

VIABILIDADE ECONÔMICA E SUSTENTABILIDADE DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO BRASIL: UM ESTUDO SOBRE RETORNO FINANCEIRO E IMPACTO AMBIENTAL

Danilo Falcão Lima¹
George Leite Mamede²

RESUMO

Este estudo analisa a viabilidade econômica e a sustentabilidade da energia solar fotovoltaica como alternativa para a gestão de eletricidade no Brasil, abordando aspectos técnicos e financeiros. O objetivo principal foi investigar como os sistemas solares impactam financeiramente os consumidores residenciais, considerando o tempo de retorno do investimento e o tempo de payback. A metodologia adotada foi um estudo de caso de abordagem quantitativa e descritiva, dividido em duas etapas. A primeira consistiu no levantamento bibliográfico de diversas publicações acadêmicas e relatórios, abrangendo estudos de 2019 a 2024, com o objetivo de entender a situação atual do tema. A segunda etapa envolveu a análise de dados de usuários residenciais. Além dos benefícios econômicos, a energia solar contribui significativamente para a sustentabilidade do meio ambiente, reduzindo as emissões de gases de efeito estufa e minimizando o uso de recursos hídricos. A análise revelou que a energia solar oferece vantagens financeiras e ambientais, alinhando-se às metas do Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). No entanto, o estudo também aponta desafios, como o custo inicial ainda elevado para algumas regiões e a eficiência limitada em locais de baixa incidência solar. Conclui-se que, com incentivos adequados e políticos de apoio, a energia solar fotovoltaica tem o potencial de consolidar-se como uma das principais fontes de energia no Brasil, proporcionando economia, sustentabilidade e resiliência energética para o país.

Palavras-chave: Economia. Energia Limpa. Sistema.

ABSTRACT

This study analyzes the economic viability and sustainability of photovoltaic solar energy as an alternative for electricity management in Brazil, addressing technical and financial aspects. The main objective was to investigate how solar systems impact residential consumers financially, considering the return on investment time and payback time. The methodology adopted was a case study with a quantitative and descriptive approach, divided into two stages. The first consisted of a bibliographic survey of several academic publications and reports, covering studies from 2019 to 2024, with the aim of understanding the current situation of the topic. The second stage involved the analysis of data from residential users. In addition to the economic benefits, solar energy contributes significantly to environmental sustainability, reducing greenhouse gas emissions and minimizing the use of water resources. The analysis revealed that solar energy offers financial and environmental advantages, aligning with the goals of the Sustainable Development Goals (SDGs). However, the study also points out challenges, such as the still high initial cost for some regions and limited efficiency in places with low solar incidence. It is concluded that, with adequate incentives and supportive policies, photovoltaic solar energy has the potential to consolidate itself as one of the main sources of energy in Brazil, providing savings, sustainability and energy resilience for the country.

Keywords: Economy. Clean Energy. System.

¹ Discente da Especialização em Gestão de Recursos Hídricos Ambientais e Energéticos, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB).

² Docente do Programa de Pós-graduação, PGEA da UNILAB, mamede@unilab.edu.br.

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o Brasil tem enfrentado um cenário crescente de aumento nas tarifas de eletricidade, motivado pela escassez hídrica, que afeta a matriz energética do país, ainda amplamente dependente das hidrelétricas (EPE, 2021). A necessidade de fontes alternativas e sustentáveis de energia, somada ao alto potencial de radiação solar em diversas regiões, posiciona a energia solar fotovoltaica como uma solução promissora para garantir a segurança energética e redução de custos de energia para consumidores residenciais (ABNT, 2020).

As estatísticas mais recentes apontam para uma rápida expansão da microgeração e minigeração distribuída, amparada pela Resolução Normativa nº 482, de 2012, da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que estabeleceu as condições para que consumidores pudessem gerar sua própria eletricidade, injetando o excedente na rede e recebendo créditos na fatura de energia (BRASIL, 2012).

A legislação evoluiu com a Lei nº 14.300, de 2022, que instituiu o marco legal da micro e minigeração distribuída, consolidando os incentivos para a instalação de sistemas fotovoltaicos e formalizando o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (BRASIL, 2022).

Com base nessa regulamentação, o Brasil tem registrado um aumento expressivo na instalação de sistemas fotovoltaicos em residências, impulsionado tanto pelos benefícios econômicos quanto pela consciência ambiental dos consumidores. A problemática do estudo se apoia na importância econômica e ambiental da energia solar fotovoltaica no contexto brasileiro. Especificamente, neste estudo, busca-se avaliar se os sistemas residenciais fotovoltaicos oferecem redução significativa nos custos de eletricidade e se representam um retorno financeiro positivo a médio e longo prazo. Lima *et al.* (2022, p. 2) destacam que:

A geração própria de energia por fontes renováveis contribui para a redução dos impactos ambientais e dos problemas enfrentados no setor de energia brasileiro, como problemas de abastecimento de energia aos consumidores.

O uso de energia solar representa uma alternativa promissora para diversificar a matriz energética, reduzir a dependência de fontes hidrelétricas e mitigar os impactos ambientais associados ao uso de combustíveis fósseis (TEIXEIRA; MENDES, 2020). Além disso, as políticas de incentivo à energia solar e o avanço das tecnologias de painéis fotovoltaicos têm tornado a instalação desses sistemas cada vez mais acessível (DANTAS; POMPERMAYER, 2018). A pesquisa, ao investigar a viabilidade econômica dos sistemas

fotovoltaicos residenciais, contribui para orientar futuras políticas públicas e para apoiar a decisão de consumidores sobre a adoção da energia solar. Assim, buscando responder à seguinte pergunta: Como a instalação de sistemas fotovoltaicos em residências pode reduzir os custos com eletricidade?

O estudo tem como objetivo geral avaliar a viabilidade econômica da instalação de painéis solares em residências no Ceará, considerando os diferentes perfis de usuários. Os objetivos específicos incluem: (i) comparar a geração dos sistemas fotovoltaicos. (ii) analisar o retorno sobre o investimento e o tempo de payback dos sistemas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 TECNOLOGIA E FUNCIONAMENTO DOS SISTEMAS DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

A tecnologia de energia solar fotovoltaica, consolidada como uma solução sustentável para a geração de eletricidade, envolve o uso de células fotovoltaicas que convertem a luz solar diretamente em energia elétrica, comumente utilizadas em painéis solares (ABNT, 2020). Essas células, formadas por materiais semicondutores, como o silício, são responsáveis por transformar a energia luminosa em eletricidade por meio do efeito fotovoltaico. Este efeito consiste na excitação dos elétrons no material semicondutor quando expostos à radiação solar, gerando uma corrente elétrica contínua. Para garantir o uso prático dessa eletricidade em residências ou indústrias, é essencial o uso de inversores, que convertem a corrente contínua em corrente alternada, compatível com os sistemas de distribuição elétrica (DANTAS; POMPERMAYER, 2018).

As células fotovoltaicas são dispostas em módulos e, posteriormente, em arranjos fotovoltaicos maiores, o que possibilita sua adaptação a diferentes demandas energéticas, desde pequenos sistemas domésticos até grandes plantas de geração em escala comercial (FERREIRA; SILVA, 2020). A eficiência de um sistema fotovoltaico depende, portanto, da qualidade das células utilizadas, da configuração dos módulos e do controle adequado de variáveis ambientais.

Os painéis solares modernos, por exemplo, contam com camadas protetoras adicionais que garantem maior resistência a intempéries e contaminantes, como poeira e salinidade, o que é essencial em regiões costeiras e ambientes industriais (MARTINS; COSTA, 2021). Além disso, melhorias na tecnologia de encapsulamento das células têm

contribuído para reduzir os efeitos da degradação causada pela exposição constante ao sol, um fenômeno conhecido como “degradação induzida por potencial” (PID, na sigla em inglês), que pode comprometer a performance dos módulos fotovoltaicos ao longo do tempo (SILVA; PEREIRA, 2023).

Tecnologias avançadas de limpeza automática e revestimentos anti reflexivos também vêm sendo incorporadas aos painéis, aumentando a eficiência de absorção e reduzindo a necessidade de manutenção manual.

Outro aspecto importante da tecnologia fotovoltaica moderna é o aprimoramento dos inversores, dispositivos fundamentais para a operação dos sistemas. Nos sistemas mais avançados, os inversores não apenas convertem a corrente contínua em alternada, mas também desempenham funções de monitoramento e proteção, como o controle da fase e da tensão, além de possibilitar a desconexão automática em caso de falhas na rede elétrica (OLIVEIRA; SANTOS, 2022).

Esses recursos são particularmente importantes em sistemas conectados à rede, pois garantem a segurança do sistema e previnem problemas de sobrecarga ou inversão de corrente. A tecnologia de inversores também evoluiu para incorporar opções como inversores otimizadores de potência e inversores com microcontroladores, que ajustam individualmente o desempenho de cada módulo, otimizando a produção energética e reduzindo perdas causadas por sombreamento parcial (ABNT, 2019).

Os avanços tecnológicos nas células fotovoltaicas também têm favorecido a diversificação dos materiais semicondutores, indo além do silício cristalino, que, embora dominante, apresenta limitações de custo e eficiência em altas temperaturas (SOUZA; LIMA, 2019). As células de filme fino, que utilizam materiais como telureto de cádmio (CdTe) e disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS), são exemplos de alternativas que oferecem maior flexibilidade e podem ser aplicadas em superfícies variadas, o que amplia as possibilidades de instalação em estruturas como fachadas de edifícios e telhados de formatos irregulares (TEIXEIRA; MENDES, 2020).

Paralelamente, a pesquisa em células solares de perovskita têm mostrado resultados promissores, oferecendo potencial para uma eficiência de conversão superior e custos de produção mais baixos. As perovskitas, ainda em fase de desenvolvimento comercial, são conhecidas por sua alta capacidade de absorção de luz e flexibilidade em combinações com outras tecnologias, como células de silício em configurações tandem, o que aumenta significativamente a eficiência global do sistema (FERREIRA; SILVA, 2020). No entanto, essas tecnologias ainda enfrentam desafios em termos de estabilidade e durabilidade,

especialmente devido à sensibilidade à umidade, que pode comprometer o desempenho a longo prazo.

Em termos de eficiência e longevidade, a combinação de tecnologias, como a integração de células de alta eficiência e inversores avançados, tem permitido que os sistemas fotovoltaicos atinjam uma vida útil média superior a 25 anos, com uma taxa de degradação anual que varia entre 0,3% e 0,8%, dependendo das condições ambientais e da qualidade dos materiais (GONÇALVES; ALMEIDA, 2019). Esse aumento na durabilidade, combinado com a diminuição dos custos de produção e instalação, tem favorecido a adesão crescente à energia solar fotovoltaica no Brasil, tornando-a uma alternativa economicamente viável e ambientalmente sustentável, especialmente em um contexto de alta variabilidade tarifária na energia convencional (INMETRO, 2020).

A tecnologia fotovoltaica, portanto, evolui constantemente, adaptando-se às necessidades energéticas e climáticas, e consolidando-se como uma das principais soluções para geração de energia renovável no país. Os avanços tecnológicos e a padronização das normas de instalação e operação, conforme definido pela ABNT, contribuem para que o setor fotovoltaico continue a crescer, reduzindo impactos ambientais e proporcionando benefícios econômicos tanto para consumidores residenciais quanto para o setor industrial. Esses fatores reforçam a importância de estudos aprofundados sobre o tema, incentivando a adoção da energia solar fotovoltaica e impulsionando a inovação e a sustentabilidade na matriz energética brasileira.

2.2 IMPACTO ECONÔMICO DA ENERGIA SOLAR

O impacto econômico da energia solar fotovoltaica tem sido objeto de ampla análise, especialmente considerando o potencial de redução nas contas de luz e os incentivos governamentais que viabilizam a expansão da geração distribuída no Brasil. Com a regulamentação estabelecida pela Resolução Normativa nº 482, de 2012, da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), consumidores residenciais passaram a ter a possibilidade de instalar sistemas fotovoltaicos e integrar o excedente de geração ao Sistema de Compensação de Energia Elétrica, gerando créditos na conta de luz (Brasil, 2012).

Esse mecanismo permitiu uma economia considerável, especialmente em regiões de alta incidência solar, onde o retorno financeiro é maximizado. A regulamentação avançou com a aprovação da Lei nº 14.300, de 2022, que consolidou o marco legal da microgeração e minigeração distribuída e garantiu a continuidade dos incentivos para instalações solares em

residências e pequenos comércios, com o objetivo de reduzir os custos energéticos dos consumidores e incentivar a transição energética no país (Brasil, 2022).

Estudos regionais indicam que o impacto econômico da energia solar fotovoltaica varia conforme as características locais, como a média de irradiação solar, os custos de energia e os incentivos fiscais específicos de cada estado. Gonçalves e Almeida (2019) evidenciaram que residências localizadas em estados do Nordeste brasileiro, onde há alta incidência solar e programas estaduais de incentivo, apresentam uma redução mais expressiva na conta de energia após a instalação de sistemas fotovoltaicos.

Essa economia pode alcançar até 95% dos custos mensais de eletricidade em áreas de elevada exposição solar e tarifas energéticas elevadas. Em contrapartida, regiões com menor irradiação solar, como o Sul do país, observam uma economia reduzida, embora ainda relevante, em torno de 70% a 80%, dependendo da capacidade instalada e do perfil de consumo das residências (MARTINS; COSTA, 2021).

O perfil de consumo das residências também influencia diretamente o retorno financeiro proporcionado pelos sistemas fotovoltaicos. Dantas e Pompermayer (2018) apontam que residências de maior consumo mensal, como aquelas com elevado uso de eletrodomésticos e sistemas de climatização, obtêm um retorno mais rápido sobre o investimento, pois o sistema solar atende a uma demanda energética significativa e proporciona maior economia em termos absolutos. Em comparação, residências com menor consumo podem demorar mais para alcançar o ponto de equilíbrio do investimento, especialmente quando os custos de instalação são elevados. Isso destaca a importância de adequar o dimensionamento do sistema fotovoltaico ao perfil de consumo específico, assegurando que o custo-benefício do investimento seja otimizado para cada caso.

Além do retorno na conta de energia, os incentivos governamentais desempenham um papel crucial na viabilização financeira da energia solar para consumidores residenciais. A Lei nº 14.300/2022 não apenas manteve o Sistema de Compensação de Energia Elétrica, mas também estabeleceu o Programa de Energia Renovável Social, que visa apoiar o acesso à energia solar para famílias de baixa renda (Brasil, 2022). Esse programa contribui para a democratização da energia solar, permitindo que uma parcela maior da população brasileira se beneficie da tecnologia, independentemente da capacidade financeira inicial para a instalação. Incentivos estaduais, como isenções de ICMS para equipamentos solares em estados do Nordeste, complementam esses benefícios, tornando a energia solar mais acessível e vantajosa em regiões onde o custo de energia é historicamente elevado (FERREIRA; SILVA, 2020).

A economia gerada pelo uso de sistemas fotovoltaicos também tem implicações macroeconômicas significativas. Ao reduzir a demanda por energia elétrica da rede pública, os consumidores que adotam a energia solar contribuem para aliviar a sobrecarga no sistema elétrico nacional, especialmente em períodos de estiagem, quando a geração hidrelétrica é comprometida. Estudos realizados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) em 2021 demonstram que a expansão da energia solar distribuída tem o potencial de reduzir os custos operacionais do setor elétrico, ao diminuir a necessidade de ativação de usinas termelétricas em momentos críticos, o que, em última instância, pode reduzir o valor das tarifas de energia para todos os consumidores (EPE, 2021). Esse impacto econômico positivo não se restringe aos consumidores individuais, mas beneficia a economia como um todo ao possibilitar uma matriz energética mais resiliente e menos dependente de fontes de energia caras e poluentes.

2.3 SUSTENTABILIDADE E ENERGIA RENOVÁVEL

A sustentabilidade da energia solar fotovoltaica no Brasil se destaca como um fator essencial para o desenvolvimento de uma matriz energética mais limpa e alinhada às metas climáticas nacionais e internacionais. Diante da crescente preocupação com as mudanças climáticas, a energia solar se apresenta como uma das alternativas mais promissoras para a redução das emissões de gases de efeito estufa, uma vez que sua geração é isenta de combustão e, portanto, não produz emissões diretas de dióxido de carbono (CO₂). De acordo com o Plano Decenal de Expansão de Energia 2030 (EPE, 2021), a inclusão de fontes renováveis, como a solar, é uma prioridade para diversificar a matriz energética brasileira e reduzir a dependência de fontes fósseis, o que contribui diretamente para a mitigação das mudanças climáticas.

A energia solar é uma fonte renovável e inesgotável, o que a diferencia das fontes convencionais de energia, como o carvão e o gás natural, que emitem altas quantidades de CO₂ e outros poluentes atmosféricos. A Empresa de Pesquisa Energética estima que, com o crescimento da energia solar, será possível evitar a emissão de milhões de toneladas de CO₂ até 2030, um dado que reforça o papel crucial da energia solar no cumprimento das metas do Acordo de Paris e dos compromissos firmados pelo Brasil em fóruns internacionais (EPE, 2021).

Além da redução de emissões, a energia solar fotovoltaica contribui para o desenvolvimento sustentável ao exigir uma menor quantidade de recursos hídricos para sua operação em comparação com as hidrelétricas e termelétricas. As usinas solares não necessitam de água para resfriamento ou geração, o que representa uma vantagem

significativa em um contexto de escassez hídrica cada vez mais frequente no Brasil (TEIXEIRA; MENDES, 2020). Em comparação, as usinas termelétricas, por exemplo, demandam grandes volumes de água para resfriamento e produção de vapor, impactando diretamente a disponibilidade de recursos hídricos e contribuindo para o estresse hídrico em regiões que já enfrentam restrições. Portanto, o avanço da energia solar não só alivia a pressão sobre os recursos hídricos, mas também fortalece a resiliência do setor energético frente às variações climáticas.

A adoção de tecnologias fotovoltaicas também favorece a sustentabilidade ao minimizar o impacto ambiental durante o ciclo de vida dos equipamentos. Embora a produção de painéis solares envolve a extração de minerais, como o silício, as práticas de reciclagem e reutilização desses materiais estão avançando rapidamente, tornando o setor cada vez mais sustentável. Segundo estudos recentes, o desenvolvimento de programas de reciclagem para painéis solares e inversores tem permitido que componentes e materiais sejam reaproveitados, reduzindo o descarte e o impacto ambiental associado ao fim da vida útil desses sistemas (OLIVEIRA; SANTOS, 2022). Além disso, os painéis solares possuem uma vida útil prolongada, de até 25 anos ou mais, o que dilui o impacto ambiental da produção inicial ao longo de um extenso período de geração limpa.

No contexto das metas climáticas e dos compromissos de sustentabilidade, a energia solar fotovoltaica representa uma oportunidade única para o Brasil diversificar sua matriz energética e avançar rumo a um modelo de baixo carbono. O Plano Decenal de Expansão de Energia 2030 projeta que, com políticas de incentivo e um aumento significativo na adoção de sistemas solares, será possível não apenas contribuir para o desenvolvimento sustentável, mas também para a independência energética em regiões isoladas, onde o acesso à energia ainda é limitado (EPE, 2021). Portanto, a energia solar não apenas fortalece a segurança energética do país, mas também se alinha com os objetivos de desenvolvimento sustentável, promovendo uma matriz energética mais limpa e resiliente.

Em resumo, os benefícios ambientais da energia solar vão além da redução das emissões de CO₂, abrangendo a preservação de recursos hídricos, a conservação da biodiversidade e a minimização dos impactos de ocupação do solo. Ao contribuir para a sustentabilidade ambiental e o desenvolvimento de comunidades menos dependentes de combustíveis fósseis. Com base nos estudos e nas projeções do Plano Decenal, fica claro que o investimento em energia solar fotovoltaica é uma estratégia essencial para que o país alcance suas metas climáticas, promovendo, simultaneamente, benefícios sociais e ambientais que consolidam a sustentabilidade como uma prioridade no setor energético brasileiro.

2.4 VIABILIDADE ECONÔMICA A LONGO PRAZO

A viabilidade econômica da energia solar fotovoltaica no Brasil é um fator decisivo que tem atraído cada vez mais consumidores residenciais e comerciais a investirem na tecnologia, principalmente devido à redução dos custos operacionais e ao retorno financeiro proporcionado no médio e longo prazo. Para avaliar a viabilidade, dois indicadores financeiros são fundamentais: o Retorno sobre o Investimento (ROI) e o tempo de payback, que indicam o período necessário para que o sistema fotovoltaico gera economia suficiente para cobrir os custos iniciais de instalação (GONÇALVES; ALMEIDA, 2019). Esse retorno é acelerado em regiões de alta incidência solar e elevado custo energético, como o Nordeste brasileiro, onde os sistemas fotovoltaicos encontram uma vantagem operacional expressiva (MARTINS; COSTA, 2021).

O cálculo do ROI para sistemas fotovoltaicos também reflete uma economia significativa no longo prazo, dado que a vida útil dos painéis solares geralmente ultrapassa 25 anos. Durante esse período, a manutenção exigida é relativamente baixa, consistindo basicamente na limpeza dos painéis e na eventual substituição de inversores, cuja vida útil é menor que a dos módulos solares (DANTAS; POMPERMAYER, 2018).

Esses custos de manutenção representam, em média, apenas uma fração dos custos de instalação e não comprometem a economia gerada pela redução na conta de eletricidade. No entanto, para assegurar um desempenho constante e minimizar as perdas, é essencial que os sistemas estejam devidamente dimensionados e instalados em conformidade com a norma ABNT NBR 16690:2019, que estabelece os requisitos para instalações de arranjos fotovoltaicos (ABNT, 2019).

O Programa Brasileiro de Etiquetagem do INMETRO também desempenha um papel relevante na viabilidade econômica dos sistemas fotovoltaicos, pois orienta os consumidores sobre a eficiência dos módulos e inversores disponíveis no mercado, assegurando que os equipamentos atendam aos padrões de qualidade e desempenho. Essa etiquetagem permite ao consumidor realizar escolhas mais informadas, selecionando produtos de maior durabilidade e eficiência, o que contribui para otimizar o ROI dos sistemas instalados (INMETRO, 2020).

A classificação dos produtos de acordo com sua eficiência facilita a comparação entre diferentes modelos e marcas, permitindo que consumidores e investidores optem por tecnologias que garantam uma economia máxima ao longo dos anos, com mínima degradação da capacidade produtiva dos sistemas.

O avanço das tecnologias de produção e a ampliação da escala de fabricação global têm contribuído para tornar a energia solar cada vez mais acessível. Segundo o Plano Decenal de Expansão de Energia 2030, o custo de instalação de sistemas fotovoltaicos no Brasil deverá continuar a diminuir, estimulando ainda mais a adesão e tornando o payback e o ROI mais atrativos (EPE, 2021). Essa redução de custos, somada à economia contínua nas contas de eletricidade, fortalece o argumento de que a energia solar não é apenas uma solução sustentável, mas também financeiramente vantajosa para diversos perfis de consumidores.

Em resumo, a viabilidade econômica da energia solar fotovoltaica no Brasil é amplamente favorecida pela combinação de retorno financeiro atrativo, baixo custo de manutenção e incentivos governamentais, como o Programa Brasileiro de Etiquetagem. A análise do ROI e do tempo de payback demonstra que o investimento em energia solar é financeiramente vantajoso para a maioria dos consumidores, com benefícios econômicos que se estendem ao longo de décadas. Essa viabilidade é reforçada pela estabilidade dos sistemas fotovoltaicos e pela crescente redução dos custos de instalação, que garantem um impacto econômico positivo e tornam a energia solar uma escolha cada vez mais racional no contexto das finanças pessoais e empresariais no Brasil.

3 METODOLOGIA

A pesquisa é um estudo de caso, quantitativo e descritivo, com o intuito de investigar a viabilidade econômica, e as vantagens técnicas da energia solar fotovoltaica residencial com base em cinco exemplos de geração para sistemas de capacidade instaladas distintas. O sistema A possuindo 14,75 kwp , sistema B com 2,52 Kwp, sistema C com 14,75 kwp, sistema D com 5,31 Kwp, e o sistema E com 10,1 Kwp.

Para o desenvolvimento do trabalho utilizou-se dados de diferentes publicações acadêmicas e relatórios, priorizando estudos realizados entre 2019 e 2024. Assim, possibilitando entender a situação atual dessa temática. Adicionalmente de dados de geração de usuários residenciais, com intuito de atestar o retorno financeiro e o playback. Diante disso, visa sintetizar o conhecimento existente, identificar pontos convergentes para o campo de energia renovável, através de exemplos reais de usuários.

Para calcular o payback dos sistemas de geração fotovoltaicas analisados neste estudo, foram considerados a produção mensal de energia (kWh/mês) de cada sistema e a tarifa média anual de cada um (conforme Equação 1): o sistema A com R\$ 1,21, o sistema B com R\$ 1,21, o sistema C com R\$ 1,23, o sistema D com R\$ 1,24 e o sistema E com R\$ 1,22.

Também foi levado em conta um aumento anual da tarifa de 10%, uma perda de eficiência do sistema de 0,5% ao ano e um custo anual de manutenção de 0,5%.

$$\text{Payback} = \text{Ano anterior} + \frac{\text{Valor acumulado do ano anterior}}{\text{Fluxo de caixa do ano subsequente}} \quad (1)$$

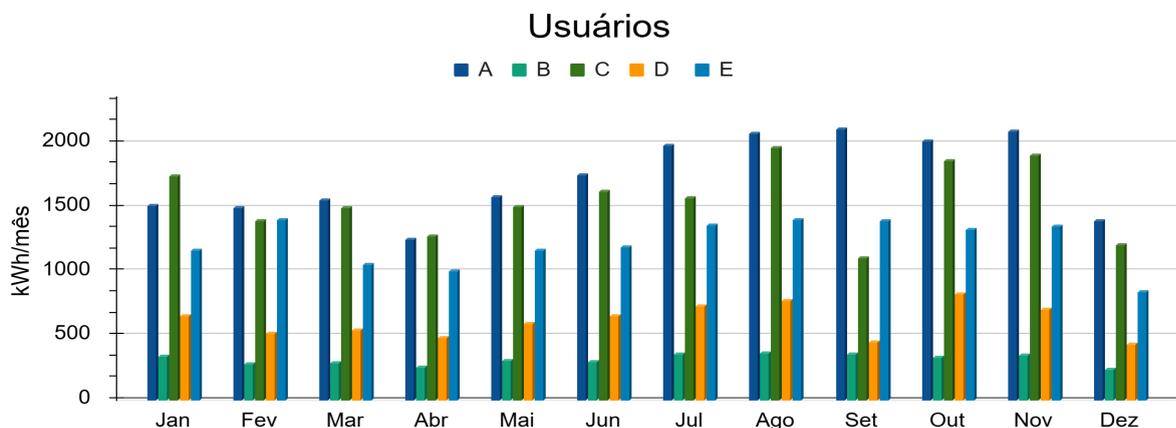
O payback é o tempo necessário para que o valor investido seja recuperado a partir dos fluxos de caixa anuais. Para cada um dos sistemas (A, B, C, D, E), os fluxos de caixa ao longo dos anos mostram o quanto cada sistema gera de retorno, permitindo determinar o momento em que o valor total investido é recuperado. Esses cálculos indicam o ano em que o fluxo acumulado de cada sistema atinge ou ultrapassa o valor do investimento inicial, marcando o momento em que o payback é alcançado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 GERAÇÃO DOS SISTEMAS

Na Figura 1 é mostrado cinco exemplos de geração para sistemas de capacidade instaladas distintas. As capacidades instaladas variam entre 2,52 kWp e 14,75 kWp. Os usuários A e C possuem os maiores sistemas, com 14,75 kWp, constituídos por 25 painéis de 590 W das marcas JINKO e LEAPTON, respectivamente. Os demais consumidores apresentam capacidades diferentes: a instalação D possui 5,31 kWp com 9 painéis de 590 W da marca LEAPTON; a instalação E tem 10,1 kWp com 20 painéis de 505 W da marca SUNOVA; e a instalação B conta com 2,52 kWp, compostos por 5 painéis de 505 W também da marca SUNOVA.

Figura 1 - Produção de energia fotovoltaica no ano de 2024.



Fonte: Autoria própria (2024).

A Figura 1 apresenta a produção de energia em kWh/mês dos cinco sistemas fotovoltaicos residenciais, com dados organizados por mês, permitindo comparar a geração em diferentes períodos. A instalação A exibe a maior média, com 1730 kWh, evidenciando uma produção consistente ao longo dos meses. Por outro lado, a instalação B apresentou a menor média de 314,52 kWh, devido ter a menor capacidade instalada. A instalação C, D e E apresentaram médias de 1535 kWh, 620,35 kWh e 1213,33 kWh, respectivamente. A instalação C demonstrou uma geração de energia semelhante à instalação A, enquanto a instalação D mostrou variações significativas ao longo do ano, com picos de produção nos meses de maior incidência solar. A instalação E manteve uma produção relativamente estável, apesar de uma queda em dezembro.

Os valores mensais indicam que todos os sistemas seguem um padrão de geração que tende a aumentar nos meses de maior incidência solar, como julho e agosto, e a diminuir nos meses de menor incidência solar, como abril e dezembro. Esse comportamento é característico de sistemas fotovoltaicos, e essa variação está diretamente associada à incidência solar, que é influenciada pela duração do dia e pela inclinação terrestre, levando em consideração eventos que influenciam diretamente na geração, como sombreamento, limpeza dos painéis e dimensionamento correto do sistema.

A Tabela 1 apresenta uma queda significativa na geração dos sistemas A e C no mês de abril. No caso do sistema A, isso foi causado pelo crescimento da vegetação no local, que sombreou parte dos painéis. Já o sistema C sofreu uma redução na geração devido à falta de limpeza periódica, o que resultou no acúmulo de sujeira sobre os painéis. Em dezembro, a diminuição da geração dos sistemas A e C foi devido a interrupções no fornecimento de energia, com diversas quedas e falta de energia na rede de distribuição que os alimenta, compartilhando a mesma fase. Por outro lado, o sistema E manteve a geração prevista, conforme as condições do local, a incidência solar e a inclinação dos painéis, assim como os sistemas B e D, que também apresentaram desempenho consistente.

Tabela 1 - Geração mensal (kWh/mês) dos cinco usuários de energia solar residencial.

Mês	A	B	C	D	E
Jan	1510	332,603	1740	653,2	1160
Fev	1492	276,275	1390	513,9	1400
Mar	1549	288,155	1490	542,9	1050
Abr	1249	252,134	1270	482,8	1000
Mai	1577	304,244	1500	591,7	1160

Mês	A	B	C	D	E
Jun	1748	297,087	1620	649	1190
Jul	1975	350,542	1570	726,4	1360
Ago	2072	365,728	1960	768,3	1400
Set	2100	352,642	1100	445	1390
Out	2009	324,788	1860	820,2	1320
Nov	2087	346,591	1900	697,8	1350
Dez	1392	233,154	1200	431	840
Média	1730	314,52	1535	620,35	1218,33

Fonte: Autoria própria (2024).

4.2 ANÁLISE FINANCEIRA: RETORNO SOBRE O INVESTIMENTO (ROI) E PAYBACK

A análise financeira dos sistemas fotovoltaicos, considerando o Retorno sobre o Investimento (ROI) e o tempo de payback, aponta para uma viabilidade econômica positiva a longo prazo. Para sistemas residenciais de 3 a 5 kW, o tempo de payback é geralmente alcançado entre 5 e 8 anos, dependendo da economia mensal e do custo inicial do sistema. No Nordeste, onde os custos de instalação são mais baixos e a incidência solar é alta, o payback ocorre mais rapidamente, em torno de 5 a 6 anos, enquanto no Sul esse período pode se estender até 8 anos devido aos custos iniciais mais elevados e à menor produção energética (FERREIRA; SILVA, 2020).

O ROI médio para sistemas residenciais é estimado em cerca de 15% a 20% ao ano, considerando a economia contínua nas contas de luz e a vida útil dos sistemas, que ultrapassa 25 anos. Em regiões de alta tarifa energética, como o Sudeste, o ROI tende a ser mais elevado, garantindo que o sistema gere retorno financeiro significativo ao longo de sua operação (TEIXEIRA; MENDES, 2020). Para consumidores comerciais, o payback costuma ser mais curto, em torno de 4 a 5 anos, dado o alto consumo e a proporcional economia mensal gerada. Esses números reforçam a viabilidade econômica dos sistemas fotovoltaicos, indicando que, uma vez amortizado o investimento inicial, os consumidores continuam a usufruir de uma economia significativa por décadas, com baixos custos de manutenção.

Portanto, os resultados indicam que a instalação de sistemas solares fotovoltaicos é uma solução econômica viável e vantajosa para diferentes perfis de consumidores no Brasil, variando conforme os custos regionais, o consumo específico e as condições de irradiação. Esses sistemas oferecem uma economia substancial, com uma expectativa de retorno

financeiro duradoura, consolidando a energia solar como uma alternativa eficiente e financeiramente sustentável.

Tabela 2 - Retorno financeiro dos cinco usuários de energia solar residencial

Ano	A	B	C	D	E
1	-R\$ 80131,76	-R\$ 16007,46	-R\$ 70862,14	-R\$ 26893,87	-R\$ 57564,29
2	-R\$ 64105,40	-R\$ 11034,03	-R\$ 39758,11	-R\$ 16102,08	-R\$ 35958,60
3	-R\$ 51284,32	-R\$ 7723,82	-R\$16879,77	-R\$ 4034,55	-R\$ 19087,38
4	-R\$ 35899,02	-R\$ 3089,53	R\$ 5864,60	R\$ 8654,85	-R\$1699,78
5	-R\$ 21539,41	R\$ 361,54	R\$ 20699,02	R\$ 16851,08	R\$ 17255,44
6	R\$ 8615,76	R\$ 1066,57	R\$ 55506,13	R\$ 31444,89	R\$ 36255,12
7	R\$ 19887,67	R\$ 3082,33	R\$ 74192,64	R\$45513,13	R\$ 54052,86
8	R\$ 42758,82	R\$ 6781,12	R\$ 94657,44	R\$ 60946,76	R\$ 86765,21

Fonte: Autoria própria (2024).

O retorno financeiro é apresentado em anos para facilitar a compreensão. Vale destacar que houve diferentes formas de aquisição para os cinco sistemas. O sistema A financiou 100% do valor e optou por amortizar as parcelas mensalmente. O sistema B, por sua vez, fez um pagamento de entrada de 20% e optou por amortizar as parcelas a cada três meses. O sistema C escolheu um parcelamento em 8 vezes, com 30% de entrada. O sistema D fez um pagamento inicial de 25%, financiando o restante, enquanto o sistema E optou por uma entrada de 30% e amortização mensal ao longo do tempo. Assim, o retorno de cada sistema está relacionado à forma de aquisição adotada.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo sobre a viabilidade econômica da energia solar fotovoltaica no Brasil evidencia a relevância e os benefícios dessa tecnologia para os diversos setores da sociedade. A análise realizada, embasada em dados técnicos, financeiros e normativos, aponta que a energia solar não apenas representa uma alternativa sustentável para a geração de eletricidade, mas também uma solução economicamente vantajosa para consumidores residenciais. Os resultados desta investigação confirmam que os sistemas fotovoltaicos apresentam um impacto significativo na redução de custos de energia e oferecem um retorno financeiro positivo a médio e longo prazo, variando conforme a região e o perfil de consumo. A energia solar, antes considerada uma alternativa cara, está se tornando cada vez mais acessível.

O impacto econômico proporcionado pelos sistemas fotovoltaicos é expressivo. Os sistemas possibilitam reduzir custos com a eletricidade em percentuais que variam de 1% a 95%, dependendo da região e da capacidade instalada. As projeções indicam que, ao longo da vida útil dos sistemas, que em média ultrapassa 25 anos, a economia acumulada ultrapassa em várias vezes o valor do investimento inicial, demonstrando que a energia solar é uma solução eficaz e duradoura para mitigar os altos custos de eletricidade.

O estudo reafirma que a tecnologia fotovoltaica oferece benefícios financeiros consideráveis, promove a sustentabilidade ambiental e contribui para a independência energética do país. Com o suporte adequado de políticas públicas e o aprimoramento contínuo da tecnologia, a energia solar tem o potencial de se consolidar como uma das principais fontes de energia no Brasil, beneficiando não apenas consumidores individuais, mas também a sociedade como um todo, ao promover uma matriz energética mais resiliente e menos dependente de recursos não renováveis.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR 10899:2020 – Energia solar fotovoltaica – Terminologia. 2020. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7933594/mod_folder/content/0/NBR10899%20-%20Terminologia.pdf. Acesso em: 14 nov. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR 16690:2019 – Instalações elétricas de arranjos fotovoltaicos – Requisitos de projeto. Rio de Janeiro: ABNT, 2019. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7933594/mod_folder/content/0/NBR16690%20-%20requisitos%20projeto.pdf. Acesso em: 14 nov. 2024.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. Brasília, DF: ANEEL, 2012. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acesso em: 14 nov. 2024.

BRASIL. Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022. Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS). 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/aceso-a-informacao/legislacao/leis/lei-n-14-300-2022.pdf/view>. Acesso em: 14 nov. 2024.

DANTAS, Stefano Giacomazzi; POMPERMAYER, Fabiano Mezadre. Viabilidade econômica de sistemas fotovoltaicos no Brasil e possíveis efeitos no setor elétrico. Texto para Discussão nº 2388. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), 2018. Disponível em: https://portalantigo.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/TDs/td_2388.pdf. Acesso em: nov. 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Plano Decenal de Expansão de Energia 2030. Brasília: EPE, 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Decenal-de-Expansao-de-Energia-2030>. Acesso em: 14 nov. 2024.

FERREIRA, Lucas; SILVA, Mariana. Impacto ambiental da adoção de sistemas fotovoltaicos em áreas urbanas. Revista de Sustentabilidade Energética, v. 15, n. 3, p. 123-138, 2020. Acesso em: 14 nov. 2024.

GONÇALVES, Pedro; ALMEIDA, João. Viabilidade econômica de sistemas fotovoltaicos residenciais no Brasil. Revista de Energia Renovável, v. 10, n. 1, p. 89-105, 2019. Acesso em: 14 nov. 2024.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA (INMETRO). Programa Brasileiro de Etiquetagem: Requisitos de Avaliação da Conformidade para Sistemas Fotovoltaicos. 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/inmetro/pt-br/assuntos/avaliacao-da-conformidade>. Acesso em: 14 nov. 2024.

MARTINS, Ana; COSTA, Bruno. Análise comparativa de custos de instalação de sistemas fotovoltaicos em diferentes regiões do Brasil. *Revista Brasileira de Engenharia Elétrica*, v. 22, n. 4, p. 201-218, 2021. Acesso em: 14 nov. 2024.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro – Outubro de 2024. Acesso em: 14 nov. 2024.

LIMA, Luana Tavares Abrão; SILVA, Gustavo Cicero; OLIVEIRA, André Luiz de. Empreendimentos de geração distribuída fotovoltaica On Grid: desafios e oportunidades. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.34117/bjdv8n12-095>. Acesso em: 21 nov. 2024.

OLIVEIRA, Adriana Tenir Egéa de; SOBREIRA, André Alves; COSTA, Hozana Freitas da; FERREIRA, José dos Santos; PEREZ, Carlos Ariel Samudio. Photovoltaic solar energy: transformation, evolution, environmental aspects and approaches in the classrooms. 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i9.32533>. Acesso em: 21 nov. 2024.

OLIVEIRA, Carla; SANTOS, Eduardo. Benefícios econômicos e ambientais da energia solar fotovoltaica em residências brasileiras. *Revista de Tecnologias Sustentáveis*, v. 18, n. 2, p. 77-92, 2022. Acesso em: 14 nov. 2024.

OPERATOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). Relatório Anual de Operação 2023. Acesso em: 14 nov. 2024.

SILVA, Rafael; PEREIRA, Lucas. Retorno sobre investimento de sistemas fotovoltaicos residenciais: uma análise financeira. *Revista de Economia de Energia*, v. 12, n. 3, p. 150-165, 2023. Acesso em: 14 nov. 2024.

SOUZA, Fernanda; LIMA, Roberto. Energia solar fotovoltaica: potencial de geração e desafios no Brasil. *Revista de Energias Renováveis*, v. 9, n. 2, p. 33-50, 2019. Acesso em: 14 nov. 2024.

TEIXEIRA, Juliana; MENDES, Carlos. Sustentabilidade e energia solar: uma revisão dos benefícios ambientais. *Revista de Meio Ambiente e Energia*, v. 14, n. 1, p. 101-118, 2020. Acesso em: 14 nov. 2024.