

IMPACTOS AMBIENTAIS CAUSADOS PELO USO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA: UMA REVISÃO DA LITERATURA

Andrey Gabriel Rodrigues Pimentel (UFVJM) E-mail: andrey.gabriel@ufvjm.edu.br

Gustavo Dias Montanha (UFVJM) E-mail: gustavo.dias@ufvjm.edu.br

Thaís de Fátima Araújo Silva (UFVJM) E-mail: thais.araujo@ufvjm.edu.br

Jáder Fernando Dias Breda (UFVJM) E-mail: jader.breda@ufvjm.edu.br

Resumo: A energia solar fotovoltaica desempenha papel relevante na transição para uma matriz elétrica com menor emissão de gases de efeito estufa. Entretanto, sua utilização não é isenta de impactos ambientais. Este trabalho teve como objetivo analisar os impactos associados à instalação e à operação de usinas fotovoltaicas e ao descarte dos módulos após o término de sua vida útil, bem como discutir estratégias para sua mitigação. Foi realizada uma revisão bibliográfica narrativa, de abordagem qualitativa e caráter descritivo-analítico. As buscas foram conduzidas no Google Acadêmico, no Portal de Periódicos CAPES e na SciELO, resultando na seleção de nove estudos publicados entre 2021 e 2023. Os trabalhos foram organizados em dois eixos temáticos: impactos associados à instalação e à operação das usinas e impactos relacionados ao fim da vida útil e ao descarte dos módulos. Os resultados indicaram que a implantação dos empreendimentos pode provocar retirada da cobertura vegetal, alteração do uso do solo, perda de habitats, mudanças no microclima e modificações paisagísticas. No descarte, destacaram-se a geração crescente de resíduos, a presença de materiais potencialmente tóxicos e os riscos de contaminação do solo e da água. A comparação entre os estudos também evidenciou a necessidade de ampliar pesquisas de longo prazo e análises sobre a realidade brasileira. Conclui-se que a redução desses impactos depende da integração entre planejamento territorial, monitoramento ambiental, logística reversa, reutilização, reciclagem e políticas públicas específicas.

Palavras-chave: Energia solar fotovoltaica, Impactos ambientais, Resíduos fotovoltaicos, Logística reversa.

ENVIRONMENTAL IMPACTS CAUSED BY THE USE OF PHOTOVOLTAIC ENERGY: A LITERATURE REVIEW

Abstract: Photovoltaic solar energy plays an important role in the transition toward an electricity matrix with lower greenhouse gas emissions. However, its use is not free from environmental impacts. This study aimed to analyze the impacts associated with the installation and operation of photovoltaic power plants and the disposal of modules at the end of their useful life, as well as to discuss strategies for mitigating these impacts. A narrative literature review was conducted using a qualitative and descriptive-analytical approach. Searches were performed in Google Scholar, the CAPES Journals Portal, and SciELO, resulting in the selection of nine studies published between 2021 and 2023. The studies were organized into two thematic axes: impacts associated with the installation and operation of photovoltaic power plants and impacts related to the end of the modules' useful life and their disposal. The results indicated that the implementation of photovoltaic facilities may cause vegetation removal, changes in land use, habitat loss, microclimatic changes, and landscape alterations. Regarding disposal, the main concerns were the increasing generation of waste, the presence of potentially toxic materials, and the risks of soil and water contamination. The comparison among the studies also highlighted the need for further long-term research and analyses focused on the Brazilian context. It is concluded that reducing these impacts requires the integration of territorial planning, environmental monitoring, reverse logistics, reuse, recycling, and specific public policies.

Keywords: Photovoltaic solar energy, Environmental impacts, Photovoltaic waste, Reverse logistics.

1. Introdução

O crescimento da demanda mundial por energia elétrica, aliado à necessidade de redução das emissões de gases de efeito estufa e da dependência de combustíveis fósseis, tem impulsionado a expansão das fontes renováveis de energia. Nesse contexto, a energia solar fotovoltaica destaca-se como uma das principais alternativas para a

diversificação da matriz elétrica, devido à disponibilidade do recurso solar, à possibilidade de geração descentralizada e às menores emissões de gases poluentes durante sua operação quando comparada às fontes fósseis (ARAÚJO et al., 2022; SIMS, ROGNER e GREGORY, 2003).

Apesar desses benefícios, a classificação da energia solar fotovoltaica como fonte renovável não significa que sua utilização seja isenta de impactos ambientais. A implantação de usinas fotovoltaicas pode envolver ocupação de grandes áreas, retirada da cobertura vegetal, alteração de habitats, mudanças nas características do solo e interferências no microclima local. Além disso, ao final da vida útil dos módulos, o descarte inadequado pode provocar acúmulo de resíduos e liberação de materiais potencialmente tóxicos, com riscos de contaminação do solo e dos recursos hídricos.

Os estudos sobre essa temática abordam diferentes dimensões dos impactos ambientais, mas frequentemente analisam de maneira isolada aspectos relacionados à implantação das usinas, às alterações nos ecossistemas ou ao descarte dos módulos fotovoltaicos. A sistematização dessas informações é relevante para compreender de forma integrada os principais impactos identificados, suas implicações ambientais e sociais e as medidas que podem ser adotadas para reduzi-los.

Diante disso, este trabalho tem como objetivo analisar, com base na literatura científica, os impactos ambientais associados à energia solar fotovoltaica, considerando duas etapas específicas: a instalação e a operação das usinas fotovoltaicas e o descarte dos módulos ao final de sua vida útil. Busca-se identificar e comparar os principais impactos relatados pelos estudos revisados, discutir suas implicações para os ecossistemas e as comunidades locais e apresentar estratégias de mitigação, gestão de resíduos e reaproveitamento de materiais. Como contribuição, o estudo reúne evidências dispersas na literatura e apresenta uma síntese crítica dos principais desafios ambientais relacionados à expansão da geração fotovoltaica.

2. Energia solar fotovoltaica: crescimento do uso e benefícios sociais

A expansão das fontes renováveis de energia tem sido impulsionada pela necessidade de diversificação das matrizes elétricas e de redução das emissões de gases de efeito estufa. No Brasil, as fontes renováveis representaram 89,2% da matriz elétrica em 2023, resultado associado à elevada participação da geração hidrelétrica e ao crescimento das fontes eólica e solar (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2024).

Conforme apresentado na Figura 1, a participação da fonte solar na matriz elétrica brasileira passou de 4,4%, em 2022, para 7,0%, em 2023. Nesse período, a geração solar aumentou de 30,1 TWh para 50,6 TWh, enquanto a capacidade instalada passou de aproximadamente 24,4 GW para mais de 37 GW (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2024).

A expansão da energia solar também foi favorecida pela regulamentação da microgeração e da minigeração distribuída, iniciada com a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012, que permitiu aos consumidores gerar eletricidade a partir de fontes renováveis e participar do sistema de compensação de energia elétrica (ANEEL, 2012).

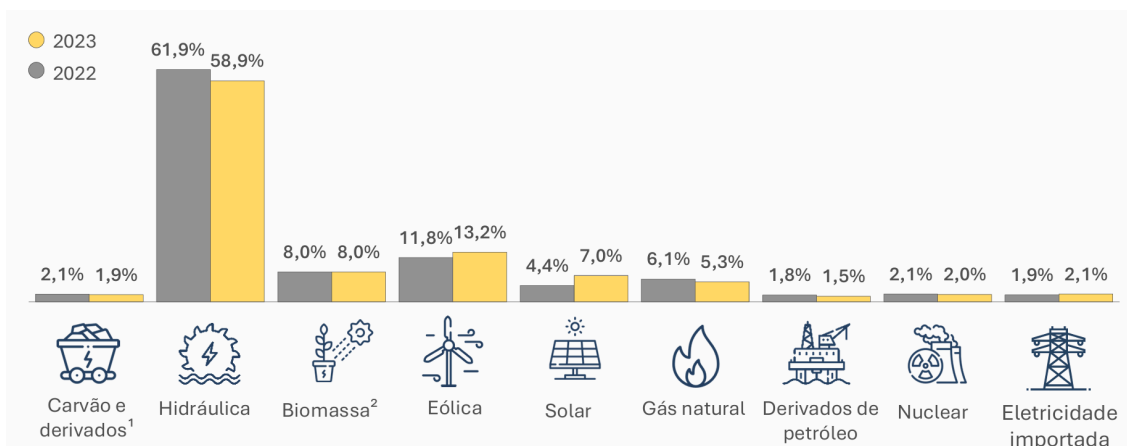


Figura 1 – Matriz elétrica brasileira em 2022 e 2023

Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2024).

Além da contribuição para a diversificação da matriz elétrica, a energia solar apresenta benefícios sociais e econômicos. Segundo a ABSOLAR (2023), o setor fotovoltaico gerou aproximadamente 240 mil empregos em 2023 e acumulou mais de 960 mil postos de trabalho desde 2012. Em áreas rurais e comunidades isoladas, os sistemas fotovoltaicos também podem ampliar o acesso à eletricidade e apoiar atividades produtivas locais (FRANCISCO et al., 2024).

Esses benefícios reforçam a importância da fonte solar para a transição energética. Entretanto, sua expansão deve ser acompanhada pela avaliação e pela gestão dos impactos ambientais associados à implantação das usinas e ao descarte dos módulos fotovoltaicos.

3. Metodologia

Esta seção apresenta os procedimentos adotados para a realização da revisão bibliográfica, incluindo o delineamento da pesquisa, as bases consultadas, os termos utilizados nas buscas, os critérios de inclusão e exclusão, as etapas de seleção dos trabalhos e a forma de organização e análise das informações. A descrição desses procedimentos busca conferir maior transparência ao processo de revisão e permitir a compreensão dos critérios empregados na composição do conjunto de estudos analisados.

3.1 Delineamento da pesquisa

Este estudo caracteriza-se como uma revisão bibliográfica narrativa, de abordagem qualitativa e caráter descritivo-analítico. A pesquisa foi conduzida por meio de procedimentos de busca, seleção, organização e síntese temática das publicações, com o objetivo de identificar os principais impactos ambientais associados à instalação e à operação de usinas fotovoltaicas e ao descarte dos módulos após o término de sua vida útil. A opção pela revisão narrativa decorreu da diversidade metodológica e temática dos estudos encontrados, que incluem análises de campo, estudos baseados em sensoriamento remoto, revisões bibliográficas e avaliações ambientais. Em razão dessa heterogeneidade, os resultados foram examinados por meio de síntese qualitativa e comparação entre os trabalhos, sem a aplicação de técnicas estatísticas de metanálise.

3.2 Estratégia de busca e critérios de seleção

As buscas foram realizadas em 2024, durante o desenvolvimento da pesquisa, nas plataformas Google Acadêmico, Portal de Periódicos CAPES e SciELO. Foram utilizadas combinações de termos em português e inglês, incluindo: “impactos dos painéis solares”, “impactos positivos e negativos”, “impactos econômicos”, “impactos ambientais”, “resíduos durante a produção de placas fotovoltaicas”, “*impacts of solar panels*” e “*environmental impacts*”.

Relatórios institucionais, documentos governamentais e legislação também foram consultados para contextualizar a expansão da energia solar, apresentar informações sobre a matriz elétrica e fundamentar a discussão relacionada à gestão de resíduos e às políticas públicas. Essas fontes foram utilizadas como apoio à fundamentação teórica, não integrando o conjunto de nove trabalhos submetidos à análise temática dos impactos ambientais.

Para a seleção das publicações, foram considerados os seguintes critérios de inclusão:

- a) trabalhos disponibilizados integralmente em português ou inglês;
- b) estudos publicados entre 2021 e 2023, intervalo correspondente às publicações selecionadas para a análise dos impactos ambientais;
- c) trabalhos que abordassem diretamente impactos ambientais relacionados à instalação ou à operação de usinas fotovoltaicas, ou ao descarte e à gestão dos resíduos provenientes de módulos fotovoltaicos;
- d) artigos científicos, trabalhos acadêmicos e capítulos técnico-científicos que apresentassem resultados, discussões ou revisões pertinentes aos objetivos da pesquisa.

Foram excluídos:

- a) trabalhos duplicados;
- b) publicações sem acesso ao texto completo;
- c) estudos restritos à eficiência energética, ao dimensionamento, ao desempenho técnico ou à viabilidade econômica dos sistemas fotovoltaicos, sem análise de impactos ambientais;
- d) estudos sobre fontes renováveis em geral que não apresentassem informações específicas sobre a energia solar fotovoltaica;
- e) notícias, textos de divulgação, páginas comerciais e documentos sem fundamentação técnico-científica.

A seleção dos trabalhos ocorreu em três etapas. Inicialmente, foram examinados os títulos das publicações identificadas. Em seguida, realizou-se a leitura dos resumos dos trabalhos potencialmente relacionados aos objetivos da pesquisa. Por fim, os estudos considerados pertinentes foram lidos integralmente. Ao término desse processo, nove trabalhos foram selecionados para compor o conjunto analisado, sendo cinco relacionados à instalação e à operação das usinas fotovoltaicas e quatro relacionados ao descarte dos módulos.

3.3 Organização das informações

Para cada trabalho selecionado, foram identificadas informações referentes ao título, ano de publicação, autoria, etapa analisada, impactos ambientais relatados, componentes

ambientais afetados e possíveis medidas de mitigação. A identificação dos estudos, os principais aspectos ambientais analisados e sua classificação temática foram organizados na Tabela 1.

Posteriormente, os resultados foram agrupados em dois eixos temáticos:

- a) impactos associados à instalação e à operação das usinas fotovoltaicas, abrangendo uso e ocupação do solo, retirada da vegetação, alterações na fauna e na biodiversidade, mudanças no microclima e na temperatura superficial, interferências nos recursos hídricos e alterações paisagísticas;
- b) impactos associados ao fim da vida útil e ao descarte dos módulos, abrangendo geração e acúmulo de resíduos, presença de materiais potencialmente tóxicos, contaminação do solo e da água, riscos à saúde pública e possibilidades de reciclagem e reaproveitamento dos materiais.

A análise foi realizada mediante comparação qualitativa entre os estudos selecionados, buscando identificar impactos recorrentes, resultados convergentes, diferenças de abordagem, possíveis medidas de mitigação e lacunas existentes na literatura.

Como limitação metodológica, o processo original de busca não preservou o número total de registros inicialmente recuperados nem a quantidade de publicações excluídas em cada etapa da seleção. Por esse motivo, o estudo não é apresentado como revisão sistemática e não utiliza fluxograma baseado em protocolos como o PRISMA. Ainda assim, a explicitação das bases consultadas, dos termos de busca, dos critérios de seleção, do número final de estudos e do procedimento de análise amplia a transparência do percurso metodológico adotado.

Tabela 1 – Caracterização dos estudos selecionados

Estudo	Principais Aspectos Analisados	Eixo Temático
Guimarães (2021)	Fauna, flora, cobertura vegetal, terraplanagem, recursos hídricos e resíduos	Instalação e operação das usinas
Gomes (2022)	Albedo, NDVI, temperatura superficial e saldo de radiação	Instalação e operação das usinas
Nascimento et al. (2022)	Impactos ambientais da implantação e do funcionamento de parques fotovoltaicos	Instalação e operação das usinas
Rahman, Farrok e Haque (2022)	Uso da terra, habitats, produtividade do solo e temperatura local	Instalação e operação das usinas
Nascimento e Dias (2022)	Poluição visual, paisagem, áreas agrícolas, fauna e flora	Instalação e operação das usinas
Silva, Penha e Santos (2021)	Resíduos, materiais potencialmente tóxicos e contaminação ambiental	Fim da vida útil e descarte dos módulos
Silva (2021)	Composição dos módulos e riscos do descarte inadequado	Fim da vida útil e descarte dos módulos
Pedroso, Santos e Pires (2023)	Crescimento do volume de resíduos e sobrecarga dos sistemas de disposição final	Fim da vida útil e descarte dos módulos
Góes et al. (2023)	Riscos toxicológicos, contaminação, reciclagem e reaproveitamento	Fim da vida útil e descarte dos módulos

4. Resultados e discussões

A análise dos nove estudos selecionados permitiu organizar os impactos ambientais da energia solar fotovoltaica em dois eixos principais: os efeitos associados à instalação e à operação das usinas e os impactos relacionados ao fim da vida útil e ao descarte dos módulos. De modo geral, os trabalhos convergem ao demonstrar que, embora a fonte fotovoltaica apresente benefícios para a transição energética, sua expansão pode provocar alterações ambientais relevantes quando não acompanhada de planejamento territorial, medidas de mitigação e gestão adequada dos resíduos.

Os cinco estudos relacionados à instalação e à operação das usinas concentram-se principalmente nas alterações do uso do solo, na retirada da cobertura vegetal, nos efeitos sobre a fauna e a flora, nas mudanças do microclima e nos impactos paisagísticos. Os quatro trabalhos relacionados ao descarte destacam a geração crescente de resíduos, a presença de materiais potencialmente tóxicos e os riscos de contaminação do solo e da água. Esses resultados são discutidos nas subseções seguintes.

4.1 Impactos associados à instalação e à operação de usinas fotovoltaicas

Os estudos analisados apresentam convergência quanto à relação entre a implantação de usinas fotovoltaicas e as modificações no uso e na ocupação do solo. Guimarães (2021), Rahman, Farrok e Haque (2022) e Nascimento e Dias (2022) destacam que a preparação das áreas pode envolver retirada da cobertura vegetal, terraplanagem, fragmentação de habitats e alteração das condições naturais do terreno. Como consequência, podem ocorrer perda de habitats, mudanças no comportamento das espécies, redução da biodiversidade e comprometimento da capacidade de regeneração da vegetação.

Apesar dessa convergência, os estudos enfatizam dimensões distintas do problema. Guimarães (2021) concentra-se nos efeitos locais da implantação, incluindo alterações na fauna, na flora, no lençol freático e na geração temporária de resíduos. Rahman, Farrok e Haque (2022), por sua vez, destacam a extensão territorial exigida pelos empreendimentos de grande porte e os possíveis efeitos sobre a produtividade do solo e sua recuperação após o encerramento da operação. Segundo esses autores, usinas de escala utilitária podem demandar entre 3,5 e 10 acres, correspondentes a aproximadamente 14.164 a 40.469 m².

Nascimento e Dias (2022) ampliam essa análise ao considerar também os impactos paisagísticos e as possíveis interferências sobre áreas agrícolas. Para os autores, a implantação de grandes conjuntos de módulos pode modificar a aparência do ambiente, provocar poluição visual e competir com outros usos da terra. Em áreas com potencial agrícola, essa ocupação pode reduzir a disponibilidade de terrenos destinados à produção de alimentos, evidenciando a necessidade de planejamento territorial prévio.

As alterações do microclima constituem outro resultado recorrente. Gomes (2022) analisou uma área antes e depois da instalação de uma usina fotovoltaica, considerando o albedo da superfície, o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), a Temperatura de Superfície Terrestre (TST) e o saldo de radiação. Os resultados indicaram aumento do albedo no interior da usina após sua implantação e redução expressiva do NDVI, principalmente durante o período chuvoso, quando as áreas externas apresentaram maior desenvolvimento da vegetação.

A Figura 2 apresenta a comparação dos valores de NDVI antes e após a instalação da usina, em períodos secos e chuvosos.

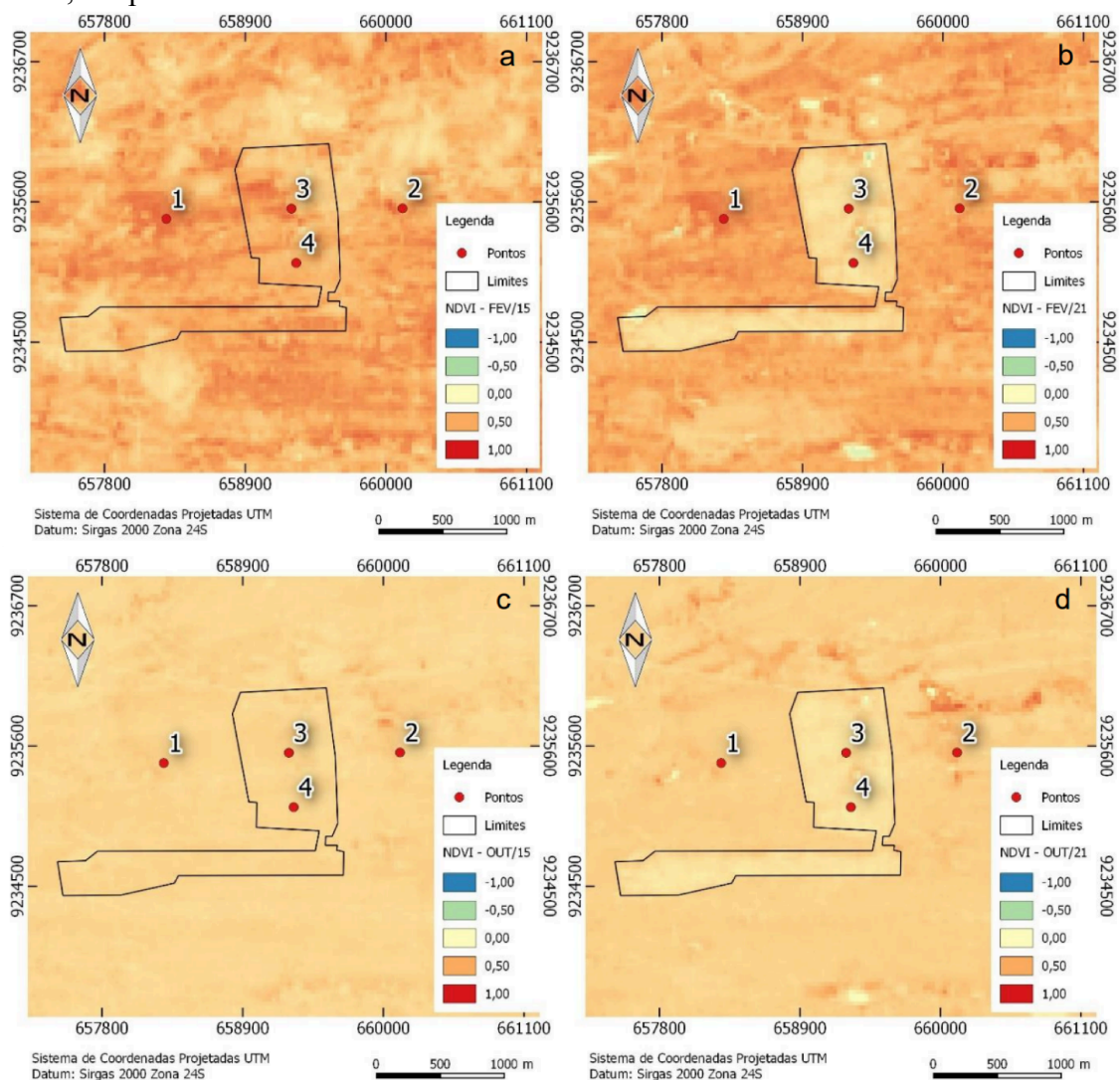


Figura - 2. Imagens Utilizadas para a Análise do NDVI da Região nos Meses de: a) 02/2015, b) 02/2021, c) 10/2015, d) 10/2021.

Fonte: Gomes (2022).

Durante o período seco, os valores de NDVI foram reduzidos tanto nas áreas internas quanto nas externas à usina, em razão da menor disponibilidade hídrica. No período chuvoso, entretanto, observou-se maior desenvolvimento da vegetação nas áreas externas, enquanto os valores no interior da usina permaneceram próximos de zero, indicando baixa ou inexistente cobertura vegetal.

Em relação à temperatura, Gomes (2022) verificou que, no período chuvoso, os pontos localizados no interior da usina apresentaram valores de TST até 5 °C superiores aos registrados nas áreas externas. No período seco, a diferença foi menos expressiva, pois tanto os módulos quanto o solo exposto apresentaram comportamento térmico semelhante. O estudo também identificou redução do saldo de radiação na área ocupada pela usina, com valores variando entre 390 e 750 W/m².

Esses resultados complementam as conclusões de Nascimento et al. (2022), que associam a substituição da vegetação por módulos fotovoltaicos às mudanças na

absorção e na reflexão da radiação solar, com possíveis efeitos sobre a temperatura e o microclima local. Embora os estudos utilizem métodos diferentes, há convergência quanto à influência da remoção da vegetação e da alteração das características da superfície sobre o balanço energético do ambiente.

A comparação entre os trabalhos demonstra que os impactos não se restringem à presença física dos módulos. A principal origem das alterações está frequentemente associada à transformação prévia da área, especialmente à retirada da vegetação, ao nivelamento do terreno e à modificação de sua cobertura. Dessa forma, os efeitos podem variar conforme o porte do empreendimento, as características climáticas e ecológicas da região, o uso anterior do solo e as medidas adotadas durante a implantação.

Os estudos também apresentam diferenças quanto ao nível de evidência. Gomes (2022) realizou uma análise quantitativa, baseada em dados de sensoriamento remoto e indicadores ambientais, enquanto Guimarães (2021), Nascimento et al. (2022) e Nascimento e Dias (2022) adotaram abordagens predominantemente qualitativas ou de síntese bibliográfica. Essa diversidade metodológica amplia a compreensão do problema, mas dificulta a comparação direta da magnitude dos impactos entre diferentes empreendimentos.

Uma lacuna identificada é a reduzida quantidade de estudos de acompanhamento de longo prazo que avaliem as condições ambientais antes, durante e após a operação das usinas. Também são limitadas as análises sobre a recuperação do solo e da vegetação após o descomissionamento, bem como sobre a influência de diferentes técnicas construtivas e práticas de manejo. Assim, os resultados indicam a necessidade de avaliações ambientais específicas para cada empreendimento, considerando as características locais e prevendo medidas de prevenção, monitoramento e recuperação das áreas afetadas.

4.2 Impactos associados ao fim da vida útil e ao descarte dos módulos fotovoltaicos

Os quatro estudos relacionados ao fim da vida útil dos módulos fotovoltaicos convergem ao apontar que o crescimento da geração solar deve ser acompanhado pelo planejamento da gestão dos resíduos. Embora os módulos permaneçam em operação por períodos relativamente longos, estimados pelos trabalhos revisados entre 20 e 25 anos, a expansão acelerada da capacidade instalada tende a resultar no aumento progressivo da quantidade de equipamentos retirados de serviço.

Silva, Penha e Santos (2021) e Silva (2021) destacam que os módulos fotovoltaicos são constituídos por diferentes materiais, incluindo vidro, alumínio, polímeros, silício, cobre e pequenas quantidades de outros metais. Quando descartados inadequadamente, os módulos podem sofrer degradação física e liberar componentes capazes de comprometer o solo, os recursos hídricos, a fauna e a flora.

Os estudos apresentam, entretanto, enfoques distintos. Silva, Penha e Santos (2021) concentram-se nos resíduos gerados durante a produção e o descarte dos módulos, enfatizando a necessidade de destinação adequada dos materiais. Silva (2021), por sua vez, amplia a discussão ao abordar os riscos relacionados à composição de diferentes tecnologias fotovoltaicas. Nos módulos de filme fino, por exemplo, podem estar presentes compostos de cádmio, como o telureto de cádmio, enquanto determinados componentes e conexões podem conter chumbo. A liberação desses elementos no

ambiente pode representar riscos toxicológicos e contribuir para a contaminação do solo e da água.

Góes et al. (2023) também destacam a diversidade de materiais presentes nos módulos, diferenciando os componentes metálicos dos não metálicos. O descarte direto representa não apenas um risco ambiental, mas também a perda de materiais com potencial de reaproveitamento, como vidro, alumínio, cobre, silício e polímeros. Segundo os autores, módulos abandonados ou dispostos em aterros podem ser submetidos à chuva, a variações de temperatura, a incêndios e à ação de gases corrosivos, favorecendo a degradação de seus componentes e o transporte de substâncias para o solo e para os recursos hídricos.

Pedroso, Santos e Pires (2023) concentram sua análise no crescimento futuro do volume de resíduos fotovoltaicos e na ausência de planejamento suficiente para sua destinação. Os autores ressaltam que, mesmo quando os materiais não apresentam elevada toxicidade, sua disposição em grande quantidade pode contribuir para a sobrecarga dos aterros e para o desperdício de recursos passíveis de recuperação.

A comparação entre os estudos demonstra que os impactos associados ao descarte não dependem apenas da quantidade de módulos retirados de operação. A magnitude dos riscos também varia conforme a tecnologia empregada, a composição dos equipamentos, o estado de conservação, as condições de armazenamento e a forma de destinação final. Portanto, não é adequado considerar todos os resíduos fotovoltaicos como ambientalmente equivalentes, uma vez que diferentes tipos de módulos apresentam composições e potenciais de contaminação distintos.

Outro ponto de convergência é que o descarte inadequado representa simultaneamente um problema ambiental e uma perda econômica. Parte significativa dos materiais utilizados nos módulos pode ser recuperada e reinserida em cadeias produtivas. A ausência de sistemas de coleta, triagem, tratamento e reciclagem reduz a possibilidade de reaproveitamento desses componentes e aumenta a necessidade de extração de novas matérias-primas.

Apesar de reconhecerem os riscos associados ao fim da vida útil dos módulos, os estudos revisados apresentam predominantemente abordagens bibliográficas. São limitadas as análises experimentais que quantificam a liberação de substâncias em diferentes condições de descarte, bem como os estudos que avaliam a eficiência técnica, econômica e ambiental dos processos de reciclagem em escala industrial.

Também foram identificadas lacunas relacionadas à realidade brasileira, especialmente quanto à estimativa regional da geração de resíduos, à rastreabilidade dos módulos instalados, à capacidade existente de reciclagem e à efetividade dos mecanismos de logística reversa. Essas limitações evidenciam a necessidade de planejamento antecipado, uma vez que os efeitos do crescimento atual do setor se tornarão mais evidentes à medida que os primeiros grandes volumes de módulos atingirem o fim de sua vida útil.

Assim, os resultados indicam que a redução dos impactos associados ao descarte depende da implementação de sistemas de gestão capazes de acompanhar os módulos desde sua comercialização até a destinação final. Entre as medidas necessárias destacam-se a logística reversa, o armazenamento adequado, a reciclagem, o reaproveitamento dos materiais e a definição clara das responsabilidades dos fabricantes, importadores, distribuidores, consumidores e agentes públicos.

4.3 Estratégias de mitigação, gestão de resíduos e políticas públicas

A mitigação dos impactos ambientais da energia solar fotovoltaica deve considerar tanto a implantação e a operação das usinas quanto o fim da vida útil dos módulos. Na primeira etapa, o planejamento territorial constitui uma medida essencial. Sempre que tecnicamente possível, devem ser priorizadas áreas já alteradas e evitadas regiões com vegetação nativa, habitats sensíveis, recursos hídricos vulneráveis ou elevado potencial agrícola. Também são recomendadas a redução da supressão vegetal e da terraplanagem, a preservação das áreas de drenagem, o controle da erosão e o monitoramento da fauna, da flora e do solo. Essas medidas respondem aos impactos sobre o uso da terra, os habitats e a paisagem apontados por Guimarães (2021), Rahman, Farrok e Haque (2022) e Nascimento e Dias (2022).

No fim da vida útil, os estudos convergem quanto à necessidade de evitar o abandono dos módulos ou sua destinação direta aos aterros. A implantação de sistemas de coleta, armazenamento, triagem, reutilização e reciclagem pode reduzir o volume de resíduos e os riscos de contaminação ambiental. Além disso, materiais como vidro, alumínio, cobre e silício apresentam potencial de recuperação e reinserção em cadeias produtivas (Silva, Penha e Santos, 2021; Silva, 2021; Góes et al., 2023).

A diversidade de tecnologias fotovoltaicas exige procedimentos diferenciados de desmontagem e tratamento, uma vez que a composição e o potencial de contaminação variam entre os módulos. Nesse contexto, a rastreabilidade dos equipamentos e a logística reversa são importantes para acompanhar os produtos desde sua comercialização até a destinação final e para definir as responsabilidades dos fabricantes, importadores, distribuidores e consumidores. Pedrosa, Santos e Pires (2023) ressaltam que a ausência desse planejamento pode contribuir para o aumento dos resíduos e para a sobrecarga dos sistemas de disposição final.

No Brasil, a Lei nº 12.305/2010, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos, estabelece princípios como redução, reutilização, reciclagem, tratamento, destinação ambientalmente adequada e responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos (Brasil, 2010). Entretanto, a aplicação desses princípios aos módulos fotovoltaicos ainda demanda mecanismos específicos de coleta, rastreamento, processamento e fiscalização.

De modo geral, a literatura revisada apresenta maior aprofundamento sobre os impactos do que sobre a efetividade das medidas de mitigação. Assim, a expansão da fonte solar deve ser acompanhada por planejamento ambiental, monitoramento dos empreendimentos, inovação tecnológica, logística reversa, reciclagem e políticas públicas capazes de assegurar a destinação adequada dos módulos.

5. Conclusões

A análise dos nove estudos selecionados demonstrou que a energia solar fotovoltaica, embora desempenhe papel relevante na transição para uma matriz elétrica de menor emissão de gases de efeito estufa, não é isenta de impactos ambientais. Os efeitos identificados concentram-se em duas etapas específicas: a instalação e a operação das usinas fotovoltaicas e o fim da vida útil e descarte dos módulos.

Na etapa de instalação e operação, os principais impactos estão associados à retirada da cobertura vegetal, à alteração do uso do solo, à fragmentação de habitats, às mudanças na fauna e na flora, aos efeitos sobre o microclima e às modificações paisagísticas. Os

estudos analisados indicam que parte significativa desses impactos decorre da transformação prévia da área destinada ao empreendimento, especialmente da supressão da vegetação, da terraplanagem e da alteração das características da superfície.

No fim da vida útil, os trabalhos destacam o aumento esperado da geração de resíduos, a presença de materiais potencialmente tóxicos e os riscos de contaminação do solo e da água quando os módulos são descartados de maneira inadequada. Além dos riscos ambientais, a disposição direta em aterros representa desperdício de materiais com potencial de recuperação, como vidro, alumínio, cobre e silício.

A comparação entre os estudos indica que a mitigação desses impactos depende da adoção integrada de medidas de planejamento territorial, técnicas construtivas de menor interferência ambiental, monitoramento dos empreendimentos, logística reversa, reutilização e reciclagem dos módulos. Também se destaca a necessidade de políticas públicas e mecanismos específicos que definam responsabilidades, assegurem a rastreabilidade dos equipamentos e viabilizem sua destinação ambientalmente adequada.

Como principal contribuição, este trabalho sistematizou evidências dispersas na literatura e apresentou uma análise comparativa dos impactos relacionados às etapas selecionadas, destacando convergências, diferenças de abordagem e lacunas de pesquisa. Entretanto, a revisão possui limitações decorrentes de seu caráter narrativo, do número restrito de estudos selecionados e da ausência de registro do total de publicações inicialmente recuperadas e excluídas durante o processo de busca.

Recomenda-se que pesquisas futuras realizem revisões sistemáticas com protocolos de seleção reprodutíveis, ampliem o número de bases consultadas e desenvolvam estudos de longo prazo sobre os efeitos ambientais das usinas antes, durante e após sua operação. Também são necessários estudos experimentais sobre a liberação de substâncias em diferentes condições de descarte, a viabilidade técnica e econômica da reciclagem e a efetividade dos sistemas de logística reversa no contexto brasileiro.

Conclui-se, portanto, que a expansão da energia solar fotovoltaica deve ser acompanhada por planejamento ambiental, inovação tecnológica e gestão adequada dos resíduos. A incorporação dessas medidas é essencial para que os benefícios energéticos, sociais e econômicos da fonte sejam alcançados com a redução dos impactos sobre os ecossistemas e os recursos naturais.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA – ABSOLAR. Energia solar se aproxima da marca de 1 milhão de empregos. 2023. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/noticias-externas/energia-solar-se-aproxima-da-marca-de-1-milhao-de-empregos/>. Acesso em: 8 ago. 2025.

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 e o Sistema de Compensação de Energia Elétrica. Brasília: ANEEL, 2012.

ARAÚJO, R.S.; SOUSA, F.L.N.; VANDERLEY, P.S.; BENTES, S.O.S.; GOMES, L.M. & FERREIRA, F.C.L. Fontes de energias renováveis: pesquisas, tendências e perspectivas sobre as práticas sustentáveis. Research, Society and Development, Vol. 11, n.11, e468111133893, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i11.33893.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial da União, Brasília, 3 ago. 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2007-2010/2010/lei/112305.htm. Acesso em: 12 ago. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. Balanço Energético Nacional 2024: relatório síntese, ano-base 2023. Rio de Janeiro: EPE, 2024. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-819/topico-715/BEN_S%C3%ADntese_2024_PT.pdf. Acesso em: 12 ago. 2025.

FRANCISCO, A.P.; ZORGETTE, A.J.; FERREIRA, G.M. & BUENO, M.P. Impactos da energia solar na área rural. Revista de Gestão e Secretariado, Vol. 15, n.7, e3542, 2024. DOI: 10.7769/gesec.v15i7.3542.

GÓES, P.F.; SOUSA FILHO, C.L.; SOUZA, D.A.; FERREIRA, E.; LOPES, V.A.J.; SILVA, M.S.; ALBUQUERQUE, É.L. & TANIMOTO, A.H. Resíduos de painéis solares fotovoltaicos: uma revisão dos impactos ambientais e toxicológicos. Revista de Gestão e Secretariado, Vol. 14, n.8, p.12528-12553, 2023. DOI: 10.7769/gesec.v14i8.2553.

GOMES, F.T. Impactos no microclima associados à substituição da vegetação natural por placas fotovoltaicas. Trabalho de Conclusão de Curso, Bacharelado em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Pombal, 2022.

GUIMARÃES, A.W. Placas fotovoltaicas: um estudo avaliativo dos impactos ambientais e econômico no IFPB – Campus Guarabira. Trabalho de Conclusão de Curso, Tecnologia em Gestão Comercial, Instituto Federal da Paraíba, Guarabira, 2021.

NASCIMENTO, L.C. & DIAS, M.J. Análise dos impactos visuais e arquitetônicos das usinas fotovoltaicas nos centros urbanos, bem como o comprometimento da fauna e da flora quando instaladas em propriedades rurais. CIPEEX, Vol. 3, n.1, p.1-7, 2022.

NASCIMENTO, M.G.; SOUZA, B.C.B.N.; MENEZES JÚNIOR, R.A.; CÂMARA, R.A.; FERNANDES, A.C.G. & MELLO, S.C. Impactos ambientais associados à instalação e ao funcionamento de parques solares: estudo de nível de interesse por análise cognitiva de dados Trend Data. Research, Society and Development, Vol. 11, n.13, e255111335265, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i13.35265.

PEDROSO, R.N.S.; SANTOS, L.R. & PIRES, R.C.S. Um futuro problema com o descarte de painéis solares. In: Construção civil: engenharia e inovação. Vol. 5. Rio de Janeiro: Epitaya, p.204-213, 2023. DOI: 10.47879/ed.ep.2023724p204.

RAHMAN, A.; FARROK, O. & HAQUE, M.M. Environmental impact of renewable energy source based electrical power plants: solar, wind, hydroelectric, biomass, geothermal, tidal, ocean, and osmotic. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 161, 112279, 2022. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112279.

SILVA, G.S.; PENHA, L.S. & SANTOS, W.C. Produção de painéis fotovoltaicos: avaliação dos impactos causados, resíduos gerados e a importância do descarte correto. Trabalho de Conclusão de Curso, Rede de Ensino Doctum, Serra, 2021.

SILVA, J.V.F.C. Resíduos de placas solares: uma revisão bibliográfica. Trabalho de Conclusão de Curso, Bacharelado Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Angicos, 2021.

SIMS, R.E.H.; ROGNER, H.H. & GREGORY, K. Carbon emission and mitigation cost comparisons between fossil fuel, nuclear and renewable energy resources for electricity generation. Energy Policy, Vol. 31, n.13, p.1315-1326, 2003. DOI: 10.1016/S0301-4215(02)00192-1.