

Revisão sistemática da literatura dos métodos de valorização de resíduos fotovoltaicos

Systematic literature review of photovoltaic waste value methods

OLIVEIRA, Natalia de Souza Barbosa¹; DA COSTA, Bruno Barzellay Ferreira²; PINTO, Augusto Eduardo Miranda³

nsbo1902@gmail.com¹; bruno.barzellay@macae.ufrj.br²; augustoepinto@gmail.com³.

¹ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Instituto Federal Fluminense, Macaé, Rio de Janeiro.

² Instituto Politécnico, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Macaé, Rio de Janeiro.

³ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Instituto Federal Fluminense, Macaé, Rio de Janeiro.

Informações do Artigo

Palavras-chave:
Descarte;
Fotovoltaico;
Reciclagem;
Reutilização.

Keywords:
Disposal;
Photovoltaic;
Recycling;
Reuse.

Resumo:

O sistema fotovoltaico se tornou um elemento fundamental do desenvolvimento sustentável, sendo um oportuno substituto aos modelos fósseis tradicionais. No entanto, o crescimento exponencial deste sistema eleva o risco de descarte inadequado dos seus resíduos que, atualmente, em sua maioria, são descartados indevidamente em aterros, o que pode gerar danos ao meio-ambiente e à saúde humana, além do desperdício de materiais escassos e com valor financeiro agregado. Isto evidencia uma escassez de tecnologias em escala comercial para tratar especificamente este material, de legislações e de pesquisas acadêmicas. Assim, o objetivo deste estudo é desenvolver uma revisão sistemática de literatura por meio do protocolo Prisma Sc-R, acompanhada de uma análise bibliométrica para identificar, entre outros, os autores e as instituições mais relevantes neste campo de conhecimento. Além disso, foi realizada a análise das principais técnicas de reciclagem e de reutilização das placas fotovoltaicas, o que resultou em um resumo acompanhado de um diagrama com sugestões de técnicas e de materiais recuperados em cada etapa do processo. Ao final, apresentam-se propostas de melhorias sobre o tema, o que envolve desde a utilização de materiais com maior facilidade de recuperação até o desenvolvimento de novas pesquisas e de incentivo governamental e legislativo.

Abstract

The photovoltaic system has become a fundamental element of sustainable development, being an opportune replacement for traditional fossil models. However, the exponential growth of this system increases the risk of inadequate disposal of its waste, which is currently mostly disposed of improperly in landfills, which can cause damage to the environment and human health, in addition to waste of materials. scarce and with added financial value. This highlights a lack of commercial-scale technologies to specifically treat this material, legislation and academic research. Thus, the objective of this study is to develop a systematic literature review using the Prisma Sc-R protocol, accompanied by a bibliometric analysis to identify, among others, the

most relevant authors and institutions in this field of knowledge. Furthermore, an analysis of the main recycling and reuse techniques for photovoltaic panels was carried out, which resulted in a summary accompanied by a diagram with suggestions for techniques and materials recovered at each stage of the process. At the end, proposals for improvements on the topic are presented, which range from the use of materials that are more easily recovered to the development of new research and government and legislative incentives.

1. Introdução

A geração e o consumo de energia é um tópico desafiador no contexto mundial, por ser um elemento imprescindível para o crescimento, mas que deve estar em consonância com o meio-ambiente [1]. Assim, o sistema fotovoltaico de geração de energia elétrica tem sido considerado um elemento fundamental para o desenvolvimento sustentável [2], uma vez que vincula vantagens econômicas e técnicas (como a escalabilidade e a acessibilidade) [3] ao benefício ambiental – é uma fonte renovável de energia [4].

Estas razões contribuíram para a popularização deste sistema, cuja vida útil gira em torno de 25 a 30 anos [5,6], devendo ocasionar um grande volume de resíduos nas próximas décadas que precisarão ser corretamente tratados para que o sistema fotovoltaico mantenha a sustentabilidade [7]. A destinação inadequada destes resíduos pode gerar perdas de elementos raros ou escassos na natureza [8,9], além de causar exposição dos seres vivos a substâncias e elementos químicos perigosos [10]. Atualmente, a maioria dos resíduos fotovoltaicos são destinados para aterros [11], com pouca legislação vigente sobre o assunto [12].

Diante disto, este artigo apresenta uma revisão sistemática da literatura visando compreender o cenário de pesquisas sobre o tema, identificando as principais metodologias de destinação destes materiais após a vida útil (principalmente a reciclagem, a reutilização e a recuperação), verificando os parâmetros ambientais, técnicos e econômicos.

Por meio desta revisão, busca-se fornecer uma visão geral dos avanços em relação a reutilização e a reciclagem das placas fotovoltaicas, de forma sintetizada, para contribuir na resolução do desafio do descarte adequado dos resíduos fotovoltaicos.

2. Metodologia

Este trabalho trata-se de uma revisão sistemática – método de investigação científica que busca analisar estudos primários sobre determinada temática, utilizando fontes de dados da literatura [13], sendo um recurso que amplia o potencial de busca, agregando de forma organizada uma quantidade considerável de resultados sobre um tema [14].

Por ser um método de investigação que reúne as informações das pesquisas mais atuais, é uma metodologia fundamental para a elaboração do estado da arte e concentrar de forma objetiva as principais e mais recentes informações sobre esta temática auxiliando a realização de pesquisas futuras.

Buscou-se apresentar as mais modernas pesquisas sobre as técnicas de recuperação, reciclagem e descarte das placas fotovoltaicas após a vida útil, analisando o viés econômico de aplicabilidade destas tecnologias.

O processo de pesquisa foi seccionado em quatro etapas: identificação da questão de investigação, busca por estudos pertinentes, seleção dos artigos e análise do estado da arte. A questão norteadora foi sobre as técnicas do processo de reciclagem do sistema fotovoltaico após o fim da vida útil. O procedimento de busca e seleção dos estudos seguiu as recomendações do protocolo

PRISMA-ScR 2020, com o objetivo de auxiliar o pesquisador no planejamento e condução da revisão sistemática de garantindo que todas as informações necessárias sejam contempladas, que novas pesquisas possam ser acrescentadas e que outros cientistas possam replicar o processo de busca [15].

O rastreio dos artigos foi realizado em dezembro de 2023 e validado em março de 2024 (para identificar novas publicações que não foram abordadas na primeira busca) por meio do Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), no qual foi consultado o acervo das bases de dados Scopus e Capes.

A base de dados Scopus - foi escolhida por conter amplo conteúdo sobre a visão científica das energias renováveis no setor industrial e da utilização de materiais de terceira geração na produção de energia [16]- e CAPES, foi selecionada por ser referência em pesquisa no Brasil, com artigos qualificados no âmbito nacional e no exterior, auxiliando na compreensão do tema no país [17].

Para a seleção dos artigos, foram utilizadas as palavras-chaves “*photovoltaic*”, “*residue*” e “*recycling*” e o recorte temporal de 2019 a 2024 (período com maior concentração de pesquisas e com informações mais atualizadas sobre o tema), conforme indicado no quadro 1.

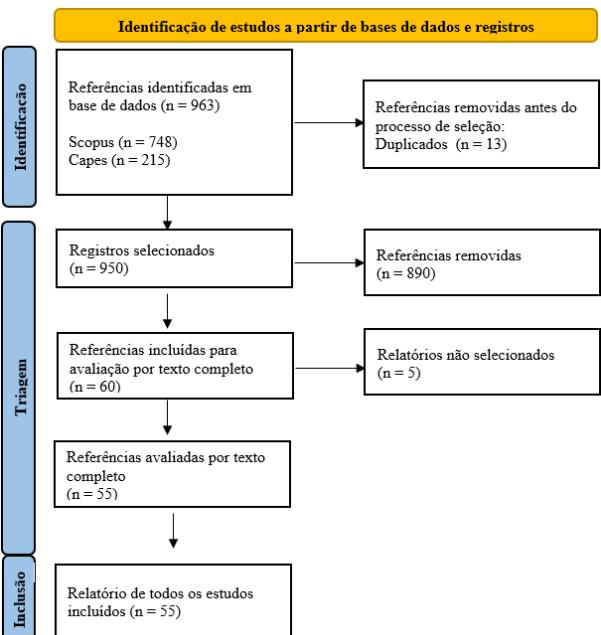
Quadro 1 – Critérios para a seleção dos artigos

Questão norteadora	Base de dados	Palavras-chave	Recorte temporal
Como reciclar tecnicamente os resíduos fotovoltaicos após a vida útil?	Scopus	“ <i>photovoltaic</i> ” and “ <i>residue</i> ” and “ <i>recycling</i> ”	2019 - 2024
	Capes	“ <i>photovoltaic</i> ” and “ <i>residue</i> ” and “ <i>recycling</i> ”	2019 - 2024

Fonte: Próprio autor

Os critérios de inclusão adotados para a seleção foram os artigos e as revisões disponíveis no formato eletrônico, de acesso livre ou permitido pelo periódico capes, nos idiomas português, inglês e espanhol. Os artigos irrelevantes e a versão duplicada dos artigos presentes em ambas as bases foram excluídos. O processo de seleção dos artigos pelo protocolo PRISMA-ScR 2020 é apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Protocolo PRISMA



Fonte: Adaptado de Page et al. (2020) [18]

Os artigos foram escolhidos após a leitura dos títulos e dos resumos, desconsiderando aqueles que apesar de satisfazerem as palavras-chaves abordavam o tema de forma ampla, selecionando aqueles que explicavam sobre alguma técnica de reutilização ou de reciclagem das placas fotovoltaicas.

Os 55 trabalhos resultantes da análise foram agrupados em categorias temáticas buscando responder à questão norteadora da pesquisa: quais as principais técnicas atuais da reciclagem das placas fotovoltaicas? Além disso, procurou-se compreender a viabilidade econômica e a aplicabilidade dos resíduos gerados em outras fontes de energia.

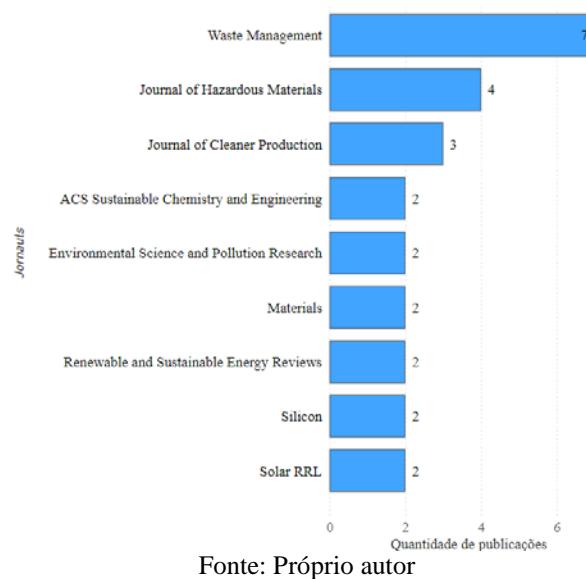
3. Análise bibliométrica

Após a seleção dos 55 artigos científicos, sendo 53 da base *scopus* e 2 da base capes, foi realizada a bibliometria deste material, por meio do software *VosViewer*, com apoio gráfico do *Power BI* para maior compreensão das informações.

3.1 Journals mais relevantes

Os artigos selecionados foram publicados por 38 *journals* distintos, com uma média de 1,45 publicações por *journal*, revelando uma variedade de fontes. Ao todo, 9 revistas apresentaram mais de uma publicação, sendo as fontes com maior quantidade de publicações: ‘*Waste Management*’ com 7 publicações, ‘*Journal of Hazardous Materials*’ com 4 publicações e ‘*Journal of Cleaner Production*’ com 3 publicações.

Figura 2 – *Journals* com mais publicações sobre o tema



3.2 Autores mais relevantes

Os artigos selecionados foram publicados por 227 autores distintos, sendo apenas 6 artigos de autoria única e em média existem 4,13 coautores por documento. Dos 227 autores, 14 tiveram pelo menos 2 publicações e 5 foram responsáveis por no mínimo 3 materiais acadêmicos, sendo os mais relevantes para a pesquisa: Wenhui Ma (o autor com mais publicações, 4), Shaoyuan Li e Rong Deng (o autor com mais citações,

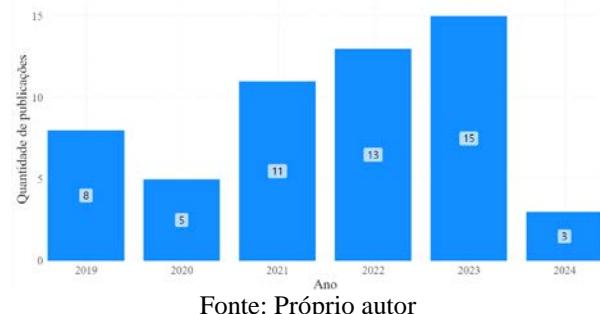
305). Dos 5 autores mais relevantes, 3 tiveram publicações conjuntas entre si e os outros 2 também elaboração de material juntos.

Em relação às citações, Rong Deng foi o autor com o maior número de citações, 305; seguido por Nathan Chang, Chee Mun Chong e Zi Ouyang (ambos com 257 citações). Em relação ao ‘total link strength’ (que demonstra o grau de correlação entre os pesquisadores), os autores mais relevantes foram: Wenhui Ma (27 conexões), Shaoyuan Li (22 ligações) e Rong Deng (18 conexões).

Dessa forma, considerando os três parâmetros: quantidade de publicações, de citações e de conexões, 23 autores foram considerados os mais relevantes, conforme o apêndice B indica: as linhas demostram as conexões entre os autores (pesquisas publicadas em conjunto).

O quantitativo de publicações obteve uma taxa média de 15,03% ao ano (desconsiderada a variação entre 2023 e 2024 por conta da vigência do ano atual – apesar da pesquisa ter sido realizada em 2023, foram encontrados artigos publicados com o ano de 2024) revelando uma tendência cada vez maior de conteúdo acadêmico relacionado a este tema.

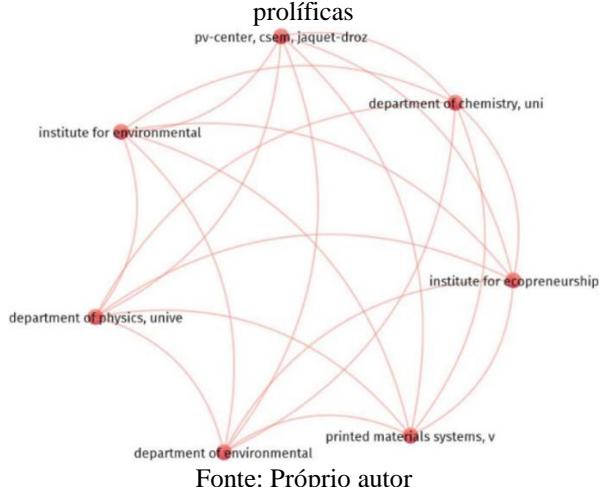
Figura 3 – Quantidade de artigos por ano de publicação



3.3 Instituições mais relevantes

O material selecionado composto por 55 artigos foi elaborado por 117 organizações distintas, sendo que 15 instituições produziram pelo menos 2 artigos, e destas 7 apresentaram conexões (publicaram em parcerias pelo menos 1 material acadêmico), conforme indica a Figura 4.

Figura 4 – Relações entre as instituições mais prolíficas



Fonte: Próprio autor

3.4 Países mais relevantes

Os artigos selecionados foram produzidos por 20 países, sendo que 9 elaboraram ao menos 2 artigos, 5 nações foram responsáveis por pelo menos 4 materiais científicos, caso da China com 18 artigos (a maior exportadora de material acadêmico – mais de 32% do conteúdo analisado), seguidos da Austrália e da Índia com 5 publicações cada.

A análise realizada no Power BI por meio de um *treemap* - quanto maior o retângulo pertencente àquela nação, maior a quantidade de materiais publicados por aquele país – demonstra a predominância do continente asiático (nos tons de azul), seguido da Europa (tons de verde), do continente americano (tons de amarelo) e a Oceania (em rosa), conforme figura 5.

Figura 5 – Países com mais publicações



Fonte: Próprio autor

O Brasil possui apenas 1 publicação e juntamente com os Estados Unidos (o país do continente americano com mais publicações – 4), com a Argentina, a Colômbia e o México foram responsáveis pelas 8 publicações do continente americano. O destaque ficou para o continente asiático com 26 artigos (incluindo a Turquia que pertence a dois continentes), seguido pela Europa com 16 materiais desenvolvidos, o que pode ser visualizado na Figura 5. A Oceania produziu 5 artigos, enquanto o Oriente Médio e o continente africano não tiveram participações, considerando as publicações selecionadas para esta pesquisa. Além disso, 5 países da Europa e 2 nações asiáticas tiveram publicações correlatas, conforme apêndice B.

3.5 Palavras-chave mais utilizadas

A seleção de 55 artigos contém ao todo 932 palavras-chaves, destas 198 aparecem em pelo menos 2 artigos, 95 constam em no mínimo 3 publicações, 48 estão presentes em pelo menos 4 artigos e 32 estão em no mínimo 5 artigos diferentes, termos apresentados no apêndice C.

Por meio da figura 6, é possível verificar que as palavras mais recorrentes foram: “recycling” em 29 publicações diferentes (mais de 50% do material selecionado), “silicon” com 19 ocorrências e “photovoltaic cells”, em 14 publicações distintas. Estas palavras eram esperadas pois faziam parte das palavras-chaves pesquisadas originalmente nas bases de dados.

Nesta mesma análise foi possível verificar a presença de quatro clusters, indicando palavras com maior proximidade – geralmente presentes na mesma publicação. A rede de palavras também indica a quantidade de vezes que foram utilizadas simultaneamente: quanto maior o número de linhas entre elas, maior a frequência com que foram utilizadas simultaneamente; como, a palavra “recycling” que é a mais recorrente está relacionada com todas as outras 31 palavras mais recorrentes, conforme indica o apêndice D.

4. Importância do descarte correto de resíduos fotovoltaicos

A tendência de crescimento de resíduos fotovoltaicos representa um grande impacto econômico por conta da presença de metais raros e de ampla aplicação como silício, que precisam ser corretamente destinados para que não gerem transtornos ambientais e sociais, especialmente à saúde das pessoas [19].

Com a ausência de tecnologias sobre o descarte correto destes resíduos, a maior parte deste material têm sido alocado em aterros sanitários [20,21] - junto a dejetos domésticos; causando perda de recursos consideráveis e danos ambientais ao solo e ao ar [12,22,23] com a lixiviação de substâncias perigosas [24] - ou incinerados com pouco controle da eliminação dos gases, lançando na atmosfera gases tóxicos e nocivos [2].

O descarte incorreto em aterros gera uma série de impactos ambientais, como a erosão e a contaminação do solo e do lençol freático com materiais poluentes [24] (metais pesados e substâncias orgânicas) [25], além de afetar a flora e a fauna [26]. Ademais, a recuperação de metais raros e de alto valor agregado reduz a necessidade de extração destes materiais, o que é um benefício ambiental [28].

O resíduo eletrônico confere certo risco à saúde humana [23] e a presença de elementos tóxicos como o cádmio e o chumbo nas placas fotovoltaicas [29] também deve ser considerado. Alguns pesquisadores alertaram sobre o risco à saúde humana [7] [29], pois o descarte irregular de alguns metais pode gerar danos cerebrais, renais, pulmonares e dermatológicos [27].

Conjuntamente, a reciclagem das placas fotovoltaicas, concede vantagens econômicas: o sistema é composto por metais com alto valor agregado, como o silício, que pode ser reutilizado em outras aplicações como em ligas de metais e aplicações eletrônicas; e por materiais que possuem reciclagem e reutilização convencionais (alumínio, por exemplo) [4]. À vista disto, este processo garante valor de mercado a

materiais que até então seriam descartados em aterros, e por outro lado, reduz os custos na produção do sistema fotovoltaico, uma vez que estes materiais possuem custo menor que os materiais virgens [23].

Sob este aspecto financeiro, Fiandra et al. [23] realizaram dois comparativos principais: o valor agregado do material virgem comparado ao do material reutilizado/reciclado, e o custo para recuperar este material com o valor que possui no mercado – a pesquisa indicou que a reutilização pode trazer aumento de receita para empresas do setor [23].

Deste modo, um sistema de gestão que compreenda todas as etapas do processo de descarte dos resíduos é fundamental para compreender os impactos que este processo pode ter à saúde e ao meio ambiente [24].

5. Principais técnicas de reciclagem, reutilização e recuperação dos resíduos fotovoltaicos

Para facilitar a compreensão das técnicas analisadas na revisão da literatura, optou-se por separar os processos, por partes da estrutura, apresentando os principais métodos sugeridos (que podem ser aplicados de forma conjunta ou individualmente) e os materiais recuperados; conforme descrito no Apêndice E.

5.1 Retirada da armação de fixação e framework

O primeiro procedimento para a destinação correta dos resíduos fotovoltaicos é a retirada da armação de fixação e estrutura externa que envolve as placas fotovoltaicas [2,12], formada pelas esquadrias de alumínio e caixas de junção [24], também conhecida como *framework*.

O método mais comum é a remoção manual [23], porém, Guo et al. [4] comentam sobre o emprego de um sistema automático de desmontagem para a remoção de estruturas e cabos de alumínios em painéis fotovoltaicos, o que aumenta a eficiência e qualidade da operação, bem como reduz os custos. Em

outra pesquisa, Ramos et al. [30] citam a utilização de uma máquina de corte para separar a célula de silício coberta com vidro da armação de alumínio e conectores antes do processo de pirólise para a recuperação de metais.

O alumínio corresponde em torno de 10% do peso da placa fotovoltaica [2] possui alto valor agregado na reciclagem [2] e é um material convencional [23] que possui técnicas simples de reutilização. Inclusive, Deng et al. [12] abordam sobre a recuperação do alumínio e do vidro em um procedimento mais acessível e de baixo custo – uma abordagem *downcycling* – em que o vidro e o alumínio não voltariam necessariamente ao sistema fotovoltaico, mas poderia ter outras aplicações com menor valor agregado. Li et al. [32] apresentam a aplicação do alumínio reciclado em ligas de silício-alumínio.

5.2 Recuperação do vidro

Além do alumínio, o outro material de reciclagem convencional e com grande valor agregado é o vidro [23,25], responsável por 75% do peso da placa fotovoltaica [7,33] e que pode ser recuperado por processos mecânicos e/ou térmicos [23].

Gahlot et al. [34] realizaram a remoção da camada mais externa do vidro com a imersão da placa em água quente a 80°C, enfraquecendo a ligação entre a camada de EVA e a folha de vidro facilitando a remoção do vidro temperado por meio do descamamento manual.

Dobra et al. [35] utiliza um método térmico para a retirada da folha de vidro do encapsulante; onde a placa sem o *framework* é colocada em uma bandeja de cerâmica no forno mufla por 10 minutos a uma temperatura constante de 170°C, reduzindo a rigidez da folha de vidro que pode ser removida manualmente com uma pinça, obtendo um material que pode ser utilizado como matéria-prima secundária. Porém, para a geração de um vidro plano com alta qualidade é necessário remover os polímeros agregados ao vidro, que este material fica encapsulado ao EVA [2,4]. Por isto é

realizado um tratamento de delaminação térmica para a remoção praticamente completa dos polímeros e a possibilidade de separação manual de vidro e células [35]. Este tratamento térmico também é indicado por Sasai et al. [36] para a retirada de fuligem, através do derretimento da placa, seguido de uma reação de oxidação no reator.

Uma outra possibilidade apresentada por Deng et al. [12] é a Trituração da peça por meio de motor de dois rotores seguido de fresagem com martelo e do processo hidrotérmico para separar o vidro do EVA, com a vantagem da utilização do método de corte quente com faca em alta frequência, que separa o vidro em uma única etapa.

Em relação à aplicação do material reciclado, Ramos et al. [30] cita o alto potencial de reciclagem do vidro, em torno de 80%, por meios de processos físicos, sendo um dos itens da placa fotovoltaica com maior taxa de recuperação. Zhao et al. [22], Zhao et al. [20] e Macalová et al. [37] abordam uma aplicação do pó de vidro fotovoltaico – que é extremamente difícil de degradar - em um material ligante aplicado em cimento, com melhor desempenho e menor consumo de energia, que quando comparado ao cimento tradicional – o que garante retorno financeiro considerável. Outras aplicações com os resíduos de vidros fotovoltaicos são: a confecção de vidros inorgânicos com resíduos de vidros fotovoltaicos [38] e a fabricação de cerâmicas [33].

5.3 Degradação do EVA

Após a retirada da estrutura de alumínio e da folha de vidro, o próximo passo é a remoção do EVA para acessar os metais presentes na placa fotovoltaica [2]. Para remover o encapsulamento, várias pesquisas indicam a pirólise - tratamento termoquímico que utiliza substâncias químicas a altas temperaturas para a degradação de determinado material – para a retirada do etileno-vinil-acetato (EVA) [24].

Tao et al. [41], Mishra et al. [27] e Deng et al. [12] apresentam a pirólise como uma tecnologia de separação de substâncias

orgânicas que pode ser utilizada para a desagregação do EVA das placas que o método convencional de solvente orgânico possui um longo tempo de reação, baixa eficiência da remoção e gera um líquido residual que requer tratamento específico [41] – Mishra et al. [27] realiza esse processo por meio da inserção das placas fotovoltaicas no vácuo e em um reator de leito fluidizado ou em forno para a obtenção de 100% do vidro e 80% do silício; enquanto Deng et al. [12] aborda a utilização da pirólise com ácido acético, propano, propeno, etano, metano e outros óleos e gases combustíveis para a remoção do encapsulamento de EVA.

Wang et al. [39] apresentam a pirólise a alta temperatura como uma solução, apontando também a corrosão por ácido fluorídrico para a retirada das impurezas orgânicas e metálicas agregadas às partículas do silício. Com o mesmo objetivo do artigo anterior, Li et al. [8] apontam a decomposição térmica e o inchamento químico como uma alternativa para a remoção do EVA e assim, conseguir separar o vidro e as células de silício; porém, este procedimento tem custo elevado e utiliza solventes orgânicos (como tolueno e hexano) que resultam em resíduos com alta toxicidade. Hossain et al. [2] propõe dissolução das camadas de EVA em solução com ácido nítrico e solventes orgânicos e destaca, que de acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA) o tratamento químico e térmico da remoção do EVA nas placas fotovoltaicas é mais eficiente do que os procedimentos mecânicos e salienta que os resíduos provenientes do processo podem ser utilizados como fonte de combustível.

Schmidt et. al [40] sugere um pré-tratamento mecânico com a quebra das moléculas de vidro, seguido da imersão do material em água quente para a dissolução imediata de vários sais inorgânicos e orgânicos que são altamente solúveis em água, sendo assim, possível realizar a separação de resíduos de plástico ou vidro do EVA.

Esta etapa do processo de tratamento dos resíduos fotovoltaicos é a mais complexa:

apresenta um custo elevado e utiliza solventes orgânicos (como tolueno e hexano) que resultam em resíduos com alta toxicidade [8]. Por isso, Vinayagamoorthi et al. [7] sugere a vaporização do EVA em um forno a 400°C com a concentração de oxigênio no forno a no máximo 3% por 20 minutos, o que reduz consideravelmente a presença de material particulado ao final do processo.

5.4 Recuperação dos metais

Os metais, como a prata, o alumínio, o cobre, o chumbo e o estanho [11,41] representam cerca de 22% da composição das placas fotovoltaicas [4], inclusive pesquisas patenteadas pela IEA apontam que as maiores taxas de recuperação de materiais neste sistema estão relacionadas aos metais, principalmente cobre, prata e alumínio [5], que são os materiais recicláveis comumente presentes nas placas [8]. Por outro lado, o sistema também conta com a presença de metais pesados como cádmio e estanho [7,23] e raros como índio, gálio, germano e selênio [9,12,27].

A lixiviação com ácidos é uma importante técnica para a remoção de impurezas dos particulados de resíduos fotovoltaicos como o carbono e o oxigênio [32]. No caso, da purificação do silício proveniente dos resíduos fotovoltaicos, três artigos abordaram a lixiviação como alternativa. Li et al. [32] sugerem uma combinação de ácidos mistos na lixiviação capaz de garantir um silício com 97% de pureza, enquanto Wang et al. [42] apresentam a lixiviação (com ácido sulfúrico) com a combinação da técnica de fundição de lingote por indução de ‘bola’ para a remoção de impurezas resultando em um silício com 99,99% de pureza e Guo et al. [43] recomendam a utilização de uma mistura de 5% de ácido fluorídrico e 8% de ácido nítrico para a remoção das impurezas como o ferro e o óxido de ferro, que após uma lixiviação assistida por ultrassom é capaz de garantir um silício com até 97% de pureza.

A lixiviação também é sugerida para o tratamento de outros metais: Zhang et al. [44] realizam um experimento com a lixiviação do

gálio por meio de CFCs na temperatura de 300°C e 8,8 Mpa com um resultado eficiente de 81%; Modrzynski et al. [11] abordam a lixiviação com ácido sulfúrico acompanhada da eletroextração para a obtenção de prata com pureza entre 88% e 99%; Prasar et al. [29] propõem o tratamento térmico seguido de lixiviação com HNO para a recuperação do chumbo na forma menos tóxica.

Para atingir esta alta taxa de purificação as impurezas são enriquecidas na forma de óxidos, para então serem coletas e removidas na lixiviação ácida. No entanto, a principal desvantagem é que o excremento produzido durante a lixiviação pode ser potencialmente danoso ao meio ambiente [32]. Além disso, há a dificuldade de ampliar a técnica de lixiviação com ácidos em escala industrial, por conta de grande quantidade de produtos químicos necessários para a realização do processo [23].

A separação eletrostática é uma tecnologia utilizada em outros tratamentos de resíduos, por ser de baixo custo e discriminar os elementos conforme as diferentes propriedades elétricas [8]. Assim, a britagem mecânica (que pode ser feita por esmagamento de pulso de alta pressão ou fragmentação de alta pressão ou, com a utilização de um martelo / britador) seguida da separação eletrostática para a recuperação especialmente de silício é uma opção [8]. Neste caso, o resíduo fotovoltaico após passar pela fragmentação de alta pressão e lavagem ácida e fluorescência de raios é então separado eletrostaticamente.

Outro processo que também envolve a britagem mecânica é realizado após a Trituração da placa [30]. Este material é submetido à tratamento térmico em um forno elétrico isotérmico seguido de calcinação em corrente de nitrogênio. Com este processo pirometalúrgico é possível recuperar as partículas de prata da placa fotovoltaica. A britagem mecânica também é indicada para a recuperação de chumbo com alta pureza (maior que 95%) [40].

A irradiação de micro-ondas é uma técnica utilizada para potencializar a

eficiência da lixiviação na recuperação de outros metais, por ter um aquecimento mais rápido que a lixiviação sob pressão ou cuba convencional [40] e apesar de encarecer consideravelmente o processo, podem ampliar a eficiência e reduzir o tempo de reação da técnica da pirólise para a remoção do EVA [34]. Xanthopoulos et al. [45] sugerem a irradiação micro-ondas para a recuperação do cobre, zinco e chumbo nos resíduos fotovoltaicos.

Para os metais raros, como o índio e o gálio, há uma grande dificuldade na extração desses metais por outros métodos como a lixiviação química, que requer uma alta quantidade de reagentes como H₂O₂ e SOCl₂, e tem como resultado uma purificação menor que 90,59% [9]. Por isso, Song et al. [9] apresentaram a eletrodeposição controlada por potencial como alternativa, onde a extração seletiva do metal ocorre de acordo com a diferença de potencial da eletrorredução.

Para reduzir as impurezas dos metais, Hu et al. [46] sugerem um pré-tratamento com Trituração, decapagem, filtragem e secagem para ser aplicado antes dos outros processos descritos.

No que tange à utilização dos metais recuperados, o silício foi o que recebeu maiores sugestões de aplicabilidade: Li et al. [47] abordam o seu emprego em baterias de íons de lítio, ligas, catalisadores e material cerâmico. Estes autores recomendam o uso não apenas nas baterias de lítio, mas também em materiais estruturais de alta temperatura e termoelétricos; Liang et al. [49] e Li et al. [50], por sua vez, sugerem a utilização do pó de silício na fabricação de nanotubos.

5.5 Remoção do Backsheet

O *backsheet*, conhecido como folha traseira, é formado por polímeros termoplásticos. Morita et al. [51] propõe a retirada manual da folha, e depois, a reciclagem de polímeros termoplásticos por processos de fusão e deformação.

5.6 Reaplicação das baterias

Conjuntamente, a destinação das baterias após a vida útil também é uma preocupação, estes equipamentos também fazem parte do sistema [52] e são compostos de vários elementos químicos como chumbo-ácido, níquel-cádmio [28]. Norgren et al. [52] propõem a utilização da economia circular sugerindo a utilização de baterias de segunda vida oriundas de veículos elétricos para o armazenamento estacionário de energia fotovoltaica, o que ampliaria a vida útil e a aplicação dessas baterias.

No entanto, para os sistemas que já estão instalados com uma bateria de primeira vida, a destinação ideal seria a reciclagem dos componentes destes dispositivos, o que é viável tecnologicamente para as baterias à base de chumbo-ácido – a Austrália, por exemplo, possui mecanismo que garante 99% da reciclagem; porém, as baterias de lítio carecem de ferramentas de reciclagem que garantam alta taxa de recuperação de materiais [3].

6. Propostas de melhoria

Para ampliar o potencial de tratamento dos resíduos fotovoltaicos, algumas melhorias devem ser propostas.

A fabricação dos módulos fotovoltaicos deve atentar para a reciclagem, logo, a melhoria do design com uma simples desmontagem, acompanhada da eliminação de elementos de forte adesão e de componentes tóxicos deve ser considerada [12,47]. Materiais orgânicos podem ser uma alternativa, conforme indicam Bautista-López et al. [53], Suresh et al. [54] e Zhang et al. [55], que apresentam uma série de benefícios como leveza, flexibilidade, baixo custo, não toxicidade e biodegradabilidade – características similares ao material verde, que foi proposto para a mesma função por Zhang et al. [56].

No que tange as técnicas utilizadas na recuperação dos resíduos fotovoltaicos, Guo et al. [4] comentam sobre a necessidade de reduzir os processos que requerem alto valor energético (como a degradação do EVA) e

focar na reutilização de componentes-chaves (que tenham valor econômico agregado). Esta opção é reforçada por Markert et al. [57] que indicam a necessidade da utilização de métodos que envolvam menos produtos químicos tóxicos e ácidos para reduzir o custo com a reciclagem e os danos ambientais.

Para ampliar as vantagens econômicas e até ambientais do processo de reciclagem é importante reduzir o deslocamento entre o local de resíduos fotovoltaicos e a usina de tratamento [57]. Por isto, Pero et al. [24] propõem modelos de estações móveis de reciclagem de resíduos fotovoltaicos (os PV-MOREDE system) capazes de realizar desde o pré-tratamento (com a remoção da moldura e corte do painel), até a separação do vidro e do silício, reduzindo custos de deslocamento e investimento para instalação de instalações de reciclagem deste tipo de resíduo.

No aspecto financeiro, para que este processo apresente vantagem econômica e desperte o interesse para seu desenvolvimento em escala comercial, é ideal que os materiais provenientes da reciclagem do sistema possuam um valor econômico considerável e que tenham aplicação comercial.

A economia circular é uma alternativa que traz novos modelos de negócios que diminuem a dependência de matéria-prima virgem e priorizam insumos recicláveis e renováveis [29,58].

De forma geral, os países não adaptaram o sistema para a correta destinação destes resíduos [59], com exceção de casos pontuais como estado da Califórnia - cujo estudo desenvolvido por Theocharis et al. [19] mostrou a eficiência da participação governamental neste processo – e na União Europeia – onde Modrzynski et al. [60] também indicaram vantagens na incorporação das placas fotovoltaicas à diretiva de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos. Por isso, um ponto trivial é a criação de regulamentações para preparar, incentivar e desenvolver aplicações adequadas de tratamento de resíduos fotovoltaicas [27], como a logística reversa [1] ou incentivos fiscais [61], que tragam benefícios ambientais

e econômicos [29], além de desestimular este descarte em aterros [12].

As tecnologias para a destinação correta de resíduos fotovoltaicos são recentes, e em grande parte, não é possível a aplicação em escala comercial [24]. Assim, é necessário o desenvolvimento de pesquisas que se atentem ao fim da vida útil do sistema [19,24,27]. No Brasil, essa exigência é maior, pois o país carece de estudos sobre o assunto, que representa uma oportunidade para autoridades públicas, indústrias e instituições de pesquisa desenvolverem conhecimento [1].

7. Discussão

A análise bibliométrica da literatura revelou o destaque chinês nas pesquisas sobre o tratamento dos resíduos fotovoltaicos, com notável atuação dos autores Rong Deng e Wenhui Ma. Todavia, há maior diversidade de instituições envolvidas, e um destaque para o *journal Waste Management*, como a maior fonte de publicações o de material.

Sobre os processos de reciclagem, reutilização e recuperação dos resíduos fotovoltaicos, foi possível identificar as principais técnicas da literatura sobre o assunto, sendo possível desenvolver um modelo de processo com sugestões para o tratamento de cada parcela estrutural do sistema fotovoltaico, resultando em materiais que podem ser aplicados comercialmente.

Além disso, as alternativas apresentadas, demonstraram viabilidade: ambiental (com exceção do processo de remoção do EVA, que pode gerar substratos tóxicos), técnica para pequenas quantidades (requer adaptação para sua ampliação para escala comercial) e econômica (ao focar na recuperação de elementos com maior valor econômico, como metais raros; ou realizar processos mais simplificados, mas cujos materiais resultantes são reutilizados convencionalmente, caso da remoção manual da estrutura de alumínio).

8. Considerações Finais

O descarte incorreto dos resíduos fotovoltaicos pode gerar prejuízos ambientais e econômicos, e por isso é necessário incentivar o tratamento correto deste material. Dessa forma, para um melhor reaproveitamento das placas fotovoltaicas após a vida útil é ideal que sejam desenvolvidos sistemas intencionando a reciclagem e a reutilização, ampliando a utilização de elementos de fácil recuperação e reduzindo o uso de metais raros e elementos como o EVA que encarecem e dificultam os processos de reciclagem e reutilização.

Embora não tenha sido elaborado um modelo em escala comercial de recuperação total da placa, existem tecnologias fotovoltaicas dedicadas ao reaproveitamento de partes específicas da estrutura. Ademais, o ideal é focar na recuperação de um material, pois isso facilita o processo: no caso do vidro por exemplo, existem técnicas que conseguem remover o material apenas com o aquecimento. Além disso, cerca de 85% da placa fotovoltaica é formada por alumínio e vidro - materiais que são reciclados/reutilizados convencionalmente.

Para que os processos de reciclagem e de reutilização possam ter viabilidade não apenas ambiental, mas também técnica e econômica, é fundamental que os materiais oriundos da recuperação tenham aplicabilidade no mercado e recebam incentivos para a sua utilização em relação aos materiais virgens – o que deve acontecer inclusive com intervenção estatal. O *downcycling* (reciclagem de baixo custo que reutiliza materiais de menor valor financeiro) é uma alternativa para o reaproveitamento destes resíduos, já que em sua maioria, os materiais provenientes da reciclagem não necessariamente voltarão ao mercado fotovoltaico, mas podem ser utilizados em outras aplicações que exigem menor grau de pureza, por exemplo.

Por ser uma geração distribuída, para ampliar a adesão ao descarte correto e reduzir custos econômicos e ambientais, é importante reduzir a distância entre os resíduos e a usina

de tratamento, logo, estações móveis são uma boa alternativa, especialmente em locais com grande concentração de usuários do sistema.

Por fim, as instituições governamentais têm um papel fundamental: desde o desestímulo do descarte em aterros (por métodos legislativos ou fiscais) – o que tem demonstrado retorno positivo na União Europeia -, o incentivo da reciclagem e da reutilização com a valorização dos materiais oriundos destes processos até o fomento do desenvolvimento de pesquisas e tecnologias no cenário acadêmico e industrial.

Por ser um tema recente, com quantidade moderada de material acadêmico sobre o tema, a pesquisa encontrou uma limitação – número reduzido de tecnologias propostas e com baixa aplicação comercial. Neste aspecto, pesquisas futuras podem se concentrar desde o desenvolvimento de novos materiais e modelos de placas fotovoltaicos até a criação de tecnologias voltadas à reciclagem e reutilização dos resíduos fotovoltaicos.

9. Referências

- [1] SOUSA, N. M.; OLIVEIRA, C. B.; CUNHA, D. *Photovoltaic electronic waste in Brazil: circular economy challenges, potential and obstacles*. Social Sciences & Humanities Open, [S.L.], v.7, n. 1, p.1-10, 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ssaho.2023.100456>. Acesso em: 24 set. 2024.
- [2] HOSSAIN, M. F. *Assessment of the energy recovery potential of waste photovoltaic (PV) modules*. Advanced Technology For The Conversion Of Waste Into Fuels And Chemicals, [S.L.], n.2, p.219-238, 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-323-90150-5.00013-3>. Acesso em: 26 abr. 2024.
- [3] SALIM, H. K.; STEWART, R. A.; SAHIN, O. DUDLEY, M. *Systems approach to end-of-life management of residential photovoltaic panels and battery energy storage system in Australia*. Renewable And Sustainable Energy Reviews, [S.L.], v. 134, p.1 – p.10, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110176>. Acesso em: 26 abr. 2024.
- [4] GUO, J.; LIU, X.; YU J.; XU, C.; WU, Y.; PAN, D.; SENTHIL, R. A. *An overview of the comprehensive utilization of silicon-based solid waste related to PV industry*. Resources, Conservation And Recycling, [S.L.], v. 169, p.1 – p.10, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105450>. Acesso em: 12 abr. 2024.
- [5] RUBINO, A.; SHIAVI, P. G.; ALTIMARI, P.; PAGNANELLI, F. *Valorization of polymeric fractions and metals from end of life photovoltaic panels*. Waste Management, [S.L.], p.89 – p.99, 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2020.12.037>. Acesso em: 12 abr. 2024.
- [6] BENLİ, H.; GÜRTÜRK, M.; NESLİHAN, K. *Analysis of cleaning process losses in photovoltaic cells*. Environmental Progress & Sustainable Energy, [S.L.], v. 41, n.4, p.1 – p.12, 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/ep.13805>. Acesso em: 12 abr. 2024.
- [7] VINAYAGAMOORTHI, R.; BHARGAV, P. B.; AHMED, N.; BALAJI, C.; ARAVINTH, K.; KRISHNAN, A.; GOVINDARAJ, R.; RAMASAMY, P. *Recycling of end of life photovoltaic solar panels and recovery of valuable components: a comprehensive review and experimental validation*. Journal Of Environmental Chemical Engineering, [S.L.], n.1, p.1 – p.12, 2024. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2023.111715>. Acesso em: 12 abr. 2024.
- [8] LI, J.; YAN, S.; LI, Y.; WANG, Z.; TAN, Y.; LI, J.; XIA, M.; LI, P. *Recycling Si in waste crystalline silicon photovoltaic panels after mechanical crushing by electrostatic separation*. Journal Of Cleaner Production, [S.L.], p.1 – p.12, 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137908>. Acesso em: 12 abr. 2024.
- [9] SONG, Q.; ZHANG, L.; YANG, C.; XU, Z. *Novel Electrodeposition Method for Cu-In-Cd-Ga Sequential Separation from Waste Solar Cell: mechanism, application, and environmental impact assessment*. Environmental Science & Technology, [S.L.], v. 55, N.15, p.10724 – P.10733, 2021. Disponível em:

- <http://dx.doi.org/10.1021/acs.est.1c0249>. Acesso em: 12 abr. 2024.
- [10] GUERIN, T. *Using integrated risk assessment to enable on-site re-purposing of construction wastes from renewable energy projects to confirm highest value re-use*. Environmental Science And Pollution Research, [S.L.], v. 29, n.15, p.8909 – p.8920, 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-021-16283-2>. Acesso em: 12 abr. 2024.
- [11] MODRZYNSKI, C.; WEIDLICH, C. *An Electrochemical Process for the Recovery of Metals and High Purity Silicon from Photovoltaic Modules*. Ecs Meeting Abstracts, [S.L.], n. 25, p.1211 – p.1225, 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1149/ma2022-01251211mtgabs>. Acesso em: 12 abr. 2024.
- [12] DENG, R.; CHANG, N. L.; OUYANG, Z.; CHONG, C. M. *A techno-economic review of silicon photovoltaic module recycling*. Renewable And Sustainable Energy Reviews, [S.L.], v.109, n. 3, p.532 – p.550, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.020>. Acesso em: 12 abr. 2024.
- [13] SÁNCHEZ-SERRANO, S.; PEDRAZA-NAVARRO, I.; DONOSO-GONZÁLEZ, M. *¿Cómo hacer una revisión sistemática siguiendo el protocolo PRISMA?* Bordón. Revista de Pedagogía, [S.L.], v.74, n. 3, p.51 – p.66, 2022. Disponível em: http://dx.doi.org/10.13042/bordon.2022.9509_0. Acesso em: 20 mar. 2024.
- [14] PICCOLI, M. S. Q.; STECANELA, N. *Popularização da ciência: uma revisão sistemática de literatura*. Educação e Pesquisa, [S.L.], v.49, n. 1, p.1 – p.20, 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-4634202349253818>. Acesso em: 20 mar. 2024.
- [15] MARCONDES, R.; SILVIA, S. L. R. *O Protocolo Prisma 2020 como uma possibilidade de roteiro para revisão sistemática em ensino de ciências*. Revista de Brasileira de Pós-Graduação (RBPG), Brasília, v.18, n. 39, p.1 – p.19, 2022. Disponível em: <https://rbpg.capes.gov.br/rbpg/article/view/1894/980>. Acesso em: 20 mar. 2024.
- [16] FRANCO, A. C.; PIEKARSKI, C. M.; FRANCO, L. S. *Industrial challenges with photovoltaic applications: a systematic review*. Navus - Revista de Gestão e Tecnologia, [S.L.], v.10, n. 1, p.1 – p.16, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.22279/navus.2020.v10.p01-16.1283>. Acesso em: 20 mar. 2024.
- [17] SILVA, J. D. N.; RIZZATTI, I. M.; FRANÇA, A. C. S. *Pesquisa participante e educação ambiental: análise a partir de periódicos da capes no período de 2012 a 2022*. Navus - Revista Brasileira de Educação Ambiental, [S.L.], v.19, n. 1, p.488 – p.500, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.34024/revbea.2024.v19.15522>. Acesso em: 20 mar. 2024.
- [18] PAGE, Matthew J; MCKENZIE, Joanne e; BOSSUYT, Patrick M; BOUTRON, Isabelle; HOFFMANN, Tammy C; MULROW, Cynthia D; SHAMSEER, Larissa; TETZLAFF, Jennifer M; A AKL, Elie; BRENNAN, Sue e. *The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews*. Bmj, [S.L.], p. 71-79, 29 mar. 2021. BMJ. <http://dx.doi.org/10.1136/bmj.n71>. Acesso em 29 de setembro de 2024.
- [19] THEOCHARIS, M.; PAVLOPOULOS, C.; KOUSI, P.; HATZIKIOSEYIAN, A.; ZARKADAS, I.; TSAKIRIDIS, P. E.; REMOUNDAKI, E.; ZOUMBOULAKIS, L.; LYBERATOS, G. *An Integrated Thermal and Hydrometallurgical Process for the Recovery of Silicon and Silver from End-of-Life Crystalline Si Photovoltaic Panels*. Waste And Biomass Valorization, [S.L.], v.13, n. 9, p.4027 – p.4041, 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s12649-022-01754-5>. Acesso em: 29 mar. 2024.
- [20] ZHAO, J.; LI, S. *Performance study and environmental evaluation of alkali-activated materials based on waste photovoltaic glass*. Journal Of Cleaner Production, [S.L.], v.379, n. 1, p.134576 – p.500, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.34024/revbea.2024.v19.15522>. Acesso em: 29 mar. 2024.
- [21] YU, Y.; BAI, X.; LI, S.; SHI, J.; WANG, LEI.; XI, F.; MA, W.; DENG, R. *Review of silicon recovery in the photovoltaic industry*. Current Opinion In Green And Sustainable Chemistry, [S.L.], v.44, p.100870, 2023. Disponível em:

- <http://dx.doi.org/10.1016/j.cogsc.2023.100870>. Acesso em: 29 mar. 2024.
- [22] ZHAO, J.; LI, S. *Alkali-activated binder with waste photovoltaic glass powder and blast furnace slag as precursors: performance study, shrinkage-reducing technology and mechanism analysis*. Journal Of Non-Crystalline Solids, [S.L.], v.609, p.122263, 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2023.122263>. Acesso em: 29 mar. 2024.
- [23] FIANDRA, V.; SANNINO, L.; ANDREOZZI, C.; GRADITI, G. *End-of life of silicon PV panels: a sustainable materials recovery process*. Waste Management, [S.L.], v.84, p.91 – P.101, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2018.11.035>. Acesso em: 29 mar. 2024.
- [24] PERO, F.; DELOGU, M.; BERZI, L; ESCAMILLA, M. *Innovative device for mechanical treatment of End of Life photovoltaic panels: technical and environmental analysis*. Waste Management, [S.L.], p.535 – p.548, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2019.06.037>. Acesso em: 29 mar. 2024.
- [25] PEREIRA, M. C. R.; CORIA, A. S. Environmental impacts of solar photovoltaic systems: a revision from life cycle assessments and other studies. Revista Eia, [S.L.], v.19, n. 38, p.1 – p.18, 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.24050/reia.v19i38.1570>. Acesso em: 29 mar. 2024.
- [26] LIU, B.; LI, J.; DING, Y.; ZHENG, H.; ZHANG, S. Recycling Status of Scrap Photovoltaic Panels. Chinese Journal Of Rare Metals, [S.L.], v.43, n. 9, p.987 – p.996, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.13373/j.cnki.cjrm.XY19010021>. Acesso em: 29 mar. 2024.
- [27] MISHRA, S.; ROUT, P. K.; DAS, A. P. *Solar photovoltaic panels as next generation waste: a review*. Biointerface Research In Applied Chemistry, [S.L.], v.9, n. 6, p.4539 – p.4546, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.33263/briac96.539546>. Acesso em: 29 mar. 2024.
- [28] SALIM, H. K.; STEWART, R. A.; SAHIN, O.; DUDLEY, M. *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, [S.L.], v.211, p.537 – p.554, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.229>. Acesso em: 29 mar. 2024.
- [29] KALASARIYA, N.; ALEXANDER, A.; BHUNIA, P. K.; GUTIERREZ – PARTIDA, E.; BENNY, R.; STOLTERFOHT, M.; NAMBOOTHIRY, M. A. G. *Controlling Lead Halide Residue in Perovskite Solar Cells: a method to improve the photostability and hysteresis*. Solar Rrl, [S.L.], v.8, n. 1, p.1 – p.10, 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/solr.20230078>. Acesso em: 29 mar. 2024.
- [30] PRASAR, D.; KUMAR, S.; SANJANA, B.; KIRAN, D.; KAMARAJ, A.; RATHEESH, R. *A novel approach for the efficient recovery of lead from End-of-Life Silicon Photovoltaic modules*. Solar Energy Materials And Solar Cells, [S.L.], v.266, n. 1, p.112 – p.130, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2023.112672>. Acesso em: 29 mar. 2024.
- [31] RAMOS, I.; OROSCO, P.; BARRIOS, . C.; JEREZ, A. L.; SHAM, E. L.; TESIO, A. *Forsterite and magnesium aluminate spinel synthesis and silver extraction by calcination of silicon solar cell from discarded solar Pv panels with bischofite*. Silicon, [S.L.], v.15, n. 6, p.2581 – p.2595, 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s12633-022-02187-4>. Acesso em: 04 abr. 2024.
- [32] LI, X.; RUAN, J.; ZANG, X.; ZHANG, X.; HE, Y.; ZHANG, L.; XING, Z. *Research Progresso on Resource Utilization of Crystal Silicon Diamond-Wire Cutting Waste*. Materials Reports, [S.L.], v.35, p.22339 – p.23234, 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.11896/cldb.20080070>. Acesso em: 04 abr. 2024.
- [33] SAVVILOTIDOU, V.; KRITIKAKI, A.; STRATAKIS, A.; KOMNITSAS, K.; GIDARAKOS, E. *Energy efficient production of glass-ceramics using photovoltaic (P/V) glass and lignite fly ash*. Waste Management, [S.L.], v.90, p.46 – p.58, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2019.04.022>. Acesso em: 04 abr. 2024.

- [34] GAHLOT, R.; MIR, S. DHAWAN, N. *Recycling of Discarded Photovoltaic Solar Modules for Metal Recovery: a review and outlook for the future.* Energy & Fuels, [S.L.], v.36, n. 24, p.14554 – p.14572, 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1021/acs.energyfuels.2c02847>. Acesso em: 04 abr. 2024.
- [35] DOBRA, T.; VOLLPRECHT, D.; POMBERGER, R. *Thermal delamination of end-of-life crystalline silicon photovoltaic modules.* Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy, [S.L.], v.40, n.1, p.96 – p.103, 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1177/0734242x211038184>. Acesso em: 04 abr. 2024.
- [36] SASAI, M.; YAMASHITA, T.; INOUE, D. *Development of low-temperature thermal decomposition recycling technology from photovoltaic modules to flat glass applications.* Japanese Journal Of Applied Physics, [S.L.], v.62, p.1 – p.10, 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.35848/1347-4065/accd7a>. Acesso em: 06 abr. 2024.
- [37] MÁČALOVÁ, K.; VÁCLAVÍK, V.; DVORSKÝ, T.; FIGMIG, R.; CHARVÁT, J.; LUPTÁK, M. *The Use of Glass from Photovoltaic Panels at the End of Their Life Cycle in Cement Composites.* Materials, [S.L.], v.14, n.21, p.6655, 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/ma14216655>. Acesso em: 06 abr. 2024.
- [38] BARCELOS, D. A.; DIANA, C. L.; LAURA, C. J.; GONÇALVES, M. C. *What Is Driving the Growth of Inorganic Glass in Smart Materials and Opto-Electronic Devices?* Materials, [S.L.], v.14, n.11, p.2926, 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/ma14112926>. Acesso em: 04 abr. 2024.
- [39] WANG, K.; TAN, Y.; LI, P.; WANG, Y. *Recycling Si waste cut from diamond wire into high performance porous Si@SiO₂@C anodes for Li-ion battery.* Journal Of Hazardous Materials, [S.L.], v.407, p.124778, 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124778>. Acesso em: 06 abr. 2024.
- [40] SCHMIDT, F.; AMREIN, M.; HEDWIG, S.; KOBER-CZERNY, M.; PARACCHINO, A.; HOLAPPA, V.; SUHONEN, R.; SCHAFFER, A.; CONSTABLE, E.; SNAITH, H. *Organic solvent free PbI₂ recycling from perovskite solar cells using hot water.* Materials, [S.L.], v.447, p.6655, 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/ma14216655>. Acesso em: 06 abr. 2024.
- [41] TAO, R.; LI, B.; WU, Y.; ZHANG, W.; YUAN, H.; GU, J.; CHEN, Y. *Pyrolysis mechanism and recycling strategy of end-of-life photovoltaic modules based on the experiment and the density functional theory.* Polymer Degradation And Stability, [S.L.], v.217, p.110545, 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2023.110545>. Acesso em: 06 abr. 2024.
- [42] WANG, L.; XI, F.; ZHANG, Z.; LI, S.; CHEN, X.; WAN, X.; MA, W.; DENG, R.; CHONG, C. *Recycling of photovoltaic silicon waste for high-performance porous silicon/silver/carbon/graphite anode,* [S.L.], v.132, p.56 – P.63, 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2021.07.014>. Acesso em: 07 abr. 2024.
- [43] GUO, J.; LIU, Y.; LIU, L.; LIU, J.; KONG, K.; WANG, S.; JIANG, S.; XING, P. *A Low-Cost and Facile Method to Recycle Silicon Carbide Particles from the Solar Grade Silicon Slicing Wastes,* Silicon, [S.L.], v.12, p.2405 – p.2412, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s12633-019-00334-y>. Acesso em: 07 abr. 2024.
- [44] ZHANG, T.; ZHAN, L.; YUAN, X.; XU, Z. *Simultaneous harmless ionization of CFC and resource utilization of waste solar panel through one-pot hydrothermal treatment.* Journal Of Hazardous Materials, [S.L.], v.441, p.129918, 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129918>. Acesso em: 07 abr. 2024.
- [45] XANTHOPOULOS, P.; BEVANDIC, S.; SPOOREN, J.; BINNEMANS, K.; KURURUGYA, F. *Recovery of copper, zinc and lead from photovoltaic panel residue.* Rsc Advances, [S.L.], v.12, p.2351 – p.2360, 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1039/d1ra09268e>. Acesso em: 07 abr. 2024.
- [46] HU, Z.; YUAN, F.; LI, J.; TAN, Y.; LIU, Y.; LI, P. *Recycling of kerf loss silicon: an optimized method to realize effective*

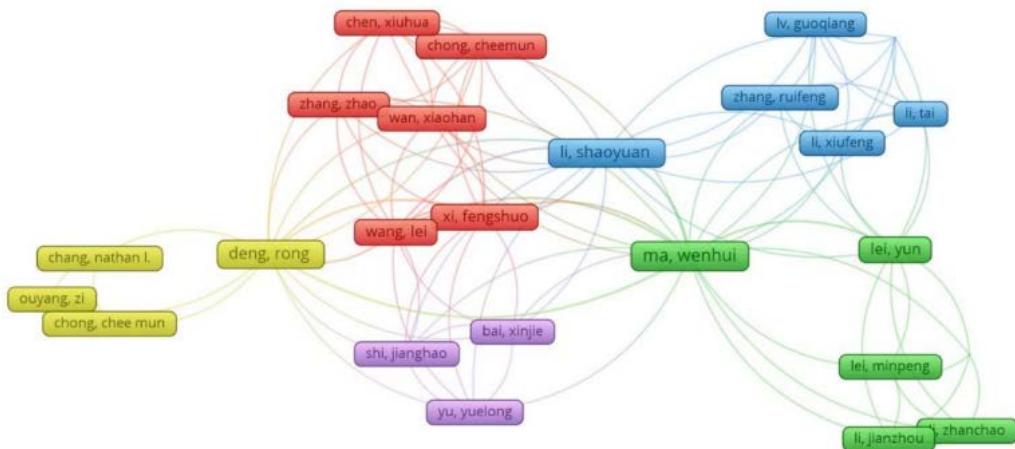
- elimination of various impurities.* Waste Management, [S.L.], v.170, p.230 – p.239, 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2023.09.015>. Acesso em: 07 abr. 2024.
- [47] LI, X.; LV, G.; MA, W.; LI, T.; ZHANG, J.; LI, S.; LEI, Y. *Review of resource and recycling of silicon powder from diamond-wire sawing silicon waste.* Journal Of Hazardous Materials, [S.L.], v.424, p.127389, 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127389>. Acesso em: 11 mai. 2024.
- [48] LI, J.; LI, Z.; LEI, M.; WANG, M.; MA, W.; LEI, Y. *Simultaneous Recycling of Chromium-Containing Waste Slag and Diamond-Wire Silicon Slitting Scrap to Prepare High-Purity CrSi₂ and Eutectic Si-Cr Alloy.* Acs Sustainable Chemistry & Engineering, [S.L.], v.11, n.46, p.16554 – 16566, 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1021/acssuschemeng.3c04546>. Acesso em: 11 mai. 2024.
- [49] LIANG, A.; XU, T.; LIOU, S.; LI, Y. *Silicon Single Walled Carbon Nanotube-Embedded Pitch-Based Carbon Spheres Prepared by a Spray Process with Modified Antisolvent Precipitation for Lithium Ion Batteries.* Energy & Fuels [S.L.], v.35, n.11, p.9705 - 9713, 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c01084>. Acesso em: 15 mai. 2024.
- [50] LI, Y.; CHEN, G.; LIU, W.; ZHANG, C.; HUANG, L.; LUO, X. *Construction of porous Si/Ag@C anode for lithium-ion battery by recycling volatile deposition waste derived from refining silicon.* Waste Management, [S.L.], p.22 - p.32, 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c01084>. Acesso em: 15 mai. 2024.
- [51] MORITA, Y.; SAITO, Y.; KUMAGAI, S.; KAMEDA, T.; SHIRATORI, T.; YOSHIOKA, T. *Alkaline hydrolysis of photovoltaic backsheet containing PET and PVDF for the recycling of PVDF.* Journal Of Material Cycles And Waste Management [S.L.], v.25, n.2, p.674 – p. 683, 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s10163-023-01609-8>. Acesso em: 20 mai. 2024.
- [52] NORRGEN, A.; CARPENTER, A.; HEATH, G. *Design for Recycling Principles Applicable to Selected Clean Energy Technologies: crystalline-silicon photovoltaic modules, electric vehicle batteries, and wind turbine blades.* Journal Of Sustainable Metallurgy, [S.L.], v.6, n.4, p.761 – p. 774, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s40831-020-00313-3>. Acesso em: 20 mai. 2024.
- [53] BAUTISTA-LÓPEZ, J. A.; DÍAZ-PONCE, A.; RANGEL-MÉNDEZ, J. R.; CHÁZARO-RUIZ, L. F.; MUMANGA, T. J.; OLMO-MOYA, P.; VENCES-ÁLVAREZ, E.; PINEDA-ARELLANO, C. A. *Design for Recent progress in organic waste recycling materials for solar cell applications.* Environmental Science And Pollution Research, [S.L.], v.30, n.47, p.103367 – p. 103389, 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s40831-020-00313-3>. Acesso em: 22 mai. 2024.
- [54] SURESH, L.; VAGHASIYA, J. V.; JONES, M. R.; TAN, S. C. *Design for Biodegradable Protein-Based Photoelectrochemical Cells with Biopolymer Composite Electrodes That Enable Recovery of Valuable Metals.* Acs Sustainable Chemistry & Engineering, [S.L.], n.9, p.8834 – p. 8841, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b00790>. Acesso em: 22 mai. 2024.
- [55] ZHANG, G; HU, D.; TANG, H.; SONG, H.; DUAN, S.; KAN, Z.; LU, S. *Volatile Additive Strategy Triggering 17.48% Efficient Post-Treatment-Free Organic Solar Cells.* Solar Rrl, [S.L.], v.7, n.4, p.1 – p. 8, 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/solr.20220099>. Acesso em: 22 mai. 2024.
- [56] MARTINS R. *Discover Materials: the pathway to explore materials as activators of the challenges of the future.* Discover Materials, [S.L.], v.1, n.1, p.104 – p. 109, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s43939-020-00002-8>. Acesso em: 22 mai. 2024.
- [57] MARKERT, E.; CELIK, I.; APUL, D. *Private and Externality Costs and Benefits of Recycling Crystalline Silicon (c-Si) Photovoltaic Panels.* Energies, [S.L.], v.13, n.14, p.3650 – p. 3659, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/en13143650>. Acesso em: 29 mai. 2024.

- [58] HEATH, G. A.; RAVIKUMAR, D.; HANSEN, B.; KUPETS, E. *A critical review of the circular economy for lithium-ion batteries and photovoltaic modules – status, challenges, and opportunities*. Journal Of The Air & Waste Management Association, [S.L.], v.72, n.6, p.478 – p. 539, 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/10962247.2022.2068878>. Acesso em: 29 mai. 2024.
- [59] GUERIN, T. F.. *Assessing Technical Options for Handling Packaging Wastes from Construction of a Solar PV Powerstation: a case study from a remote site*. Water, Air, & Soil Pollution, [S.L.], v.231, n.5, p.1, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s11270-020-04604-z>. Acesso em: 29 mai. 2024.
- [60] MODRZYNSKI, C.; BLOH, J. Z.; WEIDLICH, C. *Kinetic Investigations of the Electrochemically Assisted Leaching of Metals for the Recycling of Photovoltaics*. Journal Of The Electrochemical Society, [S.L.], v.169, n. 7, p.073513, 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1149/1945-7111/ac8021>. Acesso em: 29 mai. 2024.
- [61] BARTIE, N.; COBOS-BECERRA, L.; FRÖHLING, M.; SCHLATMANN, R.; REUTER, M. *Metallurgical infrastructure and technology criticality: the link between photovoltaics, sustainability, and the metals industry*. Mineral Economics, [S.L.], v.35, p. 503 – p. 519, 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s13563-022-00313-7>. Acesso em: 02 jun. 2024.

10. Apêndices

APÊNDICE A

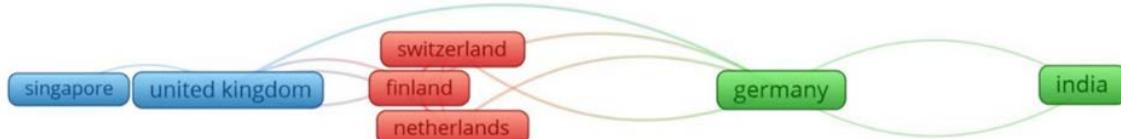
Fluxograma 1 – Autores mais relevantes



Fonte: Próprio autor

APÊNDICE B

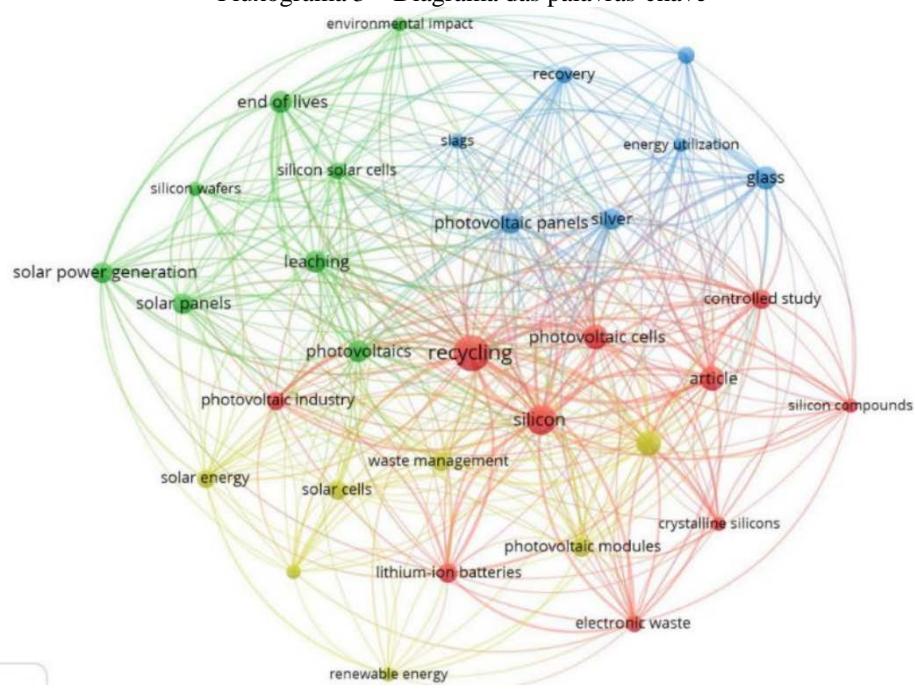
Fluxograma 2 – Países com publicações correlatas



Fonte: Próprio autor

APÊNDICE C

Fluxograma 3 – Diagrama das palavras-chave

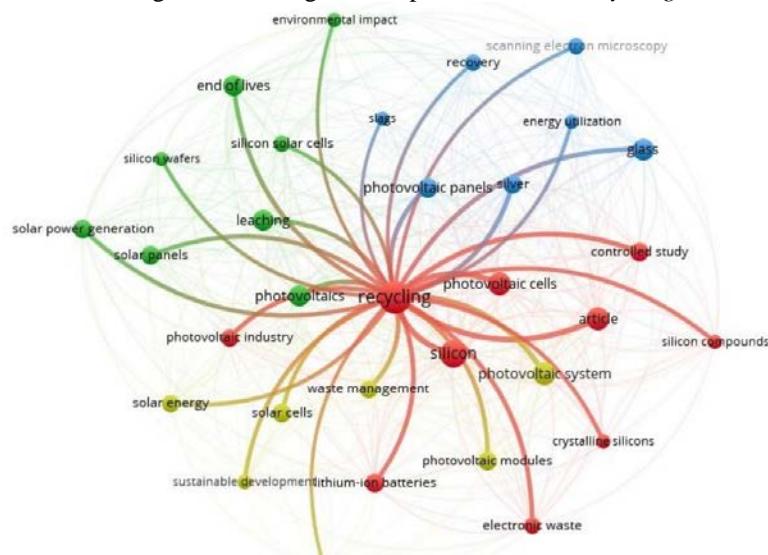


Fonte: Próprio autor

APÊNDICE D

APPENDICE B

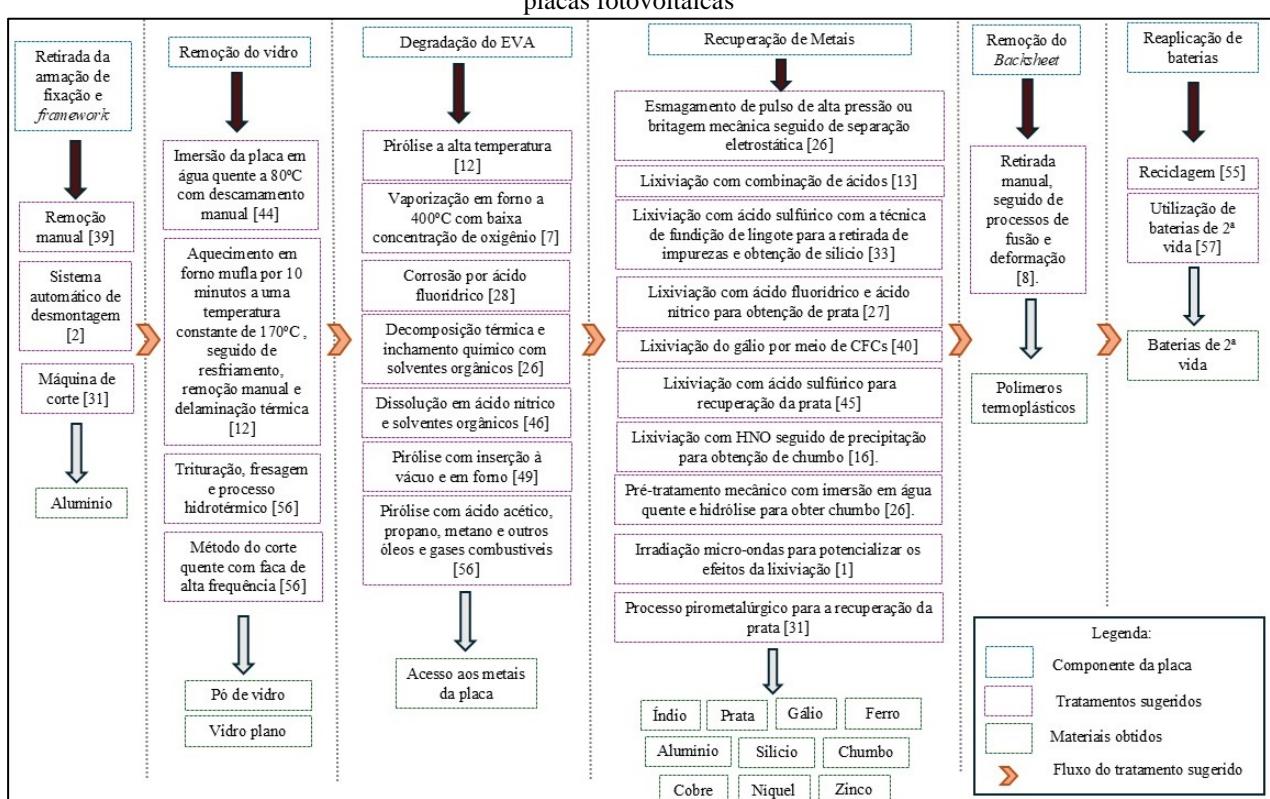
Fluxograma 4 – Diagrama da palavra-chave “recycling”



renewable energy

APÊNDICE E

APÊNDICE E



Fonte: Próprio autor