

PROCESSOS DE RECICLAGEM DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS NO BRASIL: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas a demanda por energia tem aumentado de forma progressiva, quer em função da ampliação de tipos e quantidades de equipamentos presentes nas residências, quer seja em relação aos diversos tipos de atividades que necessitam de energia para sua operação.

Neste contexto, a partir da Primeira Conferência das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento e Meio Ambiente Humano, realizada em Estocolmo em 1972, passou-se a discutir as questões referentes aos impactos causados pela utilização de recursos e a geração de energia para as gerações futuras (ONU, 1972), destacando-se as energias renováveis. Entre as fontes renováveis destaca-se a energia solar, a qual pode ser aproveitada, termicamente, para aquecimento de fluidos e ambientes e, eletricamente, pelo efeito que a radiação é capaz de causar em alguns materiais, tais como fotovoltaicos.

O objetivo deste trabalho foi realizar um levantamento bibliográfico a partir do método de mapeamento sistemático, para verificar os estudos que foram e estão sendo desenvolvidos em relação à destinação de painéis fotovoltaicos em final de vida útil ou por descarte antecipado, além dos processos de reciclagem realizados no Brasil.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A tecnologia fotovoltaica (PV) é uma das fontes de eletricidade renovável amplamente implementada (BRITO et al. 2023) sendo uma das tecnologias mais promissoras e tecnologicamente madura para a produção de energia renovável. Entretanto, a alta taxa de implantação está associada à geração de resíduos em fim de vida útil dos equipamentos fotovoltaicos contendo, particularmente, metais cancerígenos (BRITO et al. 2023). Assim, ao longo das últimas décadas, o potencial risco ambiental desses equipamentos, em conjunto com a gestão dos resíduos, tem atraído a atenção de alguns pesquisadores possibilitando assim a exploração da valorização dos resíduos produzidos pelo setor de energias renováveis.

Em relação ao Brasil, Pereira et al., (2012) apud Elgamal; Demajorovic (2020) defendem as vantagens comparativas para a implantação de sistemas de geração de energia por células solares fotovoltaicas. A radiação no território nacional é maior do que na Alemanha, que possui a maior capacidade instalada de geração solar fotovoltaica no mundo. O Brasil tem uma irradiação solar mínima de 4,25 kWh/m²/dia e máxima de 6,75 kWh/m²/dia, enquanto na Alemanha a irradiação mínima é de 2,95 kWh/m²/dia e a máxima de 3,42 kWh/m²/dia (WWF-Brasil, 2015). Apesar das condições favoráveis do país para o uso dessa tecnologia, as iniciativas ainda são bastante restritas.

Tendo em vista o aumento nas instalações de sistemas fotovoltaicos, os processos de reciclagem e de valorização dos resíduos se tornam importantes no sentido de diminuir os impactos ambientais. Segundo Yu et al. (2019) apud Brito et al. (2023), a recuperação de elementos valiosos, presentes nos resíduos fotovoltaicos, será benéfica tanto por razões econômicas quanto de sustentabilidade, já que podem ser vistos como uma fonte potencial de materiais valiosos, dado que contêm uma série de matérias-primas que podem ser recuperadas (SOUSA et al. 2023).

Uma outra ferramenta de gestão ambiental que se aplica à essa problemática, seria a Simbiose Industrial (SI), pois pode apresentar soluções compartilhadas com os mais diversos stakeholders da cadeia produtiva tanto das placas solares, como na gestão dos resíduos eletroeletrônicos (REEE). (Rocha et al, 2023)

No Brasil, de acordo com dados do Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE 2029) da Empresa Brasileira de Pesquisa Energética (EPE), atingiu-se os níveis esperados para 2029 antes do tempo, já em 2022, ultrapassando a barreira da instalação de 10 GW de GD FV (EPE, 2020). Assim, com este crescimento do uso dos painéis fotovoltaicos, o descarte tem gerado uma crescente preocupação e merece um olhar atento das autoridades e da sociedade para as devidas negociações, com a implementação de políticas públicas e o aproveitamento das oportunidades que serão geradas, bem como a condução de mais estudos acerca da reciclagem e da valoração dos resíduos gerados, tanto em termos de impactos ambientais, como nos processos de reciclagem.

Ainda incipientes no Brasil estão as normas e as regulamentações que norteiam a gestão dos resíduos sólidos fotovoltaicos, incluindo a reciclagem. Com isso, tudo indica que, no futuro, o setor poderá gerar grandes volumes de materiais, podendo colocar em xeque a vantagem do uso deste tipo de energia dentro do que preconiza os princípios da sustentabilidade, da Agenda 2030 e dos ODS, (Objetivos do Desenvolvimento Sustentável), especialmente os objetivos 7 e 9. O objetivo 7 que propõe garantir o acesso a fontes de energia viáveis, sustentáveis e modernas e o objetivo 9 o qual discorre sobre construir infraestrutura resiliente, promover a industrialização inclusiva e sustentável, e fomentar a inovação (ODS BRASIL, 2022).

Além da Política Nacional dos Resíduos Sólidos de 2010, foi assinado no Brasil, no ano de 2019, o Acordo Setorial de Eletroeletrônicos, que contém orientações gerais quanto à destinação final. Tal acordo considera que fabricantes, distribuidores e comerciantes de produtos eletroeletrônicos, devam implementar sistemas de logística reversa (BRASIL, 2019), entretanto, não existem diretrizes específicas para os resíduos sólidos fotovoltaicos.

Em 15 de agosto de 2023 foi apresentado um projeto de Lei, o PL 3.784/2023, que propõe obrigar fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes de painéis solares fotovoltaicos a estruturar e implementar sistemas de logística reversa (SENADO FEDERAL, 2023). A proposta pretende incluir ainda um inciso sobre painéis solares na Política Nacional dos Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305, de 2010).

3 METODOLOGIA

O presente trabalho de revisão bibliográfica narrativa foi desenvolvido a partir do levantamento de referências, de forma exploratória e qualitativa sobre o tema. Para tanto, foi realizado um mapeamento sistemático utilizando-se as seguintes palavras chaves: fotovoltaic panels, solar panels, Recycling, Brazil e suas respectivas expressões no idioma português, a partir das quais foram definidas strings de busca.

As buscas foram realizadas nas seguintes bases de dados: Portal de Periódicos CAPES, EBSCOhost e Science Direct, no período de julho de 2024.

Os critérios de inclusão para as bases utilizadas foram: Período (2019-2024); idioma (português, inglês, espanhol); revisado por pares ou analisados por especialistas e acesso aberto. Já os critérios de exclusão foram período anterior a 2019, não revisado por pares ou especialistas e de acesso restrito.

As referências mais relevantes, que abordam os processos de reciclagem e valorização dos resíduos fotovoltaicos, serão discutidas no presente trabalho. Estas referências foram obtidas da avaliação dos títulos dos trabalhos e, quando necessário, os resumos.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A partir das palavras-chaves definidas, as strings de busca foram: photovoltaic panels or solar panels and recycling and Brazil. Com os critérios de exclusão e inclusão apresentados foram encontrados um total de 141 artigos científicos, sendo destes, apenas seis de relevância em relação aos processos de reciclagem dos materiais utilizados nos painéis fotovoltaicos, além dos impactos ambientais decorrentes da destinação incorreta dos resíduos (Tabela 1). A maioria dos artigos encontrados são de revisão bibliográfica.

Tabela 1- Bases de dados utilizadas e referências relevantes encontradas acerca do tema reciclagem e valorização dos resíduos fotovoltaicos.

Bases de dados/total de artigos científicos	Referências relevantes
Periódicos CAPES	
2	Sousa et al (2023)
EBSCOhost	
95	Brito et al (2023) Elgamal; Demajorovic (2020) Góes et al (2023)
Science Direct	
44	Souza; Veit (2023)

Fonte: autores.

Segundo Konzen; Pereira (2020), alguns estudos estimam que o tempo médio de vida útil dos painéis fotovoltaicos é de 25 anos e que alguns países europeus já regulamentaram a estratégias para a reciclagem, compreendendo que o descarte incorreto poderá acarretar, além da perda de materiais valiosos, efeitos nocivos pela dispersão de produtos tóxicos prejudicando a saúde humana e o meio ambiente. No final do ciclo de vida das placas solares, metais como prata (Ag), cobre (Cu), gálio (Ga), índio (In), chumbo (Pb) e cádmio (Cd) são valiosos e podem ser reaproveitados, justificando-se a reciclagem, salientando-se que Pb e Cd são extremamente nocivos ao meio ambiente. Neste contexto, alguns metais presentes em painéis fotovoltaicos requerem um manuseamento especial e métodos de reciclagem específicos. O desafio é saber como gerir estas questões uma vez que os volumes devem crescer exponencialmente. Com as capacidades instaladas já são mais de 1.400 GW atualmente, a Agência Internacional de Energia estima que haverá 4675 GW de capacidade instalada até 2050.

De acordo com o mapeamento sistemático realizado no presente trabalho, os estudos relevantes apontam para a necessidade premente que se tenha metodologias e processos para a reciclagem dos resíduos provenientes dos painéis fotovoltaicos. Estudos realizados por Souza; Veit (2023) indicam que o alumínio, por exemplo, é de alta reciclabilidade e tem a maior taxa de reciclagem entre os materiais. Além disso, a reciclagem do alumínio contribui tanto para a redução de emissões e para a economia de energia. De acordo com os autores, os processos atualmente utilizados para a recuperação/reciclagem de painéis fotovoltaicos envolvem métodos pirometalúrgicos ou hidrometalúrgicos especiais, que causam poluição atmosférica e/ou geram grandes quantidades de efluentes. Além disso, muitos dos metais preciosos e raros

que os resíduos eletrônicos contêm podem ser extraídos e recuperados a partir de processos mecânicos e/ou químicos. Sverdrup et al. (2014) apud Souza; Veit (2023), mencionam que, para a prata, uma das possibilidades é a recuperação por lixiviação em ácido nítrico e posterior eletrólise.

Um estudo de Ardente et al. (2019) apud Sousa et al. (2023) analisou o desempenho de diferentes processos de reciclagem de resíduos fotovoltaicos de silício cristalino a partir de um ciclo de vida. Os autores compararam os impactos da reciclagem no ciclo de vida com os benefícios ambientais da recuperação de matérias-primas secundárias em diferentes cenários. A reciclagem de alta eficiência pode atingir estes objetivos, permitindo a recuperação de materiais de alta qualidade como o silício, o vidro e a prata, que muitas vezes se perdem nos processos de reciclagem normais. Os benefícios da recuperação destes materiais compensam os impactos dos processos de reciclagem de alta processos.

Em relação ao descarte dos resíduos de painéis fotovoltaicos, Góes et al (2023) mencionam relatório apresentado pela Agência Internacional de Energias Renováveis (IRENA) em 2016 no qual foram discutidas as primeiras projeções globais para futuros volumes de resíduos de painel fotovoltaico até 2050, estimando-se a produção anual de cerca de 60 milhões de toneladas, no caso de perdas precoces (desgaste antes da vida útil de 30 anos) e outros 78 milhões de toneladas, considerando a perda regular após 30 anos de uso, totalizando 138 milhões de toneladas anuais. De acordo com os autores, os principais efeitos conhecidos do descarte incorreto desses resíduos estão relacionados à lixiviação de metais pesados, à perda de recursos convencionais (principalmente vidro e alumínio) e de metais raros como prata, índio, gálio e germânio.

No que se refere ao volume de geração e valorização dos resíduos fotovoltaicos, Mahmoudi; Huda; Behnia (2021) apud Brito et al (2023) projetaram o fluxo de resíduos desde o ano de 2001 até o ano de 2058, com base na instalação fotovoltaica histórica nos 38 países da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE). De acordo com os autores, os estudos indicaram um volume cumulativo dos resíduos estimado entre 25 e 28,5 milhões de toneladas (MT), compondo-se no fluxo de resíduos principais, como metais básicos e especiais (4,58 PT) e outros metais (2,37 PT), seguido por resíduos não metálicos (25,69 MT), incluindo vidro (68%) e acetato de vinil etileno (EVA) (26%). Neste contexto, a criação de valor bruto dos materiais residuais recuperados (entre 36-42 bilhões de dólares) revelou um cenário promissor envolvendo todos os atores do processo (indústria, usuários, recicladores, entre outros).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise dos artigos selecionados visando à elaboração deste trabalho indicaram que estudos referentes à reciclagem de painéis fotovoltaicos no Brasil ainda é muito incipiente. Entre os artigos verificados, todos foram elaborados por autores brasileiros, sendo cinco publicados em periódicos brasileiros e dois em periódicos estrangeiros. Em função dos constituintes dos painéis fotovoltaicos, muitos deles metais de alto valor e críticos, faz-se necessário um maior investimento em estudos que visem a reciclagem de alta eficiência destes materiais.

REFERÊNCIAS

BRASIL. Boletins 2019: dezembro. Ministério de Minas e Energia. Boletins de Monitoramento do Sistema Elétrico. 2019c. Disponível em:

<http://www.mme.gov.br/web/guest//secretarias/energia-eletrica/publicacoes/boletimde-monitoramento-do-sistema-eletrico/2019>. Acesso em: 11 set. 2023.

BRITO, J. L. R. de; SANTOS, M. R. dos; SHIBAO, F. Y. Gestão e valorização de resíduos de sistemas de geração de energia fotovoltaica. *Revista Contemporânea*, v. 3, n. 9, p. 16062–16083, 2023. DOI: 10.56083/RCV3N9-136. Disponível em: <https://ojs.revistacontemporanea.com/ojs/index.php/home/article/view/1588>. Acesso em: 18 jul. 2024.

ELGAMAL, G. M.; DEMAJOROVIC, J. Barriers and perspectives for electric power generation out of photovoltaic solar panels in the brazilian energy matrix. **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**. v. 9, n. 1, p. 1-26, 2020.

EPE [Empresa de Pesquisa Energética] Balanço Energético Nacional (BEN) 2018: Ano base 2017, 2018. Disponível em <https://ben.epe.gov.br>. Acesso em jul/2024.

GÓES, P. F.; SOUSA FILHO, C. L. de; SOUZA, D. A. de; FERREIRA, E., LOPES, V. A. J.; SILVA, M. S., ALBUQUERQUE, É. L.; TANIMOTO, A. H. (2023). Resíduos de painéis solares fotovoltaicos: uma revisão dos impactos ambientais e toxicológicos. *Revista de Gestão e Secretariado*, v. 14, n. 8, 12528–12553. <https://doi.org/10.7769/gesec.v14i8.2553>

KONZEN, B.A.D.; PEREIRA, A. F. Gestão de resíduo fotovoltaico: revisão bibliográfica sobre o cenário de fim de vida do sistema. 2020. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/1011>. Acesso em 12 nov. 2023.

ODS BRASIL. Indicadores Brasileiros para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Brasília, 2022. Disponível em: <https://odsbrasil.gov.br>. Acesso em: 22 jul/ 2024.

ONU. Declaração da Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano. Tradução livre. Estocolmo, jun. 1972.

ROCHA, L.K.; SILVA, T.D.P.; DORNELES, K. O.; MORAES, C.A.M; Gestão Financeira e Simbiose Industrial na Cadeia de Logística Reversa de Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos. 2023. Anais do ENGEMA 2023. Disponível em: <https://engemausp.submissao.com.br/25/anais/arquivos/686.pdf?v=1726869210>. Acesso em 08/09/2024.

SOUSA, M. N.; OLIVEIRA, C, B; CUNHA, D. Photovoltaic electronic waste in Brazil: Circular economy challenges, potential and obstacles. **Social Sciences & Humanities Open** n. 7, 2023.

SOUZA, R. A. de.; VEIGT, H. M. Study of electrostatic separation to concentrate silver, aluminum, and silicon from solar panel scraps. **Circular Economy**, n.2, 2023