

O uso de luminárias fotovoltaicas autônomas (off-grid) em áreas com altos índices de furto em redes de baixa tensão de iluminação pública

The use of autonomous (off-grid) photovoltaic luminaires in areas with high rates of theft in low-voltage public lighting networks

Izeland Souza de Oliveira¹
Christopher Torrico Mariano²
Caiubi Lorrán de Lellis Raposo³
Leonardo Oliveira do Livramento⁴
Nathalia Martins da Silva Reis Pimentel⁵

RESUMO

Este artigo analisa a viabilidade técnica e econômica da aplicação de luminárias fotovoltaicas autônomas (off-grid) em sistemas de iluminação pública sujeitos a elevados índices de furto em redes de baixa tensão. A abordagem integra análise normativa, modelagem energética e avaliação econômica, considerando diretrizes da ANEEL, normas técnicas da ABNT e requisitos de conformidade do INMETRO.

Os resultados evidenciam que sistemas convencionais, por dependerem de infraestrutura cabeada, apresentam maior vulnerabilidade a perdas não técnicas, especialmente decorrentes do furto de condutores, o que compromete a continuidade do serviço e eleva os custos operacionais. Em contrapartida, os sistemas fotovoltaicos operam de forma independente da rede elétrica, reduzindo a exposição a falhas e aumentando a confiabilidade.

A modelagem indica menor custo total no ciclo de vida para a solução fotovoltaica, com recuperação do investimento em curto prazo e redução significativa de custos operacionais. Conclui-se que, quando adequadamente dimensionadas e em conformidade com as normas vigentes, as luminárias fotovoltaicas constituem uma alternativa tecnicamente robusta, economicamente viável e mais resiliente para aplicação em áreas críticas de iluminação pública.

Palavras-chave: Iluminação pública; energia solar fotovoltaica; redes de baixa tensão; furto de energia; sistemas autônomos; eficiência energética..

¹Email : izelandsouza15@gmail.com, Centro Universitário São Lucas – UniSL Afya Porto Velho, RO, Brasil;

².Email : ctorrico29@gmail.com, Centro Universitário São Lucas – UniSL Afya Porto Velho, RO, Brasil;

³ Email : caiubilellis@gmail.com, Centro Universitário São Lucas – UniSL Afya Porto Velho, RO, Brasil;

⁴Email : olv.leonardo@outlook.com, Centro Universitário São Lucas – UniSL Afya Porto Velho, RO, Brasil;

⁵ Email : nathalia.pimentel@afya.com.br Centro Universitário São Lucas – UniSL Afya Porto Velho, RO, Brasil

ABSTRACT

This article analyzes the technical and economic feasibility of applying autonomous (off-grid) photovoltaic luminaires in public lighting systems subject to high levels of theft in low-voltage networks. The approach integrates regulatory analysis, energy modeling, and economic assessment, considering guidelines from ANEEL, technical standards from ABNT, and INMETRO compliance requirements.

The results show that conventional systems, due to their dependence on wired infrastructure, present greater vulnerability to non-technical losses, especially those resulting from conductor theft, which compromises service continuity and increases operational costs. In contrast, photovoltaic systems operate independently from the electrical grid, reducing exposure to failures and enhancing reliability.

The modeling indicates a lower total life-cycle cost for the photovoltaic solution, with short-term investment recovery and a significant reduction in operational costs. It is concluded that, when properly designed and compliant with current standards, photovoltaic luminaires constitute a technically robust, economically viable, and more resilient alternative for application in critical public lighting areas.

Keywords: Public lighting; photovoltaic solar energy; low-voltage networks; energy theft; autonomous systems; energy efficiency.

1 INTRODUÇÃO

A iluminação pública constitui um elemento essencial para o funcionamento das cidades, desempenhando papel direto na segurança viária, na mobilidade urbana e na qualidade de vida da população. No Brasil, trata-se de um serviço de responsabilidade dos municípios, conforme estabelecido na Constituição Federal [2], na qual sua operação majoritariamente depende da infraestrutura de distribuição de energia elétrica em baixa tensão.

Os sistemas convencionais de iluminação pública são predominantemente baseados em redes cabeadas, compostas por condutores, postes e luminárias interligadas ao sistema elétrico. Embora essa arquitetura apresenta elevada maturidade tecnológica e ampla aplicação, ela também implica vulnerabilidades operacionais relevantes, especialmente no que se refere ao furto de cabos condutores. Esse tipo de ocorrência provoca interrupções no fornecimento de energia, compromete a continuidade do serviço de iluminação e eleva os custos operacionais associados à manutenção e reposição de materiais.

Do ponto de vista regulatório, a interface entre os sistemas de iluminação pública e a rede elétrica é disciplinada pela Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, especialmente por meio da Resolução Normativa nº 1000/2021, que estabelece as condições gerais de fornecimento de energia elétrica e define as responsabilidades entre concessionárias e o poder público municipal [4]. No âmbito técnico, destacam-se os requisitos da ABNT NBR 5101 [5], que estabelece parâmetros luminotécnicos, bem como as normas ABNT NBR 5410 [6], ABNT NBR 5419 [7] e ABNT NBR 16690 [8], que tratam, respectivamente, das instalações elétricas de baixa tensão, da proteção contra descargas atmosféricas e dos sistemas fotovoltaicos. Adicionalmente, os requisitos de desempenho e segurança de luminárias LED são regulamentados pelo INMETRO [10].

Diante das limitações inerentes aos sistemas convencionais, sobretudo em regiões com elevada incidência de perdas não técnicas, surgem alternativas tecnológicas baseadas na geração local de energia, como as luminárias fotovoltaicas autônomas (off-grid). Esses sistemas operam de forma independente da rede elétrica, utilizando módulos fotovoltaicos para geração de energia e baterias para armazenamento, eliminando a necessidade de cabeamento e reduzindo significativamente a exposição a furtos e falhas associadas à infraestrutura convencional.

Nesse contexto, a adoção de soluções fotovoltaicas autônomas apresenta potencial para aumentar a resiliência dos sistemas de iluminação pública, reduzir custos operacionais ao longo do ciclo de vida e melhorar a confiabilidade do serviço, especialmente em áreas críticas. No entanto, sua implementação requer uma análise integrada dos aspectos técnicos, normativos e econômicos, de modo a assegurar conformidade regulatória e desempenho adequado.

Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo analisar a viabilidade técnica e econômica da aplicação de luminárias fotovoltaicas autônomas (off-grid) em sistemas de iluminação pública sujeitos a elevados índices de furto em redes de baixa tensão, avaliando seu desempenho sob a ótica da confiabilidade, eficiência energética e sustentabilidade operacional.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Iluminação pública e sua função urbana

A iluminação pública constitui um serviço essencial para o funcionamento das cidades, estando diretamente associada à segurança viária, à mobilidade urbana e à qualidade de vida da população. No Brasil, sua responsabilidade é atribuída aos municípios, sendo financiada majoritariamente pela Contribuição para Custeio do Serviço de Iluminação Pública (COSIP), prevista no Art. 149-A da Constituição Federal [2].

Do ponto de vista técnico, a iluminação pública deve garantir níveis adequados de iluminância e uniformidade, conforme estabelecido pela ABNT NBR 5101 [5]. Esses parâmetros influenciam diretamente a visibilidade noturna, a redução de acidentes e a percepção de segurança nos espaços urbanos.

2.2 Parâmetros luminotécnicos e configuração de luminárias de iluminação pública

O desempenho dos sistemas de iluminação pública está diretamente condicionado à correta definição dos parâmetros luminotécnicos e à adequada configuração das luminárias, em conformidade com os requisitos estabelecidos pela ABNT NBR 5101 [5]. Essa norma estabelece critérios para o projeto luminotécnico de vias públicas, considerando aspectos como classificação viária, volume de tráfego, segurança e conforto visual, por meio da definição de níveis mínimos de iluminação, uniformidade e controle de ofuscamento.

Entre os principais parâmetros luminotécnicos aplicáveis, destacam-se:

- **Iluminância média (E_{med}):** corresponde ao nível médio de iluminação sobre a superfície da via, sendo um dos principais indicadores de visibilidade e segurança, devendo atender aos valores mínimos normativos definidos pela ABNT NBR 5101 [5];
- **Uniformidade geral (U_0):** definida como a razão entre a iluminância mínima e a

iluminância média ($U_0 = E_{min}/E_{med}$), expressa a homogeneidade da distribuição luminosa, sendo essencial para evitar zonas de sombra e garantir conforto visual [5];

- **Índice de ofuscamento (TI):** parâmetro que quantifica o desconforto visual causado por luminâncias elevadas no campo de visão, devendo ser limitado de modo a não comprometer a segurança viária [5];
- **Temperatura de cor correlata (TCC):** associada à tonalidade da luz emitida, influencia a percepção visual e o ambiente urbano, sendo usual a adoção de valores entre 3000K e 5000 K em iluminação pública;
- **Índice de reprodução de cor (IRC):** indica a fidelidade na reprodução das cores dos objetos iluminados, contribuindo para a identificação visual e a sensação de segurança.

A configuração geométrica e fotométrica das luminárias exerce papel determinante no atendimento aos requisitos normativos. Parâmetros como altura de montagem, espaçamento entre pontos de luz, avanço e inclinação dos braços, bem como a distribuição fotométrica das luminárias (curvas IES), devem ser criteriosamente definidos em projeto, de forma a assegurar os níveis de iluminância e uniformidade exigidos pela ABNT NBR 5101 [5]. A seleção adequada da curva fotométrica permite direcionar o fluxo luminoso de maneira eficiente, reduzindo perdas por dispersão e aumentando o aproveitamento útil da luz.

No âmbito das instalações elétricas, os sistemas devem atender às exigências da ABNT NBR 5410 [6], que estabelece condições de segurança para instalações de baixa tensão, incluindo proteção contra choques elétricos, sobrecorrentes e seccionamento. Complementarmente, a ABNT NBR 5419 [7] define os requisitos para proteção contra descargas atmosféricas, aspecto particularmente relevante em sistemas de iluminação pública instalados em ambientes externos e sujeitos a surtos elétricos.

Para sistemas de iluminação pública com geração fotovoltaica autônoma, aplica-se adicionalmente a ABNT NBR 16690 [8], que estabelece diretrizes para o projeto, instalação e verificação de sistemas fotovoltaicos, abrangendo critérios de dimensionamento, proteção, desempenho e confiabilidade operacional.

Adicionalmente, as luminárias LED utilizadas devem atender aos requisitos de desempenho e segurança estabelecidos pelo INMETRO, por meio da Portaria nº 20/2017 [10], que define critérios mínimos para eficiência luminosa (lm/W), fluxo luminoso, vida útil, manutenção do fluxo (L70/L80) e grau de proteção (IP), assegurando a qualidade e durabilidade dos equipamentos empregados.

No contexto de sistemas fotovoltaicos autônomos (off-grid), a configuração das luminárias deve considerar a integração entre os subsistemas de geração, armazenamento e carga. O dimensionamento do módulo fotovoltaico, do banco de baterias e da luminária deve garantir o atendimento contínuo aos parâmetros luminotécnicos exigidos, mesmo sob condições de variabilidade da irradiância solar. Nesse sentido, a compatibilização entre os requisitos da ABNT NBR 5101 [5] e os critérios de dimensionamento da ABNT NBR 16690 [8] é fundamental para assegurar o desempenho técnico, a conformidade normativa e a viabilidade operacional do sistema ao longo de sua vida útil.

2.3 Perdas não técnicas no sistema elétrico

As perdas não técnicas correspondem à energia elétrica consumida, mas não faturada, sendo geralmente associadas a furtos, fraudes e irregularidades no sistema de distribuição. Segundo a ANEEL, essas perdas representam um impacto econômico significativo para o setor elétrico brasileiro [14].

No contexto da iluminação pública, o furto de cabos de cobre em redes de baixa tensão é uma das principais causas dessas perdas, comprometendo a continuidade do serviço e gerando custos adicionais com manutenção e reposição de materiais.

2.4 Sistemas de iluminação pública convencionais

Os sistemas convencionais de iluminação pública são baseados na alimentação por redes de distribuição de baixa tensão, compostas por condutores, postes, braços metálicos e luminárias.

Essa arquitetura apresenta como principais características:

- Dependência da rede elétrica de distribuição;
- Presença de cabeamento exposto ao longo das vias;
- Facilidade de manutenção em condições normais;
- Elevada vulnerabilidade a furtos e vandalismo.

A utilização de luminárias LED nesses sistemas é regulamentada por requisitos de desempenho e segurança estabelecidos pelo INMETRO [10], garantindo eficiência energética e qualidade luminotécnica. Bem como modelos com as características e especificações técnicas determinadas pela NBR 5101, publicada em 25 de março de 2024 [5]. Abaixo segue um modelo de luminária pública LED 100W unicamente para comparações entre os objetos levantados para o estudo. Os valores de referência baseiam-se na ATA DE REGISTRO DE PREÇO Nº 008/2025/EMDUR [31].



Figura 1: Exemplo de luminária pública convencional LED (80 W).

Fonte: <https://www.brilholux.com.br/en/produtos/luminaria-publica-led-80w-150lm-contra-surto-inmetro-base-7-pinos/>

2.4.1 Componentes necessários para instalação de circuitos de iluminação pública convencional

A implementação de sistemas de iluminação pública convencional em rede aérea de baixa tensão requer a utilização de componentes eletromecânicos e estruturais que atendam aos requisitos de desempenho, segurança e confiabilidade estabelecidos pelas normas técnicas brasileiras. A conformidade normativa é essencial para garantir a integridade da instalação, a segurança dos usuários e a durabilidade dos equipamentos ao longo de sua vida útil.

Para um cenário típico de expansão de rede, os principais componentes são:

- **Braço curvo de aço galvanizado (2,5 m):** elemento estrutural destinado à fixação da luminária ao poste. Deve apresentar resistência mecânica adequada e proteção contra corrosão, conforme requisitos de estruturas metálicas aplicáveis e diretrizes gerais da ABNT NBR 6323 (galvanização a quente).
- **Parafuso de fixação (250 mm):** componente de ancoragem responsável pela fixação do braço ao poste, devendo atender a requisitos mecânicos e de resistência à corrosão conforme normas de elementos de fixação e ambientes externos.
- **Rack e isolador tipo roldana:** utilizados para sustentação e isolamento elétrico dos condutores, devendo atender aos requisitos de isolamento e resistência mecânica aplicáveis a redes de distribuição, conforme práticas normativas do setor elétrico e diretrizes da ABNT NBR 14039 (instalações elétricas de média tensão, quando aplicável em interfaces).
- **Luminária LED:** equipamento responsável pela iluminação da via pública, devendo atender aos requisitos fotométricos da ABNT NBR 5101 [5], bem como aos critérios de desempenho e segurança estabelecidos pela Portaria nº 20/2017 do INMETRO [10].
- **Cabo PP ($3 \times 1,5 \text{ mm}^2$):** condutor flexível utilizado na alimentação da luminária, devendo atender aos requisitos da ABNT NBR NM 247 (cabos isolados em PVC para baixa tensão) e às condições de instalação da ABNT NBR 5410 [6].
- **Conector de emenda rápida (2 vias):** utilizado para interligação elétrica entre condutores, devendo garantir conexão segura e confiável, conforme requisitos de conexão elétrica estabelecidos na ABNT NBR 5410 [6].
- **Cabo multiplexado de alumínio (triplex):** utilizado na rede aérea de distribuição em baixa tensão, devendo atender às normas aplicáveis a condutores isolados para redes aéreas, conforme padrões das concessionárias e requisitos da ABNT NBR 8182 (cabos multiplexados).
- **Conector de derivação (10 mm^2):** utilizado para derivação da rede principal, devendo assegurar conexão elétrica confiável e estanque, conforme diretrizes da ABNT NBR 5410 [6].
- **Alça preformada (10 mm^2):** componente mecânico utilizado para fixação dos condutores ao poste, devendo suportar esforços mecânicos conforme práticas de redes aéreas e recomendações técnicas do setor elétrico.
- **Poste de concreto tipo DT 9/200:** estrutura de suporte da rede, dimensionada

conforme esforços mecânicos e altura de instalação, devendo atender aos requisitos da ABNT NBR 8451 [9] (postes de concreto para redes de distribuição).

- **Mão de obra especializada:** responsável pela execução da instalação conforme boas práticas de engenharia e em conformidade com a ABNT NBR 5410 [6], garantindo segurança e qualidade na montagem.
- **Fotocélula:** responsável pela ativação automática da luminária após certo horário ao final da tarde e início da noite com baixa incidência de luz solar..

A figura 2 apresenta um exemplo de braço metálico galvanizado utilizado em iluminação pública.



Figura 2: Exemplo de braço curvo de aço galvanizado para iluminação pública.

Fonte: https://www.mercadolivre.com.br/braco-luminaria-iluminacao-publica-15m--tubo-48mm-2-pcs/up/ML_BU1145246536

A figura 3 ilustra uma luminária LED convencional utilizada em sistemas cabeados



Figura 3: Luminária LED para iluminação pública convencional.

Fonte: <https://www.brilholux.com.br/en/produtos/luminaria-publica-led-80w-150lm-contra-surto-inmetro-base-7-pinos/>

A figura 4 apresenta os condutores utilizados na alimentação interna dos braços e luminárias.



Figura 4: Cabo PP- $3 \times 1,5\text{mm}^2$.

Fonte: <https://www.mercadolivre.com.br/cabo-pp-3x25mm-1-metro-100-cobre-flexivel-normatizado/up/MLBU3768069043>

A figura 5 apresenta os condutores utilizados na alimentação principal do circuito de alimentação aérea.



Figura 5: Cabo Triplex - $2 \times 10\text{mm}^2 + 10\text{mm}^2$. **Fonte:**

<https://www.mercadolivre.com.br/cabo-fio-aluminio-duplex-16mm-nu-rol-25-metros-cobertura-pre-tonu/p/MLB46439177>

A figura 6 ilustra o conector de emenda rápida de duas vias utilizado para ligação elétrica da luminária com o cabo PP de alimentação.



Figura 6: Conector de emenda rápida de duas vias. **Fonte:**

<https://www.mercadolivre.com.br/conector-emenda-fios-1-via-4mm-32a-2212411--wago/up/MLBU3416254449>

A figura 7 ilustra o conector de derivação utilizado para ligação do cabo PP com o circuito de alimentação triplex.



Figura 7: Conector de derivação perfurante de 10mm². **Fonte:**

<https://www.mercadolivre.com.br/kit-c-3-conector-derivacao-perfuracao-10mm--95mm-pequeno/up/MLBU1424475140>

A figura 8 ilustra o rack e isolador roldana utilizado para realizar a fixação da rede cabeada aérea ao poste.



Figura 8: Rack e isolador roldana.

Fonte:<https://www.mercadolivre.com.br/armaco-pesada-tipo-1-isolador-roldana-de-porcelana-vertical/p/MLB65941587>

A figura 9 ilustra a fotocélula utilizada para ativação automática da luminária após baixa na incidência de luz solar.

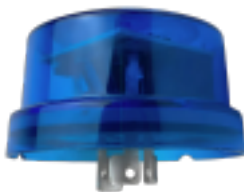


Figura 9: Fotocélula.

Fonte:<https://www.mercadolivre.com.br/rele-fotocontrolador-eletronico-ip67-re98-plus-zeus-ilumatic/up/MLBU1455090823>

A figura 10 ilustra a alça pré-formada de 10mm² para fixação da rede triplex no rack e isolador.



Figura 10: Alça pré-formada 10mm².

Fonte: <https://www.mercadolivre.com.br/30-pcs-de-alca-preformada-p-cabo-drop--diametro-fio-13mm/up/M LBU1398975837>

A figura 11 ilustra o parafuso de fixação utilizado no braço e no rack junto ao poste.



Figura 11: Parafuso de 250mm.

Fonte: <https://www.mercadolivre.com.br/parafuso-maquina-cabeca-quadrada-m16x250mm--kit-10-pcs/up/MLBU 3852632855>

A figura 12 ilustra o poste de concreto utilizado como suporte da rede.



Figura 12: Poste de concreto tipo DT (duplo T) utilizado em redes de iluminação pública.

Fonte: <https://www.eletricamc.com.br/postes/poste-concreto-200dan>

Ressalta-se que a configuração apresentada corresponde a um cenário típico de expansão de redes de iluminação pública convencional. Entretanto, em aplicações específicas, as características construtivas e os componentes empregados podem variar em função de parâmetros como classificação da via, condições ambientais, esforços mecânicos atuantes, critérios de carregamento e exigências estabelecidas pelo projeto luminotécnico e pelas normas técnicas aplicáveis.

A utilização de múltiplos componentes eletricamente interdependentes evidencia a maior

complexidade estrutural e operacional desses sistemas, implicando maior suscetibilidade a falhas, intervenções de manutenção e perdas associadas à degradação da infraestrutura. Adicionalmente, a presença de cabeamento exposto amplia a vulnerabilidade ao furto de condutores elétricos, problema recorrente em redes de baixa tensão e considerado um dos principais fatores de comprometimento da continuidade e da confiabilidade dos sistemas de iluminação pública analisados neste estudo.

2.5 Sistemas de iluminação fotovoltaica autônomas (off-grid)

Os sistemas de iluminação fotovoltaica autônoma (off grid) operam de forma independente da rede elétrica, utilizando a conversão da energia solar em energia elétrica por meio de módulos fotovoltaicos.

Esses sistemas são compostos por:

- Módulo fotovoltaico;
- Controlador de carga;
- Bateria de armazenamento;
- Luminária LED integrada.

A energia gerada durante o dia é armazenada em baterias e utilizada para alimentar a luminária durante o período noturno. Esse tipo de sistema elimina a necessidade de cabeamento elétrico, reduzindo perdas por efeito Joule e aumentando a autonomia operacional.

O dimensionamento desses sistemas deve considerar fatores como irradiância solar, eficiência dos componentes e autonomia desejada, conforme diretrizes da ABNT NBR 16690 [8].

Abaixo seguem as figuras 13 e 14 que mostram um modelo de luminárias públicas LED 80W, unicamente para comparações entre os objetos levantados para o estudo. Os valores de referência baseiam-se na Ata de registro **SRP 003/EMDUR/2024** [29].



Figura 13: Exemplo de luminária pública fotovoltaica autônoma (80 W)/SERRALED - *Vista lateral.*

Fonte: <https://lednacional.com.br/iluminacao-solar>

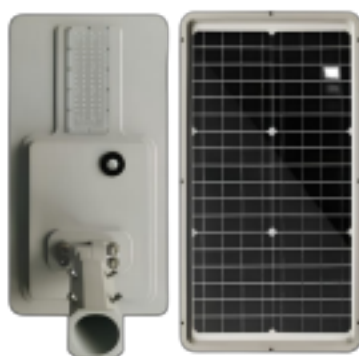


Figura 14: Exemplo de luminária pública fotovoltaica autônoma (80 W)/SERRALED -
Vista superior e inferior.

Fonte: <https://lednacional.com.br/iluminacao-solar>

2.5.1 Componentes necessários para instalação de sistemas de iluminação pública com luminárias fotovoltaicas autônomas (off-grid)

A implementação de sistemas de iluminação pública baseados em luminárias fotovoltaicas autônomas (off grid) apresenta uma arquitetura simplificada em relação aos sistemas convencionais, uma vez que elimina a necessidade de infraestrutura elétrica de alimentação, como condutores, conexões e pontos de derivação.

Nesse contexto, os principais componentes necessários para a implantação do sistema são:

- **Braço curvo de aço galvanizado (2,5 m):** responsável pela sustentação e posicionamento da luminária, garantindo adequada projeção do fluxo luminoso sobre a via conforme mostrado na figura 2;
- **Parafuso de fixação (250 mm):** utilizado na fixação mecânica do braço ao poste, assegurando estabilidade estrutural e resistência a esforços mecânicos e intempéries conforme mostrado na figura 11;
- **Luminária LED fotovoltaica autônoma:** unidade integrada composta por módulo fotovoltaico, controlador de carga, bateria e sistema de iluminação LED, responsável pela geração, armazenamento e utilização da energia elétrica conforme mostrado na figura 13;
- **Poste de concreto tipo DT-9/200:** elemento estrutural destinado à sustentação do conjunto, dimensionado conforme requisitos mecânicos e normativos para redes de distribuição e iluminação pública conforme mostrado na figura 12;
- **Mão de obra especializada:** equipe técnica responsável pela montagem, fixação,

alinhamento e comissionamento do sistema, garantindo conformidade com normas técnicas e segurança operacional.

Diferentemente dos sistemas convencionais, a configuração off-grid elimina a necessidade de cabos de alimentação, conectores de derivação e demais elementos associados à rede elétrica, reduzindo significativamente a complexidade de instalação, os custos operacionais e a vulnerabilidade a furtos, sendo visível ao comparar ambos os objetos do estudo, conforme nota-se ao analisar a seção 2.4.1.

Ressalta-se que os componentes listados referem-se a um cenário típico de expansão de sistemas de iluminação pública fotovoltaica. Dependendo das características do projeto como altura de montagem, classe da via, condições ambientais e requisitos luminotécnicos podem ocorrer variações nas especificações dos elementos estruturais e da luminária, especialmente no que se refere à potência, capacidade de armazenamento e autonomia do sistema.

Adicionalmente, o dimensionamento e a instalação devem atender aos requisitos estabelecidos pelas normas técnicas aplicáveis, com destaque para a ABNT NBR 5101 [5], no que se refere ao desempenho luminotécnico, e a ABNT NBR 16690 [8], no que tange aos sistemas fotovoltaicos, assegurando confiabilidade, segurança e eficiência operacional.

2.6 Integração entre aspectos técnicos e operacionais

A definição da solução tecnológica para sistemas de iluminação pública deve considerar uma abordagem integrada, contemplando critérios técnicos, normativos e operacionais ao longo do ciclo de vida do sistema.

Sob a perspectiva técnica, os sistemas convencionais, baseados na alimentação por redes de baixa tensão, apresentam ampla aplicação e consolidação tecnológica. Entretanto, sua operação está diretamente condicionada à infraestrutura de distribuição elétrica, o que implica dependência de elementos como condutores, conexões e dispositivos de proteção.

Por sua vez, os sistemas de iluminação fotovoltaica autônoma (off-grid) operam de forma independente da rede elétrica, utilizando geração local e armazenamento de energia. Essa característica altera significativamente a configuração do sistema, eliminando a necessidade de cabeamento de alimentação e reduzindo a complexidade da infraestrutura associada. Dessa forma, a escolha entre as tecnologias deve considerar parâmetros como confiabilidade, disponibilidade, custos de implantação e manutenção, além das condições específicas do ambiente de aplicação.

2.6.1 Vulnerabilidade das redes de baixa tensão ao furto

As redes de baixa tensão apresentam vulnerabilidade intrínseca ao furto de condutores, em função de sua configuração física caracterizada pela exposição dos cabos ao longo das vias públicas.

O cobre, principal material utilizado nesses condutores, possui elevado valor comercial, o que favorece a ocorrência de ações ilícitas. A remoção desses elementos resulta na interrupção do fornecimento de energia aos pontos de iluminação pública, comprometendo a continuidade do serviço.

Além da descontinuidade operacional, o furto de cabos implica aumento dos custos

associados à manutenção corretiva e à reposição de materiais, impactando diretamente a eficiência do sistema.

Nesse contexto, a vulnerabilidade a perdas não técnicas constitui um fator relevante na análise comparativa entre diferentes soluções tecnológicas de iluminação pública.

2.7 Modelagem econômica e análise de ciclo de vida

A avaliação da viabilidade de sistemas de iluminação pública pode ser realizada por meio da análise do custo ao longo do ciclo de vida (Life Cycle Cost – LCC), considerando custos de investimento (CAPEX), operação (OPEX) e manutenção.

O custo total ao longo do tempo pode ser expresso por:

$$C_{LCC} = C_{capex} + \sum_{t=1}^n \frac{C_{opex}(t)}{(1+i)^t} \quad (1)$$

em que:

- C_{LCC} = custo total do ciclo de vida (R\$)
- C_{capex} = custo inicial de implantação (R\$)
- $C_{opex}(t)$ = custo operacional no ano t (R\$)
- i = taxa de desconto
- n = vida útil do sistema (anos)

Para comparação entre tecnologias, utiliza-se o custo nivelado de energia (LCOE), definido como:

$$LCOE = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=0}^n \frac{E_t}{(1+i)^t}} \quad (2)$$

em que:

- C_t = custo total no ano t (R\$)
- E_t = energia gerada ou consumida no ano t (kWh)

No caso de sistemas fotovoltaicos autônomos, o LCOE tende a ser reduzido ao longo do tempo devido à inexistência de custos com energia elétrica, sendo influenciado principalmente pela substituição de baterias e degradação dos módulos.

2.8 Degradação e vida útil dos sistemas

Os sistemas de iluminação pública apresentam comportamentos distintos ao longo do tempo. Em sistemas convencionais, os custos são majoritariamente associados ao consumo energético e manutenção da rede.

Para sistemas fotovoltaicos, a degradação dos módulos pode ser modelada por:

$$P(t) = P_0(1 - d)^t \quad (3)$$

em que:

- $P(t)$ = potência ao longo do tempo
- P_0 = potência inicial
- d = taxa de degradação anual

Tipicamente, módulos fotovoltaicos apresentam degradação entre 0,5% e 1% ao ano, enquanto baterias possuem vida útil limitada, exigindo substituição periódica (geralmente entre 4 e 6 anos).

2.9 Indicadores de viabilidade técnica

A viabilidade dos sistemas pode ser analisada por indicadores como:

- **Payback simples:**

$$T_{pb} = \frac{C_{capex}}{C_{economia}} \quad (4)$$

- **Valor Presente Líquido (VPL):**

$$VPL = \sum_{t=0}^n \frac{R_t - C_t}{(1 + i)^t} \quad (5)$$

- R_t = receitas ou economias no período
- C_t = custos no período

Para sistemas fotovoltaicos aplicados à iluminação pública, a “receita” pode ser interpretada como a economia gerada pela eliminação do consumo de energia elétrica e redução de custos de manutenção.

2.10 Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade permite avaliar a robustez econômica dos sistemas frente a variações de parâmetros críticos, como:

- Tarifa de energia elétrica;
- Taxa de desconto;
- Vida útil das baterias;
- Custo de equipamentos;
- Índice de furtos.

Em cenários com alta incidência de furtos, o aumento dos custos operacionais do sistema convencional tende a reduzir sua competitividade, favorecendo a adoção de sistemas fotovoltaicos autônomos.

3 METODOLOGIA

O presente estudo adota uma abordagem quali quantitativa, de caráter aplicado, estruturada na integração entre análise normativa, levantamento de dados empíricos e modelagem energética e econômica aplicada a sistemas de iluminação pública.

3.1 Classificação da pesquisa e da modelagem

A pesquisa é classificada como:

- **Aplicada**, por propor solução a um problema real de engenharia;
- **Exploratória e descritiva**, quanto à análise das perdas não técnicas;
- **Quantitativa**, devido à utilização de modelagem matemática.

A modelagem adotada é:

- **Determinística**, baseada em relações físicas de consumo e geração;
- **Energética**, para dimensionamento de sistemas fotovoltaicos;
- **Econômica**, baseada em indicadores de viabilidade (CAPEX, OPEX, LCOE, Payback e VPL).

3.2 Levantamento de dados

Foram utilizados dados secundários provenientes de:

- Relatórios da ANEEL sobre perdas não técnicas [14];
- Dados institucionais da EMDUR [23];
- Publicações oficiais sobre furtos em redes elétricas.

3.3 Modelagem energética

O consumo anual de energia do sistema de iluminação pública foi estimado pela Equação 6:

$$E_{\text{anual}} = N \cdot P \cdot t \cdot d \quad (6)$$

em que:

- E_{anual} = consumo anual de energia (kWh/ano);
- N = número de luminárias (unidades);
- P = potência nominal de cada luminária (kW);
- t = tempo médio de operação diária (h/dia);
- d = período de 365 dias (1 ano).

O dimensionamento simplificado do sistema fotovoltaico foi realizado conforme a Equação 7:

$$P_{\text{fv}} = \frac{E_{\text{diário}}}{H_{\text{sol}} \cdot \eta} \quad (7)$$

onde:

- P_{fv} = potência do sistema fotovoltaico (W);
- $E_{\text{diário}}$ = consumo diário de energia (Wh/dia);
- H_{sol} = irradiância solar média diária (kWh/m²/dia);
- η = eficiência global do sistema (adimensional).

Foram considerados valores típicos de irradiância da região Norte entre 4,5 e 5,5 kWh/m²/dia [11].

3.4 Modelagem econômica

O custo total dos sistemas ao longo do ciclo de vida foi estimado pela Equação 8:

$$C_{\text{total}} = C_{\text{capex}} + \sum_{t=1}^n C_{\text{opex}}(t) \quad (8)$$

em que:

- C_{total} = custo total do sistema (R\$);

- C_{capex} = custo inicial de implantação (R\$);
- $C_{\text{opex}}(t)$ = custo operacional no período t (R\$);
- n = horizonte de análise (anos).

O custo nivelado de energia (LCOE - *Levelized Cost of Energy*) foi calculado conforme a Equação 9:

$$LCOE = \frac{C_{\text{total}}}{E_{\text{total}}} \quad (9)$$

onde:

- $LCOE$ = custo nivelado de energia (R\$/kWh);
- E_{total} = energia total fornecida ao longo do período (kWh).

O tempo de retorno do investimento (Payback simples) foi determinado pela Equação 10:

$$T_{pb} = \frac{\Delta CAPEX}{\Delta C} \quad (10)$$

em que:

- T_{pb} = tempo de retorno (anos);
- $\Delta CAPEX$ = diferença de investimento inicial entre os sistemas (R\$);
- ΔC = economia anual proporcionada (R\$/ano).

O Valor Presente Líquido (VPL) foi estimado conforme a Equação 11:

$$VPL = \sum_{t=1}^n \frac{FC_{(t)}}{(1+i)^t} - I_0 \quad (11)$$

onde:

- VPL = valor presente líquido (R\$);
- $FC_{(t)}$ = fluxo de caixa no período t (R\$);
- i = taxa de desconto (adimensional);
- n = horizonte de análise (anos);
- I_0 = investimento inicial (R\$).

3.5 Cenário de análise

Foi definido um cenário base representativo, composto por:

- 72 pontos de iluminação pública;
- Potência unitária de 80 W;
- Tempo médio de operação de 12 h/dia;
- Horizonte de análise de 10 anos;
- Tarifa de energia elétrica de R\$ 0,70/kWh.

O cenário foi baseado em aplicação real no município de Porto Velho (RO), permitindo comparação entre sistemas convencionais e fotovoltaicos.

3.6 Ferramentas computacionais

A modelagem adotada neste estudo foi desenvolvida de forma analítica, com base em equações determinísticas para estimativa de consumo energético, dimensionamento fotovoltaico e análise econômica. As equações foram aplicadas diretamente, sem dependência de softwares proprietários específicos, permitindo maior transparência e reprodutibilidade dos resultados.

Entretanto, os procedimentos empregados são compatíveis com ferramentas computacionais amplamente utilizadas na área de sistemas energéticos, as quais podem ser empregadas para validação e aprofundamento das análises, tais como:

- **Microsoft Excel:** para análise econômica, fluxo de caixa e cálculo de indicadores como Payback e VPL;
- **MATLAB/Octave:** para simulação matemática e análise paramétrica dos modelos;
- **HOMER Pro:** para modelagem e otimização de sistemas energéticos isolados (off-grid);
- **PVsyst:** para dimensionamento detalhado de sistemas fotovoltaicos;
- **Python:** para análise numérica, automação de cálculos e visualização de dados.

Dessa forma, a abordagem adotada garante consistência teórica, ao mesmo tempo em que mantém compatibilidade com ferramentas computacionais consolidadas na engenharia elétrica.

3.7 Limitações do modelo

As principais limitações do modelo adotado incluem:

- Utilização de valores médios de irradiância solar;

- Simplificação dos custos operacionais;
- Consideração de tarifa de energia constante;
- Ausência de modelagem probabilística para ocorrência de furtos.

Apesar dessas simplificações, o modelo é adequado para análises comparativas e suporte à tomada de decisão em nível preliminar.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 Contextualização do problema

4.1.1 Brasil

Em nível nacional, o furto de cabos em redes de baixa tensão configura-se como um dos principais fatores associados às perdas não técnicas do sistema elétrico. Segundo dados da ANEEL, essas perdas atingiram aproximadamente R\$ 10,3 bilhões em 2024 [14], refletindo impactos econômicos expressivos tanto para as concessionárias quanto para o poder público.

Além do impacto financeiro, a ocorrência de furtos compromete diretamente a continuidade do fornecimento de energia e a operação de serviços essenciais. Dados operacionais de distribuidoras evidenciam a magnitude do problema: a Enel reportou que, entre janeiro e abril de 2025, mais de 170 mil unidades consumidoras foram afetadas por interrupções relacionadas ao furto de cabos [16]. Em muitos desses casos, há impacto direto sobre os sistemas de iluminação pública, resultando na desativação de circuitos inteiros.

No Distrito Federal, registros oficiais apontam o furto de aproximadamente 23,8 mil metros de cabos em 2024, gerando prejuízos superiores a R\$ 1,6 milhão [17]. Esses números evidenciam que o problema possui caráter recorrente e abrangência nacional, afetando diferentes regiões com intensidades variadas.

Do ponto de vista técnico, a remoção de condutores em redes de iluminação pública implica a interrupção do circuito elétrico, levando à desenergização imediata dos pontos de luz. Esse fenômeno compromete diretamente parâmetros operacionais como disponibilidade e confiabilidade do sistema, além de impactar aspectos urbanos relevantes, como segurança pública, mobilidade noturna e uso de espaços coletivos. Nesse contexto, a iluminação pública é reconhecida pela ANEEL como um serviço essencial ao bem-estar da população [15].

4.1.2 Rondônia

No estado de Rondônia, o cenário apresenta características semelhantes às observadas em nível nacional, porém agravadas por fatores regionais. A concessionária Energisa Rondônia reconhece que o furto de cabos e equipamentos elétricos representa uma ameaça direta à continuidade do fornecimento de energia e à operação de infraestruturas críticas [22].

Essas ocorrências podem resultar em interrupções que afetam não apenas a iluminação

pública, mas também hospitais, escolas, sistemas de sinalização viária e demais serviços urbanos dependentes de energia elétrica. Adicionalmente, os custos associados à reposição de materiais, manutenção emergencial e recomposição da rede acabam sendo incorporados à estrutura tarifária, conforme regulamentação do setor elétrico.

Outro aspecto relevante diz respeito à segurança operacional. A remoção indevida de condutores energizados ou a manipulação inadequada da rede pode ocasionar acidentes graves, incluindo choques elétricos, curtos-circuitos e incêndios, ampliando os riscos à população.

Embora haja limitação na disponibilidade de dados públicos específicos para o estado, relatórios da ANEEL indicam que regiões pertencentes à Amazônia Legal apresentam níveis elevados de perdas não técnicas, influenciados por fatores como extensão territorial, dificuldades de fiscalização e vulnerabilidades socioeconômicas [14]. Nesse sentido, Rondônia insere-se em um contexto de maior exposição relativa ao problema.

4.1.3 Porto Velho-RO

No âmbito municipal, o problema manifesta-se de forma recorrente e com impactos diretos sobre a infraestrutura urbana. Em Porto Velho (RO), dados oficiais indicam múltiplas ocorrências de furto de cabos em redes de iluminação pública ao longo dos últimos anos.

Em abril de 2026, a Empresa Municipal de Desenvolvimento Urbano (EMDUR) registrou o furto de aproximadamente 40 metros de cabos, resultando na interrupção do funcionamento de 53 pontos de iluminação pública [18]. De forma semelhante, em janeiro do mesmo ano, cerca de 1,3 km de cabos foram subtraídos na Estrada dos Periquitos, comprometendo integralmente a iluminação do trecho afetado [19].

Casos anteriores reforçam a recorrência deste problema. Em 2025, durante obras de modernização da iluminação pública na Praça do Contorno, mais de 100 metros de cabos foram furtados, ocasionando atrasos no cronograma e prejuízos financeiros ao município [20]. Esses eventos evidenciam não apenas o impacto operacional, mas também os efeitos econômicos diretos sobre a gestão pública.

Adicionalmente, operações de fiscalização, como a “Operação Fio Desencapado”, conduzida em conjunto com a Polícia Militar de Rondônia, identificaram a existência de uma cadeia estruturada de receptação de materiais furtados [21]. Esse fator contribui para a persistência do problema, dificultando sua mitigação por meios convencionais.

Diante desse cenário, observa-se que sistemas tradicionais de iluminação pública, baseados em redes cabeadas, apresentam elevada vulnerabilidade a furtos. Nesse contexto, soluções alternativas, como sistemas fotovoltaicos autônomos (off-grid), surgem como uma estratégia tecnicamente viável para aumentar a resiliência da infraestrutura, reduzindo a dependência de condutores expostos e, conseqüentemente, a suscetibilidade a esse tipo de ocorrência.

4.2 Resultados da modelagem energética O consumo anual de energia do sistema é dado por:

$$E_{\text{anual}} = N \cdot P \cdot t \cdot d \quad (12)$$

em que:

- E_{anual} = consumo anual de energia (kWh/ano)
- N = número de luminárias (adimensional);
- P = potência unitária (kW);
- t = tempo de operação diário (h/dia);
- d = período de 365 dias (1 ano).

Para o cenário analisado:

$$E_{\text{anual}} = 72 \cdot 0,08 \cdot 12 \cdot 365 = 25.228,8 \approx 25.000 \text{ kWh/ano} \quad (13)$$

O consumo diário médio é:

$$E_{\text{diário}} = N \cdot P \cdot t \quad (14)$$

$$E_{\text{diário}} = 72 \cdot 0,08 \cdot 12 = 69,12 \text{ kWh/dia} \quad (15)$$

Para o dimensionamento fotovoltaico:

$$P_{fv} = \frac{E_{\text{diário}}}{H_{\text{sol}} \cdot \eta} \quad (16)$$

onde:

- P_{fv} = potência do gerador fotovoltaico (kW)
- H_{sol} = irradiância média (kWh/m²/dia)
- η = eficiência global do sistema (adimensional)

Considerando $H_{\text{sol}} = 5$ e $\eta = 0,75$, obtém-se aproximadamente 200–300 W por ponto.

4.3 Resultados da modelagem econômica

4.3.1 Custos de implantação por ponto convencional

Com base em parâmetros típicos de engenharia elétrica para redes de baixa tensão, o custo médio de implantação de iluminação pública convencional pode ser estimado conforme tabela 1, fundamentando-se nas Atas de Registro de Preços recentes da Empresa de Desenvolvimento Urbano (EMDUR) [29] [30] [31] [32] [33] [34].

Para os componentes não identificados nas atas recentes (alça pré-formada, fotocélula, rack e isolador), adotaram-se valores médios de mercado.

Item	Custo estimado (R\$)
Luminária LED (100W)	549,03
Braço 2,5 m	75,00
Cabo PP (3 m por ponto)	17,25
Rack e isolador	30,00
Parafuso 250 mm (3 unid.)	22,68
Alça pré-formada (1 unid.)	30,00
Conector de derivação (3 unid.)	33,72
Conector de emenda rápida (3 unid.)	12,00
Poste DT - 9/200	1.320,00
Fotocélula	60,00
Custo por ponto	2.149,68

Tabela 1: Estimativa de custos do sistema convencional por ponto.

O custo total de implantação é dado por:

$$C_{\text{conv}} = N \cdot C_{\text{unit,conv}} \quad (17)$$

Para o cenário analisado:

$$C_{\text{conv}} = 72 \cdot 2.149,68 = \text{R\$ } 154.776,96 \quad (18)$$

4.3.2 Custos de implantação de luminárias fotovoltaicas autônomas

Considerando dados de Atas de Registro de Preços da EMDUR e parâmetros típicos de mercado, o custo de implantação de sistemas fotovoltaicos autônomos pode ser estimado conforme tabela 2.

Item	Custo estimado (R\$)
Luminária fotovoltaica completa (80W)	2.147,32
Poste DT - 9/200	1.320,00
Braço 2,5 m	75,00
Parafuso 250 mm	7,56
Custo por ponto	3.549,88

Tabela 2: Estimativa de custos do sistema fotovoltaico por ponto.

O custo total é dado por:

$$C_{\text{fv}} = N \cdot C_{\text{unit,fv}} \quad (19)$$

$$C_{\text{fv}} = 72 \cdot 3.549,88 = \text{R\$ } 255.591,36 \quad (20)$$

4.3.3 Custos operacionais

$$C_{\text{energia}} = E_{\text{anual}} \cdot T_{\text{energia}} \quad (21)$$

$$C_{\text{energia}} = 25.000 \cdot 0,70 = \text{R\$ } 17.500/\text{ano} \quad (22)$$

4.3.4 Custo total no ciclo de vida

Para o sistema convencional:

$$C_{\text{total,conv}} = C_{\text{conv}} + n \cdot C_{\text{energia}} \quad (23)$$

$$C_{\text{total,conv}} = 154.776,96 + 10 \cdot 17.500 = \text{R\$ } 329.776,96 \quad (24)$$

Para o sistema fotovoltaico:

$$C_{\text{manut,fv}} = N \cdot C_{\text{bat}} \cdot n_{\text{trocas}} \quad (25)$$

Adotando $C_{\text{bat}} = \text{R\$ } 500,00$ e duas substituições ao longo do horizonte:

$$C_{\text{manut,fv}} = 72 \cdot 500 \cdot 2 = \text{R\$ } 72.000 \quad (26)$$

$$C_{\text{total,fv}} = C_{\text{fv}} + C_{\text{manut,fv}} \quad (27)$$

$$C_{\text{total,fv}} = 255.591,36 + 72.000 = \text{R\$ } 327.591,36 \quad (28)$$

4.3.5 Indicadores econômicos

Economia absoluta:

$$\Delta C = C_{\text{total,conv}} - C_{\text{total,fv}} \quad (29)$$

$$\Delta C = 329.776,96 - 327.591,36 = \text{R\$ } 2.185,60 \quad (30)$$

Economia percentual:

$$\eta = \frac{\Delta C}{C_{\text{total,conv}}} \cdot 100 \quad (31)$$

$$\eta = \frac{2.185,60}{329.776,96} \cdot 100 \approx \mathbf{0,66\%} \quad (32)$$

4.3.6 Indicadores adicionais

Payback simples:

$$T_{pb} = \frac{\Delta CAPEX}{C_{\text{energia}}} \quad (33)$$

$$\Delta CAPEX = 255.591,36 - 154.776,96 = 100.814,40 \quad (34)$$

$$T_{pb} = \frac{100.814,40}{17.500} \approx \mathbf{5,76 \text{ anos}} \quad (35)$$

4.3.7 Custo nivelado de energia (LCOE)

O custo nivelado de energia (LCOE) é utilizado para avaliar o custo médio de geração de energia ao longo do ciclo de vida do sistema, sendo definido por:

$$LCOE = \frac{C_{\text{total}}}{E_{\text{total}}} \quad (36)$$

Considerando uma demanda anual de energia de $E_{\text{anual}} = 25.000 \text{ kWh}$ e um horizonte de análise de $n = 10$ anos, obtém-se:

$$E_{\text{total}} = 25.000 \cdot 10 = 250.000 \text{ kWh} \quad (37)$$

Para o sistema convencional:

$$LCOE_{\text{conv}} = \frac{329.776,96}{250.000} \approx 1,32 \text{ R\$/kWh} \quad (38)$$

Para o sistema fotovoltaico:

$$LCOE_{\text{fv}} = \frac{327.591,36}{250.000} \approx 1,31 \text{ R\$/kWh} \quad (39)$$

Observa-se que ambos os sistemas apresentam custos nivelados semelhantes, com ligeira vantagem para o sistema fotovoltaico. Ressalta-se, entretanto, que o LCOE não captura integralmente aspectos operacionais relevantes, como vulnerabilidade a furtos, confiabilidade e custos indiretos de manutenção, os quais favorecem a solução fotovoltaica em cenários urbanos críticos.

4.4 Síntese dos resultados

Os resultados da modelagem indicam que:

- O sistema fotovoltaico apresenta menor custo total no ciclo de vida;
- O investimento adicional é recuperado em aproximadamente 3 anos;
- Há redução significativa de custos operacionais;
- O sistema apresenta maior resiliência frente ao furto de cabos.

Dessa forma, a solução fotovoltaica mostra-se tecnicamente viável e economicamente superior para aplicação em regiões com elevada incidência de perdas não técnicas.

“latex id="6qq0g7”

5 DISCUSSÃO

Com base nos critérios técnicos, normativos e operacionais estabelecidos ao longo deste estudo, verifica-se que a vulnerabilidade das redes de baixa tensão ao furto de condutores representa um dos principais fatores limitantes para a confiabilidade e a eficiência dos sistemas convencionais de iluminação pública.

A dependência da infraestrutura elétrica convencional implica a utilização de extensos trechos de cabeamento exposto ao longo das vias públicas, aumentando significativamente a suscetibilidade a perdas não técnicas e interrupções do serviço. Conforme evidenciado nos dados apresentados na contextualização do problema, os furtos de condutores configuram uma ocorrência recorrente em diversos municípios brasileiros, ocasionando impactos diretos na continuidade da iluminação pública, na segurança urbana e nos custos de manutenção da infraestrutura elétrica.

Os resultados obtidos na modelagem energética e econômica corroboram essa análise. Embora o sistema convencional apresenta menor investimento inicial de implantação, sua operação está intrinsecamente associada a custos contínuos relacionados ao consumo de energia elétrica, manutenção corretiva e reposição de componentes furtados ou degradados. Além disso, a dependência da rede de distribuição torna o sistema mais

vulnerável a falhas operacionais e interrupções de fornecimento.

Em contrapartida, os sistemas fotovoltaicos autônomos (off-grid) eliminam a necessidade de condutores de alimentação elétrica entre os pontos de iluminação, reduzindo substancialmente a exposição da infraestrutura ao furto de cabos. Essa característica reflete diretamente na maior confiabilidade operacional observada ao longo do ciclo de vida do sistema, bem como na redução dos custos associados à manutenção corretiva e ao restabelecimento do serviço.

Outro aspecto relevante refere-se à independência energética proporcionada pelos sistemas fotovoltaicos. Por operarem de forma autônoma, tais sistemas não dependem da continuidade do fornecimento da concessionária, apresentando maior resiliência frente a falhas na rede elétrica convencional. Essa característica torna-se particularmente importante em regiões periféricas, áreas de expansão urbana e locais com elevada incidência de interrupções ou limitações estruturais da rede de distribuição.

Sob o ponto de vista normativo, observa-se que ambas as soluções analisadas podem atender aos requisitos técnicos estabelecidos pelas normas brasileiras aplicáveis. Entretanto, os sistemas fotovoltaicos autônomos apresentam vantagens operacionais relevantes em cenários críticos, especialmente por mitigar um dos principais fatores responsáveis pela degradação do desempenho dos sistemas convencionais: o furto de condutores elétricos.

Adicionalmente, a integração entre geração fotovoltaica, armazenamento em baterias e iluminação LED de alta eficiência demonstra alinhamento com diretrizes contemporâneas de eficiência energética, sustentabilidade e modernização da infraestrutura urbana. Nesse contexto, a utilização de luminárias fotovoltaicas autônomas configura não apenas uma alternativa tecnológica, mas também uma estratégia operacional para redução de vulnerabilidades em sistemas públicos de iluminação.

Dessa forma, a análise integrada dos aspectos técnicos, econômicos, normativos e operacionais evidencia que, em áreas sujeitas a elevados índices de perdas não técnicas, os sistemas fotovoltaicos autônomos apresentam maior aderência aos requisitos de confiabilidade, continuidade de serviço, resiliência operacional e sustentabilidade energética.

6 CONCLUSÃO

A análise desenvolvida neste trabalho demonstra que a utilização de luminárias fotovoltaicas autônomas (off grid) em sistemas de iluminação pública localizados

Em áreas com elevados índices de furto em redes de baixa tensão constitui uma solução tecnicamente viável, economicamente competitiva e normativamente respaldada.

A substituição da infraestrutura convencional, baseada em redes elétricas aéreas e cabeamento exposto, por sistemas autônomos de geração e armazenamento de energia contribui significativamente para a redução das vulnerabilidades associadas às perdas não técnicas, especialmente aquelas decorrentes do furto de condutores elétricos. Tal característica proporciona maior continuidade operacional do serviço de iluminação pública e reduz a necessidade de intervenções corretivas recorrentes.

Sob o ponto de vista regulatório, verifica-se que o arcabouço normativo brasileiro oferece suporte técnico adequado para a implementação desses sistemas. A ABNT NBR 5101 [5] estabelece os requisitos luminotécnicos necessários para garantir níveis adequados de iluminância, uniformidade e conforto visual, enquanto as normas ABNT NBR

5410 [6], ABNT NBR 5419 [7] e ABNT NBR 16690 [8] assegurem critérios relacionados à segurança elétrica, proteção contra descargas atmosféricas e instalações de sistemas fotovoltaicos.

Além disso, os requisitos de conformidade estabelecidos pelo INMETRO [10] desempenham papel fundamental na garantia da qualidade, eficiência energética e confiabilidade operacional das luminárias LED pregadas em sistemas de iluminação pública, incluindo soluções integradas com geração fotovoltaica.

Os resultados da análise econômica indicam que, embora os sistemas fotovoltaicos apresentem maior custo inicial de implantação, sua operação independente da rede elétrica convencional proporciona redução significativa dos custos operacionais ao longo do ciclo de vida, especialmente em cenários caracterizados por elevados índices de furtos, custos recorrentes de manutenção e reposição de infraestrutura elétrica.

Adicionalmente, a independência energética dos sistemas off-grid amplia a resiliência da iluminação pública frente a falhas da rede de distribuição, tornando essa solução particularmente adequada para regiões periféricas, áreas de expansão urbana, rodovias, pontes e locais com limitações estruturais da infraestrutura elétrica convencional.

Dessa forma, conclui-se que a implementação de luminárias fotovoltaicas autônomas representa uma alternativa tecnicamente robusta, operacionalmente resiliente e alinhada aos princípios de eficiência energética e sustentabilidade aplicados à modernização dos sistemas de iluminação pública.

Por fim, recomenda-se que trabalhos futuros aprofundem análises relacionadas ao desempenho luminotécnico em campo, degradação dos sistemas de armazenamento, avaliação do ciclo de vida dos equipamentos e estudos econômicos de longo prazo, incluindo indicadores como VPL, TIR, payback descontado e custo nivelado de energia, de modo a subsidiar políticas públicas e estratégias de expansão em larga escala.

REFERÊNCIAS

- [1] OLIVEIRA, I. S.; TORRICO, C. M.; RAPOSO, C. L. L.; LIVRAMENTO, L. O.; PIMENTEL, N. M. S. R. *O uso de luminárias fotovoltaicas autônomas (off grid) em áreas com altos índices de furto em redes de baixa tensão de iluminação pública*. Artigo científico (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade São Lucas – UniSL Afya, Porto Velho, 2026. Orientadora Co-autora: Me. Eng^a. PIMENTEL, N.M.S.R.
- [2] BRASIL. Constituição da República Federativa do Brasil de 1988. Brasília, DF: Presidência da República, 1988.
- [3] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012. Brasília, DF, 2012.
- [4] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resolução Normativa nº 1000, de 7 de dezembro de 2021. Brasília, DF, 2021.
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5101: Iluminação pública — Procedimento. Rio de Janeiro, 2024.
- [6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5410: Instalações elétricas de baixa tensão. Rio de Janeiro, 2004.

- [7] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5419: Proteção contra descargas atmosféricas. Rio de Janeiro, 2015.
- [8] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 16690: Instalações elétricas de sistemas fotovoltaicos. Rio de Janeiro, 2019.
- [9] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 8451: Postes de concreto armado e protegido para redes de distribuição de energia elétrica - Especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2019.
- [10] INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA (INMETRO). Portaria nº 20, de 15 de fevereiro de 2017. Rio de Janeiro, RJ, 2017.
- [11] CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO (CRESESB). Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro, 2018.
- [12] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Trends in Photovoltaic Applications. Paris, 2022.
- [13] VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações. São Paulo: Érica, 2015.
- [14] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Relatório de perdas técnicas e não técnicas no sistema de distribuição de energia elétrica. Brasília, DF, 2025.
- [15] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Regulação e diretrizes sobre serviços de iluminação pública. Brasília, DF, [s.d.]. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/iluminacao-publica>. Acesso em: 24 abr. 2026.
- [16] ENEL DISTRIBUIÇÃO. Furto de cabos impacta mais de 170 mil clientes no Brasil. São Paulo, SP, 2025. Disponível em: <https://www.enel.com.br/pt-saopaulo/midia/press/d202506-furto-cabos-enel-atende-170-mil-clientes-pelo-Brasil.html>. Acesso em: 24 abr. 2026.
- [17] DISTRITO FEDERAL. Secretaria de Governo. Furtos de cabos de energia elétrica no DF e impactos financeiros. Brasília, DF, 2025. Disponível em: <https://segov.df.gov.br/w/furto-de-cabos-de-iluminacao-publica-em-2025-ultrapassa-86-km-no-df>. Acesso em: 24 abr. 2026.
- [18] PORTO VELHO (Município). Prefeitura Municipal. Vandalismo: furto de cabos compromete iluminação na capital. Porto Velho, RO, 2026. Disponível em: <https://www.portovelho.ro.gov.br/artigo/55640>. Acesso em: 24 abr. 2026.
- [19] PORTO VELHO (Município). Prefeitura Municipal. Furto de cabos compromete iluminação na Estrada dos Piriquitos. Porto Velho, RO, 2026. Disponível em: <https://www.portovelho.ro.gov.br/artigo/53391/>. Acesso em: 24 abr. 2026.
- [20] PORTO VELHO (Município). Prefeitura Municipal. Furto de cabos interrompe obra de iluminação na Praça do Contorno. Porto Velho, RO, 2025. Disponível em:

<https://www.portovelho.ro.gov.br/artigo/51759>. Acesso em: 24 abr. 2026.

- [21] RONDÔNIA (Estado). Polícia Militar. Operação Fio Desencapado combate furto de fios em Porto Velho. Porto Velho, RO, 2025. Disponível em: <https://www.pm.ro.gov.br/operacao-fio-desencapado-governo-e-prefeitura-combatem-receptacao-e-furto-de-fios-em-porto-velho/>. Acesso em: 24 abr. 2026.
- [22] ENERGISA RONDÔNIA. Alerta sobre riscos do furto de cabos de energia. Porto Velho, RO, 2025. Disponível em: <https://www.energisa.com.br>. Acesso em: 24 abr. 2026.
- [23] EMPRESA DE DESENVOLVIMENTO URBANO DE PORTO VELHO (EMDUR). PVH 100% iluminada. Porto Velho, RO, 2023. Disponível em: <https://emdur.portovelho.ro.gov.br/artigo/51975/>. Acesso em: 24 abr. 2026.
- [24] EMPRESA DE DESENVOLVIMENTO URBANO DE PORTO VELHO (EMDUR). Ata de Registro de Preços para aquisição de luminárias solares LED. Porto Velho, RO, 2023. Disponível em: <https://licita.emdurportovelho.com.br/licitacao/srp-020-emdur-2023/>. Acesso em: 24 abr. 2026.
- [25] EMPRESA DE DESENVOLVIMENTO URBANO DE PORTO VELHO (EMDUR). Implantação de iluminação pública na BR-364. Porto Velho, RO, 2022. Disponível em: <https://www.portovelho.ro.gov.br/artigo/34907>. Acesso em: 24 abr. 2026.
- [26] PORTO VELHO (Município). Ponte sobre o rio Madeira ganha nova iluminação com sistema solar. Porto Velho, RO, 2025. Disponível em: <https://www.portovelho.ro.gov.br/artigo/47522/>. Acesso em: 24 abr. 2026.
- [27] EMPRESA DE DESENVOLVIMENTO URBANO DE PORTO VELHO (EMDUR). Modernização da iluminação na Avenida Nações Unidas contempla 56 pontos de luz. Porto Velho, RO, 2025. Disponível em: <https://emdur.portovelho.ro.gov.br/artigo/50707/>. Acesso em: 24 abr. 2026.
- [28] EMPRESA DE DESENVOLVIMENTO URBANO DE PORTO VELHO (EMDUR). Implantação de iluminação pública na Avenida Guaporé com cerca de 150 luminárias LED. Porto Velho, RO, 2025. Disponível em: <https://www.portovelho.ro.gov.br/artigo/50503>. Acesso em: 24 abr. 2026.
- [29] EMPRESA DE DESENVOLVIMENTO URBANO DE PORTO VELHO (EMDUR). REGISTRO DE PREÇOS, PARA AQUISIÇÃO DE LUMINÁRIAS PÚBLICAS DO TIPO LED SOLAR PARA ATENDIMENTO DAS DEMANDAS POR MODERNIZAÇÃO DO PARQUE DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA DESTA EMPRESA DE DESENVOLVIMENTO URBANO - EMDUR. Disponível em: <https://licita.emdurportovelho.com.br/licitacao/srp-003-emdur-2024/>. Acesso em: 24 abr. 2026.
- [30] EMPRESA DE DESENVOLVIMENTO URBANO DE PORTO VELHO (EMDUR). AQUISIÇÃO DE LUMINÁRIA LED. Disponível em: <https://licita.emdurportovelho.com.br/licitacao/ata-d-e-registro-de-precos-no-008-2025-emdur/>. Acesso em: 24 abr. 2026.

- [31] EMPRESA DE DESENVOLVIMENTO URBANO DE PORTO VELHO (EMDUR). AQUISIÇÃO DE BRAÇOS DE LUMINÁRIAS PARA ILUMINAÇÃO PÚBLICA VISANDO ATENDER AS DEMANDAS DA EMPRESA DE DESENVOLVIMENTO URBANO – EMDUR. Disponível em: <https://licita.emdurportovelho.com.br/licitacao/srp-n-017-emdur-2023/>. Acesso em: 24 abr. 2026.
- [32] EMPRESA DE DESENVOLVIMENTO URBANO DE PORTO VELHO (EMDUR). AQUISIÇÃO DE MATERIAIS ELÉTRICOS. Disponível em: <https://licita.emdurportovelho.com.br/licitacao/ata-srp-01-2024/>. Acesso em: 24 abr. 2026.
- [33] EMPRESA DE DESENVOLVIMENTO URBANO DE PORTO VELHO (EMDUR). AQUISIÇÃO DE MATERIAIS ELÉTRICOS. Disponível em: <https://licita.emdurportovelho.com.br/licitacao/srp-n-008-emdur-2023/>. Acesso em: 24 abr. 2026.
- [34] AQUISIÇÃO DE POSTES DE CONCRETO TIPO DUPLO “T” E DE FERRO PARA ATENDER AS DEMANDAS DE ILUMINAÇÃO ORDINÁRIA DA EMPRESA DE DESENVOLVIMENTO URBANO – EMDUR. Disponível em: <https://licita.emdurportovelho.com.br/licitacao/srp-021-emdur-2023/>. Acesso em: 24 abr. 2026.