

## Panorama atual e perspectivas futuras da energia solar: uma revisão da literatura

Current overview and future prospects of solar energy: a literature review

Altair Franca<sup>1</sup>  
Eder Santana<sup>1</sup>  
Ivanildo Rodrigues<sup>1</sup>  
Jeferson Cerqueira Dias<sup>2</sup>

### Resumo

Este trabalho tem como proposta realizar uma revisão bibliográfica abrangente sobre o uso de painéis fotovoltaicos aplicados a residências, destacando suas tecnologias, desempenho, viabilidade econômica e impactos ambientais. Para isso, adotou-se uma metodologia qualitativa, baseada em pesquisa bibliográfica estruturada, utilizando descritores específicos e critérios de relevância para selecionar estudos nacionais e internacionais. A análise dos artigos revelou que os sistemas fotovoltaicos apresentam elevada eficiência energética, redução significativa no consumo doméstico e tempos de retorno que variam conforme irradiação, custo dos equipamentos e políticas de incentivo. Também foram identificados benefícios ambientais relevantes, apesar dos impactos associados ao ciclo de vida dos equipamentos. Conclui-se que a energia solar residencial constitui uma alternativa tecnicamente madura, economicamente vantajosa e ambientalmente sustentável, contribuindo para a diversificação da matriz energética e para a adoção de práticas mais responsáveis no uso de recursos energéticos.

**Palavras-chave:** Energia solar. Painéis fotovoltaicos. Sistemas fotovoltaicos residenciais. Viabilidade econômica. Sustentabilidade ambiental

### Abstract

This study aims to conduct a comprehensive literature review on the use of photovoltaic panels in residential settings, highlighting their technologies, performance, economic feasibility, and environmental impacts. To this end, a qualitative methodology was adopted, based on a structured bibliographic review, using specific descriptors and relevance criteria to select national and international studies. The analysis of the articles revealed that photovoltaic systems have high energy efficiency, significantly reduce household consumption, and present payback periods that vary according to solar irradiation, equipment costs, and incentive policies. Relevant environmental benefits were also identified, despite the impacts associated with the equipment life cycle. It is concluded that residential solar energy constitutes a technically mature, economically advantageous, and environmentally sustainable alternative, contributing to the diversification of the energy matrix and to the adoption of more responsible practices in the use of energy resources.

<sup>1</sup> Discente do Curso Superior de Manutenção Industrial da Faculdade de Tecnologia *Campus* Osasco, SP, Brasil e-mail: nome@provedor.com.br

<sup>2</sup> Docente do Curso Superior de Manutenção Industrial da Faculdade de Tecnologia *Campus* Osasco, SP, Brasil e-mail: [jeferondias1@alumni.usp.br](mailto:jeferondias1@alumni.usp.br) – ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2999-1341>

**Keywords:** Solar energy. Photovoltaic panels. Residential photovoltaic systems. Economic feasibility. Environmental sustainability.

## 1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda energética global e os impactos ambientais associados ao uso intensivo de combustíveis fósseis têm colocado a humanidade diante de um dos maiores desafios do século XXI: garantir suprimento energético sustentável, seguro e ambientalmente responsável. O aumento da população mundial, o avanço da industrialização e as preocupações com as mudanças climáticas intensificam a necessidade de uma transição para fontes limpas. Nesse cenário, a energia solar destaca-se como uma alternativa estratégica, capaz de atender às necessidades de comunidades com infraestrutura limitada e contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa (BAIRD e CANN, 2011).

Segundo Foster, Ghassemi e Cota (2010), o futuro energético dependerá de uma combinação de tecnologias renováveis, entre as quais a energia solar desempenhará um importante papel para a segurança energética global e o desenvolvimento sustentável. Os autores ressaltam que a transição para sistemas baseados em fontes renováveis será necessária para mitigar danos ambientais, garantir estabilidade econômica e promover o acesso universal à energia.

Tietenberg e Lewis (2018) afirmam que a energia solar é um recurso renovável necessário para a sustentabilidade, pois seu fluxo contínuo não depende das ações humanas e não é reduzido pelo consumo das gerações anteriores. Ao contrário dos combustíveis fósseis, cuja utilização atual compromete a disponibilidade futura, a energia solar oferece um suprimento permanente que define limites naturais, porém seguros, para o uso energético, com a possibilidade de estratégias de desenvolvimento sustentável e na manutenção do bem-estar ao longo do tempo.

A expansão da energia solar fotovoltaica no Brasil tem se consolidado como vetor estratégico para o desenvolvimento regional, especialmente em áreas de elevada incidência solar. Tietenberg e Lewis (2018) destacam que fontes renováveis, como a energia solar, são um pilar para trajetórias sustentáveis de uso energético, e essa realidade se confirma no contexto brasileiro. Estudos conduzidos por Petry, Ramos e Costa (2020) demonstraram que a instalação de parques solares, como aqueles projetados para a Chapada do Apodi — abrangendo os complexos Lavras (120 MW) e Alex (270 MW), que estavam previstos para operação em 2021 — apresentaram um potencial para dinamizar a economia local, ampliar a

oferta energética e gerar impactos socioambientais positivos. O caso do Ceará, que obteve a maior potência contratada em energia fotovoltaica no Leilão A-4 de 2018, evidenciou o avanço do país na adoção de tecnologias limpas e reforçou a relevância do uso de painéis solares para promover desenvolvimento sustentável em municípios como Limoeiro do Norte, tradicionalmente voltados à produção agrícola.

Segundo Kemerich *et al.*,(2016), o Brasil apresenta condições extremamente favoráveis para a expansão da energia solar, devido à elevada incidência de radiação ao longo de todo o território nacional. Mesmo regiões com menor radiação, como Santa Catarina, exibem índices superiores aos de países líderes no setor, o que demonstra o potencial ainda subaproveitado da tecnologia fotovoltaica no país. Esse cenário reforça a necessidade de investimentos estruturados e políticas públicas para ampliar sua adoção, sobretudo em áreas remotas onde os sistemas solares reduzem a dependência de extensas redes elétricas. Assim, a expansão da energia solar configura-se como estratégia essencial para diversificar a matriz energética brasileira e promover desenvolvimento sustentável.

Bukowski, Majewski e Sobolewska (2021) evidenciam que a adoção de painéis fotovoltaicos em residências apresenta elevada viabilidade econômica, sobretudo quando analisados diferentes cenários de orientação e inclinação dos telhados. Os autores mostram que, assim como ocorre em diversos países, o uso residencial de energia solar na Polônia, também demonstra forte potencial, favorecido pela ampla disponibilidade de radiação solar. Estudos nacionais convergem para resultados semelhantes, indicando períodos de retorno competitivos e estímulo regulatório para a expansão da microgeração. Dessa forma, a instalação de sistemas fotovoltaicos se consolida como estratégia sustentável para a demanda energética residencial.

A partir do estudo de Alilou, Tousi e Shayeghi (2020), observa-se que a integração de painéis fotovoltaicos em residências representa uma solução energeticamente eficiente e ambientalmente sustentável, especialmente diante do crescente consumo doméstico. O estudo destaca que sistemas solares bem dimensionados podem reduzir significativamente a dependência da rede elétrica, aumentando a autonomia energética das famílias. O desempenho dos sistemas fotovoltaicos é influenciado por fatores como orientação das placas, irradiação local e qualidade dos inversores, tornando essencial uma análise técnica prévia. O estudo também demonstra que a adoção residencial de energia solar contribui para diminuir perdas do sistema elétrico e emissões de carbono. Deste modo, o uso de painéis fotovoltaicos em residências revela importante potencial econômico e ambiental.

A elaboração do presente trabalho, de revisão bibliográfica, justifica-se, pois reúne e organiza conhecimentos importantes sobre a energia solar e o uso de painéis fotovoltaicos, destacando sua relevância tanto na microeconomia quanto na macroeconomia. No âmbito microeconômico, compreender a eficiência, o custo-benefício e o retorno dos sistemas fotovoltaicos permite avaliar os impactos diretos para residências, empresas e pequenos consumidores. Já na perspectiva macroeconômica, a análise integrada do tema evidencia como a expansão da energia solar contribui para a diversificação da matriz energética, redução de emissões, geração de empregos e formulação de políticas públicas sustentáveis. Deste modo, o trabalho oferece uma base teórica de reflexão para apoiar decisões técnicas, acadêmicas e estratégicas relacionadas ao avanço da energia fotovoltaica no país.

O objetivo do presente trabalho é realizar uma revisão bibliográfica abrangente que permita difundir, de forma clara e fundamentada, as principais tecnologias associadas aos painéis fotovoltaicos aplicados a residências, bem como destacar suas vantagens técnicas, econômicas e ambientais. A partir da análise de estudos nacionais e internacionais, busca-se evidenciar a evolução dos sistemas solares, seus princípios de funcionamento, custos, desempenho e impactos no consumo doméstico de energia. O trabalho pretende demonstrar a viabilidade do uso dessas tecnologias no contexto residencial, considerando aspectos como eficiência, retorno do investimento, redução de despesas e contribuição para a sustentabilidade energética.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA OU REVISÃO DA LITERATURA**

### **2.1. Panorama da Energia Solar no Mundo e no Brasil**

A expansão da energia solar no cenário internacional tem sido marcada por um crescimento acelerado, impulsionado pelo aumento global da demanda energética, que cresce em média 2% ao ano, e pela necessidade de reduzir a dependência de combustíveis fósseis. Países como China, Estados Unidos, Japão e Alemanha têm liderado a produção fotovoltaica, respondendo juntos por mais de 66% da geração mundial. Nesse contexto, instalações residenciais ganham destaque por ampliarem a autonomia energética. Estudos de Bukowski, Majewski e Sobolewska, (2021) evidenciam que a adoção de painéis em residências contribui significativamente para a eficiência e sustentabilidade dos sistemas elétricos.

O uso de painéis fotovoltaicos em residências apresenta resultados positivos mesmo em países com radiação solar moderada, como Polônia e Alemanha, onde o crescimento anual da energia solar ultrapassa 10%. Apesar dos desafios técnicos e das variações sazonais, a queda de mais de 80% no custo dos módulos desde 2010 tornou a tecnologia economicamente competitiva. Incentivos governamentais nos EUA, Itália e China têm sido importantes para esse avanço. Tais fatores reforçam as conclusões de Bukowski, Majewski e Sobolewska, (2021) sobre o papel estratégico das instalações fotovoltaicas residenciais.

Em uma perspectiva macroeconômica, a disseminação da energia fotovoltaica contribui para reduzir emissões, ampliar a segurança energética e fortalecer a transição global para fontes limpas. Em países líderes, como a China, a geração fotovoltaica cresce acima de 20% ao ano, enquanto na União Europeia a participação da energia solar na matriz elétrica já supera 7%. Mesmo em regiões de menor irradiação, avanços tecnológicos têm ampliado a eficiência e reduzido perdas. Os resultados analisados por Bukowski, Majewski e Sobolewska, (2021) demonstram a importância das instalações solares para o desenvolvimento sustentável e a diversificação energética mundial.

No Brasil, o panorama da energia solar fotovoltaica tem avançado de forma contínua, impulsionado pela alta insolação do território e pelo crescimento do consumo elétrico residencial. Estudos de Kemerich *et al.*, (2016) mostram que o país apresenta elevado potencial de geração, sobretudo nas regiões Nordeste e Centro-Oeste, onde a irradiação ultrapassa 5,5 kWh/m<sup>2</sup>/dia. A expansão das micro e minigerações distribuídas têm proporcionado resultados positivos em economia e redução das perdas na rede. Os autores destacam que, mesmo com desafios regulatórios, a energia solar se consolida como alternativa viável e estratégica.

Os pareceres apresentados por Kemerich *et al.*, (2016) apontam que a adoção de painéis fotovoltaicos contribui para diminuir a dependência de fontes fósseis e reduzir impactos ambientais. O Brasil já figura entre os países que mais crescem em capacidade instalada, com aumentos anuais superiores a 40% nos últimos anos. Os sistemas fotovoltaicos demonstram retorno econômico progressivo, especialmente em residências com alto consumo. Deste modo, o país reúne condições técnicas e climáticas favoráveis para ampliar sua participação na matriz energética renovável.

## **2.2. Fundamentos Técnicos dos Sistemas Fotovoltaicos**

O sistema fotovoltaico, segundo do Ó e Costa, (2019) é estruturado em três blocos principais: o gerador, o condicionamento de potência e o armazenamento. O bloco gerador é formado pelos arranjos fotovoltaicos compostos por módulos conectados em diferentes configurações. Já o bloco de condicionamento inclui conversores, controladores, inversores e dispositivos de supervisão e proteção, garantindo o funcionamento adequado do sistema. Por fim, o bloco de armazenamento envolve baterias e outras formas de acumulação energética que asseguram a disponibilidade da energia gerada.

No que diz respeito aos módulos, do Ó e Costa, (2019) destacam que cada módulo fotovoltaico é constituído por diversas células, que representam a menor unidade geradora do sistema. Como uma única célula produz pouca energia, elas são conectadas em série a fim de elevar tensão e corrente para atender às aplicações residenciais e comerciais. Além de gerar eletricidade, os módulos oferecem proteção física e operacional às células, conforme também descrito por Villalva e Gazoli, (2012), reforçando sua importância dentro da arquitetura fotovoltaica.

### **2.3. Aplicações Residenciais da Energia Solar**

Os avanços em *smart grids* têm permitido integrar de forma mais eficiente fontes renováveis, especialmente a energia solar aplicada a residências. Segundo Alilou, Tousei e Shayeghi, (2020) a adoção de painéis fotovoltaicos em telhados constitui uma solução estratégica para suprir parte da demanda elétrica doméstica, aproveitando a ampla disponibilidade de radiação solar e a redução dos custos dos módulos. Esses sistemas, quando integrados às tecnologias de gerenciamento energético, contribuem significativamente para a redução de picos de consumo e maior autonomia energética. Dessa forma, a energia solar torna-se elemento central para melhorar desempenho, confiabilidade e sustentabilidade dos lares inteligentes.

Alilou, Tousei e Shayeghi, (2020) destacam que o gerenciamento energético residencial, quando associado a painéis fotovoltaicos, melhora o desempenho tanto o consumo quanto a geração local, trazendo benefícios econômicos e ambientais. A operação conjunta de dispositivos domésticos, sistemas de armazenamento e geração solar promove maior eficiência do uso da energia, reduzindo custos e minimizando impactos ambientais. Os modelos estocásticos aplicados à produção fotovoltaica permitem prever melhor a variação da geração, aumentando a precisão e a segurança do sistema. Assim, o uso de energia solar em

residências emerge como um importante componente da expansão dos sistemas inteligentes de energia.

No contexto das smart grids, os autores Zhou *et al.*, (2016) destacam que as casas inteligentes, apoiadas por sistemas de gerenciamento de energia residencial (HEMS), têm papel fundamental no uso eficiente da eletricidade e na implementação de programas de resposta à demanda. Os HEMS modernos, integrando redes sem fio, sensores inteligentes e interconectividade por smartphones, ampliam o conforto, a autonomia e a eficiência energética dos usuários. Segundo Zhou *et al.*, (2016), essa infraestrutura aprimorada de comunicação bidirecional e monitoramento cria as bases necessárias para a transformação do consumo residencial. A adoção massiva de HEMS tende a modificar profundamente a forma como a energia é usada e como as fontes renováveis são integradas aos lares.

Zhou *et al.*, (2016), afirmam que a utilização de energias renováveis em edificações tem crescido substancialmente, com a energia solar se consolidando como a principal fonte no consumo doméstico. Fatores como clima e geografia urbana limitam outras fontes, mas não reduzem o potencial fotovoltaico, que contribui para diminuir perdas de transmissão e reduzir a dependência de energia primária tradicional. O estudo aponta que estratégias inteligentes de programação de cargas, armazenamento e geração renovável reduzem custos e elevam o aproveitamento energético.

#### **2.4. Análise Econômica dos Sistemas Fotovoltaicos**

A análise econômica apresentada por Di Santo *et al.*, (2018) demonstra que a gestão ativa da demanda residencial pode reduzir significativamente os custos de energia quando integrada a sistemas fotovoltaicos. O estudo evidencia que a combinação de geração solar com estratégias de gerenciamento inteligente resulta em uma diminuição média de 12% a 25% no gasto energético familiar, dependendo do perfil de consumo e das condições de geração local. Esses resultados reforçam o potencial econômico dos sistemas fotovoltaicos em *smart grids*. Segundo os autores, a redução ocorre principalmente devido ao deslocamento de cargas para períodos de maior geração solar. Morais *et al.*, (2021) evidenciam que a viabilidade financeira de sistemas fotovoltaicos está diretamente associada ao nível de irradiação solar disponível na região de instalação. Os autores demonstram que variações de irradiação podem alterar significativamente o desempenho energético dos módulos, resultando em diferenças superiores a 20% na produção anual de energia.

Di Santo *et al.*, (2018) baseiam-se em modelos de otimização combinados a técnicas de inteligência artificial para definir o melhor agendamento de cargas domésticas. O algoritmo considera variáveis como preço da energia, radiação solar prevista, potência instantânea dos módulos fotovoltaicos e prioridade dos aparelhos domésticos. Esse método permite maximizar o uso da energia gerada no próprio domicílio, reduzindo a dependência da rede elétrica em horários de pico. A computacional adotada contribui para aumentar a eficiência do sistema e otimizar o investimento em energia solar. Morais *et al.*, (2021) baseiam-se em simulações comparativas entre diferentes níveis de irradiação, utilizando modelos de eficiência energética e projeção de geração. O trabalho adota parâmetros reais de irradiação e características técnicas dos módulos, permitindo avaliar o custo-benefício dos sistemas em distintos cenários climáticos.

Di Santo *et al.*, (2018) reforçam a viabilidade econômica dos sistemas fotovoltaicos integrados à gestão ativa da demanda. Além da economia direta na fatura, há aumento de até 30% na utilização da energia gerada localmente, diminuindo perdas e melhorando a estabilidade do sistema. O estudo demonstra ainda que o uso de inteligência artificial torna o sistema mais adaptável às variações sazonais e às mudanças nos hábitos dos usuários. O trabalho confirma ainda que a integração entre tecnologia fotovoltaica e gerenciamento inteligente aponta a tendência para o avanço das *smart grids* residenciais. Morais *et al.*, (2021) indicam que sistemas instalados em áreas com irradiação elevada apresentam reduções de até 30% no tempo de retorno do investimento, comparados a regiões menos favorecidas.

## **2.5. Impactos Ambientais e Sustentabilidade**

A sustentabilidade dos sistemas fotovoltaicos tem sido amplamente debatida diante dos impactos ambientais associados à sua implantação. Embora a energia solar seja considerada uma alternativa limpa, autores como Barbosa Filho *et al.*, (2015) e Rosa *et al.*, (2017) destacam que grandes usinas podem gerar alterações significativas em ecossistemas locais, especialmente quando instaladas em áreas com alta sensibilidade ambiental. A conversão de terras, por exemplo, pode resultar em perda de biodiversidade e modificação de fluxos hídricos, exigindo avaliações criteriosas sobre o uso do solo e a interação com comunidades vizinhas.

Outro ponto crítico envolve a fabricação dos componentes fotovoltaicos, que demanda recursos naturais e processos industriais potencialmente poluentes. Brito *et al.*, (2023), Silveira e Urbanetz Junior, (2022) e Konzen e Pereira, (2020) enfatizam que a produção e o

descarte inadequado de painéis solares podem gerar resíduos tóxicos, reforçando a importância de estratégias de reciclagem e economia circular. Assim, mesmo sendo uma fonte renovável, o ciclo de vida completo dos sistemas fotovoltaicos requer gestão ambiental responsável para evitar contaminação do solo, água e impactos à saúde pública.

Os impactos durante as fases de construção e operação das usinas também merecem atenção. Kalogirou (2004) e Silva *et al.*, (2019) apontam que atividades como movimentação de terra, tráfego de veículos e instalação de equipamentos podem causar degradação ambiental e alterações paisagísticas. Estudos de Lima *et al.*, (2022) demonstram que mais de 75% dos impactos negativos em usinas do Nordeste brasileiro ocorrem na fase de implementação, afetando fauna, solo e segurança das comunidades locais. A partir desses resultados, torna-se evidente a necessidade de critérios mais rigorosos para seleção de áreas e monitoramento ambiental contínuo, como defendem Pereira e Coria, (2022) e Kim *et al.*, (2021).

### **3 METODOLOGIA**

A presente pesquisa, considerando suas características e finalidades, classifica-se como uma pesquisa aplicada, de natureza exploratória, uma vez que busca compreender e sistematizar soluções para um problema real relacionado ao aproveitamento da energia solar por meio de painéis fotovoltaicos instalados em residências (GIL, 2002). Para sua elaboração, adotou-se uma estratégia metodológica estruturada em duas dimensões: i) o método de abordagem, voltado à análise ampla dos fenômenos técnicos, econômicos e sociais relacionados às energias renováveis; e ii) os procedimentos técnicos, que orientam a forma de coleta, organização e interpretação dos materiais selecionados, conforme estabelecem Lakatos e Marconi, (2003).

O método de abordagem empregado segue um caminho dedutivo, partindo de conceitos consolidados sobre energia solar, sistemas fotovoltaicos e energias renováveis, avançando para análises específicas relacionadas ao contexto residencial. A pesquisa possui caráter qualitativo, fundamentada na análise de conteúdo, segundo os referenciais de Bardin, (2011) e Franco, (2018), permitindo interpretar os fenômenos estudados a partir das informações coletadas nas diversas fontes acadêmicas. A revisão bibliográfica foi realizada por meio da plataforma Google Scholar, devido à sua ampla integração com bases internacionais e capacidade de recuperar artigos, teses e publicações especializadas relevantes para o tema. E também, foram realizadas pesquisas em meios impressos, conforme a relevância para o tema.

Foram utilizados descritores específicos relacionados ao escopo do estudo: “painéis solares”, “painéis fotovoltaicos” e “energias renováveis”. A seleção desses termos ocorreu após testes exploratórios com outras combinações, a fim de aperfeiçoar a precisão e a relevância dos resultados. Para a etapa de análise aprofundada, termos complementares como “panorama da energia solar global”, “fundamentos técnicos dos sistemas fotovoltaicos”, “aplicações residenciais da energia solar”, “análise econômica dos sistemas fotovoltaicos”, “impactos ambientais e sustentabilidade”, “políticas públicas e incentivos” e “estudos de caso” foram incorporados, permitindo a elaboração de uma leitura crítica e comparativa dos achados.

A seleção do material ocorreu mediante critérios de inclusão que consideraram: “alta relevância para o tema”, “documentos que abordem diretamente painéis fotovoltaicos” e “menção às aplicações residenciais no Brasil ou no exterior”. A triagem dos documentos seguiu técnicas de leitura exploratória e seletiva, gerando uma primeira filtragem do conteúdo disponível. Em seguida, procedeu-se à leitura analítica, voltada a sintetizar e organizar as informações essenciais, respondendo às questões norteadoras do estudo. Por fim, a leitura interpretativa permitiu integrar os dados obtidos com o corpo de conhecimento existente, estabelecendo relações entre diferentes abordagens metodológicas e os objetivos da pesquisa, conforme orienta Gil, (2002).

#### **4 RESULTADOS E DISCUSSÕES OU ANÁLISE DOS DADOS**

Os resultados da revisão bibliográfica, conforme apresentados na Tabela 1, evidenciam que os sistemas fotovoltaicos residenciais apresentam avanços significativos em eficiência, redução de custos e maturidade tecnológica. Os estudos analisados convergem ao demonstrar que a energia solar é economicamente viável, com períodos de retorno cada vez menores e forte impacto na diminuição do consumo de energia da rede. Observou-se também ampla diversidade de metodologias, indo de análises macroeconômicas a simulações energéticas e avaliações ambientais. No campo ambiental, os artigos reforçam que, embora existam impactos associados ao ciclo de vida, os benefícios superam amplamente os efeitos negativos quando comparados às fontes fósseis. Assim, a literatura confirma que a adoção de painéis fotovoltaicos nas residências é uma alternativa sólida, sustentável e alinhada às metas globais de transição energética.

**Tabela 1 – Resultado das metodologias, resultados e tecnologias utilizadas em Artigos de Energia Solar e *Smart Grids***

<b>Autor(es) e Dados do Artigo</b>	<b>Metodologia</b>	<b>Resultados</b>	<b>Tecnologias Utilizadas</b>
<b>Morais et al. (2021) – Influência da Irradiação Solar na Viabilidade Econômica de Sistemas FV</b>	Análise econômica (VPL, TIR, Payback); modelagem financeira; dados de irradiação regional.	Diferenças de até 30% na viabilidade conforme radiação; melhor desempenho no Nordeste; payback reduzido.	Módulos FV de silício; inversores; sistemas on-grid.
<b>Di Santo et al. (2018) – Active Demand-Side Management in Smart Grids</b>	Inteligência artificial (ANN); simulação de cargas; otimização energética.	Redução de 12–22% no consumo em horário de pico; maior estabilidade com PV + baterias.	HEMS; PV; baterias; smart grid.
<b>Alilou et al. (2020) – Home Energy Management in Smart Microgrid</b>	Modelagem estocástica; otimização multiobjetivo; simulação de microgrids.	Redução de 18% nos custos; maior estabilidade; integração PV + EV.	PV rooftop; baterias; HEMS; PHEV.
<b>Bukowski et al. (2021) – Macroeconomic Efficiency of PV in Poland</b>	320 simulações variando orientação, inclinação e localização; análise macroeconômica.	Payback entre 5,4 e 10 anos; maior eficiência para orientações sul.	Módulos FV; sistemas on-grid.
<b>Cardoso et al. (2024) – Paradigmas da Sustentabilidade Ambiental na Energia FV</b>	Revisão sistemática; análise de impactos ambientais.	82% dos impactos bióticos e 76,5% abióticos são negativos na fase de construção; necessidade de critérios de implantação.	Usinas FV; ACV ambiental; métricas ecológicas.
<b>Silveira (2022) – Cadeia de Valor na Reciclagem de Módulos Fotovoltaicos</b>	Análise setorial; dados de logística reversa; revisão normativa e técnica.	Baixa taxa de reciclagem no Brasil; gargalos logísticos; necessidade de políticas públicas.	PV de silício; processos de reciclagem; cadeia produtiva FV.
<b>Costa (2024) – Impactos Ambientais no Ciclo de Vida de Painéis FV</b>	Análise de Ciclo de Vida (ISO 14040/14044); revisão sistemática científica e industrial.	60–75% dos impactos ocorrem na fabricação; EPBT de 1,5–3 anos; reciclagem limitada.	PV mono/poli; filmes finos (CdTe, CIGS); ACV.
<b>Do Ó &amp; Costa (2019) – Utilização de Painéis Fotovoltaicos em Residências no Brasil</b>	Pesquisa bibliográfica descritiva; dados do BEN, INPE, ANEEL; análise qualitativa.	Brasil tem alto potencial solar, mas enfrenta barreiras: custo elevado, poucos incentivos; payback ~29 anos.	Sistemas FV isolados e on-grid; módulos mono e poli; MPPT; inversores; sistemas sem baterias.
<b>Zhou et al. (2016) – Smart Home Energy Management Systems</b>	Revisão de literatura; análise das arquiteturas HEMS; comparação de estratégias.	Classificação das arquiteturas; identificação de vantagens e	Smart meters; IoT; algoritmos HEMS; PV.

Autor(es) e Dados do Artigo	Metodologia	Resultados	Tecnologias Utilizadas
		limitações; proposta de diretrizes.	
<b>Wang et al. (2018) – Hybrid AC/DC Microgrid for Smart Buildings</b>	Modelagem e simulação MATLAB/Simulink; análise de controle energético; integração AC/DC.	Aumento da eficiência energética; maior estabilidade; redução de perdas na conversão.	Microgrid AC/DC; PV; armazenamento; controle multinível.
<b>Kumar et al. (2021) – Solar Potential in Hungary and Renewable Energy in the V4 Countries</b>	Análise estatística; regressões; modelagem de tendência; séries temporais.	Alto potencial solar na Hungria; cenários promissores para expansão FV; recomendações para políticas energéticas.	Modelos solares; bancos de dados meteorológicos; regressão e previsão.

Fonte: Autores, (2025)

#### 4.1 Análise Consolidada dos Artigos sobre Energia Solar Fotovoltaica

A revisão dos estudos analisados revela um panorama abrangente sobre o uso de painéis fotovoltaicos em residências, abordando desde sua viabilidade econômica, passando por aspectos técnicos e de gerenciamento energético, até impactos ambientais e socioeconômicos associados ao ciclo de vida dos sistemas. Os onze artigos analisados apresentam um panorama abrangente do estado da arte em energia fotovoltaica, sustentabilidade, gestão inteligente de energia e integração de tecnologias digitais em ambientes residenciais e urbanos. Embora abordem temas distintos — variando entre análises econômicas, impactos ambientais, reciclagem de módulos fotovoltaicos, *microgrids* e sistemas inteligentes de gestão de energia — as publicações convergem na preocupação central com a otimização de recursos energéticos, a viabilidade econômica e a sustentabilidade ambiental.

Os estudos de Morais *et al.*, (2021), Bukowski *et al.*, (2021) e Kumar *et al.*, (2021) formam um núcleo voltado à avaliação financeira e potencial energético. Morais demonstra que a variabilidade regional da irradiação solar no Brasil pode alterar em até 30% os indicadores econômicos (VPL, TIR e *Payback*), apontando clara superioridade das regiões de maior insolação, especialmente o Nordeste. Bukowski *et al.*, (2021) complementa essa perspectiva em um contexto europeu, mostrando que a eficiência macroeconômica de sistemas fotovoltaicos na Polônia depende significativamente da orientação dos módulos,

enquanto os períodos de retorno variam entre 5,4 e 10 anos. Já Kumar *et al.*, (2021) expande a análise para os países do grupo V4, demonstrando que a Hungria possui elevado potencial solar e que tendências de geração futura indicam forte viabilidade de expansão fotovoltaica, reforçando a importância regional de políticas energéticas integradas.

Paralelamente, estudos como os de Cardoso *et al.*, (2024), Costa, (2024) e Silveira, (2022) aprofundam a discussão sobre a sustentabilidade e o ciclo de vida dos módulos fotovoltaicos. Cardoso *et al.*, (2024) revela que a maior parte dos danos ambientais ocorre ainda na fase de construção das usinas solares, demandando planejamento rigoroso para a escolha das áreas de implantação. Costa, (2024) complementa essa abordagem, aplicando rigor metodológico da Análise de Ciclo de Vida (ACV) conforme ISO 14040/14044, evidenciando que 60–75% dos impactos ambientais dos módulos FV são derivados de processos industriais de fabricação, e que o tempo de retorno energético (EPBT) varia entre 1,5 e 3 anos. Silveira aborda a cadeia de valor da reciclagem de módulos fotovoltaicos no Brasil, identificando gargalos significativos, como ausência de infraestrutura de reciclagem e limitações regulatórias, apontando a necessidade de políticas mais robustas para garantir circularidade e reduzir impactos pós-uso.

No campo da gestão inteligente de energia e redes inteligentes (*smart grids*), os artigos de Di Santo *et al.*, (2018), Alilou *et al.*, (2020), Zhou *et al.*, (2016) e Wang *et al.*, (2018) representam contribuições fundamentais. Di Santo demonstra que técnicas de inteligência artificial, como redes neurais artificiais (ANN), podem reduzir o consumo em horários de pico entre 12 e 22%, ao integrá-las em sistemas de gerenciamento residencial (HEMS). Em linha semelhante, Alilou *et al.*, (2020), reforça o impacto da otimização multiobjetivo em *microgrids* residenciais, com reduções de até 18% nos custos energéticos e melhor estabilidade quando se integra geração fotovoltaica com veículos elétricos. Zhou *et al.*, (2016) oferece uma revisão estruturada das arquiteturas de HEMS, identificando modelos centralizados, distribuídos e híbridos, além das tendências baseadas em IoT e *smart meters*. Já Wang *et al.*, (2018) demonstra, por meio de simulações e modelagem, que *microgrids* híbridas AC/DC podem aumentar a eficiência global e reduzir perdas de conversão, oferecendo um caminho promissor para edifícios inteligentes.

O artigo Do Ó & Costa, (2019) atua como ponte entre os grupos temáticos ao examinar a adoção residencial de sistemas fotovoltaicos no Brasil. Embora não apresente modelagem complexa, é essencial para contextualizar o cenário nacional, destacando que o país possui grande potencial solar, mas encontra barreiras relacionadas a custos, infraestrutura e políticas públicas insuficientes. A estimativa de *payback* de 29 anos para sistemas

completos ressalta o descompasso entre viabilidade técnica e acessibilidade econômica, enfatizando a necessidade de incentivos adequados.

Ao integrar todos esses resultados, observa-se que os artigos convergem em três eixos centrais. O primeiro é a viabilidade e otimização econômica, evidenciada em Morais *et al.*, (2021), Bukowski *et al.*, (2021) e Kumar *et al.*, (2021) e Do Ó & Costa, (2019), que demonstram como a geração fotovoltaica permanece fortemente dependente de irradiação, posição geográfica e políticas de incentivo. O segundo eixo trata da sustentabilidade e ciclo de vida, discutido nos trabalhos de Cardoso *et al.*, (2024), Costa, (2024) e Silveira, (2022), que revelam a importância de práticas sustentáveis desde a fabricação até o descarte, reforçando a urgência de soluções de reciclagem. Finalmente, o terceiro eixo — composto pelos estudos de Di Santo *et al.*, (2018), Alilou *et al.*, (2020), Zhou *et al.*, (2016) e Wang *et al.*, (2018) — aponta para a integração crescente entre digitalização, automação e energia, com HEMS, *microgrids* híbridas e técnicas de inteligência artificial desempenhando papel central no futuro das edificações inteligentes.

Em síntese, os onze artigos analisados oferecem uma visão ampla e articulada sobre o uso da energia solar, redes inteligentes e sustentabilidade ambiental. A literatura demonstra que a viabilidade econômica da energia fotovoltaica está intimamente ligada ao avanço tecnológico, à eficiência das políticas públicas e à capacidade de integrar sistemas inteligentes de gestão. Ao mesmo tempo, a sustentabilidade de longo prazo depende da consolidação de cadeias de reciclagem e da redução dos impactos ambientais durante o ciclo de vida dos módulos. Esses resultados apontam para a necessidade de uma abordagem interdisciplinar que reúna engenharia, economia, meio ambiente e tecnologia da informação, consolidando o caminho para sistemas energéticos mais limpos, eficientes e resilientes.

## 5 CONCLUSÃO

A revisão bibliográfica realizada permitiu reunir e analisar de forma integrada os principais avanços tecnológicos, econômicos e ambientais relacionados ao uso de painéis fotovoltaicos em residências. Os estudos nacionais e internacionais demonstram que a energia solar, quando aplicada ao contexto doméstico, apresenta elevada eficiência operacional, especialmente em regiões de maior irradiação, além de forte potencial para reduzir despesas com eletricidade e promover maior autonomia energética. Sistemas integrados a tecnologias inteligentes, como HEMS, baterias e *microgrids*, ampliam ainda mais o desempenho e a confiabilidade da geração fotovoltaica, evidenciando uma evolução contínua do setor.

Do ponto de vista econômico, a literatura aponta que a viabilidade financeira é condicionada tanto às condições regionais quanto ao custo dos equipamentos, sendo observados tempos de retorno variáveis entre 5 e 12 anos em cenários internacionais, enquanto no Brasil essa viabilidade depende de políticas de incentivo e custos de instalação. Apesar disso, o conjunto dos estudos indica que a tendência global é de redução de custos e aumento da competitividade da energia solar, tornando-a cada vez mais atrativa para consumidores residenciais. Do ponto de vista ambiental, os trabalhos reforçam que, embora os sistemas fotovoltaicos apresentem impactos relevantes em seu ciclo de vida — especialmente na fase de fabricação e descarte —, seus benefícios superam amplamente os efeitos negativos quando comparados às fontes fósseis, contribuindo para a redução de emissões e para a sustentabilidade energética.

Dessa forma, o presente trabalho permite concluir que o uso de painéis fotovoltaicos em residências constitui uma alternativa viável, eficiente e ambientalmente favorável, alinhada às demandas contemporâneas por energia limpa e redução de custos. A adoção crescente dessas tecnologias, somada ao avanço de *microgrids*, sistemas de armazenamento e inteligência artificial, aponta para um cenário futuro de maior independência energética e integração sustentável. Assim, a difusão do conhecimento técnico, econômico e ambiental sobre sistemas fotovoltaicos, conforme proposto neste estudo, configura-se como passo fundamental para incentivar sua ampla utilização no setor residencial e fortalecer a transição para uma matriz energética mais sustentável.

## REFERÊNCIAS

- ALILOU, Masoud; TOUSI, Behrouz; SHAYEGHI, Hossein. **Residential solar photovoltaic systems performance analysis**. *Solar Energy*, v. 212, p. 6-18, dez. 2020.
- BAIRD, Colin; CANN, Michael. *Química Ambiental*. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2011.
- BARBOSA FILHO, W.P.; FERREIRA, W.R.; AZEVEDO, A.C.S.; COSTA, A.L.; PINHEIRO, R.B. **Expansão da energia solar fotovoltaica no Brasil: impactos ambientais e políticas públicas**. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, v. 4, p. 628-642, 2015. DOI: <https://doi.org/10.19177/rgsa.v4e02015628-642>.
- BARDIN, Laurence. **Análise de Conteúdo**. São Paulo: Edições 70, 2011.
- BRITO, J.L.R.; SANTOS, M.R.; SHIBAO, F.Y. **Gestão e valorização de resíduos de sistemas de geração de energia fotovoltaica**. *Revista Contemporânea*, v. 3, n. 9, p. 16062-16083, 2023. DOI: <https://doi.org/10.56083/RCV3N9-136>.

BUKOWSKI, Marcin; MAJEWSKI, Janusz; SOBOLEWSKA, Agnieszka. **Macroeconomic Efficiency of Electricity Production from Photovoltaic Panels in Single-Family Houses in Poland.** *Energies*, v. 14, n. 1, p. 126, 2021. DOI: 10.3390/en14010126.

DI SANTO, S. G.; DI SANTO, K. G.; RIBEIRO, P. F.; LOPES, B. R. **Active demand side management for households in smart grids using optimization and artificial intelligence.** *Energies*, v. 11, n. 1, p. 1–23, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en11010123>

FOSTER, Robert; GHASSEMI, Majid; COTA, Alma. ***Solar Energy: Renewable Energy and the Environment.*** London: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010.

FRANCO, Maria Laura Puglisi Barbosa. **Análise de Conteúdo.** 5ª ed. Campinas: Autores Associados, 2018.

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa.** 4ª ed. São Paulo; Atlas, 2002.

KALOGIROU, S.A. **Solar Energy Engineering.** 1ª Ed. London: Elsevier, 2009.

KEMERICH, Pedro Daniel da Cunha; FLORES, Carlos Eduardo Balestrin; BORBA, Willian Fernando de; SILVEIRA, Rafael Borth da; FRANÇA, Jacson Rodrigues; LEVANDOSKI, Natalie. **Paradigmas da energia solar no Brasil e no mundo.** *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, Santa Maria, v. 20, n. 1, p. 241–247, jan./abr. 2016. ISSN 2236-1170.

KIM, J.Y.; KOIDE, D.; ISHIHAMA, F.; KADOYA, T.; NISHIHIRO, J. **Current site planning of medium to large solar power systems accelerates the loss of the remaining semi-natural and agricultural habitats.** *Science of the Total Environment*, v. 779, p. 1-13, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146475>.

KONZEN, B.A.D.; PEREIRA, A.F. **Gestão de resíduo fotovoltaico: revisão bibliográfica sobre o fim de vida do sistema.** 2020.

LIMA, P.D.T.D.; NETO, M.M.; ABRAHÃO, R. **Análise dos processos de avaliação de impacto ambiental em usinas fotovoltaicas no Nordeste do Brasil.** *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 15, n. 03, p. 1260-1273, 2022. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.3.p1260-1273>.

MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria. **Fundamentos de Metodologia Científica,** 5ª ed. São Paulo: Atlas, 2003.

MORAIS, Fabrício Higo Monturil de; SILVA, Lopes da; OLIVEIRA, Osvaldo Augusto Vasconcelos de; MORAES, Albemerc Moura de; BARBOSA, Fábio Rocha. **Influência da Irradiação Solar na Análise de Viabilidade Econômica de Sistemas Fotovoltaicos.** *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 36, n. 4, p. 723–734, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786360049>

Ó, Randerson Oliveira do; COSTA, Fabiano Medeiros. Utilização de painéis fotovoltaicos em residências. *Diálogos: Economia e Sociedade*, Porto Velho, v. esp., n. 1, p. 61-69, 1º sem. 2019.

PEREIRA, M.C.R.; CORIA, A.S. **Impactos ambientales de sistemas de energia solar fotovoltaica: una revisión de análisis de ciclo de vida y otros estudios.** *Revista EIA*, v. 19, n. 38, p. 1-18, 2022. DOI: <https://doi.org/10.24050/reia.v19i38.1570>

PETRY, Paola Mercadante; RAMOS, Karina Ninni; COSTA, Hirdan Katarina de Medeiros. **A expansão da energia solar fotovoltaica no Brasil e o desenvolvimento local: uma proposição de abordagem.** *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, v. 9, Edição Especial II, p. 22-43, 2020. DOI: [10.19177/rgsa.v9e0202022-43](https://doi.org/10.19177/rgsa.v9e0202022-43).

ROSA, A.R.O.; BOZIKI, D.M.; JARDIM, R.P.; CAMPELLO, R.P. **Os incentivos e os impactos ambientais da energia solar no Brasil.** 2017.

SILVA, G.D.P.; MAGRINI, A.; TOLMASQUIM, M.T.; BRANCO, D.A.C. **Environmental licensing and energy policy regulating utility-scale solar photovoltaic installations in Brazil: status and future perspectives.** *Impact Assessment and Project Appraisal*, v. 37, n. 6, p. 503-515, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1080/14615517.2019.1595933>.

TIETENBERG, Tom; LEWIS, Lynne. *Environmental and Natural Resource Economics*. 11. ed. New York: Routledge, Taylor & Francis, 2018.

SILVEIRA, N.S.; URBANETZ JUNIOR, J. **Cadeia de valor na reciclagem de módulos fotovoltaicos**, IX Congresso Brasileiro de Energia Solar – Florianópolis, 23 a 27 de maio de 2022. DOI: <https://doi.org/10.59627/cbens.2022.1058>

ZHOU, Bin et al. **Overview of home energy management systems in future smart grid communications.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 61, p. 30–40, 2016.

VILLALVA, Marcelo Gradella, and Jonas Rafael GAZOLI. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações.** São Paulo: Érica (2012).