública permanece continuamente exposto (Saraiji, Hamdan & Harb, 2013).

2.2 CONDIÇÕES CLIMÁTICAS E AMBIENTAIS DA REGIÃO AMAZÔNICA

As condições ambientais constituem fatores relevantes para o desempenho de equipamentos de iluminação instalados permanentemente em espaços externos, sobretudo quando envolvem variações térmicas significativas. Em luminárias LED, a temperatura influencia diretamente o comportamento dos componentes eletrônicos e exige soluções adequadas de gerenciamento térmico para assegurar condições satisfatórias de funcionamento. A dissipação do calor produzido durante a operação torna-se, portanto, um aspecto importante do projeto, pois condições térmicas desfavoráveis podem interferir no desempenho e na confiabilidade dos equipamentos ao longo de sua utilização. (Ashby, M. F. 2017).

No contexto amazônico, essa discussão assume maior importância em razão da combinação entre calor, elevada umidade, chuvas frequentes e exposição contínua dos equipamentos ao ambiente externo. Tais condições devem ser compreendidas não como fatores isolados, mas como elementos que atuam simultaneamente sobre luminárias, estruturas de sustentação, conexões e sistemas de proteção. Dessa forma, projetar a iluminação pública para essa realidade exige reconhecer que as características ambientais do território interferem nas exigências de conservação da infraestrutura, tornando necessária uma análise preventiva capaz de considerar as condições efetivas às quais os componentes permanecerão submetidos durante sua operação.

A análise ambiental dos sistemas de iluminação também deve considerar a durabilidade dos equipamentos como elemento relacionado ao seu ciclo de vida. A necessidade de substituições, intervenções de manutenção e utilização de novos recursos ao longo do período de funcionamento pode modificar os impactos associados às diferentes tecnologias de iluminação viária. Assim, avaliar uma solução somente pelo consumo energético durante sua operação oferece uma perspectiva limitada, pois sua vida útil e as demandas materiais relacionadas à fabricação e à manutenção também participam da avaliação global de seu desempenho ambiental. Roberge, P. R. (2008).

Sob essa perspectiva, as particularidades ambientais amazônicas precisam integrar as decisões técnicas desde a escolha dos materiais até a definição das soluções de proteção dos componentes. Um material aparentemente adequado em condições menos severas pode apresentar comportamento diferente quando submetido continuamente à combinação de calor, umidade e exposição às intempéries. Por isso, a resiliência da iluminação pública depende da compatibilidade entre as características dos materiais e o ambiente de instalação. Essa compreensão permite tratar a durabilidade como requisito de projeto, reduzindo a possibilidade de deterioração precoce, substituições recorrentes e aumento dos custos de manutenção.

Figura 1 - Desafios Ambientais da Iluminação Amazônica.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor, com auxílio da ferramenta de IA Gemini na geração da imagem, 2026.

A Figura 1 evidencia as principais condições climáticas e ambientais capazes de influenciar o desempenho dos sistemas de iluminação pública instalados na região amazônica. Entre os fatores representados destacam-se a elevada precipitação, a alta umidade relativa do ar, as temperaturas elevadas e a intensa exposição à radiação solar e ultravioleta. A atuação contínua desses agentes pode submeter luminárias, postes, suportes, conexões e demais componentes a condições severas de exposição, favorecendo processos de corrosão, deterioração de materiais, envelhecimento de revestimentos e redução da vida útil dos equipamentos.

Nesse contexto, a figura demonstra que a resiliência dos sistemas de iluminação pública depende diretamente da compatibilidade entre os materiais empregados e as características ambientais do local de instalação. A combinação de calor, umidade, chuvas intensas e radiação solar reforça a necessidade de selecionar componentes com propriedades adequadas de resistência e durabilidade. Dessa forma, a análise das condições amazônicas constitui uma etapa essencial para estabelecer critérios técnicos e ambientais de seleção, contribuindo para reduzir falhas prematuras, necessidades frequentes de manutenção e substituições, além de favorecer maior confiabilidade e sustentabilidade da infraestrutura de iluminação pública.

2.3 INFLUÊNCIA DO AMBIENTE AMAZÔNICO NO DESEMPENHO DA ILUMINAÇÃO PÚBLICA

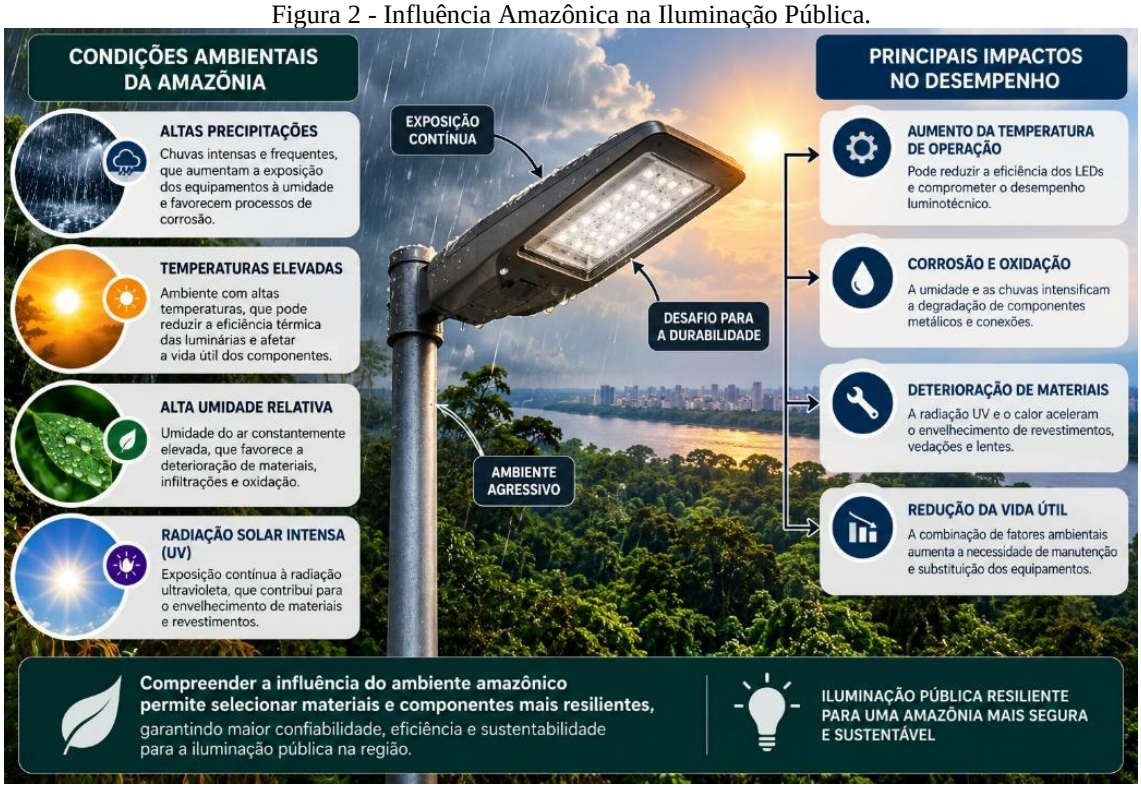
A exposição contínua das luminárias às condições ambientais pode influenciar seu comportamento durante a operação, especialmente em relação ao gerenciamento térmico dos dispositivos LED. A temperatura de funcionamento está associada à capacidade de dissipação do calor gerado pelos componentes, tornando o projeto térmico um aspecto relevante para preservar características funcionais e favorecer maior confiabilidade. Em ambientes caracterizados por temperaturas elevadas, essa questão assume importância ainda maior, pois as condições externas podem dificultar a transferência adequada de calor e aumentar as exigências sobre a estrutura da luminária (Iaronka et al., 2015).

No contexto amazônico, a avaliação do desempenho dos sistemas de iluminação pública exige uma abordagem integrada que considere a influência das condições climáticas sobre a durabilidade e a confiabilidade dos equipamentos. A exposição simultânea ao calor, à umidade e à radiação solar pode intensificar mecanismos de degradação, especialmente em componentes eletrônicos, materiais poliméricos e estruturas metálicas. Nesse sentido, a Illuminating Engineering Society (IES, 2018) destaca que a estimativa da vida útil de produtos LED deve contemplar diferentes mecanismos de falha, não se restringindo à manutenção do fluxo luminoso. Dessa forma, a análise do desempenho operacional deve incorporar, além da eficiência energética e luminotécnica, critérios relacionados à estabilidade térmica, à resistência dos materiais e à adequação construtiva dos equipamentos, permitindo estabelecer parâmetros mais consistentes para sua aplicação nas condições ambientais da Amazônia.

A durabilidade dos sistemas de iluminação externa também possui relação significativa com os impactos produzidos ao longo de seu ciclo de vida. A necessidade de manutenção e substituição de componentes interfere na quantidade de materiais e recursos empregados durante o período de utilização da infraestrutura. Nesse sentido, soluções capazes de permanecer em funcionamento por períodos mais prolongados podem contribuir para uma abordagem ambientalmente mais consistente, desde que suas características técnicas sejam compatíveis com as exigências de operação e com as condições às quais os equipamentos estarão submetidos (Lozano-Miralles et al., 2020).

Diante dessa perspectiva, a influência do ambiente amazônico precisa ser incorporada como variável determinante na avaliação do desempenho da iluminação pública. A escolha de componentes inadequados às condições locais pode favorecer deteriorações precoces, aumentar intervenções corretivas e comprometer a continuidade do serviço, mesmo quando a tecnologia empregada apresenta elevada eficiência energética. Portanto, desempenho e resiliência devem ser analisados conjuntamente, considerando não apenas o funcionamento inicial do equipamento, mas sua capacidade de conservar propriedades estruturais, elétricas e funcionais durante a exposição prolongada às condições ambientais características da região.

Figura 2 - Influência Amazônica na Iluminação Pública.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor, com auxílio da ferramenta de IA Gemini na geração da imagem, 2026.

A Figura 2 apresenta a relação entre as condições climáticas da região amazônica e os desafios associados à conservação dos sistemas de iluminação pública, permitindo compreender como a exposição simultânea a diferentes agentes ambientais pode influenciar o comportamento dos materiais ao longo do tempo. Mais do que identificar fatores como precipitação, umidade, temperatura e radiação solar, a representação evidencia a possibilidade de ocorrência de processos de degradação interdependentes, capazes de comprometer a integridade estrutural e o funcionamento dos equipamentos. Nesse contexto, a norma ISO 9223:2012 destaca a importância da caracterização da corrosividade atmosférica para a avaliação dos efeitos ambientais sobre materiais metálicos, enquanto a IEC 60598-2-3 estabelece requisitos específicos de segurança e construção aplicáveis às luminárias destinadas à iluminação pública. Essas referências demonstram a relevância de considerar as condições reais de exposição na especificação técnica dos equipamentos (ISO, 2012; IEC, 2011).

Sob essa perspectiva, a análise da Figura 2 contribui para compreender que a durabilidade dos sistemas de iluminação pública deve ser avaliada de maneira integrada, considerando a interação entre características ambientais, propriedades dos materiais e condições operacionais. A adoção de componentes inadequados pode acelerar processos de deterioração e comprometer a confiabilidade dos equipamentos, resultando em maior frequência de manutenção e substituição de peças. Conforme a Illuminating Engineering Society (IES, 2018), a avaliação da vida útil de produtos LED deve contemplar diferentes mecanismos de falha, não se restringindo à manutenção do fluxo luminoso. Assim, a principal contribuição

da figura consiste em evidenciar a necessidade de incorporar variáveis ambientais aos critérios de seleção e avaliação dos materiais, estabelecendo uma relação entre resistência à degradação, desempenho operacional e custos ao longo do ciclo de vida. Essa abordagem oferece fundamentos técnicos para a definição de soluções de iluminação pública mais adequadas às particularidades climáticas da Amazônia, sem limitar a análise aos benefícios energéticos da tecnologia LED (IES, 2018).

3 MATERIAIS E MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO EM SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA

3.1 MATERIAIS EMPREGADOS NOS COMPONENTES DA ILUMINAÇÃO PÚBLICA

As luminárias LED reúnem diferentes materiais e elementos construtivos cuja integração é fundamental para o funcionamento adequado do sistema. Além dos dispositivos semicondutores responsáveis pela emissão luminosa, sua estrutura envolve componentes ópticos, eletrônicos e térmicos que precisam favorecer a dissipação do calor e assegurar condições apropriadas de operação. As propriedades dos materiais empregados influenciam a eficiência, a estabilidade e a confiabilidade do equipamento, demonstrando que o desempenho da iluminação não depende apenas da fonte luminosa, mas também da configuração física e tecnológica que sustenta seu funcionamento (Schubert, 2018).

A diversidade de componentes presentes na iluminação pública demonstra que a seleção de materiais precisa considerar a função desempenhada por cada elemento dentro do sistema. Corpos de luminárias e estruturas de sustentação exigem resistência mecânica e estabilidade, enquanto cabos e conexões demandam propriedades compatíveis com a condução e o isolamento elétrico. Elementos de vedação, por sua vez, precisam preservar áreas internas contra agentes externos. Portanto, selecionar materiais apenas com base no custo inicial pode comprometer a confiabilidade do conjunto, sobretudo quando a infraestrutura permanece continuamente exposta às condições ambientais amazônicas.

A composição material das soluções de iluminação pública também deve ser analisada sob uma perspectiva que integre desempenho técnico, custos e consequências ambientais. Durante as etapas de projeto e engenharia, as decisões relativas aos componentes podem interferir tanto na funcionalidade do sistema quanto nos recursos consumidos e nos impactos gerados ao longo de sua utilização. Dessa maneira, a escolha dos materiais constitui uma decisão estratégica, pois características relacionadas à durabilidade, manutenção e aproveitamento de recursos participam da construção de soluções capazes de conciliar valor funcional e ecoeficiência (Klaassen et al., 2020).

Nesse sentido, os materiais empregados em luminárias, postes, braços, suportes, cabos, conectores e sistemas de vedação não devem ser avaliados de maneira isolada. É necessário compreender como suas propriedades se complementam e como cada componente contribui para a resistência global da infraestrutura. No contexto amazônico, essa integração torna-se particularmente importante, pois materiais

com comportamentos distintos permanecem submetidos simultaneamente a condições ambientais exigentes. A seleção criteriosa pode, portanto, favorecer maior durabilidade, reduzir intervenções corretivas e contribuir para sistemas de iluminação pública tecnicamente mais confiáveis e ambientalmente mais coerentes.

Além desses aspectos, a adequação dos materiais às condições específicas de exposição deve ser considerada desde a fase de planejamento do sistema de iluminação pública. Essa perspectiva é especialmente relevante na Amazônia, onde fatores climáticos podem atuar de maneira combinada sobre diferentes partes da infraestrutura. Portanto, incorporar critérios de resistência, compatibilidade, manutenção e vida útil ao processo de seleção representa uma estratégia para ampliar a resiliência do sistema e evitar substituições prematuras de componentes.

Figura 3 - Principais componentes para uma iluminação sustentável para a Amazônia.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor, com auxílio da ferramenta de IA Gemini na geração da imagem, 2026.

A Figura 3 apresenta os principais materiais empregados na composição dos sistemas de iluminação pública, evidenciando a relação entre suas propriedades físicas, químicas e mecânicas e as funções desempenhadas pelos diferentes componentes. A utilização de alumínio no corpo das luminárias e nos

dissipadores térmicos está associada à sua condutividade térmica e à sua relação entre resistência mecânica e massa, enquanto materiais como policarbonato e vidro temperado são empregados em elementos ópticos e de proteção, conforme os requisitos de cada projeto. Nos sistemas de sustentação, alimentação elétrica e fixação, a seleção de materiais deve considerar a resistência estrutural, a condutividade elétrica, o isolamento e a compatibilidade entre os componentes. Nesse sentido, a norma IEC 60598-2-3 estabelece requisitos específicos para luminárias destinadas à iluminação de vias públicas, reforçando a necessidade de avaliar a segurança e a adequação construtiva dos equipamentos. Complementarmente, a IEC 60529 apresenta critérios para a classificação dos graus de proteção dos invólucros contra o ingresso de corpos sólidos e água, aspecto relevante para a preservação dos componentes internos (IEC, 2011; IEC, 1989).

No contexto amazônico, a análise dos materiais apresentados na Figura 3 ultrapassa sua identificação estrutural, pois permite compreender como a seleção inadequada de componentes pode comprometer a durabilidade, a eficiência e a confiabilidade dos sistemas de iluminação pública. A exposição contínua à elevada umidade, às variações térmicas, às precipitações intensas e à radiação solar exige materiais capazes de preservar suas propriedades ao longo do período de operação. Conforme a ISO 9223:2012, a avaliação da corrosividade atmosférica constitui um parâmetro relevante para a identificação dos riscos de degradação dos materiais metálicos e para a definição de medidas de proteção compatíveis com as condições ambientais. Além disso, a Illuminating Engineering Society (IES, 2018) destaca que a estimativa da vida útil dos produtos LED deve considerar diferentes mecanismos de falha, uma vez que a manutenção do fluxo luminoso não representa, isoladamente, a durabilidade de todo o equipamento. Dessa forma, a interpretação integrada da figura demonstra que a escolha dos materiais deve contemplar não apenas o custo inicial e a funcionalidade dos componentes, mas também sua resistência aos agentes ambientais, sua compatibilidade construtiva e suas necessidades de manutenção. Esses critérios contribuem para reduzir falhas prematuras, ampliar a vida útil dos equipamentos e favorecer a sustentabilidade técnica, econômica e ambiental da infraestrutura de iluminação pública na Amazônia (ISO, 2012; IES, 2018).

3.2 CORROSÃO, UMIDADE, TEMPERATURA E RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA

A durabilidade dos sistemas de iluminação pública está relacionada às características dos equipamentos e ao período durante o qual permanecem em operação, aspecto que também interfere nos impactos ambientais associados à infraestrutura. A fabricação, manutenção e eventual substituição de luminárias envolvem consumo de materiais, energia e outros recursos, tornando relevante considerar soluções capazes de apresentar maior permanência em serviço. Dessa perspectiva, a vida útil dos componentes constitui uma variável importante na avaliação das tecnologias de iluminação pública e de suas consequências ambientais ao longo do ciclo de vida (Abdul Hadi et al., 2013).

No contexto amazônico, essa questão ganha maior complexidade porque corrosão, umidade, temperatura elevada e radiação ultravioleta podem atuar simultaneamente sobre diferentes componentes. Elementos metálicos estão sujeitos à perda progressiva de integridade, enquanto polímeros, revestimentos, vedações e componentes ópticos podem sofrer alterações em suas propriedades durante exposições prolongadas. Por isso, a deterioração não deve ser interpretada apenas como consequência natural do tempo de utilização. Trata-se também de uma questão de compatibilidade entre material e ambiente, tornando indispensável considerar as condições reais de exposição durante a especificação da infraestrutura.

O desempenho da iluminação viária deve ser analisado de maneira integrada, considerando que a eficiência do sistema resulta da interação entre diferentes parâmetros técnicos e operacionais. A avaliação de soluções destinadas às vias públicas requer atenção às características do projeto e às condições capazes de influenciar seu funcionamento, evitando que a análise seja limitada a indicadores isolados de consumo energético. Essa perspectiva amplia a compreensão do desempenho e favorece decisões mais consistentes sobre tecnologias e componentes destinados à iluminação externa, particularmente quando se busca eficiência ao longo do período de utilização da instalação (Leccese et al., 2017).

Dessa forma, controlar os efeitos da corrosão, da umidade, do calor e da radiação ultravioleta exige uma abordagem preventiva na seleção dos materiais. A resistência do sistema depende tanto das propriedades individuais de cada componente quanto da qualidade das interfaces entre estruturas, revestimentos, conexões e elementos de vedação. Tal direcionamento pode reduzir deteriorações precoces, preservar o desempenho operacional e diminuir a frequência de manutenção e substituição dos componentes da iluminação pública.

Figura 4 - Fatores Ambientais na Iluminação Pública.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor, com auxílio da ferramenta de IA Gemini na geração da imagem, 2026.

A Figura 4 apresenta uma síntese dos principais agentes ambientais que influenciam a durabilidade e o desempenho dos sistemas de iluminação pública instalados em regiões de clima tropical úmido, com destaque para a umidade, as temperaturas elevadas, a radiação ultravioleta e os processos corrosivos. No contexto amazônico, esses fatores assumem particular relevância em razão das condições climáticas que caracterizam a região, exigindo critérios específicos para a seleção de materiais, o dimensionamento dos componentes e a definição de estratégias de manutenção. A análise integrada dessas variáveis permite compreender que a confiabilidade dos sistemas não depende exclusivamente da eficiência luminosa das fontes de iluminação, mas também da capacidade dos materiais e equipamentos de resistirem às solicitações ambientais durante sua vida útil.

Entre os fatores identificados, a umidade constitui uma condição crítica para a conservação dos componentes elétricos e eletrônicos, especialmente quando associada à precipitação intensa e à ocorrência de ciclos de molhamento e secagem. A infiltração de água em compartimentos internos, conexões e dispositivos de alimentação pode favorecer a oxidação de contatos metálicos, a deterioração de materiais isolantes e o aparecimento de falhas elétricas. Nesse contexto, a norma IEC 60529 estabelece critérios para a classificação dos graus de proteção proporcionados pelos invólucros de equipamentos elétricos contra o ingresso de corpos sólidos e água. Sua aplicação fornece subsídios técnicos para a especificação de luminárias adequadas às condições de exposição ambiental, contribuindo para minimizar a entrada de agentes externos e preservar a integridade funcional dos sistemas (IEC, 1989).

As temperaturas elevadas, por sua vez, representam um fator determinante para o desempenho e a confiabilidade das luminárias LED, considerando que a eficiência e a manutenção do fluxo luminoso desses dispositivos são influenciadas pelas condições térmicas de operação. A exposição prolongada a temperaturas excessivas pode acelerar mecanismos de degradação dos componentes semicondutores, dos circuitos de alimentação e dos materiais empregados na fabricação dos equipamentos. Conforme a Illuminating Engineering Society (IES, 2018), a avaliação da vida útil de produtos LED requer a consideração de diferentes mecanismos de falha, não sendo suficiente analisar isoladamente a manutenção do fluxo luminoso dos módulos emissores. Assim, a adoção de dissipadores térmicos adequados, a utilização de materiais com propriedades favoráveis à transferência de calor e o dimensionamento apropriado dos componentes eletrônicos constituem medidas relevantes para reduzir o estresse térmico e favorecer a estabilidade operacional.

A radiação ultravioleta também exerce influência sobre o comportamento dos materiais utilizados em sistemas de iluminação pública, particularmente daqueles constituídos por polímeros, revestimentos e componentes ópticos expostos permanentemente à radiação solar. A exposição prolongada pode desencadear processos de foto-oxidação e alterações nas propriedades físicas e químicas desses materiais, manifestando-se por descoloração, perda de transparência, fragilização e comprometimento das

características mecânicas. Em lentes e difusores, essas transformações podem modificar a transmissão e a distribuição da luz, afetando o desempenho luminotécnico. A norma ASTM G154-23 estabelece procedimentos para ensaios de exposição acelerada à radiação ultravioleta por meio de lâmpadas fluorescentes, permitindo investigar o comportamento de materiais submetidos a condições controladas de envelhecimento. Dessa forma, a realização de ensaios de resistência ao intemperismo representa um recurso importante para subsidiar a seleção de materiais destinados a aplicações externas (ASTM International, 2023).

No que se refere à corrosão, sua ocorrência está relacionada à interação entre os materiais metálicos e as condições ambientais, podendo ser intensificada pela presença de umidade, contaminantes atmosféricos e agentes quimicamente agressivos. Em sistemas de iluminação pública, os processos corrosivos podem comprometer postes, braços de sustentação, suportes, fixadores e conexões, provocando perda de seção resistente, deterioração superficial e redução da confiabilidade mecânica. A norma IEC 60068-2-52 apresenta procedimentos de ensaio de névoa salina cíclica destinados à avaliação do comportamento de componentes e equipamentos expostos a atmosferas contendo sais. Embora esse procedimento seja particularmente relevante para ambientes com exposição a cloretos, sua utilização deve considerar a agressividade atmosférica efetivamente identificada no local de instalação, não sendo adequado pressupor que todas as áreas amazônicas apresentem condições equivalentes às de ambientes marinhos (IEC, 2017).

A interpretação conjunta dos fatores apresentados na Figura 4 evidencia que os mecanismos de degradação podem atuar de maneira simultânea e interdependente. A associação entre umidade e temperatura elevada, por exemplo, pode intensificar processos de deterioração de materiais isolantes e componentes eletrônicos, enquanto a exposição à radiação ultravioleta pode reduzir progressivamente a capacidade de determinados polímeros de preservar suas propriedades originais. De modo semelhante, a deterioração de revestimentos protetores pode aumentar a suscetibilidade dos componentes metálicos à corrosão. Essas interações demonstram que a avaliação da durabilidade deve considerar o sistema de iluminação como um conjunto integrado, no qual a falha de um componente pode comprometer o desempenho e a disponibilidade operacional dos demais.

Sob a perspectiva da gestão da infraestrutura urbana, a degradação prematura dos equipamentos pode ocasionar aumento da frequência de intervenções corretivas, elevação dos custos de manutenção, redução da disponibilidade do serviço e necessidade antecipada de substituição de componentes. Tais consequências também apresentam implicações ambientais, uma vez que a redução da vida útil dos equipamentos tende a ampliar a demanda por novos materiais e a geração de resíduos decorrentes das substituições. Dessa maneira, a durabilidade deve ser compreendida como um critério técnico, econômico e ambiental, integrado aos princípios da eficiência energética e da sustentabilidade dos sistemas de iluminação pública.

Diante dessas considerações, a Figura 4 reforça a necessidade de estabelecer critérios de seleção de materiais compatíveis com as condições ambientais da Amazônia. Entre os aspectos prioritários, destacam-se a resistência à corrosão, a estabilidade térmica, a resistência ao envelhecimento por radiação ultravioleta, a proteção contra o ingresso de água e a qualidade das soluções construtivas. A incorporação desses critérios às etapas de projeto, aquisição, instalação e manutenção pode contribuir para ampliar a confiabilidade e a resiliência dos sistemas, reduzir a probabilidade de falhas prematuras e favorecer o uso eficiente dos recursos públicos. Portanto, a análise dos fatores ambientais constitui uma etapa fundamental para a proposição de soluções de iluminação pública tecnicamente adequadas, economicamente viáveis e ambientalmente sustentáveis para a realidade amazônica.

3.3 EFEITOS DA DEGRADAÇÃO NA DURABILIDADE, VIDA ÚTIL E MANUTENÇÃO

A degradação dos componentes da iluminação pública apresenta relação direta com a durabilidade e com os impactos associados ao ciclo de vida dos equipamentos. A redução da vida útil pode antecipar substituições e ampliar a demanda por materiais, energia e atividades de manutenção, alterando o desempenho ambiental originalmente esperado para determinada tecnologia. Nesse sentido, a longevidade das luminárias constitui aspecto relevante na avaliação das soluções utilizadas em vias públicas, pois o tempo efetivo de funcionamento interfere na frequência de reposição dos equipamentos e nos recursos necessários para manter a continuidade do serviço (Tähkämö & Halonen, 2015).

Sob essa perspectiva, a degradação deve ser considerada um problema que ultrapassa a simples deterioração física dos materiais. Quando componentes perdem progressivamente suas propriedades, surgem consequências técnicas, econômicas e operacionais que podem comprometer a confiabilidade da infraestrutura. No ambiente amazônico, essa situação torna-se particularmente relevante devido à exposição permanente dos equipamentos às condições climáticas adversas. Assim, prolongar a vida útil exige decisões preventivas desde o projeto, especialmente na escolha de materiais, revestimentos, vedações e conexões capazes de reduzir falhas e limitar a necessidade de intervenções corretivas recorrentes.

A incorporação de tecnologias inteligentes aos sistemas de iluminação amplia as possibilidades de acompanhamento das condições operacionais e de gerenciamento da infraestrutura. Recursos de automação, comunicação e monitoramento podem contribuir para identificar alterações no funcionamento dos equipamentos e apoiar estratégias mais eficientes de operação. Essa capacidade torna-se relevante para a manutenção, pois possibilita acompanhar o comportamento do sistema e direcionar intervenções de maneira mais racional, evitando que determinados problemas permaneçam sem identificação até provocarem interrupções ou perdas significativas de desempenho na iluminação das vias públicas (Achar et al., 2024).

Dessa maneira, durabilidade, vida útil e manutenção constituem dimensões interdependentes na avaliação de sistemas resilientes de iluminação pública. Materiais inadequados às condições de exposição podem acelerar processos de deterioração e aumentar a frequência de reparos, enquanto componentes selecionados de acordo com as exigências ambientais tendem a favorecer maior estabilidade operacional. Para a realidade amazônica, essa relação reforça a importância de combinar seleção criteriosa de materiais, proteção dos componentes e acompanhamento das condições de funcionamento, buscando reduzir substituições prematuras, racionalizar custos de manutenção e assegurar maior continuidade e confiabilidade do serviço público.

3.4 CRITÉRIOS TÉCNICOS DE RESISTÊNCIA E DURABILIDADE

A definição de critérios técnicos para sistemas de iluminação pública deve considerar o desempenho dos equipamentos durante todo o período de operação, e não somente indicadores imediatos de eficiência energética. Aspectos relacionados ao projeto, às características das luminárias, às condições de instalação e à sustentabilidade precisam ser integrados para que as soluções adotadas apresentem maior consistência técnica. Nesse sentido, a durabilidade assume papel relevante, pois influencia a permanência dos componentes em serviço, a necessidade de intervenções e o aproveitamento dos recursos empregados na infraestrutura de iluminação urbana (Skandali et al., 2025).

No contexto amazônico, estabelecer critérios de resistência significa reconhecer previamente quais solicitações ambientais poderão comprometer cada componente. Materiais metálicos devem apresentar características compatíveis com ambientes sujeitos à umidade e à corrosão, enquanto polímeros, revestimentos e elementos ópticos precisam conservar suas propriedades diante do calor e da exposição solar. A durabilidade, portanto, não pode ser tratada como característica genérica do produto, mas como resultado de sua adequação às condições reais de utilização. Essa perspectiva permite selecionar soluções capazes de reduzir vulnerabilidades e preservar a integridade funcional do sistema durante períodos mais prolongados.

A avaliação técnica das luminárias destinadas às vias públicas também envolve a capacidade de manter condições adequadas de iluminação associadas ao uso eficiente da energia. O desempenho do sistema depende de diferentes características do equipamento e de sua relação com as condições específicas da aplicação, tornando necessária uma análise que considere simultaneamente qualidade luminosa e eficiência energética. Dessa forma, a especificação técnica deve buscar soluções que apresentem desempenho compatível com as necessidades da via e que mantenham resultados satisfatórios durante sua utilização, evitando avaliações fundamentadas exclusivamente na potência instalada (Yoomak & Ngaopitakkul, 2018).

Assim, resistência e durabilidade devem integrar um conjunto de critérios que envolva comportamento mecânico, estabilidade térmica, proteção contra umidade, resistência à corrosão e conservação das propriedades dos materiais diante da radiação ultravioleta. Para sistemas instalados na Amazônia, esses requisitos precisam ser avaliados conjuntamente, pois os agentes ambientais podem atuar de maneira simultânea e intensificar processos de deterioração. A adoção dessa abordagem favorece escolhas tecnicamente mais coerentes, reduz a probabilidade de falhas prematuras e contribui para ampliar a vida útil, a confiabilidade e a continuidade operacional da iluminação pública.

3.5 CRITÉRIOS AMBIENTAIS, ENERGÉTICOS E DE SUSTENTABILIDADE

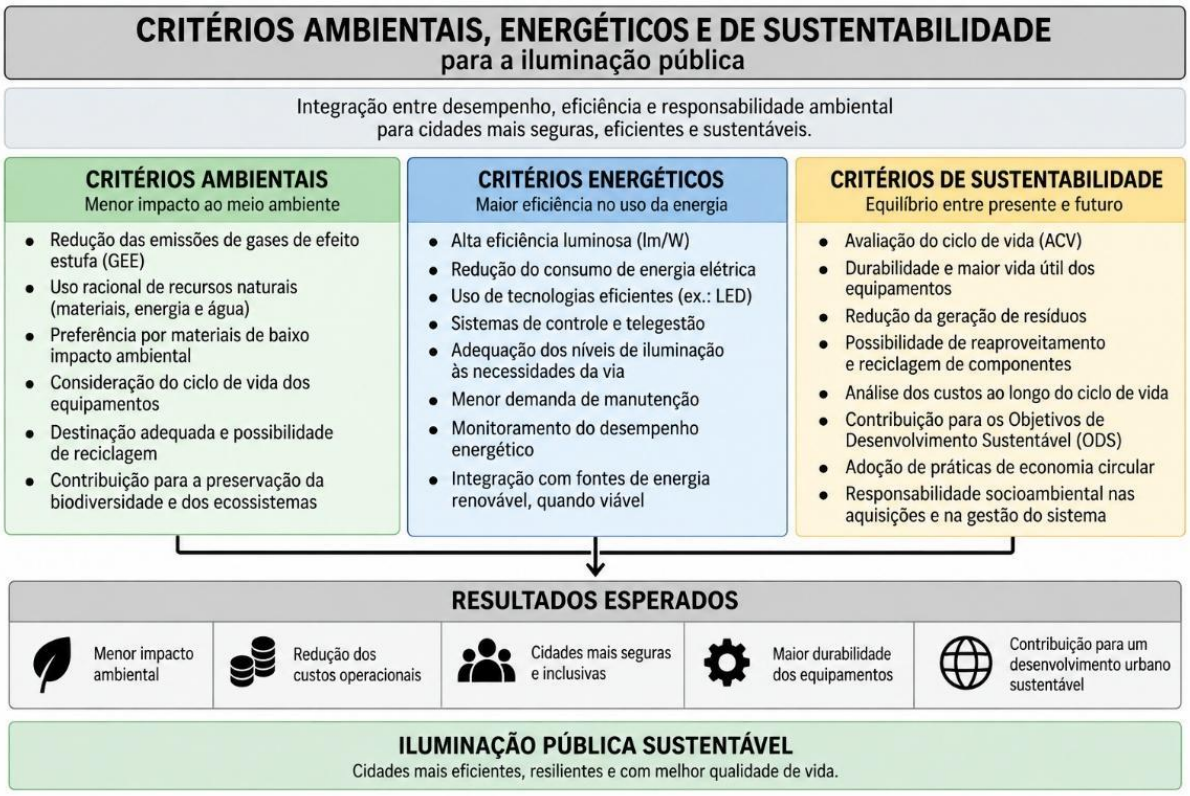
A avaliação energética dos sistemas de iluminação pública requer uma abordagem que ultrapasse a análise isolada da potência instalada, incorporando indicadores capazes de relacionar consumo, características da instalação e desempenho efetivamente proporcionado. A eficiência deve representar a capacidade do sistema de atender às necessidades de iluminação utilizando racionalmente os recursos energéticos disponíveis. Nesse contexto, critérios adequados de avaliação permitem comparar soluções tecnológicas e identificar configurações que conciliem qualidade luminosa e redução do consumo, evitando decisões fundamentadas exclusivamente em parâmetros simplificados ou insuficientes para representar o desempenho global da infraestrutura (Leccese et al., 2017).

Sob essa perspectiva, a eficiência energética deve integrar o processo de seleção dos materiais e componentes desde a concepção do sistema, e não constituir apenas uma verificação posterior ao funcionamento. Na realidade amazônica, essa integração é particularmente importante porque equipamentos sujeitos à deterioração precoce podem perder desempenho e exigir substituições frequentes, reduzindo os benefícios inicialmente associados à economia de energia. Portanto, uma solução eficiente precisa combinar consumo adequado, confiabilidade operacional e permanência em serviço, estabelecendo equilíbrio entre desempenho luminotécnico, resistência às condições ambientais e utilização racional dos recursos públicos ao longo do tempo.

A sustentabilidade da iluminação pública também pode ser examinada por meio da perspectiva do ciclo de vida, considerando que diferentes tecnologias apresentam impactos associados à produção, utilização, manutenção e substituição dos equipamentos. A avaliação ambiental permite ampliar a comparação entre alternativas ao incorporar aspectos que não são percebidos quando se observa exclusivamente o consumo durante a fase operacional. Dessa maneira, decisões relacionadas aos materiais e às tecnologias utilizadas devem considerar os recursos empregados e as consequências ambientais produzidas nas diferentes etapas de existência do sistema, favorecendo escolhas tecnicamente fundamentadas e ambientalmente responsáveis (Abdul Hadi et al., 2013).

Nesse sentido, os critérios ambientais e de sustentabilidade precisam considerar durabilidade, possibilidade de reciclagem, redução de resíduos, consumo de recursos e frequência de substituição dos componentes. Para sistemas de iluminação pública instalados na Amazônia, prolongar a vida útil mediante materiais adequados às condições climáticas representa também uma estratégia ambiental, pois reduz a necessidade de fabricar, transportar e descartar equipamentos prematuramente. A seleção sustentável deve, portanto, articular eficiência energética e resistência ambiental, buscando soluções capazes de prestar o serviço requerido com menor consumo de recursos e menor geração de impactos durante sua vida útil.

Figura 5 - Critérios para Iluminação Pública Sustentável.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor, com auxílio da ferramenta de IA Gemini na geração da imagem, 2026.

A Figura 5 apresenta uma abordagem integrada dos critérios ambientais, energéticos e de sustentabilidade aplicáveis aos sistemas de iluminação pública, evidenciando que a seleção de materiais e tecnologias deve considerar não apenas o desempenho operacional, mas também os impactos associados ao ciclo de vida dos equipamentos. A análise demonstra que a eficiência energética, a durabilidade dos componentes, a possibilidade de reciclagem e a redução da necessidade de manutenção constituem fatores interdependentes, capazes de influenciar os custos operacionais e o consumo de recursos naturais. Nesse contexto, os princípios da avaliação do ciclo de vida estabelecidos pela ISO 14040:2006 oferecem fundamentos para considerar os aspectos ambientais associados às diferentes etapas de utilização dos materiais, sem que isso represente necessariamente a realização de uma avaliação quantitativa completa.

Para as condições climáticas da Amazônia, a principal contribuição da figura consiste em reforçar a necessidade de incorporar critérios de resistência ambiental, confiabilidade e desempenho energético às decisões de especificação técnica, favorecendo soluções com maior potencial de durabilidade, menor frequência de substituições e melhor aproveitamento dos recursos ao longo da vida útil da infraestrutura (ISO, 2006).

3.6 SELEÇÃO DE MATERIAIS PARA SISTEMAS RESILIENTES ÀS CONDIÇÕES AMAZÔNICAS

A seleção de materiais para sistemas resilientes de iluminação pública deve considerar a capacidade dos componentes de preservar seu desempenho diante das condições efetivas de utilização. A experiência com sistemas LED em aplicações viárias demonstra que eficiência e qualidade da iluminação precisam ser avaliadas em conjunto com características técnicas e operacionais da instalação. Dessa forma, a especificação dos componentes deve estar associada às particularidades do ambiente de aplicação, buscando soluções que mantenham condições adequadas de funcionamento durante sua utilização e contribuam para a eficiência global da infraestrutura instalada (Jägerbrand, 2016).

Na realidade amazônica, essa seleção exige uma análise integrada das propriedades dos materiais e das solicitações ambientais às quais estarão submetidos. Metais utilizados em postes, braços, suportes e fixadores devem apresentar resistência compatível com ambientes úmidos e sujeitos à corrosão, enquanto polímeros, lentes, revestimentos e vedações precisam suportar calor, precipitação e exposição solar prolongada. Portanto, a resiliência resulta da compatibilidade entre material, função e ambiente. Essa perspectiva reduz decisões fundamentadas somente no custo inicial e direciona a escolha para soluções capazes de conservar sua integridade e funcionalidade ao longo do tempo.

A escolha de materiais também deve incorporar uma perspectiva ambiental que considere as diferentes etapas do ciclo de vida dos componentes. Em luminárias externas, a avaliação não se limita ao período de funcionamento, pois fabricação, utilização, manutenção, substituição e destinação final participam dos impactos associados ao sistema. A incorporação de princípios de economia circular amplia essa análise ao valorizar durabilidade, aproveitamento dos recursos e possibilidades de recuperação dos materiais, favorecendo soluções que conciliem desempenho técnico e redução das consequências ambientais decorrentes da infraestrutura de iluminação pública (Lozano-Miralles et al., 2020).

Dessa maneira, a seleção destinada às condições amazônicas deve combinar resistência à corrosão, estabilidade térmica, proteção contra umidade, resistência à radiação ultravioleta, durabilidade e facilidade de manutenção com critérios de eficiência energética e sustentabilidade. A decisão mais adequada não corresponde necessariamente ao material de menor custo inicial, mas àquele capaz de oferecer desempenho satisfatório durante maior período de utilização e menor necessidade de substituição. Essa abordagem

permite estruturar sistemas mais resilientes, reduzir intervenções corretivas e geração de resíduos e ampliar a confiabilidade da iluminação pública diante das particularidades ambientais da Amazônia.

4 METODOLOGIA

O presente estudo foi desenvolvido como uma pesquisa aplicada, de caráter exploratório e descritivo, com abordagem qualitativa e quantitativa, orientada à análise dos critérios técnicos e ambientais para a seleção de materiais empregados em sistemas de iluminação pública submetidos às condições climáticas da Amazônia. A natureza aplicada fundamentou-se na busca por soluções para um problema concreto, relacionado à durabilidade, à resistência e à adequação dos componentes utilizados na infraestrutura de iluminação pública. O caráter exploratório possibilitou aprofundar a compreensão das relações entre propriedades dos materiais, condições ambientais e mecanismos de degradação, enquanto a dimensão descritiva permitiu caracterizar os componentes, os requisitos técnicos e os fatores que interferem em seu desempenho operacional. Conforme Gil (2022), as pesquisas exploratórias favorecem a familiaridade com o problema investigado, enquanto as descritivas permitem identificar e caracterizar propriedades e relações pertinentes ao objeto de estudo.

Quanto à abordagem metodológica, a investigação articulou procedimentos qualitativos e quantitativos, considerando a necessidade de interpretar as características dos materiais e examinar indicadores técnicos relacionados ao desempenho dos sistemas de iluminação pública. A dimensão qualitativa concentrou-se na análise das propriedades físicas, químicas e mecânicas dos componentes, especialmente quanto à resistência à corrosão, ao comportamento térmico, à exposição à umidade, à radiação ultravioleta e à durabilidade. A dimensão quantitativa esteve relacionada à avaliação de indicadores mensuráveis, como potência elétrica, consumo de energia, eficiência energética e estimativas de custos operacionais, conforme os dados apresentados nos resultados. Essa combinação permitiu relacionar evidências técnicas e informações numéricas, ampliando a compreensão do problema investigado. Segundo Creswell e Creswell (2018), a integração de abordagens qualitativas e quantitativas pode proporcionar uma compreensão mais abrangente dos fenômenos, desde que os procedimentos de coleta, análise e integração dos dados sejam claramente definidos.

Em relação aos procedimentos técnicos, a investigação fundamentou-se em pesquisa bibliográfica e documental, utilizadas para reunir conhecimentos científicos e informações normativas sobre materiais, sistemas de iluminação pública e condições ambientais da região amazônica. A pesquisa bibliográfica contemplou livros, artigos científicos, dissertações, teses e publicações técnicas relacionadas à eficiência energética, às propriedades dos materiais, aos mecanismos de degradação e à durabilidade dos equipamentos. A pesquisa documental, por sua vez, abrangeu normas técnicas, especificações de fabricantes, regulamentos e documentos institucionais pertinentes aos componentes analisados. A seleção

das fontes considerou sua pertinência temática, consistência técnica e contribuição para os objetivos da investigação. De acordo com Marconi e Lakatos (2021), a pesquisa bibliográfica permite examinar contribuições científicas existentes, enquanto a análise documental possibilita utilizar registros e documentos como fontes de informações relevantes para a investigação.

Como estratégia de investigação, adotou-se o estudo de caso, tendo como referência os sistemas de iluminação pública localizados no bairro Tancredo Neves, em Manaus, Amazonas. A escolha desse contexto permitiu relacionar os fundamentos teóricos às condições de aplicação dos equipamentos em ambiente amazônico, considerando as particularidades climáticas e operacionais da região. A análise contemplou componentes como luminárias, invólucros, postes, braços de sustentação, cabos, conectores, fixadores e elementos de vedação, observando suas funções, propriedades e requisitos de resistência ambiental. O estudo também considerou os aspectos técnicos relacionados ao desempenho das tecnologias de iluminação examinadas. Conforme Yin (2018), o estudo de caso constitui uma estratégia apropriada para investigar fenômenos contemporâneos em seus contextos reais, especialmente quando as relações entre o fenômeno e o ambiente apresentam múltiplas variáveis e exigem a utilização de diferentes fontes de evidência.

O tratamento das informações foi estruturado por meio de análise descritiva e comparativa, considerando critérios previamente relacionados aos objetivos da investigação. Na avaliação dos materiais, foram examinadas características como resistência à corrosão, estabilidade térmica, resistência mecânica, comportamento diante da umidade e da radiação ultravioleta, durabilidade, necessidade de manutenção e aspectos de sustentabilidade. A comparação permitiu identificar vantagens, limitações e condições de adequação dos diferentes materiais empregados na infraestrutura de iluminação pública. Paralelamente, os indicadores quantitativos foram examinados por meio da comparação entre tecnologias de iluminação, considerando dados de potência, consumo energético, economia estimada e viabilidade econômica, conforme as informações disponíveis no estudo. Essa organização possibilitou relacionar os requisitos de seleção dos materiais aos aspectos operacionais e ambientais dos sistemas, mantendo a interpretação dos resultados vinculada às evidências obtidas. A utilização de diferentes fontes e procedimentos de análise contribuiu para a consistência da investigação, em conformidade com as orientações metodológicas de Yin (2018) e Creswell e Creswell (2018).

Por fim, os resultados da pesquisa bibliográfica, documental e do estudo de caso foram sistematizados e interpretados de maneira integrada, buscando identificar relações entre as condições ambientais amazônicas, as propriedades dos materiais, os mecanismos de degradação e os indicadores de desempenho dos sistemas de iluminação pública. A análise permitiu estabelecer critérios técnicos e ambientais para subsidiar a escolha de componentes mais adequados às exigências de operação da região, considerando resistência, durabilidade, eficiência energética, custos de manutenção e sustentabilidade. As conclusões foram delimitadas pelas características do contexto investigado e pelas evidências disponíveis,

sem pretensão de generalização estatística para todos os sistemas de iluminação pública da Amazônia. Dessa maneira, o percurso metodológico forneceu subsídios para a proposição de recomendações técnicas voltadas à melhoria da seleção de materiais e ao aprimoramento da confiabilidade e da resiliência da infraestrutura de iluminação pública regional.

4.1 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

A pesquisa foi delimitada ao estudo dos materiais empregados nos principais componentes dos sistemas de iluminação pública, considerando sua aplicação em condições ambientais compatíveis com as características climáticas da região amazônica. A investigação concentrou-se na análise de produções científicas relacionadas a luminárias, invólucros, postes, braços, suportes, cabos, conectores, elementos de fixação, componentes ópticos e sistemas de vedação, buscando compreender de que maneira suas propriedades influenciaram a resistência, a durabilidade, a confiabilidade e a vida útil da infraestrutura. Essa delimitação permitiu estabelecer limites coerentes com o problema e os objetivos definidos para a investigação (Gil, 2022).

A delimitação temática também considerou os principais agentes ambientais identificados na literatura como relevantes para o desempenho de materiais permanentemente expostos ao ambiente externo. Nesse sentido, foram priorizados estudos relacionados à umidade, precipitação, temperaturas elevadas, radiação ultravioleta e processos corrosivos, estabelecendo relações entre essas condições e os mecanismos de degradação dos componentes. Também foram considerados aspectos relacionados ao comportamento térmico das luminárias LED, tendo em vista a influência da temperatura sobre sua confiabilidade e desempenho. Essa delimitação direcionou a revisão para fatores diretamente relacionados à seleção de materiais destinados às condições amazônicas. (Ashby, M. F. 2017).

4.2 SELEÇÃO E ORGANIZAÇÃO DAS FONTES BIBLIOGRÁFICAS

O levantamento bibliográfico foi direcionado à identificação de livros, artigos científicos, trabalhos acadêmicos e publicações técnicas relacionadas aos sistemas de iluminação pública, aos materiais utilizados em seus componentes, aos mecanismos de degradação, à eficiência energética, à durabilidade e à sustentabilidade. A seleção das publicações considerou sua pertinência em relação ao problema e aos objetivos estabelecidos, priorizando fontes capazes de fornecer fundamentos para compreender o comportamento dos materiais diante das condições de exposição ambiental e os requisitos associados ao desempenho da infraestrutura. A pesquisa bibliográfica permitiu, assim, reunir conhecimentos previamente produzidos e relevantes para a análise proposta (Marconi & Lakatos, 2021).

Após o levantamento, as fontes selecionadas foram organizadas de acordo com os principais eixos temáticos da pesquisa: sistemas e componentes de iluminação pública; condições ambientais amazônicas;

materiais empregados; mecanismos de degradação; durabilidade e manutenção; eficiência energética; e sustentabilidade. Essa organização permitiu sistematizar as informações identificadas e estabelecer relações entre os diferentes referenciais consultados, favorecendo uma interpretação articulada do objeto investigado. O procedimento também possibilitou estruturar a fundamentação necessária à comparação dos materiais, mantendo correspondência entre as categorias analisadas, os objetivos da investigação e as evidências disponíveis na literatura científica (Creswell & Creswell, 2018).

4.3 CONDIÇÕES AMBIENTAIS CONSIDERADAS NA PESQUISA

Para o desenvolvimento da análise bibliográfica, foram consideradas como principais condições ambientais a elevada umidade, as temperaturas características do clima amazônico, as precipitações frequentes e a exposição à radiação solar. Esses fatores foram selecionados em razão de sua relação com os mecanismos de degradação discutidos na literatura consultada. A exposição prolongada a tais condições foi analisada quanto às exigências impostas aos componentes metálicos, materiais poliméricos, revestimentos, sistemas ópticos, conexões elétricas e elementos de vedação, permitindo incorporar a resistência ambiental como dimensão relevante para a seleção de materiais e para a durabilidade da infraestrutura de iluminação pública. Roberge, P. R. (2008).

A análise considerou ainda que os diferentes agentes ambientais poderiam atuar simultaneamente sobre os componentes da iluminação pública. A presença de umidade e precipitação foi relacionada aos processos corrosivos e à necessidade de proteção contra a entrada de água, enquanto as temperaturas elevadas foram associadas às exigências de gerenciamento térmico das luminárias LED. A exposição prolongada à radiação solar também foi considerada na avaliação de materiais poliméricos, revestimentos e elementos ópticos. Dessa maneira, as evidências bibliográficas foram interpretadas considerando a interação entre condições ambientais, propriedades dos materiais, mecanismos de deterioração e desempenho esperado dos componentes.

4.4 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO DE CASO E ORIGEM DOS DADOS DOS 100 PONTOS DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA

A investigação considerou como referência espacial o bairro Tancredo Neves, localizado em Manaus, Amazonas, adotando um cenário comparativo composto por 100 pontos de iluminação pública. A análise contemplou três tecnologias: vapor de sódio de 70 W, vapor metálico de 150 W e LED de 45 W. Os dados técnicos relativos às potências nominais foram utilizados para comparar o desempenho energético potencial das alternativas, enquanto as informações bibliográficas e documentais subsidiaram a avaliação das propriedades dos materiais, dos mecanismos de degradação e dos requisitos de resistência ambiental. O tratamento quantitativo foi estruturado por meio de cálculos comparativos de potência e estimativas de

consumo, economia financeira e emissões de dióxido de carbono. A abordagem foi articulada à pesquisa bibliográfica e documental, permitindo relacionar os resultados estimados às exigências de durabilidade e confiabilidade dos sistemas de iluminação pública nas condições amazônicas. Conforme Yin (2018), a investigação de fenômenos em contextos específicos exige a delimitação clara da unidade de análise e a identificação das fontes de evidência utilizadas.

A análise dos 100 pontos foi estruturada considerando a quantidade de unidades, as potências nominais das tecnologias e os indicadores energéticos e econômicos apresentados na pesquisa. Os procedimentos comparativos envolveram a determinação das diferenças percentuais de potência nominal e a estimativa dos efeitos associados à substituição das tecnologias convencionais por luminárias LED. A avaliação ambiental considerou a redução potencial das emissões de CO_2 associada à economia projetada de energia elétrica. Paralelamente, as informações sobre resistência à corrosão, estabilidade térmica, proteção contra umidade e durabilidade foram examinadas com base na literatura científica, nas normas técnicas e nas especificações documentais utilizadas. A interpretação dos resultados distinguiu as estimativas quantitativas das propriedades dos materiais identificadas em fontes bibliográficas, reconhecendo que a comparação de potências nominais não constitui, isoladamente, comprovação de economia efetiva de energia ou de maior vida útil dos equipamentos.

4.5 CRITÉRIOS PARA ANÁLISE COMPARATIVA DOS MATERIAIS

A análise comparativa dos materiais foi realizada a partir de critérios estabelecidos com base nas informações identificadas na literatura científica e documental selecionada. Para os diferentes componentes dos sistemas de iluminação pública, foram considerados resistência à corrosão, resistência à umidade e à precipitação, estabilidade térmica, resistência à radiação ultravioleta, resistência mecânica, durabilidade, vida útil, necessidade de manutenção, adequação funcional, eficiência e sustentabilidade. A utilização de categorias previamente estabelecidas possibilitou organizar as informações de maneira sistemática e comparar as alternativas segundo parâmetros compatíveis com o problema investigado e com os objetivos definidos para a pesquisa (Gil, 2022).

A análise comparativa estabeleceu relações entre as propriedades físicas, químicas e mecânicas dos materiais, suas funções nos componentes dos sistemas de iluminação pública e as exigências decorrentes das condições ambientais amazônicas. A investigação fundamentou-se na sistematização de informações bibliográficas, documentais e técnicas, articuladas aos dados considerados no estudo de caso realizado no bairro Tancredo Neves, em Manaus, Amazonas. Não foram realizados ensaios laboratoriais específicos para determinar a resistência dos materiais à corrosão, à umidade, à radiação ultravioleta ou às variações térmicas. Entretanto, a análise contemplou os dados referentes aos 100 pontos de iluminação pública considerados na investigação, distinguindo os indicadores quantitativos de desempenho energético e

luminotécnico das informações sobre as propriedades dos materiais obtidas em fontes técnicas e científicas. Essa distinção permitiu estabelecer relações entre os fundamentos teóricos e o contexto investigado, respeitando os limites metodológicos do estudo de caso e evitando generalizações não sustentadas pelas evidências disponíveis. Conforme Yin (2018), a utilização de diferentes fontes de evidência contribui para a compreensão contextualizada do fenômeno investigado e para a consistência das interpretações realizadas.

Com base nesse procedimento, foram identificadas propriedades consideradas relevantes para a resistência, a durabilidade e a confiabilidade dos componentes, permitindo estruturar critérios técnicos e ambientais destinados a subsidiar a seleção de materiais para sistemas de iluminação pública em condições amazônicas. A comparação considerou que a adequação de determinado material depende de sua função, das condições de exposição e dos requisitos operacionais, não sendo possível estabelecer uma alternativa universalmente superior para todos os componentes. Nesse contexto, a resistência à corrosão, a estabilidade térmica, a resistência mecânica e a conservação das propriedades ao longo do tempo foram examinadas como parâmetros de seleção. Segundo Roberge (2008), a compreensão dos mecanismos corrosivos e das estratégias de proteção constitui um aspecto fundamental para a preservação da integridade dos materiais metálicos e para a redução dos efeitos associados à sua deterioração. Assim, a avaliação priorizou a compatibilidade entre as propriedades dos materiais e as condições ambientais de utilização, considerando suas implicações para a manutenção e a vida útil dos equipamentos.

Complementarmente, foram incorporados à análise critérios ambientais e operacionais relacionados à reciclabilidade, à necessidade de manutenção, à frequência potencial de substituição, à geração de resíduos e aos custos associados ao ciclo de vida dos componentes. Essa abordagem possibilitou ampliar a avaliação para além do investimento inicial, considerando que materiais de menor custo de aquisição podem apresentar desvantagens econômicas e ambientais quando associados à menor durabilidade ou à necessidade frequente de intervenções corretivas. Nesse sentido, a norma ISO 14040:2006 estabelece princípios e uma estrutura metodológica para a avaliação do ciclo de vida, contribuindo para a compreensão dos impactos ambientais associados às diferentes etapas de utilização de produtos e materiais. Embora não tenha sido realizada uma avaliação completa do ciclo de vida, seus princípios foram considerados na definição dos critérios ambientais adotados. Dessa maneira, a análise comparativa forneceu subsídios para identificar alternativas potencialmente mais adequadas às exigências da infraestrutura de iluminação pública amazônica, conciliando desempenho técnico, durabilidade, racionalidade econômica e sustentabilidade ambiental (ISO, 2006).

Tabela 1 - Comparação do consumo energético das tecnologias de iluminação pública.

COMPARAÇÃO DO CONSUMO ENERGÉTICO DAS TECNOLOGIAS DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA			
TECNOLOGIA	**POTÊNCIA NOMINAL**	**REFERÊNCIA DE COMPARAÇÃO**	**REDUÇÃO DE CONSUMO COM LED**
VAPOR DE SÓDIO	70 W	LED EM RELAÇÃO AO VAPOR DE SÓDIO	35,70%
VAPOR METÁLICO	150 W	LED EM RELAÇÃO AO VAPOR METÁLICO	70,00%
LED	45 W	TECNOLOGIA PROPOSTA	—

Fonte: elaborado pelo próprio autor (2026), com base nos dados da pesquisa.

A Tabela 1 apresenta a análise comparativa das potências nominais das tecnologias de iluminação pública de vapor de sódio, vapor metálico e LED, considerando equipamentos de 70 W, 150 W e 45 W, respectivamente. A comparação demonstrou que a luminária LED apresentou uma redução de potência nominal de 35,7% em relação à tecnologia de vapor de sódio e de 70,0% em comparação à de vapor metálico, calculada pela diferença percentual entre as potências consideradas. Esses resultados indicam o potencial de redução da demanda elétrica mediante a substituição das tecnologias convencionais por equipamentos LED. Entretanto, ressalta-se que a potência nominal, isoladamente, não permite determinar o consumo real de energia elétrica, uma vez que este depende do tempo efetivo de funcionamento, das perdas nos dispositivos auxiliares e das condições operacionais dos equipamentos. Dessa forma, os percentuais apresentados representam reduções teóricas de potência, que poderiam corresponder a reduções proporcionais no consumo energético sob condições equivalentes de funcionamento, desconsiderando as perdas adicionais dos sistemas. Para uma avaliação mais precisa da eficiência energética, torna-se necessário considerar a potência total absorvida, as horas de operação e os requisitos luminotécnicos atendidos por cada tecnologia.

Os resultados demonstrados no quadro reforçam que a eficiência energética constitui um critério relevante para a modernização da iluminação pública, porém sua análise deve permanecer integrada aos demais objetivos deste estudo. No contexto amazônico, a menor demanda energética precisa estar associada à resistência e à durabilidade dos materiais utilizados nas luminárias, considerando sua exposição contínua à umidade, precipitação, temperaturas elevadas e radiação solar. Dessa maneira, a adoção do LED torna-se mais consistente quando o ganho energético é acompanhado pela adequada seleção de materiais, contribuindo para maior vida útil, menor necessidade de manutenção e maior resiliência da infraestrutura.

Tabela 2 - Matriz de critérios para análise.

Componente	Critérios principais	Condição ambiental relacionada	Aspecto analisado
Luminária/invólucro	Corrosão e dissipação térmica	Umidade e temperatura	Resistência e vida útil
Postes e braços	Corrosão e resistência mecânica	Chuva e umidade	Integridade estrutural
Cabos	Isolamento e estabilidade	Umidade e temperatura	Segurança e durabilidade
Conectores	Vedação e resistência à oxidação	Umidade e precipitação	Confiabilidade elétrica
Lentes/polímeros	Resistência térmica e UV	Calor e radiação solar	Conservação das propriedades
Vedações	Estanqueidade e estabilidade	Chuva, umidade e calor	Proteção dos componentes
Fixadores	Resistência à corrosão	Umidade e precipitação	Integridade das conexões

Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2026).

A Tabela 2 apresenta a matriz de critérios técnicos e ambientais utilizada para sistematizar a avaliação dos materiais empregados nos principais componentes dos sistemas de iluminação pública, considerando suas funções, propriedades e condições de exposição no ambiente amazônico. A análise contemplou luminárias, postes, braços de sustentação, cabos, conectores, lentes, elementos de vedação e fixadores, relacionando os requisitos de desempenho aos mecanismos de degradação potencialmente associados às condições climáticas regionais. Os critérios considerados compreenderam resistência à corrosão, capacidade de dissipação térmica, estabilidade dimensional, resistência mecânica, proteção contra ingresso de água e resistência ao envelhecimento ambiental. A definição desses parâmetros foi fundamentada em requisitos técnicos de proteção dos invólucros, avaliação da corrosividade atmosférica e segurança dos equipamentos de iluminação, conforme estabelecido pelas normas IEC 60529, ISO 9223 e IEC 60598-2-3. Dessa forma, a matriz constituiu um instrumento de organização e comparação das propriedades dos materiais, permitindo identificar requisitos relevantes para a confiabilidade e a durabilidade dos componentes, sem atribuir desempenho experimental a materiais que não foram submetidos a ensaios específicos (IEC, 1989; ISO, 2012; IEC, 2011).

A interpretação da matriz considerou a pertinência de cada critério à função desempenhada pelo componente, reconhecendo que diferentes materiais apresentam exigências específicas de resistência, proteção e desempenho. Assim, a resistência à corrosão assumiu maior relevância para elementos metálicos expostos às condições atmosféricas, enquanto a dissipação térmica foi considerada especialmente importante para os corpos e dissipadores de luminárias LED. Nos componentes ópticos e elementos de vedação, destacaram-se a estabilidade dos materiais, a resistência ao envelhecimento e a proteção contra a entrada de água. A classificação da adequação dos materiais, quando apresentada na matriz, deve estar vinculada a parâmetros técnicos verificáveis, como especificações de fabricantes, requisitos normativos e resultados de estudos científicos, evitando atribuições subjetivas de desempenho. Nesse sentido, a Tabela 2 contribui para fundamentar a seleção de materiais de maneira sistemática, considerando a compatibilidade

entre propriedades técnicas, condições ambientais e necessidades operacionais da infraestrutura de iluminação pública amazônica.

4.6 ANÁLISE ENERGÉTICA ASSOCIADA À SELEÇÃO DE MATERIAIS

A eficiência energética constitui um dos aspectos relevantes na avaliação de sistemas de iluminação pública, especialmente diante da necessidade de conciliar desempenho luminoso, consumo de energia e condições adequadas de operação. Estudos sobre sistemas viários demonstram que a tecnologia LED apresenta possibilidades de melhoria do desempenho energético quando adequadamente dimensionada e aplicada às características do sistema de iluminação. Nesse contexto, a avaliação não deve se limitar à potência instalada, devendo considerar também aspectos relacionados à qualidade da iluminação, às condições operacionais e ao desempenho esperado ao longo do período de utilização (Yoomak & Ngaopitakkul, 2018).

Sob a perspectiva desta pesquisa, a eficiência energética também deve ser relacionada às características construtivas e à durabilidade dos componentes que constituem as luminárias. A conservação do desempenho ao longo da vida útil depende das condições às quais os componentes permanecem expostos e da capacidade do sistema de manter características adequadas de funcionamento. A avaliação do ciclo de vida de luminárias evidencia que aspectos relacionados à fabricação, utilização, consumo energético, durabilidade e substituição dos equipamentos precisam ser considerados conjuntamente na análise de soluções para iluminação pública (Tähkämö & Halonen, 2015).

Nas luminárias LED, o gerenciamento térmico assume importância particular, uma vez que as condições de temperatura influenciam o funcionamento e a confiabilidade desses sistemas. Ashby, M. F. (2017) destacam a relevância do gerenciamento térmico em luminárias LED, demonstrando a necessidade de dissipação adequada do calor gerado durante sua operação. Dessa maneira, a seleção de materiais empregados no corpo da luminária e nos elementos relacionados à dissipação térmica deve considerar propriedades capazes de favorecer condições adequadas de funcionamento e contribuir para a conservação do desempenho do equipamento.

Assim, a análise bibliográfica adotada neste estudo considera que eficiência energética, durabilidade e seleção de materiais são aspectos interdependentes. Uma solução tecnologicamente eficiente deve apresentar características construtivas compatíveis com as condições de utilização e exposição ambiental, evitando que processos de degradação comprometam prematuramente seu desempenho. Essa perspectiva permite incorporar à seleção dos materiais critérios relacionados não apenas à eficiência, mas também à resistência, manutenção, vida útil e sustentabilidade do sistema.

4.7 SÍNTESE DOS PROCEDIMENTOS DE ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA

A análise bibliográfica foi desenvolvida por meio da sistematização e integração das informações provenientes das fontes científicas e técnicas selecionadas, considerando as funções dos componentes dos sistemas de iluminação pública, as propriedades dos materiais e os fatores associados à sua durabilidade. O procedimento possibilitou relacionar características técnicas e condições operacionais aos aspectos de desempenho, manutenção, consumo de recursos e sustentabilidade. Foram examinados materiais empregados em invólucros, estruturas de sustentação, sistemas ópticos, conexões elétricas, elementos de vedação e dispositivos de dissipação térmica, considerando sua resistência à corrosão, estabilidade térmica, resistência mecânica e comportamento diante da umidade e da radiação solar. Essa sistematização permitiu identificar os principais mecanismos de degradação e estabelecer relações entre as propriedades dos materiais e as exigências ambientais da região amazônica. Nesse contexto, os princípios da avaliação do ciclo de vida contribuíram para ampliar a compreensão das implicações ambientais associadas à durabilidade, à manutenção e à substituição dos componentes, conforme as diretrizes estabelecidas pela ISO 14040:2006 (ISO, 2006).

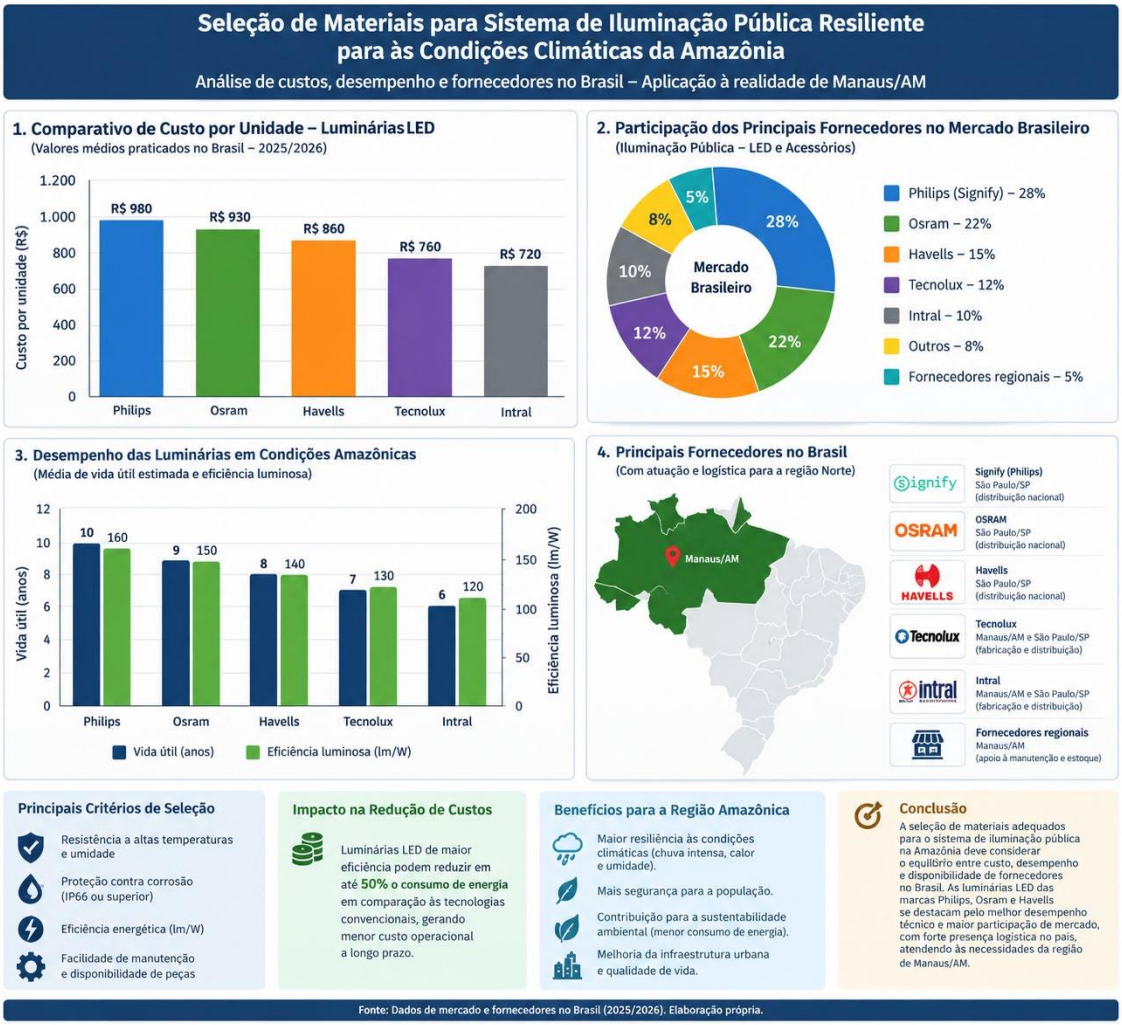
A comparação dos materiais foi realizada com base em critérios técnicos, ambientais e funcionais previamente definidos, contemplando resistência, durabilidade, vida útil, necessidade de manutenção, eficiência operacional, potencial de reciclabilidade e possíveis impactos ambientais. As informações foram organizadas de acordo com os grupos de componentes e suas respectivas condições de aplicação, permitindo identificar vantagens, limitações e requisitos de adequação às características climáticas da Amazônia. A análise não teve como finalidade determinar um material universalmente superior, mas estabelecer parâmetros que fundamentassem escolhas compatíveis com as exigências de desempenho, segurança e confiabilidade dos sistemas de iluminação pública. Conforme Yin (2018), a integração de diferentes fontes de evidência contribui para a consistência das interpretações desenvolvidas em estudos de caso. Dessa maneira, a sistematização bibliográfica e documental forneceu subsídios para a proposição de critérios de seleção de materiais, considerando sua compatibilidade com as condições ambientais, a racionalidade econômica e a sustentabilidade da infraestrutura de iluminação pública amazônica.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos evidenciaram que a seleção de materiais para sistemas de iluminação pública destinados às condições amazônicas não deve ser orientada exclusivamente pela eficiência energética ou pelo custo inicial dos equipamentos. A análise integrada demonstrou que elevada umidade, precipitações frequentes, temperaturas elevadas e exposição contínua à radiação solar constituem condições relevantes para a durabilidade dos diferentes componentes. Esses fatores atuam sobre luminárias, postes, braços, suportes, cabos, conectores, fixadores, componentes ópticos e sistemas de vedação, exigindo materiais

compatíveis com as particularidades do ambiente de instalação. Dessa forma, resistência ambiental, estabilidade e vida útil mostraram-se critérios indispensáveis à especificação da infraestrutura.

Figura 6 – Análise comparativa de custos e critérios de desempenho de luminárias LED para iluminação pública.



Fonte: Elaboração própria (2026), com base nas informações técnicas e comerciais dos fornecedores consultados no período de 2025 a 2026.

A Figura 6 apresenta uma análise comparativa dos aspectos econômicos e técnicos relacionados à seleção de luminárias LED para sistemas de iluminação pública, considerando sua aplicação nas condições ambientais de Manaus, Amazonas. A avaliação contemplou critérios como custo de aquisição, potência nominal, eficiência luminosa, durabilidade, resistência ambiental e requisitos de manutenção, buscando identificar fatores relevantes para a escolha dos equipamentos. Nesse contexto, a análise considerou que o menor preço inicial não representa necessariamente a alternativa mais vantajosa, uma vez que a viabilidade econômica depende também do consumo energético, da vida útil efetiva e das despesas operacionais. Conforme a Illuminating Engineering Society (IES, 2018), a estimativa da vida útil dos produtos LED deve

considerar diferentes mecanismos de falha, não se restringindo à manutenção do fluxo luminoso, o que reforça a importância de uma avaliação técnica abrangente.

A interpretação dos dados apresentados na Figura 6 evidencia a necessidade de relacionar as características dos equipamentos às exigências ambientais da região amazônica, especialmente quanto à proteção contra umidade, ao gerenciamento térmico e à resistência dos materiais empregados. A norma IEC 60529 estabelece critérios para a classificação dos graus de proteção dos invólucros contra o ingresso de água e corpos sólidos, enquanto a IEC 60598-2-3 contempla requisitos específicos aplicáveis às luminárias destinadas à iluminação pública. Dessa maneira, a seleção de fornecedores deve considerar a documentação técnica dos produtos, a compatibilidade com as condições de instalação e os custos estimados ao longo do período de utilização. Essa abordagem contribui para fundamentar decisões de aquisição orientadas pela confiabilidade, eficiência energética e sustentabilidade, sem pressupor que os equipamentos analisados apresentem desempenho idêntico em condições reais de operação (IEC, 1989; IEC, 2011).

Figura 7 – Análise comparativa dos custos de luminárias LED para iluminação pública no Amazonas e no Brasil.



Fonte: Elaboração própria (2026), com base em referências do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI/CAIXA–IBGE) e nos requisitos de conformidade do Inmetro, estabelecidos pela Portaria nº 62/2022.

A Figura 7 apresenta uma análise comparativa dos custos de referência de luminárias LED destinadas à iluminação pública, considerando as diferenças regionais de preços e sua relação com os critérios técnicos de seleção de equipamentos para Manaus, Amazonas. Como referência compatível com a luminária de 45 W considerada neste estudo, identificou-se a composição SINAPI nº 101654, referente ao fornecimento e à instalação de luminárias LED com potência entre 33 W e 50 W. Em setembro de 2026, os valores divulgados em consulta secundária à base SINAPI, no regime desonerado, corresponderam a R$ 261,39 por unidade no Amazonas e R$ 205,22 para a média aritmética das unidades federativas,

representando uma diferença de aproximadamente 27,4%. Esses resultados indicam uma diferença regional de custo para a composição considerada, sem permitir sua generalização para todas as categorias de luminárias ou períodos de referência. Ressalta-se, ainda, que os valores correspondem ao serviço de fornecimento e instalação, não exclusivamente ao preço de aquisição do equipamento.

A interpretação econômica dessa diferença evidencia a importância de considerar, além do investimento inicial, as características técnicas e as condições operacionais dos equipamentos. Para sua aplicação na região amazônica, destacam-se requisitos relacionados à proteção contra umidade e poeira, à dissipação térmica, à resistência à corrosão e à confiabilidade dos componentes. Nesse contexto, a Portaria Inmetro nº 62/2022 estabelece requisitos de avaliação da conformidade para luminárias destinadas à iluminação pública viária, constituindo uma referência relevante para a verificação da regularidade dos produtos comercializados. Entretanto, o atendimento aos requisitos regulamentares não comprova, isoladamente, maior durabilidade em todas as condições ambientais. Dessa maneira, a seleção de luminárias deve articular conformidade técnica, especificações dos materiais, desempenho luminotécnico, custos de manutenção e vida útil prevista, permitindo uma avaliação mais consistente da viabilidade econômica e ambiental dos sistemas de iluminação pública em Manaus (INMETRO, 2022).

A análise dos componentes metálicos demonstrou que a resistência à corrosão representa um dos principais critérios para postes, braços, suportes, fixadores e partes estruturais das luminárias. A presença recorrente de umidade e precipitação pode aumentar a vulnerabilidade desses elementos quando os materiais e sistemas de proteção empregados não apresentam características compatíveis com a exposição ambiental. Nesse sentido, a escolha de metais resistentes, associada à utilização adequada de revestimentos e tratamentos superficiais, constitui estratégia relevante para preservar a integridade estrutural. Os resultados reforçam, portanto, que a durabilidade deve ser avaliada em função da interação entre material, proteção superficial, ambiente e período esperado de utilização do componente.

Em relação às luminárias LED, os resultados indicaram que o gerenciamento térmico constitui outro aspecto determinante para a confiabilidade do sistema. A temperatura de operação interfere no comportamento dos componentes eletrônicos e torna necessária a utilização de soluções capazes de favorecer a transferência e a dissipação do calor. Nesse contexto, materiais empregados no corpo e nos dissipadores das luminárias assumem função que ultrapassa a resistência mecânica, participando diretamente do controle térmico do equipamento. Essa constatação está de acordo com Iaronka et al. (2015), que destacam a relevância do gerenciamento térmico para o desempenho das luminárias LED. Assim, eficiência energética e estabilidade térmica devem ser analisadas conjuntamente na especificação dos equipamentos.

Para componentes poliméricos, elementos ópticos e sistemas de vedação, a análise apontou a necessidade de considerar simultaneamente resistência à umidade, temperatura e radiação ultravioleta.

Lentes, difusores, revestimentos e materiais de vedação podem sofrer alterações progressivas quando submetidos continuamente às condições ambientais, comprometendo transparência, estanqueidade e proteção das partes internas. Consequentemente, a seleção desses materiais deve priorizar a conservação de suas propriedades durante a vida útil prevista e não apenas seu desempenho inicial. Essa perspectiva é particularmente relevante porque uma falha localizada na vedação ou proteção óptica pode permitir a entrada de umidade e desencadear deteriorações em outros componentes, comprometendo a confiabilidade global da luminária.

A matriz de critérios desenvolvida no estudo permitiu relacionar cada grupo de componentes às principais condições ambientais e aos aspectos técnicos considerados prioritários. Para luminárias e invólucros, destacaram-se corrosão e dissipação térmica; para postes e braços, resistência à corrosão e resistência mecânica; para cabos, estabilidade do isolamento; para conectores, vedação e resistência à oxidação; para lentes e polímeros, estabilidade térmica e resistência à radiação ultravioleta; e, para vedações e fixadores, estanqueidade e resistência à corrosão. Essa sistematização demonstra que não existe um único critério capaz de determinar a adequação de todos os materiais, sendo necessário considerar a função desempenhada por cada componente e sua condição específica de exposição.

A análise dos indicadores energéticos referentes ao cenário de 100 pontos de iluminação pública evidenciou o potencial de utilização da tecnologia LED como alternativa às soluções convencionais consideradas no estudo. A comparação entre as potências nominais demonstrou que a luminária LED de 45 W apresentou redução de 35,7% em relação à lâmpada de vapor de sódio de 70 W e de 70,0% em comparação à de vapor metálico de 150 W. Esses percentuais representam diferenças de potência nominal, não medições diretas do consumo energético real, que depende das horas de funcionamento e das características elétricas dos equipamentos. A avaliação econômica apresentou economia financeira anual estimada em R$ 28.897,50 e período de retorno do investimento de aproximadamente 19,5 meses, conforme as premissas adotadas no estudo. Tais indicadores sugerem a viabilidade potencial da modernização tecnológica, embora sua confirmação dependa da consistência dos dados de consumo, das tarifas consideradas, dos custos de instalação e das condições efetivas de operação.

Sob a perspectiva ambiental, a pesquisa apresentou uma estimativa de redução anual de 8.847 kg de CO_2 associada à diminuição projetada do consumo de eletricidade. Entretanto, a validade desse resultado depende da identificação do fator de emissão utilizado, do período de referência e da memória de cálculo correspondente. A análise também evidenciou que os benefícios ambientais da modernização não devem ser associados exclusivamente à eficiência energética, uma vez que a durabilidade dos componentes influencia a frequência de substituições, a demanda por materiais e a geração de resíduos. Essa interpretação está alinhada aos princípios da avaliação do ciclo de vida estabelecidos pela ISO 14040 (ISO, 2006), segundo os quais os impactos ambientais devem ser examinados considerando diferentes etapas do ciclo de

vida dos produtos. Assim, os resultados reforçam a importância de integrar critérios energéticos, econômicos e ambientais à seleção de equipamentos, respeitando os limites dos dados disponíveis e das estimativas realizadas.

6 CONCLUSÃO

A presente pesquisa teve como objetivo analisar critérios técnicos e ambientais para a seleção de materiais destinados a sistemas de iluminação pública resilientes às condições climáticas da Amazônia. Os resultados permitiram compreender que a adequação dos componentes depende da relação entre suas propriedades, funções e condições de exposição, não sendo suficiente considerar isoladamente o custo de aquisição ou a eficiência energética. A análise bibliográfica e documental identificou requisitos relevantes para a preservação da integridade estrutural e funcional dos equipamentos, incluindo resistência à corrosão, estabilidade térmica, proteção contra umidade, resistência mecânica e conservação das propriedades dos materiais ao longo de sua utilização. Dessa forma, constatou-se que a seleção deve ser fundamentada em critérios específicos para cada grupo de componentes, considerando as exigências ambientais e operacionais da região.

A matriz de critérios desenvolvida constituiu uma das principais contribuições da investigação, ao organizar parâmetros técnicos e ambientais capazes de subsidiar decisões de especificação de materiais para a infraestrutura de iluminação pública. Sua aplicação conceitual permitiu reconhecer que diferentes componentes exigem soluções compatíveis com suas funções e condições de exposição, não sendo possível estabelecer um material universalmente superior. Paralelamente, a comparação energética e econômica indicou benefícios potenciais associados à adoção da tecnologia LED no cenário analisado, reforçando a necessidade de conciliar eficiência operacional, durabilidade e custos ao longo da vida útil dos sistemas. Nesse sentido, a pesquisa contribuiu para uma abordagem de seleção de materiais orientada não apenas pelo desempenho inicial, mas também pela confiabilidade e pela sustentabilidade da infraestrutura.

Considera-se, portanto, que os objetivos propostos foram atendidos no âmbito das análises bibliográfica, documental e comparativa realizadas, mediante a identificação dos principais fatores ambientais associados à degradação, a caracterização dos requisitos de desempenho dos materiais e a sistematização de critérios técnicos para sua seleção. Como limitação, destaca-se a ausência de ensaios laboratoriais específicos destinados à avaliação experimental da resistência e do envelhecimento dos materiais nas condições amazônicas, o que restringe a confirmação de seu desempenho em longo prazo. Recomenda-se, para pesquisas futuras, a realização de ensaios de corrosão, envelhecimento acelerado, estabilidade térmica e resistência à umidade, associados ao monitoramento de equipamentos em operação. A ampliação dessas investigações poderá fornecer evidências experimentais para aperfeiçoar os critérios

apresentados e contribuir para o desenvolvimento de sistemas de iluminação pública mais duráveis, confiáveis e adequados às particularidades ambientais da Amazônia.

REFERÊNCIAS

ABDUL HADI, S., AL KAABI, M. R., Al Ali, M. O., & ARAFAT, H. A. (2013). Comparative life cycle assessment (LCA) of streetlight technologies for minor roads in United Arab Emirates. **Energy for Sustainable Development**, 17(5), 438–450.

ACHAR, T. E., REKHA, C., & SHREYAS, J. (2024). Smart automated highway lighting system using IoT: A survey. **Energy Informatics**, 7, Article 76.

ASHBY, M. F. (2017). **Materials selection in mechanical design** (5th ed.). Butterworth-Heinemann.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) – **ABNT NBR 5101:2024, sobre iluminação viária**.

ASTM INTERNATIONAL – **ASTM G154-23, referente a ensaios de exposição à radiação ultravioleta**.

CAIXA ECONÔMICA FEDERAL e IBGE – **Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI)**.

CRESWELL, J. W., & CRESWELL, J. D. (2018). **Research design**: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches (5th ed.). SAGE Publications.

CRESWELL, John W.; CRESWELL, J. David (2018) – **Abordagens qualitativa, quantitativa e métodos mistos**.

DILAURA, D. L., HOUSER, K. W., MISTRICK, R. G., & STEFFY, G. R. (2011). The lighting handbook: Reference and application (10th ed.). **Illuminating Engineering Society**.

GIL, A. C. (2022). **Como elaborar projetos de pesquisa** (7ª ed.). Atlas.

GIL, Antonio Carlos (2022) – **Metodologia da pesquisa científica, pesquisas exploratórias e descritivas**.

IARONKA, O., BENDER, V. C., & MARCHESAN, T. B. (2015). Thermal management of LED luminaires based on computational fluid dynamic. **Eletrônica de Potência**, 20(1), 76–84.

ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY (IES) – **IES PS-10-18, sobre estimativa da vida útil de produtos LED**.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. (2022). **Censo Demográfico 2022**. IBGE.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA (Inmetro) – **Portaria nº 62/2022**, referente à avaliação da conformidade de luminárias para iluminação pública viária.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC) – **IEC 60529, IEC 60598-2-3 e IEC 60068-2-52**.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO) – **ISO 14040:2006 e ISO 9223:2012**.

JÄGERBRAND, A. K. (2016). LED (light-emitting diode) road lighting in practice: An evaluation of compliance with regulations and improvements for further energy savings. **Energies**, 9(5), Article 357.

JUNTUNEN, E., TETRI, E., TAPANINEN, O., YRJÄNÄ, S., KONDRATYEV, V., SITOMANIEMI, A., SIIRTOLA, H., SARJANOJA, E.-M., AIKIO, J., & HEIKKINEN, V. (2015). A smart LED luminaire for energy savings in pedestrian road lighting. **Lighting Research & Technology**, 47(1), 103–115. https://doi.org/10.1177/1477153513510015

KLAASSEN et al. (2020) – **Aspectos técnicos, econômicos e ambientais de sistemas de iluminação**. Referência bibliográfica a conferir.

KLAASSEN, N., SCHEEPENS, A., FLIPSEN, B., & VOGTLÄNDER, J. (2020). Eco-efficient value creation of residential street lighting systems by simultaneously analysing the value, the costs and the eco-costs during the design and engineering phase. **Energies**, 13(13), Article 3351.

LECCESE, F., SALVADORI, G., & ROCCA, M. (2017). Critical analysis of the energy performance indicators for road lighting systems in historical towns of central Italy. **Energy**, 138, 616–628. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.093

LOZANO-MIRALLES et al. (2020) – **Avaliação ambiental e ciclo de vida de sistemas de iluminação**. Referência bibliográfica a conferir.

LOZANO-MIRALLES, J. A., HERMOSO-ORZÁEZ, M. J., GAGO-CALDERÓN, A., & BRITO, P. (2020). LCA case study to LED outdoor luminaries as a circular economy solution to local scale. **Sustainability**, 12(1), Article 190.

MARCONI, M. de A., & LAKATOS, E. M. (2021). **Fundamentos de metodologia científica** (9ª ed.). Atlas.

MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria (2021) – **Pesquisa bibliográfica, documental e fundamentos metodológicos**.

ROBERGE, P. R. (2008). **Corrosion engineering**: Principles and practice. McGraw-Hill.

ROBERGE, PIERRE R. (2008) – **Corrosão, resistência dos materiais e estratégias de proteção**.

SARA IJI, R.; HAMDAN, M. O.; HARB, A. Illuminance degradation of LED streetlighting luminaires in a hot environment. **LEUKOS**, v. 9, n. 3, p. 201–216, 2013. DOI: 10.1582/LEUKOS.2013.09.03.004.

SCHUBERT, E. F. (2018). **Light-emitting diodes** (3rd ed.). E. Fred Schubert.

SKANDALI, C., ZEREFOS, S., TSANGRASSOULIS, A., PEÑA-GARCÍA, A., TRIANTAFYLLIDIS, G. A., ZISSIS, G., & DOULOS, L. T. (2025). Reviewing the parameters that affect sustainability and

energy efficient concepts in road and urban lighting design. **Journal of Cleaner Production**, 490, Article 144607.

TÄHKÄMÖ e HALONEN (2015) – **Avaliação ambiental e ciclo de vida de sistemas de iluminação**. Referência bibliográfica a conferir.

TÄHKÄMÖ, L., & HALONEN, L. (2015). Life cycle assessment of road lighting luminaires: Comparison of light-emitting diode and high-pressure sodium technologies. **Journal of Cleaner Production**, 93, 234–242. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.01.025

YIN, R. K. (2018). **Case study research and applications**: Design and methods (6th ed.). SAGE Publications.

YIN, Robert K. (2018) – **Estudo de caso, coleta e análise de evidências**.

YOOMAK, S., & NGAOPITAKKUL, A. (2018). Optimisation of lighting quality and energy efficiency of LED luminaires in roadway lighting systems on different road surfaces. **Sustainable Cities and Society**, 38, 333–347. https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.01.005