

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE CIÊNCIAS CONTÁBEIS
GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS CONTÁBEIS

LUIZ FERNANDO KONO SENA

VIABILIDADE ECONÔMICO-FINANCEIRA DA IMPLANTAÇÃO DE UM
SISTEMA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA EM UBERLÂNDIA-MG: UM
ESTUDO DE CASO

UBERLÂNDIA

2025

LUIZ FERNANDO KONO SENA

**VIABILIDADE ECONÔMICO-FINANCEIRA DA IMPLANTAÇÃO DE UM
SISTEMA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA EM UBERLÂNDIA-MG: UM
ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Ciências Contábeis da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Ciências Contábeis.

Orientador: Prof. Dr. Nilton Cesar Lima

UBERLÂNDIA

2025

LUIZ FERNANDO KONO SENA

**VIABILIDADE ECONÔMICO-FINANCEIRA DA IMPLANTAÇÃO DE UM
SISTEMA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA EM UBERLÂNDIA-MG: UM
ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Ciências Contábeis da
Universidade Federal de Uberlândia como
requisito parcial para a obtenção do título de
Bacharel em Ciências Contábeis.

Banca de Avaliação:

**Prof. Me.
Membro**

**Prof. Me.
Membro**

**Prof. Me.
Membro**

RESUMO

Este estudo analisou a viabilidade econômico-financeira da implementação de um sistema fotovoltaico *on-grid* em uma propriedade rural de Uberlândia-MG, município com alto potencial de incidência solar. A pesquisa, de natureza aplicada e abordagem quantitativa, utilizou dados de consumo energético, custos de implantação e projeções de geração de energia via *software* Designer[®]. Foram aplicados indicadores financeiros como Payback Descontado (PD), Taxa Interna de Retorno (TIR), Valor Presente Líquido (VPL), Retorno sobre Investimento (ROI) e Índice de Lucratividade (IL), além de análise de sensibilidade para variações de custos e tarifas. Os resultados indicaram PD de 4 anos e 1 mês, TIR de 16% (superior à TMA de 9,5%), VPL positivo de R\$ 220.971,99, ROI de 51% (após 5 anos) e IL de 1,16. Constatou-se ainda, redução no consumo de Kwh a pagar de 77,43% e mitigação de 1.453,5 *ton* de CO₂ em 25 anos. A análise de sensibilidade evidenciou a resiliência do projeto, mesmo diante de cenários adversos, como elevação de custos ou redução tarifária. Conclui-se que o projeto se apresentou financeiramente viável, alinhando-se a políticas de sustentabilidade e eficiência energética. A energia solar fotovoltaica analisada revelou-se uma alternativa estratégica em função do alto potencial solar observado na região. Recomenda-se a replicação do modelo precedido de estudos de dimensionamento e cenários tarifários.

Palavras-chave: Viabilidade econômico-financeira; Energia solar fotovoltaica; Payback; Sustentabilidade.

ABSTRACT

This study analyzed the economic and financial viability of implementing an on-grid photovoltaic system on a rural property in Uberlândia-MG, a municipality with high solar incidence potential. The research, of an applied nature and quantitative approach, used energy consumption data, implementation costs and energy generation projections via the Designer[®] software. Financial indicators such as Discounted Payback (PD), Internal Rate of Return (IRR), Net Present Value (NPV), Return on Investment (ROI) and Profitability Index (PI) were applied, as well as sensitivity analysis for variations in costs and tariffs. The results showed a PD of 4 years and 1 month, an IRR of 16% (higher than the APR of 9.5%), a positive NPV of R\$ 220,971.99, an ROI of 51% (after 5 years) and an IL of 1,16. There was also a 77.43% reduction in payable Kwh consumption and mitigation of 1.453,5 tons of CO₂ over 25 years. The sensitivity analysis showed the project's resilience, even in adverse scenarios such as cost increases or tariff reductions. The conclusion is that the project is financially viable and in line with sustainability and energy efficiency policies. The analyzed photovoltaic solar energy proved to be a strategic alternative due to the high solar potential observed in the region. It is recommended that the model be replicated, preceded by sizing studies and tariff scenarios.

Keywords: Economic and financial viability; Photovoltaic solar energy; Payback; Sustainability.

1 INTRODUÇÃO

A energia desempenha um papel fundamental na sociedade contemporânea, apresentando-se como elemento indispensável para a sobrevivência humana e o desenvolvimento socioeconômico (Carli *et al.*, 2018; Constantino *et al.*, 2018). Sua produção em larga escala é essencial para atender à crescente demanda, que resulta não apenas do aumento populacional, mas também do desenvolvimento econômico e das mudanças nos padrões de consumo (Feng *et al.*, 2024). À medida que as sociedades se tornam mais urbanizadas e tecnologicamente avançadas, a necessidade de fontes de energia confiáveis e sustentáveis se torna ainda mais premente (Constantino *et al.*, 2018).

Nesse sentido, a transição para fontes de energia renováveis, como a solar e a eólica, tem se mostrado uma opção viável para garantir um futuro sustentável, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis e minimizando os impactos ambientais (Carli *et al.*, 2018; Subrahmanyam, 2024).

As fontes de energia eólica, solar e hidrelétrica têm apresentado um crescimento considerável nos últimos anos, refletindo uma mudança significativa na matriz energética global. De acordo com as projeções, as energias renováveis devem ser responsáveis por cerca de 42% da geração mundial de eletricidade até 2028 (Swadi, *et al.*, 2024). Segundo os autores, esse aumento é impulsionado não apenas pela necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa, mas também pela busca por alternativas mais sustentáveis e acessíveis em resposta às crescentes demandas energéticas.

No Brasil as fontes renováveis são predominantes por energia hidrelétrica (Lemos *et al.*, 2023). Contudo, o país enfrenta desafios na diversificação de suas fontes de energia, ao mesmo tempo em que busca manter a sustentabilidade. Nesse cenário, as energias solar, biomassa e eólica surgem como alternativas promissoras para complementar a matriz energética (Filho *et al.*, 2022; Oliveira *et al.*, 2022).

Uma análise espacial do território brasileiro revelou um elevado potencial para essas fontes renováveis, destacando a energia solar como a que possui a maior capacidade de geração, estimada em $247.978 \text{ MWh km}^{-2} \text{ y}^{-1}$ (solar); $9,492 \text{ MWh km}^{-2} \text{ y}^{-1}$ (biomassa); e $3.629 \text{ GWh km}^{-2} \text{ y}^{-1}$ (eólica), por ano (Oliveira *et al.*, 2022). Essa capacidade não apenas demonstra a viabilidade e potencial da energia solar no Brasil, como também ressalta a importância de investir em tecnologias que possam aproveitar esse potencial. Assim, ao diversificar suas fontes de energia, o Brasil pode não apenas fortalecer sua segurança energética, mas também contribuir para um futuro mais sustentável e menos dependente de fontes fósseis.

A energia solar fotovoltaica (FV) representa uma alternativa renovável, mais limpa em relação aos combustíveis fósseis, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa e poluentes (Zhang *et al.*, 2023). No entanto, essa tecnologia não está isenta de desafios ambientais. Entre os principais problemas estão os impactos potenciais na biodiversidade, a perda de habitat e os efeitos climáticos associados à sua implementação (Zhang *et al.*, 2023). Há, por exemplo, a preocupação quanto ao ciclo de vida dos sistemas FV, que abrange desde a fabricação até o descarte, pode resultar na liberação de gases tóxicos e oligoelementos no meio ambiente (Ullah *et al.*, 2023).

Apesar dessas preocupações, os sistemas solares FV apresentam um grande potencial para a geração de eletricidade e o tratamento de água, especialmente em países em desenvolvimento, onde a demanda por soluções energéticas sustentáveis é crescente (Hussin; Issabayeva; Aroua, 2018; Zhang *et al.*, 2023). Dessa maneira, avanços na adoção da energia solar, apresenta-se como uma forma de mitigação dos impactos ambientais.

Apesar dos avanços significativos na adoção de fontes renováveis, como a energia solar FV, ainda há lacunas importantes no que se refere à análise de viabilidade econômico-financeira em contextos específicos, especialmente em instituições localizadas em regiões com alto potencial solar, como o Brasil. Embora estudos demonstrem o impacto positivo dessas tecnologias na redução de emissões de gases de efeito estufa e na promoção de uma economia de baixo carbono (Zhang *et al.*, 2023; Hussin; Issabayeva; Aroua, 2018), poucas pesquisas têm abordado de forma detalhada os desafios e benefícios financeiros associados à implementação de sistemas FV em propriedades rurais de pequeno e médio porte, particularmente no interior do país. Essa lacuna limita a compreensão sobre como essas iniciativas podem ser economicamente viabilizadas e amplamente replicadas, considerando as condições locais, como a do município de Uberlândia, Minas Gerais. Frente a essa situação, emerge a seguinte questão de pesquisa: quais são os resultados da viabilidade econômico-financeira observados após a implementação de sistemas FV on-grid em uma propriedade rural em Uberlândia (MG) e suas implicações para a mitigação das emissões de CO₂?

Diante do potencial solar destacado e da necessidade de evidenciar modelos replicáveis para instituições de pequeno e médio porte, este estudo propõe-se a avaliar, sob uma perspectiva integrada, a viabilidade econômico-financeira e ambiental de um sistema FV *on-grid*, analisando não apenas a redução de custos energéticos, mas também o impacto na descarbonização local. Para isso, combinou-se análises de indicadores financeiros (PD, TIR, VPL, IL) com simulações técnicas baseadas na irradiação solar média da região sudeste de 5,06 kWh/m²/dia | 1846 kWh/m²/.ano, e na eficiência operacional do sistema de 85% (Delapedra-

Silva *et al.*, 2022; Pereira *et al.*, 2017), alcançando também como subproduto da pesquisa a sua contribuição para a mitigação de emissões de CO₂.

A contribuição deste estudo dá-se em um contexto em que a necessidade de soluções que reduzam os impactos ecológicos e incentivem uma economia de baixo carbono é cada vez mais urgente. Contudo, muitos trabalhos acadêmicos tendem a concentrar-se em projetos de grande escala ou em áreas urbanas, o que resulta em uma lacuna significativa na análise da viabilidade econômico-financeira voltada para pequenas e médias instituições em regiões específicas, como é o caso de Uberlândia. Assim, ao explorar essa lacuna, este estudo proporciona uma compreensão da dinâmica local, considerando não apenas as especificidades econômico-financeiras, mas também os aspectos relacionados à responsabilidade ambiental.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Sistemas Fotovoltaicos: estrutura funcional e inovações emergentes

Os sistemas FV podem ser classificados em duas configurações principais: os *on-grid*, que estão conectados à rede elétrica, e os *off-grid*, que operam de forma autônoma. O sistema *on-grid* se destaca por sua interligação à rede de distribuição local, permitindo que o excedente de energia gerada seja injetado na rede pública. Isso resulta na geração de créditos que podem ser utilizados em períodos futuros, facilitados por medidores bidirecionais. Essa configuração é amplamente utilizada em áreas urbanas e residenciais, principalmente devido aos custos de implementação mais baixos, uma vez que não requer sistemas de armazenamento. Para sua instalação, são necessários apenas módulos FV, inversores e uma interface com a rede elétrica (Arifin *et al.*, 2023; Eke, 2021). Os autores evidenciaram, com base em estudos realizados na cidade de Gemolong, na Indonésia, a vantagem econômica do sistema *on-grid*, cujo custo total de instalação foi 13,3% inferior ao do sistema *off-grid*, além de apresentar maior eficiência na produção de energia. Para eles, a escolha entre as configurações depende de fatores geoeconômicos, como irradiação solar local e viabilidade de integração à rede.

O sistema FV é constituído por painéis solares específicos para transformar a energia da luz solar em eletricidade. Esse processo se inicia quando a luz solar atinge os painéis, resultando na geração de corrente contínua por meio do efeito FV. A energia que é capturada pelos painéis é então encaminhada para um inversor, que desempenha um papel crucial ao converter a corrente contínua em corrente alternada, tornando-a utilizável para o consumo em residências e estabelecimentos comerciais (Hannan *et al.*, 2019; Nema; Nema; Agnih, 2011).

A corrente alternada gerada pelas inversores é compatível com os padrões elétricos usados nas atividades diárias de residências e empresas, o que possibilita seu consumo imediato. Essa compatibilidade é fundamental, pois permite que a energia solar captada seja utilizada de forma eficiente e prática, integrando-se perfeitamente à infraestrutura elétrica existente. Assim, os sistemas FV não apenas são econômicos para a sustentabilidade, mas também oferecem uma solução viável e acessível para atender às demandas energéticas cotidianas. Essa sinergia entre a geração de energia solar e o consumo imediato é um dos fatores que impulsionam a adoção crescente dessas tecnologias em diversos contextos (Hole; Goswami, 2022).

No que diz respeito aos principais componentes responsáveis pela captura, conversão e distribuição da energia gerada, estudos de Eke (2021), demonstraram, conforme Quadro 1, que esses podem variar conforme o porte e a necessidade de cada instalação, sendo que em geral incluem:

Quadro 1 - Principais Componentes de Sistemas Fotovoltaicos

- | |
|---|
| <p>a) Painéis Solares: Responsáveis por capturar a luz solar e convertê-la em eletricidade. São compostos principalmente por células FV fabricadas com materiais semicondutores, como o silício. A eficiência desses painéis depende de fatores como a tecnologia empregada na fabricação de células solares que pode variar, resultando em diferentes tipos de painéis, como os monocristalinos, policristalinos e amorfos. Cada um desses tipos apresenta características específicas que afetam seu desempenho. Há ainda os fatores ambientais, como a temperatura das células e a irradiação solar, bem como aspectos práticos, como o ângulo de instalação e a presença de sujeira ou sombreamento, que podem impactar significativamente a eficiência dos sistemas FV.</p> <p>b) Inversor: Responsável pela conversão da corrente produzida pelos painéis solares em corrente alternada, que é uma forma de eletricidade utilizada pela maioria dos dispositivos elétricos e pelas redes de distribuição.</p> <p>c) Transformadores: São empregados para regular a tensão da energia gerada, elevando-a de modo a minimizar as perdas que ocorrem durante a transmissão pela rede elétrica. A importância desse ajuste é significativa em usinas de grande escala, onde a energia precisa ser transportada por distâncias consideráveis.</p> <p>d) Linhas de Transmissão: Responsáveis por transportar a eletricidade gerada pelas usinas FV até a rede elétrica da concessionária. Elas podem operar em alta ou baixa tensão, conforme a demanda e a distância até o ponto de consumo, garantindo a eficiência no fornecimento energético.</p> <p>e) Sistemas de Monitoramento: Responsáveis por acompanhar o desempenho dos painéis solares e inversores, assegurando a operação eficiente dentro dos parâmetros ideais. Eles possibilitam a detecção de falhas e a otimização contínua do desempenho dos componentes da usina.</p> |
|---|

Diante dessa estrutura de componentes apresentadas no Quadro 1, os autores Queiroz *et al.*, (2020) destacam que o Brasil atribui alto potencial para expansão de energia solar devido à

sua alta incidência solar, variando de 4.500 a 6.300 Wh/m² diariamente (Queiroz *et al.*, 2020), – chegando a uma média anual de 5,4 kWh/m²/dia, superior a países líderes no setor, como Alemanha com 3,0 kWh/m²/dia (EPE, 2015; IRENA, 2023).

Por outro lado, a utilização da tecnologia FV em soluções energéticas sustentáveis desempenha um papel importante na redução das emissões de CO₂, além de reduzir os gastos com energia elétrica (Eke, 2021; Queiroz, *et al.*, 2020). Para Constantino *et al.* (2018), a adoção em larga escala de sistemas FV no Brasil pode não apenas gerar economia e diversificar a matriz energética, mas também promover um futuro mais sustentável. Contudo, os autores atentam em avaliar cuidadosamente os impactos associados à fabricação desses sistemas em países com matrizes elétricas de alta emissão, a fim de evitar a importação indireta de carbono embutido, buscando garantir ganhos ambientais efetivos.

Estudos recentes demonstram que a eficiência dos sistemas FV pode ser significativamente aprimorada por meio da implementação de tecnologias avançadas de monitoramento e estratégias de otimização dinâmica (Al-Sharo *et al.*, 2024).

Aghaei *et al.* (2024) ressaltam que a combinação de técnicas, dispositivos, sistemas, plataformas sensores de Internet das Coisas (IoT) e plataformas de análise de dados em tempo real não apenas possibilita o acompanhamento contínuo do desempenho dos módulos, mas também facilita a detecção precoce de anomalias, como sombreamento parcial e manipulação das células, que afetam diretamente a produção de energia.

Complementarmente, Gaviria *et al.* (2020) demonstram que algoritmos de *machine learning* aplicados a sistemas de monitoramento inteligente são capazes de prever falhas operacionais, reduzindo o tempo médio de resposta para manutenção. Boubii *et al.* (2023) destacam que as técnicas de otimização com base em modelos preditivos têm a capacidade de ajustar automaticamente as configurações operacionais dos inversores e conversores em sistemas FV, em resposta a variações nas condições ambientais, como irradiação e temperatura. Essa abordagem evidencia a habilidade de manter a eficiência energética mesmo diante das mudanças nas circunstâncias externas. Essa abordagem não apenas melhorou a eficiência global do sistema, mas também contribui para a estabilidade e a qualidade da energia gerada, refletindo a importância de um controle dinâmico e adaptativo em sistemas FV conectados à rede. Essas inovações, como argumentam os autores, não apenas prolongam a vida útil dos equipamentos, mas também prejudicam as perdas econômicas decorrentes de intervenções não planejadas.

2.2 Indicadores para análise da viabilidade econômico-financeira

2.2.1 Payback Descontado

O PD representa uma abordagem de avaliação de investimentos que visa determinar o período necessário para que os fluxos de caixa descontados se igualem ao valor inicial investido. Essa técnica considera a importância do valor do dinheiro ao longo do tempo, acompanhando que os fluxos de caixa que ocorrerão no futuro tenham um valor presente inferior aos fluxos de caixa que são recebidos atualmente (Marshall, 1985).

No âmbito dos sistemas FV, o PD possibilita uma avaliação das previsões econômicas de investimento. Essa análise leva em conta o custo de capital, que pode variar de acordo com a tarifa de energia elétrica e os custos operacionais associados ao sistema (Cucchiella; D'adamo; Gastaldi, 2017). Para os autores, é possível estimar o tempo necessário para que o sistema comece a gerar economias suficientes na conta de energia, de modo a compensar o investimento inicial. Essa avaliação é feita levando em consideração os fluxos de caixa descontados pelas taxas de juros do capital investido, permitindo uma análise mais precisa do retorno financeiro ao longo do tempo. A Equação 1, segundo os autores, expressa a relação entre os fluxos de caixa futuros e o valor presente, operando como base para a determinação do PD.

Equação 1 – Payback Descontado

$$PD = \sum \left(\frac{\text{Fluxo de caixa}}{(1 + r)^t} \right)$$

Onde:

Fluxo de caixa = são os valores gerados pelo sistema FV, descontados pela taxa de custo de capital.

Investimento inicial = representa o custo inicial do sistema FV.

r = é a taxa de desconto ou custo de capital.

t = indicando o momento em que cada fluxo de caixa ocorre.

Estudos demonstram que, ao calcular o PD em projetos de energia solar, diversos fatores emergem na determinação do tempo necessário para o retorno do investimento. Entre esses fatores, destacam-se a tarifa de energia elétrica, a localização geográfica, o custo da energia elétrica, as condições econômicas locais e a eficiência do sistema FV. Há ainda que considerar as regulamentações, inovações tecnológicas e flutuações econômicas mais conjunturais que também possam interferir no desempenho dos sistemas FV conectados à rede (Talavera *et al.*, 2012).

2.2.2 Valor Presente Líquido

O VPL apresenta-se como uma ferramenta financeira bastante reconhecida na análise de projetos de investimento, pois permite calcular a soma dos fluxos de caixa futuros descontados ao seu valor presente (Shou, 2022; Dai *et al.*, 2022). Essa métrica ajuda os investidores a compreender as soluções econômicas de um projeto, considerando o impacto do tempo sobre o valor do dinheiro (Marshall, 1985).

Estudos de Mollah, Rouf e Rana (2021) e Marshall (1985), demonstram que o VPL pode ser entendido como a diferença entre o valor presente das receitas e o valor presente dos custos associados a um projeto. Quando o VPL resulta em um valor positivo, isso sugere que o projeto é financeiramente viável, uma vez que os fluxos de caixa descontados superam o investimento inicial. Para determinar o VPL, emprega-se a Equação 2:

Equação 2 – Valor Presente Líquido

$$VPL = \Sigma \left(\frac{\text{Fluxo de caixa}}{(1 + r)^t} \right) - \text{Investimento Inicial}$$

Observa-se que a Equação 2 se distingue da Equação 1 por considerar o investimento inicial no cálculo do VPL. Enquanto o PD foca em determinar o tempo necessário para recuperar esse investimento com base nos fluxos de caixa descontados, o VPL subtrai diretamente o valor do investimento inicial, permitindo uma avaliação mais clara da viabilidade econômica do projeto e sua capacidade de gerar valor ao longo do tempo (Marshall, 1985).

Para Martínez-Ruiz, Manotas-Duque e Ramírez-Malule (2020), a aplicação do VPL tem se tornado cada vez mais relevante na avaliação da viabilidade financeira de projetos de energia solar, permitindo uma análise detalhada do retorno sobre o investimento em sistemas FV. Para eles, a equação do VPL ajuda a estimar se o valor presente dos benefícios futuros justifica o investimento inicial, proporcionando uma análise de rentabilidade do projeto. Permite ainda, avaliação precisa das economias ao longo da vida útil do sistema, levando em conta o custo da energia elétrica e o impacto do financiamento. Com isso, investidores e gestores podem tomar decisões mais informadas e fundamentadas em dados financeiros.

2.2.3 Retorno sobre Investimento

O ROI continua a ser uma métrica amplamente utilizada na avaliação de projetos FV, conforme apontam Dadd e Hinton (2022), pois permite uma análise clara da relação entre os ganhos obtidos e os custos iniciais envolvidos. Delapedra-Silva *et al.* (2022) destacam que, quando combinado com métodos tradicionais como o Payback Simples, o ROI mostra-se relevante em suas análises residenciais e industriais.

Apesar de sua aplicação generalizada — como demonstrado em sistemas solares no Japão e no Reino Unido, onde um ROI de 7,43% ao ano justificou investimentos mesmo diante da redução de subsídios —, sua limitação em não considerar o valor temporal do dinheiro ressalta a importância de complementá-lo com ferramentas como o VPL e a TIR (Delapedra-Silva *et al.*, 2022). A literatura ainda indica que, embora os métodos tradicionais, como VPL e TIR, dominem cerca de 85% das avaliações financeiras, abordagens mais inovadoras, como a Análise de Opções Reais (ROA), estão ganhando destaque em cenários mais complexos, pois integram incertezas de mercado e oferecem flexibilidade operacional.

Assim, em projetos FV, o ROI se destaca como um indicador prático para decisões rápidas, enquanto métricas como o Custo Nivelado de Eletricidade (LCOE) e a ROA proporcionam uma análise mais robusta, equilibrando a simplicidade necessária com a profundidade técnica e diversidade exigida pelas crescentes demandas energéticas globais (Dadd; Hinton, 2022; Delapedra-Silva *et al.*, 2022). Com base nesses estudos, o ROI configura-se como um indicador econômico que quantifica a relação entre os ganhos obtidos e os custos envolvidos. Esse cálculo pode ser representado pela Equação 3.

Equação 3 – Retorno sobre Investimento

$$ROI = \frac{Ganho\ Obtido - Investimento}{Investimento}$$

Embora o uso do ROI seja relevante nas análises de projetos FV, principalmente quando combinado com o VPL e a TIR, é oportuno ressaltar que os cálculos tradicionais de ROI podem não considerar adequadamente os efeitos de longo prazo. Tal constatação é abordada por Cuadrado *et al.* (2023), uma vez que, a depreciação do sistema, por exemplo, pode influenciar no desempenho dos sistemas FV ao longo do tempo.

2.2.4 Taxa interna de retorno

A TIR destaca-se como uma ferramenta financeira empregada para mensurar a atratividade econômica de um investimento. Em termos práticos, ela reflete a taxa de desconto que iguala ao VPL de um projeto a zero, ou seja, o ponto em que os fluxos de caixa descontados se equilibram com o capital inicialmente aplicado (Drozdowski; Dziekański, 2022). Para os autores, essa métrica permite ao investidor realizar análise de viabilidade ao comparar diferentes oportunidades de investimento e decidir quais delas são mais alinhadas aos seus objetivos financeiros.

Quando a TIR supera a taxa mínima de retorno exigida pelo investidor — frequentemente referida como a taxa de atratividade ou custo de capital —, o projeto é considerado economicamente viável, já que promete retornos superiores ao mínimo aceitável (Assaf Neto, 2021). No entanto, é importante ressaltar que, embora a TIR seja uma medida valiosa, ela não deve ser utilizada isoladamente na tomada de decisões (Drozdowski; Dziekański, 2022).

Para Drozdowski e Dziekański (2022), fatores como riscos associados ao projeto, incertezas no fluxo de caixa e contextos macroeconômicos também precisam ser cuidadosamente avaliados para garantir uma análise mais efetiva. Os autores destacam a importância de compreender as limitações da TIR, uma vez que, há possibilidade de cenários onde ocorrem múltiplas inversões de fluxo de caixa, o que pode resultar em taxas internas de retorno incertas. Nesses casos, tanto Assaf Neto (2021) quanto Drozdowski e Dziekański (2022), recomendam complementar a análise com outras ferramentas, como o VPL ou índices de rentabilidade, capaz de oferecer uma visão mais factível sobre a viabilidade do investimento. Assim, a TIR deve ser vista como parte integrante de um processo decisório, que busca equilibrar rigor técnico com a interpretação crítica das condições específicas de cada projeto.

Na análise da viabilidade econômica de sistemas FV, a TIR tem se mostrado uma ferramenta eficaz, como evidenciado nos estudos de Carli *et al.* (2018), que investigaram projetos em uma comunidade rural do Brasil com o objetivo de avaliar a atratividade dos investimentos em energia solar. Os autores observaram que, ao considerar o consumo médio de energia das residências e as tarifas mínimas de conexão exigidas pela concessionária, a TIR superou a taxa mínima aceitável para a maioria dos imóveis analisados. Isso sugere que a implementação de sistemas FV apresentou-se financeiramente viável. Revelaram ainda que, a comparação entre a TIR e o período de retorno do investimento indicou que a adoção da energia solar não apenas satisfaz a demanda local, mas também oferece um retorno significativo ao

longo do ciclo de vida do sistema. Essa constatação reforça a relevância da energia solar como uma solução sustentável e economicamente vantajosa, contribuindo para a autonomia energética da comunidade e promovendo um futuro mais sustentável. Para calcular a TIR de um projeto com duração de t anos, Assaf Neto (2021) propõe a seguinte expressão, ver Equação 4.

Equação 4 – Taxa Interna de Retorno

$$VPL = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1 + TIR)^t} - I_0 = 0$$

Onde:

VPL: Valor Presente Líquido, definido como zero para encontrar a TIR.

FC_t : Fluxo de Caixa no período t (sendo FC_0 o investimento inicial, geralmente negativo).

TIR: Taxa Interna de Retorno, ou taxa de desconto, valor a ser encontrado para zerar o VPL.

t : Período de tempo.

n : Número total de períodos considerados no horizonte do projeto.

$1+TIR$: Fator de desconto que ajusta cada fluxo de caixa ao valor presente.

Para Assaf Neto (2021), a TIR não se configura como custo de oportunidade do capital, já que ambas aparecem como taxas de desconto na fórmula do VPL. Para o autor, a TIR representa uma medida que mostra o retorno de um projeto com base nos valores e nas datas dos fluxos de caixa que ele gera. Já o custo de oportunidade do capital é a taxa de retorno esperada de outros investimentos. Muitas vezes, definida pelos mercados financeiros, onde permite parametrizar ganhos ao comparar por outras alternativas de investimentos.

2.2.5 Índice de Lucratividade

Para Assaf Neto (2021), o Índice de Lucratividade representa um tipo de métrica que inclui a TIR e o próprio VPL na avaliação da viabilidade de projetos de investimento em diferentes cenários. Ao considerar não apenas o retorno absoluto, mas também a eficiência do investimento, essa métrica possibilita priorizar projetos que não apenas geram lucro, mas que também maximizam o uso dos recursos disponíveis. Sua análise sugere que, quando o IL é maior que 1, o projeto oferece retornos superiores ao capital investido, sendo, portanto, considerado viável. Por outro lado, valores inferiores a 1 indicam que o projeto não atinge o mínimo necessário para justificar o desembolso inicial. Conforme o autor, sua equação é apresentada da seguinte maneira:

Equação 5 – Índice de Lucratividade

$$IL = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+i)^t}}{|FC_0|}$$

Onde:

IL: Índice de Lucratividade, que mede a eficiência do uso do capital investido.

FC_t : Fluxo de Caixa no período t (sendo FC_0 o investimento inicial, geralmente negativo).

i : Taxa de desconto do projeto (custo de oportunidade ou taxa mínima de atratividade, inerentes ao projeto).

t : Período de tempo.

n : Horizonte do projeto.

Para Assaf Neto (2021) e Sokolov (2024), o emprego do IL tem-se apresentado útil na comparação de múltiplos projetos, inclusive quando há restrições orçamentárias ou necessidade de priorização na alocação de recursos. Outro destaque é que sua vantagem se dá pela capacidade de fornecer uma perspectiva relativa sobre a atratividade de um investimento. Ou seja, enquanto o VPL mede o retorno absoluto em termos monetários e a TIR avalia a taxa de retorno intrínseca do projeto, o IL oferece uma visão proporcional, destacando a eficiência na utilização do capital. No entanto, suas limitações estão relacionadas à incapacidade de captar aspectos qualitativos ou os riscos associados aos fluxos de caixa projetados.

2.3 Análise de Sensibilidade em Projetos de Energia Solar

A análise de sensibilidade representa uma técnica para avaliação de riscos em projetos de investimento, permitindo verificar como variações em variáveis críticas influenciam os indicadores de viabilidade econômico-financeira (Iloiu; Csminga, 2009). Segundo Brealey, Myers e Allen (2020), esse método testa a robustez do projeto ao simular cenários imprevisíveis, seja com variações nos custos ou na receita, de modo que decisões estratégicas sejam baseadas em dados resilientes a incertezas. De modo complementar, envolve confrontar a influência de diferentes variáveis ou fatores relativos à indicadores-chave de investimento, normalmente seguindo um processo estruturado que inclui identificar e determinar seus valores nominais e limites (Pinto *et al.*, 2020; Raeva; Chakarov, 2022).

No contexto de sistemas FV, a análise de sensibilidade é particularmente relevante devido à volatilidade de variáveis como tarifas de energia, custos de equipamentos e condições climáticas (Araújo; Medeiros; Abrahão, 2024; Jak *et al.*, 2013).

De acordo com Cortés (2024), Jak *et al.* (2013) e Talavera *et al.* (2012), a aplicação dessa técnica envolve: i) determinar variáveis-chave (por exemplo, custos iniciais, tarifas de

energia e taxa de desconto); ii) definir de cenários: base, pessimista (por exemplo, aumento de custos e redução de receita), e otimista (por exemplo, redução de custos/aumento de receita); recalcular os indicadores: VPL, TIR e PD para cada cenário.

Estudos empíricos, como o de Araújo; Medeiros; Abrahão (2024), demonstram que projetos FV no Brasil apresentam maior sensibilidade a variações às irradiações e tarifa de energia elétrica do que a flutuações nos custos iniciais. Isso ocorre porque a receita gerada pela economia na conta de energia representa a principal variável financeira desses projetos.

2.4 Impacto Ambiental de Sistemas Fotovoltaicos

A quantificação de emissões de CO₂ evitadas por sistemas FV tem sido apontada como forma de avaliar dinâmicas na transição energética sustentável. Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), metodologias padronizadas permitem calcular a redução de gases de efeito estufa (GEE) com base na energia gerada por fontes renováveis, substituindo fontes fósseis ou emissoras (IPCC, 2020).

No contexto brasileiro, o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI) fornece fatores de emissão regionalizados para o Sistema Interligado Nacional (SIN), considerando a composição da matriz elétrica de cada subsistema. Para Minas Gerais, integrada ao subsistema Sudeste/Centro-Oeste, o fator de emissão médio é de 0,1345 kg CO₂/kWh (MCTI, 2023), refletindo a participação de termelétricas a gás natural e carvão na geração de energia.

Estudos como o de Araújo (2022) constataram, por exemplo, que sistemas FV em instituições públicas brasileiras, particularmente universidades e institutos federais, têm evidenciado redução significativa de emissões de CO₂ e custos de energia, podendo mitigar entre 20 e 327 toneladas de CO₂ por ano, dependendo da capacidade instalada e das condições locais.

3 METODOLOGIA

Este estudo se configura como uma pesquisa exploratória, com a finalidade de analisar a viabilidade econômico-financeira da instalação de um sistema de energia solar FV *on-grid* em uma propriedade rural localizada no município de Uberlândia, MG.

Conforme Gil (2016), as pesquisas exploratórias permitem investigar fenômenos pouco estudados, proporcionando uma compreensão particularizada e oportunizando novas investigações. A natureza deste estudo justifica-se por tratar-se de um tema ainda pouco explorado na literatura, dado o enfoque e suas especificidades regionais e ao impacto ambiental.

Dessa forma, a pesquisa exploratória não apenas oferece uma visão geral sobre o tema, dada sua característica descritiva, mas também permite evidenciar aspectos empíricos, uma vez que sua análise ocorre pelo método de estudo de caso (Gil, 2016; Yin, 2019).

Segundo Yin (2019), o estudo de caso revela-se como adequado por permitir investigar fenômenos complexos de modo empírico, uma vez que, enfoques de investigação possibilita observar fronteiras entre o fenômeno e o ambiente em que se insere. No contexto desta pesquisa, o estudo de caso permite compreender as particularidades da implementação de um sistema solar FV. Leva em consideração as condições operacionais específicas da propriedade rural, como o consumo de energia, a irradiação solar na região e os custos de implantação, além de analisar os dados econômico-financeiros associados.

Conforme Yin (2019), embora o protocolo de estudo de caso seja recomendado, sua aplicação se mostrou dispensável nesta pesquisa devido à natureza exploratória e quantitativa do estudo, aliada à disponibilidade de dados objetivos e estruturados (consumo energético, custos de implantação, dados econômico-financeiros, projeções técnicas via *software* Designer[®], dados de radiação solar e de fator de emissão de CO₂). A ausência de um protocolo formal permitiu maior flexibilidade para adaptar a coleta e análise às especificidades do contexto rural analisado, sem comprometer a confiabilidade dos resultados, já que os procedimentos foram guiados por indicadores financeiros consolidados e simulações de cenários validados via *software*.

Os dados utilizados foram obtidos diretamente da propriedade rural em análise no ano de 2023, por meio de uma análise documental das faturas de energia elétrica. O objetivo foi medir o consumo mensal de energia, expresso em quilowatt-hora (kWh). Como ressalta Gil (2016), o método observacional é valorizado nas ciências sociais por sua capacidade de fornecer uma observação direta do fenômeno específico em estudo. A partir das informações coletadas, foi possível determinar a média mensal de consumo de energia elétrica da propriedade. Para isso, utilizou-se como referência o ano de 2024, uma vez que, o ano-base para a implementação do projeto foi 2023. As estimativas foram elaboradas com o auxílio do *software* Designer[®].

Foram utilizados dados climáticos da região, com ênfase na irradiação solar e nas condições ambientais. Essas informações foram extraídas do Atlas Brasileiro de Energia Solar, que fornece um panorama detalhado sobre o potencial solar da região sudeste em questão.

Para isso, combinou-se análises de indicadores financeiros (PD, TIR, VPL, IL) com simulações técnicas baseadas na irradiação solar média da região sudeste de 5,06 kWh/m²/dia | 1846 kWh/m²/ano, e na eficiência operacional do sistema de 85% (Delapedra-Silva *et al.*, 2022;

Pereira *et al.*, 2017), alcançando também como subproduto da pesquisa a sua contribuição para a mitigação de emissões de CO₂.

A análise da viabilidade econômico-financeira do sistema FV implementado na propriedade foi conduzida conforme o referencial desta pesquisa. Os benefícios gerados pelo sistema estão previstos para 25 anos. Foram realizadas simulações técnicas para estimar a geração de energia do sistema FV, utilizando a irradiação solar média da região sudeste do Brasil, que é de 5,06 kWh/m²/dia (equivalente a 1846 kWh/m²/ano), conforme indicado pelo Atlas Brasileiro de Energia Solar (Pereira *et al.*, 2017). Para esta análise, foi considerada uma eficiência operacional do sistema de 85%, levando em conta as perdas decorrentes de sombreamento, temperatura e outros fatores que influenciam o desempenho dos painéis solares (Delapiedra-Silva *et al.*, 2022).

Para a modelagem da capacidade de geração de energia, foi concedido o *software* “Designer[®]” da SolarEdge, que possibilita a simulação de diversos cenários de geração de energia FV, levando em conta as condições climáticas e geográficas da região. Esse *software* auxiliou no cálculo da produção estimada de energia do sistema, considerando aspectos como a irradiação solar, o tipo de painel utilizado e as perdas resultantes do sombreamento e da especificidade do terreno.

Para avaliar a robustez do projeto frente a incertezas, foi realizada uma análise de sensibilidade, a partir da metodologia de Cascaes, Rodrigues e Schneider (2020). Essa técnica possibilita avaliar projetos de investimento sob incerteza conforme estudos de Pejović, Pejović, Matić e Ljumović (2022). Ela permite avaliar como as alternâncias nas variáveis de entrada influenciam nos resultados do projeto, mantendo outras variáveis constantes (Cortés, 2022).

A análise de sensibilidade foi complementada a partir estudos de Cortés (2024), Jak *et al.* (2013) e Talavera *et al.* (2012), buscando avaliar a resiliência do projeto face às incertezas econômicas e operacionais envolvendo as seguintes etapas:

- i) definição das variáveis críticas: custo inicial do sistema FV de R\$ 1.380.000,00; e, tarifa de energia elétrica de R\$ 0,965/kWh.
- ii) definição de cenários: cenário base correspondente aos valores originais (sem alterações); cenário pessimista com aumento de 15% no custo inicial (R\$ 1.587.000,00); e, redução de 20% na tarifa de energia (R\$ 0,772/kWh); iii) cenário otimista com redução de 10% no custo inicial (R\$ 1.242.000,00), e aumento de 10% na tarifa de energia (R\$ 1,061/kWh).
- iii) recálculo dos indicadores financeiros para cada cenário, recalculou-se o VPL utilizando a TMA de 9,5%; a TIR, onde almeja-se uma taxa de desconto que iguala

o VPL a zero; o PD, com tempo para recuperação do investimento, considerando fluxos de caixa descontados; e, o ROI por meio da relação percentual entre o lucro líquido e o investimento inicial.

Os dados de entrada foram obtidos por meio das Tabelas 2 e 4, e posteriormente utilizou-se a ferramenta do Excel® conjuntamente com o software Designer® para simulação dos cenários e ajustes dos fluxos de caixa. Essa abordagem metodológica baseia-se na premissa de que projetos de energia renovável devem ser testados quanto à resiliência econômica, conforme destacado por Brealey, Myers e Allen (2020). A seleção dos cenários priorizou variáveis de maior influência nos projetos FV, como tarifas de energia e custos de implantação.

Ainda, no âmbito da análise, foi considerado o impacto ambiental do projeto, com o objetivo de quantificar a redução das emissões de CO₂ ao longo da vida útil do sistema. Para esta avaliação, foi utilizado o fator de emissão regionalizado de 0,1345 kg CO₂/kWh, conforme definido pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI, 2023). Essa abordagem possibilitou estimar a contribuição do sistema FV para a descarbonização da matriz energética local.

A avaliação do impacto ambiental do sistema FV baseou-se na estimativa da redução de emissões de CO₂, conforme as diretrizes estabelecidas pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2020). Dessa maneira, foi empregada uma abordagem metodológica que considerou a substituição da energia convencional da rede elétrica pela geração proveniente do sistema solar FV, levando em conta a composição da matriz energética regional.

Essa metodologia envolveu as seguintes etapas: i) definição das variáveis e fontes de dados: energia gerada pelo sistema correspondente a 432.074 kWh/ano; fator de emissão de CO₂ da rede elétrica: 0,1345 kg CO₂/kWh, referente ao subsistema Sudeste/Centro-Oeste (MCTI, 2023) — no qual Uberlândia está inserida; e, vida útil do sistema de 25 anos.

A redução de emissões de CO₂ foi calculada com base na substituição da energia convencional (rede elétrica) pela energia gerada pelo sistema FV, por meio da equação 6.

Equação 6 - Cálculo de emissões evitadas de CO₂

$$\text{Emissões evitadas (ton CO}_2\text{ ano)} = E_{\text{gerada}} \times FE_{\text{rede}}$$

Sendo:

E_{gerada} : Energia gerada anualmente pelo sistema FV (kWh/ano);

FE_{rede} : Fator de emissão de CO₂ da rede elétrica (ton CO₂/kWh).

O fator de emissão fornecido pelo MCTI (0,1345 kg CO₂/kWh) foi convertido para toneladas: $FE_{rede} = 0,1345 \text{ kg CO}_2/\text{kWh} \div 1000 = 0,0001345 \text{ ton CO}_2/\text{kWh}$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Estudo de caso

No estudo de caso desta pesquisa, foi constatado o interesse do proprietário rural em adquirir o sistema solar FV com o objetivo de gerar energia e reduzir os custos associados. Essa decisão se baseia na expectativa de um aumento significativo no consumo de energia em seu empreendimento ao longo do tempo. A instalação do sistema ocupou uma área de aproximadamente 4.000 m², com um investimento inicial de R\$ 1.380.000,00, conforme apresentado na Tabela 3. A propriedade optou pela implementação do sistema *on-grid* devido ao custo-benefício, uma vez que esse modelo dispensa a necessidade de baterias para armazenamento, reduzindo custos de implantação e manutenção.

O sistema de energia solar FV utilizou a configuração *on-grid*, que se integra à rede de distribuição da concessionária local e opera sob o regime de compensação de créditos energéticos, conforme Resolução Normativa nº 482/2012 da ANEEL.

Esse sistema apresenta-se como maior custo-benefício para o consumidor, já que necessita dos módulos FV, do inversor e de um medidor bidirecional para injetar a energia gerada na rede de distribuição. Ou seja, não há a necessidade de um banco de baterias para armazenar a energia gerada. A ausência de bancos de baterias, necessários em sistemas independentes (*off-grid*), constitui uma vantagem do ponto de vista econômico e operacional, uma vez que elimina os custos associados à aquisição, substituição periódica e manutenção dessas baterias. Assim, é composto por módulos fotovoltaicos, um inversor *grid-tie* e um medidor bidirecional especial, que tem a função de medir tanto o consumo de energia quanto a injeção do excedente na rede pública.

Devido a variação na incidência solar ao longo do ano, houve ajuste da inclinação e orientação azimutal dos módulos FV, pois desvios significativos em relação aos parâmetros ideais podem resultar em perdas por desalinhamento. Para este projeto, adotou-se uma inclinação de 21° em relação ao plano horizontal, que se alinha à latitude de Uberlândia (≈18,9° Sul), permitindo uma margem de ajuste para melhorar a captação de energia durante os períodos de menor insolação. Essa definição é respaldada por simulações realizadas com o *software Designer*® e pelas diretrizes da norma NBR 10899 para sistemas fotovoltaicos fixos, proporcionando equilíbrio entre eficiência anual e previsões estruturais. Demais dados relacionados a implementação do sistema FV estão nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2 – Dados da instalação do sistema solar FV

Inclinação	21°
Área ocupada	4.265 m ²
Transformador de elevação	300 kVA (380 V / 13.800 V)

Fonte: Dados da pesquisa.

Tabela 3 – Principais recursos para implementação do sistema solar FV

Módulos	
Modelo	DAH 330w (DHP72-33)
Quantidade	830
Tipo	Policristalino – 72 células
Área	1,924 m ²
Eficiência	17,02%
Inversor	
Modelo	SolarEdge SE75K-380V
Quantidade	3
Eficiência	98,10%
Otimizador	450 x (SolarEdge P730)
Mão de obra	
Projeto elétrico	informação restrita
Instalação dos módulos	informação restrita
Visita técnica	informação restrita
Comissionamento	informação restrita
Total	R\$ 1.380.000,00

Fonte: Dados da pesquisa.

Com base nas informações apresentadas nas Tabelas 2 e 3, a implementação do sistema FV, que abrange desde a concepção do projeto até a instalação e comissionamento dos equipamentos, foi realizado por meio de empresa terceirizada. O investimento inicial totalizou R\$ 1.380.000,00, o que inclui a aquisição de módulos FV, inversores *grid-tie* e um bidirecional, além dos custos de instalação, que contemplam as estruturas de fixação e os cabos necessários. Também estão incluídos os serviços de engenharia e a homologação do sistema junto à entrega. Esse montante representa, portanto, o CAPEX (Capital Expenditure).

Com base nos dados informados, as simulações computacionais foram realizadas no *software Designer*[®] e sugeriram uma capacidade de geração energética média de 3.500 kWh/mês. Esse montante corresponde à uma redução de aproximadamente 77,43% de redução no custo mensal com energia elétrica, considerando a tarifa média regional de R\$ 0,965/kWh (CEMIG, 2023) e a projeção de consumo da propriedade. A Tabela 4, a seguir, detalha o ganho econômico com a implementação do sistema FV.

Tabela 4 – Projeção mensal de economia energética para 2023: Simulação no Designer®

Mês	Consumo Total (kWh)	Estimativa de Produção FV (kWh)	Diferença a pagar (kWh)
Janeiro	50.739	32.650	18.089
Fevereiro	48.488	38.736	9.752
Março	48.194	37.720	10.474
Abril	48.004	35.361	12.643
Maio	39.449	32.225	7.224
Junho	45.572	32.114	13.458
Julho	40.079	37.353	2.726
Agosto	43.801	38.986	4.815
Setembro	48.599	40.271	8.328
Outubro	49.487	37.086	12.401
Novembro	53.443	35.336	18.107
Dezembro	42.145	34.236	7.909
Total - ano	558.000	432.074	125.926
Média - mês	46.500	36.006	10.494

Fonte: Dados da pesquisa.

A Tabela 4 simula uma redução nos custos com energia elétrica após a instalação do sistema solar FV em regime *on-grid*. Com uma geração média mensal estimada em 36.006 kWh, o sistema é capaz de suprir em 77,43% da demanda energética da propriedade rural. Essa melhoria impacta positivamente na conta de energia, ao projetar uma média de consumo a pagar de apenas 10.494 kWh por mês.

Com base nessa perspectiva de ganho econômico, prosseguiu-se na análise da viabilidade econômico-financeira. Essa foi conduzida com base em indicadores PD, TIR, VPL e IL. Esses indicadores foram calculados levando em conta o fluxo de caixa projetado para um período de 25 anos, que corresponde à vida útil do sistema, foi admitido como referência a taxa mínima de atratividade (TMA) de 9,5%, estabelecida com base na média da taxa SELIC dos últimos 10 anos. A Tabela 5 resume os resultados obtidos para cada indicador.

Tabela 5 – Indicadores de Viabilidade Econômico-Financeira do Projeto FV

Indicador	Resultado
Payback Descontado (PD)	4 anos e 1 mês
Taxa Interna de Retorno (TIR)	16%
Valor Presente Líquido (VPL)	R\$ 220.971,99
Índice de Lucratividade (IL)	1,16

Fonte: Dados da pesquisa.

A análise integrada dos indicadores financeiros apresentados na Tabela 5, confirma a viabilidade econômico-financeira do sistema FV *on-grid* na propriedade rural de Uberlândia-MG. Esses resultados não apenas atendem aos objetivos propostos de redução de custos com energia e diversificação da matriz local, como também reforçam estudos anteriores, como os de Cucchiella, D'Adamo e Gastaldi (2017), que destacam *paybacks* entre 4 e 6 anos para

sistemas FV em regiões com irradiação solar acima de 5 kWh/m²/dia, condição plenamente suprida em Uberlândia (5,06 kWh/m²/dia, conforme Pereira *et al.*, 2017).

A TIR de 16%, apresentou-se superior à TMA de 9,5%, sustentando a argumentação de Assaf Neto (2021) sobre a importância de projetos cuja rentabilidade ultrapassa o custo de oportunidade do capital, considerando contextos de alta eficiência operacional, que neste caso foi considerada de 85% (conforme Delapedra-Silva *et al.*, 2022). Esse aspecto, corrobora com os estudos de Queiroz *et al.* (2020) sobre a atratividade de investimentos em energia solar em regiões com potencial geográfico otimizado, como a do Triângulo Mineiro. O VPL positivo de R\$ 220.971,99 e o índice de lucratividade de 1,16 estão alinhados com a metodologia proposta por Martínez-Ruiz, Manotas-Duque e Ramírez-Malule (2020), que associam esses indicadores à substituição de fontes convencionais por energia solar em médio prazo.

A consistência do projeto (sistema FV) é demonstrada pela análise de sensibilidade na Tabela 7, que evidencia sua resiliência mesmo em situações desfavoráveis, como um aumento de custos de 15% e uma redução tarifária de 20%. Mesmo nessas condições, o VPL permanece positivo, alcançando R\$ 85.200,00, e o TIR se mantém acima da TMA, que foi estimada em 12%, alinhando-se às condições de resiliência econômica discutidos por Brealey, Myers e Allen (2020) e à flexibilidade estratégica defendida por Jak *et al.* (2013).

As variáveis críticas compõem-se basicamente do custo inicial do sistema de R\$ 1.380.000,00 e da tarifa de energia elétrica de R\$ 0,965/kWh. Para o cenário base os valores originais são considerados sem alterações, no cenário pessimista simulou-se um aumento de 15% no custo inicial: R\$ R\$ 1.587.000,00, e uma redução na tarifa de energia de 20%: R\$ 0,772/kWh. Já no cenário otimista projetou-se redução de 10% no custo inicial: R\$ 1.242.000,00, e um aumento de 10% na tarifa de energia, perfazendo: R\$ 1,061/kWh.

Para cada cenário recalculou-se os indicadores VPL, TIR, PD e ROI, mantendo fixos os demais parâmetros (ex.: irradiação solar, vida útil do sistema), conforme Tabela 7.

Tabela 7 - Resultados da análise de sensibilidade por cenários

Cenários	VPL (R\$)	TIR	PD	ROI (5 anos)
Base	220.971,99	16%	4 anos e 1 mês	51%
Pessimista	85.200,00	12%	5 anos e 2 meses	28%
Otimista	356.400,00	24%	3 anos e 8 meses	73%

Fonte: Dados da pesquisa.

Constatou-se na Tabela 7, a coerência entre as variações das variáveis críticas (custo inicial e tarifa) e os indicadores financeiros que, no cenário pessimista o aumento de 15% no investimento e a redução de 20% na tarifa resultaram em: i) queda de 61,4% no VPL (de R\$ 220.971,99 para R\$ 85.200,00), refletindo sensibilidade à combinação de custos elevados e

receitas menores; ii) redução de 25% na TIR (de 16% para 12%), ainda superior à TMA (9,5%), mantendo atratividade econômica; e, aumento de 23,3% no PD (4,08 para 5,17 anos), dentro de horizontes aceitáveis para projetos FV. Esses resultados validam a robustez do projeto, pois mesmo em condições desfavoráveis, os indicadores sustentam viabilidade, alinhando-se a estudos como o de Delapiedra-Silva *et al.* (2022), que destacam a resiliência de sistemas solares frente a volatilidades de mercado.

Em seguida, realizou-se complementarmente uma análise de impacto ambiental do projeto por meio da estimativa de redução de emissões de CO₂, a partir do IPCC. Com base nos dados de energia gerada de 432.074 kWh/ano, e considerando o fator de emissão de 0,1345 kgCO₂/kWh referente à média de 2023 para o subsistema Sudeste/Centro-Oeste (que inclui Minas Gerais), conforme dados do MCTI (2025).

O cálculo, conforme Equação 6, resultou em:

Emissões evitadas = $432.074 \text{ kWh/ano} \times 0,0001345 \text{ ton CO}_2/\text{kWh} = 58,14 \text{ ton CO}_2/\text{ano}$. Considerando a vida útil do sistema projetado de 25 anos, a mitigação total estimada equivaleria a $58,14 \times 25 = 1.453,5 \text{ ton CO}_2$. Essa redução equivale ao plantio de 23.404 árvores maduras (considerando que cada árvore absorve 60 kg de CO₂/ano (IPCC, 2020)). Os resultados evidenciam que, além da viabilidade econômica, o projeto contribui significativamente para a descarbonização da matriz energética local. As emissões evitadas de 1.453,5 ton CO₂ em 25 anos converge ao debate sobre externalidades positivas de sistemas FV, associando a transição energética a ganhos ambientais e econômicos simultâneos, conforme Zhang *et al.* (2023).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo deste estudo foi avaliar a viabilidade econômico-financeira da instalação de um sistema de energia solar FV em uma propriedade rural situada no município de Uberlândia. A análise foi conduzida para entender os efeitos dessa implementação na diversificação da matriz energética, na redução dos custos operacionais a longo prazo e na promoção da sustentabilidade ambiental por meio do uso de fontes renováveis de energia.

Os resultados obtidos indicam que a implementação do sistema de energia solar FV mostra-se viável tanto do ponto de vista econômico quanto financeiro. Constatou-se ganhos econômicos do sistema ao suprir 77,43% da demanda energética da propriedade rural, e os efeitos financeiros observados revelaram um PD estimado em 4 anos e 1 mês, o que sugere um retorno relativamente rápido sobre o investimento inicial. Verificou-se ainda, efeitos positivos do VPL e da TIR (R\$ 220.971,99 e 16%, respectivamente) destacando a atratividade financeira do projeto, bem como sua capacidade de gerar economias ao longo do tempo. O ROI (51%)

também apresentou um índice considerável, evidenciando em conjunto com IL (1,16) a eficiência do investimento em termos de retorno financeiro.

Identificou-se ainda a capacidade o potencial do sistema para se estabelecer como uma fonte de energia limpa e renovável, com uma estimativa de mitigação de 1.453,5 toneladas de CO₂ ao longo de 25 anos. Essa transição energética não só ajuda a diminuir as emissões de gases de efeito estufa, mas também coloca a propriedade rural em uma posição de destaque quanto ao comprometimento com práticas sustentáveis e responsáveis.

No contexto contemporâneo, caracterizado por desafios em relação à segurança energética e às mudanças climáticas, a adoção de sistemas FV se destaca como uma alternativa estratégica também para propriedades rurais que desejam otimizar seus custos operacionais, diminuir sua pegada de carbono e aprimorar sua identidade corporativa.

As contribuições desta pesquisa são relevantes tanto para o contexto acadêmico quanto prático. No que diz respeito ao âmbito acadêmico, o estudo enriquece o debate sobre a viabilidade econômico-financeira de projetos de energia solar FV, apresentando uma análise empírica dos econômicos, financeiros e ambientais em uma propriedade rural. Em relação à contribuição prática, os resultados alcançados auxiliam na tomada de decisões, permitindo que outras propriedades rurais avaliem e se adequem em suas análises ao considerar a transição para fontes de energia limpa.

Em síntese, os resultados demonstram que o projeto é viável dentro do período analisado, apresentando-se como solução sustentável para a gestão energética da propriedade rural. Desta maneira, este estudo não apenas cumpre as análises de viabilidade econômica, mas também enriquece as discussões sobre a integração de fontes renováveis no setor energético brasileiro.

Para estudos futuros, sugere-se a realização de análises comparativas entre diversas tecnologias de geração de energia renovável, como a eólica e a biomassa. Outro aspecto, seria investigar modelos de financiamento alternativos, como consórcios ou parcerias público-privadas, que possam facilitar a adoção dessas soluções dirigidas a pequenas e médias propriedades rurais. Por fim, pesquisas que incluam variáveis climáticas e regionais de forma mais detalhada podem aprofundar ainda mais a compreensão sobre a eficiência e a sustentabilidade desses sistemas em diversos contextos geográficos.

6 REFERÊNCIAS

- AGHAEI, M. *et al.* Autonomous intelligent monitoring of photovoltaic systems: An in-depth multidisciplinary review. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1002/pip.3859>
- AL-SHARO, Y. M. *et al.* Optimization of stable energy PV systems using the Internet of Things (IoT). **Tikrit Journal of Engineering Sciences**, v. 31, n. 1, p. 127-137, 2024. DOI: <https://doi.org/10.25130/tjes.31.1.11>
- ARAÚJO, N. M. F. T. S.; MEDEIROS, S. E. L.; ABRAHÃO, R. Variability and sensitivity of models used to estimate photovoltaic production. **Energies**, v. 17, n. 16, p. 4177, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17164177>
- ARIFIN, Z. *et al.* Economic feasibility investigation of on-grid and off-grid solar photovoltaic system installation in central Java. **International Journal of Energy Production and Management**, v. 8, n. 3, p. 169-175, 2023. DOI: <https://doi.org/10.18280/ijepm.080305>
- ASSAF NETO, Alexandre. **Finanças Corporativas e Valor**. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2021.
- ASSAF NETO, Alexandre; LIMA, Fabiano Guasti. **Curso de Administração Financeira**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Fixação de módulos fotovoltaicos em estruturas de suporte** – Requisitos e métodos de ensaio: NBR 10899. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.
- BOUBII, C. *et al.* Integrated control and optimization for grid-connected photovoltaic systems: A model-predictive and PSO approach. **Energies**, v. 16, n. 21, p. 7390, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16217390>
- BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Resolução Normativa nº 482**, de 17 de abril de 2012. Diário Oficial da União: Seção 1, Brasília, DF, edição de 18 de abril de 2012, p. 21.
- BREALEY, R. A.; MYERS, S. C.; ALLEN, F. **Princípios de finanças corporativas**. 12. ed. Porto Alegre: AMGH, 2020.
- CARLI, R. L. *et al.* Economic viability of photovoltaic systems in a rural community in Brazil. **Journal of Agricultural Science**, v. 10, n. 7, p. 303, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5539/jas.v10n7p303>
- CASCAES, B. P; RODRIGUES, L. J.; SCHNEIDER, P. S. **Análise de sensibilidade usando o método de Monte Carlo aplicada à instalação de um SFCR**. In: SILVA, M. E. D. Subtemas e enfoques na sustentabilidade 2. Ponta Grossa - PR: Atena, 2020. p. 41-51.
- COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS (CEMIG). **Tarifas de energia elétrica** – Grupo B (baixa tensão). Belo Horizonte: CEMIG, 2023. Disponível em: <https://www.cemig.com.br/>. Acesso em: 10 out. 2023.

CONSTANTINO, G. *et al.* Adoption of photovoltaic systems along a sure path: A Life-Cycle Assessment (LCA) study applied to the analysis of GHG emission impacts. **Energies**, v. 11, n. 10, p. 2806, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/en11102806>

CORTÉS, J. G. Sensitivity analysis and finances. **Mercados y Negocios**, n. 51, p. 131-142, 2024. DOI: <https://doi.org/10.32870/myn.vi51.7724>

CUADRADO, J. *et al.* Long-term effects of degradation on photovoltaic system return on investment. **IEEE Latin America Transactions**, v. 21, n. 12, p. 1282-1290, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1109/tla.2023.10305232>

CUCCHIELLA, F.; D'ADAMO, I.; GASTALDI, M. Economic analysis of a photovoltaic system: A resource for residential households. **Energies**, v. 10, n. 6, p. 814, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/en10060814>

DADD, D.; HINTON, M. Performance measurement and evaluation: applying return on investment (ROI) to human capital investments. **International Journal of Productivity and Performance Management**, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1108/ijppm-10-2021-0573>

DAI, H. *et al.* The analysis of three main investment criteria: NPV IRR and payback period. In: **2022 7th International Conference on Financial Innovation and Economic Development (ICFIED 2022)**. Zhuhai, China: Atlantis Press, 2022. DOI: <https://doi.org/10.2991/aebmr.k.220307.028>

DELAPEDRA-SILVA, V. *et al.* Methods for financial assessment of renewable energy projects: A review. **Processes**, v. 10, n. 2, p. 184, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr10020184>

DROZDOWSKI, G.; DZIEKAŃSKI, P. Internal rate of return as an enhancement of the decision-making process in the aspect of choosing the investment process. **Market Infrastructure**, n. 66, 2022. DOI: <https://doi.org/10.32843/infrastructure66-8>

EKE, M. N. Photovoltaic characteristics and applications. **Electrode Materials for Energy Storage and Conversion**. Boca Raton: CRC Press, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003145585-17>

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Nota Técnica DEA 19/14 - Inserção da Geração Fotovoltaica Distribuída no Brasil**. Rio de Janeiro: EPE, 2015. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/>. Acesso em: 30 jan. 2025.

FENG, G. *et al.* A Review of exploration and development technologies for coal, oil, and natural gas. **Energies**, v. 17, n. 14, p. 3600, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17143600>

FILHO, A. S. Nascimento et al. Renewable sources to promote well-being in poor regions of Brazil. **Frontiers in Physics**, v. 10, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/fphy.2022.1048721>

GAVIRIA, J. F. *et al.* Machine learning in photovoltaic systems: A review. **Renewable Energy**, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.06.105>

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2016.

HANNAN, M. A. *et al.* Fuzzy logic inverter controller in photovoltaic applications: Issues and recommendations. **IEEE Access**, v. 7, p. 24934-24955, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2019.2899610>

HOLE, S. R.; GOSWAMI, A. D. Quantitative analysis of DC–DC converter models: A statistical perspective based on solar photovoltaic power storage. **Energy Harvesting and Systems**, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1515/ehs-2021-0027>

HUSSIN, F.; ISSABAYEVA, G.; AROUA, M. K. Solar photovoltaic applications: opportunities and challenges. **Reviews in Chemical Engineering**, v. 34, n. 4, p. 503-528, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1515/revce-2016-0058>

ILOIU, M.; CSIMINGA, D. Métodos de avaliação de risco de projeto - análise de sensibilidade. **Annals of the University of Petrosani: Economics**, v. 9, p. 33-38, 2009.

International Renewable Energy Agency (IRENA). **Renewable Capacity Statistics 2023**. Abu Dhabi: IRENA, 2023. Disponível em: <https://www.irena.org/Publications/2023/Mar/Renewable-capacity-statistics-2023>. Acesso em: 30 jan. 2025.

JAK, A. Q. *et al.* Sensitivity analysis of a standalone photovoltaic system model parameters. **Journal of Applied Sciences**, v. 13, n. 2, p. 220-231, 2013. DOI: <https://doi.org/10.3923/jas.2013.220.231>. Acesso em: 29 jan. 2025.

LEMOIS, R. M. T. *et al.* Considerations on the evolution of power plants in Brazil and their social and environmental impacts. **Journal of Engineering Research**, v. 3, n. 24, p. 2-11, 2023. DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.3173242314073>

MARSHALL, H. E. A graphical approach to discounted payback. **Construction Management and Economics**, v. 3, n. 2, p. 105-120, 1985. DOI: <https://doi.org/10.1080/01446198500000009>

MARTÍNEZ-RUIZ, Y.; MANOTAS-DUQUE, D. F.; RAMÍREZ-MALULE, H. Evaluation of investment projects in photovoltaic solar energy using the dnpv methodology. **International Journal of Energy Economics and Policy**, v. 11, n. 1, p. 180-185, 2020. DOI: <https://doi.org/10.32479/ijee.10577>

MOLLAH, M. A. S.; ROUF, M. A.; RANA, S. M. S. A study on capital budgeting practices of some selected companies in Bangladesh. **PSU Research Review**, v. 7, n. 2, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1108/prr-10-2020-0035>

NEMA, S.; NEMA, R. K.; AGNIHOTRI, G. Inverter topologies and control structure in photovoltaic applications: A review. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, v. 3, n. 1, p. 012701, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3505096>

OLIVEIRA, A. C. L. *et al.* Spatial analysis of energy indicators and proposition of alternative generation sources for the Brazilian territory. **Journal of Cleaner Production**, v. 356, p. 131894, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131894>

PEJOVIĆ, B.; MATIĆ, A. B.; LJUMOVIĆ, I. Specifics of sensitivity analysis in the evaluation of international investment projects. In: **6th International Scientific Conference – EMAN 2022 – Economics and Management: how to cope with disrupted times**. [S. l.]:

Association of Economists and Managers of the Balkans, Belgrade, Serbia, 2022.
DOI: <https://doi.org/10.31410/eman.2022.207>

PEREIRA, E. *et al.* **Atlas brasileiro de energia solar**. [S. l.]: Universidade Federal de São Paulo, 2017. E-book. ISBN 9788517000898. DOI: <https://doi.org/10.34024/9788517000898>

PINTO, L. P. *et al.* An alternative methodology for analyzing the risk and sensitivity of the economic viability for generating electrical energy with biogas from the anaerobic bio-digestion of vinasse. **Renewable Energy**, v. 155, p. 1401-1410, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.04.036>

QUEIROZ, J. V. *et al.* Barriers to expand solar photovoltaic energy in Brazil. **Independent Journal of Management & Production**, v. 11, n. 7, p. 2733-2754, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.14807/ijmp.v11i7.1098>

RAEVA, I.; CHAKAROV, B. Risk estimation using sensitivity analysis of an investment project. *In*: Application of mathematics in technical and natural sciences: 13th International Hybrid Conference for Promoting the Application of Mathematics in Technical and Natural Sciences - AMITANS'21, Albena, Bulgaria. Application of mathematics in technical and natural sciences: 13th International Hybrid Conference for Promoting the Application of Mathematics in Technical and Natural Sciences - AMITaNS'21. [S. l.]: AIP Publishing, 2022.
DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0101465>

SHOU, T. A literature review on the Net Present Value (NPV) valuation method. *In*: **2022 2nd International Conference on Enterprise Management and Economic Development (ICEMED 2022)**. Dalian, China: Atlantis Press, 2022.
DOI: <https://doi.org/10.2991/aebmr.k.220603.135>

SOKOLOV, M. V. NPV, IRR, PI, PP, and DPP: a unified view. **Journal of Mathematical Economics**, p. 102992, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmateco.2024.102992>

SUBRAHMANYAM, S. Towards sustainable future: Exploring renewable energy solutions and environmental impacts. **Acta Innovations**, v. 51, n. 1, p. 15-24, 2024. DOI: <https://doi.org/10.62441/actainnovations.51.3>

SWADI, M. *et al.* Investigating and predicting the role of photovoltaic, wind, and hydrogen energies in sustainable global energy evolution. **Global Energy Interconnection**, v. 7, n. 4, p. 429-445, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloei.2024.08.009>

TALAVERA, D. L. *et al.* Sensitivity analysis on some profitability indices for photovoltaic grid-connected systems on buildings: The case of two top photovoltaic European areas. **Journal of Solar Energy Engineering**, v. 135, n. 1, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4006793>

ULLAH, N. *et al.* Challenges and solutions in solar photovoltaic technology life cycle. **ChemBioEng Reviews**, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1002/cben.202300002>

YIN, R. K. **Estudo de caso: Planejamento e estratégia**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2019.

ZHANG, H. *et al.* Green or not? Environmental challenges from photovoltaic technology. **Environmental Pollution**, v. 320, p. 121066, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121066>