

ECONOMIA CIRCULAR NA FOTOVOLTAICA: UMA ANÁLISE DAS REGULAMENTAÇÕES GLOBAIS E SUAS IMPLICAÇÕES NO BRASIL

 <https://doi.org/10.56238/arev6n3-080>

Data de submissão: 08/10/2024

Data de publicação: 08/11/2024

Álvaro Guilherme Rocha

Mestre em Gestão Organizacional pela Universidade Federal de Catalão

Universidade Federal de Catalão/GO

E-mail: alvaro@discente.ufcat.edu.br

Orcid: <https://orcid.org/0009-0005-2948-8091>

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/4021849906910249>

André Barra Neto

Doutor em Administração pela Universidade Federal de São Paulo

Universidade Federal de Catalão/GO

E-mail: andrebarra@ufcat.edu.br

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-4134-323X>

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/7045210393263735>

RESUMO

Com a expansão do mercado o volume de resíduos gerados por esse setor também está em crescimento. Entretanto, em diversos países, as regulamentações para o gerenciamento desses resíduos no final de sua vida útil ainda são inadequadas, em parte porque a quantidade de módulos solares descartados até agora tem sido relativamente baixa. Este estudo revisa a cadeia de valor da energia solar fotovoltaica, focando na análise de regulamentações voltadas para a gestão de resíduos fotovoltaicos ao final de sua vida útil, tanto em âmbito nacional quanto internacional. Para isso, foi realizada uma revisão bibliométrica que analisou 654 artigos revisados por pares, publicados em inglês. Os resultados oferecem um panorama das regulamentações e normas globais aplicadas ao tratamento de resíduos fotovoltaicos, proporcionando informações úteis para empreendedores e formuladores de políticas públicas na avaliação de futuras tecnologias fotovoltaicas e na criação de diretrizes para a gestão desses resíduos.

Palavras-chave: Energia solar fotovoltaica, Economia circular, Resíduos fotovoltaicos.

1 INTRODUÇÃO

A indústria fotovoltaica global apresentou um crescimento constante nos últimos dez anos, com uma taxa média anual de 26,5% entre 2012 e 2021. Esse aumento resultou em uma produção aproximada de 1 TWh, correspondendo a 3,6% da geração total de energia elétrica no mundo (Bezerra, 2022; Maka & Alabid, 2022). Estima-se que em 2030 a capacidade global possa alcançar 2.840 GW, enquanto em 2050 poderá alcançar 8.500 GW (IRENA, 2016). Este cenário reflete a importância crescente da energia solar fotovoltaica na matriz energética mundial.

No Brasil, observa-se uma clara expansão da energia solar fotovoltaica. A Resolução Normativa n.º 482, publicada em 17 de abril de 2012 pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), deu um impulso relevante ao setor. Até maio de 2023, a capacidade instalada de energia solar fotovoltaica no país atingiu 28,9 GW, representando 13,1% da matriz energética nacional (ABSOLAR, 2023). Esse crescimento destaca a importância estratégica da energia solar no contexto brasileiro.

Porém, o aumento da capacidade instalada vem acompanhado de uma preocupação crescente com a gestão dos resíduos gerados por esses sistemas. Com a obsolescência e falhas nas instalações, estima-se que, entre 2030 e 2050, de 60 a 78 milhões de toneladas de resíduos de módulos fotovoltaicos serão descartados em aterros ao redor do mundo (Franco & Groesser, 2021). Esse volume de resíduos ressalta a necessidade urgente de desenvolver soluções eficazes para a gestão desse material.

A União Europeia (UE), ciente dos potenciais impactos ambientais dos resíduos fotovoltaicos, foi pioneira ao implementar a Diretiva de Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (WEEE), estabelecendo regulamentações específicas para o tratamento desses resíduos. A diretiva exige que os Estados-Membros apresentem relatórios sobre a projeção de resíduos fotovoltaicos e implementem regulamentações adicionais para resíduos sólidos (Kim & Park, 2018). Essas iniciativas visam orientar a indústria fotovoltaica em direção a um ciclo de vida circular.

No Brasil, o avanço na gestão de resíduos sólidos foi consolidado com a instituição do Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PLANARES), através do Decreto n.º 11.043, de 13 de abril de 2022. Esse plano estabelece diretrizes e metas para a gestão de resíduos sólidos ao longo das próximas duas décadas. Contudo, o PLANARES ainda não contempla diretrizes específicas para o tratamento de resíduos fotovoltaicos, o que evidencia uma lacuna na política ambiental do país.

Diante desse cenário, este estudo se propõe a realizar uma revisão bibliométrica para analisar o funcionamento atual da cadeia de valor fotovoltaica e as políticas públicas adotadas em países líderes na gestão de resíduos fotovoltaicos. O objetivo é fornecer subsídios para uma transição informada da indústria fotovoltaica brasileira para uma economia circular, alinhando-se às melhores práticas internacionais.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A compreensão do desenvolvimento, fabricação, venda e gerenciamento ao longo da vida útil dos sistemas fotovoltaicos requer uma análise da cadeia de valor, conforme destacado por Franco e Groesser (2021). A introdução do conceito de processo circular por Abdala e Sampaio (2018) apresenta-se como uma rede de relações de produção dentro de um sistema, exercendo influência direta ou indireta na existência independente e simultânea de todos os elementos que compõem os diversos grupos reproduzíveis, de maneira independente dos sistemas de reprodução.

Dessa maneira, a economia circular tem como propósito viabilizar um aproveitamento e reaproveitamento sistemático e ideal de produtos industrializados, abrangendo tanto bens duráveis quanto não duráveis. Essa abordagem engloba desde a fase inicial de concepção do projeto até além da sua reutilização, contemplando assim todo o ciclo de vida útil do produto.

Diante da crescente deterioração ambiental e da crise energética global, torna-se imprescindível o desenvolvimento de tecnologias de energia limpa e renovável. Nesse contexto, a energia fotovoltaica apresenta-se como uma das alternativas mais sustentáveis e promissoras para a geração de energia.

A energia solar fotovoltaica experimentou um notável aumento em sua capacidade, registrando um acréscimo significativo de 191.450 MW (IRENA, 2022). A China destaca-se como líder mundial, apresentando a maior potência instalada para geração de energia solar (De Souza Ribeiro Filho et al., 2022), com um total de 392 GW. Somente em 2021, foram adicionados 150 GW, e projeta-se uma média de adições anuais de 210 GW durante o período de 2022 a 2030 (IRENA, 2022).

Em 2016, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) projetava que o Brasil teria uma capacidade instalada de 25 GW em energia solar até 2030. Entretanto, em uma revisão recente dessas projeções, a EPE atualizou a estimativa, prevendo que o país alcançará 45,27 GW em capacidade instalada até 2031 (EPE, 2022). Esses números refletem não apenas o crescimento notável do setor no Brasil, mas também sua posição cada vez mais relevante no cenário global de energia solar.

Na indústria fotovoltaica, os módulos solares e os sistemas de armazenamento de energia contêm materiais que podem ser prejudiciais ao meio ambiente, tornando essencial a implementação de uma gestão eficaz para o fim de vida dessas tecnologias. Essa estratégia busca não apenas mitigar os impactos ambientais, mas também evitar a escassez de materiais críticos, garantindo que as futuras demandas de recursos sejam atendidas de forma sustentável (Dos Santos et al., 2022).

Conforme os princípios estabelecidos pela Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), os fabricantes são responsáveis por acompanhar seus produtos durante todo o ciclo de vida, assumindo tanto obrigações ambientais quanto econômicas. Assim, é fundamental que o setor fotovoltaico adote uma abordagem de economia circular, especialmente com a contínua expansão

da capacidade fotovoltaica instalada globalmente. Esse crescimento leva a um aumento considerável no número de módulos fotovoltaicos desativados (Sica et al., 2018).

Essas abordagens exigem transformações em toda a cadeia de valor, desde a produção até a implementação de novas formas de converter resíduos em recursos. Simultaneamente, elas contribuem para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), ao propor medidas para o uso sustentável dos recursos naturais e a reciclagem de resíduos, promovendo a inovação e gerando retornos financeiros desejáveis, além de benefícios econômicos mais amplos (Gil-Lamata & Latorre-Martínez, 2022).

Países líderes em capacidade instalada de fonte solar, como Itália, Austrália e Coreia do Sul, não possuem legislações específicas para o gerenciamento do fim da vida útil dos módulos solares fotovoltaicos, limitando-se a legislações gerais de resíduos (Majewski et al., 2023). Por outro lado, a União Europeia (UE), reconhecendo o possível impacto ambiental dos resíduos fotovoltaicos, estabeleceu diretrizes para os Estados-Membros.

Nessas diretrizes, a responsabilidade pelo descarte e reciclagem dos módulos fotovoltaicos é atribuída aos fabricantes. Além disso, os Estados-Membros devem estimar e enviar relatórios à Comissão Europeia sobre a quantidade de resíduos fotovoltaicos (Kim, Park, 2018). A UE também determina que os fabricantes rotulem os equipamentos para informar aos usuários que os produtos devem ser reciclados no final do ciclo de vida. De acordo com Ritzen et al. (2016), todos os Estados-Membros da UE adaptaram a Diretiva WEEE às suas legislações nacionais, implementando regulamentos específicos para cada país.

No Brasil, o gerenciamento de resíduos fotovoltaicos ainda carece de regulamentação específica e segue as diretrizes da Política Nacional de Resíduos Sólidos, que os enquadra na categoria de resíduos eletroeletrônicos. Segundo Konzen e Pereira (2020), a Política Nacional de Resíduos Sólidos de 2010 define como destinação final ambientalmente adequada para resíduos sólidos as práticas de reutilização, reciclagem e compostagem. Além disso, o documento legislativo aborda conceitos fundamentais, como ciclo de vida, logística reversa, responsabilidade compartilhada, desenvolvimento sustentável e princípios de prevenção e precaução. Destaca-se a relevância desses conceitos na gestão ambientalmente responsável dos resíduos no país. Essa abordagem visa promover práticas que minimizem os impactos ambientais, fomentando a sustentabilidade e a responsabilidade na gestão dos resíduos fotovoltaicos no contexto brasileiro.

A reutilização de módulos solares está sendo abordada na Austrália, embora em um mercado ainda pequeno. Acredita-se que haverá uma escalada e desenvolvimento da economia circular para o setor de energia solar. Conforme destacado por Majewski et al. (2023), seria necessário estabelecer

uma certificação para os módulos solares com o propósito de garantir que atendam aos requisitos de segurança e desempenho. Essa certificação deve possibilitar o rastreamento dos módulos solares e estabelecer diretrizes para a legislação de fim de vida.

Na Coreia do Sul, os resíduos fotovoltaicos são categorizados como resíduos industriais. No entanto, a geração desses resíduos não está sendo acompanhada pelo governo, e não existem estimativas ou cronogramas para os módulos solares ao alcançarem o fim do ciclo de vida (Kim & Park, 2018). A discussão sobre o assunto no país é recente, tendo sido estabelecido em 2016 que as entidades responsáveis pelo descarte de resíduos industriais devem gerenciar esses resíduos de maneira adequada, buscando reduzir sua quantidade mediante a construção de instalações especializadas na redução de resíduos. Em 2017, o governo sul-coreano inaugurou uma instalação destinada à reciclagem de resíduos fotovoltaicos na província de Chungcheong do Norte.

Conforme Gautam et al. (2021), a Índia não possui regulamentos específicos para o descarte de resíduos fotovoltaicos, utilizando as diretrizes do MNRE. Essas diretrizes afirmam que os fabricantes devem garantir que os resíduos fotovoltaicos sejam descartados conforme as regras do 'E-waste (Management and Handling) Rules'. No entanto, os autores apontam que a Índia, em 2019, conseguia lidar com apenas 22% do total de lixo eletrônico gerado no país.

Assim, torna-se evidente a relevância de analisar os impactos na economia circular dos resíduos fotovoltaicos, considerando que já estão sendo tratados em diversos países. No entanto, no Brasil, o tema ainda é incipiente, não havendo legislação própria e fiscalização para gerenciar a cadeia circular da indústria fotovoltaica.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

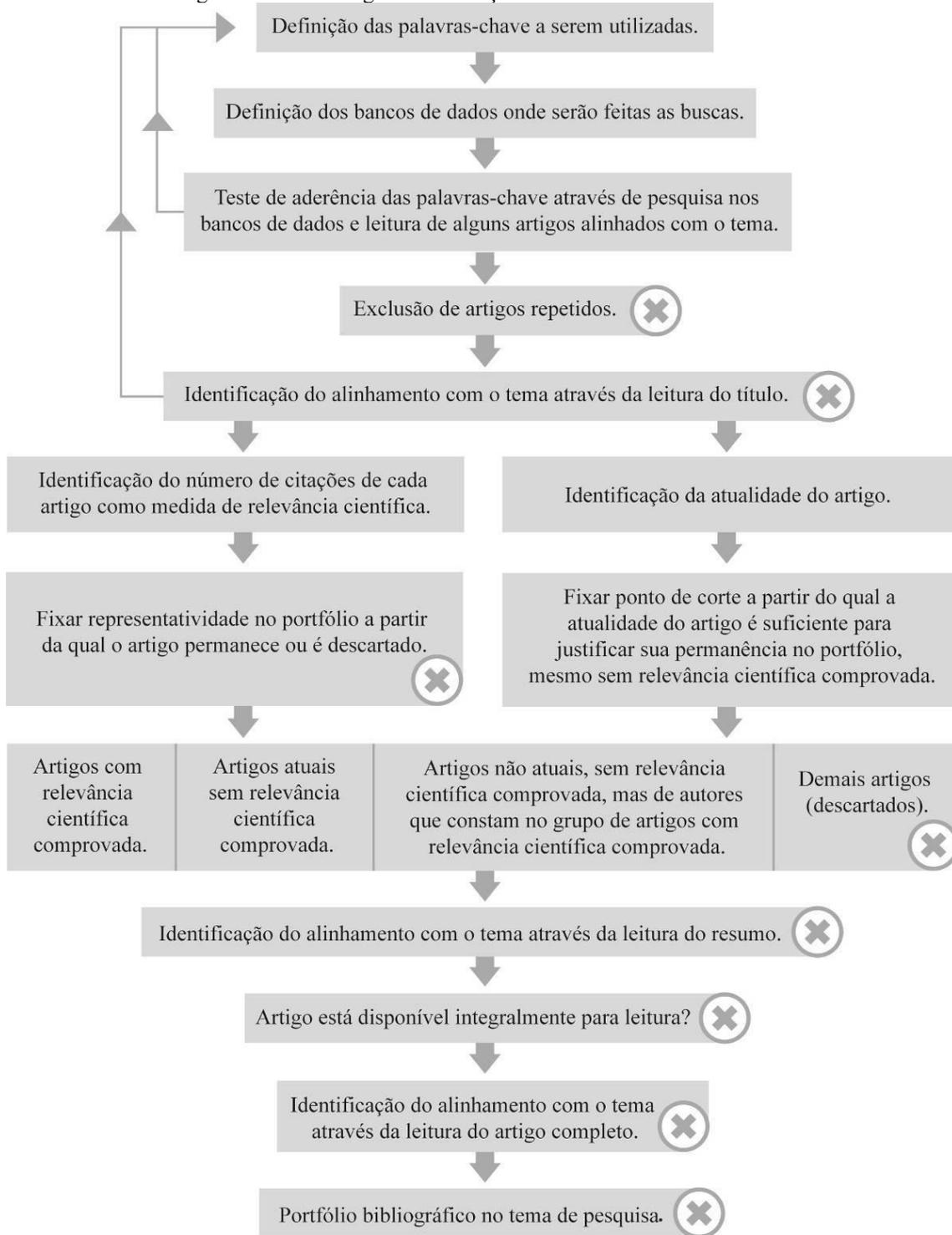
Este estudo adota uma metodologia descritiva, conforme a classificação de Vergara (2006), por apresentar características específicas de um fenômeno, no caso, as publicações científicas sobre a cadeia de valor da energia solar fotovoltaica, com foco na análise de regulamentações voltadas para a gestão de resíduos fotovoltaicos ao final de sua vida útil, tanto em âmbito nacional quanto internacional. A pesquisa é caracterizada como qualitativa, seguindo as categorias metodológicas propostas por Richardson e Social (2008), sendo essa abordagem escolhida para fundamentar a coleta de dados necessários à construção de um Portfólio Bibliográfico.

Para explorar as questões de pesquisa, foi conduzida uma revisão bibliométrica da literatura, um processo científico que, de acordo com Cook, Mulrow e Haynes (1997), é replicável e transparente, estabelecendo uma base sólida para o avanço do conhecimento em um campo específico e o desenvolvimento de teorias. A técnica utilizada para a revisão sistemática foi o Knowledge

Development Process - Constructivist (ProKnow-C), conforme proposto por Ensslin, Ensslin, Lacerda e Tasca (2010). Este instrumento orientou a busca e seleção dos artigos, permitindo a criação de um portfólio bibliográfico com os estudos mais relevantes sobre o tema, uma abordagem amplamente utilizada em pesquisas acadêmicas em diversas áreas.

A metodologia adotada neste estudo visa a garantir que a seleção dos artigos seja conduzida de maneira rigorosa e criteriosa, oferecendo uma visão abrangente e aprofundada das publicações científicas mais pertinentes ao tema investigado.

Figura 1 – Metodologia de construção do conhecimento Proknow-C



Legenda



Não obtendo bons resultados, retornar ao ponto inicial.



Etapa em que são descartados artigos do portfólio atual.

Fonte: Ensslin; Ensslin; Lacerda e Tasca (2010)

Para formatar o Portfólio Bibliográfico (PB), foi estabelecido um ponto de corte de 80%, calculando assim a representatividade de cada artigo no PB. Os artigos classificados como reconhecidos cientificamente passam por uma análise do resumo, e aqueles alinhados com o tema permanecem no PB.

A pesquisa da literatura foi conduzida utilizando a base de dados Web of Science, garantindo a inclusão de estudos de alta qualidade revisados por pares em nossos resultados (Denyer & Tranfield, 2009). Conduzimos uma busca abrangente por artigos revisados por pares em língua inglesa, com o propósito de incluir os conhecimentos mais atuais disponíveis, especialmente no contexto da economia circular na indústria de energia solar fotovoltaica. Essa investigação foi realizada em maio de 2023, cobrindo todo o período disponível e incluindo artigos publicados até esse mês.

Tabela 1 – Resumo da Pesquisa do banco de dados

Palavras-chave	Base de dados	Quantidade
economy circular and solar energy	Web of Science	416
economy circular and photovoltaic energy		181
economy circular and solar modules		57

Fonte: Elaborado pelos autores com dados extraídos da Web of Science

Foi empregado o software VOSviewer, reconhecido por sua eficácia na criação e exploração de mapas bibliométricos baseados em redes (Boyack et al., 2018). A escolha desse software para as análises bibliométricas se justificou por diversas razões: I) sua interface gráfica intuitiva, que facilitou a visualização e interpretação dos dados; II) sua compatibilidade com a base de dados Web of Science, permitindo uma análise mais abrangente; e III) o fato de ser um software freeware, isento de custos adicionais, o que viabilizou sua utilização na pesquisa.

4 RESULTADOS DA PESQUISA

Conforme observado por Dos Santos et al. (2022), o crescimento dos resíduos fotovoltaicos apresenta um novo desafio ambiental, exigindo o desenvolvimento de indústrias focadas na reciclagem e no reaproveitamento dos módulos solares. No cenário brasileiro, torna-se essencial instituir uma gestão eficaz, por meio de políticas que obriguem os produtores de módulos fotovoltaicos a assumirem responsabilidades tanto ambientais quanto econômicas.

Para identificar alternativas que contribuam para a gestão de resíduos fotovoltaicos, foi realizado uma revisão bibliométrica. Na pesquisa, utilizando o conjunto de palavras-chave exibido na Tabela 1, todas as informações obtidas da base de dados do Web of Science (título, resumo, autores, ano de publicação, local de publicação, citações, país, palavras-chave) foram exportadas para planilhas

do Microsoft Excel. Os resultados foram fundidos em um (n=654) e identificado as duplicatas (n=179). Uma vez identificadas, foram removidas do banco consolidado.

No próximo passo, que envolve a análise dos títulos dos artigos com o intuito de avaliar sua relevância em relação ao tema de pesquisa, um total de 346 artigos foram excluídos, restando, portanto, 129 artigos que se mostraram congruentes com o escopo da investigação. Nesse estágio, os critérios de seleção abrangeram a abordagem do tema da economia circular dos resíduos fotovoltaicos, com ênfase na consideração dos impactos sociais, ambientais e econômicos. As justificativas para a exclusão dos 346 artigos foram as seguintes: I) O conteúdo não estava alinhado com o foco desta pesquisa; II) O acesso aos artigos estava restrito; III) Os artigos eram considerados excessivamente técnicos, muitos dos quais se concentravam em pesquisas relacionadas à extensão da vida útil das baterias e à aplicação de módulos solares para o aquecimento de água.

Seguindo o método Proknow-C, os 129 artigos foram ordenados em modo decrescente de citação, sendo 34 artigos separados no repositório A, definido pela razão de 80% do total de citações sobre o total de artigos. Logo após os demais 95 artigos foram separados no repositório B, dos quais 57 títulos possuem de 1 a 12 citações, e 22 não possuíam citação.

Após a análise do Banco de Autores, foram selecionados 2 artigos alinhados ao tema, os quais foram adicionados ao repositório A.

Tabela 2 – Portfólio Bibliográfico do tema de pesquisa

#	Título	Citações	Autores	Ano Publicação
1	Circular economy strategies for mitigating critical material supply issues	141	Gaustad, G; Krystofik, M; Bustamante, M; Badami, K	2018
2	Research and development priorities for silicon photovoltaic module recycling to support a circular economy	98	Heath, GA; Silverman, TJ; Kempe, M; Deceglie, M; Ravikumar, D; Remo, T; Cui, H; Sinha, P; Libby, C; Shaw, S; Komoto, K; Wambach, K; Butler, E; Barnes, T; Wade, A	2020
3	Drivers, barriers and enablers to end-of-life management of solar photovoltaic and battery energy storage systems: A systematic literature review	97	Salim, HK; Stewart, RA; Sahin, O; Dudley, M	2019
4	Management of end-of-life photovoltaic panels as a step towards a circular economy	83	Sica, D; Malandrino, O; Supino, S; Testa, M; Lucchetti, MC	2018

5	Technical challenges and opportunities in realising a circular economy for waste photovoltaic modules	72	Farrell, CC; Osman, AI; Doherty, R; Saad, M; Zhang, X; Murphy, A; Harrison, J; Vennard, ASM; Kumaravel, V; Al-Muhtaseb, AH; Rooney, DW	2020
6	Towards a circular supply chain for PV modules: Review of today's challenges in PV recycling, refurbishment and re-certification	46	Tsanakas, JA; van der Heide, A; Radavicius, T; Denafas, J; Lemaire, E; Wang, K; Poortmans, J; Voroshazi, E	2020
7	Assessment of the energy recovery potential of waste Photovoltaic modules	44	Farrell, C; Osman, AI; Zhang, XL; Murphy, A; Doherty, R; Morgan, K; Rooney, DW; Harrison, J; Coulter, R; Shen, D	2019
8	Photovoltaic waste assessment: Forecasting and screening of emerging waste in Australia	42	Mahmoudi, S; Huda, N; Behnia, M	2019
9	Adapting Stand-Alone Renewable Energy Technologies for the Circular Economy through Eco-Design and Recycling	38	Gallagher, J; Basu, B; Browne, M; Kenna, A; McCormack, S; Pilla, F; Styles, D	2019
10	Sustainable energy storage for solar home systems in rural Sub-Saharan Africa - A comparative examination of lifecycle aspects of battery technologies for circular economy, with emphasis on the South African context	37	Charles, RG; Davies, ML; Douglas, P; Hallin, IL; Mabbett, I	2019
11	Life cycle assessment for a solar energy system based on reuse components for developing countries	30	Kim, B; Azzaro-Pantel, C; Pietrzak-David, M; Maussion, P	2019
12	Promoting a circular economy in the solar photovoltaic industry using life cycle symbiosis	29	Mathur, N; Singh, S; Sutherland, JW	2020
13	The Role of Renewable Energy in the Promotion of Circular Urban Metabolism	27	Barragan-Escandon, A; Terrados-Cepeda, J; Zalamea-Leon, E	2017
14	PV Waste Management at the Crossroads of Circular Economy and Energy Transition: The Case of South Korea	24	Kim, H; Park, H	2018
15	Policies and Measures for Sustainable Management of Solar Panel End-of-Life in Italy	24	Malandrino, O; Sica, D; Testa, M; Supino, S	2017
16	Life cycle assessment of a vanadium flow battery A joint organization of University of Aveiro (UA), School of Engineering of the Polytechnic of Porto (ISEP) and SCIENCE and Engineering Institute (SCIEI)	22	Gouveia, J; Mendes, A; Monteiro, R; Mata, TM; Caetano, NS; Martins, AA	2020

17	Sustainable industrial technology for recovery of Al nanocrystals, Si micro particles and Ag from solar cell wafer production waste	21	Yousef, S; Tatariants, M; Denafas, J; Makarevicius, V; Lukosiute, SI; Kruopiene, J	2019
18	Environmental Impact Assessment of crystalline solar photovoltaic panels' End-of-Life phase: Open and Closed-Loop Material Flow scenarios	20	Lisperguer, RC; Ceron, EM; Higuera, JD; Martin, RD	2020
19	A Life Cycle Assessment of a recovery process from End-of-Life Photovoltaic Panels	20	Ansanelli, G; Fiorentino, G; Tammara, M; Zucaro, A	2021
20	Design for Recycling Principles Applicable to Selected Clean Energy Technologies: Crystalline-Silicon Photovoltaic Modules, Electric Vehicle Batteries, and Wind Turbine Blades	19	Norgren, A; Carpenter, A; Heath, G	2020
21	The resources, exergetic and environmental footprint of the silicon photovoltaic circular economy: Assessment and opportunities	18	Bartie, NJ; Cobos-Becerra, YL; Frohling, M; Schlatmann, R; Reuter, MA	2021
22	Powering a Sustainable and Circular Economy-An Engineering Approach to Estimating Renewable Energy Potentials within Earth System Boundaries	17	Desing, H; Widmer, R; Beloin-Saint-Pierre, D; Hirsch, R; Wager, P	2019
23	Towards a circular economy: Investigating the critical success factors for a blockchain-based solar photovoltaic energy ecosystem in Turkey	16	Erol, I; Peker, I; Ar, IM; Turan, I; Searcy, C	2021
24	Life Cycle Assessment of a solar thermal system in Spain, eco-design alternatives and derived climate change scenarios at Spanish and Chinese National levels	16	Alberti, J; Raigosa, J; Raugei, M; Assiego, R; Ribas-Tur, J; Garrido-Soriano, M; Zhang, LH; Song, GB; Hernandez, P; Fullana-i-Palmer, P	2019
25	Simulation-Based Exergy Analysis of Large Circular Economy Systems: Zinc Production Coupled to CdTe Photovoltaic Module Life Cycle	16	Llamas, AA; Bartie, NJ; Heibeck, M; Stelter, M; Reuter, MA	2020
26	Sustainable technology for mass production of Ag nanoparticles and Al microparticles from damaged solar cell wafers	15	Yousef, S; Tatariants, M; Tichonovas, M; Makarevicius, V	2019
27	A Systematic Literature Review of the Solar Photovoltaic Value Chain for a Circular Economy	14	Franco, MA; Groesser, SN	2021
28	Review of State of the Art Recycling Methods in the Context of Dye Sensitized Solar Cells	14	Schoden, F; Dotter, M; Knefelkamp, D; Blachowicz, T; Hellkamp, ES	2021
29	Remanufacturing end-of-life silicon photovoltaics: Feasibility and viability analysis	14	Deng, R; Chang, N; Lunardi, MM; Dias, P; Bilbao, J; Ji, JJ; Chong, CM	2021
30	Holistic review of hybrid renewable energy in circular economy for valorization and management	13	Bist, N; Sircar, A; Yadav, K	2020

31	Life cycle assessment of a renewable energy generation system with a vanadium redox flow battery in a NZEB household A joint organization of University of Aveiro (UA), School of Engineering of the Polytechnic of Porto (ISEP) and SCience and Engineering Institute (SCIEI)	13	Gouveia, JR; Silva, E; Mata, TM; Mendes, A; Caetano, NS; Martins, AA	2020
32	End-of-life CIGS photovoltaic panel: A source of secondary indium and gallium	13	Amato, A; Beolchini, F	2019
33	A set of principles for applying Circular Economy to the PV industry: Modeling a closed-loop material cycle system for crystalline photovoltaic panels	12	Contreras-Lisperguer, R; Munoz-Ceron, E; Aguilera, J; de la Casa, J	2021
34	Upcycling Silicon Photovoltaic Waste into Thermoelectrics	12	Cao, J; Sim, Y; Tan, XY; Zheng, J; Chien, SW; Jia, N; Chen, KW; Tay, YB; Dong, JF; Yang, L; Ng, HK; Liu, HF; Tan, CKI; Xie, GF; Zhu, Q; Li, ZB; Zhang, G; Hu, L; Zheng, Y; Xu, JW; Yan, QY; Loh, XJ; Mathews, N; Wu, J; Suwardi, A	2022
35	Recycling and Reuse potential of NICE PV-Modules	5	Einhaus, R; Madon, F; Degoulange, J; Wambach, K; Denafas, J; Lorenzo, FR; Abalde, SC; Garcia, TD; Bollar, A	2018
36	Third Generation Photovoltaics - Early Intervention for Circular Economy and a Sustainable Future	2	Charles, RG; Davies, ML; Douglas, P	2016

Fonte: Elaborado pelos autores com dados extraídos do Web of Science

O portfólio bibliométrico indica um crescente interesse da comunidade acadêmica por pesquisas sobre a economia circular na indústria solar fotovoltaica, com a publicação de 36 artigos entre 2016 e 2022. Conforme apresentado na Tabela 3, a principal via de divulgação dos resultados foi por meio de periódicos acadêmicos. As revistas com maior número de publicações foram Resources Conservation and Recycling e Sustainability (n = 4), seguidas por Progress in Photovoltaics (n = 3) e Energies, Energy Reports, Journal of Cleaner Production, Journal of Sustainable Energy Reviews, Renewable & Sustainable Energy Reviews, e Sustainable Production and Consumption (n = 2). Os dez periódicos mais ativos representaram 67% dos artigos analisados.

Por fim, os resultados mostram que o tema economia circular da indústria solar fotovoltaica é adequado para publicação em uma variedade de revistas especializadas (n = 22) que focam principalmente em questões de sustentabilidade, meio ambiente e energia.

Tabela 3 – Número de publicações por revista

Fonte	Artigos
Resources Conservation and Recycling	4
Sustainability	4
Progress in Photovoltaics	3
Energies	2
Energy Reports	2
Journal of Cleaner Production	2
Journal of Sustainable Metallurgy	2
Renewable & Sustainable Energy Reviews	2
Sustainable Production and Consumption	2
2016 Electronics Goes Green 2016+	1
2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (wcpec)	1
Advanced Materials	1
Applied Energy	1
Energy	1
Energy for Sustainable Development	1
Environmental Technology & Innovation	1
Journal of Industrial Ecology	1
Nature Energy	1
Scientific Reports	1
Solar Energy Materials and Solar Cells	1
Sustainable Cities and Society	1
Waste Management	1

Fonte: Elaborado pelos autores com dados extraídos do *Web of Science*

Os Países Europeus e os Estados Unidos da América têm estado na vanguarda da publicação acadêmica em relação sistemas fotovoltaicos. Entre todos os artigos revisados, 56% tiveram primeiros autores que trabalham em uma instituição europeia, Alemanha, Espanha, Lituânia e Itália. A Ásia encontra-se com 21% de coautores, impulsionado pelo interesse e investimentos da China em energia limpa, principalmente, geração de energia através de sistemas fotovoltaicos. Em seguida, as Américas com 16% de coautores.

Segundo Franco e Groesser (2021), os países em desenvolvimento apresentam desvantagens em comparação com as situações europeia e chinesa. Embora esteja sendo adotadas políticas de implantação de sistemas fotovoltaicos nesses países, exista a falta de investimentos governamentais para pesquisas acadêmicas.

Tabela 4 – Distribuição temporal da localização geográfica por autoria

País	Coautoria	País	Coautoria	País	Coautoria
Alemanha	5	País de Gales	3	Brasil	1
Espanha	5	Canadá	2	Colômbia	1
Itália	4	Chile	2	Equador	1
Lituânia	4	Inglaterra	2	Índia	1
EUA	4	Irlanda	2	Omã	1
Austrália	3	Japão	2	Polônia	1
Egito	3	Irlanda do Norte	2	Escócia	1
França	3	Portugal	2	Singapura	1
China	3	África do Sul	2	Coréia do Sul	1
Suíça	3	Bélgica	1	Turquia	1

Fonte: Elaborado pelos autores com dados extraídos do Web of Science

A Tabela 5 destaca os autores com maior quantidade de artigos publicados do portfólio bibliográfico selecionado, destacam-se que os dez primeiros autores possuem reconhecimento acadêmico e são citados em diversas pesquisas. Em relação ao reconhecimento dos autores, observou-se o total de 192 autores distintos nos artigos do portfólio.

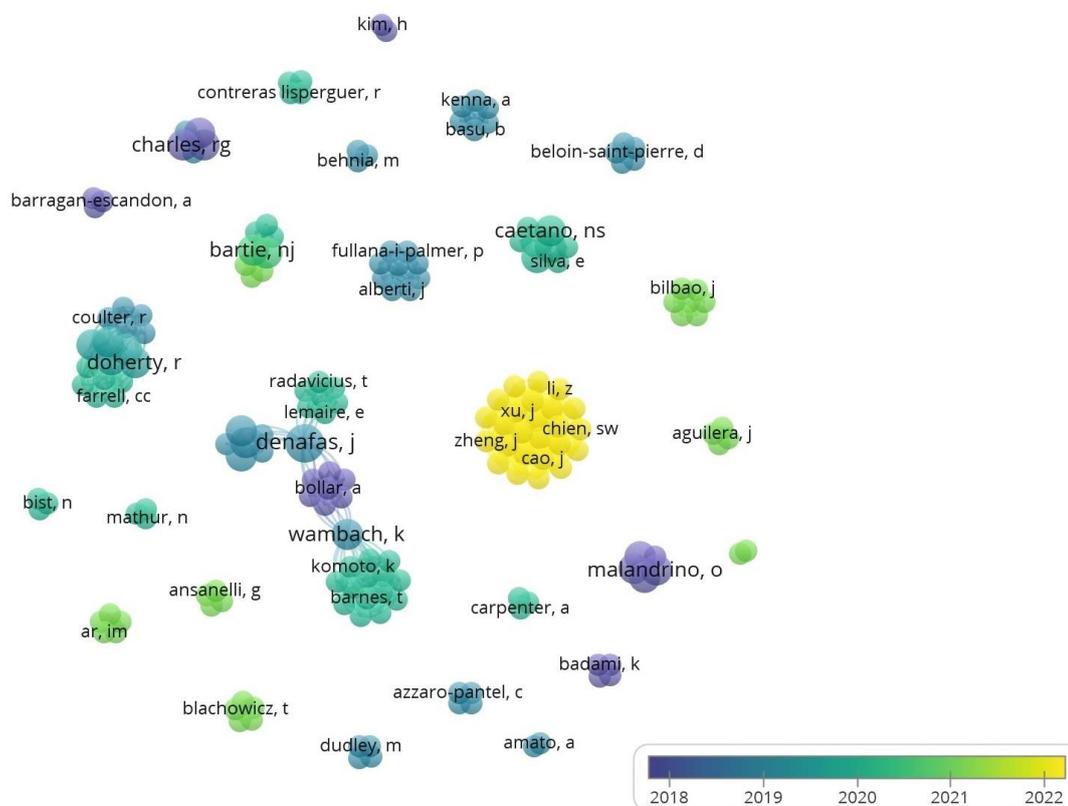
Tabela 5 – Principais autores do portfólio

Autores	Documentos	Citações
Denafas, Julius	3	72
Bartie, N.J.	2	37
Caetano, N. S.	2	35
Charles, Rhys G.	2	39
Davies, Matthew I.	2	39
Douglas, Peter	2	39
Makarevicius, Vidas	2	36
Malandrino, Ornella	2	108
Martins, A. A.	2	35
Mata, T. M.	2	35

Fonte: Elaborado pelos autores com dados extraídos do Web of Science

É importante notar que não há pesquisadores ou grupos de pesquisa com destaque predominante (Figura 2). A análise da rede de relacionamento entre autores e coautores revela a existência de pequenos grupos de pesquisa que publicam em conjunto.

Figura 2 – Relacionamento autores no portfólio



Fonte: Elaborado pelos autores com dados extraídos do Web of Science

A Tabela 6 demonstra os dez trabalhos mais citados pelos autores dentro do portfólio selecionado.

Tabela 6 – Trabalhos mais citados no portfólio

Título	Abordagem	Autores	Citações recebidas pelo portfólio selecionado
Life Cycle Assessment of an innovative recycling process for crystalline silicon photovoltaic panels	<p>O artigo apresenta avaliações e informações transparentes e detalhadas relacionadas ao estágio de fim de vida (LCA - Life Cycle Assessment) dos módulos fotovoltaicos de silício, oferecendo análises ambientais minuciosas sobre os procedimentos desenvolvidos para a reciclagem de módulos fotovoltaicos cristalinos. Para esta análise, as normas ISO 14040 foram aplicadas ao FRELP - Full Recovery End of Life Photovoltaic.</p> <p>Os pesquisadores desempenharam um papel fundamental na disseminação do processo inovador de reciclagem de resíduos de módulos fotovoltaicos, contribuindo significativamente para sua adoção mais ampla. Os resultados obtidos também desempenharam um papel importante na orientação de decisões políticas relacionadas ao tema, proporcionando informações valiosas para a formulação de políticas públicas mais eficazes na gestão de resíduos fotovoltaicos.</p>	LATUNUSSA et al. (2016)	12

<p>Management of end-of-life photovoltaic panels as a step towards a circular economy</p>	<p>O objetivo da pesquisa foi analisar a contribuição do setor fotovoltaico com as demandas energéticas e promover uma economia de circuito fechado, baseada na partilha, arrendamento, reutilização, reparação, reabilitação e reciclagem, valorizando a energia e os recursos naturais e na minimização da produção de resíduos fotovoltaicos. O tema da pesquisa foi abordado pela Comissão Europeia, onde incluiu medidas e ações para desenvolver uma economia circular em todas as cadeias de valor, envolvendo todos os atores nos processos (produção e consumo). Esta alteração exigiu mudanças entre os segmentos 'upstream' e 'downstream', sendo necessário a implementação de caminhos inovadores de gerenciamento de resíduos e logística reversa.</p>	<p>SICA et al. (2018)</p>	<p>10</p>
<p>Review on feasible recycling pathways and technologies of solar photovoltaic modules</p>	<p>A pesquisa aborda o aumento de resíduos fotovoltaicos, debatendo os possíveis danos ambientais causados por substâncias tóxicas que podem ser liberadas dos módulos fotovoltaicos e o risco de escassez de recursos naturais para materiais semicondutores. Os autores abordam a questão da reciclagem de módulos fotovoltaicos por meio de três abordagens distintas: a reciclagem dos resíduos de fabricação, a reciclagem dos módulos descartados e a prática de remanufatura e reutilização dos próprios módulos. Os resultados da pesquisa evidenciam que as tecnologias voltadas para a reciclagem de módulos no final de sua vida útil estão sendo amplamente exploradas, havendo inclusive algumas opções disponíveis no mercado. Entretanto, subsistem desafios significativos em relação à eficiência do processo, simplificação da complexidade do procedimento, demanda energética e o uso de substâncias químicas.</p>	<p>TAO; YU (2015)</p>	<p>10</p>
<p>Global status of recycling waste solar panels: A review</p>	<p>O artigo traz uma revisão e discussão do status da avaliação do ciclo de vida dos resíduos fotovoltaicos, abordando tipos de módulos utilizados; produção dos módulos e a geração dos resíduos; técnicas de reciclagem; políticas de reciclagem adotadas pelos Estados-Membros da UE, após a Diretiva WEEE e de países fora do mercado da UE. Os autores propõem que seja desenvolvido um padrão de reciclagem para a indústria fotovoltaica, exigindo que os fabricantes sejam os responsáveis pela reciclagem e que os governos adotem políticas e regulamentos para incentivar a reciclagem e descarte seguro dos resíduos fotovoltaicos.</p>	<p>XU et al. (2018)</p>	<p>10</p>
<p>A techno-economic review of silicon photovoltaic module recycling</p>	<p>Os autores revisaram a tecnologia de reciclagem de ponta e a associaram a uma avaliação econômica quantitativa para entender melhor a barreira econômica apresentada. A revisão tecno econômica permitiu identificar a estrutura essencial e as mudanças tecnológicas necessárias para superar a barreira atual para a implementação da reciclagem em escala comercial. Foi demonstrado a estrutura de custo para reciclar cinco tipos diferentes de módulos, cada um usando três métodos distintos de reciclagem. Todos eles são mais caros do que o aterro sanitário, o que é um desincentivo à reciclagem. A regulamentação governamental é fundamental para permitir a reciclagem e a quebra da barreira econômica.</p>	<p>DENG et al. (2019)</p>	<p>9</p>

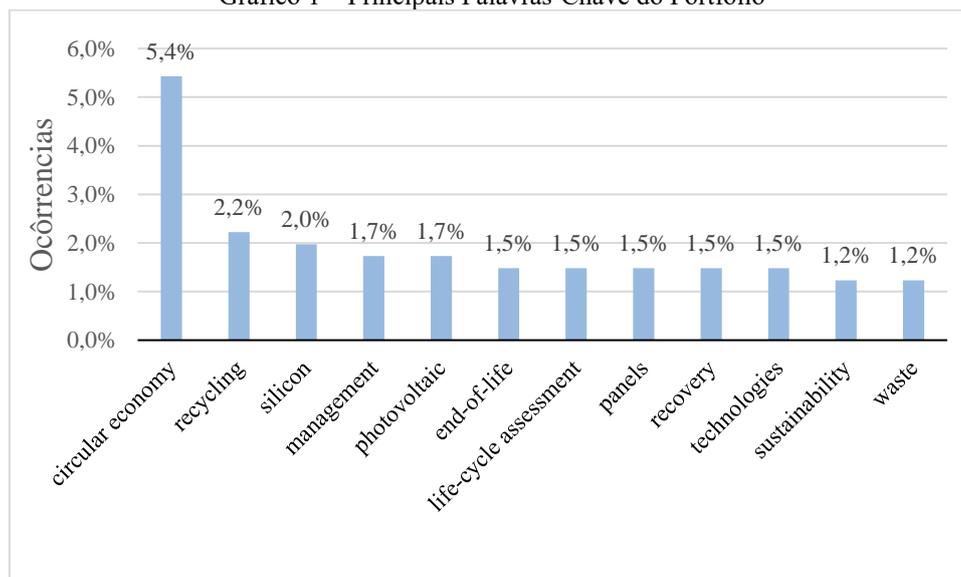
Strategy and technology to recycle wafer-silicon solar modules	Neste trabalho, os autores propõem um processo de reciclagem para módulos wafer-Si, apresentando duas novas tecnologias (eletroextração e monitoramento da resistência da folha), reduzindo o quantitativo de resíduos fotovoltaicos em aterros sanitários.	HUANG et al. (2017)	8
Experimental investigations for recycling of silicon and glass from waste photovoltaic modules	O artigo relata um novo procedimento para a recuperação de recursos de módulos fotovoltaicos residuais, onde obteve o rendimento de silício recuperado em 86%. Os autores apuraram rendimento de silício puro com pureza de 99,999% e vidro temperado recuperado do módulo fotovoltaico residual. Como resultado, foi possível otimizar o processo de recuperação do silício metálico por meio de um tratamento de superfície nos módulos fotovoltaicos.	KANG et al. (2012)	8
Producer responsibility and recycling solar photovoltaic modules	O artigo explora a necessidade de políticas voltadas à reciclagem de resíduos fotovoltaicos, avaliando os protocolos de reciclagem existentes para os cinco principais tipos de materiais PV comercializados (índio, gálio, silício, sulfeto de cádmio, cádmio e telúrio). Constatou-se que, para a maioria dos dispositivos fotovoltaicos, a motivação econômica para reciclagem não compensa a diferença entre os custos de reciclagem e os de descarte em aterros, tornando a reciclagem uma alternativa economicamente inviável sem incentivos adequados. Apesar disso, algumas empresas do setor de energia solar têm iniciado voluntariamente a reciclagem de módulos solares, movidas possivelmente pela responsabilidade ambiental, mais do que por vantagens econômicas.	MCDONALD; PEARCE (2010)	8
Resource efficient recovery of critical and precious metals from waste silicon PV panel recycling	Os autores compararam ao processo inovador de reciclagem 'FRELP' com os demais processos utilizados em usinas europeias de reciclagem WEEE, constatando que o processo inovador atende às metas de reciclagem definidas pela legislação europeia. Por fim, questionam que a baixa quantidade de resíduos fotovoltaicos coletados está desestimulando investimentos em processos industriais para reciclagem e abordam que tal situação não é uma justificativa para atrasar a pesquisa neste campo.	ARDENTE; LATUNUSSA; BLENGINI (2019)	7
Crystalline Silicon Photovoltaic Recycling Planning: Macro and Micro Perspectives	Os autores elaboraram modelos matemáticos para avaliar a rentabilidade das tecnologias de reciclagem e para auxiliar nas decisões estratégicas sobre a localização ideal dos centros de tratamento de resíduos fotovoltaicos, essenciais para o descarte de produtos ao final de sua vida útil. O estudo também apresenta alternativas de logística reversa, propondo soluções para o transporte dos resíduos fotovoltaicos de diversas instalações de coleta até os centros de tratamento.	CHOI; FTHENAKIS (2014)	7

Fonte: Elaborado pelos autores com dados extraídos do Web of Science.

Os artigos relataram quais fatores que poderão contribuir com a economia circular, buscando a valorização de resíduos com foco na recuperação de resíduos fotovoltaicos e os consequentes benefícios ambientais, econômicos e sociais. A demonstração de novos processos para viabilizar a reciclagem dos resíduos fotovoltaicos foi a maior discussão pelos artigos co-citados, demonstrando o interesse acadêmico em contribuir com novas tecnologias e tornar tal ação economicamente viável.

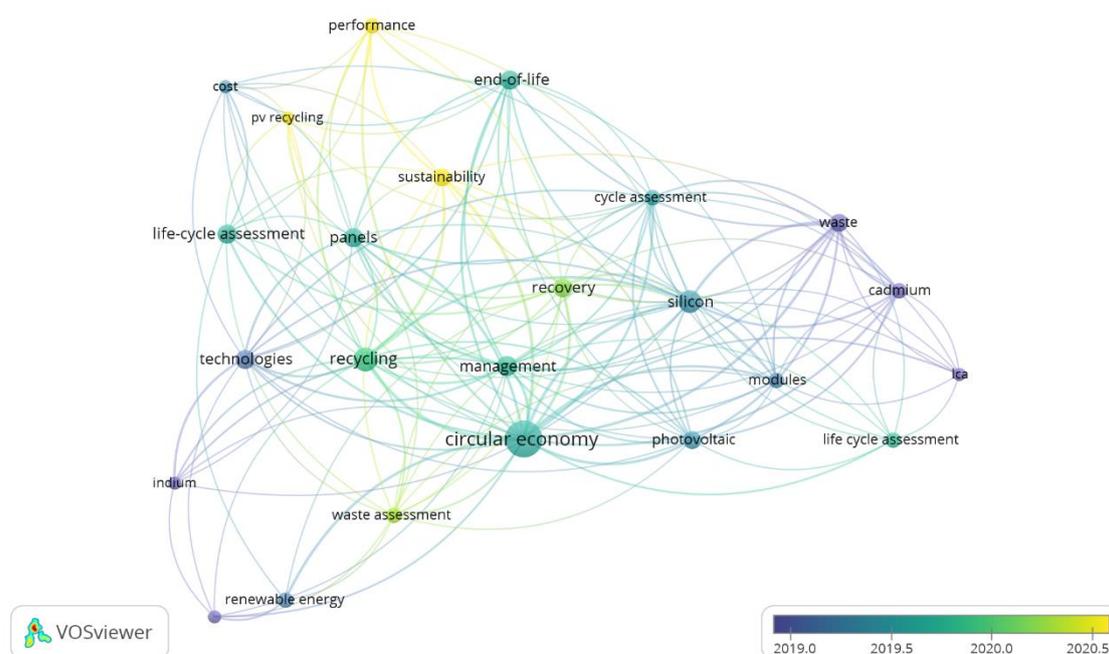
Para a análise textual das palavras-chave extraídas nos artigos do portfólio, foram utilizados os softwares VOSviewer e o Microsoft Excel, onde possibilitou um total de 262 ocorrências, sendo todas distintas. O Gráfico 1 e a Figura 3 exibem a análise bibliométrica das palavra-chave com frequência acima de 1 e suas conexões. As mais frequentes são “circular economy” e “recycling”.

Gráfico 1 – Principais Palavras-Chave do Portfólio



Fonte: Elaborado pelos autores com dados extraídos do Web of Science

Figura 3 – Principais Palavras-Chave do Portfólio



Fonte: Elaborado pelos autores com dados extraídos do Web of Science

As palavras “circular economy” e “recycling”, são genéricas e são utilizadas em outras áreas de pesquisa, sendo relevantes e aplicáveis ao tema economia circular da indústria de sistemas fotovoltaicos.

5 DISCUSSÃO

A transição para uma economia circular no setor fotovoltaico exige uma reestruturação das cadeias de valor e a adoção de novos modelos de negócios sustentáveis. Embora a energia solar fotovoltaica seja uma fonte promissora de energia limpa, o aumento dos resíduos gerados por módulos solares danificados ou obsoletos apresenta um desafio crescente, sublinhando a importância de políticas públicas e inovações tecnológicas para assegurar a sustentabilidade do setor.

A União Europeia (UE) tem se destacado na implementação de regulamentações voltadas para a gestão desses resíduos, como demonstrado pela Diretiva de Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (WEEE). Implementada na Alemanha em 2015, essa diretiva responsabiliza os fabricantes pelo descarte e reciclagem dos módulos solares, utilizando o modelo Business-to-Business (B2B) (Kim & Park, 2018). A obrigatoriedade de estimativas e relatórios sobre a geração de resíduos fotovoltaicos e a recuperação de materiais na Alemanha enfatiza a importância desse modelo de gestão (PV Cycle, 2016; Majewski et al., 2023).

No entanto, a viabilidade econômica da reciclagem de resíduos fotovoltaicos ainda é um obstáculo, especialmente devido aos altos custos envolvidos. Diferentes abordagens, como o sistema japonês, onde os consumidores pagam uma taxa no final da vida útil, e o modelo sueco, onde o Estado assume a coleta dos resíduos, mostram como esses desafios são enfrentados em contextos distintos (Sasaki, 2004). A implementação de taxas de reciclagem pode fornecer os recursos financeiros necessários para apoiar essas práticas, conforme sugerido por Monier et al. (2014), embora haja debates sobre a adequação de tais taxas em sistemas de energia limpa (Dias et al., 2018).

No Brasil, a gestão de resíduos fotovoltaicos é orientada pela Política Nacional de Resíduos Sólidos, que trata os módulos como parte dos resíduos eletroeletrônicos, sem diretrizes específicas para a indústria fotovoltaica (Konzen & Pereira, 2020). A falta de regulamentação específica impede o desenvolvimento de uma economia circular robusta no setor, o que reforça a necessidade de adaptação e implementação de modelos regulatórios baseados em experiências internacionais bem-sucedidas (Majewski et al., 2021).

A baixa taxa de reciclagem de Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE) no Brasil, onde apenas 3% das 2 milhões de toneladas produzidas em 2019 foram recicladas, evidencia a urgência de uma abordagem colaborativa entre a comunidade empresarial, órgãos governamentais e a sociedade

civil (Forti et al., 2020; Gagliardi et al., 2023). Promover a sustentabilidade como prioridade nos negócios é importante para impulsionar a transformação em direção à economia circular.

Portanto, a economia circular no setor fotovoltaico exige uma abordagem que inclua a inovação tecnológica, a implementação de políticas públicas adequadas e a criação de modelos de negócios sustentáveis. A combinação dessas estratégias pode mitigar os impactos ambientais e gerar benefícios econômicos e sociais. A colaboração entre todos os envolvidos é fundamental para que a expansão da energia solar ocorra de maneira sustentável.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A transição para uma economia circular na indústria fotovoltaica no Brasil é um passo importante, especialmente à medida que a energia solar ganha mais espaço e surgem desafios na gestão de resíduos. Implementar políticas e regulamentações específicas que abranjam toda a cadeia de valor, desde a produção até o descarte, é importante para garantir que o crescimento dessa indústria seja sustentável. A experiência da União Europeia com a Diretiva WEEE pode servir como um modelo adaptável ao contexto brasileiro para ajudar a mitigar impactos ambientais.

O descarte inadequado de resíduos fotovoltaicos em aterros ou no meio ambiente pode comprometer os benefícios associados à energia solar. Isso reforça a necessidade de tomar medidas que assegurem uma gestão adequada desses materiais. A ausência de uma regulamentação específica no Brasil para lidar com esses resíduos destaca a urgência de ações que incluam uma fiscalização eficiente, garantindo o cumprimento das normas e a prevenção de danos ambientais.

A literatura destaca a importância de investimentos contínuos em pesquisa e desenvolvimento para o aprimoramento das tecnologias de reciclagem e reaproveitamento dos componentes fotovoltaicos. Diante disso, o presente estudo realizou uma revisão bibliométrica utilizando o método Proknow-C, que identificou 129 publicações relevantes entre 654 artigos analisados, evidenciando o crescente interesse acadêmico na área. Esses estudos reforçam a necessidade de avanços tecnológicos para otimizar a gestão de resíduos, permitindo uma reciclagem mais eficiente e a criação de novas oportunidades econômicas.

Além disso, a conscientização e engajamento dos diferentes grupos envolvidos, como fabricantes, consumidores e órgãos governamentais, também é essencial para o sucesso de uma economia circular no setor fotovoltaico. A educação sobre práticas sustentáveis e a importância da economia circular pode promover a mudança cultural necessária para integrar essas práticas ao cotidiano. A colaboração entre todos os envolvidos é fundamental para criar um ambiente propício à sustentabilidade.

Para garantir que o crescimento da energia fotovoltaica no Brasil seja sustentável, é necessário avançar na criação de regulamentações específicas, investir em inovação tecnológica e promover a conscientização social. Essas medidas não apenas mitigam os impactos ambientais dos resíduos fotovoltaicos, mas também posicionam o país para uma transição mais eficaz para uma economia circular no setor de energia.

REFERÊNCIAS

Abdalla, F. A., & Sampaio, A. C. F. (2018). Os novos princípios e conceitos inovadores da economia circular. *Entorno Geográfico*, (15), 82-102.

ABSOLAR. Brasil 4º país que mais cresceu em 2021. [Web page]. Recuperado de <https://www.absolar.org.br/noticia/energia-solarfotovoltaica-brasil-e-4o-pais-que-mais-cresceu-em-2021/>. Acesso em: 30 mai. 2023.

ABSOLAR. Panorama da solar fotovoltaica no Brasil e no mundo. [Web page]. Recuperado de <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>. Acesso em: 21 abr. 2022.

AGENDA 2030. ODS – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável [Web page]. Recuperado de <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 05 set. 2022.

Bezerra, F. D. (2022). Agropecuária: micro e minigeração distribuída e suas perspectivas com a Lei 14.300/2022. Fortaleza: BNB. Caderno Setorial Etene, 7(234), ago. 2022.

Boyack, K. W., van Eck, N. J., Colavizza, G., & Waltman, L. (2018). Characterizing in-text citations in scientific articles: A large-scale analysis. *Journal of Informetrics*, 12(1), 59-73.

BRASIL. Lei n.º 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei n.º 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Recuperado de https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm. Acesso em: 05 set. 2022.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Qualidade Ambiental. (2022). Plano Nacional de Resíduos Sólidos - Planares [recurso eletrônico]. Coordenação de André Luiz Felisberto França... [et al.]. Brasília, DF: MMA. Recuperado de <https://sinir.gov.br/informacoes/plano-nacional-de-residuos-solidos/>. Acesso em: 05 set. 2022.

Cook, D. J., Mulrow, C. D., & Haynes, R. B. (1997). Systematic reviews: synthesis of best evidence for clinical decisions. *Annals of Internal Medicine*, 126(5), 376-380.

De Souza Ribeiro Filho, Luiz Alberto; Pereira, Vítor Lima; Velázquez, Sílvia Maria Stortini González. Simulador de Energia Solar para Implementação de Sistemas Fotovoltaicos no Contexto Urbano. *Revista Mackenzie de Engenharia e Computação*, v. 22, n. 1, p. 82-104, 2022.

DENYER, David; TRANFIELD, David. Producing a systematic review. 2009.

Dias, P., Bernardes, A. M., & Huda, N. (2018). Waste electrical and electronic equipment (WEEE) management: An analysis on the Australian e-waste recycling scheme. *Journal of Cleaner Production*, 197, 750-764.

DOS SANTOS, M. R., de Brito, J. L. R., & Shibao, F. Y. (2022). Economia circular e a energia solar fotovoltaica. *Colóquio - Revista do Desenvolvimento Regional*, 19(1), 293-311.

Empresa de Pesquisa Energética (Brasil). Balanço Energético Nacional 2021: Ano base 2020 / Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro: EPE, 2021. Brazilian Energy Balance 2021 Year 2020 / Empresa de Pesquisa Energética – Rio de Janeiro: EPE, 2021.

ENSSLIN, L., Ensslin, S. R., Lacerda, R. T. D. O., & Tasca, J. E. (2010). ProKnow-C, Knowledge Development Process – Constructivist: Processo técnico com patente de registro pendente junto ao INPI. Brasil: [sn].

Forti, V., Baldé, C. P., Kuehr, R., & Bel, G. (2020). The global e-waste monitor 2020. United Nations University (UNU), International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn/Geneva/Rotterdam, 120.

Franco, M. A., & Groesser, S. N. (2021). A systematic literature review of the solar photovoltaic value chain for a circular economy. *Sustainability*, 13(17), 9615.

Gagliardi, S. F., Ferreira, J. B., Solon, A. S., & Frascati, G. (2023). Logística reversa: uma análise dos indicadores de sustentabilidade das organizações de recicladores de Uberlândia-MG. *Revista ADMPG*, 13.

Gautam, A., Shankar, R., & Vrat, P. (2021). End-of-life solar photovoltaic e-waste assessment in India: A step towards a circular economy. *Sustainable Production and Consumption*, 26, 65-77.

Gil-Lamata, M., & Latorre-Martínez, M. P. (2022). The circular economy and sustainability: a systematic literature review. *Cuadernos de Gestión (Bilbao)*, (ART-2022-128134).

IRENA. (2016). End-of-life management: Solar photovoltaic panels. International Renewable Energy Agency and International Energy Agency Photovoltaic Power Systems.

IRENA. (2022). IRENA's energy transition support to strengthen climate action: Insight to impact. International Renewable Energy Agency.

Kim, H., & Park, H. (2018). PV waste management at the crossroads of circular economy and energy transition: The case of South Korea. *Sustainability*, 10(10), 3565.

Konzen, B. A. D. V., & Pereira, A. F. (2020). Gestão de resíduo fotovoltaico: revisão bibliográfica sobre o cenário de fim de vida do sistema. In Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS.

Majewski, P., Al-shammari, W., Dudley, M., Jit, J., Lee, S. H., Myoung-Kug, K., & Sung-Jim, K. (2021). Recycling of solar PV panels: Product stewardship and regulatory approaches. *Energy Policy*, 149, 112062.

Majewski, P., Deng, R., Dias, P. R., & Jones, M. (2023). Product stewardship considerations for solar photovoltaic panels. *AIMS Energy*, 11(1), 140-155.

Maka, A. O. M., & Alabid, J. M. (2022). Solar energy technology and its roles in sustainable development. *Clean Energy*, 6(3), 476-483.

MONIER, Véronique et al. Development of Guidance on Extended Producer Responsibility (EPR). 2014.

Richardson, R. J. (2008). Métodos e técnicas. 3ª ed. São Paulo: Atlas.

RITZEN, Michiel et al. IEA-PVPS Task 15. In: Proceedings of the 48th IEA PVPS Executive Committee Meeting, Vienna, Austria. 2016. p. 15-16.

Sasaki, K. (2004). Examining the waste from electrical and electronic equipment management systems in Japan and Sweden. Lund University Master's Programme in Environmental Science. Lund, Sweden. 30pp.

Sica, D., Malandrino, O., Supino, S., Testa, M., & Lucchetti, M. C. (2018). Management of end-of-life photovoltaic panels as a step towards a circular economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 2934-2945.

Vergara, S. C. (2006). *Projetos e relatórios de pesquisa*. São Paulo: Atlas.