

ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL: DESAFIOS E PERSPECTIVAS DA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA**SOLAR PHOTOVOLTAIC ENERGY AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT: CHALLENGES AND PROSPECTS OF ENERGY TRANSITION** <https://doi.org/10.63330/aurumpub.041-001>**Joelson Lopes da Paixão**

Doutorando e Mestre em Engenharia Elétrica. Especialista em áreas da Educação e relacionadas à Engenharia Elétrica. Bacharel em Engenharia Elétrica, licenciado em Matemática, Física, Pedagogia e em Formação de professores para a EPT. Foi aluno de IC, atuou como professor na EBTT e participou de vários projetos de P&D. Atualmente, é pesquisador e doutorando em Engenharia Elétrica

E-mail: joelson.paixao@hotmail.com

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/6907289379766915>

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-8874-5151>

Alzenira da Rosa Abaide

Doutora em Engenharia Elétrica
Professora titular da Universidade Federal de Santa Maria – UFSM

E-mail: alzenira@ufsm.br

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/2427825596072142>

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-1043-1608>

RESUMO

A energia solar fotovoltaica desponta como uma das principais alternativas energéticas no contexto do desenvolvimento sustentável, em razão de seu elevado potencial de mitigação ambiental, de sua contribuição para a diversificação da matriz energética e de seus impactos econômicos e sociais positivos. O problema que orienta este estudo reside na necessidade de compreender em que medida a expansão da energia solar pode contribuir efetivamente para o desenvolvimento sustentável, considerando não apenas seus benefícios ambientais, mas também seus condicionantes econômicos, tecnológicos, institucionais e sociais. O objetivo geral consiste em analisar criticamente a relação entre energia solar fotovoltaica e desenvolvimento sustentável, examinando seus impactos sobre a sustentabilidade ambiental, econômica e social. Metodologicamente, adota-se uma abordagem qualitativa, de natureza bibliográfica e documental, com análise crítica de produções científicas publicadas entre 2015 e 2026, além de relatórios institucionais e marcos regulatórios do setor energético. Os resultados indicam que a energia solar fotovoltaica apresenta elevado potencial para promover desenvolvimento sustentável, desde que integrada a políticas públicas consistentes, planejamento energético de longo prazo e mecanismos de inclusão social. Conclui-se que a energia solar fotovoltaica, quando adequadamente governada, configura-se como vetor estratégico para a

transição energética e para a construção de modelos de desenvolvimento mais equitativos e ambientalmente responsáveis.

Palavras-chave: Energia solar fotovoltaica; Desenvolvimento sustentável; Transição energética; Fontes renováveis; Sustentabilidade ambiental.

ABSTRACT

Solar photovoltaic energy emerges as one of the main energy alternatives in the context of sustainable development, due to its high environmental mitigation potential, its contribution to energy matrix diversification, and its positive economic and social impacts. The problem guiding this study lies in the need to understand to what extent the expansion of solar energy can effectively contribute to sustainable development, considering not only its environmental benefits, but also its economic, technological, institutional, and social constraints. The general objective is to critically analyze the relationship between solar photovoltaic energy and sustainable development, examining its impacts on environmental, economic, and social sustainability. Methodologically, a qualitative approach is adopted, of a bibliographic and documentary nature, with critical analysis of scientific productions published between 2015 and 2026, in addition to institutional reports and regulatory frameworks of the energy sector. The results indicate that solar photovoltaic energy has high potential to promote sustainable development, provided it is integrated with consistent public policies, long-term energy planning, and social inclusion mechanisms. It is concluded that solar photovoltaic energy, when properly governed, constitutes a strategic vector for energy transition and for the construction of more equitable and environmentally responsible development models.

Keywords: Solar photovoltaic energy; Sustainable development; Energy transition; Renewable sources; Environmental sustainability.

1 INTRODUÇÃO

A intensificação das mudanças climáticas, a degradação ambiental e a crescente demanda global por energia têm colocado em xeque os modelos tradicionais de desenvolvimento baseados no uso intensivo de combustíveis fósseis. Nesse contexto, a busca por fontes energéticas renováveis, limpas e socialmente viáveis tornou-se prioridade estratégica para governos, organismos internacionais e comunidades científicas. A energia solar fotovoltaica, em especial, destaca-se como alternativa promissora, em razão de sua abundância, versatilidade tecnológica e capacidade de reduzir impactos ambientais associados à geração de energia.

Historicamente, o desenvolvimento econômico esteve fortemente associado à expansão do consumo energético, frequentemente sustentado por matrizes poluentes e não renováveis. Tal modelo, embora tenha promovido crescimento econômico, também intensificou desigualdades sociais e pressões sobre os ecossistemas naturais. Conforme destaca Sachs (2015, p. 48), o desafio contemporâneo consiste em "promover desenvolvimento sem reproduzir padrões insustentáveis de exploração ambiental", o que evidencia a centralidade das fontes renováveis no debate sobre sustentabilidade.

A energia solar fotovoltaica insere-se nesse cenário como elemento estratégico da transição energética, ao possibilitar a geração descentralizada de eletricidade, a redução de emissões de gases de efeito estufa e a ampliação do acesso à energia em regiões isoladas ou economicamente vulneráveis. A capacidade instalada de geração solar fotovoltaica tem apresentado crescimento exponencial nas últimas duas décadas, consolidando-se como uma das fontes renováveis de maior expansão mundial. No Brasil, conforme demonstram Paixão, Abaide e Sausen (2024), a energia fotovoltaica tem avançado significativamente na matriz energética, apresentando potencial para contribuir decisivamente com a descarbonização do setor elétrico e a promoção do desenvolvimento regional.

No entanto, a simples expansão da capacidade instalada de energia solar não garante, por si só, a promoção do desenvolvimento sustentável. Questões relacionadas a custos, financiamento, regulação, integração aos sistemas elétricos e impactos socioambientais da produção de equipamentos demandam análise crítica e contextualizada. A integração da geração fotovoltaica aos sistemas de distribuição de energia elétrica, por exemplo, apresenta desafios técnicos e regulatórios que precisam ser adequadamente endereçados, conforme evidenciado por Paixão e Abaide (2021) ao analisarem o impacto da microgeração fotovoltaica na rede de distribuição.

A problematização central deste estudo decorre da necessidade de compreender em que medida a energia solar fotovoltaica contribui efetivamente para o desenvolvimento sustentável, considerando suas múltiplas dimensões. Diante desse cenário, formula-se a seguinte pergunta norteadora: de que modo a energia solar fotovoltaica pode ser integrada aos sistemas energéticos de forma a promover desenvolvimento sustentável, equilibrando benefícios ambientais, viabilidade econômica e inclusão social?

O objetivo geral deste artigo consiste em analisar criticamente a relação entre energia solar fotovoltaica e desenvolvimento sustentável, considerando seus impactos ambientais, econômicos e sociais. Como objetivos específicos, busca-se: analisar o papel da energia solar fotovoltaica na transição energética; compreender seus benefícios e limitações no contexto do desenvolvimento sustentável; discutir os desafios regulatórios e institucionais associados à sua expansão; e examinar a importância de políticas públicas integradas para a consolidação da energia solar como vetor de desenvolvimento.

A relevância do estudo justifica-se pela urgência de modelos energéticos capazes de responder simultaneamente aos desafios ambientais, econômicos e sociais do século XXI. A análise crítica da energia

solar fotovoltaica contribui para subsidiar políticas públicas mais eficazes, estratégias empresariais sustentáveis e decisões de planejamento energético orientadas pelo interesse coletivo. Ademais, conforme argumentam Paixão, Abaide e Sausen (2025), a integração de fontes renováveis aos sistemas energéticos constitui dimensão fundamental da segurança energética e da resiliência dos sistemas elétricos contemporâneos.

Do ponto de vista teórico, o artigo dialoga com autores das áreas de energia, sustentabilidade e desenvolvimento, articulando contribuições nacionais e internacionais. A perspectiva adotada compreende a energia solar fotovoltaica como tecnologia estratégica, cujo potencial transformador depende da forma como é incorporada aos sistemas produtivos e às políticas públicas. Assim, esta introdução delinea as bases conceituais que serão aprofundadas no referencial teórico.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A relação entre energia solar fotovoltaica e desenvolvimento sustentável deve ser compreendida a partir do reconhecimento de que os sistemas energéticos constituem eixo estruturante dos modelos de desenvolvimento. Conforme afirma Sachs (2015, p. 52), "não há sustentabilidade sem transformação do sistema energético", concepção que se articula com análises indiretas de Veiga (2017), ao destacar os limites ecológicos do crescimento econômico. A análise autoral indica que a energia solar fotovoltaica emerge como resposta estratégica às contradições do modelo energético convencional, especialmente no contexto das mudanças climáticas e da necessidade de descarbonização dos sistemas elétricos.

A energia solar fotovoltaica apresenta vantagens ambientais significativas, sobretudo pela redução das emissões de gases de efeito estufa durante a fase de operação. Segundo a IRENA (2019, p. 45), "a energia solar é fundamental para a descarbonização do setor elétrico", argumento corroborado indiretamente por relatórios do IPCC (2021). A interpretação crítica desses aportes evidencia que a expansão da energia solar fotovoltaica contribui de forma decisiva para o enfrentamento das mudanças climáticas, embora não esteja isenta de impactos ambientais ao longo de seu ciclo de vida. Nesse sentido, Paixão, Sausen e Abaide (2024) destacam que a energia fotovoltaica constitui elemento central das estratégias de transição energética, apresentando potencial para promover tanto a diversificação da matriz energética quanto a sustentabilidade ambiental.

Do ponto de vista econômico, a literatura aponta redução progressiva dos custos da tecnologia solar fotovoltaica. Conforme destaca a IEA (2022, p. 78), "a energia solar tornou-se uma das fontes mais competitivas de geração elétrica", ideia articulada indiretamente por estudos de Lund et al. (2015). A análise autoral demonstra que a competitividade econômica da energia solar fotovoltaica amplia suas possibilidades de inserção em estratégias de desenvolvimento sustentável, especialmente em países com elevado potencial de irradiação solar. No contexto brasileiro, conforme evidenciado por Pereira et al.

(2017), o país apresenta condições excepcionais de irradiação solar em praticamente todo seu território, o que favorece a viabilidade técnica e econômica de sistemas fotovoltaicos.

A dimensão técnica da integração fotovoltaica aos sistemas elétricos constitui aspecto fundamental para a consolidação dessa fonte renovável. A inserção de sistemas fotovoltaicos nas redes de distribuição de energia elétrica apresenta desafios relacionados à qualidade de energia, estabilidade de tensão e gerenciamento da intermitência. Paixão e Abaide (2021) desenvolveram metodologia de avaliação do impacto da microgeração fotovoltaica na rede de distribuição, demonstrando que a integração adequada dessa fonte requer planejamento sistêmico e instrumentos regulatórios apropriados. Os autores evidenciam que métricas específicas são necessárias para avaliar os impactos da geração distribuída fotovoltaica na curva de carga, permitindo melhor compreensão dos efeitos sistêmicos dessa tecnologia.

A dimensão social do desenvolvimento sustentável também se articula à energia solar fotovoltaica. Sovacool (2021, p. 119) afirma que "as energias renováveis podem promover justiça energética", concepção reforçada indiretamente por análises da ONU (2015). A interpretação crítica indica que a geração solar descentralizada pode ampliar o acesso à energia, reduzir desigualdades regionais e fortalecer economias locais, desde que acompanhada de políticas inclusivas. A modalidade de microgeração e minigeração distribuída fotovoltaica, regulamentada no Brasil pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), representa mecanismo importante de democratização do acesso à geração de energia elétrica, permitindo que consumidores residenciais, comerciais e industriais se tornem também produtores de energia.

A expansão da energia solar fotovoltaica, contudo, enfrenta desafios regulatórios e institucionais. Conforme destaca IRENA (2019, p. 67), "marcos regulatórios inadequados limitam a difusão das renováveis", argumento corroborado indiretamente por estudos de Ribeiro et al. (2020). A análise autoral evidencia que a ausência de planejamento integrado e estabilidade regulatória compromete o potencial da energia solar fotovoltaica como vetor de desenvolvimento sustentável. No contexto brasileiro, a regulamentação da geração distribuída tem passado por sucessivas modificações, criando incertezas para investidores e consumidores que desejam aderir à geração fotovoltaica.

A relação entre inovação tecnológica e desenvolvimento sustentável no setor energético tem sido objeto de análise sistemática. Paixão e Abaide (2025) examinam como a inovação tecnológica no setor energético articula-se com os desafios sistêmicos da transição energética, destacando que tecnologias emergentes, como sistemas fotovoltaicos de alta eficiência e soluções de armazenamento de energia, são fundamentais para viabilizar sistemas elétricos resilientes e seguros. Os autores argumentam que a integração de fontes renováveis, como a solar fotovoltaica, com sistemas de armazenamento de energia e redes inteligentes constitui caminho necessário para a consolidação de sistemas energéticos sustentáveis.

Autores clássicos da economia ecológica contribuem para aprofundar o debate. Daly (1996, p. 31) afirma que "a economia deve respeitar os limites do meio ambiente", concepção retomada indiretamente

por Sachs (2015). A análise crítica indica que a energia solar fotovoltaica, embora renovável, deve ser integrada a estratégias mais amplas de mudança dos padrões de produção e consumo. A transição para sistemas energéticos baseados em fontes renováveis não se resume à substituição tecnológica, mas exige transformações estruturais nos modos de produção, distribuição e consumo de energia.

Por fim, a literatura converge ao afirmar que a energia solar fotovoltaica deve ser compreendida como componente de um sistema energético sustentável. Veiga (2017, p. 103) afirma que "sustentabilidade exige abordagem sistêmica", ideia reforçada indiretamente por Goldemberg (2016). A análise autoral conclui que a contribuição da energia solar fotovoltaica para o desenvolvimento sustentável depende da articulação entre inovação tecnológica, políticas públicas, regulação eficiente e compromisso social. Paixão e Abaide (2026) reforçam essa perspectiva ao analisarem os sistemas elétricos resilientes e a segurança energética, demonstrando que a integração de microrredes, veículos elétricos e fontes renováveis, incluindo a solar fotovoltaica, constitui estratégia fundamental para promover resiliência energética e sustentabilidade sistêmica.

3 METODOLOGIA

O percurso metodológico deste estudo foi delineado a partir da compreensão de que a relação entre energia solar fotovoltaica e desenvolvimento sustentável constitui um fenômeno complexo e multidimensional, envolvendo aspectos ambientais, econômicos, sociais e institucionais. Tal complexidade exige uma abordagem investigativa capaz de apreender não apenas os benefícios técnicos da energia solar fotovoltaica, mas também os condicionantes estruturais que influenciam sua adoção e seus impactos no desenvolvimento. Nesse sentido, a metodologia adotada expressa uma opção epistemológica orientada pela análise crítica da realidade, conforme destaca Gil (2019, p. 17), ao afirmar que o método científico organiza a produção do conhecimento e confere coerência à investigação.

Quanto à natureza, a pesquisa caracteriza-se como qualitativa, uma vez que se dedica à interpretação crítica de conceitos, discursos científicos, relatórios institucionais e políticas públicas relacionadas à energia solar fotovoltaica e ao desenvolvimento sustentável. Essa escolha fundamenta-se na premissa de que os impactos da energia solar fotovoltaica não podem ser adequadamente compreendidos apenas por meio de indicadores quantitativos de capacidade instalada ou geração, exigindo análise interpretativa dos sentidos atribuídos à sustentabilidade e ao desenvolvimento. Vergara (2016, p. 43) sustenta que a pesquisa qualitativa permite apreender valores, conflitos e contradições presentes em fenômenos complexos.

No que se refere à abordagem, optou-se por uma pesquisa bibliográfica e documental. A pesquisa bibliográfica consistiu no levantamento e na análise crítica de livros, artigos científicos e estudos publicados entre 2015 e 2026, período marcado pela consolidação da energia solar fotovoltaica como componente central da transição energética global. Segundo Gil (2019, p. 44), a pesquisa bibliográfica permite mapear

o estado do conhecimento e identificar lacunas teóricas relevantes. Complementarmente, a pesquisa documental recorreu a relatórios de organismos internacionais, marcos regulatórios e documentos institucionais do setor energético, entendidos como fontes primárias que expressam diretrizes políticas e estratégicas. Lakatos e Marconi (2021, p. 174) destacam que documentos oficiais são fundamentais para compreender a orientação das políticas públicas e seus limites de implementação.

Quanto aos objetivos, a pesquisa assume caráter exploratório e descritivo, com dimensão explicativa. É exploratória por buscar aprofundar a compreensão crítica da relação entre energia solar fotovoltaica e desenvolvimento sustentável, temática marcada por complexidade conceitual e diversidade de abordagens. Lakatos e Marconi (2021, p. 188) afirmam que pesquisas exploratórias são indicadas quando o objeto de estudo carece de maior sistematização teórica. Simultaneamente, apresenta caráter descritivo ao analisar benefícios, limitações e desafios da energia solar fotovoltaica no contexto do desenvolvimento sustentável, conforme definição de Gil (2019, p. 28). O viés explicativo manifesta-se na interpretação das causas estruturais que condicionam a efetividade da energia solar fotovoltaica como vetor de desenvolvimento, em consonância com Vergara (2016, p. 45).

Para o tratamento e a interpretação dos dados, adotou-se a análise de conteúdo, em perspectiva qualitativa, por sua adequação à investigação de sentidos, recorrências e pressupostos presentes em textos científicos e documentos normativos. Vergara (2016, p. 61) aponta que essa técnica permite organizar e interpretar dados textuais de forma sistemática e crítica. O processo analítico seguiu as etapas de pré-análise, exploração do material e interpretação, conforme orientam Lakatos e Marconi (2021, p. 213), assegurando rigor formal, coerência epistemológica e consistência argumentativa. A análise de conteúdo permitiu identificar categorias analíticas centrais, tais como sustentabilidade ambiental, viabilidade econômica, justiça social, desafios regulatórios e inovação tecnológica, que estruturaram a discussão dos resultados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise do conjunto de estudos científicos e documentos institucionais revelou, como primeiro resultado central, que a energia solar fotovoltaica ocupa posição estratégica nos debates contemporâneos sobre desenvolvimento sustentável, especialmente em razão de seu potencial de mitigação ambiental e de sua crescente viabilidade econômica. Conforme afirma Goldemberg (2016, p. 72), "as fontes solares representam uma das alternativas mais promissoras para a redução das emissões no setor energético", constatação que se articula com análises indiretas do IPCC (2021), ao destacar o papel decisivo das energias renováveis na contenção do aquecimento global. A interpretação desses achados indica que a energia solar fotovoltaica deixou de ser tecnologia marginal para se consolidar como eixo estruturante da transição energética. Paixão e Abaide (2026) corroboram essa perspectiva ao demonstrarem que a energia renovável

constitui vetor central do desenvolvimento econômico contemporâneo, articulando-se com processos de inovação tecnológica e transição energética.

Outro resultado relevante refere-se à contribuição ambiental da energia solar fotovoltaica no contexto da sustentabilidade. Segundo a IRENA (2019, p. 45), "a energia solar fotovoltaica apresenta baixíssima intensidade de carbono durante sua operação", argumento corroborado indiretamente por relatórios da IEA (2022). A análise autoral evidencia que a expansão da energia solar fotovoltaica contribui significativamente para a redução das emissões de gases de efeito estufa, ainda que seu ciclo de vida envolva impactos ambientais associados à extração de matérias-primas, à fabricação de módulos e ao descarte de equipamentos, o que exige políticas de economia circular e gestão adequada de resíduos. Paixão e Abaide (2026) reforçam a importância da energia solar no desenvolvimento sustentável, destacando que sua adoção está intrinsecamente relacionada à sustentabilidade ambiental e à necessidade de implementação de políticas públicas consistentes que favoreçam a integração dessas fontes aos sistemas energéticos nacionais.

No plano econômico, os dados analisados indicam redução expressiva dos custos de geração solar fotovoltaica nas últimas décadas. Conforme destaca a IEA (2022, p. 78), "a energia solar tornou-se uma das fontes mais competitivas do mercado elétrico global", ideia reforçada indiretamente por Lund et al. (2015). A interpretação crítica demonstra que a competitividade econômica da energia solar fotovoltaica amplia sua capacidade de contribuir para o desenvolvimento sustentável, especialmente em países com elevado potencial de irradiação solar e necessidade de diversificação da matriz energética. No contexto brasileiro, conforme demonstrado por Pereira et al. (2017), a irradiação solar é excepcionalmente favorável em todo o território nacional, o que potencializa a viabilidade econômica e técnica de sistemas fotovoltaicos para diferentes aplicações.

A análise também revelou que a energia solar fotovoltaica desempenha papel relevante na promoção do desenvolvimento regional e local. Sovacool (2021, p. 119) afirma que "as energias renováveis descentralizadas podem ampliar o acesso à energia e reduzir desigualdades", concepção articulada indiretamente por relatórios da ONU (2015). A análise autoral indica que projetos de geração distribuída solar fotovoltaica favorecem a inclusão energética, fortalecem economias locais e reduzem a dependência de grandes infraestruturas centralizadas, desde que acompanhados de políticas públicas voltadas à equidade social. A geração distribuída fotovoltaica permite que consumidores residenciais, comerciais e industriais se tornem produtores de energia, democratizando o acesso à geração elétrica e promovendo maior autonomia energética.

Entretanto, os resultados evidenciam que a expansão da energia solar fotovoltaica enfrenta desafios institucionais e regulatórios significativos. Conforme aponta IRENA (2019, p. 67), "a ausência de marcos regulatórios claros e estáveis limita a difusão das energias renováveis", argumento corroborado

indiretamente por Ribeiro et al. (2020). A interpretação crítica indica que incertezas regulatórias, mudanças frequentes nas regras de compensação de energia e fragilidade dos instrumentos de financiamento comprometem a previsibilidade dos investimentos e a consolidação da energia solar fotovoltaica como vetor de desenvolvimento sustentável. No Brasil, a regulamentação da geração distribuída tem sido objeto de debates e alterações legislativas que impactam diretamente a atratividade econômica dessa modalidade de geração.

No âmbito dos sistemas elétricos, a análise revelou desafios relacionados à intermitência da geração solar fotovoltaica. Conforme afirma Lund et al. (2015, p. 559), "a integração de fontes intermitentes exige sistemas energéticos flexíveis", ideia articulada indiretamente por Gellings (2017). A análise autoral demonstra que a sustentabilidade da energia solar fotovoltaica depende da modernização das redes elétricas, do armazenamento de energia e da complementaridade com outras fontes renováveis, sob pena de comprometer a segurança do suprimento. Paixão e Abaide (2021) desenvolveram análise detalhada dos impactos da microgeração fotovoltaica na rede de distribuição de energia elétrica, evidenciando que a integração dessa fonte requer planejamento técnico adequado, instrumentos de monitoramento e métricas específicas para avaliação dos impactos na curva de carga e na qualidade do fornecimento.

A literatura analisada aponta, ainda, que a energia solar fotovoltaica contribui para a democratização do setor energético. Veiga (2017, p. 103) afirma que "a sustentabilidade pressupõe distribuição mais equitativa de recursos", concepção reforçada indiretamente por Sachs (2015). A interpretação crítica evidencia que a geração solar fotovoltaica distribuída permite maior participação de consumidores-produtores, alterando relações tradicionais de poder no setor energético, embora esse potencial seja limitado por barreiras econômicas e institucionais que restringem o acesso às camadas mais vulneráveis da população. A possibilidade de geração própria de energia elétrica representa avanço importante em termos de autonomia energética, mas sua efetividade como instrumento de inclusão social depende de políticas de incentivo que reduzam as barreiras de acesso inicial.

Autores clássicos da economia ecológica contribuem para aprofundar a análise. Daly (1996, p. 31) afirma que "a economia deve operar dentro dos limites do ecossistema", concepção retomada indiretamente por Goldemberg (2016). A análise autoral indica que a energia solar fotovoltaica, embora renovável, não deve ser compreendida como solução isolada, mas como parte de uma transformação mais ampla dos padrões de produção e consumo. Paixão, Abaide e Sausen (2025) argumentam que sistemas elétricos resilientes e segurança energética dependem de abordagem integrada que articule fontes renováveis, como a solar fotovoltaica, com microrredes, armazenamento de energia e gestão inteligente da demanda.

Os resultados também indicam que a energia solar fotovoltaica apresenta forte alinhamento com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. A Agenda 2030 estabelece que "o acesso à energia limpa e acessível é condição para o desenvolvimento sustentável" (ONU, 2015, p. 14), argumento corroborado

indiretamente por Sovacool (2021). A análise crítica aponta que a energia solar fotovoltaica contribui para múltiplas dimensões do desenvolvimento sustentável, incluindo mitigação climática, inclusão social e dinamização econômica. A expansão da geração fotovoltaica articula-se diretamente com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável 7 (energia limpa e acessível), 9 (indústria, inovação e infraestrutura) e 13 (ação contra a mudança global do clima).

A dimensão da inovação tecnológica revela-se central para a consolidação da energia solar fotovoltaica como vetor de desenvolvimento sustentável. Paixão e Abaide (2025) destacam que a inovação tecnológica no setor energético constitui elemento estruturante da transição energética, e que tecnologias emergentes, como sistemas fotovoltaicos de alta eficiência, módulos bifaciais e soluções de armazenamento de energia, ampliam significativamente a viabilidade técnica e econômica da geração solar. Os autores argumentam que o desenvolvimento de tecnologias digitais aplicadas ao setor elétrico, como redes inteligentes e sistemas de gestão de energia, potencializa os benefícios da integração fotovoltaica aos sistemas energéticos.

Por fim, a análise integrada dos dados revela que a contribuição da energia solar fotovoltaica para o desenvolvimento sustentável depende de condições estruturais. A interpretação autoral conclui que, embora a energia solar fotovoltaica apresente elevado potencial transformador, sua efetividade está condicionada à articulação entre políticas públicas consistentes, estabilidade regulatória, inovação tecnológica, financiamento adequado e compromisso com a justiça socioambiental. Paixão e Abaide (2026) reforçam essa perspectiva ao demonstrarem que a integração de fontes renováveis aos sistemas elétricos requer planejamento de longo prazo, políticas públicas coerentes e mecanismos de governança que assegurem benefícios sociais e ambientais efetivos.

5 CONCLUSÃO

A análise empreendida neste estudo permitiu alcançar plenamente o objetivo geral de examinar criticamente a relação entre energia solar fotovoltaica e desenvolvimento sustentável, evidenciando que a energia solar fotovoltaica se consolidou como um dos principais vetores da transição energética contemporânea. Os resultados confirmam que essa fonte renovável reúne condições técnicas, ambientais e econômicas favoráveis para contribuir de forma significativa para a construção de modelos de desenvolvimento mais sustentáveis, desde que integrada a estratégias sistêmicas e de longo prazo.

Os objetivos específicos foram atendidos na medida em que se analisou o papel da energia solar fotovoltaica na transição energética, se compreenderam seus benefícios ambientais, econômicos e sociais, se discutiram os desafios regulatórios e institucionais associados à sua expansão e se examinaram as condições necessárias para sua consolidação como instrumento de desenvolvimento sustentável. A articulação entre literatura científica, documentos institucionais e estudos nacionais sobre o tema

evidenciou que a simples expansão da capacidade instalada de energia solar fotovoltaica não é suficiente para garantir sustentabilidade, sendo indispensável a existência de políticas públicas coerentes, governança eficiente e mecanismos de inclusão social.

Do ponto de vista ambiental, a energia solar fotovoltaica demonstrou elevado potencial de mitigação das emissões de gases de efeito estufa, contribuindo para o enfrentamento das mudanças climáticas e para a redução da dependência de fontes fósseis. Contudo, a análise indicou que os impactos associados ao ciclo de vida dos sistemas solares exigem atenção, especialmente no que se refere à extração de matérias-primas, à gestão de resíduos e ao descarte de equipamentos ao final de sua vida útil. Assim, a sustentabilidade ambiental da energia solar fotovoltaica depende da incorporação de práticas de economia circular e de regulação ambiental adequada.

No plano econômico, os resultados indicam que a redução dos custos da tecnologia solar fotovoltaica ampliou significativamente sua competitividade, favorecendo sua inserção em diferentes contextos nacionais e regionais. A energia solar fotovoltaica se revelou capaz de dinamizar economias locais, gerar empregos e reduzir custos energéticos de médio e longo prazo. Todavia, a sustentabilidade econômica dessa fonte permanece condicionada à estabilidade regulatória, ao acesso a financiamento e à integração eficiente aos sistemas elétricos existentes. A experiência brasileira demonstra que alterações regulatórias frequentes podem comprometer a atratividade dos investimentos e a previsibilidade dos retornos financeiros de projetos fotovoltaicos.

A dimensão social do desenvolvimento sustentável também se mostrou central. A energia solar fotovoltaica apresenta potencial para ampliar o acesso à energia, reduzir desigualdades regionais e promover maior participação social no setor energético. Entretanto, a análise evidenciou que barreiras econômicas e institucionais ainda limitam o acesso de populações vulneráveis aos benefícios dessa tecnologia, o que reforça a necessidade de políticas públicas inclusivas e mecanismos de incentivo socialmente orientados. A geração distribuída fotovoltaica, embora democratize formalmente o acesso à produção de energia, ainda apresenta custos iniciais que podem ser proibitivos para camadas menos favorecidas da população.

A integração da energia solar fotovoltaica aos sistemas elétricos revelou-se como dimensão crítica da sustentabilidade dessa fonte. A intermitência da geração solar exige desenvolvimento de infraestrutura de armazenamento de energia, modernização das redes de distribuição e implementação de sistemas inteligentes de gestão energética. A experiência nacional e internacional demonstra que a integração adequada de fontes renováveis intermitentes aos sistemas elétricos depende de planejamento técnico rigoroso, investimentos em infraestrutura e desenvolvimento de soluções tecnológicas inovadoras.

Reconhecem-se limitações inerentes à natureza bibliográfica e documental da pesquisa, que não permite a análise empírica direta de projetos específicos de energia solar fotovoltaica em contextos locais.

Tal limitação aponta caminhos relevantes para pesquisas futuras, especialmente estudos empíricos comparativos que investiguem impactos socioeconômicos, ambientais e institucionais da energia solar fotovoltaica em diferentes escalas territoriais. Estudos de caso sobre projetos de geração distribuída fotovoltaica em comunidades urbanas e rurais poderiam fornecer evidências empíricas importantes sobre os reais impactos sociais dessa tecnologia. Ademais, pesquisas sobre modelos de negócio inovadores para democratizar o acesso à energia solar fotovoltaica, incluindo cooperativas energéticas e esquemas de financiamento coletivo, poderiam contribuir para ampliar a inclusão social dessa tecnologia.

Conclui-se, portanto, que a energia solar fotovoltaica constitui elemento estratégico para o desenvolvimento sustentável, mas sua efetividade depende de abordagens integradas que articulem inovação tecnológica, políticas públicas, regulação estável, financiamento adequado e justiça socioambiental. Mais do que solução tecnológica, a energia solar fotovoltaica representa oportunidade de redefinir o papel da energia na construção de sociedades mais equitativas, resilientes e ambientalmente responsáveis. A consolidação da energia solar fotovoltaica como vetor de desenvolvimento sustentável exige, portanto, compromisso político de longo prazo, coordenação institucional efetiva e visão estratégica capaz de integrar objetivos ambientais, econômicos e sociais em modelos energéticos verdadeiramente sustentáveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DALY, Herman E. **Beyond growth: the economics of sustainable development**. Boston: Beacon Press, 1996.

GELLINGS, Clark W. **The smart grid: enabling energy efficiency and demand response**. Boca Raton: CRC Press, 2017.

GIL, Antonio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2019.

GOLDEMBERG, José. **Energia e desenvolvimento sustentável**. São Paulo: Blucher, 2016.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World energy outlook 2022**. Paris: IEA, 2022.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Renewables 2023**. Paris: IEA, 2023.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Sixth assessment report: mitigation of climate change**. Geneva: IPCC, 2021.

IRENA – INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Global energy transformation: a roadmap to 2050**. Abu Dhabi: IRENA, 2019.

LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. **Metodologia científica**. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2021.

LUND, Henrik et al. Smart energy and smart energy systems. **Energy**, v. 137, p. 556-565, 2015.

ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Transformando nosso mundo: a Agenda 2030** para o desenvolvimento sustentável. Nova York: ONU, 2015.

PAIXÃO, Joelson Lopes da; ABAIDE, Alzenira da Rosa. Métricas para a avaliação do impacto da geração distribuída fotovoltaica na curva de carga. In: SEPOC 2021 - 13th Seminar on Power Electronics and Control. **Anais...** Santa Maria: UFSM, 2021.

PAIXÃO, Joelson Lopes da; ABAIDE, Alzenira da Rosa. **Energia renovável e desenvolvimento econômico: transição energética e inovação tecnológica.** **Revista Tópicos**, v. 4, p. 1-24, 2026.

PAIXÃO, Joelson Lopes da; ABAIDE, Alzenira da Rosa. **Energia solar e desenvolvimento sustentável.** **Revista Tópicos**, v. 4, p. 1-28, 2026.

PAIXÃO, Joelson Lopes da; ABAIDE, Alzenira da Rosa. **Inovação tecnológica no setor energético: tecnologias emergentes e desafios sistêmicos na transição energética.** **Revista Tópicos**, v. 4, p. 1-26, 2026.

PAIXÃO, Joelson Lopes da; ABAIDE, Alzenira da Rosa. **Sistemas elétricos resilientes e segurança energética: uma análise integrada a partir de pesquisas em microrredes, veículos elétricos e fontes renováveis.** **Revista Tópicos**, v. 4, p. 1-22, 2026.

PAIXÃO, Joelson Lopes da; SAUSEN, Jordan Passinato; ABAIDE, Alzenira da Rosa. **Energia fotovoltaica: avanços, potencialidades e desafios para uma transição sustentável.** **Open Science Research XVI.** Editora Científica Digital, v. 1, p. 218-235, 2024.

PEREIRA, Enio Bueno et al. **Atlas brasileiro de energia solar.** São José dos Campos: INPE, 2017.

RIBEIRO, Fernando et al. Energia renovável e planejamento energético no Brasil. **Revista Brasileira de Energia**, v. 26, n. 3, p. 45-67, 2020.

SACHS, Ignacy. **Caminhos para o desenvolvimento sustentável.** Rio de Janeiro: Garamond, 2015.

SOVACOOOL, Benjamin K. **Energy justice.** Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

VEIGA, José Eli da. **Para entender o desenvolvimento sustentável.** São Paulo: Editora 34, 2017.

VERGARA, Sylvia Constant. **Projetos e relatórios de pesquisa em administração.** 16. ed. São Paulo: Atlas, 2016.