

Ministério da Educação
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas
Departamento de Engenharia de Produção, Administração e Economia

JARDEL DE SOUZA SILVA COSTA BARBOSA

Energia Solar Fotovoltaica como Solução Sustentável para a Iluminação Pública: Análise de Cenários e Impactos Econômicos

Ouro Preto
2024

Jardel de Souza Silva Costa Barbosa

**Energia Solar Fotovoltaica como Solução Sustentável para a
Iluminação Pública: Análise de Cenários e Impactos
Econômicos**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro de Produção.

Universidade Federal de Ouro Preto

Orientador: Prof. DSc. Gustavo Nikolaus Pinto de Moura

Ouro Preto
2024



FOLHA DE APROVAÇÃO

Jardel de Souza Silva Costa Barbosa

Energia Solar Fotovoltaica como Solução Sustentável para a Iluminação Pública: Análise de Cenários e Impactos Econômicos

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Produção

Aprovada em 19 de setembro de 2024

Membros da banca

Prof. D.Sc. - Gustavo Nikolaus Pinto de Moura - Orientador(a) Universidade Federal de Ouro Preto
Prof. D.Sc. - Bruna de Fátima Pedrosa Guedes Flausino- Universidade Federal de Ouro Preto
Prof. D.Sc. - Magno Silverio Campos - Universidade Federal de Ouro Preto

Gustavo Nikolaus Pinto de Moura, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 19/09/2024



Documento assinado eletronicamente por **Gustavo Nikolaus Pinto de Moura, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/09/2024, às 18:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Magno Silverio Campos, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/09/2024, às 19:50, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Bruna de Fatima Pedrosa Guedes Flausino, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/09/2024, às 19:50, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0781039** e o código CRC **7111C3D9**.

Dedico este trabalho à Jaqueline, minha mãe, por acreditar em mim mesmo quando eu duvidava, ao Joselito, meu pai, por me mostrar o caminho e à Vanda, minha avó, por suas palavras sábias que me acompanham sempre.

Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus, por me conceder força, sabedoria e perseverança ao longo de toda a minha jornada acadêmica. Sua presença foi fundamental em cada passo que dei.

Agradeço aos meus pais, Jaqueline e Joselito, e à minha avó, Vanda, pelo amor incondicional, apoio e incentivo que sempre me deram. Vocês foram minha base e motivação, e sou eternamente grato por tudo o que fizeram por mim. Um agradecimento especial também à Sarah, meu amor, por sua compreensão e apoio durante todo esse processo.

Agradeço também a toda a minha família e amigos, que sempre estiveram presentes, oferecendo palavras de encorajamento e apoio. Cada um de vocês teve um papel importante na minha trajetória.

Agradeço à Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) e à Escola de Minas, por me proporcionarem um ambiente de aprendizado tão enriquecedor. Sou grato por todas as oportunidades que tive durante minha formação. Agradeço a todos os professores que contribuíram para minha formação, compartilhando seu conhecimento e experiência, e ajudando a moldar minha visão acadêmica e profissional. Agradeço especialmente ao meu professor orientador, Gustavo, pela orientação, dedicação e apoio incondicional. Suas valiosas contribuições foram fundamentais durante toda minha graduação.

“A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo”

Albert Einstein

Resumo

O desenvolvimento sustentável é um conceito fundamental que busca equilibrar as necessidades econômicas, sociais e ambientais, promovendo um futuro que respeite os limites do planeta e assegure a qualidade de vida das gerações presentes e futuras. Neste contexto, este trabalho de conclusão de curso analisa a viabilidade da modernização do sistema de iluminação pública no município de Queluzito, Minas Gerais, por meio da implementação de tecnologias sustentáveis, através do Planejamento Energético Integrado. A pesquisa propõe simulações de quatro cenários distintos atuando tanto na demanda quanto na oferta de energia para identificar o cenário mais viável e sustentável. A revisão bibliográfica realizada foi essencial para fundamentar teoricamente o estudo, permitindo a identificação de melhores práticas e experiências em outras localidades. Essa análise crítica da literatura existente possibilitou a construção de um entendimento teórico sólido, que orientou a formulação das propostas. A revisão também destacou a importância do planejamento energético integrado e do envolvimento de diversas partes interessadas para garantir o sucesso da implementação das tecnologias. O modelo de simulação *HOMER Pro* permitiu uma análise detalhada da viabilidade técnica e econômica das propostas, indicando que a substituição das lâmpadas convencionais por *LED* e a utilização da energia solar fotovoltaica como principal fonte energética é o cenário mais vantajoso, representando uma economia total de R\$ 832.216,04 ao longo de 20 anos, se comparado ao cenário atual do município. A análise financeira, realizada por meio do modelo *HOMER Pro*, revelou um Payback Time de 5,12 anos para o investimento na usina solar e uma Taxa Interna de Retorno (TIR) de 23,7%, que indica uma alta rentabilidade do projeto. Essa solução, além de gerar economia, contribui para a sustentabilidade ambiental ao eliminar as emissões de CO_{2eq} geradas pelo setor de iluminação pública.

Palavras-chave: iluminação pública; energia solar; eficiência energética; desenvolvimento sustentável; Planejamento Energético Integrado.

Abstract

Sustainable development is a fundamental concept that seeks to balance economic, social, and environmental needs, promoting a future that respects planetary limits and ensures the quality of life for present and future generations. In this context, this course completion work analyzes the feasibility of modernizing the public lighting system in the municipality of Queluzito, Minas Gerais, through the implementation of sustainable technologies, via Integrated Energy Planning. The research proposes simulations of various scenarios, attending to both demand and energy supply, to identify the most viable and sustainable scenario. The bibliographic review carried out was essential to provide a theoretical foundation for the study, allowing for the identification of best practices and experiences in other localities. This critical analysis of the existing literature enabled the construction of a solid theoretical understanding that guided the formulation of the proposals. The review also highlighted the importance of integrated energy planning and the involvement of various stakeholders to ensure the success of the implementation of technologies. The HOMER Pro simulation model allowed for a detailed analysis of the technical and economic viability of the proposals, indicating that the substitution of conventional lamps with LEDs and the use of solar photovoltaic energy as the main energy source is the most advantageous scenario, representing a total saving of R\$ 832,216.04 over 20 years, compared to the current scenario of the municipality. The financial analysis, carried out through the HOMER Pro model, revealed a Payback Time of 5.12 years for the investment in the solar power plant and an Internal Rate of Return (IRR) of 23.7%, which indicates a high profitability of the project. This solution, in addition to generating savings, contributes to environmental sustainability by eliminating CO_{2eq} emissions generated by the public lighting sector.

Keywords: public lighting; solar energy; energy efficiency; sustainable development; Integrated Energy Planning.

Lista de abreviaturas e siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEN	Balanco Energético Nacional
HOMER	Hybrid Optimization Model for Electric Renewables
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEA	International Energy Agency
LED	Light Emitting Diode
NBR	Norma Brasileira
NREL	National Renewable Energy Laboratory
PDE	Plano Decenal de Expansão de Energia
PEI	Planejamento Energético Integrado
PIR	Planejamento Integrado de Recursos
Procel	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
ONU	Organização das Nações Unidas
VME	Vapor Metálico
VPL	Valor Presente Líquido
VSO	Vapor de Sódio
tep	Tonelada Equivalente de Petróleo

Lista de ilustrações

Figura 1 – Processo de Planejamento Energético Integrado	23
Figura 2 – Consumo final energético por segmento no setor de serviços	24
Figura 3 – Capacidade de geração da energia solar em GW	26
Figura 4 – Localização do projeto	31
Figura 5 – Taxa de irradiação solar em Queluzito (kWh/m ² /dia)	32
Figura 6 – Curva de carga inicial (kW/h)	34
Figura 7 – Perfil de consumo Anual do Cenário Referência	36
Figura 8 – Valor Presente Líquido - Cenário Referência	36
Figura 9 – Balanço de Emissões - Cenário Referência	37
Figura 10 – Capacidade Instalada Usina Fotovoltaica - Cenário Alternativo com Energia Fotovoltaica	38
Figura 11 – Valor Presente Líquido - Cenário Alternativo com Energia Fotovoltaica	39
Figura 12 – Comparação entre os cenários Referência e Alternativo com Energia Fotovoltaica	39
Figura 13 – Balanço de Emissões - Cenário Alternativo com Energia Fotovoltaica .	40
Figura 14 – Análise de Sensibilidade - Iluminação Convencional	41
Figura 15 – Nova curva de carga (kW/h)	44
Figura 16 – Perfil de consumo anual do cenário alternativo com substituição para lâmpadas <i>LED</i>	44
Figura 17 – Valor Presente Líquido - Cenário Alternativo com substituição para lâmpadas <i>LED</i>	45
Figura 18 – Balanço de Emissões - Cenário Alternativo com substituição para lâm- padas <i>LED</i>	46
Figura 19 – Capacidade Instalada Usina Fotovoltaica - Cenário Alternativo com Substituição para Lâmpadas <i>LED</i> e Energia Fotovoltaica	47
Figura 20 – Valor Presente Líquido - Cenário Alternativo com Tecnologia <i>LED</i> e Energia Fotovoltaica	48
Figura 21 – Comparação entre os cenários Alternativos Tecnologia <i>LED</i> e Energia Fotovoltaica	48
Figura 22 – Balanço de Emissões - Cenário alternativo <i>LED</i> com Energia Fotovol- taica	49
Figura 23 – Análise de Sensibilidade - Iluminação <i>LED</i>	50

Lista de tabelas

Tabela 1 – Cenários de Iluminação e Geração	28
Tabela 2 – Consumo de Energia Elétrica - Iluminação Pública	29
Tabela 3 – Equipamentos da iluminação pública de Queluzito	30
Tabela 4 – Carga Elétrica por Hora	33
Tabela 5 – Equipamentos da iluminação pública - <i>LED</i>	42
Tabela 6 – Nova Carga Elétrica por Hora	43
Tabela 7 – Resultados Financeiros	52

Lista de quadros

Quadro 1 – Principais resultados energéticos das ações do Procel em 2022	22
--	----

Sumário

	Lista de ilustrações	10
	Lista de tabelas	11
	Lista de quadros	12
1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivos	17
1.1.1	Objetivo Geral	17
1.1.2	Objetivos Específicos	17
2	METODOLOGIA	18
2.1	Planejamento Energético Integrado - Iluminação Pública de Queluzito-MG	18
2.2	Revisão Bibliográfica	20
3	REFERENCIAL TEÓRICO	21
3.1	Eficiência Energética	21
3.2	Planejamento Energético Integrado	22
3.3	Iluminação Pública	23
3.4	Energia Solar Fotovoltaica	25
3.5	Gestão Pública de Energia	27
4	APRESENTAÇÃO DOS CENÁRIOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	28
4.1	Dados de Entrada	29
4.1.1	Curva de Carga	29
4.1.2	Demanda inicial de energia por equipamentos	29
4.1.3	Premissas técnicas e econômicas	30
4.1.4	Recursos renováveis disponíveis	31
4.1.5	Consumo de energia	32
4.1.6	Compensação de energia	34
4.2	Cenários	35
4.2.1	Cenário Referência	35
4.2.2	Cenário Alternativo com Energia Fotovoltaica	37
4.2.3	Cenário Alternativo com Substituição para Lâmpadas LED	42

4.2.4	Cenário Alternativo com Substituição para Lâmpadas LED e Energia Fotovoltaica	46
5	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	52
	REFERÊNCIAS	55

1 Introdução

O cenário energético global enfrenta desafios urgentes e interligados: o crescimento exponencial da demanda por energia, a escassez de combustíveis fósseis, os impactos ambientais devastadores e a necessidade premente de um futuro sustentável.

De acordo com Sachs (2000), a sustentabilidade não é um destino final, mas sim um processo contínuo de mudança e adaptação. Ele enfatiza a importância de repensarmos nossos modelos de produção e consumo para construir um futuro sustentável, respeitando os limites do planeta e promovendo a justiça social.

O desenvolvimento socioeconômico e o crescimento populacional impulsionam um aumento vertiginoso na demanda por energia elétrica. Essa pressão sobre os recursos energéticos tradicionais, como petróleo, carvão e gás natural, intensifica a busca por alternativas mais sustentáveis.

Os combustíveis fósseis, base da matriz energética global, são finitos e não renováveis. Sua exploração exaure os recursos naturais, gera volatilidade nos preços e traz consigo questões geopolíticas complexas. Segundo Reis (2015), “A diversificação da matriz energética brasileira surge, então, como estratégia fundamental para enfrentar o desafio da segurança energética de maneira sustentável”.

A queima de combustíveis fósseis para geração de energia é um dos principais responsáveis pelas mudanças climáticas, pela poluição do ar e da água, e por diversos outros danos ambientais. Esses impactos negativos exigem a adoção urgente de práticas mais sustentáveis e de baixo impacto ambiental na produção de energia.

Diante dos desafios mencionados, a busca por fontes de energia renováveis, como solar, eólica, hidrelétrica e biomassa, se intensifica. Essas fontes, abundantes e inesgotáveis, oferecem uma alternativa promissora para atender às crescentes demandas energéticas da sociedade, promovendo um futuro mais sustentável e em harmonia com o meio ambiente.

“As fontes renováveis de energia são o caminho para um futuro energético mais limpo, seguro e sustentável, fundamental para combater as mudanças climáticas e garantir o acesso à energia para todos.” (IRENA, 2018)

O município de Queluzito, situado em Minas Gerais, apresenta características singulares que o tornam um objeto de estudo relevante para a análise da sustentabilidade em pequenas cidades. Segundo dados do IBGE (2022), a cidade conta com uma população de 1.770 habitantes e uma área de 153,56 km², a densidade demográfica de 11,53 hab/km² reflete a predominância rural da região. A economia local é baseada na agricultura familiar e no turismo ecológico. Essas características, aliadas à busca por um desenvolvimento sustentável, fazem da cidade um objeto de estudo interessante para soluções inovadoras e adaptadas à realidade local, como a otimização da iluminação pública.

Dada a importância da iluminação pública para a segurança e o bem-estar da popu-

lação, este estudo se concentra na análise do sistema de iluminação de vias públicas de Queluzito, composto por 333 postes instalados tanto na área urbana quanto rural. A partir da compreensão das particularidades desse sistema, busca-se identificar oportunidades para a implementação de soluções mais sustentáveis e eficientes, que contribuam para o desenvolvimento local e a redução dos impactos ambientais.

O sistema de iluminação pública da cidade conta, em sua maioria, com lâmpadas convencionais como *VME* (Vapor Metálico) e *VSO* (Vapor de Sódio). A substituição dessas lâmpadas convencionais por lâmpadas *LED* (*Light Emitting Diodes*) representa um passo crucial na busca por maior eficiência energética e sustentabilidade. A tecnologia *LED* oferece inúmeras vantagens em relação às lâmpadas tradicionais, como maior durabilidade, menor consumo de energia e melhor qualidade da iluminação. Essa transição não apenas gera economia nos custos de energia e manutenção para os municípios, mas também contribui para a redução do impacto ambiental da iluminação pública, promovendo cidades mais inteligentes e sustentáveis.

A IEA (2022) destaca a iluminação *LED* como uma tecnologia transformadora, capaz de reduzir significativamente as emissões de CO_2 e contribuir para a eficiência energética global. Com o objetivo de alcançar 100% de vendas de iluminação *LED* até 2025, a Agência Internacional de Energia enfatiza a necessidade de políticas governamentais que acompanhem essa transição, marcando um passo crucial na transformação do setor de construções para um cenário de emissões zero até 2050.

Outra solução promissora e alinhada aos princípios da sustentabilidade é a utilização da energia solar para suprir a demanda do sistema de iluminação pública. A energia solar é abundante no contexto brasileiro e oferece uma alternativa renovável para a geração de eletricidade minimizando os impactos ambientais. Além de contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa, a energia solar fotovoltaica também pode gerar economia nos custos de energia elétrica para os municípios, tornando a iluminação pública mais eficiente e acessível. Segundo Nunes-Villela (2020), “O avanço da energia solar fotovoltaica no Brasil reflete o compromisso do país com a sustentabilidade e a descarbonização. A crescente adoção dessa tecnologia renovável é um passo significativo na direção de um futuro energético mais seguro e sustentável”.

Será avaliado o impacto dessas medidas a partir da modelagem energética do sistema de iluminação pública do município. O modelo usado será o *HOMER Pro* (Otimização Híbrida de Recursos Energéticos Múltiplos).

1.1 Objetivos

Os objetivos serão descritos a seguir.

1.1.1 Objetivo Geral

Elaborar um Planejamento Energético Integrado para o setor de iluminação pública de Queluzito-MG, visando a otimização do consumo energético, a redução dos custos operacionais e a promoção da sustentabilidade ambiental através da implementação de tecnologias eficientes e práticas sustentáveis.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Analisar o potencial de implementação de fontes alternativas de energia, especialmente a energia solar, para suprir a demanda energética da iluminação pública em Queluzito-MG;
- Realizar simulações e otimizações de sistemas híbridos de energia utilizando o software *HOMER*, considerando fatores técnicos e econômicos;
- Realizar revisão bibliográfica sobre Planejamento Energético Integrado;
- Identificar configurações eficientes que atendam às demandas técnicas e econômicas da cidade, comparando cenários com e sem a substituição das lâmpadas por *LED*;
- Avaliar o retorno financeiro, o *Payback Time* e a taxa interna de retorno dos projetos de implementação de energia solar na cidade;
- Demonstrar a viabilidade da energia solar e da substituição das lâmpadas por *LED* como medidas sustentáveis para reduzir custos e emissões de gases poluentes em Queluzito-MG.

A modelagem energética constitui ferramenta crucial para a análise e otimização de sistemas de energia, sendo fundamental para estudos que visam a implementação de fontes alternativas, como no caso da iluminação pública de Queluzito-MG. Este estudo utiliza a modelagem energética como metodologia para representar matematicamente e computacionalmente o sistema energético da cidade, considerando variáveis como demanda energética, disponibilidade de recursos renováveis, custos de instalação e operação, entre outros fatores relevantes.

2 Metodologia

O presente trabalho consiste em uma pesquisa científica de natureza aplicada, com abordagem mista (qualitativa e quantitativa), que visa realizar uma análise técnico-econômica da estrutura tecnológica e do consumo energético do sistema de iluminação pública em Queluzito-MG. Para a coleta de dados, foi utilizado o documento de Demonstrativo do Faturamento da Iluminação Pública, que detalha o tipo, quantidade e potência dos equipamentos do sistema de iluminação, fornecendo informações cruciais sobre a composição e o perfil de consumo da rede.

A partir dos dados coletados, será elaborado um Planejamento Energético Integrado (PEI) para a iluminação pública de Queluzito-MG. O PEI consistirá na construção de cenários futuros, considerando diferentes alternativas de modernização e otimização do sistema, como a substituição de lâmpadas convencionais por tecnologia *LED* e a utilização de fontes de energia renováveis.

De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (2018), o planejamento energético integrado é fundamental para assegurar a segurança energética, a sustentabilidade ambiental e a competitividade econômica em nível nacional, estadual ou municipal. Esse processo permite a tomada de decisões estratégicas e a coordenação de ações entre os diversos agentes do setor energético.

2.1 Planejamento Energético Integrado - Iluminação Pública de Queluzito-MG

Para a elaboração do planejamento energético do setor de Iluminação Pública da cidade de Queluzito-MG, serão realizadas quatro etapas fundamentais, visando identificar e implementar soluções que promovam a otimização do consumo energético, a redução de custos operacionais e a melhoria da qualidade da iluminação pública.

1. Coleta de dados: Nesta etapa, serão coletados dados detalhados sobre o sistema de iluminação pública atual, incluindo informações sobre o consumo energético, tipos de lâmpadas utilizadas, localização dos pontos de iluminação e outros dados relevantes. Essa coleta será realizada por meio de levantamento em campo, análise de documentos e informações fornecidas pela concessionária de energia.
2. Definição das premissas do projeto: Com base nos dados coletados, serão estabelecidas as premissas do projeto, que incluem a área de abrangência do estudo, o período de análise, as metas de redução de consumo energético e as tecnologias a serem consideradas. Essa etapa é crucial para delimitar o escopo do projeto e direcionar as análises subsequentes.

3. Elaboração da modelagem energética: Utilizando o modelo HOMER (*Hybrid Optimization Model for Electric Renewables*), será realizada a modelagem energética do sistema de iluminação pública. Essa modelagem permitirá simular o comportamento do sistema sob diferentes cenários, considerando a integração de fontes renováveis de energia, como a solar fotovoltaica, e a substituição das lâmpadas convencionais por tecnologias mais eficientes, como as lâmpadas *LED*.
4. Construção de cenários energéticos: Com base na modelagem energética, serão construídos diferentes cenários, variando as tecnologias e estratégias de eficiência energética. Esses cenários serão avaliados em termos de viabilidade técnica, econômica e ambiental, considerando indicadores como o *payback time*, a redução de emissões de gases de efeito estufa e a melhoria da qualidade da iluminação. A análise dos resultados permitirá identificar as soluções mais adequadas para o contexto de Queluzito-MG, contribuindo para a elaboração de um PEI eficaz e sustentável.

A modelagem energética constitui ferramenta crucial para a análise e otimização de sistemas de energia, sendo fundamental para estudos que visam a implementação de fontes alternativas, como no caso da iluminação pública de Queluzito-MG. Este estudo utiliza a modelagem energética como metodologia para representar matematicamente e computacionalmente o sistema energético da cidade, considerando variáveis como demanda energética, disponibilidade de recursos renováveis, custos de instalação e operação, entre outros fatores relevantes.

Para a análise do caso de Queluzito-MG, será empregado o modelo *HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewables)*, desenvolvido pelo *NREL (National Renewable Energy Laboratory)* dos Estados Unidos da América. Essa ferramenta possibilita a simulação de diferentes cenários, incluindo a integração de energia solar, e a avaliação da viabilidade técnica e econômica de cada configuração.

O *HOMER Pro* é uma ferramenta de simulação e otimização poderosa, que permite avaliar a viabilidade técnica e econômica de sistemas de energia em diversas localidades. No caso específico de Queluzito-MG, o *HOMER Pro* será utilizado para simular diferentes cenários para identificar a configuração mais adequada para atender às necessidades energéticas da região. Essa ferramenta é capaz de modelar uma ampla variedade de componentes de um sistema elétrico, como painéis solares, turbinas eólicas, baterias, geradores e cargas, permitindo aos pesquisadores e engenheiros analisar o desempenho do sistema em diferentes condições e otimizar sua operação para maximizar a geração de energia renovável e reduzir os custos. Em resumo, o *HOMER Pro* oferece as seguintes possibilidades:

- Simulação de diferentes cenários: Permite simular uma variedade de configurações de sistemas de energia renovável, considerando diferentes fontes de energia, tamanhos de sistemas e condições climáticas;

- Otimização: Identifica a configuração mais adequada para um determinado local, considerando fatores técnicos e econômicos, como custo inicial, custos de operação e manutenção, e geração de energia;
- Análise de sensibilidade: Avalia o impacto de diferentes variáveis no desempenho do sistema, como variações nos preços de energia, incentivos governamentais e mudanças nas condições climáticas;
- Análise de ciclo de vida: Permite avaliar o impacto ambiental de um sistema de energia renovável ao longo de seu ciclo de vida, desde a produção dos componentes até a sua disposição final.

2.2 Revisão Bibliográfica

A revisão bibliográfica é uma etapa fundamental na construção do conhecimento científico, pois permite a contextualização do tema em estudo e a identificação de lacunas na literatura existente. Neste trabalho, a revisão foi realizada com o objetivo de fundamentar teoricamente a análise da viabilidade da energia solar fotovoltaica e da substituição das lâmpadas convencionais por *LEDs* na iluminação pública de Queluzito-MG.

A pesquisa envolveu a busca por artigos, livros, teses e relatórios técnicos que abordam temas como planejamento energético integrado, eficiência energética, tecnologias de iluminação pública e a aplicação de energias renováveis. A seleção dos materiais foi feita com base em critérios de relevância, atualidade e credibilidade das fontes, priorizando publicações recentes e reconhecidas na área de energia e sustentabilidade.

A análise crítica da literatura permitiu identificar melhores práticas e experiências de outras localidades que implementaram soluções semelhantes, contribuindo para a formulação de propostas adequadas ao contexto de Queluzito-MG. Além disso, a revisão destacou a importância do envolvimento de diversas partes interessadas no planejamento e na implementação de tecnologias sustentáveis, evidenciando que o sucesso de projetos energéticos depende não apenas da viabilidade técnica e econômica, mas também do apoio da comunidade e de políticas públicas eficazes.

Os resultados da revisão bibliográfica foram fundamentais para a definição dos cenários a serem simulados no modelo *HOMER Pro*, permitindo uma análise mais robusta e embasada das alternativas propostas. Assim, a revisão não apenas fundamentou teoricamente o estudo, mas também orientou a escolha das metodologias e ferramentas a serem utilizadas na análise da viabilidade das soluções energéticas para a iluminação pública.

3 Referencial teórico

Este capítulo tem como objetivo apresentar os fundamentos teóricos da pesquisa, baseados em fontes acadêmicas e literárias, que sustentarão o desenvolvimento do trabalho.

3.1 Eficiência Energética

“A eficiência energética é fundamental para superar os desafios enfrentados pelo sistema global de energia, à medida que procuramos garantir um fornecimento de energia seguro, sustentável e acessível para os cidadãos em todo o mundo”. (IEA, 2018)

“Eficiência energética é a relação entre a quantidade de energia que se utiliza em uma atividade e a que está disponível para sua realização, ou seja, requer o menor gasto de energia possível para desenvolver um serviço”. (SANTOS *et al.*, 2015)

Segundo Souza *et al.* (2009), na década de 1980, diversos países implementaram medidas inovadoras para otimizar a gestão energética. Dentre elas, destacaram-se os programas de Gerenciamento do Lado da Demanda (GLD), que buscavam reduzir o consumo de energia através de diversas estratégias. Paralelamente, o Planejamento Integrado de Recursos (PIR) emergiu como uma nova abordagem, considerando a eficiência energética como uma alternativa à expansão da oferta. Nos Estados Unidos, especificamente, surgiram métodos de regulação tarifária por incentivos, visando compartilhar os benefícios da melhoria do desempenho econômico das concessionárias com os consumidores.

“Eficiência energética é a racionalização de energia e se fundamenta nas leis da Termodinâmica. A eficiência energética abrange o conjunto de ações de racionalização, que levam à redução do consumo de energia, sem perda na quantidade ou qualidade dos bens e serviços produzidos, ou no conforto disponibilizado pelos sistemas energéticos utilizados”. (GODOI; JÚNIOR, 2009, p. 5).

Segundo Selvakkumaran e Limmeechokchai (2013), a eficiência energética emerge como uma solução estratégica para mitigar os impactos ambientais associados ao crescimento econômico. Ao reduzir o consumo de energia, é possível diminuir a emissão de gases do efeito estufa e a dependência de importações energéticas, contribuindo para a segurança energética.

De acordo com EPE (2021), os ganhos de eficiência energética em 2031 são estimados para atender a cerca de 17 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (tep), dados do PDE (Plano Decenal de Expansão de Energia) 2031, representando aproximadamente 7% do consumo final de energia do país em 2020, dados do BEN (Balanço Energético Nacional) 2021. Os setores de transporte e indústria devem apresentar as maiores contribuições para essa economia de energia.

O Procel, Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica, é uma iniciativa do Governo Brasileiro criada com o objetivo de promover a eficiência energética no país. Instituído em 1985, o programa tem como foco principal orientar os consumidores na escolha de produtos mais eficientes, reduzindo o consumo de energia elétrica e, conseqüentemente, os impactos ambientais. O selo Procel, símbolo do programa, é aplicado em diversos produtos eletroeletrônicos, indicando aqueles que apresentam os melhores níveis de eficiência energética dentro de suas respectivas categorias.

“O Selo Procel indica ao consumidor os produtos que apresentam os melhores níveis de eficiência energética dentro da sua categoria (ventiladores de teto, lavadoras automáticas, geladeiras). Assim, se você for a uma loja para comprar um eletrodoméstico e escolher aquele com o selo Procel, saberá que este produto consome menos energia que outro equivalente sem o selo, proporcionando economia na conta de eletricidade e acarretando menos impactos no meio ambiente”. (EPE, 2015).

Quadro 1 – Principais resultados energéticos das ações do Procel em 2022

Resultado	Total	Unidade
Energia economizada	22,10	bilhões de kWh
Demanda Retirada da Ponta	7.481	MW
Emissão de CO_2 equivalente evitada	942	mil tCO_2e

Fonte: (PROCEL, 2023)

Embora os resultados do Procel sejam expressivos, ainda há desafios a serem superados para a consolidação da cultura de eficiência energética no Brasil. A expansão do programa para novos setores e a intensificação das campanhas de conscientização são essenciais para alcançar resultados ainda mais significativos. Além disso, a atualização contínua dos critérios para a obtenção do selo Procel é fundamental para garantir que os produtos disponíveis no mercado sejam cada vez mais eficientes.

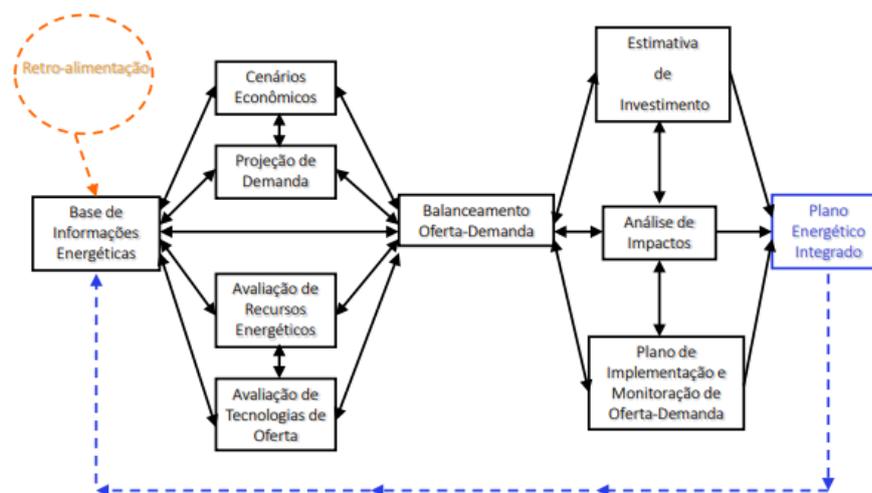
3.2 Planejamento Energético Integrado

Conforme SILVA e Bermann (2002), o planejamento energético desempenha um papel crucial ao identificar as fontes energéticas mais adequadas para suprir as necessidades da sociedade, considerando aspectos tecnológicos, econômicos, sociais e ambientais. Além disso, essa ferramenta permite otimizar o uso das fontes de energia por meio da identificação de tecnologias eficientes para o consumo final. A construção de cenários futuros é fundamental para a resolução de conflitos entre oferta e demanda, meio ambiente e desenvolvimento econômico.

O planejamento energético integrado, como ilustrado na Figura 1, é um processo iterativo que busca equilibrar a oferta e a demanda de energia, considerando fatores como

recursos energéticos disponíveis, tecnologias, cenários econômicos e impactos ambientais. A partir de uma base de dados consolidada, são projetadas as necessidades futuras e avaliadas as opções tecnológicas para atendê-las. Após a análise de impactos, é elaborado um plano detalhado, que inclui metas, ações e mecanismos de monitoramento para garantir sua implementação e eficácia.

Figura 1 – Processo de Planejamento Energético Integrado



Fonte: (FERREIRA; MACHADO, 2016)

Conforme SILVA e Cândido (2015), a construção de um planejamento energético nacional alinhado com os princípios do desenvolvimento sustentável pressupõe a integração de fontes renováveis à matriz energética. O autor argumenta que as fontes tradicionais, por si só, são insuficientes para garantir a sustentabilidade energética a longo prazo.

“As atividades de transformação e de produção requerem energia para sua realização. O aumento dessas atividades tem feito a demanda humana por energia crescer a níveis que tornaram crítica a questão da obtenção e oferta de recursos energéticos. Não obstante, toda forma de uso da energia implica em impactos diversos que vão além do âmbito do uso em si. Questões como estas justificam a pesquisa por uma abordagem abrangente e mais adequada do planejamento energético.” (UDAETA, 2012).

De acordo com Paes (2018), diante da crescente importância do desenvolvimento sustentável, o planejamento energético se torna fundamental para o crescimento econômico de um país. Isso porque é preciso garantir o abastecimento energético contínuo sem comprometer os recursos naturais, tanto os renováveis quanto os não renováveis.

3.3 Iluminação Pública

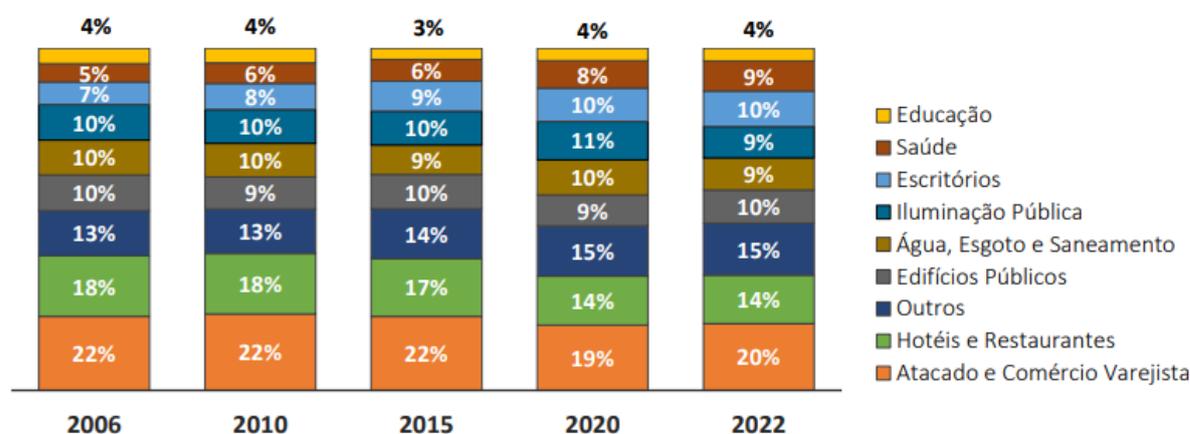
A iluminação pública é um componente fundamental para a segurança e qualidade de vida nas cidades. Ela garante visibilidade noturna, previne crimes, estimula atividades

sociais e facilita a mobilidade urbana. Com o avanço tecnológico, a eficiência energética se tornou uma prioridade nesse setor, impulsionando a adoção de soluções mais sustentáveis, como as lâmpadas *LED*. Essas tecnologias, além de reduzir o consumo de energia e os custos operacionais, contribuem para a diminuição da poluição, alinhando-se aos objetivos de desenvolvimento sustentável. A modernização da iluminação pública, especialmente em cidades como Queluzito-MG, representa uma oportunidade para melhorar a infraestrutura urbana e promover um ambiente mais seguro e sustentável.

“A Iluminação Pública desempenha um papel de extrema importância no desenvolvimento, progresso, funcionamento, segurança, socialização e na valorização das cidades. Pois áreas bem iluminadas proporcionarão o aumento de práticas esportivas, eventos culturais, o envolvimento da prefeitura e instituições em prol de realizações comemorativas, festividades, cerimônias, festivais que busquem a socialização e a valorização dos espaços públicos. Além de impedir, através de uma boa visibilidade durante a noite, atos criminosos, roubos, vendas de produtos ilícitos, e ainda reduzir os acidentes de trânsito sejam com pedestres, veículos com choques com meio-fio, buracos e irregularidades no solo”. (AGUERA, 2015, p. 23).

A importância da iluminação pública na vida urbana é inegável. No entanto, o consumo de energia desse setor é significativo, representando cerca de 15% do consumo total do setor de serviços no país em 2022, conforme mostra a Figura 2. Essa alta demanda energética torna a busca por soluções mais eficientes, como a adoção de lâmpadas *LED*, uma prioridade para a gestão pública. Ao otimizar a iluminação pública, não apenas reduzimos os custos operacionais, mas também contribuimos para a sustentabilidade ambiental, alinhando-nos aos objetivos de desenvolvimento sustentável.

Figura 2 – Consumo final energético por segmento no setor de serviços



Fonte: ((EPE), 2023)

A iluminação pública é fundamental para o desenvolvimento urbano, proporcionando segurança e contribuindo para o bem-estar da população. Segundo Brandão (2013), a

iluminação pública está diretamente ligada à qualidade de vida, sendo essencial para o reconhecimento dos espaços públicos e a orientação de trajetos, especialmente nas vias rodoviárias.

Conforme Soares, Baratella e Griebenow (2018), a utilização de lâmpadas *LED* na iluminação pública demonstra ser uma solução eficaz para a otimização dos serviços públicos. Essa tecnologia possibilita uma redução substancial nos gastos com energia elétrica, graças à sua maior eficiência energética e vida útil prolongada. Além disso, o controle remoto das luminárias *LED* permite uma gestão mais eficiente da iluminação pública, reduzindo custos operacionais e de manutenção e possibilitando a integração com outras tecnologias para a construção de Cidades Inteligentes. Segundo o Ministério de Minas e Energia - MME (2023) mais de 150 municípios brasileiros estão avançando na modernização da iluminação pública, adotando um sistema mais eficiente e durável até 2025, implementando a tecnologia *LED* na iluminação pública.

Silva e Araújo (2018) realizaram um estudo sobre a aplicação da tecnologia *LED* na orla de Macapá-AP. Concluiu-se que a utilização de luminárias *LED* na iluminação pública não apenas melhora a qualidade da iluminação nas vias, mas também contribui significativamente para a mobilidade urbana e a sustentabilidade ambiental. A pesquisa demonstrou que a tecnologia *LED* é capaz de reduzir o consumo de energia e é fabricada com materiais menos poluentes, promovendo um espaço público mais seguro e saudável, conforme as diretrizes estabelecidas pela norma NBR 5101 para projetos de iluminação pública

A norma ABNT NBR 5101:2024 estabelece critérios técnicos para a iluminação pública, visando garantir a segurança de pedestres e veículos. Essa norma aborda aspectos como os níveis mínimos de iluminância para diferentes tipos de vias, a uniformidade da iluminação para evitar sombras excessivas, os limites de ofuscamento para garantir o conforto visual e a classificação das luminárias com base em sua eficiência energética. Além disso, a norma também define requisitos para a instalação e manutenção da iluminação pública, incluindo a altura das luminárias e o espaçamento entre elas, bem como os limites para a emissão de luz no céu noturno, com o objetivo de reduzir a poluição luminosa.

3.4 Energia Solar Fotovoltaica

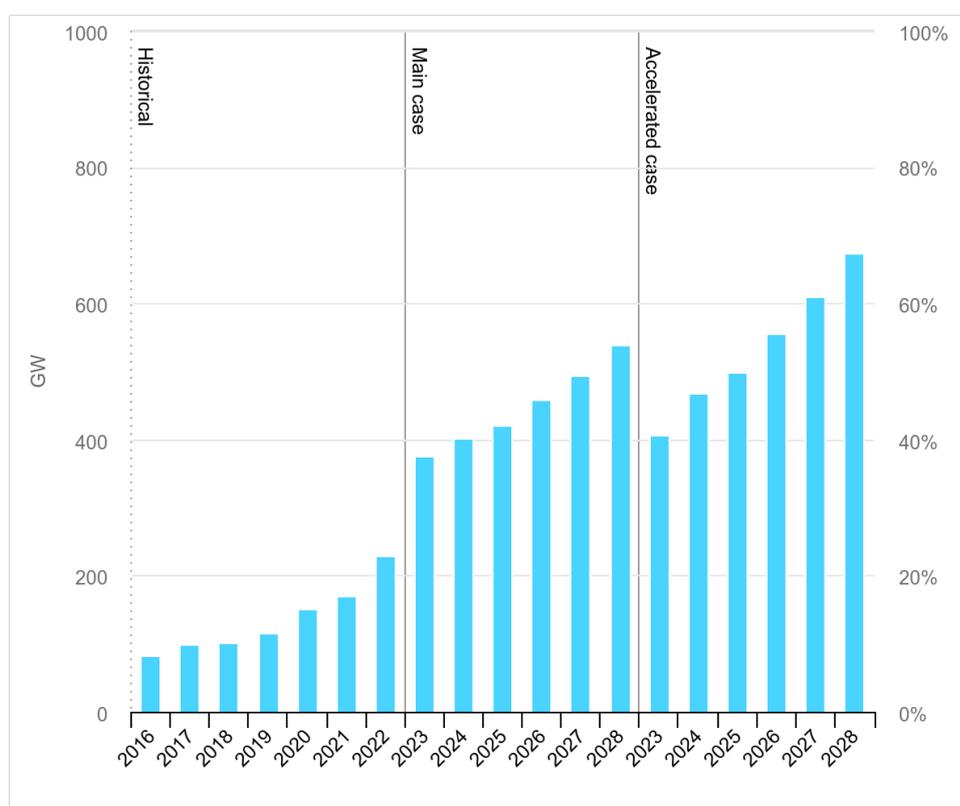
“A energia solar fotovoltaica é obtida através da conversão da radiação solar em eletricidade por intermédio de materiais semicondutores. Esse fenômeno é conhecido como Efeito Fotovoltaico.” (BRAGA, 2008)

“O Sol constitui a principal fonte de energia do planeta Terra e é responsável pela manutenção da vida atuando como uma fonte de energia inesgotável. A captação da energia solar para sua utilização como fonte de energia elétrica e térmica, por exemplo, tem grande potencial como uma alternativa aos métodos atuais de produção de energia baseados em recursos não-renováveis e limitado.” (PINHO; GALDINO, 2014)

Segundo Silva *et al.* (2020), a energia solar tem se destacado no cenário energético brasileiro devido às suas diversas vantagens em relação a fontes tradicionais como carvão e gás. Além disso, a redução nos custos de instalação tem tornado a energia solar a opção mais econômica para geração de eletricidade.

O gráfico apresentado pela Figura 3 demonstra um crescimento exponencial na capacidade instalada de geração de energia solar fotovoltaica ao longo dos últimos anos, evidenciando uma tendência global de transição para fontes de energia renováveis. Essa expansão se dá por fatores como a redução dos custos dos equipamentos como os módulos fotovoltaicos de acordo com os avanços tecnológicos, as políticas públicas que incentivam o investimento no setor solar e o aumento da conscientização ambiental que impulsiona a busca por fontes mais limpas de energia.

Figura 3 – Capacidade de geração da energia solar em GW



Fonte: (IEA, 2024)

De acordo com a ANEEL (2023) (Agência Nacional de Energia Elétrica), em 2023, houve um significativo aumento na instalação de sistemas fotovoltaicos de geração distribuída no Brasil, ultrapassando a marca de 625 mil unidades. Esse crescimento resultou em um acréscimo de mais de 837 mil unidades consumidoras que passaram a usufruir dos benefícios dos excedentes e créditos energéticos gerados por esses sistemas.

3.5 Gestão Pública de Energia

A gestão eficiente da energia no setor público emerge como um desafio premente em um contexto global marcado pela crescente demanda energética e pelos impactos das mudanças climáticas. A busca por soluções sustentáveis e economicamente viáveis impulsiona a necessidade de compreender as práticas e políticas adotadas por diferentes órgãos públicos. Torna-se importante analisar as principais abordagens e ferramentas utilizadas na gestão da energia no setor público, identificando tanto os desafios quanto as oportunidades para a otimização do consumo energético e a redução da pegada ambiental.

“O ambiente da gestão pública de energia é desenvolvido através de políticas públicas no setor elétrico, que geralmente pretendem demonstrar que os investimentos objetivam o crescimento econômico e a melhoria das condições de vida da população. A energia elétrica compreende o produto de um processo adequado de uso de propriedades físico-químicas e eletromagnéticas da matéria para propiciar o funcionamento de equipamentos fornecedores de usos finais pela sociedade.” (REIS; FADIGAS; CARVALHO, 2012).

Para Lage, Morais e Morais (2020) a gestão energética em municípios tem se tornado um tema central nas discussões sobre gestão pública, especialmente no que diz respeito à otimização de custos. A importância da implementação de políticas públicas eficazes nessa área tem sido cada vez mais reconhecida.

“A gestão da energia elétrica não é uma solução para a falta de recursos dos municípios, mas pode contribuir significativamente para reduzir os impactos deste insumo essencial nas contas públicas e permitir a destinação de tais economias para outras iniciativas necessárias.” (SAIDEL, 2005).

Segundo Kurahassi (2006), a gestão eficiente dos recursos energéticos nos municípios pode gerar benefícios para a população. No entanto, para que esses resultados sejam alcançados, é fundamental a implementação de políticas públicas específicas, com a participação de diversos setores da sociedade. Ele ainda explica que os custos com energia elétrica são influenciados pela forma de utilização e aquisição da energia, sendo a gestão eficiente deste recurso fundamental para reduzir gastos e otimizar a prestação de serviços públicos.

A gestão da energia no setor público apresenta um potencial significativo para gerar benefícios econômicos e ambientais. A otimização do consumo energético pode reduzir custos, melhorar a eficiência operacional e diminuir a emissão de gases de efeito estufa. A literatura analisada demonstra que a implementação de políticas públicas eficazes nessa área é um caminho promissor para alcançar esses objetivos. No futuro, espera-se que a crescente conscientização sobre a importância da sustentabilidade e o avanço das tecnologias energéticas impulsionem ainda mais a adoção de práticas de gestão energética eficientes no setor público.

4 Apresentação dos cenários e discussão dos resultados

Com o objetivo de avaliar a viabilidade técnica, econômica e ambiental da implementação de um sistema de iluminação pública mais sustentável em Queluzito-MG, propôs-se quatro cenários distintos. Essa análise visa identificar a configuração ideal do sistema, considerando aspectos como a demanda energética, a disponibilidade de recursos naturais, os custos de investimento e operação, e os impactos ambientais, a fim de contribuir para a otimização dos recursos municipais e a redução das emissões de gases do efeito estufa. A seguir, são apresentados os cenários analisados.

1. **Cenário Referência:** O primeiro cenário representa a situação atual do setor de iluminação pública no município, com lâmpadas convencionais e dependência total da rede elétrica.
2. **Cenário Alternativo com Energia Fotovoltaica:** O segundo cenário introduz uma usina solar projetada para suprir a demanda energética do setor de iluminação pública.
3. **Cenário Alternativo com Substituição para Lâmpadas *LED*:** O terceiro cenário considera a substituição das lâmpadas convencionais por lâmpadas *LED*, que oferecem maior eficiência energética e menor consumo energético.
4. **Cenário Alternativo com Substituição para Lâmpadas *LED* e Energia Fotovoltaica:** O quarto cenário combina a usina solar com a substituição para lâmpadas *LED*, maximizando os benefícios econômicos e ambientais.

A avaliação desses cenários permitirá uma discussão abrangente sobre os impactos financeiros, técnicos e ambientais de cada abordagem, contribuindo para a tomada de decisões informadas sobre a implementação de soluções sustentáveis na iluminação pública da cidade. Os tipos de lâmpadas e as fontes de energia empregadas em cada cenário são apresentadas na Tabela 1:

Tabela 1 – Cenários de Iluminação e Geração

Cenário	Lâmpadas	Fonte
1	VME, VSO e LED	Rede
2	VME, VSO e LED	Rede e Usina Solar
3	LED	Rede
4	LED	Rede e Usina Solar

Fonte: Elaboração Própria

4.1 Dados de Entrada

Os dados foram retirados das tarifas de energia referentes à iluminação pública, fornecidas pela Prefeitura Municipal de Queluzito, servindo como a base fundamental para a simulação e otimização do sistema híbrido de energia renovável. Os principais parâmetros para realizar a modelagem *HOMER* estão descritos nos itens a seguir.

4.1.1 Curva de Carga

A curva de carga representa a quantidade de energia elétrica necessária para iluminar publicamente a cidade de Queluzito. Esse dado é fundamental para dimensionar corretamente um sistema fotovoltaico e garantir que ele atenda à demanda energética da cidade, contribuindo para a eficiência energética e a sustentabilidade. Tabela 2

Tabela 2 – Consumo de Energia Elétrica - Iluminação Pública

Mês/Ano	Consumo kWh	Média kWh/Dia
ago/22	18.280	589,03
set/22	18.291	690,03
out/22	17.704	690,13
nov/22	18.107	584,09
dez/22	17.515	583,83
jan/23	18.120	584,51
fev/23	18.066	573,75
mar/23	17.787	573,12
abr/23	17.727	571,83
mai/23	17.136	571,16
jun/23	17.737	572,16
jul/23	17.184	672,13
ago/23	17.736	672,09

Fonte: Elaboração Própria

4.1.2 Demanda inicial de energia por equipamentos

Para a definição da demanda, utilizou-se a lista de todos os equipamentos presentes no sistema de iluminação pública municipal (lâmpadas, reatores, relés) e suas respectivas potências, fornecidos pela concessionária de energia elétrica. A Tabela 3 apresenta a quantidade de equipamentos, a tecnologia de cada um, a potência de cada lâmpada, a quantidade de relés que acompanham cada tipo de equipamento e a potência total dos conjuntos (lâmpada e relé). A potência unitária de todos os relés é de 1,2 W.

Tabela 3 – Equipamentos da iluminação pública de Queluzito

Qtde.	Tipo de Lâmpada	Potência (W)	Qtde. Relé	Potência Total (kWh)
3	LED	50	3	0,154
95	LED	100	86	9,603
48	VME	80	43	3,901
3	VME	125	3	0,392
23	VSO	70	21	1,649
66	VSO	100	59	6,688
6	VSO	150	5	0,928
81	VSO	250	73	20,368
8	VSO	400	7	3,246

Fonte: Cemig, (2023)

4.1.3 Premissas técnicas e econômicas

A definição de parâmetros como custos de instalação e operação, vida útil dos equipamentos, taxas de juros e outros fatores críticos garante a viabilidade técnica e econômica do sistema.

- Taxa de juros: 11,75% (Fevereiro/2024);
- Taxa de inflação: 4%;
- Tempo de vida do projeto: 20 anos;
- Preço unitário do kWh provindo da rede da concessionária de energia: R\$ 0,52 (Cemig, (2023));
- Emissão de dióxido de carbono no Brasil: 100g/kWh (EPE, (2023));
- Preço de aquisição e instalação de 1 kW de placas fotovoltaicas: R\$ 2200,00 (EPE, (2022));
- Custo de operação e manutenção de 1 kW de placas fotovoltaicas: R\$ 14,00 ao ano;
- Redução de capacidade do sistema (Essa redução pode estar relacionada a diversos fatores, como temperatura, incidência de poeira, sombreamento, etc.): 80%;
- Dimensões de uma placa fotovoltaica de 250W: 1,64m de largura e 0,99m de comprimento (RESUN);
- Preço de aquisição e instalação de conversor de 1 kW de capacidade: R\$ 1100,00;
- Custo de operação e manutenção de conversor de 1 kW de capacidade: R\$ 14,00 ao ano;

- Vida útil conversor: 15 anos;
- Eficiência do conversor: 95%;
- Radiação solar média anual no município: 4,93 kWh/m²/dia. (Homer, (2024));
- Horário de funcionamento da iluminação pública: 18h a 06h.

4.1.4 Recursos renováveis disponíveis

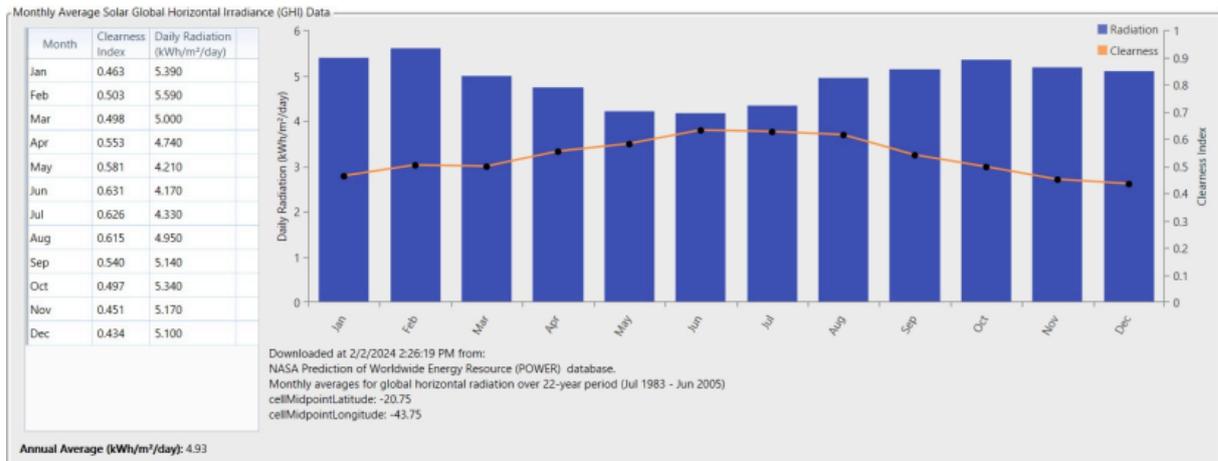
A caracterização detalhada do potencial solar da região, incluindo dados históricos de irradiação solar fornecidos pelo *HOMER*, é crucial para avaliar a viabilidade técnica do projeto. Para isso definiu-se o local mostrado na Figura 4.

Figura 4 – Localização do projeto



Fonte: Elaboração Própria a partir de Homer PRO

Essas informações são cruciais para dimensionar adequadamente sistemas fotovoltaicos, garantindo que eles atendam às demandas energéticas da área. A partir da localização anteriormente definida, a Figura 5 apresenta a taxa de irradiação solar em Queluzito ao longo do ano. Observa-se uma clara sazonalidade, com picos de irradiação nos meses mais quentes e valores menores no inverno. Essa variação é fundamental para determinar a capacidade de geração dos painéis solares e dimensionar adequadamente o sistema de armazenamento de energia, garantindo o fornecimento contínuo de eletricidade, mesmo em períodos de menor insolação.

Figura 5 – Taxa de irradiação solar em Queluzito (kWh/m²/dia)

Fonte: Elaboração Própria a partir de Homer PRO

4.1.5 Consumo de energia

Para fins de estudo, considerou-se que a iluminação tem seu horário de funcionamento entre as 18h e 06h, totalizando 12h por dia. A Tabela 4 apresenta o perfil de carga utilizado como base para os cálculos de dimensionamento do sistema fotovoltaico. O consumo constante de 46,92 kW por hora entre as 18h e 6h permitiu estimar um consumo médio diário de 563,04 kWh, totalizando 17172,72 kWh mensais. Com base nesse valor, foi possível dimensionar o sistema fotovoltaico necessário para atender à demanda de energia da iluminação pública, considerando os fatores de perda e os níveis de irradiação solar da região.

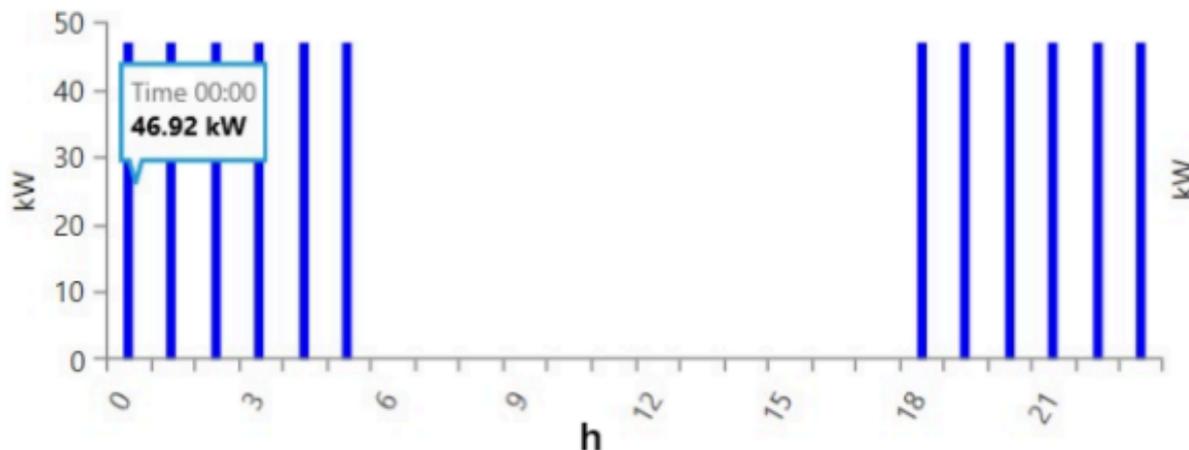
Tabela 4 – Carga Elétrica por Hora

Hora	Carga (kW)
0	46.920
1	46.920
2	46.920
3	46.920
4	46.920
5	46.920
6	0
7	0
8	0
9	0
10	0
11	0
12	0
13	0
14	0
15	0
16	0
17	0
18	46.920
19	46.920
20	46.920
21	46.920
22	46.920
23	46.920

Fonte: Elaboração Própria

Para demonstrar esse consumo é usada a curva de carga, que representa a variação temporal da demanda de potência elétrica em um sistema, fornecendo um perfil detalhado do consumo ao longo de um período específico. Como podemos verificar na Figura 6, a demanda é constante nas 12 horas de funcionamento do sistema.

Figura 6 – Curva de carga inicial (kW/h)



Fonte: Elaboração Própria a partir de Homer PRO

4.1.6 Compensação de energia

Para os cenários onde se considera a implementação de uma usina solar, é importante lembrar que a geração de energia ocorre durante o dia, aproveitando a radiação solar. Entretanto, o consumo da iluminação pública, por exemplo, concentra-se no período noturno. Nesse contexto, os sistemas de compensação de energia, também chamado de *Net Metering*, desempenham um papel fundamental, permitindo que a rede elétrica funcione como uma espécie de bateria virtual. A energia excedente gerada durante o dia é injetada na rede, gerando créditos que podem ser utilizados posteriormente para consumir energia quando a geração própria for insuficiente. A seguir, é apresentado o funcionamento do *Net Metering*.

1. Geração de Energia: O sistema de compensação começa com a instalação do sistema de geração de energia, nesse caso os painéis solares fotovoltaicos. Durante o dia, esses painéis convertem a radiação solar incidente em energia elétrica.
2. Consumo Imediato: A energia gerada é utilizada primeiramente para suprir a demanda imediata do consumidor.
3. Excedente de Energia: Como a geração de energia nesse caso excede o consumo, o excesso é enviado para a rede elétrica. Isso é feito através de um medidor bidirecional, que registra tanto a energia consumida da rede quanto a energia injetada nela.
4. Compensação: A energia injetada na rede é contabilizada e pode ser utilizada como crédito para compensar o consumo futuro.

O sistema de compensação de energia é uma solução eficiente que promove a geração distribuída e a utilização de fontes renováveis, beneficiando tanto os consumidores quanto

o meio ambiente. Esse sistema entrou em vigor a partir da Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012, que estabeleceu as bases para que consumidores pudessem gerar sua própria energia a partir de fontes renováveis e injetar o excedente na rede elétrica, recebendo créditos para consumo futuro.

Posteriormente, a Resolução Normativa nº 687/2015 trouxe aprimoramentos à Resolução 482, com o objetivo de otimizar o sistema de compensação e facilitar o acesso à microgeração e minigeração distribuída. Essa resolução trouxe mais clareza e flexibilidade para os procedimentos, incentivando ainda mais a participação dos consumidores nesse modelo de geração de energia.

A Lei nº 14.300/2021, conhecida como o Marco Legal da Geração Distribuída, junto a Resolução Normativa nº 1.000/2021 da ANEEL, representaram um avanço significativo para o setor. Trazendo diversas alterações e simplificações às regras da micro e minigeração distribuída, como a possibilidade de geração compartilhada, a transferência de créditos entre unidades consumidoras e a criação de novas modalidades de geração.

Por fim, a Resolução Normativa nº 1.059/2023 da ANEEL, representa um aprimoramento do marco legal estabelecido pela Resolução nº 1.000/2021 e pela Lei 14.300/2021. Essa resolução traz ajustes importantes para a micro e minigeração distribuída, visando simplificar ainda mais os procedimentos, estimular a inovação e adaptar a regulamentação às novas demandas do setor. Ao contemplar o uso de novas tecnologias, como baterias e sistemas de armazenamento de energia, e ao ampliar as possibilidades de geração compartilhada, a Resolução nº 1.059/2023 contribui para a consolidação do Brasil como um dos líderes mundiais em geração distribuída e para a construção de um futuro energético mais sustentável.

4.2 Cenários

4.2.1 Cenário Referência

O Cenário Referência representa a situação atual da iluminação pública em Queluzito-MG, onde a demanda energética é atendida exclusivamente pela rede da concessionária de energia. A partir da Figura 7, é possível verificar que anualmente, a cidade compra da concessionária de energia 205.510 kWh referentes ao funcionamento do sistema de iluminação pública municipal.

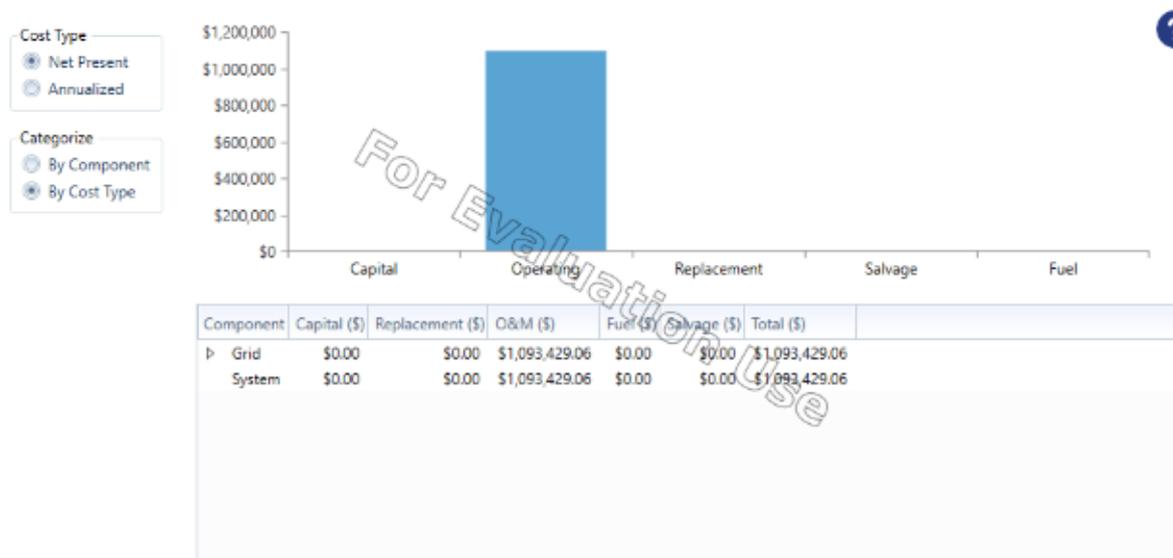
Figura 7 – Perfil de consumo Anual do Cenário Referência



Fonte: Elaboração Própria a partir de Homer PRO

Considerando a premissa onde o tempo de vida do projeto é de 20 anos e o atual *Levelized cost of energy* (LCOE), que representa o custo nivelado da energia, é de R\$ 0,52, o *Net Present Cost* (NPC) ou Valor Presente Líquido (VPL), será de R\$ 1.093.429,06, conforme pode ser visto na Figura 8.

Figura 8 – Valor Presente Líquido - Cenário Referência



Fonte: Elaboração Própria a partir de Homer PRO

A Figura 9 detalha o perfil de emissões do cenário base, evidenciando a preponderância do dióxido de carbono (CO_2). Com uma emissão anual estimada em 20,551 toneladas, o CO_2 se destaca como o principal poluente neste contexto. A ausência de emissões signi-

ficativas de outros gases e partículas, como monóxido de carbono e material particulado, sugere que as medidas de mitigação devem estar concentradas na redução das emissões de CO_2 . Essa informação é fundamental para a avaliação do impacto ambiental do sistema e para a definição de estratégias de controle e redução das emissões.

Figura 9 – Balanço de Emissões - Cenário Referência

Quantity	Value	Units
Carbon Dioxide	20,551	kg/yr
Carbon Monoxide	0	kg/yr
Unburned Hydrocarbons	0	kg/yr
Particulate Matter	0	kg/yr
Sulfur Dioxide	0	kg/yr
Nitrogen Oxides	0	kg/yr

Fonte: Elaboração Própria a partir de Homer PRO

Em síntese, neste cenário, as lâmpadas convencionais utilizadas geram um consumo médio anual de aproximadamente 205.510 kWh, resultando em um custo significativo para o município, estimado em R\$ 1.093.429,06 ao longo de 20 anos. Além do impacto financeiro, esse modelo de abastecimento também contribui para a emissão de gases poluentes, com uma média anual de 20,5 toneladas de dióxido de carbono liberadas na atmosfera. A análise deste cenário é fundamental, pois serve como referência para avaliar as melhorias potenciais que podem ser alcançadas com a adoção de fontes alternativas de energia, como a solar, e a implementação de tecnologias mais eficientes, como as lâmpadas *LED*.

4.2.2 Cenário Alternativo com Energia Fotovoltaica

O Cenário Base com Energia Fotovoltaica explora a viabilidade da integração de uma usina solar para atender à demanda energética da iluminação pública em Queluzito-MG. Para dimensionar a capacidade instalada da Usina Solar, o modelo utiliza o *HOMER Optimizer*, ferramenta que avalia diversos fatores para otimizar a configuração do sistema híbrido, maximizando a geração de energia e minimizando os custos gerais. Para esse cenário, o *HOMER Optimizer* definiu que a capacidade instalada da usina seria de 153 kW, com uma potência média de saída de 639 kWh por dia e um fator de capacidade de 17,4%, conforme pode ser visto na Figura 10.

Figura 10 – Capacidade Instalada Usina Fotovoltaica - Cenário Alternativo com Energia Fotovoltaica

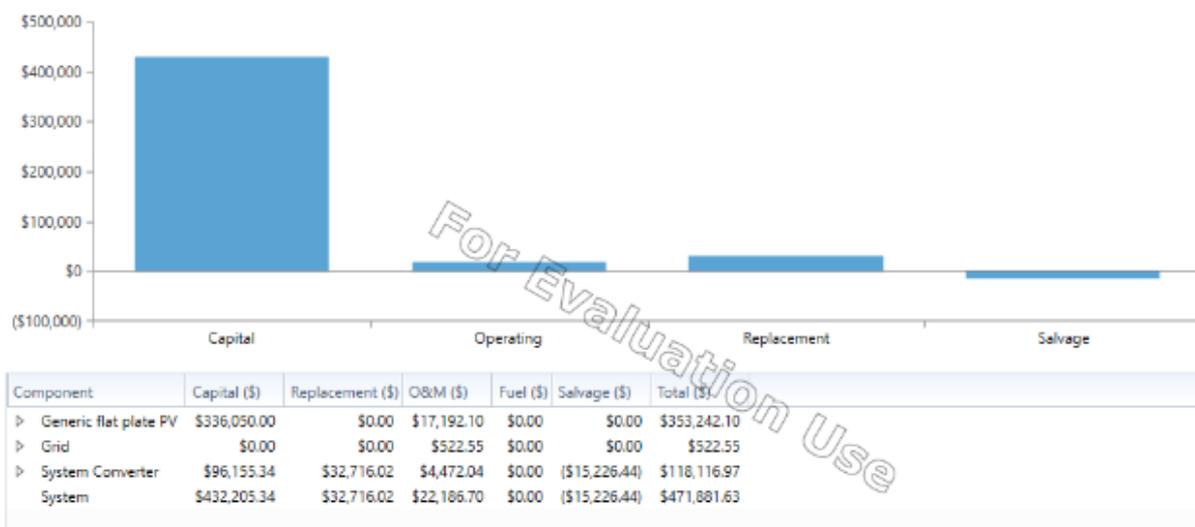
Quantity	Value	Units
Rated Capacity	153	kW
Mean Output	26.6	kW
Mean Output	639	kWh/d
Capacity Factor	17.4	%
Total Production	233,055	kWh/yr

Fonte: Elaboração Própria a partir de Homer PRO

Para esses valores, seriam necessários 612 painéis solares de 250W e 88 conversores de 1kW. Com essa configuração, a capacidade total de produção anual da usina seria de 233.055 kWh por ano. Esse valor representa um excedente de, em média, 16.833 kWh por ano, que podem ser transformados em créditos e abater o consumo de outras áreas da gestão pública municipal. Para a implantação da usina seria necessário uma área de 1953 metros quadrados, supondo dispor os painéis em uma configuração de 4 linhas de 153 placas fotovoltaicas cada e levando em consideração espaçamentos de 1,5 metro entre linhas a fim de facilitar a manutenção.

Para viabilizar a construção da usina, realizar a manutenção e repor equipamentos obsoletos o projeto conta com um VPL de R\$ 471.881,60. Para aquisição dos painéis, seria necessário um investimento de R\$ 336.050,00 e para os conversores R\$ 96.155,34, além de R\$ 32.716,02 em reposições futuras. O gasto com operação e manutenção será de R\$ 22.186,70 e os créditos gerados pelo excedente produzido representam uma economia de R\$ 15.226,44 a ser abatida em outras tarifas do município. Os custos por tipo são apresentados na Figura 11.

Figura 11 – Valor Presente Líquido - Cenário Alternativo com Energia Fotovoltaica



Fonte: Elaboração Própria a partir de Homer PRO

Pode-se verificar na Figura 12 que a implantação de uma usina solar fotovoltaica resultaria em uma economia total de R\$ 621.547,00 ao longo dos 20 anos de vida do projeto, com um custo nivelado da energia de R\$ 0,112 por kWh. O CAPEX (*Capital Expenditure*), ou seja, investimento em bens de capital, seria de R\$ 432.205,00. A TIR (Taxa interna de retorno) seria de 23,7%. Por fim, o *Payback Time*, tempo de retorno do investimento, seria de 5,12 anos.

Figura 12 – Comparação entre os cenários Referência e Alternativo com Energia Fotovoltaica

Architecture				Cost		
PV (kW)	Grid (kW)	Converter (kW)	NPC (\$)	CAPEX (\$)	LCOE (\$/kWh)	
153	999,999	87.4	\$471,882	\$432,205	\$0.112	

Metric	Value
Present worth (\$)	\$621,547
Annual worth (\$/yr)	\$60,746
Return on investment (%)	18.9
Internal rate of return (%)	23.7
Simple payback (yr)	4.13
Discounted payback (yr)	5.12

Fonte: Elaboração Própria a partir de Homer PRO

A adoção da energia solar como fonte de energia primária resultou em uma redução expressiva nas emissões de gases do efeito estufa, conforme evidenciado pelos dados apre-

sentados na Figura 13. A emissão de dióxido de carbono, principal gás causador do efeito estufa, foi reduzida em 52,22%, atingindo o valor de 9,82 toneladas por ano. Essa diminuição significativa demonstra o potencial da energia solar na mitigação das mudanças climáticas.

Figura 13 – Balanço de Emissões - Cenário Alternativo com Energia Fotovoltaica

Quantity	Value	Units
Carbon Dioxide	9.82	kg/yr
Carbon Monoxide	0	kg/yr
Unburned Hydrocarbons	0	kg/yr
Particulate Matter	0	kg/yr
Sulfur Dioxide	0	kg/yr
Nitrogen Oxides	0	kg/yr

Fonte: Elaboração Própria a partir de Homer PRO

Em síntese, neste cenário, a cidade implementa um sistema fotovoltaico que gera energia suficiente para suprir o consumo de energia elétrica do setor de iluminação pública da cidade, reduzindo a dependência da concessionária de energia. A análise deste cenário revela uma economia de R\$ 621.547,00 ao longo dos 20 anos de vida do projeto. Além dos benefícios econômicos, como a diminuição dos custos com energia elétrica, este cenário também contribui para a redução das emissões de dióxido de carbono, promovendo uma compensação significativa em relação ao cenário base, de 52,22%. A avaliação deste modelo é crucial para entender como a energia solar pode ser uma solução eficaz e sustentável para a iluminação pública, alinhando-se às metas de eficiência energética e preservação ambiental do município.

A análise comparativa apresentada na Figura 14 evidencia de forma contundente a viabilidade econômica da implantação de uma usina fotovoltaica para suprir a demanda de iluminação pública em Queluzito-MG. O VPL positivo e substancial da usina solar, calculado em R\$ 471.881,60, contrasta significativamente com o VPL do cenário atual, dependente da tarifa da CEMIG, que alcança R\$ 1.093.429,00. Essa diferença financeira expressiva demonstra o potencial de economia a longo prazo que a geração própria de energia pode proporcionar ao município.

Figura 14 – Análise de Sensibilidade - Iluminação Convencional



Fonte: Elaboração Própria

A sensibilidade da análise aos diferentes cenários de tarifa demonstra a maior previsibilidade de custos da usina fotovoltaica. Ao considerar uma tarifa mais baixa, de R\$ 0,42 por kWh, o VPL seria de R\$ 883.154,20, sendo assim, a economia gerada pelo uso da energia fotovoltaica seria de R\$ 359.940,80. No entanto, caso a tarifa da CEMIG sofra um aumento e alcance R\$ 0,62 por kWh, o VPL do cenário atual se eleva consideravelmente, chegando a R\$ 1.303.704,00, nesse caso, a economia gerada pelo uso da energia fotovoltaica seria de R\$ 831.822,40. Lembrando que todos esses valores são calculados para os 20 anos de projeto.

Esse contexto evidencia a vulnerabilidade do município às flutuações do mercado de energia. A volatilidade dos preços da energia da concessionária pode resultar em aumentos inesperados nas tarifas, impactando negativamente o orçamento municipal. Em contrapartida, a energia gerada pela usina fotovoltaica mantém um custo estável ao longo do tempo, permitindo que o município planeje melhor seus gastos e direcione recursos para outras áreas essenciais.

Em suma, a análise apresentada demonstra que a implantação da usina fotovoltaica é uma decisão estratégica para o município de Queluzito-MG. A combinação de benefícios econômicos, ambientais e sociais torna essa solução atrativa e alinhada com as metas de desenvolvimento sustentável. A economia gerada com a produção própria de energia pode ser reinvestida em outras áreas prioritárias, como educação, saúde e infraestrutura, contribuindo para a melhoria da qualidade de vida da população.

4.2.3 Cenário Alternativo com Substituição para Lâmpadas LED

O Cenário de Substituição para Lâmpadas *LED* foca na modernização da iluminação pública de Queluzito-MG por meio da troca das lâmpadas convencionais por lâmpadas *LED*, que são conhecidas por sua eficiência energética e menor consumo de eletricidade. A conversão da tecnologia de cada equipamento é mostrada na Tabela 5.

Tabela 5 – Equipamentos da iluminação pública - *LED*

Qtde.	Tipo de Lâmpada	Potência (W)	Qtde. Relé	Potência Total (kWh)
3	LED	50	3	0,154
95	LED	100	86	9,603
48	LED	40	43	1,972
3	LED	60	3	0,184
23	LED	35	21	0,830
66	LED	50	59	3,371
6	LED	80	5	0,486
81	LED	100	73	8,188
8	LED	150	7	1,208

Fonte: Elaboração Própria

A Tabela 6 apresenta o novo perfil de carga, produto da adoção da tecnologia *LED*, utilizado como base para os cálculos de dimensionamento do sistema fotovoltaico. O consumo constante de 25,995 kW por hora entre as 18h e 6h permitiu estimar um consumo médio diário de 311,94 kWh, totalizando 9.488,17 kWh mensais.

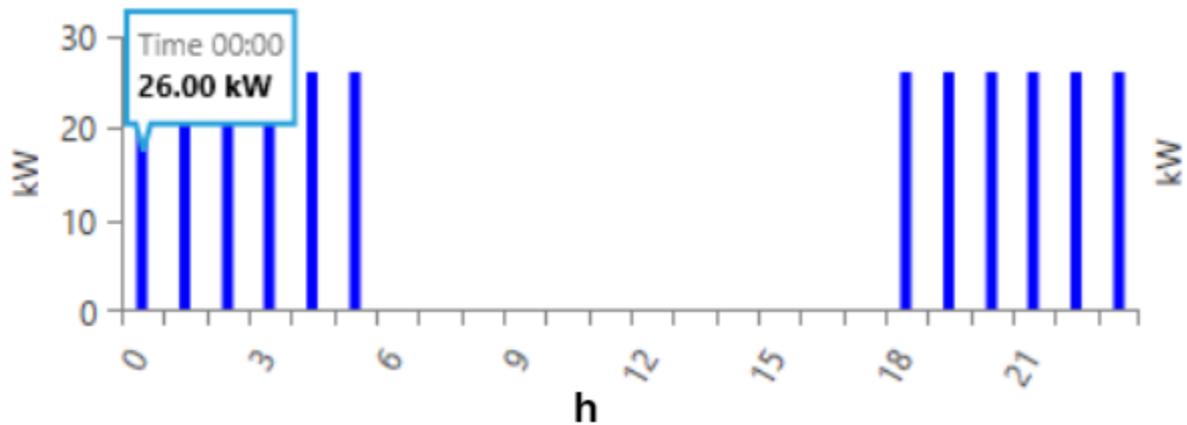
Tabela 6 – Nova Carga Elétrica por Hora

Hora	Carga (kW)
0	25.995
1	25.995
2	25.995
3	25.995
4	25.995
5	25.995
6	0
7	0
8	0
9	0
10	0
11	0
12	0
13	0
14	0
15	0
16	0
17	0
18	25.995
19	25.995
20	25.995
21	25.995
22	25.995
23	25.995

Fonte: Elaboração Própria

Para demonstrar esse consumo usa-se a curva de carga, que representa a variação temporal da demanda de potência elétrica em um sistema, fornecendo um perfil detalhado do consumo ao longo de um período específico. Como podemos verificar na Figura 15, a demanda é 44,6% menor quando comparada à demanda do Cenário Referência.

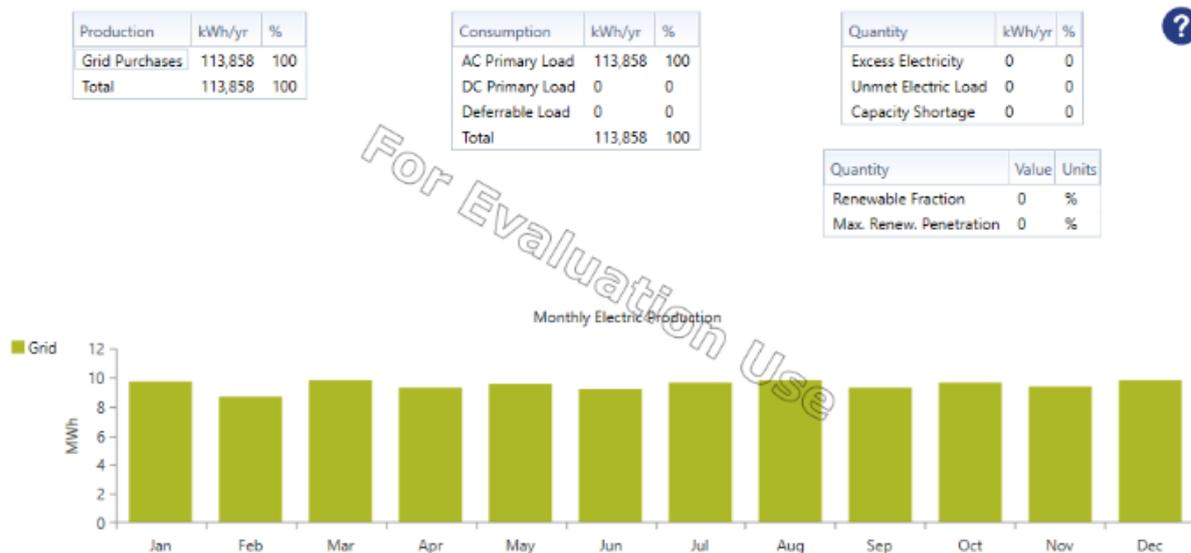
Figura 15 – Nova curva de carga (kW/h)



Fonte: Elaboração Própria a partir de Homer PRO

O gráfico do perfil de consumo anual de energia elétrica desse cenário, apresentado na Figura 16, demonstra uma redução significativa no consumo após a substituição das lâmpadas convencionais por *LED* na iluminação pública de Queluzito. Observa-se que o consumo médio mensal, medido em kWh, apresentou uma queda de 44,6% em comparação com o cenário base. Essa redução é evidente em todos os meses do ano, indicando a eficiência energética das lâmpadas *LED*. As pequenas variações no consumo ao longo dos meses estão relacionados a fatores estocásticos.

Figura 16 – Perfil de consumo anual do cenário alternativo com substituição para lâmpadas *LED*

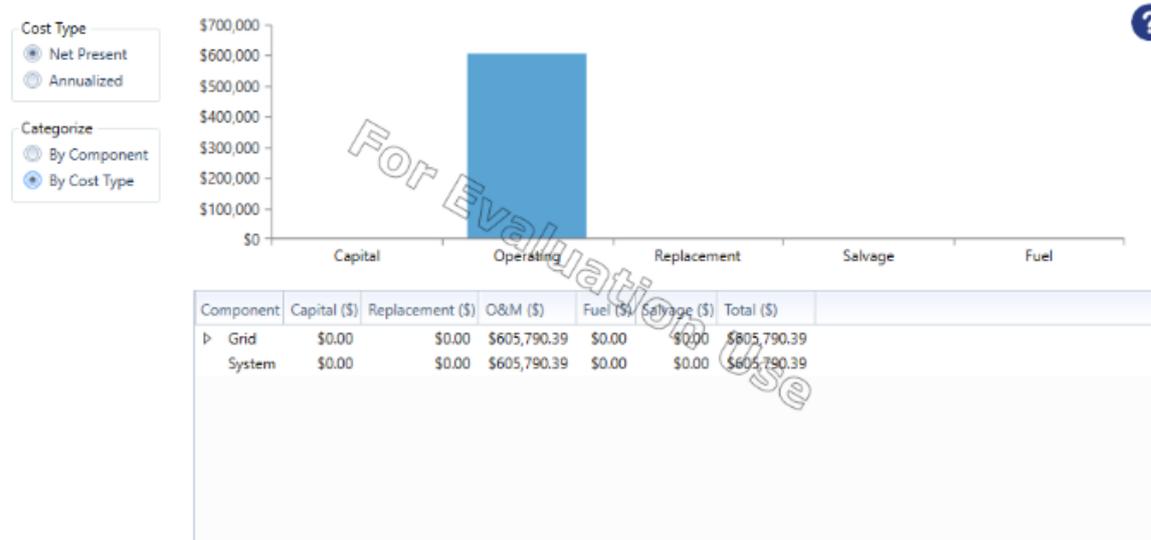


Fonte: Elaboração Própria a partir de Homer PRO

A partir da Figura 16, pode-se verificar que anualmente, a cidade compraria da concessionária de energia 113.858 kWh. Considerando a premissa onde o tempo de vida do

projeto é de 20 anos e o atual *Levelized cost of energy* (LCOE), que representa o custo nivelado da energia, é de R\$ 0,52, o VPL será de R\$ 605.790,39, conforme pode ser visto na Figura 17, totalizando uma economia de R\$ 487.638,67 em relação ao cenário base.

Figura 17 – Valor Presente Líquido - Cenário Alternativo com substituição para lâmpadas *LED*



Fonte: Elaboração Própria a partir de Homer PRO

Considerou-se que a substituição das lâmpadas será prestada de forma gratuita pela CEMIG através do projeto Minas *LED*, por isso, não consideramos como investimento a compra e instalação das novas lâmpadas.

“A Cemig irá substituir luminárias de iluminação pública de maior potência por luminárias *LED* em municípios localizados em sua área de concessão, por meio do projeto Minas *LED*. Trata-se de um investimento de mais de R\$ 112 milhões, em uma iniciativa do Programa de Eficiência Energética (PEE) da Cemig, regulado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel). A meta é substituir mais de 100 mil pontos de iluminação, beneficiando mais de 600 cidades do Estado e promovendo a eficiência energética e a redução inteligente do consumo de energia e da demanda no horário de ponta do sistema elétrico.” (CEMIG, 2023)

A substituição de lâmpadas convencionais por lâmpadas *LED* proporcionou uma redução significativa de 44,6% nas emissões de gases do efeito estufa, em relação ao cenário base, conforme evidenciado pelos dados apresentados na Figura 18. A análise indica que a emissão de dióxido de carbono, principal gás causador do efeito estufa, foi reduzida para 11.386 kg/ano. Essa redução expressiva demonstra o potencial de eficiência energética da tecnologia *LED*, capaz de mitigar as mudanças climáticas e promover a sustentabilidade ambiental

Figura 18 – Balanço de Emissões - Cenário Alternativo com substituição para lâmpadas *LED*

Quantity	Value	Units
Carbon Dioxide	11,386	kg/yr
Carbon Monoxide	0	kg/yr
Unburned Hydrocarbons	0	kg/yr
Particulate Matter	0	kg/yr
Sulfur Dioxide	0	kg/yr
Nitrogen Oxides	0	kg/yr

Fonte: Elaboração Própria a partir de Homer PRO

O Cenário de Substituição para Lâmpadas *LED* demonstra uma transformação significativa na eficiência energética da iluminação pública de Queluzito-MG. A implementação das lâmpadas *LED* não apenas resultou em uma redução de 44,6% no consumo médio mensal de energia elétrica em comparação ao cenário base, mas também proporcionou uma economia financeira substancial ao longo de 20 anos, totalizando R\$487.638,67. Além disso, a substituição contribuiu para a diminuição das emissões de dióxido de carbono, com uma redução expressiva de 9.165 kg/ano em relação ao cenário base, evidenciando o potencial das lâmpadas *LED* para promover a sustentabilidade ambiental e alinhar-se às metas de eficiência energética do município. Essa análise ressalta a importância de adotar tecnologias mais eficientes, não apenas para a economia de recursos, mas também para a preservação do meio ambiente, tornando a iluminação pública mais sustentável e responsável.

4.2.4 Cenário Alternativo com Substituição para Lâmpadas *LED* e Energia Fotovoltaica

O Cenário com Substituição para Lâmpadas *LED* e Energia Fotovoltaica combina as vantagens da modernização da iluminação pública com a adoção de uma fonte de energia renovável, criando uma solução integrada e sustentável para Queluzito-MG. O Cenário com Substituição para Lâmpadas *LED* e Energia Fotovoltaica representa uma abordagem integrada e sustentável para a iluminação pública de Queluzito-MG, combinando a eficiência das lâmpadas *LED* com a geração de energia renovável. Neste cenário, a adoção de lâmpadas *LED* não apenas reduz o consumo de energia elétrica, mas, ao ser complementada por uma usina solar, maximiza a geração de energia, garantindo que a demanda energética da iluminação pública seja atendida de forma sustentável. O *HOMER Optimizer* definiu que a capacidade instalada da usina seria de 84,5 kW, com uma potência média de saída de 353 kWh por dia e um fator de capacidade de 17,4%, conforme pode ser visto na Figura 19.

Figura 19 – Capacidade Instalada Usina Fotovoltaica - Cenário Alternativo com Substituição para Lâmpadas *LED* e Energia Fotovoltaica

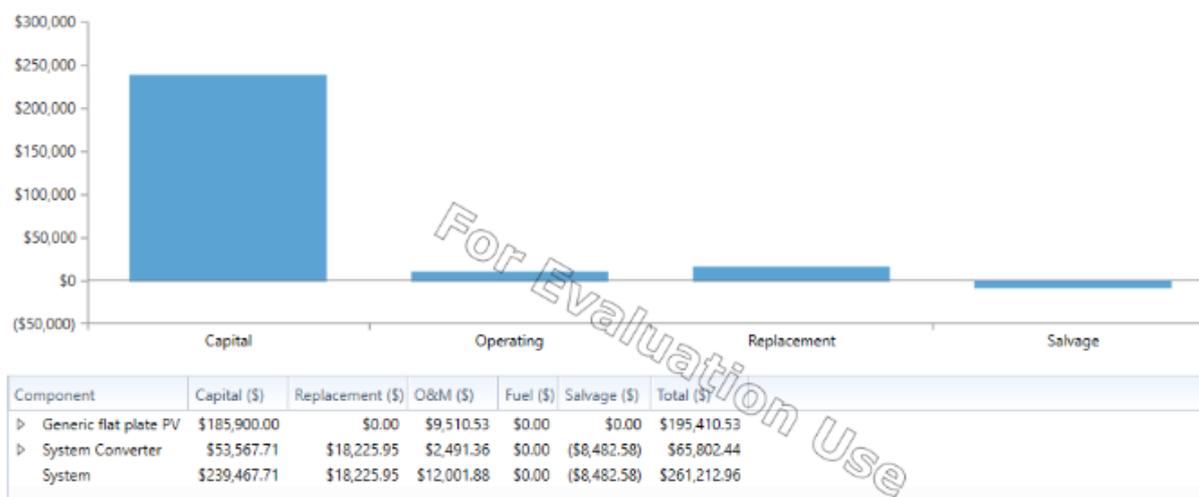
Quantity	Value	Units
Rated Capacity	84.5	kW
Mean Output	14.7	kW
Mean Output	353	kWh/d
Capacity Factor	17.4	%
Total Production	128,924	kWh/yr

Fonte: Elaboração Própria a partir de Homer PRO

Para esses valores, seriam necessários 338 painéis solares de 250W e 49 conversores de 1kW. Com essa configuração, a capacidade total de produção anual da usina seria de 128.924 kWh por ano. Esse valor representa um excedente de, em média, 8.899 kWh por ano, que podem ser transformados em créditos e abater o consumo de outras áreas da gestão pública municipal. Para a implantação da usina seria necessário uma área de 1075 metros quadrados, supondo dispor os painéis em uma configuração de 2 linhas de 169 placas fotovoltaicas cada e levando em consideração espaçamentos de 1,5 metro entre elas a fim de facilitar a manutenção.

Para viabilizar a construção da usina, realizar a manutenção e repor equipamentos obsoletos o projeto conta com um *Net Present Cost* (NPC), valor presente líquido, de R\$ 261.212,96. Para aquisição dos painéis, seria necessário um investimento de R\$ 185.900,00 e para os conversores R\$ 53.567,71, além de R\$ 18.225,95 em reposições futuras. O gasto com operação e manutenção será de R\$ 12.001,88 e os créditos gerados pelo excedente produzido representam uma economia de R\$ 8.482,58 a ser abatida em outras tarifas do município. Os custos por tipo são apresentados na Figura 20.

Figura 20 – Valor Presente Líquido - Cenário Alternativo com Tecnologia LED e Energia Fotovoltaica



Fonte: Elaboração Própria a partir de Homer PRO

Pode-se verificar na Figura 21 que a implantação de uma usina solar fotovoltaica resultaria em uma economia total de R\$ 344.577,43 ao longo dos 20 anos de vida do projeto, com um custo nivelado da energia de R\$ 0,112 por kWh. O CAPEX (Capital Expenditure), ou seja, investimento em bens de capital, seria de R\$ 239.468,00. A TIR (Taxa interna de retorno) seria de 23,7%. Por fim, o Payback Time, tempo de retorno do investimento, seria de 5,12 anos.

Figura 21 – Comparação entre os cenários Alternativos Tecnologia LED e Energia Fotovoltaica

Architecture				Cost		
PV (kW)	Grid (kW)	Converter (kW)	NPC (\$)	CAPEX (\$)	LCOE* (\$/kWh)	
999,999			\$605,790	\$0,00	\$0,520	
84,5	999,999	48,7	\$261,213	\$239,468	\$0,112	

Metric	Value
Present worth (\$)	\$344,577
Annual worth (\$/yr)	\$33,677
Return on investment (%)	18.9
Internal rate of return (%)	23.7
Simple payback (yr)	4.13
Discounted payback (yr)	5.12

Fonte: Elaboração Própria a partir de Homer PRO

A adoção de energia solar fotovoltaica nesse sistema de iluminação pública com lâmpadas LED resultou na eliminação completa das emissões de gases do efeito estufa, conforme

evidenciado pelos dados apresentados na Figura 22. Isso significa que o sistema não mais contribui para o aumento das concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera, como o dióxido de carbono (CO_2). Essa conquista representa um marco importante na busca por um futuro mais sustentável e com menor impacto ambiental.

Figura 22 – Balanço de Emissões - Cenário alternativo *LED* com Energia Fotovoltaica

Quantity	Value	Units
Carbon Dioxide	-7.13	kg/yr
Carbon Monoxide	0	kg/yr
Unburned Hydrocarbons	0	kg/yr
Particulate Matter	0	kg/yr
Sulfur Dioxide	0	kg/yr
Nitrogen Oxides	0	kg/yr

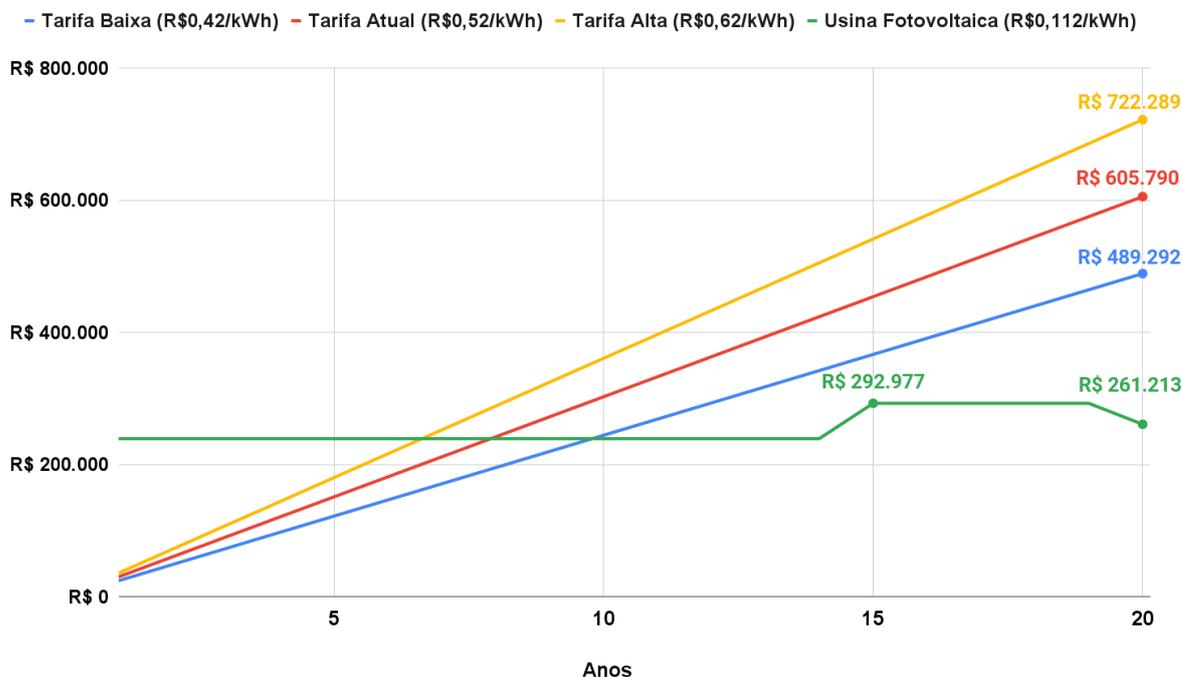
Fonte: Elaboração Própria a partir de Homer PRO

A análise dos cenários de iluminação pública em Queluzito-MG demonstra a viabilidade econômica e ambiental da adoção de tecnologias mais eficientes, como lâmpadas *LED* e energia solar fotovoltaica. A substituição das lâmpadas convencionais por *LEDs* resultou em uma redução significativa no consumo de energia elétrica, promovendo uma economia considerável ao longo do tempo, além de contribuir para a diminuição das emissões de CO_2 .

Além disso, a implementação de uma usina solar fotovoltaica não apenas proporcionaria uma economia substancial, mas também eliminaria completamente as emissões de gases do efeito estufa associadas à iluminação pública. Esses resultados ressaltam a importância de investir em soluções sustentáveis, que beneficiam a economia local e promovem a preservação ambiental, alinhando-se com as metas de eficiência energética do município.

A análise de viabilidade econômica apresentada na Figura 23 evidencia a atratividade da implantação de uma usina solar fotovoltaica para atender à demanda de iluminação pública em Queluzito. A substituição das lâmpadas convencionais por *LEDs*, que resultaria em uma redução significativa no consumo de energia, não diminui a competitividade da geração própria de energia solar. O Valor Presente Líquido (VPL) positivo da usina solar, calculado em R\$ 261.212,96, supera os VPLs dos cenários que consideram a aquisição de energia da rede elétrica, mesmo com a redução no consumo.

Figura 23 – Análise de Sensibilidade - Iluminação LED



Fonte: Elaboração Própria

Ao compararmos os VPLs para diferentes tarifas, observa-se que, mesmo com a tarifa mais baixa de R\$ 0,42/kWh o VPL seria de R\$ 489.292,20 e a usina solar ainda apresentaria um retorno financeiro superior, com economia de R\$ 228.079,24. Adicionalmente, a análise demonstra que a usina solar se torna ainda mais atrativa em cenários de aumento da tarifa de energia, como os observados para as tarifa atual de R\$ 0,52/kWh com VPL de R\$ 605.790,39, onde a economia seria de R\$ 344.577,43 e por fim, com a tarifa de R\$ 0,62/kWh o VPL seria de R\$ 722.289,60, com uma economia de R\$ 461.076,64. Lembrando que o VPL é calculado para os 20 anos de vida do projeto.

Considerando as incertezas inerentes a projeções de consumo e futuras tarifas de energia, realizou-se uma análise de sensibilidade que demonstra a robustez da solução proposta. Mesmo diante de variações nos parâmetros considerados, a usina solar mantém-se como a opção mais vantajosa economicamente. Além dos benefícios econômicos, a implantação da usina solar contribui para a sustentabilidade ambiental do município, reduzindo a dependência de fontes de energia não renováveis e diminuindo a emissão de gases do efeito estufa. A estabilidade do custo da energia solar, aliada à redução do consumo decorrente da utilização de LEDs, proporciona maior segurança energética e permite que a administração municipal invista em outras áreas prioritárias, como educação, saúde e infraestrutura. Adicionalmente, a geração de empregos durante a fase de construção e instalação da usina, bem como a possibilidade de incentivos fiscais e linhas de financiamento específicas para projetos de energia solar, tornam a solução ainda mais atrativa.

Em suma, a análise apresentada demonstra que a implantação da usina solar é uma decisão estratégica para o município de Queluzito. A combinação de benefícios econômicos, ambientais e sociais, aliada à sua robustez diante de diferentes cenários, torna essa solução uma escolha inteligente e sustentável a longo prazo.

5 Conclusões e considerações finais

O presente trabalho teve como objetivo analisar o sistema de iluminação pública de Queluzito-MG, destacando a importância de um sistema eficiente e sustentável para a segurança e bem-estar da população. A pesquisa revelou que a modernização do sistema de iluminação, por meio da substituição das lâmpadas convencionais por tecnologia *LED* e a adoção de fontes de energia renováveis, como a energia solar fotovoltaica, é não apenas viável, mas também essencial para o desenvolvimento econômico e ambiental do município.

A substituição do sistema convencional por uma usina solar fotovoltaica e lâmpadas *LED* de alta eficiência resultou em uma economia significativa de R\$ 832.216,04 ao longo de 20 anos, se comparado ao cenário atual do município. Nos dois casos, com lâmpadas convencionais e o uso de *LEDs*, a implementação de uma usina solar para suprir a demanda energética apresenta um *Payback Time* de 5,12 anos. Isso indica que a geração própria de energia solar é uma alternativa economicamente atrativa em comparação com a dependência da rede elétrica convencional.

Essa economia se traduz em uma redução substancial nos custos operacionais, permitindo que os recursos financeiros economizados sejam reinvestidos em outras áreas prioritárias, como educação, saúde e infraestrutura. Além disso, quando levamos em consideração o cenário ideal do uso de uma tecnologia mais eficiente para a iluminação pública, as lâmpadas *LED*, e a geração de energia fotovoltaica, as emissões de *CO₂* associadas à iluminação pública são completamente eliminadas, contribuindo para a redução em 20,5 toneladas anuais de dióxido de carbono e alinhando-se com as metas globais de combate às mudanças climáticas.

A análise de diferentes cenários indicou que o custo nivelado da energia (LCOE) do novo sistema foi de R\$ 0,112 por kWh, significativamente menor do que o custo do sistema convencional, onde atualmente o valor do kWh da concessionária de energia apresenta um custo de R\$ 0,52. Os investimentos iniciais para a instalação da usina solar são de R\$ 471.881,60 para o cenário atual com lâmpadas convencionais e R\$ 239.468,00 para o cenário com uso das lâmpadas *LED*, em ambos casos, a taxa interna de retorno (TIR) é de 23,7%, evidenciando a alta atratividade financeira do projeto. O comparativo final dos resultados financeiros pode ser visto na Tabela 7.

Tabela 7 – Resultados Financeiros

Cenário	Valor Presente Líquido	CAPEX
1	R\$ 1.093.429,06	-
2	R\$ 471.881,60	R\$ 432.205,00
3	R\$ 605.790,39	-
4	R\$ 261.212,96	R\$ 239.468,00

Fonte: Elaboração Própria

A escolha por lâmpadas *LED* de 35W a 150W e painéis solares fotovoltaicos de 250W garantiram a otimização do sistema, tanto em termos de eficiência energética quanto de durabilidade. A redução no consumo de energia elétrica também resultou em menores custos de manutenção e operação, além de contribuir para a segurança energética do município.

Os benefícios deste projeto transcendem a esfera ambiental e financeira. A iluminação pública mais eficiente e sustentável proporciona maior segurança para a população, além de valorizar o patrimônio histórico e cultural da cidade. A iniciativa pode servir como um modelo para outras cidades brasileiras, demonstrando que é possível conciliar desenvolvimento econômico e social com a preservação do meio ambiente.

A análise de sensibilidade realizada no estudo confirmou a robustez da solução proposta, mostrando que, mesmo diante de incertezas nas projeções de consumo e nas tarifas de energia, a usina solar se mantém como a opção mais vantajosa economicamente. A estabilidade do custo da energia solar, aliada à redução do consumo decorrente da utilização de *LEDs*, proporciona maior segurança energética ao município, reduzindo a dependência de fontes de energia não renováveis e contribuindo para a diminuição das emissões de gases do efeito estufa.

Ademais, a implementação da usina solar não apenas gera economia, mas também promove a criação de empregos durante a fase de construção e instalação, além de possibilitar o acesso a incentivos fiscais e linhas de financiamento específicas para projetos de energia renovável. Esses fatores tornam a solução ainda mais atrativa, contribuindo para o desenvolvimento econômico local.

Em suma, este trabalho não apenas apresenta uma análise detalhada do sistema de iluminação pública de Queluzito, mas também propõe um caminho claro para a modernização e eficiência. A combinação de benefícios econômicos, ambientais e sociais torna a implementação da usina solar uma decisão estratégica e inteligente a longo prazo. Assim, o município de Queluzito-MG pode avançar em direção a um futuro mais sustentável, alinhando-se com as metas de desenvolvimento sustentável e promovendo uma melhor qualidade de vida para sua população.

A originalidade deste trabalho reside na aplicação de um modelo detalhado de simulação para avaliar a viabilidade técnica e econômica da implementação dessas tecnologias em um município de pequeno porte. Os resultados obtidos podem servir como referência para outras cidades que buscam soluções inovadoras para a gestão de seus sistemas energéticos.

No entanto, é importante ressaltar que a implementação dessas tecnologias exige um planejamento cuidadoso, considerando as características específicas de cada município, e o envolvimento de diversos atores sociais. Além disso, a continuidade das políticas públicas de incentivo às energias renováveis é fundamental para garantir a sustentabilidade dos projetos a longo prazo.

Diante dos resultados promissores deste estudo, recomenda-se que os gestores públicos de Queluzito e de outros municípios invistam em projetos de energia solar e eficiência energética, buscando parcerias com instituições de pesquisa e empresas do setor. A criação de programas de incentivo fiscal, a simplificação dos processos de licenciamento e a oferta de linhas de crédito específicas para esses projetos são medidas que podem acelerar a transição para um modelo energético mais sustentável.

Em conclusão, este trabalho demonstra que a transição para um modelo energético mais sustentável é possível e viável, mesmo em municípios de pequeno porte. A implementação das soluções propostas neste estudo contribui para o alcance dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU e posiciona Queluzito como um exemplo a ser seguido por outras cidades que buscam um futuro mais verde e próspero.

Referências

- AGUERA, R. S. Cenário brasileiro da iluminação pública. *Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica e Computação. Universidade de São Paulo. São Carlos-SP*, 2015.
- ANEEL, A. N. de E. E. *ANEEL regulamenta marco legal da Micro e Minigeração Distribuída*. 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2023/aneel-regulamenta-marco-legal-da-micro-e-minigeracao-distribuida>>.
- BRAGA, R. P. Energia solar fotovoltaica: fundamentos e aplicações. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.
- BRANDÃO, R. F. M. Eficiência energética na iluminação pública. *Neutro à Terra*, Instituto Politécnico do Porto. Instituto Superior de Engenharia do Porto . . . , n. 12, p. 55–60, 2013.
- CEMIG. *Cemig moderniza iluminação pública de municípios mineiros por meio do projeto Minas LED*. 2023. Página da Web. Acessado em 07 de setembro de 2023. Disponível em: <<https://www.cemig.com.br/noticia/cemig-moderniza-iluminacao-publica-de-municipios-mineiros-por-meio-do-projeto-minas-led/>>.
- EPE, E. de P. E. *O Selo Procel indica ao consumidor quais são os produtos mais eficientes, como lavadoras automáticas, geladeiras*. 2015. <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/eficiencia-energetica>>. Acesso em: 17 de abril de 2024.
- (EPE), E. de P. E. *Plano Nacional de Energia 2050*. 2018. Rio de Janeiro: EPE. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-nacional-de-energia-2050>>. Acesso em: 6 jun. 2024.
- EPE, E. de P. E. *Plano Decenal de Expansão de Energia 2031*. Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2021. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2031>>.
- (EPE), E. de P. E. *Atlas da Eficiência Energética Brasil 2023*. 2023. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/publicacoes/atlas-de-eficiencia-energetica-brasil-2023>>.
- FERREIRA, T. V. B.; MACHADO, G. V. O papel do planejamento na transição energética: mais luz e menos calor. *Revista Brasileira de Energia*, v. 22, n. 1, p. 44–54, 2016. Disponível em: <<https://sbpe.org.br/index.php/rbe/article/view/635>>.
- GODOI, J. M. A.; JÚNIOR, S. O. Gestão da eficiência energética. In: *2nd International Workshop Advances in Cleaner Production*. [S.l.: s.n.], 2009.
- IBGE. *Queluzito (MG) | Cidades e Estados | IBGE*. 2022. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/mg/queluzito.html>>. Acesso em: 05 abr. 2024.
- IEA. *Adições de capacidade de eletricidade renovável por tecnologia e segmento, 2016-2028*. Paris: International Energy Agency, 2024. Licença: CC BY 4.0. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/renewable-electricity-capacity-additions-by-technology-and-segment-2016-2028>>.

IEA, I. E. A. *Curso Online da Agência Internacional de Energia*. 2018. Acesso em: 17 de abril de 2024. Disponível em: <<https://pt.elearning.iea.org/courses/course-v1:InternationalEnergyAgencyPT+FS1+Open/about>>.

IEA, I. E. A. *Targeting 100* Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/targeting-100-led-lighting-sales-by-2025>>. Acesso em: 05 abr. 2024.

IRENA, I. R. E. A. *Global Energy Transformation: A Roadmap to 2050*. 2018. Abu Dhabi. Relatório. Disponível em: <<https://www.irena.org/publications/2019/Apr/Global-energy-transformation-A-roadmap-to-2050-2019Edition>>. Acesso em: 05 abr. 2024.

KURAHASSI, L. F. *Gestão da energia elétrica: bases para uma política pública municipal*. Tese (Doutorado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde-13122006-165629/publico/Kurahassi_Tese.pdf>.

LAGE, M. H. W.; MORAIS, B. L. de; MORAIS de. Aplicação da gestão energética como ferramenta de redução estratégica de custos nas escolas públicas municipais de belo horizonte/mg. *Anais do Congresso Brasileiro de Custos - ABC*, p. 3947–3954, 2020. Disponível em: <<https://anaiscbc.emnuvens.com.br/anais/article/view/3947>>.

MME, M. de Minas e E. *Municípios brasileiros terão mais eficiência na iluminação pública*. 2023. Ministério de Minas e Energia. Acesso em: 25 de abril de 2024. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/municipios-brasileiros-terao-mais-eficiencia-na-iluminacao-publica>>.

NUNES-VILLELA, J. *Sustentabilidade e a Emergência da Energia Solar no Brasil: Motivações e Decisões de Consumidores Fotovoltaicos Residenciais*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, 2020. Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Gestão Sustentáveis da Escola de Engenharia da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do título de Doutora em Sistemas de Gestão Sustentáveis.

PAES, C. E. A aplicação de modelos computacionais no planejamento energético. *Boletim de Conjuntura*, v. 11, p. 16–21, 2018.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. *Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos*. Rio de Janeiro: CEPEL, 2014. 36 p.

REIS, C. M. *Diversificação da Matriz Energética Brasileira: Caminho para a Segurança Energética em Bases Sustentáveis*. [S.l.]: CEBRI, 2015.

REIS, L. B.; FADIGAS, E. A. F. A.; CARVALHO, C. E. *Energia, recursos naturais e a prática do desenvolvimento sustentável*. Barueri, SP: Manole, 2012. (Coleção Ambiental).

SACHS, I. *Caminhos para o desenvolvimento sustentável*. [S.l.]: Editora Garamond, 2000.

SAIDEL, M. A. *A gestão de energia elétrica na USP: o programa permapara uso eficiente de energia elétrica*. Tese (Tese (Livre-Docência)) — Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

- SANTOS, T. S. d. et al. Análise da eficiência energética, ambiental e econômica entre lâmpadas de led e convencionais. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, SciELO Brasil, v. 20, p. 595–602, 2015.
- SELVAKKUMARAN, S.; LIMMEECHOKCHAI, B. Energy security and co-benefits of energy efficiency improvement in three asian countries. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, v. 20, n. 1, p. 491–503, 2013.
- SILVA, M. S. da et al. Energia solar fotovoltaica: Revisão bibliográfica. *Revista Mythos*, v. 14, n. 2, p. 51–61, 2020.
- SILVA, M. V. M. d.; BERMANN, C. O planejamento energético como ferramenta de auxílio às tomadas de decisão sobre a oferta de energia na zona rural. *Proceedings of the 4th Encontro de Energia no Meio Rural*, SciELO Brasil, 2002.
- SILVA, S. S. F. da; CÂNDIDO, G. A. Matriz energética limpa e renovável: um desafio para o planejamento energético nacional e uma oportunidade para a região nordeste do brasil. *Revista ESPACIOS| Vol. 36 (Nº 15) Año 2015*, 2015.
- SILVA, T. G. da; ARAÚJO, G. de O. A aplicação da tecnologia led na iluminação pública como forma de favorecer a melhoria na mobilidade urbana e a sustentabilidade do meio ambiente: Estudo de caso da orla de macapá-ap. *VII SAU*, p. 1–19, 2018.
- SOARES, G. A.; BARATELLA, P. R. M.; GRIEBENOW, C. *Iluminação Pública Municipal: Programas e Políticas Públicas - Orientações para Gestores Municipais*. 2018. Disponível em: [<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/sef/livreto-iluminacao-publica20180219.pdf>]. *Acesso em* : 20abr.2024.
- SOUZA, H. M. de et al. Reflexões sobre os principais programas em eficiência energética existentes no brasil. *Revista Brasileira de energia*, v. 15, n. 1, p. 1o, 2009.
- UDAETA, M. E. M. *Novos instrumentos de planejamento energético e o desenvolvimento sustentável-Planejamento Integrado de Recursos energéticos na USP*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2012.