

ESTRATÉGIAS DE ECONOMIA CIRCULAR EM PLACAS FOTOVOLTAICAS EM FIM DE VIDA: UMA REVISÃO DE LITERATURA

1 INTRODUÇÃO

O uso de energias renováveis pode auxiliar na redução da emissão de poluentes e no combate às mudanças climáticas (YANG; JAVANROODI; NIK, 2022). Neste sentido, o uso da energia solar fotovoltaica cresceu consideravelmente nos últimos anos causado por diversos motivos, mas, principalmente, pela diminuição nos preços dos painéis fotovoltaicos utilizados para a geração da energia (LI et al., 2023). Esta diminuição tem sido anualmente consecutiva desde o fim do Século XX e a projeção é de queda ainda maior para os anos seguintes, o que impulsionará ainda mais a geração de energia limpa (FELDMAN et al., 2014).

O Brasil possui um grande potencial para geração de energia fotovoltaica por conta do seu vasto território e da alta taxa de irradiação solar, portanto, torna-se necessária a adoção de mais incentivos governamentais para aumentar a utilização no país (CARSTENS; CUNHA, 2019). Deste modo, a Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022, transformou a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, e instituiu o Marco Legal da Microgeração e Minigeração Distribuída e o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (BRASIL, 2022), o que proporcionou o aumento no número de empreendimentos no setor de energia solar fotovoltaica, com foco na geração distribuída.

Este crescimento tem gerado preocupações por conta do futuro descarte irregular de painéis fotovoltaicos em fim de vida, pois a quantidade significativa de resíduos que será gerada pode gerar ameaças à saúde humana e ao meio ambiente (SICA et al., 2018). O tempo de vida útil usual de um painel solar é em torno de 25 a 30 anos e é esperado que a quantidade total de painéis fotovoltaicos em fim de vida atinja a marca de 9,57 milhões de toneladas até o ano de 2050 (CHOWDHURY et al., 2020). Portanto, uma gestão adequada do descarte destas tecnologias torna-se importante para criar um setor fotovoltaico sustentável (PAIANO, 2015).

Muitas empresas do setor ainda não passaram pelo processo de descarte de seus painéis fotovoltaicos vendidos. Segundo Greener (2023), 50% dos empreendimentos participantes de sua pesquisa relataram não possuir equipamentos quebrados ou danificados, conseqüentemente, ainda não há necessidade de descarte. Além disso, 68% desses negócios iniciaram suas atividades no mercado solar há pelo menos cinco anos, ou seja, grande parte dos módulos fotovoltaicos ainda não atingiu o tempo de vida útil usual.

Percebe-se então a importância de empresas do ramo fotovoltaico aderirem a uma gestão adequada de descarte destes equipamentos desde o presente momento. A Economia Circular (EC) surge como solução para os desafios de gestão de materiais em fim de vida, através de práticas como a reciclagem de módulos fotovoltaicos, além de possibilitar a redução da intensidade de materiais, energia e carbono na fabricação (MIRLETZ et al., 2024). Dessa forma, ao observar a atual e futura necessidade do descarte e tratamento correto dos painéis, o presente artigo tem como objetivo realizar uma revisão sistemática de literatura para investigar estratégias de Economia Circular aplicadas em placas fotovoltaicas em fim de vida, com o intuito de apresentar opções ao mercado fotovoltaico brasileiro, além de analisar o estado da arte em relação ao tema.

2 A ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E A ECONOMIA CIRCULAR

A eletricidade obtida diretamente da conversão de energia solar é chamada de energia solar fotovoltaica e ocorre através do efeito fotovoltaico, onde a luz do sol possui a função de fornecer uma quantidade de energia ao elétron mais externo do semicondutor para possibilitar que ele passe da banda de valência para a banda de condução do material, o que faz gerar a eletricidade (SAMPAIO; GONZÁLEZ, 2017).

Para a geração da energia elétrica acontecer, são utilizados módulos fotovoltaicos, um conjunto de células solares fotovoltaicas, que são instalados no local onde deseja-se produzir energia, como edifícios residenciais ou complexos industriais (AZEUMO et al., 2019). As células fotovoltaicas mais utilizadas no mercado podem ser divididas em três grupos, sendo eles: silício, filme fino e outros tipos variados de tecnologia; onde as células de silício são as mais usadas, seguidas por filme fino (CHOWDHURY et al., 2020). Dentro de cada grupo, existem tipos de células fotovoltaicas diferentes, apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 - Tipos de células fotovoltaica por grupo

Grupos	Silício	Filme Fino	Outros
Tipos	Monocristalino	Seleneto de cobre, índio e gálio	Orgânicas
	Policristalino	Telureto de cádmio	Células sensibilizadas por corantes
		Silício amorfo	Tecnologias de concentração solar

Fonte: Adaptado de Sica et al. (2018)

Estes painéis são compostos por diversos insumos durante seu processo de fabricação. Segundo Yu et al. (2022), os materiais gerais utilizados na fabricação das células de silício e de filme fino são:

- Silício: vidro, camada de laminação, espuma vinílica acetinada (EVA), células solares de silício, folha traseira de plástico, caixa de junção e moldura de alumínio;
- Filme fino: substrato de vidro, camada de óxido condutor transparente, camada de sulfeto de cádmio, camada de telureto de cádmio, camada de contato posterior, EVA e lamela de vidro.

Zubas et al. (2023) afirmam que a cadeia de suprimentos fotovoltaica atual utiliza o modelo linear, onde as matérias-primas são extraídas, utilizadas na fabricação e depois descartadas em aterros sanitários. Os autores também propõem que fechar os ciclos dentro das etapas de produção e após a vida útil do produto é uma maneira de implementar os princípios da Economia Circular dentro da indústria fotovoltaica, com o objetivo de reter o maior valor dos materiais de forma restaurativa. Segundo Tsanakas et al. (2020), entre as estratégias de Economia Circular na indústria fotovoltaica, a mais utilizada seria a reciclagem, mesmo que ainda em um nível mínimo. Outras estratégias como a reutilização, o reparo e/ou a reforma atualmente são informais e não são sistematizadas, muito menos padronizadas dentro do mercado fotovoltaico.

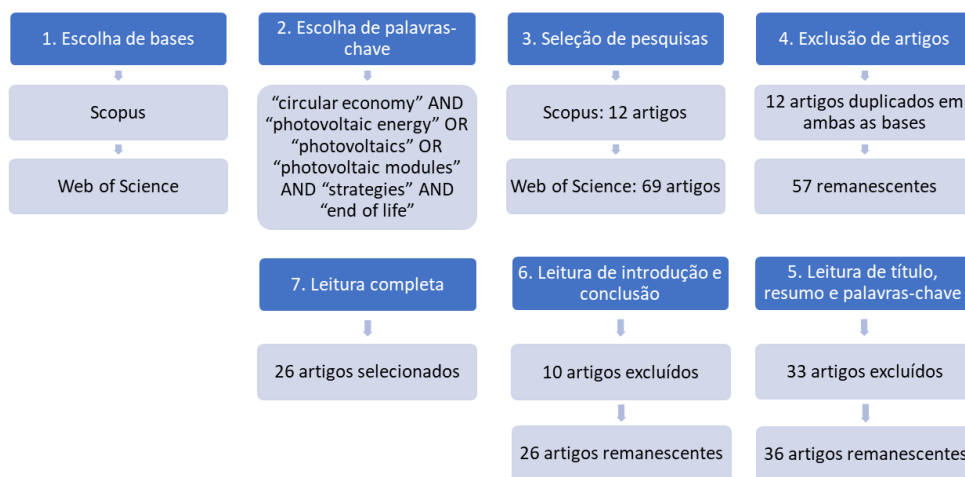
3 METODOLOGIA

Neste estudo foi conduzida uma revisão sistemática de literatura a fim de entender e analisar as estratégias circulares que são utilizadas em pesquisas e na indústria fotovoltaica em fim de vida. Portanto, foi necessário criar uma *string* de busca, onde foram utilizadas as palavras-chave “*circular economy*”, “*photovoltaic energy*”, “*photovoltaics*”, “*photovoltaic modules*”, “*strategies*” e “*end of life*” nas bases científicas Scopus e Web of Science. Entre artigos e revisões, foram selecionadas pesquisas publicadas no intervalo de tempo entre os anos de 2020 e 2024, a fim de manter a relevância com o que há de mais atual relacionado ao tema. Foram encontradas 12 pesquisas na base Scopus e 69 na Web of Science. 12 destas pesquisas

estavam duplicadas e foram excluídas, o que resultou em um total de 57 pesquisas para a primeira fase de revisão.

A primeira fase de revisão consistiu na leitura de título, resumo e palavras-chave de cada uma das 57 pesquisas. Deste total, 33 foram excluídas e 36 permaneceram para a segunda fase, que consistiu na leitura da introdução e da conclusão das pesquisas remanescentes. Nesta fase, apenas 26 permaneceram para a etapa de leitura completa. O esquema da pesquisa por artigos pode ser visualizado na Figura 1.

Figura 1 - Esquema da revisão sistemática de literatura



Fonte: Autores (2024)

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Assim como esta pesquisa, também foram encontradas outras pesquisas de revisão de literatura que buscam investigar estratégias circulares em placas fotovoltaicas. Nyffenegger et al. (2024) e Shaw et al. (2024) afirmam que a reinserção de subprodutos, a digitalização da cadeia de valor, a preparação para reutilização, a reciclagem e a recuperação de materiais, a manutenção e o gerenciamento das placas fotovoltaicas de silício e filme fino em fim de vida, atualmente, são utilizadas ao redor do mundo.

Dentro de cada estratégia, é preciso também analisar os impactos ambientais e econômicos, a fim de manter a sustentabilidade. Utilização de caminhão elétrico em vez do sistema de transporte convencional, pirólise em vez de incineração e uso de sistemas de energia renovável para consumo elétrico para melhorar o desempenho geral da estratégia de tratamento dos produtos em fim de vida seriam algumas das estratégias que atendem a este objetivo (MAHMOUDI, HUDA E BEHNIA; 2020).

A maioria dos estudos de revisão foca no processo de reciclagem. Ndalloka et al. (2024) afirmam que a reciclagem fotovoltaica é a opção mais viável para gerenciar resíduos fotovoltaicos e Mahmoudi, Huda e Behnia (2021) mostram que materiais fotovoltaicos reciclados têm o potencial de serem empregados na mesma indústria ou em indústrias diferentes, como a da manteiga, da construção civil e de ladrilhos cerâmicos.

Tecnologias existentes de reciclagem de energia fotovoltaica focam nas áreas de desmontagem, delaminação, extração de material e recuperação ou purificação (CHEEMA et al., 2024). A dissolução de solventes de materiais ativos para redeposição dentro de estruturas de eletrodos mesoporosos retidos se apresenta como uma estratégia viável para o futuro tratamento comercial de fim de vida (CHARLES et al., 2023). No entanto, é percebido na

literatura a falta de incentivos para o uso destas tecnologias de recuperação (THOMASSEN, DEWULF E PASSEL; 2022).

Neste sentido, Heath et al. (2022) alertam para a necessidade de expansão da pesquisa além da reciclagem, apoio à implantação de tecnologias com análises econômicas, ambientais e políticas, desenvolvimento de sistemas de informação digital, melhoramento nas tecnologias de reciclagem e maiores estudos e projetos de aspectos relacionados à Economia Circular dos mercados de placas fotovoltaicas.

Uma quantidade considerável de pesquisas aplicadas em estratégias de reciclagem de módulos fotovoltaicos foi percebida e pode ser visualizada no Quadro 2.

Quadro 2 – Estudos sobre reciclagem fotovoltaica

Título	Material reciclado	Tipo de placa fotovoltaica
Pyrolysis mechanism and recycling strategy of end-of-life photovoltaic modules based on the experiment and the density functional theory	EVA	Silício
Generating metal-organic frameworks (MOFs) from photovoltaic modules for wastewater remediation	Folha traseira, vidro, cobre, prata, alumínio e silício	Silício e Filme fino
c-Si PV module recycling: Analysis of the use of a mechanical pre-treatment to reduce the environmental impact of thermal treatment and enhance materials recovery		
Catalytic recovery of metals from end-of-life polycrystalline silicon photovoltaic cells: Experimental insights into silver recovery	Prata	Silício
Sustainable Recycling of Selenium-Based Optoelectronic Devices	Selênio	Filme fino
Photovoltaic recycling: enhancing silicon wafer recovery process from damaged solar panels	Silício	Silício
Remanufacturing end-of-life silicon photovoltaics: Feasibility and viability analysis		
High-performance silicon carbon anodes based on value-added recycling strategy of end-of-life photovoltaic modules		
A systematically integrated recycling and upgrading technology for waste crystalline silicon photovoltaic module		
Monocrystalline Silicon Wafer Recovery Via Chemical Etching from End-of-Life Silicon Solar Panels for Solar Cell Application		
Purification of silicon from waste photovoltaic cells and its value-added application in lithium-ion batteries		
Validation of recycling processes for demetallisation and recrystallisation of silicon solar cells		
Recovery of crystalline silicon from waste solar cells by a green deep eutectic solvent-hydrogen peroxide system	Vários materiais	Silício
Technoeconomic analysis of high-value, crystalline silicon photovoltaic module recycling processes		
Experimental, economic and life cycle assessments of recycling end-of-life monocrystalline silicon photovoltaic modules	Vidrio	Filme fino
Extraction and analysis of TCO coated glass from waste amorphous silicon thin film solar module		Silício
Life Cycle Assessment of Luminescent Solar Concentrators Integrated into a Smart Window		

Fonte: Autores (2024)

17 pesquisas, equivalente a 65% do total analisado, debatem a viabilidade e a aplicação da reciclagem de materiais presentes nos módulos fotovoltaicos, como silício, vidro, EVA e folha traseira, a fim de gerarem a destinação correta destes materiais e contribuir para a re inserção dentro da cadeia de suprimentos, seja ela a fotovoltaica ou não. Por esta razão, o processo de reciclagem pode ser considerado o mais utilizado dentro da Economia Circular. Além disso, percebe-se que a maioria destas pesquisas são adotadas em placas fotovoltaicas de silício, visto que são as mais utilizadas no mercado, como constatado por Chowdhury et al. (2020).

Desta forma, é possível afirmar que a estratégia circular mais adequada ao mercado fotovoltaico brasileiro é a reciclagem das peças que compõem os módulos em fim de vida, visto que é a prática mais utilizada e estudada dentro da literatura e já possui diretrizes para a sua

aplicação na indústria e nas placas mais utilizadas no mercado. A reciclagem pode auxiliar no problema do descarte irregular dos painéis, apoiar empresas a atingirem metas de sustentabilidade e contribuir com a reinserção dos materiais recuperados dentro da própria cadeia de suprimentos fotovoltaica, o que gera benefícios econômicos e ambientais para as partes interessadas. Além disso, a digitalização da cadeia de valor e a manutenção e o gerenciamento das placas fotovoltaicas em utilização são opções que podem auxiliar no alcance da Economia Circular, mesmo que ainda pouco estudadas.

Pode-se afirmar também que nos últimos cinco anos houve uma discussão relevante sobre o assunto dentro da literatura, o que evidencia o aumento do uso da energia fotovoltaica e da Economia Circular. No entanto, apesar de crescente, a quantidade de pesquisas sobre este tópico ainda é considerada baixa, principalmente no Brasil, onde foi identificado apenas um artigo dentro da revisão, além da perceptível falta de pesquisas sobre outras estratégias circulares que vão além da reciclagem, assim como apontado por Tsanakas et al. (2020). Portanto, é necessário o constante estudo sobre o tema, com foco nas demais estratégias circulares, visto que o problema do descarte de placas fotovoltaicas é cada vez mais atual.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

É possível dizer que este artigo atingiu seu objetivo de pesquisa, ao apresentar as estratégias de Economia Circular utilizadas para o tratamento de painéis fotovoltaicos em fim de vida, a fim de auxiliar as empresas do ramo a gerenciarem o descarte destes equipamentos no futuro próximo. Além das estratégias mais utilizadas, esta pesquisa também apresentou as lacunas dentro da literatura, principalmente em relação a falta de estudos referentes a outras estratégias circulares que não sejam a reciclagem. Para estudos futuros, é recomendado o aumento no número de bases científicas da revisão sistemática, com o propósito de encontrar uma quantidade maior de estratégias circulares aplicadas e em estudo na indústria.

REFERÊNCIAS

- AZEUMO, M. F. et al. Photovoltaic module recycling, a physical and a chemical recovery process. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, [s. l.], v. 193, n. July 2018, p. 314–319, 2019.
- BRASIL. Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022. Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS). **Diário Oficial da União**, p. 1–11, 2022.
- CAMARGO, P. S. S. et al. c-Si PV module recycling: Analysis of the use of a mechanical pre-treatment to reduce the environmental impact of thermal treatment and enhance materials recovery. **Waste Management & Research**. v. 41, n. 11, p. 1661-1673, 2023.
- CARSTENS, D. D. dos S.; CUNHA, S. K. da. Challenges and opportunities for the growth of solar photovoltaic energy in Brazil. **Energy Policy**, [s. l.], v. 125, n. February 2018, p. 396–404, 2019.
- CHARLES, R. G. et al. Circular economy for perovskite solar cells - drivers, progress and challenges. **Energy & Environmental Science**. v. 16, n. 9, p. 3711-3733, 2023.
- CHEEMA, H. A. et al. Comprehensive review of the global trends and future perspectives for recycling of decommissioned photovoltaic panels. **Waste Management**. v. 174, p. 187-202, 2024.
- CHOWDHURY, M. S. et al. An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling. **Energy Strategy Reviews**, [s. l.], v. 27, p. 100431, 2020.
- CUI, H. et al. Technoeconomic analysis of high-value, crystalline silicon photovoltaic module recycling processes. **Solar Energy Materials and Solar Cells**. v. 238, 2022.
- DENG, R. Remanufacturing end-of-life silicon photovoltaics: Feasibility and viability analysis. **Progress in Photovoltaics**. v. 29, n. 7, p. 760-774, 2020.
- FELDMAN, D. et al. Behind the PV price declines. **Renewable Energy Focus**, [s. l.], v. 15, n. 6, p. 14–15, 2014.
- GREENER. **Estudo Estratégico: Geração Distribuída 2023 | Dados do 1º semestre 2023 / Setembro 2023**. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.greener.com.br/estudo/estudo-estrategico-geracao-distribuida-setembro-2023-dados-do-1o-semester-2023/>. Acesso em: 12 out. 2023.
- HEATH, G. A. et al. A critical review of the circular economy for lithium-ion batteries and photovoltaic modules – status, challenges, and opportunities. **Journal of the Air & Waste Management Association**. v. 72, n. 6, p. 478-539, 2022.

KEERTHIVASAN, T. et al. Photovoltaic recycling: enhancing silicon wafer recovery process from damaged solar panels. **Journal of Materials Science-Materials in Electronics**. v. 35, n. 12, 2024.

LI, Y. et al. Energy–Environment–Economy (3E) Analysis of the Performance of Introducing Photovoltaic and Energy Storage Systems into Residential Buildings: A Case Study in Shenzhen, China. **Sustainability (Switzerland)**, [s. l.], v. 15, n. 11, 2023.

LIAO, Q. et al. High-performance silicon carbon anodes based on value-added recycling strategy of end-of-life photovoltaic modules. **Energy**. v. 281, 2023.

LIM, M. S. W. et al. Experimental, economic and life cycle assessments of recycling end-of-life monocrystalline silicon photovoltaic modules. **Journal of Cleaner Production**. v. 340, 2022.

MAHMOUDI, S.; HUDA, N.; BEHNIA, M. Environmental impacts and economic feasibility of end of life photovoltaic panels in Australia: A comprehensive assessment. **Journal of Cleaner Production**. v. 260, 2020.

MAHMOUDI, S.; HUDA, N.; BEHNIA, M. Multi-levels of photovoltaic waste management: A holistic framework. **Journal of Cleaner Production**. v. 294, 2021.

MIRLETZ, H. et al. Prioritizing circular economy strategies for sustainable PV deployment at the TW scale. **EPJ Photovoltaics**, [s. l.], v. 15, n. 18, 2024.

MUTERI, V. et al. Life Cycle Assessment of Luminescent Solar Concentrators Integrated into a Smart Window. **Energies**. v. 16, n. 4, 2023.

NDALLOKA, Z. N. et al. Solar photovoltaic recycling strategies. **Solar Energy**. v. 270, 2024.

NYFFENEGGER, R. et al. How circular is the European photovoltaic industry? Practical insights on current circular economy barriers, enablers, and goals. **Journal of Cleaner Production**. v. 448, 2024.

PAIANO, A. Photovoltaic waste assessment in Italy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 41, p. 99–112, 2015.

PHAM, H. K. et al. Generating metal-organic frameworks (MOFs) from photovoltaic modules for wastewater remediation. **Journal of Environmental Chemical Engineering**. v. 10, n. 5, 2022.

PREETI; KUMAR, S. Extraction and analysis of TCO coated glass from waste amorphous silicon thin film solar module. **Solar Energy Materials and Solar Cells**. v. 253, 2023.

RAJI, M. et al. Monocrystalline Silicon Wafer Recovery Via Chemical Etching from End-of-Life Silicon Solar Panels for Solar Cell Application. **Silicon**. 2024.

SAMPAIO, P. G. V.; GONZÁLEZ, M. O. A. Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 74, n. February, p. 590–601, 2017.

SICA, D. et al. Management of end-of-life photovoltaic panels as a step towards a circular economy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 82, n. December 2016, p. 2934–2945, 2018.

SHAW, S. L. et al. A circular economy roadmap for solar photovoltaics. **Solar Energy**. v. 276, 2024.

TAO, R. et al. Pyrolysis mechanism and recycling strategy of end-of-life photovoltaic modules based on the experiment and the density functional theory. **Polymer Degradation and Stability**. v. 217, 2023.

THOMASSEN, G.; DEWULF, J.; PASSEL, S. V. Prospective material and substance flow analysis of the end-of-life phase of crystalline silicon-based PV modules. **Resources Conservation and Recycling**. 2022.

TIERNO, M. et al. Validation of recycling processes for demetallisation and recrystallisation of silicon solar cells. **Solar Energy**. v. 274, 2024.

Tsanakas et al. Towards a circular supply chain for PV modules: Review of today's challenges in PV recycling, refurbishment and re-certification. **Wiley Progress in Photovoltaics**. v. 28, n. 6, p. 454-464, 2020,

WANG, X. et al. Sustainable Recycling of Selenium-Based Optoelectronic Devices. **Sustainability**. v. 16, n. 13, 2024.

XU, X. et al. A systematically integrated recycling and upgrading technology for waste crystalline silicon photovoltaic module. **Resources Conservation and Recycling**. v. 182, 2022.

YANG, R. et al. Recovery of crystalline silicon from waste solar cells by a green deep eutectic solvent-hydrogen peroxide system. **Green Chemistry**. v. 26, n. 12, p. 7246-7257, 2024.

YANG, Y.; JAVANROODI, K.; NIK, V. M. Climate Change and Renewable Energy Generation in Europe—Long-Term Impact Assessment on Solar and Wind Energy Using High-Resolution Future Climate Data and Considering Climate Uncertainties. **Energies**, [s. l.], v. 15, n. 1, 2022.

YASHAS, S. R. et al. Catalytic recovery of metals from end-of-life polycrystalline silicon photovoltaic cells: Experimental insights into silver recovery. **Waste Management**. v. 171, p. 184-194, 2023.

YU, H. F. et al. Global Challenges and Prospects of Photovoltaic Materials Disposal and Recycling: A Comprehensive Review. **Sustainability (Switzerland)**, [s. l.], v. 14, n. 14, 2022.

ZHANG, Z. et al. Purification of silicon from waste photovoltaic cells and its value-added application in lithium-ion batteries. **New Journal of Chemistry**. v. 46, n. 24, p. 11788-11796, 2022.

Zubas et al. Combining circularity and environmental metrics to assess material flows of PV silicon. **EPJ Photovoltaics**. v. 14, n. 10, 2023.