

ANÁLISE DE LITERATURA SOBRE CUSTOS DE RECICLAGEM DE EQUIPAMENTOS DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA DE ENERGIA RENOVÁVEL

LITERATURE REVIEW ON RECYCLING COSTS FOR DISTRIBUTED RENEWABLE ENERGY GENERATION EQUIPMENT

Maria Cristina Diniz¹
Paulo Alexandre Correia de Jesus²
Paulo Roberto Tardio³
Jones Luís Schaefer⁴

No século XXI observa-se a crescente transição de fontes de energia convencionais (finitas e poluentes) para as renováveis (inesgotáveis e com impacto ambiental mínimo ou nulo). Diante disso, nota-se uma preocupação emergente no desenvolvimento de estratégias pontuais para a reciclagem e reutilização de equipamentos de geração de energia. Assim, esta pesquisa investiga publicações que associem os custos destas práticas, com foco em dispositivos produtores de energia renovável. A partir da Revisão Sistemática da Literatura, foram analisados 2.061 artigos indexados na Scopus e Web of Science, entre 2005 e 2024. Observou-se nas pesquisas a predominância de aspectos técnicos, como eficiência, mas com carência de abordagens relacionadas aos custos de reciclagem destes dispositivos. Com isso, este artigo contribui para fornecer um panorama abrangente das lacunas existentes no setor, levando em conta conceitos de economia circular, políticas públicas e gerenciamento de resíduos.

Palavras-chave: Geração distribuída. Reciclagem de dispositivos de energia renovável. Energia solar.

Abstract – *In the 21st century, there has been a growing transition from conventional energy sources (finite and polluting) to renewable ones (inexhaustible and with minimal or no environmental impact). In view of this, there is an emerging concern in the development of specific strategies for the recycling and reuse of energy generation equipment. Thus, this research investigates publications that associate the costs of these practices, focusing on devices that produce renewable energy. Based on the Systematic Literature Review, 2,061*

¹ Mestranda em Engenharia de Produção e Sistema, PPGES, Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUC-PR), Curitiba, Paraná. Contato: cristina.diniz@pucpr.br

² Mestrando em Engenharia de Produção e Sistema, PPGES, Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR), Curitiba, Paraná. Contato: jesus.paulo@pucpr.edu.br

³ Doutorando em Engenharia de Produção e Sistema, PPGES, Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR), Curitiba, Paraná. Contato: paulo.tardio@pucpr.edu.br

⁴ Professor Adjunto do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas (PPGEPS) da Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR). Doutor em Engenharia de Produção e Pós-Doutorado em Engenharia de Produção. Contato: jones.schaefer@pucpr.br

articles indexed in Scopus and Web of Science were analyzed between 2005 and 2024. The research observed a predominance of technical aspects, such as efficiency, but with a lack of approaches related to the recycling costs of these devices. Thus, this article contributes to providing a comprehensive overview of the existing gaps in the sector, taking into account concepts of circular economy, public policies and waste management.

Keywords: *Distributed generation. Recycling of renewable energy devices. Solar energy.*

I. INTRODUÇÃO

Na Pré-história a descoberta do fogo pode ser considerada a primeira forma de energia. Na Idade Média a energia evoluiu, como os moinhos com a finalidade de bombear água e moer grãos. Nos séculos XVIII e XIX, na Revolução Industrial, surgiu a máquina a vapor e as ferrovias, onde a maior fonte de energia vinha do carvão. Nos séculos XIX e XX, outras fontes foram descobertas e são as mais utilizadas atualmente, entre elas: elétrica, nuclear, petróleo e gás natural. Na literatura atual observa-se que o século XXI é chamado de século ecológico devido ao grande cuidado que se tem com temas relacionados à ecologia (Niekurzak et al., 2023). As nações têm-se conscientizado que os problemas climáticos vêm se agravando e é preciso medidas enérgicas para redução dos danos causados pelos impactos da poluição, desmatamento e redução dos recursos naturais.

Nos últimos anos houve um aumento considerável de equipamentos distribuídos de energia renovável em ambientes residenciais, comerciais e industriais. Segundo a literatura (Iakovou et al., 2024), houve uma transição para fontes de energia mais limpas e sustentáveis que é necessária para combater o aquecimento global e a redução das emissões de gases do efeito estufa. Os principais motivos para o avanço da energia solar para aplicações residenciais têm sido a implantação de energia abundante, com baixos impactos ambientais e custos (Milousi et al., 2023). No entanto, este aumento será um grande desafio socioambiental, pois os painéis fotovoltaicos, por exemplo, que duram em média 25 anos, geram resíduos perigosos devido a metais pesados, como chumbo, cádmio e arsênico (Ndalloka et al., 2024).

A crescente adoção de equipamentos de geração de energia renovável, como por exemplo painéis fotovoltaicos, é fundamental para a transição para um futuro energético mais sustentável. No entanto, é crucial considerar o ciclo de vida completo desses equipamentos, incluindo sua vida útil e o destino final. Painéis fotovoltaicos, por exemplo, possuem uma vida útil estimada em torno de 25 anos (Ndalloka et al., 2024), o que significa que um volume significativo de resíduos será gerado nas próximas décadas. Esses resíduos, compostos por materiais como metais pesados (chumbo, cádmio e arsênico), representam um desafio ambiental se não forem gerenciados de forma adequada (Ndalloka et al., 2024). Nesse contexto, a reutilização e a reciclagem de equipamentos de energia renovável se tornam elementos-chave para garantir a sustentabilidade da expansão da geração de energia limpa, minimizando os impactos ambientais e promovendo a economia circular. O intuito de uma economia circular é criar um meio onde há a conservação dos recursos e estes são trazidos de volta ao ciclo de vida após serem usados (GAUSTAD et al., 2018b).

De acordo com De Laurentiis et al. (De Laurentiis et al., 2024), o pensamento do ciclo de vida é essencial para avaliar os impactos de políticas e medidas relacionadas ao gerenciamento de resíduos, incluindo a avaliação do ciclo de vida e o custeio do ciclo de vida.

Deste modo, as motivações para o desenvolvimento deste artigo correlacionam-se com a emergente necessidade de compreender os impactos financeiros da reciclagem de dispositivos de energia renovável, proporcionando uma base teórica que contribua para futuros estudos e também possíveis tomadas de decisão de órgãos públicos. Ao investigar a interação entre sustentabilidade, inovação tecnológica e custos, espera-se levantar discussões que despertem e ampliem o conhecimento neste setor.

Além disso, objetiva-se também não somente a identificação de insights valiosos na literatura, mas também um maior entendimento e avaliação da viabilidade econômica neste setor, para promover a melhoria nos processos de reciclagem e desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e de custos reduzidos.

II. METODOLOGIA

Foram utilizadas duas bases de dados científicos com maior relevância e concentração sobre o tema escolhido para pesquisa bibliográfica (conforme tabela 1): *Web of Science* e *Scopus*. Essas bases foram selecionadas devido à sua abrangência e credibilidade na literatura científica.

Tabela 1 – Base de dados

	Web of Science	Scopus
Tipo de Documento	Artigos	Artigos
Busca em	Title, abstract or Keywords	Title, abstract or Keywords
Anos	2005 a 2024	2005 a 2024
Termos de Busca	(((TS= (cost)) OR TS= (economic viability)) AND TS= (renewable energy)) OR TS= (solar energy)) OR TS= (photovoltaic energy)) AND TS= (recycling)	(TITLE-ABS-KEY ("cost*") OR TITLE-ABS-KEY ("economic viability") AND TITLE-ABS-KEY ("renewable energy") OR TITLE-ABS-KEY ("solar energy") OR TITLE-ABS-KEY ("photovoltaic energy") AND TITLE-ABS-KEY (recycling) OR TITLE-ABS-KEY (reuse))
Idioma	Inglês	Inglês

Conforme tabela 1, a busca nas plataformas foi delimitada por título, *abstract* e palavras-chaves. Assim, aplicou-se os termos “cost”, “economic viability”, “renewable energy”, “solar energy”, “photovoltaic energy” e “recycling”. O uso destes termos foi essencial para capturar uma ampla gama de documentos relevantes ao estudo. Além disso, os filtros ano (2005 a 2024), tipo de documento (artigo) e idioma dos textos (inglês) foram aplicados para contribuir na análise da tendência e evolução do tema ao longo dos anos, na garantia da credibilidade das publicações revisadas e na compreensão e estudo em uma língua comum e predominante na literatura científica.

Após a pesquisa bibliográfica nas duas bases mencionadas, foram realizadas três análises principais:

1-Multidisciplinariedade dos Artigos: utilizando a tabela 2, foi analisada a multidisciplinariedade dos artigos encontrados, destacando a integração de diferentes áreas do conhecimento.

2 -Análise de Termos: com a figura 1, extraída do software VOSViewer, foi realizada uma análise dos termos presentes nos artigos, identificando as principais tendências e temas recorrentes.

3-Matriz SWOT: com a expertise dos autores e embasados pela rica contribuição dos artigos encontrados, foi elaborada uma matriz SWOT, avaliando as forças, fraquezas, oportunidades e ameaças relacionadas ao tema estudado.

III. RESULTADOS

Este trabalho foi realizado através da pesquisa dos principais artigos publicados entre 2005 e 2024 com a temática de custos relacionados à reciclagem e reutilização de dispositivos distribuídos de geração de energia renovável. Após a aplicação dos filtros na Web of Science e Scopus (conforme Tabela 1), obteve-se um total de 1455 e 606 artigos, respectivamente, envolvendo várias áreas do conhecimento. Cada um dos artigos pode estar compreendido em diversas categorias e áreas de conhecimento, conforme demonstrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Categorias

Categorias	Web of Science	Scopus
Environmental Science		364
Energy		268
Engineering		207
Materials Science		87
Chemical Engineering		65
Chemistry		60
Energy Fuels	691	
Environmental Sciences	492	
Engineering Environmental	364	
Green Sustainable Science	310	
Technology		
Engineering Chemical	189	
Materials Science Multidisciplinary	131	
Thermodynamics	122	
Chemistry Physical	121	
Engineering Electrical Electronic	98	
Environmental Studies	93	
Other	610	278

Percebe-se, com base nos dados da tabela 2, que as pesquisas envolveram um caráter multidisciplinar, em que as áreas com maior citação ao tema foram *Environmental Science e Energy Fuels*. Esta natureza multidisciplinar demonstra a ascendente preocupação sobre a problemática ambiental e a busca por soluções sustentáveis.

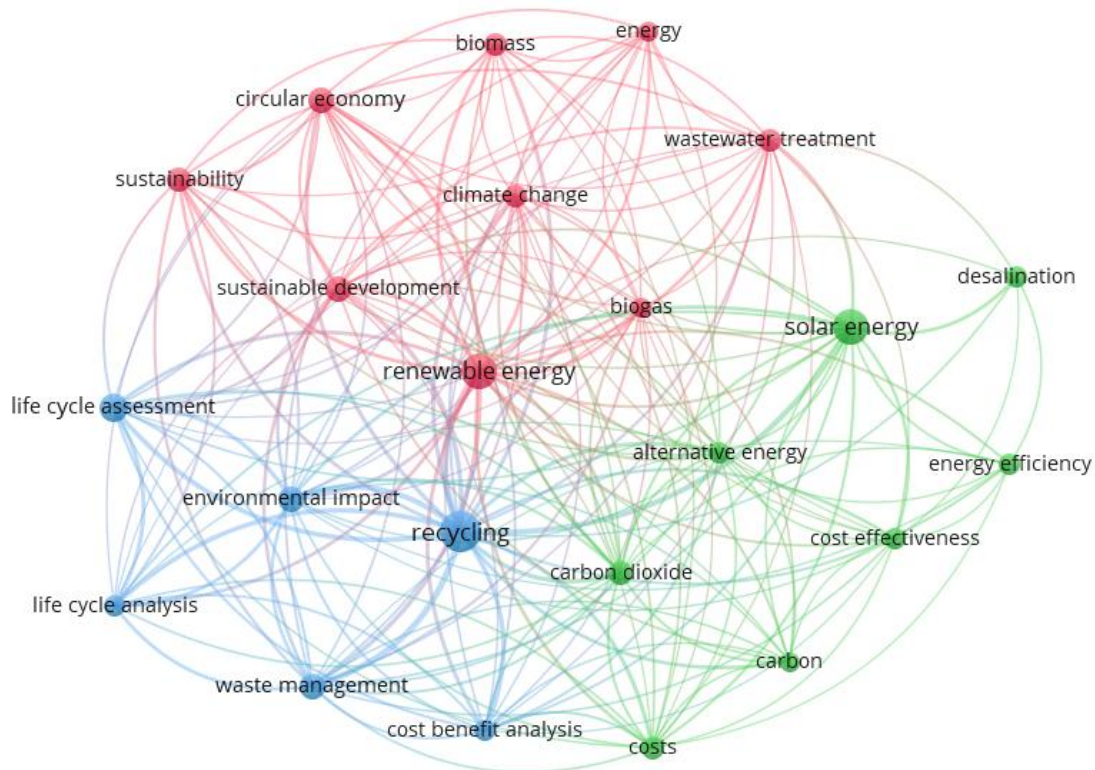
A Tabela 2 apresenta as categorias de áreas de conhecimento encontradas na Web of Science e na Scopus que abrangem os artigos incluídos nesta revisão sistemática. A diversidade de áreas, como Ciências Ambientais, Energia, Engenharia, Ciência dos Materiais e Engenharia Química, demonstra a natureza multidisciplinar da pesquisa.

Além disso, notou-se na revisão, que nos últimos anos houve o aumento acentuado do tema, mas que na maioria dos artigos ainda focam em aspectos técnicos, abordando de forma sucinta custos isoladamente, tornando-se assim uma lacuna para novas pesquisas. Chowdhury et al.(Chowdhury et al., 2024), nesta perspectiva, propõe uma abordagem de economia circular, onde o alto custo da reciclagem possa ser dividido entre todas as partes interessadas. A *Economia Circular* é um modelo de produção e consumo onde se busca

minimizar o desperdício e maximizar a utilização dos recursos, inspirando-se no ciclo natural, incentivando a reutilização de recursos, a reciclagem, o reparo, tornando o processo mais sustentável e eficiente.

Em todas as categorias da pesquisa (tabela 2) encontram-se muitos artigos referenciando o ciclo de vida das baterias solares, mas sem explicitar os custos e com ênfase em protocolos técnicos. No estudo de (Jiang et al., 2024), por exemplo, avaliam-se as etapas de produção dos painéis com foco na sustentabilidade. Já (Ndalloka et al., 2024), aborda políticas, estratégias e processos de reciclagem. Além disso, algumas publicações tem direcionamento ao tema *custos*, como verificado em estudos de (Karmakar et al., 2024), que analisou o custo-benefício na determinação da viabilidade econômica de um projeto de reciclagem de módulos solares na Índia, e (Li et al., 2023) que analisou os custos e benefícios de tecnologias de reciclagem, comparados de forma abrangente usando uma avaliação do ciclo de vida, com olhar na China. O *software VosViewer* (figura 1) foi utilizado para reforçar a análise e o estudo dos textos acadêmicos sobre os custos correlacionados com a reciclagem e reutilização de dispositivos de geração de energia renovável distribuída.

Figura 1 – Nuvem de palavras

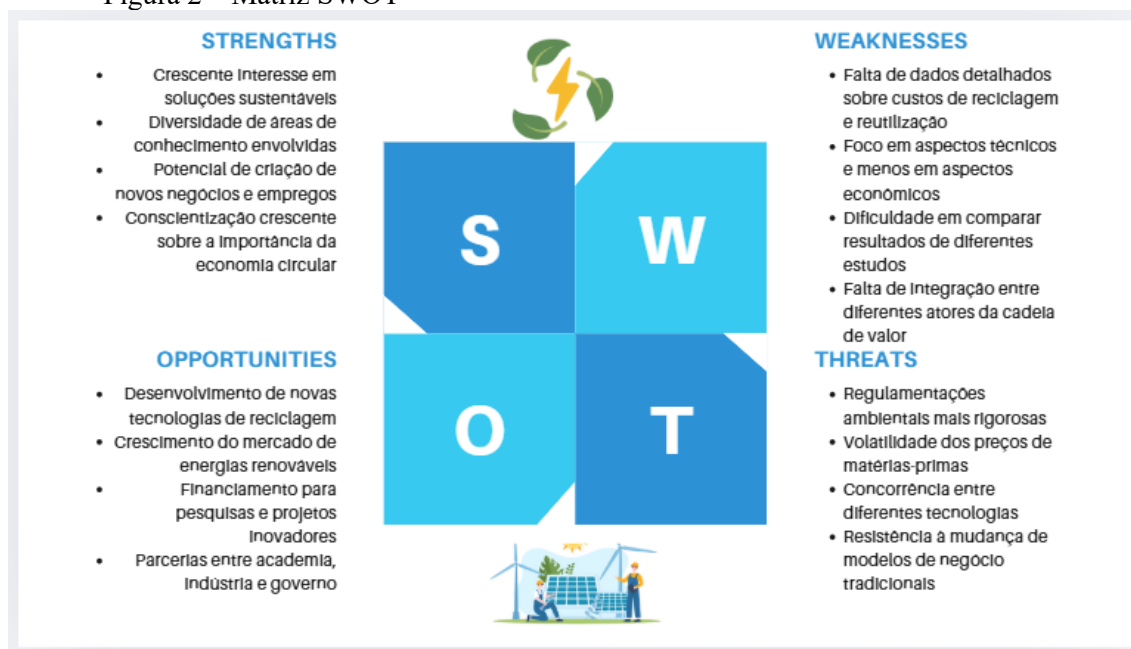


Nota-se que os termos que se destacam são *Recycling*, *Renewable energy* e *Solar energy*. Esta análise corrobora com os achados da tabela 2. Com a ajuda desta representação gráfica identificamos 3 clusters representados pelas cores verde, azul e vermelho. O mapa revela os principais temas abordados na literatura e suas inter-relações. O cluster verde agrupa as termos relacionados à energia solar, que é o termo com maior destaque no cluster. A participação da energia solar na matriz energética global tem crescido muito (KABIR et al., 2023). O cluster azul tem na sua centralidade o termo *recycling*, e agrupa termos como gestão de resíduos e avaliação de ciclo de vida, o qual De Laurentiis et al., (2024) enfatiza a importância. Já no cluster vermelho há uma forte

ligação entre energia renovável (maior destaque do cluster) com sustentabilidade. Os combustíveis fósseis são ainda a maior fonte de geração de energia elétrica, mas espera-se que isso mude em breve, e a geração de energia renovável aumente consideravelmente, especialmente por meio de painéis solares fotovoltaicos (MAJEWSKI et al., 2021). Essa visualização em clusters auxilia na identificação de áreas de pesquisa específicas dentro do tema mais amplo.

A Figura 2 apresenta a matriz SWOT elaborada a partir da expertise dos autores e de informações extraídas da revisão sistemática de literatura que embasa este artigo. No que se refere às forças, destaca-se o crescente interesse global em soluções sustentáveis, impulsionado por eventos como a COP 27 (Chowdhury et al., 2024), a diversidade de áreas de conhecimento envolvidas (Tabela 2), o potencial para criação de novos negócios e empregos, e a crescente conscientização sobre a importância da economia circular (Gaustad et al., 2018).

Figura 2 – Matriz SWOT



As oportunidades identificadas incluem o desenvolvimento de novas tecnologias de reciclagem (Ziemińska-Stolarska et al., 2023), o crescimento do mercado de energias renováveis, a disponibilidade de financiamento para pesquisas e projetos inovadores, e a possibilidade de parcerias entre academia, indústria e governo.

Em relação às fraquezas, foram observadas a falta de dados detalhados sobre custos de reciclagem e reutilização; o foco predominante é em aspectos técnicos em detrimento dos econômicos, a dificuldade em comparar resultados de diferentes estudos devido à variedade de métodos utilizados, e a falta de integração entre os atores da cadeia de valor (Karmakar et al., 2024).

Por fim, as ameaças analisadas compreendem regulamentações ambientais mais rigorosas (dado que as políticas de gestão de módulos fotovoltaicos são escassas, mesmo em países com expansão no setor) (Ziemińska-Stolarska et al., 2023), a volatilidade dos preços de matérias-primas, a concorrência entre diferentes tecnologias, e a resistência à mudança de modelos de negócio tradicionais.

IV. CONCLUSÃO

Este artigo teve como objetivo analisar a literatura científica disponível sobre os custos associados à reciclagem e reutilização de dispositivos de geração de energia renovável distribuída. A pesquisa destacou a crescente preocupação global com a transição para fontes de energia mais sustentáveis, evidenciando a relevância do tema.

A análise da literatura revelou uma quantidade significativa de artigos que abordam a reciclagem de dispositivos de geração de energia renovável, com foco predominantemente em aspectos técnicos, como o ciclo de vida dos produtos e as estratégias de reciclagem. No entanto, uma lacuna importante foi identificada em relação às discussões sobre os custos envolvidos no processo de reciclagem, o que é crucial para a viabilidade econômica e, consequentemente, para a adoção em larga escala das tecnologias de energia renovável. Em resumo, este estudo contribui para a compreensão dos desafios e oportunidades relacionados à reciclagem de dispositivos de energia renovável, destacando a importância de uma abordagem multidisciplinar e integrada para alcançar a sustentabilidade econômica e ambiental.

Diante dessa situação, futuras pesquisas devem se concentrar na avaliação econômica da reciclagem, analisando não apenas os custos diretos, mas também os benefícios ambientais e sociais associados a esse processo. A investigação poderia explorar soluções integradas que promovam práticas mais sustentáveis, aumentando a acessibilidade e viabilidade das tecnologias de energia renovável. Isso abriria novos caminhos para a sustentabilidade econômica em um contexto de crescente preocupação ambiental.

Além disso, é fundamental que as futuras pesquisas considerem a implementação de políticas públicas que incentivem a reciclagem e reutilização de dispositivos de energia renovável, promovendo a economia circular e minimizando os impactos ambientais. A colaboração entre academia, indústria e governo será essencial para desenvolver tecnologias mais eficientes e economicamente viáveis, garantindo um futuro energético sustentável.

Futuras pesquisas devem focar na avaliação econômica da reciclagem, considerando custos diretos e benefícios ambientais e sociais. É importante explorar soluções integradas que promovam práticas sustentáveis e ampliem a viabilidade das tecnologias renováveis. Isso abriria novos caminhos para a sustentabilidade econômica em um contexto de crescente preocupação ambiental. Também se destaca a necessidade de políticas públicas que incentivem a reciclagem e a economia circular. A cooperação entre academia, indústria e governo será crucial para desenvolver tecnologias mais eficientes e viáveis, garantindo um futuro energético sustentável.

V. REFERÊNCIAS

CHOWDHURY, M. J. M. et al. A Blockchain-Enabled Circular Economy: Collaborative Responsibility in Solar Panel Recycling. **IEEE Industrial Electronics Magazine**, 2024.

DE LAURENTIIS, V. et al. Life cycle thinking for the assessment of waste and circular economy policy: status and perspectives from the EU example. **Waste Management**, v. 179, p. 205–215, 2024.

GAUSTAD, G. et al. Circular economy strategies for mitigating critical material supply issues. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 135, p. 24–33, 2018a.

GAUSTAD, G. et al. Circular economy strategies for mitigating critical material supply issues. **RESOURCES CONSERVATION AND RECYCLING**, v. 135, n. SI, p. 24–33, ago. 2018b.

IAKOVOU, E. et al. Next-generation reverse logistics networks of photovoltaic recycling: Perspectives and challenges. **Solar Energy**, v. 271, 2024.

JIANG, T.; YIN, P.; JIN, Q. Performances of typical photovoltaic module production from the perspective of life cycle sustainability assessment. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 64, 2024.

KABIR, S. E. et al. Analysing economic feasibility of recycling end-of-life solar photovoltaic modules of Bangladesh. **CLEAN TECHNOLOGIES AND ENVIRONMENTAL POLICY**, v. 25, n. 10, p. 3231–3245, dez. 2023.

KARMAKAR, A.; SADHU, P. K.; DAS, S. Waste recovery cost analysis of life ended PV module in Indian context. **MICROSYSTEM TECHNOLOGIES-MICRO-AND NANOSYSTEMS-INFORMATION STORAGE AND PROCESSING SYSTEMS**, v. 30, n. 9, p. 1099–1107, 2024.

LI, J. et al. Life cycle analysis of the economic costs and environmental benefits of photovoltaic module waste recycling in China. **RESOURCES CONSERVATION AND RECYCLING**, v. 196, 2023.

MILOUSI, M.; SOULIOTIS, M. A circular economy approach to residential solar thermal systems. **Renewable Energy**, v. 207, p. 242–252, 2023.

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

NIEKURZAK, M.; BRELIK, A.; LEWICKI, W. ECONOMIC POTENTIAL OF RECOVERY AND RECYCLING OF SILICONE PHOTOVOLTAICS CELLS AND NON-FERROUS METALS AS PART OF THE TRANSITION TOWARDS A CIRCULAR ECONOMY. **Economics and Environment**, v. 86, n. 3, p. 202–224, 2023.

ZIEMIŃSKA-STOLARSKA, A.; PIETRZAK, M.; ZBICIŃSKI, I. Effect of Recycling on the Environmental Impact of a High-Efficiency Photovoltaic Module Combining Space-Grade Solar Cells and Optical Micro-Tracking. **Energies**, v. 16, n. 8, 2023.

VI. COPYRIGHT

Direitos autorais: O(s) autor(es) é(são) o(s) único(s) responsável(is) pelo material incluído no artigo.