



Contemporânea

Contemporary Journal

3(9): 16062-16083, 2023

ISSN: 2447-0961

Artigo

GESTÃO E VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA

MANAGEMENT AND RECOVERY OF WASTE FROM PHOTOVOLTAIC ENERGY GENERATION SYSTEMS

DOI: 10.56083/RCV3N9-136

Recebimento do original: 28/08/2023

Aceitação para publicação: 28/09/2023

José Luiz Romero de Brito

Doutorando pelo Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo (PPGE-USP)

Instituição: Universidade de São Paulo (USP)

Endereço: Avenida Professor Luciano Gualberto, 1289, Cidade Universitária, Butantã, São Paulo – SP

E-mail: romero.brito@usp.br

Mario Roberto dos Santos

Doutor em Administração pela Universidade Nove de Julho (UNINOVE)

Instituição: Universidade Nove de Julho (UNINOVE)

Endereço: Avenida Doutor Adolpho Pinto, 109, Barra Funda, São Paulo – SP, CEP: 01156-050

E-mail: mario.rsantos@terra.com.br

Fabio Ytoshi Shibao

Doutor em Administração de Empresas pela Universidade Presbiteriana Mackenzie (UPM)

Instituição: Universidade Guarulhos (UNG)

Endereço: Praça Tereza Cristina, 88, Centro, Guarulhos – SP, CEP: 07023-070

E-mail: fabio.shibao@gmail.com

RESUMO: O objetivo foi verificar na literatura recente como está sendo tratada produção, gerenciamento e valorização de resíduos dos sistemas fotovoltaicos de geração de energia e as propostas de solução para esses problemas. Na base *ScienceDirect*, foram encontrados 30 artigos sobre o tema referentes ao período 2012-2020. Os artigos avaliados foram classificados em quatro categorias: impactos ambientais, economia circular, reciclagem e/ou recuperação de insumos e projeção da quantidade de resíduos nos países. No tema “impactos ambientais”, cinco artigos mostraram a avaliação do impacto ambiental da fase de final de vida dos



painéis solares fotovoltaicos e o tema Economia Circular apresentou três pesquisas. Quanto à projeção dos resíduos fotovoltaicos, cinco pesquisas mostraram essa projeção nos Estados Unidos da América, na Austrália; na Espanha; no México e na Itália. Reciclagem e/ou recuperação de insumos foi o tema que apresentou mais pesquisas, com 17 artigos, sendo 14 sobre processos para retirada/recuperação de insumos e três revisões de literatura. Os artigos mostraram tanto a preocupação com os impactos ambientais que o uso da tecnologia trará no futuro quanto as sugestões para tornar essa tecnologia uma fonte de matérias-primas, seja dentro de uma economia circular ou sugerindo processos de extração dos insumos após o término da vida útil dos equipamentos.

PALAVRAS-CHAVE: Energia Fotovoltaica, Energias Renováveis, Impacto Ambiental, Resíduos.

ABSTRACT: The aim was to verify in the recent literature how the production, management and recovery of waste from photovoltaic power generation systems is being treated and the proposed solutions to these problems. In the *ScienceDirect* database, 30 articles were found on the subject for the period 2012-2020. The evaluated articles were classified into four categories: environmental impacts, circular economy, recycling and/or recovery of inputs and projection of the amount of waste in countries. In the "environmental impacts" theme, five articles showed the environmental impact assessment of the end-of-life phase of photovoltaic solar panels and the Circular Economy theme presented three researches. As for the projection of photovoltaic waste, five surveys showed this projection in the United States of America, in Australia; in Spain; in Mexico and Italy. Recycling and/or recovery of inputs was the topic that presented the most research, with 17 articles, 14 on processes for removal/recovery of inputs and three literature reviews. The articles showed both the concern with the environmental impacts that the use of technology will bring in the future and the suggestions for making this technology a source of raw materials, whether within a circular economy or suggesting processes for extracting inputs after the end of the useful life of the equipment.

KEYWORDS: Photovoltaic Energy, Renewable Energy, Environmental Impact, Waste.



Artigo está licenciado sob forma de uma licença
Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional.

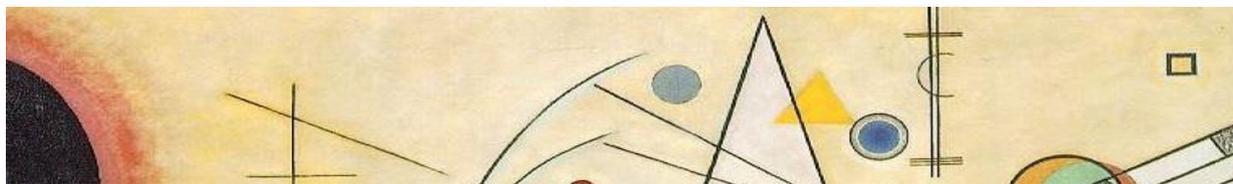


1. Introdução

A transição de energia fóssil para renovável está progredindo, a combinação de recursos do sistema de energia se altera e a energia de fontes não combustíveis (ou seja, eólica, solar) está se tornando mais proeminente. Esses 'novos' recursos são diferentes dos combustíveis fósseis em dois aspectos fundamentais: são abundantes ao invés de escassos, mas a disponibilidade instantânea é limitada, ao invés de serem despacháveis sob demanda (KRAAN et al., 2019; SANTOS; BRITO; SHIBAO, 2022a).

A tecnologia fotovoltaica (PV) é uma das fontes de eletricidade renovável amplamente implementada (DIAS et al., 2017; ISLAM et al., 2020; NAIN; KUMAR, 2020a; SANTOS; BRITO; SHIBAO, 2022b; XING; XIANG; MA, 2018) sendo uma das tecnologias mais promissoras e tecnologicamente madura para a produção de energia renovável (MARWEDE et al., 2013). No entanto, a alta taxa de implantação está associada à geração de resíduos em fim de vida útil dos equipamentos fotovoltaicos (EoL PV) contendo, particularmente, metais cancerígenos (NAIN; KUMAR, 2020c; RABAIA; SEMERARO; OLABI, 2023). O potencial risco ambiental desses equipamentos em conjunto com a gestão dos resíduos tem atraído a atenção dos pesquisadores (TAMMARO et al., 2016), possibilitando assim a exploração da valorização dos resíduos produzidos pelo setor de energias renováveis (SAVVILOTIDOU et al., 2019).

Considerando o aumento nas instalações de sistemas fotovoltaicos, como, por exemplo as fazendas fotovoltaicas ou os centros de geração de energia renovável, a reciclagem, a reutilização e a recuperação de materiais se tornarão um problema no futuro. Sugere-se pesquisar e empregar essas soluções para que o *déficit* de alguns dos metais raros e preciosos desses painéis não ocorra futuramente. Essas ações teriam um impacto significativo na oferta para a cadeia produtiva da indústria solar, como também em outras indústrias que usam esses materiais (FARRELL et al., 2020).



Nesse contexto, o objetivo desta pesquisa foi verificar na literatura recente como está sendo tratada a produção, o gerenciamento e a valorização de resíduos dos sistemas fotovoltaicos de geração de energia e as possíveis propostas de solução para esses problemas. Segundo Mahmoudi et al. (2019), apesar da vasta pesquisa em tecnologia fotovoltaica, pouco se sabe sobre a perspectiva de como os módulos FV EoL serão tratados.

2. Revisão da Literatura

A energia fotovoltaica (PV) tem sido identificada como uma das principais fontes de energia na transição da geração de eletricidade de fontes não renováveis para fontes renováveis (GARLET et al., 2019; MATHUR; SINGH; SUTHERLAND, 2020; SANTOS; BRITO; SHIBAO, 2022a; NAIN; KUMAR, 2020b), tem apresentado um enorme crescimento no setor de energia renovável (NAIN; KUMAR, 2020a; RABAIA; SEMERARO; OLABI, 2023; SICA et al., 2018), com a promessa de um futuro limpo e sustentável (LISPERGUER et al., 2020), tornando-se assim uma tecnologia competitiva (DOMÍNGUEZ; GEYER, 2019; SANTOS; ALONSO-GARCÍA, 2018). Sua versatilidade bem como a simplicidade de instalação e uso tornaram-na uma tecnologia popular, ambientalmente amigável e confiável (DOMÍNGUEZ; GEYER, 2017; PAIANO, 2015; TAMMARO et al., 2016). Em contrapartida, Dias et al. (2017) alertaram que somente nesta década, o Brasil passou a adotar políticas assertivas e ferramentas regulatórias para estimular a implantação de sistemas de geração fotovoltaica.

As tecnologias fotovoltaicas são baseadas em diferentes tipos de materiais usados, eficiência e tamanho. As principais tecnologias fotovoltaicas disponíveis no mercado são: i) painéis de Silício (Si) cristalino (c-Si) de primeira geração, representando 90% do mercado fotovoltaico; ii) tecnologias de filme fino de segunda geração, que cobrem os restantes da participação de mercado; iii) PVs de terceira geração, baseados



principalmente em tecnologias como células fotovoltaicas sensibilizadas com corantes e orgânicas. A preocupação atual reside em tornar essa fonte mais eficiente e econômica em comparação com outras fontes de energia, mas nem sempre são considerados os impactos após o fim da vida desses equipamentos (NAIN; KUMAR, 2020c). Esses impactos continuarão se não mudar o paradigma de fabricação atual, onde o fluxo de material é linear desde sua extração, fabricação de produtos, uso e fim de vida quando são desativados e descartados como resíduos em um aterro, assim chamado ciclo de material em circuito aberto associado à economia atual de produção e a coleta de resíduos (LISPERGUER et al., 2020). O gerenciamento de final de vida é uma abordagem para o gerenciamento e tratamento adequados dos resíduos fotovoltaicos (AUGUSTINE et al.; NAIN; KUMAR, 2020c) e desempenhará um papel estratégico na concretização do setor fotovoltaico (SICA et al., 2018).

Nesse contexto, impacto ambiental é definido pela norma ABNT NBR ISO 14001 como a modificação no meio ambiente, tanto adversa como benéfica, total ou parcialmente resultante dos aspectos ambientais de uma organização, sendo aspectos ambientais os elementos das atividades, dos produtos ou serviços dessa organização, que interagem ou podem interagir com o meio ambiente (ABNT, 2015).

O setor fotovoltaico tem se caracterizado por uma rápida evolução das tecnologias e tem alcançado níveis crescentes de eficiência energética por meio da redução contínua nas emissões durante o processo EPBT (*energy payback time*) e de CO₂. O EPBT é um índice do tempo de retorno de energia, ou seja, o tempo necessário para uma instalação fotovoltaica específica produzir tanta energia quanto foi necessária para fabricá-la, incluindo a energia usada para construir painéis fotovoltaicos, módulos, cabos, inversores etc. (SICA et al., 2018).

Embora a produção de energia solar seja considerada não poluente (XING; XIANG; MA, 2018), a sustentabilidade de longo prazo da energia



fotovoltaica dependerá amplamente da eficácia das soluções de processos que serão adotadas para reciclar o volume sem precedentes de painéis em fim de vida que serão gerados em um futuro próximo (FAIRCLOTH et al., 2019; FIANDRA et al., 2019; PADOAN; ALTIMARI; PAGNANELLI, 2019). Esses resíduos são considerados um dos fluxos de resíduos futuros de crescimento mais rápido na categoria de resíduos eletrônicos (ISLAM et al., 2020). Assim que os painéis fotovoltaicos, inversores e sistema de armazenamento de energia da bateria (BESS) atingirem o fim de seus ciclos de vida, eles formarão uma grande quantidade de lixo eletrônico (SALIM et al., 2019).

O painel fotovoltaico é um dos principais tipos de fonte de geração de eletricidade renovável com vantagens ambientais consideráveis durante sua vida funcional, sendo que as novas gerações de painéis resultaram em mais lucratividade e acessibilidade (MAHMOUDI; HUDA; BEHNIA, 2020). A vida útil dos painéis solares varia de 20 a 30 anos, e um projeto de rede de logística reversa apropriado é essencial para gerenciar o fluxo de resíduos de forma eficiente quando essa vida útil expirar (ISLAM et al., 2020). Além disso, pode evitar muitos impactos ambientais graves, adotando-se uma estratégia de tratamento adequada (MAHMOUDI; HUDA; BEHNIA, 2020) evitando-se assim que elementos nocivos, incluindo, por exemplo, metais pesados, possam ser dispersos no meio ambiente por meio de práticas inadequadas de descarte (PADOAN; ALTIMARI; PAGNANELLI, 2019). Assim, tornaram-se novos desafios a recuperação das matérias-primas contidas nesses painéis em fim de vida (SAVVILOTIDOU et al., 2019).

Sem uma estratégia de tratamento adequada, os painéis causam encargos ambientais se descartados em aterros. Além disso, em razão da variedade de materiais valiosos nesses resíduos, causará uma perda econômica significativa quando descartados (MAHMOUDI; HUDA; BEHNIA, 2020). A recuperação ineficiente de materiais provenientes do setor fotovoltaico em fim de vida contribui para a geração maciça de resíduos e



emissões tóxicas e aumenta a dependência de recursos primários não renováveis (LISPERGUER et al., 2020).

Tamaro et al. (2016) alertaram que os painéis fotovoltaicos podem ser vulneráveis a danos acidentais devido a incêndios, choque térmico ou agentes atmosféricos. Nesses casos, os módulos danificados ficam expostos à chuva e os lixiviados resultantes podem atingir facilmente o meio aquático e terrestre. Esses fatos foram corroborados por uma avaliação da literatura realizada por Nain e Kumar (2020b) sobre a degradação de módulos solares que indicou que alguns fatores ambientais, tais como alta irradiação UV, umidade e temperatura, desempenham papéis significativos na degradação do módulo. A análise de risco sugere que a geração de danos fotovoltaicos e ambientais em fim de vida resultante da lixiviação do metal é um dos eventos mais significativos. Danos durante a fabricação e instalação foram identificados como os eventos menos significativos.

A reciclagem de painéis fotovoltaicos desativados pode alimentar a demanda por matérias-primas, tanto na mesma indústria quanto em novos mercados (MAHMOUDI; HUDA; BEHNIA, 2020). A gestão adequada do fim da vida (ou seja, recondicionamento, reutilização ou reciclagem) dessa tecnologia é necessária, não apenas para mitigar os problemas ambientais, mas também para evitar a escassez de materiais críticos para atender às futuras demandas de recursos, impulsionando a economia circular, permitindo uma recuperação de material mais eficaz (SALIM et al., 2019), e podendo ser considerados como uma fonte potencial de materiais valiosos (FIANDRA et al., 2019; FIANDRA; SANNINO; ANDREOZZI; 2023; MATHUR; SINGH; SUTHERLAND, 2020; ZHANG et al., 2020). Economia circular é um sistema econômico baseado em modelos de negócios que substituem o conceito de 'fim de vida' pela redução, reutilização, reciclagem e recuperação de materiais nos processos de produção, distribuição e consumo (KIRCHHERR; REIKE; HEKKERT, 2017).



Segundo Yu et al. (2019), a recuperação de elementos valiosos presentes nos resíduos fotovoltaicos será benéfica tanto por razões econômicas quanto de sustentabilidade. Marwede e Relle (2012) alertaram que a reciclagem de resíduos fotovoltaicos é essencial, não apenas para evitar as emissões de cádmio, mas também para conservar o telúrio, pois vários estudos mostraram que as reservas existentes de telúrio e a sua produção anual poderão limitar o crescimento do mercado fotovoltaico. Nesse sentido, tanto o telúrio quanto o telureto de cádmio (CdTe) são elementos de alto valor comercial, conforme observaram Yue et al. (2019) e Zhang et al. (2014).

As quantidades de PVs em fim de vida (EoL) permaneçam relativamente pequenas no momento, mas, o número deverá crescer drasticamente em futuro próximo, causando preocupações sobre a gestão (MATHUR; SINGH; SUTHERLAND, 2020). Por exemplo, Mahmoudi, Huda e Behnia (2021) projetaram o fluxo de resíduos fotovoltaicos desde o ano de 2001 até o ano de 2058, com base na instalação fotovoltaica histórica nos países da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE). Os resultados revelaram que o volume cumulativo dos resíduos é estimado entre 25 e 28,5 milhões de toneladas (MT), compondo-se no fluxo de resíduos principais, como metais básicos e especiais (4,58 MT) e outros metais (2,37 MT), seguido por resíduos não metálicos (25,69 MT), incluindo vidro (68%) e acetato de vinil etileno (EVA) (26%). A criação de valor bruto dos materiais residuais recuperados (entre 36-42 bilhões de dólares) revelou um cenário promissor que seria um incentivo atraente para envolver todas as partes. Uma política proativa e uma estratégia de gestão são necessárias para criar caminhos econômicos para prosperar nos mercados competitivos dos materiais recuperados, levando à sustentabilidade ambiental e econômica.

O módulo PV c-Si é composto por camadas: vidro, uma moldura externa de alumínio, duas camadas de acetato de vinil etileno (EVA) na parte

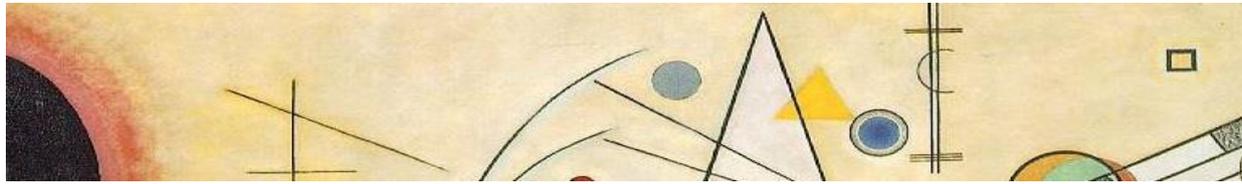


superior e na inferior das células solares de silício, que encapsulam as células, uma caixa de junção e folha PV (geralmente feita de Tedlar) localizada na parte traseira do módulo. No módulo padrão, o componente utilizado é o EVA, visando melhorar a empregabilidade, protegendo o módulo das fontes externas, como absorção de umidade, impurezas e danos físicos e atuando como um componente elétrico para as células. Além disso, o uso de EVA impulsiona a longevidade do módulo, isto gera a garantia do fabricante por 20-25 anos. Normalmente, as folhas traseiras do PV são na cor branca, devido a difusão e a refletividade da luz com essas estruturas. Isso ajuda a orientar a luz solar que atinge as áreas inativas em volta da célula solar, para aumentar a eficiência elétrica e a saída de energia do módulo. Existem dois tipos convencionais de folhas traseiras Tedlar, a TPE e a TPT, que têm uma participação de mercado de, aproximadamente, 80% do PV c-Si dos módulos no mercado em geral (FARRELL et al., 2020).

3. Procedimentos Metodológicos

Este estudo caracteriza-se como descritivo, com abordagens qualitativas, por meio de análise de conteúdo (BARDIN, 2009), e poderá encontrar áreas onde serão necessárias novas pesquisas (WEBSTER; WATSON, 2002).

Foram realizadas pesquisas na base de dados *ScienceDirect* utilizando-se os termos "*photovoltaic waste*" e limitadas por tipo "*review*" e "*research*". Essa base foi escolhida por ter periódicos relevantes, classificados no extrato Qualis A1 (2013-2016) como, por exemplo *Journal of Cleaner Production*; *Renewable Energy*; *Renewable and Sustainable Energy Reviews*; *Resources Conservation and Recycling*; *Waste Management* entre outros, e também por facilidade de acesso. A pesquisa foi realizada entre novembro de 2020 e fevereiro de 2021.



Após a leitura dos títulos para verificar se estes se enquadravam no objeto do estudo, foram lidos os *abstracts* e, posteriormente, os artigos. Depois dessa verificação, foram selecionados os artigos que tratavam de resíduos dos sistemas de geração de energia fotovoltaica. Todos artigos encontrados na pesquisa foram relacionados e avaliados.

4. Resultados e Discussão

Foram selecionados 30 artigos, conforme mostrado no Quadro 1, ano de publicação, título do artigo, autores e país ou região de origem da pesquisa.

Quadro 1 – Artigos selecionados.

Nº	Ano	Título	Autores	Origem
1	2020	Technical challenges and opportunities in realising a circular economy for waste photovoltaic modules	Farrell et al.	Reino Unido
2	2020	Reverse logistics network design for waste solar photovoltaic panels: A case study of New South Wales councils in Australia	Islam et al.	Austrália
3	2020	Preparation of reactive sintering Si ₃ N ₄ -Si ₂ N ₂ O composites ceramics with diamond-wire saw powder waste as raw material	Jin et al.	China
4	2020	Environmental impact assessment of crystalline solar photovoltaic panels' end-of-life phase: open and closed-loop material flow scenarios	Lisperguer et al.	EUA
5	2020	Environmental impacts and economic feasibility of end of life photovoltaic panels in Australia: A comprehensive assessment	Mahmoudi, Huda e Behnia	Austrália
6	2020	Promoting a circular economy in the solar photovoltaic industry using life cycle symbiosis	Mathur, Singh e Sutherland	EUA
7	2020a	Ecological and human health risk assessment of metals leached from end-of-life solar photovoltaics	Nain e Kumar	Índia
8	2020b	Understanding the possibility of material release from end-of-life solar modules: A study based on literature review and survey analysis	Nain e Kumar	Índia
9	2020c	Initial metal contents and leaching rate constants of metals leached from end-of-life solar photovoltaic waste: An integrative literature review and analysis	Nain e Kumar	Índia
10	2020	Application of multi-stage vacuum distillation for secondary resource recovery: potential recovery method of cadmium telluride photovoltaic waste	Zhang et al.	China
11	2019	Recycling perovskite solar cells through inexpensive quality recovery and reuse of patterned indium tin oxide and substrates from expired devices by single solvent treatment	Augustine et al.	Finlândia
12	2019	Photovoltaic waste assessment of major photovoltaic installations in the United States of America	Domínguez e Geyer	EUA
13	2019	The environmental and economic impacts of photovoltaic waste management in Thailand	Faircloth et al.	Tailândia
14	2019	Silicon photovoltaic modules at end-of-life: Removal of polymeric layers and separation of materials	Fiandra et al.	Itália
15	2019	End-of-life photovoltaic modules: A systematic quantitative literature review	Mahmoudi et al.	Austrália
16	2019	Photovoltaic waste assessment: Forecasting and screening of emerging waste in Australia	Mahmoudi, Huda e Behnia	Austrália
17	2019	Recycling of end of life photovoltaic panels: A chemical prospective on process development	Padoan, Altimari e Pagnanelli	Itália
18	2019	Drivers, barriers and enablers to end-of-life management of solar photovoltaic and battery energy storage systems: A systematic literature review	Salim et al.	Austrália
19	2019	Energy efficient production of glass-ceramics using photovoltaic (P/V) glass and lignite fly ash	Savvilitidou et al.	Grécia
20	2019	In situ fabrication of dynamic nano zero-valent iron/activated carbon nanotubes membranes for tellurium separation	Yu et al.	China
21	2019	Controllable fabrication of tendril-inspired hierarchical hybrid membrane for efficient recovering tellurium from photovoltaic waste	Yue et al.	China
22	2018	Projection of the photovoltaic waste in Spain until 2050	Santos e Alonso-García	Espanha
23	2018	Management of end-of-life photovoltaic panels as a step towards a circular economy	Sica et al.	Itália
24	2018	Mullite rod-enhanced porous SiC ceramics prepared at low temperature from photovoltaic waste	Xing, Xiang e Ma	China
25	2017	Photovoltaic waste assessment in Mexico	Domínguez e Geyer	EUA
26	2016	Experimental investigation to evaluate the potential environmental hazards of photovoltaic panels	Tanmaro et al.	Itália
27	2015	Photovoltaic waste assessment in Italy	Paiano	Itália
28	2014	Removal of CdTe in acidic media by magnetic ion-exchange resin: A potential recycling methodology for cadmium telluride photovoltaic waste	Zhang et al.	China
29	2013	Recycling paths for thin-film chalcogenide photovoltaic waste – Current feasible processes	Marwede et al.	Alemanha
30	2012	Future recycling flows of tellurium from cadmium telluride photovoltaic waste	Marwede e Reller	Alemanha

Fonte: Dados da pesquisa.



Quanto a relevância dos artigos, somente um dos artigos, o periódico *Sustainable Production and Consumption* não está classificado no sistema Qualis como A1, mas está na referência B1 em Ciências Ambientais, os demais (29) estão enquadrados no extrato A1 e verificou-se também que o menor fator de impacto é 2.771. A Tabela 1 mostra a classificação dos periódicos e os respectivos fatores de impacto.

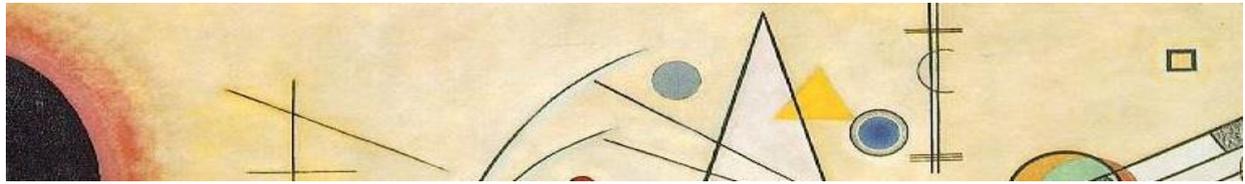
Tabela 1 – Classificação Qualis e fatores de impacto dos periódicos da pesquisa.

Periódicos	Qtde	Qualis (2013-2016)	Fator de Impacto
Resources, Conservation and Recycling	6	Admin. A1; Ciên. Ambientais A1	8,086
Renewable and Sustainable Energy Reviews	4	Admin. A1; Ciên. Ambientais A1	12,110
Journal of Cleaner Production	4	Admin. A1; Ciên. Ambientais A1	7,246
Renewable Energy	3	Admin. A1; Ciên. Ambientais A1	6,274
Waste Management	2	Admin. A1; Ciên. Ambientais A1	5,448
Journal of Hazardous Materials	3	Ciên. Ambientais A1; Engenharias I, II, III A1	9,038
Waste Management & Research	1	Admin. A2; Engenharias I A1	2,771
Sustainable Production and Consumption	1	Admin. B2; Ciên. Ambientais B1	3,660
Environmental Pollution	1	Ciên. Ambientais A1; Engenharias I A1	6,792
Journal of Materials Research and Technology	1	Engenharias II A1	5,289
Solar Energy Materials and Solar Cells	1	Ciên. Ambientais A1; Engenharias III e IV A1	6,984
Solar Energy	1	Ciên. Ambientais A1; Engenharias III e IV A1	4,608
Journal of the European Ceramic Society	1	Engenharias I, II, III A1	4,495
Chemical Engineering Science	1	Engenharias I, II, III A1	3,871
Total de periódicos	30		

Fonte: Dados da pesquisa.

Os 30 artigos tiveram 126 autores, sendo 105 diferentes autores. Os 14 autores que mais contribuíram foram S. Mahmoudi e N. Huda com quatro artigos, seguidos de M. Behnia, P. Nain e A. Kumar com três artigos. Com dois artigos foram M. T. Islam, X. Zhang, A. Domínguez, R. Geyer, T. Zhang, F. Qiu, D. Yang. M. Marwede e A. Reller 2. Os demais 91 autores tiveram a participação em um artigo. Uma constatação é que somente um artigo foi escrito por somente um autor denotando que foram formadas parcerias para desenvolver as pesquisas.

Verificando-se a produção por país envolvido nas pesquisas, o Gráfico 1 mostra essa produção. A China é o país que mais se destacou com a participação em 20% das pesquisas seguida pela Austrália e Itália com 16,7% respectivamente. De uma forma geral, os interesses por esse tema estão difundidos em diversos países, notando-se somente, que dentro da



base pesquisada não foram encontrados artigos produzidos no Brasil. Provavelmente, o tema ainda é muito recente no país, pois, segundo Dias et al. (2017), a capacidade instalada de geração de energia fotovoltaica do país é muito pequena quando comparada com outros países, principalmente em relação aos países europeus.

Gráfico 1 – Quantidade de artigos por país originário da pesquisa.



Fonte: Dados da pesquisa.

Os artigos avaliados foram classificados segundo o objetivo de cada artigo, em quatro categorias: impactos ambientais, economia circular, reciclagem e/ou recuperação de insumos e projeção da quantidade de resíduos.

O tema "impactos ambientais" mostrou cinco pesquisas: avaliação do impacto ambiental da fase de final de vida dos painéis solares fotovoltaicos cristalinos utilizando a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) (LISPERGUER et al., 2020); impactos ambientais e viabilidade econômica de painéis fotovoltaicos em fim de vida útil na Austrália, utilizando a metodologia de ACV e análise de viabilidade econômica empregando o método de Fluxo de Caixa Descontado (MAHMOUDI; HUDA; BEHNIA, 2020); avaliação de risco ecológico e à saúde humana dos metais lixiviados de energia solar fotovoltaica em fim de vida, relatando os conteúdos de metal lixiviado de diferentes resíduos fotovoltaicos (NAIN; KUMAR, 2020a); impactos ambientais e econômicos da gestão de resíduos fotovoltaicos na



Tailândia, com a reciclagem de painéis solares e usando a metodologia ACV (FAIRCLOTH et al., 2019); e investigação para avaliar os potenciais riscos ambientais dos painéis fotovoltaicos produzidos nos últimos 30 anos em diferentes países, por meio da análise de 18 metais liberáveis e também os respectivos efeitos ecotoxicológicos (TAMMARO et al., 2016). É interessante notar que três das cinco pesquisas utilizaram a metodologia ACV para avaliar os impactos ambientais.

Economia circular, como um tema da atualidade, apresentou três pesquisas: promover uma economia circular na indústria solar fotovoltaica usando a simbiose do ciclo de vida para os painéis (MATHUR; SINGH; SUTHERLAND, 2020); economia circular baseada no aumento da eficiência dos recursos e na redução de desperdícios na gestão de painéis fotovoltaicos (SICA et al., 2018); e desafios técnicos e oportunidades na realização de uma economia circular para os resíduos, investigando e estabelecendo processos mais eficientes para reciclar os módulos de silício cristalino (FARRELL et al., 2020). Segundo Farrell et al. (2020), para maximizar a recuperação, valorizar e contribuir positivamente para a economia circular e o ambiente; é necessária uma abordagem com visão de futuro, isto é, projetar resíduos e implementar um bom *design* ecológico para os materiais usados na fabricação de módulos fotovoltaicos. No entanto, a indústria pode não se alinhar com essa abordagem e ainda há uma grande quantidade de módulos que atingirão seu estágio EoL usando o *design* atual.

Reciclagem e/ou recuperação de insumos foi o tema que apresentou mais pesquisas, com 17 artigos, sendo 14 de processos e três revisões de literatura. As perspectivas técnicas das pesquisas avaliam os processos de extração de insumos e a possibilidade de utilização desses insumos. São pesquisas que mostraram as tentativas de soluções para os problemas na geração dos resíduos da tecnologia fotovoltaica com indicação de prováveis usos desses resíduos ou dos insumos extraídos. Além disso, o artigo dos autores Islam et al. (2020) propuseram um sistema de logística reversa para



a Austrália apresentando valores que poderão viabilizar o sistema. Os artigos sobre os processos, objetivos e os respectivos autores estão resumidos no Quadro 2.

Quadro 2 – Artigos sobre processos de recuperação de resíduos.

Nº	Objetivo	Autor(es)/Ano
1	Projeto de rede de logística reversa para resíduos de painéis solares fotovoltaicos, estudo de caso em New South Wales, Austrália, utilizando a quantidade futura (ano 2047) estimada de resíduos	Islam et al., 2020
2	Recuperação de pó de silício proveniente de corte do material para produção de wafers para utilização na fabricação de cerâmica	Jin et al., 2020
3	Liberação de material de módulos solares em fim de vida abordando o fluxo de resíduos fotovoltaicos usando revisão da literatura e pesquisa com os stakeholders da indústria fotovoltaica	Nain e Kumar, 2020b
4	Destilação a vácuo de múltiplos estágios para recuperação de resíduos fotovoltaicos de telureto de cádmio	Zhang et al., 2020
5	Processo de recuperação de óxido de estanho e índio utilizados na fabricação de dispositivos fotovoltaicos de nova geração	Augustine et al., 2019
6	Processo para recuperar materiais valiosos derivados de painéis fotovoltaicos à base de silício no final da vida útil	Fiandra et al., 2019
7	Reciclagem de painéis fotovoltaicos em fim de vida sob a perspectiva química no desenvolvimento de processos	Padoan, Altimari e Pagnanelli, 2019
8	Valorização de resíduos gerados no setor de energia e utilizados na produção de vitrocerâmicas com a utilização de vidro, produzido no setor de energia renovável e da cinza volante de linhita, produzida no setor de energia convencional	Savvilotidouet al., 2019
9	Fabricação controlada de membrana híbrida hierárquica baseada em gavinha para a recuperação de telúrio dos resíduos fotovoltaicos	Yue et al., 2019
10	Membranas híbridas para extração de telúrio de resíduos	Yu et al., 2019
11	Cerâmica porosa aprimorada com bastão de mullita, preparada em baixa temperatura a partir de resíduos fotovoltaicos	Xing, Xiang e Ma, 2018
12	Remoção de telureto de cádmio em meio ácido por resina de troca iônica magnética utilizando uma potencial metodologia de reciclagem para resíduos fotovoltaicos de telureto de cádmio	Zhang et al., 2014
13	Processos de reciclagem de resíduos fotovoltaicos de calcogeneto de película fina por meio de processos viáveis	Marwede et al., 2013
14	Fluxos de reciclagem de telúrio a partir de resíduos fotovoltaicos de telureto de cádmio e uma estimativa numérica global de telúrio que poderá ser recuperado da sucata fotovoltaica para substituir o telúrio primário	Marwede e Reller, 2012

Fonte: Dados da pesquisa.

As três revisões de literatura avaliaram a quantidade de metal e a taxa de lixiviação de metais lixiviados de resíduos fotovoltaicos em fim de vida (NAIN; KUMAR, 2020c) e identificaram lacunas e propuseram novas pesquisas para os módulos fotovoltaicos em fim de vida (MAHMOUDI et al., 2019). A revisão elaborada por Salim et al. (2019) abordou *drivers*, barreiras e fatores facilitadores para o gerenciamento de fim de vida de sistemas de energia solar fotovoltaica e de baterias de armazenamento de energia. Os autores classificaram os *drivers* em três categorias (i) econômica, (ii) social e (iii) ambiental; as barreiras em cinco grupos, (1) política e econômica; (2) social; (3) mercado; (4) ambiental; e (5) infraestrutura de reciclagem; e os facilitadores também em cinco grupos: (1) político e econômico; (2) social; (3) mercado; (4) comportamental; e (5) tecnologia e infraestrutura de



reciclagem. O que se nota é que o mesmo grupo pode ser um fator motivador ou facilitador e, ao mesmo tempo, uma barreira para o gerenciamento dos resíduos.

Pelas perspectivas de geração de resíduos, cinco pesquisas estimaram as quantidades que serão geradas nos próximos anos: Domínguez e Geyer (2019) estimaram em 9,8 milhões de toneladas métricas (Mt) de resíduos fotovoltaicos entre 2030 e 2060 nos Estados Unidos da América (EUA) baseados nos grandes projetos que ocorreram naquele país no final de 2015; Mahmoudi, Huda e Behnia (2019) consideraram a instalação de equipamentos para energia fotovoltaica de 2001 a 2018 na Austrália, e estimaram os resíduos acumulados em 800 mil de toneladas até 2047. Já Santos e Alonso-García (2018) fizeram a projeção dos resíduos fotovoltaicos na Espanha até 2050 como uma massa cumulativa da ordem de 700 mil toneladas; Domínguez e Geyer (2017) fizeram a avaliação dos futuros volumes de resíduos fotovoltaicos no México, por volta de 2045, e concluíram que será de 1,2 milhão de toneladas métricas os resíduos fotovoltaicos. Paiano (2015) avaliou os potenciais resíduos decorrentes do uso e das fases de final de vida dos sistemas de energia fotovoltaicos nos próximos anos e sua eliminação e / ou reciclagem na Itália.

Lisperguer et al. (2020) alertaram que é imprescindível reduzir os encargos ambientais dos atuais processos termoquímicos usados para reciclar silício e começar a considerar o papel fundamental dos princípios *Cradle-to-Cradle* (C2C) (ou do berço ao berço) para o *design* dos painéis dos sistemas de energia solar e de processos de reciclagem, visando a introdução de um sistema ciclo de material em malha fechada (CLMC).

Mahmoudi, Huda e Behnia (2020) concluíram que, no caso da Austrália, plantas com capacidade anual de processamento de 10 mil toneladas de painéis FV EoL não mostrou lucratividade em nenhuma condição, a menos que o governo australiano conceda isenção fiscal durante o período de duração do empréstimo do financiamento para a construção da planta. A



avaliação de viabilidade econômica mostrou alguns números promissores para 20 mil toneladas por ano de fluxo de resíduos fotovoltaicos.

Também na Austrália, Islam et al. (2020) pesquisaram que dos 129 conselhos de estado, o modelo identificou 78 locais otimizados para pontos de coleta de resíduos e sugeriram a implantação de três grandes instalações de reciclagem. Citaram que foi a primeira tentativa de projetar uma rede de logística reversa (RL) otimizada na Austrália com foco em resíduos de equipamentos fotovoltaicos.

Nain e Kumar (2020a) ressaltaram a urgência de desenvolver um sistema adequado para coleta e gerenciamento de módulos em fim de vida, pois as crianças têm maior risco de saúde, principalmente devido ao chumbo. Alguns metais, tais como cádmio (Cd), chumbo (Pb), índio (In), molibdênio (Mo) e telúrio (Te), apresentam riscos máximos para as subpopulações infantis e adultas por meio da via dérmica com origem no solo e seguida pela via de digestão.

Zhang et al. (2020) propuseram um método para a separação e recuperação de metais raros de resíduos de telureto de cádmio por meio de fundição de enxofre e destilação a vácuo. Essa tecnologia está fortemente alinhada com o princípio de “reduzir, reutilizar e reciclar” para resíduos sólidos e fornece uma base para o desenvolvimento sustentável da indústria fotovoltaica. Segundo Yu et al. (2019), o telureto de cádmio é um material semicondutor com alto valor comercial. Jin et al. (2020) sugeriram uma forma alternativa para a utilização de resíduos da indústria fotovoltaica para preparar compósitos cerâmicos a um custo relativamente baixo. Augustine et al. (2019) foram mais contundentes e alertaram que a reciclagem é um procedimento que consome muita energia em comparação com a estratégia de reutilização. Sugeriram então que a reutilização sistemática de componentes essenciais de dispositivos fotovoltaicos é uma opção muito melhor porque economiza a energia que vem incorporada na fabricação do



material, purificação, padronização e re-fabricação dos componentes para os dispositivos.

Domínguez e Geyer (2017) sugeriram que, no México, utilizando uma tecnologia de reciclagem adequada, cerca de 920 mil toneladas métricas de resíduos fotovoltaicos poderiam ser recicladas, recuperando metais preciosos e valiosos como prata, ouro, gálio, índio, cádmio e telúrio.

Paiano (2015) alertou também que insumos com valores elevados, como metais e metais raros, são utilizados em alguns países e produzem resíduos fotovoltaicos em outros, devido às dificuldades de destinação. Portanto, é necessária uma política global para estabelecer e monitorar estratégias ambientais e econômicas adequadas para evitar efeitos de distorção. Santos e Alonso-García (2018) mencionaram que, além dos benefícios ambientais, a gestão de resíduos fotovoltaicos implicará no desenvolvimento de um novo setor industrial, com os consequentes benefícios econômicos e sociais.

5. Conclusão

O objetivo da pesquisa foi verificar na literatura recente como está sendo tratada a produção, o gerenciamento e a valorização de resíduos dos sistemas fotovoltaicos de geração de energia e as possíveis propostas de solução para esses problemas. Os 30 artigos encontrados foram classificados em quatro categorias: impactos ambientais, economia circular, reciclagem e/ou recuperação de insumos e projeção da quantidade de resíduos.

Os artigos mostraram tanto a preocupação com os impactos ambientais que o uso da tecnologia trará no futuro, a projeção das quantidades de resíduos quanto as sugestões para tornar essa tecnologia uma fonte de matérias-primas seja dentro de uma economia circular ou sugerindo processos de extração dos insumos que estarão disponíveis após terminar a vida útil dos equipamentos. Também exploraram a revisão de



literatura com o objetivo de verificar as barreiras e lacunas citadas nessas literaturas e possibilidades de novas pesquisas. Portanto, o que se observa, é os pesquisadores buscando alternativas para minimizar os problemas que virão com o uso da tecnologia.

Mahmoudi, Huda e Behnia (2019) sugeriram que as pesquisas futuras deverão se concentrar na previsão dos fluxos de resíduos fotovoltaicos, no desenvolvimento de tecnologias de reciclagem, na logística reversa e nas políticas de cada país consumidor de PV. Na mesma linha, Lisperguer et al. (2020) sugeriram que as pesquisas futuras deveriam avaliar os impactos ambientais de EoL para os projetos de painéis fotovoltaicos, sistema de transporte de energia e metodologias alternativas de reciclagem.

Padoan, Altimari e Pagnanelli (2019) apresentaram um julgamento positivo dos processos de uso dos resíduos e citaram que, mesmo considerando os aspectos negativos gerados pela reciclagem de painéis fotovoltaicos, os processos são convenientes, pois a utilização de energia em um processo de reciclagem é menor do que a fabricação de um novo painel.

Sica et al. (2018) alertaram que, independente da tecnologia empregada, é importante observar que substâncias consideradas tóxicas ao meio ambiente e a saúde humana, como Cd e Pb, são utilizadas em pequenas quantidades na fabricação de módulos fotovoltaicos. Mas, em contrapartida, a quantidade significativa de resíduos que serão gerados no futuro impõe a necessidade de monitorar o uso de tais substâncias para evitar que representem ameaças à saúde humana e ao meio ambiente.

Este estudo tem como limitante, a consulta somente a uma base de dados (*ScienceDirect*), o que limita as conclusões aqui expressas, mas não deixa de ser relevante, pois a maioria dos periódicos consultados está classificada no extrato Qualis A1, período 2013-2016 e com fator de impacto superior a 2.770. Sugere-se a extensão desta pesquisa utilizando outras bases, como, por exemplo *Scopus* e *Web of Science*, e comparar com os resultados aqui encontrados.



Referências

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14001** Sistemas de gestão ambiental – Requisitos com orientações para uso. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

AUGUSTINE, B. et al. Recycling perovskite solar cells through inexpensive quality recovery and reuse of patterned indium tin oxide and substrates from expired devices by single solvent treatment. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 194, p. 74-82, 2019.

BARDIN, L. **Análise de conteúdo**, 5a ed. Lisboa: Edições 70. Lda, 2009.

DIAS, C. L. A. et al. Performance estimation of photovoltaic technologies in Brazil. **Renewable Energy**, v. 114, part B, p. 367-375, 2017.

DOMÍNGUEZ, A.; GEYER, R. Photovoltaic waste assessment in Mexico. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 127, p. 29-41, 2017.

DOMÍNGUEZ, A.; GEYER, R. Photovoltaic waste assessment of major photovoltaic installations in the United States of America. **Renewable Energy**, v. 133, p. 1188-1200, 2019.

FAIRCLOTH, C. C. et al. The environmental and economic impacts of photovoltaic waste management in Thailand. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 143, p. 260-272, 2019.

FARRELL, C. C. et al. Technical challenges and opportunities in realising a circular economy for waste photovoltaic modules. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 128, 109911, 2020.

FIANDRA, V. et al. Silicon photovoltaic modules at end-of-life: Removal of polymeric layers and separation of materials. **Waste Management**, v. 87, p. 97-107, 2019.

FIANDRA, V.; SANNINO, L.; ANDREOZZI, C. Photovoltaic waste as source of valuable materials: A new recovery mechanical approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 385, 135702, 2023.

GARLET, T. B. et al. Paths and barriers to the diffusion of distributed generation of photovoltaic energy in southern Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 111, p. 157-169, 2019.

ISLAM, T. et al. Reverse logistics network design for waste solar photovoltaic panels: A case study of New South Wales councils in Australia. **Waste Management & Research**, v.28, p. 1-10, 2020.



JIN, X. et al. Preparation of reactive sintering Si₃N₄-Si₂N₂O composites ceramics with diamond-wire saw powder waste as raw material. **Journal of Hazardous Materials**, v. 400, p. 1-9, 2020.

KIRCHHERR, J.; REIKE, D. HEKKERT, M. Conceptualizing the circular economy: an analysis of 114 definitions. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 127, p. 221-232, 2017.

KRAAN, O. et al. The influence of the energy transition on the significance of key energy metrics. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 111, p. 215-223, 2019.

LISPERGUER, R. C. et al. Environmental impact assessment of crystalline solar photovoltaic panels' end-of-life phase: open and closed-loop material flow scenarios. **Sustainable Production and Consumption**, v. 23, p. 157-173, 2020.

MAHMOUDI, S. et al. End-of-life photovoltaic modules: a systematic quantitative literature review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 146, p. 1-16, 2019.

MAHMOUDI, S.; HUDA, N.; BEHNIA, M. Photovoltaic waste assessment: forecasting and screening of emerging waste in Australia. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 146, p. 192-205, 2019.

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, 120996, p.1-20, 2020.

MAHMOUDI, S.; HUDA, N.; BEHNIA, M. Critical assessment of renewable energy waste generation in OECD countries: decommissioned PV panels. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 164, p. 1-12, 2021.

MARWEDE M. et al. Recycling paths for thin-film chalcogenide photovoltaic waste – Current feasible processes. **Renewable Energy**, v. 55, p. 220-229, 2013.

MARWEDE, M.; RELLER, A. Future recycling flows of tellurium from cadmium telluride photovoltaic waste. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 69, p. 35-49, 2012.

MATHUR, N.; SINGH, S.; SUTHERLAND, J. W. Promoting a circular economy in the solar photovoltaic industry using life cycle symbiosis. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 155, 104649, p. 2020.



NAIN, P.; KUMAR, A. Ecological and human health risk assessment of metals leached from end-of-life solar photovoltaics. **Environmental Pollution**, v. 267, 115393, p. 1-13, 2020a.

NAIN, P.; KUMAR, A. Understanding the possibility of material release from end-of-life solar modules: A study based on literature review and survey analysis. **Renewable Energy**, v. 160, p. 903-918, 2020b.

NAIN, P.; KUMAR, A. Initial metal contents and leaching rate constants of metals leached from end-of-life solar photovoltaic waste: an integrative literature review and analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 119, 109592, p. 1-20, 2020c.

PAIANO, A. Photovoltaic waste assessment in Italy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 41, p. 99-112, 2015.

PADOAN, F. C. S. M.; ALTIMARI, P.; PAGNANELLI, F. Recycling of end of life photovoltaic panels: a chemical prospective on process development. **Solar Energy**, v. 177, p. 746-761, 2019.

RABAIA, M. K. H.; SEMERARO, C.; OLABI, A. G. Modeling photovoltaics' waste projection and waste management optimization. **Journal of Cleaner Production**, v. 388, 135947, 2023.

SALIM, H. K. et al. Drivers, barriers and enablers to end-of-life management of solar photovoltaic and battery energy storage systems: a systematic literature review. **Journal of Cleaner Production**, v. 211, p. 537-554, 2019.

SANTOS, J. D.; ALONSO-GARCÍA, M. C. Projection of the photovoltaic waste in Spain until 2050. **Journal of Cleaner Production**, v. 196, p. 1613-1628, 2018.

SANTOS, M. R.; BRITO, J. L. R.; SHIBAO, F. Y. Economia circular e a energia solar fotovoltaica. *COLÓQUIO – Revista do Desenvolvimento Regional*, v. 19, n. 1, p. 293-311, 2022a.

SANTOS, M. R.; BRITO, J. L. R.; SHIBAO, F. Y. Academic approach on solar photovoltaic energy in Brazil. **Scientific Journal of Applied Social and Clinical Science**, v. 2, n. 21, p.1-12, 2022b.

SAVVILOTIDOU, V. et al. Energy efficient production of glass-ceramics using photovoltaic (P/V) glass and lignite fly ash. **Waste Management**, v. 90, p. 46-58, 2019.



SICA, D. et al. Management of end-of-life photovoltaic panels as a step towards a circular economy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 2934-2945, 2018.

TAMMARO, M. et al. Experimental investigation to evaluate the potential environmental hazards of photovoltaic panels. **Journal of Hazardous Materials**, v. 306, p. 395-405, 2016.

XING, Z.; XIANG, D.; MA, Y. Mullite rod-enhanced porous SiC ceramics prepared at low temperature from photovoltaic waste. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 38, n. 15, p. 4842-4849, 2018.

WEBSTER, J.; WATSON, R. T. Analyzing the past to prepare for de future: writing a literature review. **MIS Quarterly**, v. 26, n. 2, p. 13-23, 2002.

YU, H. et al. In situ fabrication of dynamic nano zero-valent iron/activated carbon nanotubes membranes for tellurium separation. **Chemical Engineering Science**, v. 205, p. 278-286, 2019.

YUE, X. et al. Controllable fabrication of tendril-inspired hierarchical hybrid membrane for efficient recovering tellurium from photovoltaic waste. **Journal of Cleaner Production**, v. 230, p. 966-973, 2019.

ZHANG, T. et al. Removal of CdTe in acidic media by magnetic ion-exchange resin: a potential recycling methodology for cadmium telluride photovoltaic waste. **Journal of Hazardous Materials**, v. 279, p. 597-604, 2014.

ZHANG, X. et al. Application of multi-stage vacuum distillation for secondary resource recovery: potential recovery method of cadmium telluride photovoltaic waste. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 9, n. 4, p. 6977-6986, 2020.