



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS ARARANGUÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS, TECNOLOGIAS E SAÚDE
CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIA

Renato Nicoloso de Oliveira

Descomissionamento de Usinas Solares Fotovoltaicas:
uma revisão sistemática da literatura

Araranguá
2025

Renato Nicoloso de Oliveira

Descomissionamento de Usinas Solares Fotovoltaicas:
uma revisão sistemática da literatura

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia de Energia do Campus Araranguá da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Lopes Pfitscher

Araranguá
2025

Oliveira, Renato Nicoloso de
Descomissionamento de Usinas Solares Fotovoltaicas :
uma revisão sistemática da literatura / Renato Nicoloso de
Oliveira ; orientador, Luciano Lopes Pfitscher, 2025.
32 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Araranguá,
Graduação em Engenharia de Energia, Araranguá, 2025.

Inclui referências.

1. Engenharia de Energia. 2. Descomissionamento. 3.
Energia Solar Fotovoltaica. 4. Resíduos Eletrônicos. I.
Pfitscher, Luciano Lopes. II. Universidade Federal de
Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Energia. III.
Título.

Renato Nicoloso de Oliveira

Descomissionamento de Usinas Solares Fotovoltaicas:
uma revisão sistemática da literatura

O presente Trabalho de Conclusão de Curso, do curso de Engenharia de Energia, foi avaliado e aprovado pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Luciano Lopes Pfitscher, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Profa. Kátia Cilene Rodrigues Madruga, Dra.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Afonso Henrique da Silva Júnior, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que essa é a versão original e final do trabalho que foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro/a de Energia.



Documento assinado digitalmente
Katia Cilene Rodrigues Madruga
Data: 07/12/2025 11:55:21-0300
CPF: ***.612.180-**
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Profa. Kátia Cilene Rodrigues Madruga , Dra.
Coordenadora do Curso



Documento assinado digitalmente
Luciano Lopes Pfitscher
Data: 08/12/2025 07:20:54-0300
CPF: ***.239.050-**
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Luciano Lopes Pfitscher, Dr.
Orientador



Documento assinado digitalmente
Renato Nicoloso de Oliveira
Data: 07/12/2025 00:00:25-0300
CPF: ***.234.790-**
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Renato Nicoloso de Oliveira
Autor

Araranguá, 27 de Novembro de 2025

Dedico este trabalho aos meus pais Renato Dacol e Luciane Nicoloso, e ao amigo Lucas Mathieu (in memoriam) que nos deixou recentemente. Você faz falta irmão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, à minha família, pelo amor incondicional, pela compreensão nos períodos de ausência e pelo incentivo constante para que eu não desistisse desta caminhada acadêmica. Sem o apoio, a paciência e a confiança de vocês, a realização deste trabalho não teria sido possível.

Aos amigos e amigas, Gabriel Garcia, Bruna Mascarenhas, Maria Luísa Anacleto, Clarice Selau, Cassiana Dadda, Aléxia Girardi e Laura Antunes, deixo meu sincero agradecimento pelo incentivo para que este trabalho saísse do campo da idéia. Agradeço também pelas conversas, pelas palavras de ânimo nos momentos mais difíceis e por celebrarem comigo cada pequena conquista. A presença de vocês tornou essa trajetória mais leve e significativa.

Registro, igualmente, minha profunda gratidão à minha psicóloga Rafaella, que teve papel fundamental para que eu não desistisse deste TCC. Seu acolhimento, suas escutas atentas e o apoio profissional foram essenciais para que eu enfrentasse a ansiedade, organizasse minhas ideias e retomasse a confiança no meu próprio percurso.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para que este trabalho se concretizasse, o meu muito obrigado.

“O cientista não é o homem que fornece as verdadeiras respostas; é quem faz as verdadeiras perguntas”. (Claude Lévi-Strauss)

RESUMO

O descomissionamento de usinas solares fotovoltaicas e a consequente geração de resíduos eletrônicos apresentam-se como um desafio emergente para a sustentabilidade ambiental, econômica e regulatória. Neste trabalho, buscou-se analisar criticamente o cenário da gestão de resíduos de painéis solares fotovoltaicos em fim de vida, tendo como objetivo principal mapear e sintetizar as principais políticas, práticas internacionais, impactos ambientais, rotas tecnológicas de reciclagem e barreiras de implementação encontradas em diferentes contextos. Para isso realizou-se uma revisão sistemática da literatura científica no Portal de Periódicos CAPES. Os resultados da busca passaram por dois filtros de forma a escolher artigos mais recentes e de fonte aberta, obtendo-se um total de 12 artigos elegíveis para leitura e análise aprofundada. Os resultados evidenciaram que a expectativa prática de vida útil dos módulos é inferior ao padrão teórico na maioria dos mercados, antecipando o pico de geração de resíduos em escala global e regional, e condicionando a necessidade de infraestrutura robusta para coleta, rastreabilidade, reciclagem e destinação ambientalmente adequada. Observou-se predominância de abordagens voltadas à economia circular, com destaque para políticas de responsabilidade estendida do produtor em contextos mais avançados, enquanto países emergentes ainda carecem de regulação, investimento em infraestrutura e conscientização para adoção de práticas sustentáveis. Concluiu-se que a implantação eficaz de políticas integradas, incentivo à inovação tecnológica e promoção de bancos de dados nacionais e regionais são essenciais para garantir a sustentabilidade do setor fotovoltaico e tornar o reaproveitamento de materiais uma ferramenta viável para a transição energética limpa.

Palavras-chave: Descomissionamento; Energia Solar Fotovoltaica; Resíduos Eletrônicos.

ABSTRACT

The decommissioning of photovoltaic solar power plants and the consequent generation of electronic waste present an emerging challenge for environmental, economic, and regulatory sustainability. This work sought to critically analyze the scenario of end-of-life photovoltaic solar panel waste management, with the main objective of mapping and synthesizing the main policies, international practices, environmental impacts, technological recycling routes, and implementation barriers encountered in different contexts. To this end, a systematic review of the scientific literature was conducted in the CAPES Periodicals Portal. The search results were filtered through two options to select more recent and open-source articles, resulting in a total of 12 articles eligible for in-depth reading and analysis. The results showed that the practical life expectancy of the modules is lower than the theoretical standard in most markets, anticipating the peak of waste generation on a global and regional scale, and conditioning the need for robust infrastructure for collection, traceability, recycling, and environmentally sound disposal. It is observed that approaches focused on the circular economy predominate, with emphasis on secure producer responsibility policies in more advanced contexts, while emerging countries still lack regulation, infrastructure investment, and awareness for the adoption of sustainable practices. It is concluded that the effective implementation of integrated policies, the encouragement of technological innovation, and the promotion of national and regional databases are essential to guarantee the sustainability of the photovoltaic sector and to make the reuse of materials a viable tool for the clean energy transition.

Keywords: Decommissioning; Photovoltaic Solar Energy; Electronic Waste.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Etapas do Método de Revisão Sistemática	17
Figura 2 - Fluxograma da seleção dos artigos para composição da revisão	20
Figura 3 - Composição típica de módulos fotovoltaicos cristalinos	26

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Critérios de elegibilidade para seleção dos estudos	18
Quadro 2 - Descrição dos artigos selecionados e síntese dos resultados obtidos	22
Quadro 3 - Comparativo entre países maduros e emergentes	32
Quadro 4 - Matriz SWOT (Cenário Brasileiro)	35

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	14
2.1	OBJETIVO GERAL	14
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3	REFERENCIAL TEÓRICO	15
3.1	DESCOMISSONAMENTO DE USINAS SOLARES FOTOVOLTAICAS	15
4	METODOLOGIA	16
4.1	TIPO DE ESTUDO	16
4.2	FORMULAÇÃO DA PERGUNTA DE PESQUISA E CHAVE DE BUSCA	17
4.3	PLATAFORMA DE DADOS	18
4.4	CRITÉRIOS DE ELEGIBILIDADE	18
4.5	SELEÇÃO DE ESTUDOS E EXTRAÇÃO DE DADOS	19
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	20
5.1	PRINCIPAIS DESTINAÇÕES DOS RESÍDUOS FOTOVOLTAICOS	24
5.2	PROJEÇÕES QUANTITATIVAS DE RESÍDUOS	25
5.3	VIDA ÚTIL DOS MÓDULOS E IMPACTO NOS RESÍDUOS	27
5.4	SOLUÇÕES TECNOLÓGICAS E BARREIRAS	28
5.5	IMPACTO AMBIENTAL E RISCOS	29
5.6	DEMANDA DE INSUMOS CRÍTICOS E ECONOMIA CIRCULAR	30
5.7	HETEROGENEIDADE REGIONAL E POLÍTICAS PÚBLICAS	31
5.8	ASPECTOS TECNOLÓGICOS E BARREIRAS À RECICLAGEM	33
5.9	ECONOMIA CIRCULAR E DESIGN THINKING PARA PV	33
5.10	LACUNAS NA PRODUÇÃO DE DADOS E RECOMENDAÇÕES	34
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	35
	REFERÊNCIAS	40

1 INTRODUÇÃO

A substituição progressiva dos combustíveis fósseis por fontes renováveis de energia é um movimento central nas estratégias globais para mitigação das mudanças climáticas e para transição rumo a uma economia de baixo carbono (CHEN et al., 2023). Nesse cenário, a energia solar fotovoltaica destaca-se pelo crescimento acelerado, pela descentralização produtiva e pela promessa de ampliação do acesso energético em diferentes regiões do planeta (SHRESTHA; ZAMAN, 2024).

O avanço vertiginoso das instalações fotovoltaicas traz consigo importantes desafios relacionados ao descomissionamento dos módulos e à gestão dos resíduos, tema que vem ganhando destaque na literatura científica internacional (FRANZONI; LEGGERINI, BANNÒ, 2024). São estimadas dezenas de milhões de toneladas de resíduos de módulos fotovoltaicos nos próximos 20 a 30 anos, tornando imprescindível o desenvolvimento de políticas e tecnologias para a destinação ambientalmente adequada desses materiais (TRYPLSKA et al., 2022).

Diversos estudos apontam não apenas o potencial de valorização econômica dos resíduos, dada a presença de metais nobres e materiais recicláveis (FRANZONI; LEGGERINI, BANNÒ, 2024), mas também os riscos inerentes ao manejo inadequado, como a liberação de metais tóxicos (Cd, Pb) para o solo e para a água (FALFUSHYNSKA, 2024). Tecnologias de reciclagem, logística reversa, adoção de políticas de responsabilidade estendida do produtor e iniciativas de economia circular têm sido propostas e implementadas em diferentes contextos, a depender do nível de maturidade institucional, da regulação vigente e da disponibilidade de infraestrutura (TAN et al., 2022; BOGACKA et al., 2020; MADRIGAL; YGER-RANIGA; YANG, 2024).

Ainda são observadas lacunas importantes, especialmente em países emergentes, onde há déficit de regulamentação específica, subdimensionamento de sistemas de coleta, dificuldades para rastreabilidade dos resíduos e baixa conscientização dos atores envolvidos (FRANZ; PIRINGER, 2020). Assim, torna-se urgente mapear as experiências internacionais, identificar os principais desafios e propor subsídios para políticas públicas eficazes e integradas.

Sabe-se que a Energia Solar Fotovoltaica é uma fonte altamente sustentável em decorrência de sua composição, sobretudo por metais raros, vidro e

alumínio, possibilitando o reaproveitamento de até 90% de sua estrutura. Contudo, no Brasil, tal reaproveitamento pode ser comprometido pela falta de legislação ou órgãos específicos que fiscalizem o descomissionamento e destinação dos seus componentes ao final de sua vida útil (GOSS, 2024). Nesse sentido, considerando que a estimativa de descarte de sistemas solares fotovoltaicos no país seja de 550 mil toneladas (CANAL SOLAR, 2021), é importante basear-se em experiências internacionais e soluções propostas da literatura que venham a direcionar esse mesmo contexto em solo brasileiro.

A escolha do tema deste Trabalho de Conclusão de Curso decorre da combinação entre a rápida expansão da energia solar fotovoltaica, o volume crescente de resíduos projetado para as próximas décadas e as dificuldades regulatórias e operacionais observadas em países emergentes, em especial no Brasil. Diante disso, torna-se relevante investigar como a literatura internacional tem tratado essas questões, de modo a identificar lições, boas práticas e desafios que possam subsidiar políticas públicas e estratégias empresariais voltadas a um fim de vida ambientalmente adequado para usinas solares fotovoltaicas.

Esta pesquisa tem por objetivo analisar, a partir de uma revisão sistemática da literatura internacional, as práticas, políticas, impactos ambientais, barreiras e soluções tecnológicas relacionadas ao descomissionamento e à gestão de resíduos de usinas solares fotovoltaicas, contribuindo para o debate sobre sustentabilidade e inovação no setor de energia renovável.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar, por meio de revisão sistemática da literatura científica internacional, o panorama atual relacionado ao descomissionamento e à gestão de resíduos de usinas solares fotovoltaicas.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar as abordagens de destinação final empregadas nos módulos fotovoltaicos ao final da vida útil, conforme descrito nos artigos analisados.
- Analisar os impactos ambientais relacionados ao descomissionamento das usinas solares fotovoltaicas, considerando riscos, benefícios e inovações tecnológicas apresentados nos estudos internacionais.
- Levantar as estimativas de tempo de vida útil dos sistemas fotovoltaicos e os volumes previstos de resíduos provenientes do descomissionamento, conforme os diferentes contextos abordados.
- Examinar as soluções e estratégias propostas nos artigos para a gestão e recuperação dos resíduos fotovoltaicos, incluindo mecanismos econômicos, regulatórios e tecnológicos.
- Identificar convergências, divergências, desafios e lacunas nas políticas e práticas internacionais, com vistas a subsidiar recomendações para aprimorar a gestão de resíduos de usinas solares fotovoltaicas no Brasil.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 DESCOMISSIONAMENTO DE USINAS SOLARES FOTOVOLTAICAS

O descomissionamento de usinas solares fotovoltaicas pode ser definido como o conjunto de ações técnicas, administrativas e ambientais conduzidas para a desativação definitiva da usina ao final de sua vida útil, englobando etapas como o desligamento seguro dos sistemas, desmontagem e remoção dos módulos fotovoltaicos, inversores e demais componentes, gerenciamento e destinação ambientalmente adequada dos resíduos, bem como a restauração da área ocupada (SUNR, 2024). O processo exige planejamento detalhado e conformidade com normas técnicas e regulatórias, assegurando que todos os materiais desmontados sejam corretamente identificados, classificados e encaminhados para reciclagem, acondicionamento ou descarte por parceiros certificados, minimizando impactos ambientais e riscos à saúde humana (SHRESTHA; ZAMAN, 2024).

As principais etapas do descomissionamento de usinas fotovoltaicas, conforme a literatura, envolvem: análise técnica da planta, desligamento dos sistemas, desmontagem dos módulos e equipamentos, logística de transporte dos materiais, classificação dos resíduos gerados, destinação para reciclagem, reúso ou descarte final e elaboração de relatórios documentais para fins de transparência e atendimento à legislação ambiental vigente (SUNR, 2024); (SHRESTHA; ZAMAN, 2024). Trata-se de uma etapa estratégica no ciclo de vida do empreendimento, sendo essencial para garantir a rastreabilidade dos materiais, evitar contaminação ambiental e potencializar a recuperação de recursos valiosos presentes nos sistemas fotovoltaicos (FRANZONI; LEGGERINI, BANNÒ, 2024).

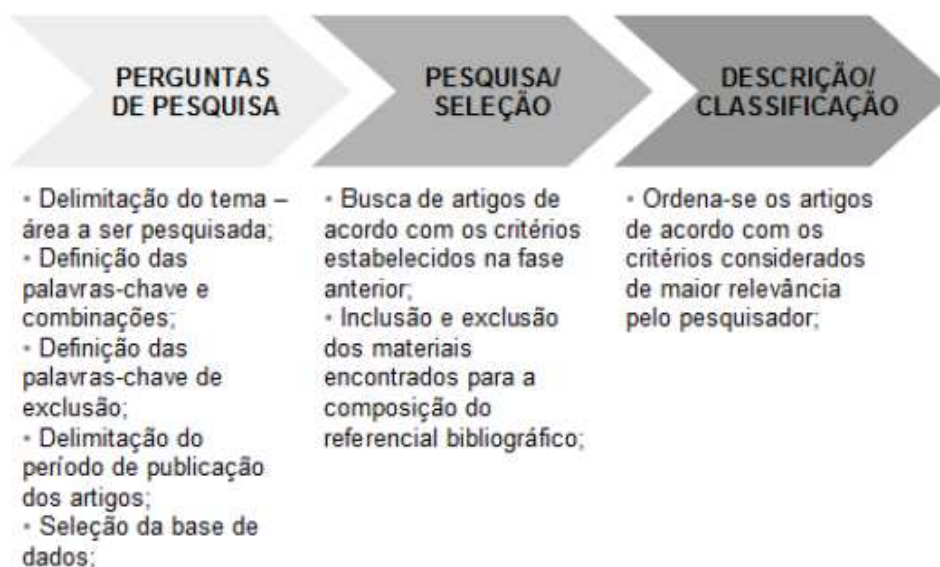
4 METODOLOGIA

4.1 TIPO DE ESTUDO

Para atingir o objetivo da pesquisa, optou-se por realizar uma revisão sistemática da literatura. Tal método visa identificar, selecionar e sintetizar os principais achados de uma determinada temática abordada pelo meio científico, por meio de etapas sistematizadas de pesquisa (ARMITAGE; KEEBLE-ALLEN, 2008). Quanto à caracterização desse estudo, trata-se de uma abordagem exploratória e descritiva, de caráter qualitativo, com base secundária em artigos publicados em periódicos científicos.

Para dar base à revisão sistemática, utilizou-se a proposta metodológica de Gohr et al. (2013), que define a sequência de passos para execução do trabalho em três etapas: 1) Perguntas de pesquisa; 2) Pesquisa/Seleção de artigos; 3) Descrição/Classificação de artigos selecionados. Essas etapas estão expostas e detalhadas na Figura 1.

Figura 1 - Etapas do Método de Revisão Sistemática



Fonte: Gohr et al. (2013)

Na sequência, serão explicitadas as etapas desenvolvidas conforme metodologia proposta.

4.2 FORMULAÇÃO DA PERGUNTA DE PESQUISA E CHAVE DE BUSCA

A pergunta formulada para a condução da pesquisa foi: “Qual o panorama atual do Descomissionamento de Usinas Solares Fotovoltaicas no cenário mundial e qual aprendizado pode servir de base para o tema no Brasil?”.

A partir dessa pergunta pode-se restringir a temática de interesse e, em seguida, fez-se necessária a definição das palavras-chave, que servem como identificadores do assunto a ser pesquisado. Para combinar as palavras-chave utilizaram-se os operadores booleanos “OR” e “AND”, que estabelecem relação de alternativa e vínculo entre os identificadores, respectivamente (Gohr et al., 2013), e por fim, construiu-se a chave de busca da pesquisa, que resultou em: “Decommissioning” AND (“Photovoltaic System” OR “Solar Power Plant” OR “Photovoltaic Solar Energy”).

Optou-se por palavras-chave no idioma inglês para ampliar os resultados da busca, uma vez que é o idioma internacional adotado pela maioria dos periódicos científicos de interesse para este trabalho.

4.3 PLATAFORMA DE DADOS

Ainda na primeira etapa proposta por Gohr et al. (2013), há a necessidade de se eleger uma plataforma/base de dados coerente para a condução da pesquisa. No caso desta, optou-se pela plataforma Portal de Periódicos CAPES, uma biblioteca virtual que contempla em um único buscador diversas bases de dados que são referência no ramo de tecnologia, como Web of Science, Scopus e SciELO. Além de incluir atualmente 396 bases científicas, reúne um acervo de 38 mil periódicos com texto completo, bem como livros, dissertações, normas técnicas e estatísticas (CAPES, 2025).

4.4 CRITÉRIOS DE ELEGIBILIDADE

Com o intuito de filtrar os resultados obtidos na plataforma de busca, estabeleceu-se critérios de inclusão e exclusão para o estudo, a serem utilizados na etapa consecutiva de pesquisa/seleção.

De modo geral, buscou-se por artigos, publicados entre 2015 e 2025, em idioma inglês e que abordassem o tema de interesse da pesquisa, com relevância e rigor metodológico. Os critérios de elegibilidade aplicados nesta etapa estão organizados no Quadro 1.

Quadro 1 - Critérios de elegibilidade para seleção dos estudos

Critérios de Inclusão	Critérios de Exclusão
Artigo publicado em periódico científico	Dissertações, teses, editoriais, relatórios, livros ou qualquer formato de publicação não correspondente a artigo científico.
Documento em formato aberto à leitura	Artigo com acesso restringido
Idioma português ou inglês	Idioma não correspondente a português ou inglês
Ano de publicação a partir de 2015	Publicações anteriores ao ano de 2015
Resultados coerentes aos objetivos da pesquisa	Resultados que fogem ou tangenciam o objetivo da pesquisa

Fonte: elaborado pelo autor (2025).

A aplicação conjunta desses critérios resultou na seleção de 12 artigos para leitura na íntegra, os quais apresentaram aderência ao tema do descomissionamento de usinas solares fotovoltaicas, disponibilidade em acesso aberto e enquadramento no recorte temporal definido. Esse conjunto de estudos constitui a base empírica da revisão sistemática, servindo de referência para a análise das abordagens de destinação final, impactos ambientais, soluções tecnológicas e lacunas regulatórias discutidas nas seções subsequentes.

4.5 SELEÇÃO DE ESTUDOS E EXTRAÇÃO DE DADOS

Na segunda etapa da metodologia de Gohr et al. (2013), foi realizado o levantamento e seleção dos resultados obtidos. Nesta etapa ocorreu a redução na quantidade de material encontrado, até ser definida a amostra final a ser consultada para a pesquisa.

Primeiramente, realizou-se uma filtragem inicial a partir dos critérios de elegibilidade: publicação recente, acesso aberto e idioma português ou inglês. Tendo excluído os artigos que fugiam do tema, seguiu-se para a segunda etapa da triagem, com a leitura dos títulos e resumos dos artigos aplicando o critério de adequação aos objetivos da pesquisa. Por fim, os artigos selecionados foram acessados e analisados na íntegra.

A análise de conteúdo e extração de dados, que possibilita classificar e descrever os resultados dos artigos (terceira etapa da metodologia adotada) se deu por meio de uma síntese qualitativa e crítica dos principais achados de cada estudo. Organizou-se, então, os resultados em uma tabela, conforme título, autoria e ano de publicação.

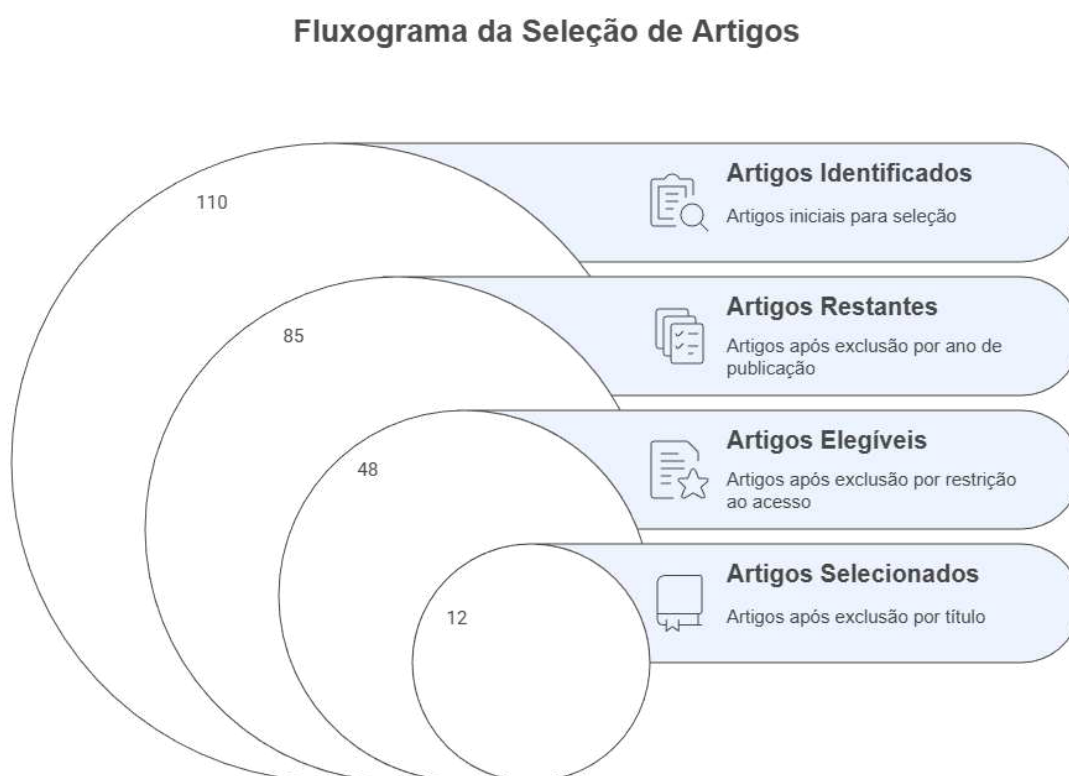
O detalhamento dessa etapa de seleção e síntese dos achados foram apresentados nas seção Resultados e Discussão.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da busca realizada na Plataforma CAPES, foram identificados inicialmente um total de 110 artigos, sob os quais aplicaram-se filtros para seleção conforme os critérios de elegibilidade.

Na triagem, foram excluídos 25 artigos publicados há mais de dez anos (anteriores a 2015), seguido de uma segunda exclusão de 37 artigos que possuíam acesso restrito a assinantes. Restaram, então, 48 para seleção com base na leitura de título e resumo. Desses, foram excluídos 36 artigos que não atenderam ao critério de adequação aos objetivos da pesquisa. Portanto, ao final da triagem, 12 artigos foram elegidos para serem analisados na íntegra e, assim, compõem os resultados da pesquisa. A Figura 2, apresenta um fluxograma das etapas de seleção.

Figura 2 - Fluxograma da seleção dos artigos para composição da revisão



Fonte: elaborado pelo autor com auxílio da I.A. Napkin (2025)

Quanto à caracterização geral dos 12 artigos incluídos na pesquisa, todos eram em idioma inglês e o ano de publicação variou entre 2018 e 2024, sendo a maioria deles (oito dos doze) publicada nos últimos três anos, o que aponta para a atualidade do tema.

Após a leitura completa dos artigos, realizou-se a síntese de seus principais achados e apontamentos, em conformidade com o objetivo central da pesquisa de descrever as problemáticas associadas ao descomissionamento de usinas solares fotovoltaicas.

A descrição dos artigos conforme autoria, ano de publicação e título, bem como a síntese dos resultados obtidos, estão organizadas no Quadro 2.

Quadro 2 - Descrição dos artigos selecionados e síntese dos resultados obtidos

Nº	Título	Autor	Ano	Periódico	Descrição
01	Decommissioning and Recycling of End-of-Life Photovoltaic Solar Panels in Western Australia	SHRESTHA, N.; ZAMAN, A.	2024	Sustainability	O estudo investiga soluções sustentáveis para o gerenciamento dos resíduos provenientes do descomissionamento de usinas solares fotovoltaicas, além do descarte adequado.
02	Estimating the Lifetime of Solar Photovoltaic Modules in Australia	TAN, V. et al	2022	Sustainability	O estudo estima o tempo de vida útil dos módulos fotovoltaicos, através de múltiplos fatores, levando em consideração fatores econômicos e técnicos.
03	Life Cycle Assessment of Large-Scale Solar Photovoltaic Plant based in Malaysia	QUEK, A. et al	2024	IOP Conference Series: Earth and Environmental Science	O estudo realiza uma Avaliação do Ciclo de Vida completa de uma usina solar de grande escala, de 78 MW na Malásia, uma das maiores do País. O foco está nos impactos ambientais detalhados de todas as fases do ciclo de vida da planta.
04	Wind and Solar Power Plant End-of-Life Equipment: Prospects for Management in Ukraine	TRYPOLSKA, G. et al	2022	Energies	O estudo avalia as perspectivas de gestão de equipamentos de fim de vida útil (EOL) de usinas solares e eólicas na Ucrânia, focando em quantidades de materiais recuperáveis, valores de mercado, custos de descomissionamento e impactos no emprego. É o primeiro estudo a abordar esta temática no contexto ucraniano.
05	A Predictive Framework for Photovoltaic Waste Quantities and Recovery Values: Insights and Application to the Italian Context	FRANZONI, A.; LEGGERINI, C.; BANNÒ, M.	2024	Environmental and Climate Technologies	O estudo propõe um modelo preditivo situado na Itália e dividido regionalmente para: 1. Estimar o volume de módulos fotovoltaicos descomissionados; 2. Sugerir destinações para os materiais recuperados.
06	Market development and consequences on end-of-life management of photovoltaic implementation in Europe	FRANZ, M.; PIRINGER, G.;	2020	Energy, Sustainability and Society	O estudo investiga o desenvolvimento de mercado e as consequências no gerenciamento do fim da vida útil das usinas fotovoltaicas na Europa.

Nº	Título	Autor	Ano	Periódico	Descrição
07	Navigating Environmental Concerns: Assessing the Ecological Footprint of Photovoltaic-Produced Energy	FALFUSHYNSKA, H.	2024	Environments	Artigo de revisão que analisa os riscos ambientais de Cádmio (Cd) e Chumbo (Pb) em módulos fotovoltaicos, quantificando emissões potenciais de diferentes tecnologias (CdTe, perovskitas, c-Si) até 2050
08	Metal Requirements for Building Electrical Grid Systems of Global Wind Power and Utility-Scale Solar Photovoltaic until 2050	CHEN, Z.; KLEIJN, R.; LIN, H.	2022	Environmental Science & Technology	O estudo prospectivo que quantifica demandas de cobre, alumínio e aço para sistemas de grid elétrico (cabos, transformadores, subestações) associados a energia eólica e solar PV utility-scale até 2050
09	Life-Cycle Land-Use Requirement for PV in Vietnam	SANSEVERINO, E. et al	2021	Energies	Estudo de análise ciclo de vida que quantifica requisitos de uso de solo, aplicando metodologia de harmonização de parâmetros técnicos e dados Ecoinvent 3.6, evidenciando competição crítica entre desenvolvimento solar e agricultura em países com economia agrícola dominante.
10	PV Waste Thermal Treatment According to the Circular Economy Concept	BOGACKA, M. et al	2020	Sustainability	Estudo experimental sobre o processo de pirólise do silício monocristalino para validação da eficiência de separação térmica para recuperação do material.
11	Structural analysis of a mobile device for the End-of-Life treatment of photovoltaic panels	GRASSIA, A. et al	2018	Procedia Structural Integrity	Estudo que elabora um protótipo móvel para o descomissionamento de módulos fotovoltaicos e avaliação de sua aplicabilidade, como alternativa às grandes e caras centrais industriais.
12	Exploring design thinking processes in circular economy strategies for PV waste management in Australia	MADRIGAL, A.; IYER-RANIGA, U.; YANG, R.	2024	IOP Conference Series: Earth and Environmental Science	Pesquisa qualitativa usando Design Thinking que desenvolve diagramas de fluxo que identificou fatores sociais e técnicos críticos no contexto australiano.

Fonte: elaborado pelo autor (2025)

A análise dos artigos selecionados revela a complexidade e diversidade dos desafios envolvidos no descomissionamento de usinas solares fotovoltaicas ao redor do mundo (SHRESTHA; ZAMAN, 2024; FRANZONI; LEGGERINI, BANNÒ, 2024; TRYPOLSKA et al., 2022). Os resultados apontam que a vida útil real dos módulos fotovoltaicos tem sido frequentemente inferior àquela prevista nos projetos originais, influenciando diretamente o volume de resíduos gerados e antecipando a sobrecarga dos sistemas de destinação (TAN et al., 2022; QUEK et al., 2024).

As abordagens internacionais para gestão destes resíduos apresentam heterogeneidade considerável, destacando-se contextos onde há políticas robustas de responsabilidade estendida do produtor e estratégias de economia circular capazes de viabilizar a reciclagem e o reúso de componentes valiosos (FRANZONI; LEGGERINI, BANNÒ, 2024; MADRIGAL; YGER-RANIGA; YANG, 2024). Apesar disso, observam-se lacunas importantes, sobretudo em países emergentes, onde a ausência de regulamentação específica, limitações logísticas e deficiências na rastreabilidade dos resíduos dificultam a estruturação de soluções eficientes e sustentáveis (FRANZ; PIRINGER, 2020; TRYPOLSKA et al., 2022).

Do ponto de vista ambiental, os riscos associados à disposição inadequada dos módulos — principalmente a liberação de metais tóxicos como chumbo e cádmio — foram amplamente destacados em diversas regiões (FALFUSHYNSKA, 2024; BOGACKA et al., 2020). Grande massa de resíduos composta por vidro e alumínio representa tanto oportunidade para recuperação de valor econômico quanto desafio para processos de purificação e adequação ambiental (SHRESTHA; ZAMAN, 2024; CHEN; KLEIJN; LIN, 2023).

Ao longo das próximas subseções, são apresentadas as projeções quantitativas dos resíduos, a análise dos impactos ambientais, a avaliação das diferentes soluções tecnológicas, econômicas e regulatórias adotadas internacionalmente, e as recomendações voltadas ao contexto brasileiro, com base comparativa nos objetivos específicos definidos originalmente nesta pesquisa.

5.1 PRINCIPAIS DESTINAÇÕES DOS RESÍDUOS FOTOVOLTAICOS

A análise dos doze artigos selecionados evidencia ampla heterogeneidade quanto às opções e estratégias de destinação final dos módulos fotovoltaicos após

seu ciclo de vida útil. Em mercados com maior grau de maturidade institucional e ambiental, como Austrália, Itália e países da União Europeia, há predominância de políticas voltadas à economia circular, com ênfase crescente na responsabilidade estendida do produtor (REP), que direciona fabricantes e importadores a viabilizar programas de recolhimento, reciclagem e até mesmo reuso dos módulos descomissionados (SHRESTHA; ZAMAN, 2024; FRANZONI; LEGGERINI, BANNÒ, 2024; FRANZ, PIRINGER, 2020).

O roteiro típico de destinação final observado nesses contextos envolve a triagem dos módulos, avaliação de possibilidade de reuso (segunda vida em instalações de menor demanda), encaminhamento de unidades defeituosas para centros de reciclagem e o mínimo envio possível a aterros sanitários. Destaca-se a adoção de processos de reciclagem térmica (como pirólise para módulos de silício – BOGACKA et al., 2020), processos mecânicos automatizados e recuperação seletiva de vidro, alumínio, silício e metais valiosos (FRANZONI; LEGGERINI, BANNÒ, 2024; GRASSIA et al., 2018). Alguns países, como Itália e Alemanha, já projetam taxas de reciclagem superiores a 90% para componentes principais, impulsionados por legislações específicas relacionadas a resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE).

Em mercados em desenvolvimento ou sem legislação específica (casos da Ucrânia, Vietnã e outros países do sudeste asiático), as opções de destinação ainda são limitadas. Nesses cenários, há predominância de descarte dos módulos em aterros ou depósitos temporários, ausência de rastreabilidade dos sistemas, e limitada infraestrutura para separação e recuperação de materiais (TRYPOLSKA et al., 2022; SANSEVERINO et al., 2021). O valor econômico potencial dos resíduos, como demonstrado por Trypolska et al. (2022), nem sempre é aproveitado de modo eficiente, dada a ausência de incentivos regulatórios, políticas públicas adequadas e conhecimento técnico local

5.2 PROJEÇÕES QUANTITATIVAS DE RESÍDUOS

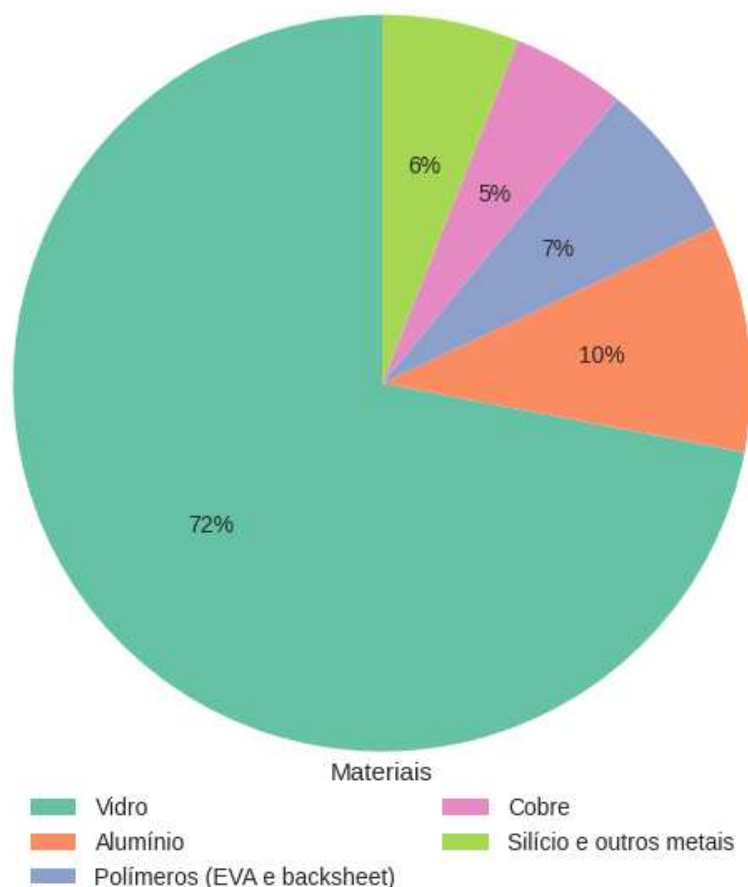
No caso italiano, o modelo preditivo baseado na função de Weibull estimou até 222 mil toneladas de resíduos somente na região da Lombardia até 2045 (cenário regular loss), com picos distribuídos entre Puglia, Emília Romanha e

Veneto. O estudo demonstra que, em cenários de vida útil reduzida por falhas precoces, os resíduos podem ser até 30% maiores que o esperado (FRANZONI; LEGGERINI, BANNÒ, 2024).

O material predominante nos resíduos em dois dos estudos foi o vidro (~74%), seguido por alumínio (~10%) e polímeros (~6,5%) (FRANZONI; LEGGERINI, BANNÒ, 2024; SHRESTHA; ZAMAN, 2024). A capacidade de recuperação desses materiais é alta em contexto europeu (até 95% para vidro/alumínio), mas requer volume operacional significativo para viabilizar economicamente os processos e atingir escala industrial (FRANZONI; LEGGERINI, BANNÒ, 2024; FRANZ; PIRINGER, 2020).

A partir desses resultados, torna-se possível representar de forma sintética a composição típica de módulos fotovoltaicos cristalinos, evidenciando a predominância de vidro e alumínio na massa total, seguida por polímeros e por frações menores de metais semicondutores e condutores (FRANZONI; LEGGERINI; BANNÒ, 2024; SHRESTHA; ZAMAN, 2024).

Figura 3 - Composição típica de módulos fotovoltaicos cristalinos (massa, %)



Fonte: elaborado pelo autor com auxílio da I.A. Microsoft Copilot (2025)

5.3 VIDA ÚTIL DOS MÓDULOS E IMPACTO NOS RESÍDUOS

Os artigos australianos desafiam a premissa de vida útil padrão de 25 anos: modelos que consideram falhas técnicas, degradação e motivações econômicas apontam médias de 12 a 24 anos, demonstrando que substituições de módulos frequentemente ocorrem antes do fim de vida útil técnica devido a incentivos e melhorias tecnológicas (TAN et al., 2022; SHRESTHA; ZAMAN, 2024). Isso implica geração prematura de resíduos e necessidade de adaptar políticas e infraestrutura a cenários mais realistas e dinâmicos, que considerem o comportamento efetivo dos sistemas em operação (TAN et al., 2022; FRANZONI; LEGGERINI, BANNÒ, 2024).

Os estudos que analisam contextos como Itália e outros países com maior maturidade operacional indicam que a vida útil prática está diretamente relacionada à qualidade da instalação, às condições de operação e às estratégias de manutenção preventiva, reforçando a importância de bases de dados nacionais e de monitoramento sistemático dos ciclos de vida dos módulos (FRANZONI; LEGGERINI, BANNÒ, 2024; TRYPOLSKA et al., 2022).

Embora alguns estudos apontem o potencial de segunda vida de módulos fotovoltaicos em aplicações com menor exigência de desempenho, essa alternativa nem sempre é tecnicamente ou ambientalmente recomendada, sobretudo quando há microfissuras, delaminação avançada, danos mecânicos significativos ou queda acentuada de eficiência. Nesses casos, o reaproveitamento em novos sistemas pode apenas postergar, em vez de resolver, a necessidade de tratamento adequado, além de transferir riscos de falha e de lixiviação de metais para outras instalações (FALFUSHYNSKA, 2024; TRYPOLSKA et al., 2022). O *retrofit* de usinas — envolvendo substituição gradual de módulos mais degradados, atualizações de inversores e reconfigurações do sistema para aumento da eficiência — surge como alternativa importante para reduzir descomissionamentos precoces, estender a vida útil operacional e planejar de forma mais racional o fluxo de resíduos ao longo do tempo, em consonância com princípios de economia circular discutidos na literatura (FRANZ; PIRINGER, 2020; MADRIGAL; IYER-RANIGA; YANG, 2024).

Os estudos analisados indicam que a redução da vida útil prática dos módulos está associada a um conjunto de fatores técnicos, ambientais e econômicos que antecipam o descomissionamento em relação ao padrão teórico de

projeto. Entre os principais motivos destacam-se microfissuras e delaminações que comprometem a integridade estrutural, danos mecânicos decorrentes de eventos extremos, falhas em interconexões e caixas de junção, bem como a queda progressiva de eficiência que torna economicamente mais atraente substituir módulos antigos por tecnologias mais recentes, mesmo antes do fim da vida útil nominal (TAN et al., 2022; SHRESTHA; ZAMAN, 2024). Adicionalmente, decisões de repotenciação de plantas e a obsolescência de determinados modelos de inversores e componentes podem levar à remoção de equipamentos ainda operacionais, reforçando a necessidade de planejar estratégias integradas de retrofit, reaproveitamento e reciclagem que considerem esse comportamento real dos sistemas ao longo do tempo.

5.4 SOLUÇÕES TECNOLÓGICAS E BARREIRAS

O uso de processos térmicos, como a pirólise, permitiu obter eficiência de separação de até 96% em painéis de silício em contextos europeus, mas a sustentabilidade do processo depende da gestão adequada dos subprodutos líquidos e gasosos e do contexto energético da região (BOGACKA et al., 2020; FALFUSHYNSKA, 2024). O estudo experimental de tratamento térmico de módulos apresenta dados termogravimétricos detalhados sobre degradação térmica dos componentes e destaca a formação de frações líquidas e gasosas contendo halogênios, exigindo etapas adicionais de tratamento para evitar emissões e contaminação ambiental (BOGACKA et al., 2020).

No plano logístico, a inovação de unidades móveis para reciclagem descentralizada demonstra potencial de redução de custos em regiões remotas, com capacidade de processamento de até 0,8 toneladas por hora, ampliando a viabilidade da reciclagem em países sem infraestrutura fixa robusta (GRASSIA et al., 2018). Contudo, ainda persiste a necessidade de certificação, padronização e garantias estruturais para o uso seguro dessas unidades no transporte e no processamento contínuo dos módulos descomissionados, especialmente quando se busca integração com cadeias formais de gestão de resíduos (GRASSIA et al., 2018; SHRESTHA; ZAMAN, 2024).

No caso específico das unidades móveis de reciclagem, a literatura indica que, apesar do potencial para reduzir custos de transporte e ampliar o acesso à reciclagem em regiões remotas, sua adoção em países emergentes enfrenta barreiras significativas. Entre elas destacam-se a necessidade de infraestrutura rodoviária adequada, disponibilidade de energia e serviços de manutenção especializada, a dificuldade em garantir um fluxo contínuo de módulos descomissionados que justifique o deslocamento e a operação dos equipamentos, bem como incertezas regulatórias relacionadas ao licenciamento de instalações móveis e ao transporte de resíduos classificados como perigosos (GRASSIA et al., 2018; TRYPOLSKA et al., 2022; SANSEVERINO et al., 2021). No contexto brasileiro, marcado por longas distâncias, concentração regional de grandes usinas e ausência de cadeias consolidadas de logística reversa para fotovoltaicos, essas barreiras reforçam a pertinência de arranjos híbridos que combinem plantas fixas em polos estratégicos com unidades móveis operando de forma complementar e regionalizada.

5.5 IMPACTO AMBIENTAL E RISCOS

Diversos trabalhos destacam a liberação e o potencial de bioacumulação de metais pesados como Cd, Pb e Ag provenientes da disposição inadequada dos painéis, perigosos para organismos aquáticos e terrestres, como ilustrado em experimentos laboratoriais de toxicidade com diferentes matrizes ambientais (FALFUSHYNSKA, 2024; TRYPOLSKA et al., 2022). Esses estudos indicam que a degradação dos módulos em condições não controladas pode gerar lixiviados com concentrações preocupantes de metais, capazes de afetar organismos de níveis tróficos distintos e comprometer a qualidade de solo e água em médio e longo prazos (FALFUSHYNSKA, 2024).

O tema da lixiviação e da identificação/monitoramento de hotspots ambientais ainda é uma lacuna importante em países emergentes, onde muitos módulos são descartados sem rastreabilidade e sem infraestrutura adequada de tratamento (TRYPOLSKA et al., 2022; SANSEVERINO et al., 2021). Nesses contextos, a ausência de bancos de dados nacionais, de protocolos padronizados de monitoramento e de requisitos específicos para aterros ou instalações de recepção

de resíduos fotovoltaicos dificulta a avaliação real da magnitude dos impactos ambientais. Assim, os autores convergem na necessidade de integrar estudos ecotoxicológicos, avaliações de ciclo de vida e mecanismos regulatórios mais rígidos, de modo a prevenir a contaminação difusa associada ao descarte inadequado de módulos ao final da vida útil (QUEK et al., 2024; FALFUSHYNSKA, 2024).

Os estudos que combinam análise de desempenho em campo e Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), fica evidente que a discussão sobre vida útil dos módulos não se restringe ao momento de substituição, mas influencia diretamente a sustentabilidade do sistema fotovoltaico ao longo de todo o seu ciclo de vida. Reduções na vida útil prática, motivadas por falhas técnicas, degradação acelerada ou decisões econômicas, antecipam a geração de resíduos e intensificam a pressão sobre as etapas de fabricação e fim de vida, ampliando a relevância de estratégias de retrofit, de rotas de reciclagem eficientes e de planejamento territorial, como mostram os estudos de ACV em usinas de grande porte e em contextos com forte competição pelo uso do solo (QUEK et al., 2024; SANSEVERINO et al., 2021). Questionar se a energia solar fotovoltaica é realmente sustentável “do berço ao túmulo” implica considerar não apenas a fase de operação livre de emissões diretas, mas também as decisões de projeto, operação e descomissionamento que encurtam ou prolongam a vida útil efetiva dos sistemas.

5.6 DEMANDA DE INSUMOS CRÍTICOS E ECONOMIA CIRCULAR

O artigo de Chen, Kleijn e Lin (2023) sobre requisitos de metais mostra que as redes elétricas associadas à transição energética exigirão 2.781 Mt de cobre, 2.067 Mt de aço e 1.131 Mt de alumínio até 2050, com cabos representando mais de 90% do cobre e do alumínio consumidos nesse contexto. A reciclagem desses metais, caso plenamente implementada, tem potencial para suprir até 40% da demanda secundária a partir de 2046, o que reforça a relevância estratégica da logística reversa, inclusive para o setor elétrico brasileiro.

Quando os resultados são relacionados ao descomissionamento de usinas solares fotovoltaicas, evidenciam-se sinergias entre a gestão de resíduos de módulos e as cadeias de suprimento metálico das redes de transmissão e

distribuição. A recuperação eficiente de alumínio e cobre presentes em estruturas, cabos e componentes elétricos dos sistemas fotovoltaicos pode contribuir para reduzir a pressão sobre a extração de recursos primários, alinhando-se a políticas de economia circular e de segurança de suprimento de materiais críticos em longo prazo (FRANZONI; LEGGERINI, BANNÒ, 2024; TRYPOLSKA et al., 2022).

5.7 HETEROGENEIDADE REGIONAL E POLÍTICAS PÚBLICAS

A revisão revela diferenças marcantes na abordagem do descomissionamento e da gestão dos resíduos entre países e regiões. Enquanto a União Europeia e a Austrália articulam estratégias de logística reversa integrada, responsabilidade estendida do produtor e investimentos em infraestrutura para reciclagem, outros mercados, como o sudeste asiático e o leste europeu, ainda enfrentam desafios na formulação de políticas públicas específicas (TRYPOLSKA et al., 2022).

Em países considerados mais maduros em termos regulatórios, como os membros da União Europeia e a Austrália, a gestão de resíduos fotovoltaicos tem sido progressivamente integrada a marcos legais mais amplos de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos, com regras específicas para coleta, rastreabilidade e reciclagem de módulos. Na União Europeia, por exemplo, as diretivas associadas aos REEE sustentam esquemas de responsabilidade estendida do produtor, nos quais fabricantes e importadores são responsáveis por organizar e financiar sistemas de retorno e tratamento ao fim da vida útil, favorecendo o desenvolvimento de infraestrutura de reciclagem e o estabelecimento de metas de desempenho (FRANZ; PIRINGER, 2020).

Na Austrália, iniciativas coordenadas em nível federal e estadual têm buscado articular políticas de economia circular, programas voluntários de recolhimento e o desenvolvimento de rotas tecnológicas para o tratamento de módulos, incluindo projetos-piloto de reciclagem e estudos voltados a modelos de negócio sustentáveis (SHRESTHA; ZAMAN, 2024; MADRIGAL; IYER-RANIGA; YANG, 2024). Esses contextos contrastam com a realidade de muitos países emergentes, onde ainda predominam lacunas regulatórias, ausência de metas

específicas e infraestrutura limitada, o que reforça a importância de adaptar experiências internacionais exitosas à realidade institucional e econômica brasileira.

O estudo na Ucrânia (TRYPOLSKA et al., 2022) destaca que o valor potencial dos resíduos pode ultrapassar EUR 400 milhões em materiais recuperáveis, sinalizando oportunidade econômica e necessidade de regulação para evitar o descarte inadequado e promover retornos ambientais e financeiros.

No Vietnã, a pressão sobre o uso do solo elevou questões sobre sustentabilidade, apontando para a competição com áreas agrícolas e impacto social regional. Em resposta, às políticas recomendam o uso de áreas degradadas ou remanescentes para instalação das usinas, minimizando perdas produtivas do território (SANSEVERINO et al., 2021).

Quadro 3 - Comparativo entre países maduros e emergentes

Aspecto	Países maduros (UE, Itália, Austrália)	Países emergentes (Vietnã, Ucrânia, outros)
Marco regulatório para resíduos FV	Existência de diretivas e normas específicas ou integradas a REEE, com exigências claras para coleta e reciclagem de módulos.	Normas gerais de resíduos, muitas vezes sem diretrizes específicas para módulos FV, com lacunas sobre responsabilidades e metas.
Responsabilidade estendida do produtor (REP)	REP já implementada ou em implementação para módulos FV, com obrigações de retorno, financiamento da reciclagem e metas de desempenho.	REP inexistente ou incipiente, sem definição clara de obrigações para fabricantes, importadores e distribuidores.
Infraestrutura de coleta e reciclagem	Presença de operadores licenciados, plantas fixas de reciclagem, programas de logística reversa estruturados e taxas de recuperação elevadas (vidro/alumínio > 90%).	Estrutura limitada, com dependência de aterros ou armazenamento temporário; poucas ou nenhuma planta dedicada, e baixa taxa de reciclagem efetiva.
Bases de dados e rastreabilidade	Bancos de dados nacionais ou regionais sobre instalações, falhas e volumes de resíduos, permitindo modelar cenários e planejar capacidade de tratamento.	Ausência ou fragmentação de dados, dificultando estimativas de volumes, monitoramento de fluxos e avaliação de riscos ambientais.
Soluções tecnológicas e inovação	Projetos pilotos e aplicações comerciais de reciclagem	Acesso limitado a tecnologias avançadas; inovações como

	térmica/mecânica, protótipos de unidades móveis e integração com estratégias de economia circular.	unidades móveis ainda em estágio experimental e pouco integradas às cadeias formais de resíduos.
--	--	--

Fonte: elaborado pelo autor (2025)

5.8 ASPECTOS TECNOLÓGICOS E BARREIRAS À RECICLAGEM

Do ponto de vista tecnológico, a predominância dos módulos cristalinos (c-Si) – cerca de 90% do mercado global – exige soluções robustas e padronizadas para reciclagem. Processos térmicos, como a pirólise, já atingem mais de 90% de eficiência na recuperação de materiais em estudos experimentais com módulos de silício, mas ainda enfrentam barreiras econômicas (altos custos operacionais, necessidade de grande escala) e desafios ambientais relacionados ao tratamento adequado dos subprodutos líquidos e gasosos gerados (BOGACKA et al., 2020).

Inovações logísticas, como plantas móveis em contêineres para reciclagem descentralizada, têm potencial para democratizar o acesso à reciclagem em países de dimensões continentais ou em regiões rurais, reduzindo custos de transporte e ampliando a capacidade de atendimento das demandas regionais. Essas plantas encontram-se atualmente em estágio experimental, e os próximos passos envolvem certificação, padronização estrutural e viabilização econômica em integração com cadeias formais de gestão de resíduos (GRASSIA et al., 2018; SHRESTHA; ZAMAN, 2024).

5.9 ECONOMIA CIRCULAR E DESIGN THINKING PARA PV

O avanço das estratégias de economia circular em países como Austrália e Itália envolve o planejamento do ciclo de vida do módulo desde sua concepção, passando pela educação do consumidor quanto ao destino final e pela implementação de incentivos ao reúso e à reciclagem (MADRIGAL; YGER-RANIGA; YANG, 2024; FRANZONI; LEGGERINI, BANNÒ, 2024). Barreiras como a falta de certificação para produtos usados, incertezas regulatórias e o comportamento do consumidor ainda limitam a adoção ampla dessas propostas, especialmente em mercados emergentes (MADRIGAL; YGER-RANIGA; YANG, 2024).

A literatura revisada sugere que adotar o conceito de “segundo uso” e esquemas de certificação para módulos recuperados pode postergar o ciclo de vida dos painéis, reduzir a geração anual de resíduos e aumentar a eficiência econômica das políticas de descomissionamento (MADRIGAL; YGER-RANIGA; YANG, 2024; TRYPOLSKA et al., 2022). Tais iniciativas, contudo, dependem de maior integração entre os diferentes atores do setor – indústria, governo, instaladores e consumidores – bem como de marcos regulatórios que garantam segurança, rastreabilidade e incentivos adequados para ganho de escala nas cadeias de reuso e reciclagem.

5.10 LACUNAS NA PRODUÇÃO DE DADOS E RECOMENDAÇÕES

O levantamento dos artigos evidencia uma lacuna crítica na produção de dados reais sobre a idade de descarte dos módulos, o volume anual de resíduos e a eficiência das práticas de reciclagem. Boa parte dos modelos projetivos utiliza estimativas matemáticas com pouca validação empírica (FRANZONI; LEGGERINI, BANNÒ, 2024; TAN et al., 2022), o que dificulta a visualização clara das tendências e a proposição de políticas públicas eficazes.

Recomenda-se que os países adotem bancos de dados nacionais para monitoramento do ciclo de vida dos sistemas FV, que a regulação ambiental seja compatibilizada com os cenários de descarte precoce e que modelos de incentivo (subsídios, créditos, certificações) sejam aplicados para maximizar a reciclagem e reuso dos resíduos críticos.

As lacunas identificadas na produção de dados sobre descomissionamento e resíduos fotovoltaicos indicam a necessidade de estruturar, no Brasil, um banco de dados nacional que acompanhe o ciclo de vida das usinas e permita estimar com maior precisão os fluxos futuros de materiais. Estudos que desenvolveram modelos preditivos e análises de ciclo de vida destacam que informações como idade dos sistemas, localização, tecnologia empregada, condições de operação e quantidades de materiais são centrais para dimensionar adequadamente a infraestrutura de coleta, transporte e reciclagem (FRANZONI; LEGGERINI; BANNÒ, 2024; QUEK et al., 2024). Nesse sentido, recomenda-se que um banco de dados brasileiro inclua, no mínimo, variáveis relativas a ano de instalação, potência instalada, localização geográfica, tipo e fabricante dos módulos,

configuração da usina, histórico de operação e manutenção, registros de falhas, tempo efetivo de operação até o descomissionamento, substituições de módulos e equipamentos, causas principais de descarte, rotas de destinação adotadas e volumes de materiais recuperados ou enviados à disposição final (TRYPOLSKA et al., 2022; SHRESTHA; ZAMAN, 2024).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos achados na literatura científica consultada foi possível compreender que as abordagens de destinação final dos módulos fotovoltaicos ao término de sua vida útil variam amplamente entre os contextos analisados, indo desde cenários mais estruturados, com predominância de reciclagem e responsabilidade estendida do produtor, até realidades em que o descarte em aterros ainda é a prática predominante, em função da ausência de regulação específica e de infraestrutura adequada. Nesse sentido, o primeiro objetivo específico foi atendido ao identificar e descrever as principais rotas de destinação final — reuso, reciclagem, tratamento térmico, armazenamento temporário e disposição final — conforme relatado pelos diferentes estudos.

À luz dos resultados desta revisão sistemática, elaborou-se uma matriz SWOT para o cenário brasileiro, com o objetivo de sintetizar as principais forças e fraquezas internas, bem como oportunidades e ameaças relacionadas ao descomissionamento e à gestão de resíduos de usinas solares fotovoltaicas com base nas experiências internacionais.

Quadro 4 - Matriz SWOT (Cenário Brasileiro)

Dimensão	Elementos principais
Forças	Crescimento acelerado da capacidade instalada, gerando escala futura de resíduos e de matéria-prima secundária; existência de marcos gerais de resíduos sólidos e logística reversa em outros setores, que podem servir de base para incluir módulos FV; presença de universidades, centros de pesquisa e empresas com capacidade técnica para desenvolver e adaptar tecnologias mecânicas e híbridas de reciclagem.
Fraquezas	Ausência de regulação específica para resíduos fotovoltaicos e indefinição sobre responsabilidades dos atores da cadeia; falta de bases de dados nacionais sobre instalações, falhas, vida útil real e volumes de resíduos; infraestrutura limitada de coleta, rastreabilidade e

	reciclagem dedicada, com poucos arranjos para integração entre geração, transporte e tratamento.
Oportunidades	Desenvolvimento de plantas de reciclagem mecânica e híbrida (fixas e móveis) adaptadas às diferentes escalas regionais; criação de serviços especializados de logística reversa para módulos e demais componentes FV; implementação gradual de modelos de responsabilidade estendida do produtor alinhados à realidade brasileira; acesso a financiamentos e políticas voltadas à economia circular e à recuperação de metais críticos presentes em módulos, estruturas e cabos.
Ameaças	Aumento do volume de resíduos sem expansão correspondente da infraestrutura, com risco de descarte em aterros comuns ou em locais inadequados; perda do valor econômico dos materiais por falta de cadeias estruturadas de reciclagem e reúso; potenciais impactos ambientais e humanos decorrentes de lixiviação de metais pesados; competição com cadeias internacionais de reciclagem já consolidadas, que podem absorver valor sem gerar desenvolvimento tecnológico e industrial local.

Fonte: elaborado pelo autor (2025)

Observa-se que as rotas de reciclagem térmica, como a pirólise aplicada a módulos de silício, alcançam elevadas taxas de recuperação de materiais, mas demandam grandes investimentos iniciais, controle rigoroso das emissões e fluxo contínuo de resíduos em escala industrial, condições ainda pouco presentes no contexto brasileiro. Nesse cenário, despontam como mais promissoras as soluções mecânicas e híbridas (combinação de etapas mecânicas com tratamentos térmicos ou químicos específicos), que permitem modularidade de escala, maior compatibilidade com a infraestrutura de gestão de resíduos já existente e possibilidade de implementação em plantas fixas e unidades móveis. Essa configuração tecnológica reforça as oportunidades destacadas na matriz SWOT, ao favorecer o surgimento de negócios voltados à logística reversa, ao tratamento descentralizado de módulos descomissionados e à consolidação de cadeias de valor ancoradas na economia circular e na recuperação de insumos críticos para o setor elétrico.

No que se refere às projeções quantitativas de resíduos e à vida útil prática dos módulos, os artigos analisados evidenciam que a antecipação do descarte, motivada por falhas, obsolescência ou decisões econômicas, agravará o volume de resíduos esperado para as próximas décadas, exigindo planejamento prévio, políticas públicas robustas e dimensionamento adequado da cadeia de

logística reversa. Dessa forma, o segundo objetivo específico, relacionado à análise das estimativas de geração de resíduos e de sua composição material, foi contemplado ao discutir as diferentes metodologias de projeção, bem como a relevância econômica associada à recuperação de vidro, alumínio e metais.

A discussão sobre impactos ambientais e riscos associados ao manejo inadequado dos resíduos fotovoltaicos evidenciou a necessidade de controle rigoroso de substâncias perigosas, como chumbo e cádmio, e reforçou o papel das avaliações de ciclo de vida e dos estudos ecotoxicológicos como ferramentas essenciais para orientar decisões regulatórias e tecnológicas. Com isso, o terceiro objetivo específico foi atendido ao reunir e interpretar as principais evidências sobre os potenciais danos ambientais e à saúde humana decorrentes de descarte ou tratamento inadequado.

Quanto às soluções tecnológicas, logísticas e regulatórias, a literatura revisada apresentou experiências que vão desde processos de reciclagem térmica e mecânica, passando pela criação de plantas móveis de tratamento, até a implementação de esquemas de responsabilidade estendida do produtor e incentivos à economia circular. Tais elementos permitiram cumprir o quarto objetivo específico, ao identificar obstáculos e oportunidades na adoção dessas soluções, especialmente em países emergentes que ainda iniciam a estruturação de suas políticas de gestão de resíduos fotovoltaicos.

Os trabalhos avaliados convergem para a necessidade de políticas integradas. Em outras palavras, apontam para a necessidade da conjunção de fatores como a responsabilidade compartilhada, o planejamento para aumento da vida útil real, a criação de bancos de dados nacionais, o estímulo ao segundo uso, a certificação das plantas recicladoras, e a elaboração de incentivos financeiros à recuperação de materiais críticos.

Os resultados também sugerem que a implementação de modelos de responsabilidade estendida do produtor (REP) para módulos fotovoltaicos constitui um passo estratégico para estruturar cadeias de logística reversa e reciclagem no Brasil, à semelhança do que se observa em países com maior maturidade regulatória. Em contextos como a União Europeia e a Austrália, a REP tem sido associada à definição de metas de recolhimento, à internalização de custos de fim de vida pelos fabricantes e importadores e ao fortalecimento da infraestrutura de coleta e tratamento. No cenário brasileiro, a existência de instrumentos de logística

reversa em outros setores e o crescimento acelerado da energia solar criam condições favoráveis para discutir a inclusão gradual dos sistemas fotovoltaicos em acordos setoriais e esquemas de REP, desde que acompanhados de clareza na distribuição de responsabilidades, mecanismos de financiamento estáveis e integração com políticas de dados e de infraestrutura de reciclagem.

Quanto às limitações do estudo, referem-se, sobretudo, à ausência de séries temporais consistentes sobre vida útil efetiva, escassez de dados regionais sobre cenários de descarte e à variabilidade das legislações aplicadas em cada contexto nacional, dificultando a replicação de modelos e a aplicação das tendências globais no contexto brasileiro, por exemplo. Nesse sentido, embora o país apresente forte expansão da capacidade instalada de geração solar, ainda há lacunas significativas. Assim, as recomendações apresentadas ao longo da discussão — incluindo a necessidade de marcos regulatórios específicos, fortalecimento de bancos de dados nacionais, incentivos ao reuso e a reciclagem bem como a promoção de campanhas de educação ambiental — podem contribuir para que o Brasil avance na direção de um modelo de descomissionamento mais alinhado às melhores práticas internacionais, atendendo ao objetivo geral deste trabalho.

Como desdobramento desta pesquisa, recomendo o desenvolvimento de estudos futuros voltados à reciclagem e à valorização dos demais componentes das usinas solares fotovoltaicas, como inversores, cabos, sistemas de aterramento e estruturas metálicas, de modo a ampliar a abordagem da economia circular para além dos módulos. Sugiro ainda a investigação dos impactos das mudanças climáticas e da maior frequência de eventos extremos (chuvas intensas, ventos fortes, ondas de calor, granizo) sobre o processo de descomissionamento, a integridade dos sistemas fotovoltaicos e os custos dos danos precoces à saúde das usinas. Outros temas relevantes incluem a análise de modelos de negócio e instrumentos regulatórios que incentivem o descomissionamento sustentável, a avaliação de indicadores de gestão e operação que incorporem o fim de vida útil já na fase de projeto, bem como estudos sobre os efeitos socioambientais do descomissionamento em comunidades do entorno de grandes empreendimentos fotovoltaicos, contribuindo para uma transição energética mais justa e resiliente.

À luz dos resultados analisados, o maior desafio para o Brasil e demais países emergentes na gestão de resíduos fotovoltaicos reside menos na disponibilidade de soluções tecnológicas e mais na ausência de marcos regulatórios

específicos, de infraestrutura estruturada de coleta e reciclagem e de bases de dados nacionais que permitam planejar o fim de vida dos sistemas. Enquanto contextos considerados “maduros”, como União Europeia, Itália e Austrália, já articulam responsabilidade estendida do produtor, metas de reciclagem e cadeias consolidadas de logística reversa, países em desenvolvimento ainda enfrentam descarte em aterros, baixa rastreabilidade dos módulos descomissionados e dificuldades para transformar o potencial econômico dos materiais recuperáveis em modelos de negócio viáveis e escaláveis.

Em síntese, os resultados obtidos indicam que o descomissionamento de usinas solares fotovoltaicas não deve ser visto apenas como um passivo ambiental, mas como uma oportunidade de geração de valor econômico, inovação tecnológica e aprimoramento das políticas públicas, desde que apoiado em planejamento, regulação consistente, responsabilidade compartilhada e engajamento dos diferentes agentes envolvidos na cadeia de energia solar.

REFERÊNCIAS

ARMITAGE, A.; KEEBLE-ALLEN, D. **Undertaking a structured literature review or structuring a literature review: tales from the field**. *Electronic Journal of Business Research Methods*, v. 6, n. 2, p. 103-114, 2008.

BOGACKA, M.; GÓRNIAK, D.; CZUPRYŃSKA, K. **PV Waste Thermal Treatment According to the Circular Economy Concept**. *Journal of Ecological Engineering*, Krosno, v. 21, n. 7, p. 213–219, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/24/10562>. Acesso em: 25 out. 2025.

CANAL SOLAR. **Painéis solares: mitos e verdades sobre o descarte dos equipamentos**. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/paineis-solares-mitos-everdades-sobre-o-descarte-dos-equipamentos/>. Acesso em: 25 out. 2025

CAPEs. Portal de Periódicos CAPEs. **Sobre quem somos**. Disponível em: <https://www-periodicos-capes-gov-br.ez1.periodicos.capes.gov.br/index.php/sobre/quem-somos.html>>. Acesso em: 5 nov. 2025.

CHEN, Z.; KLEIJN, R.; LIN, H. **Metal Requirements for Building Electrical Grid Systems of Global Wind Power and Utility-Scale Solar Photovoltaic until 2050**. *Environmental Science & Technology*, Washington, v. 57, n. 3, p. 1080-1091, 2023. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.2c06496>. Acesso em: 25 out. 2025.

FALFUSHYNSKA, H. **Navigating Environmental Concerns Assessing the Ecological Footprint of Photovoltaic-Produced Energy**. *Environments*, Basel, v. 11, n. 7, p. 140, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3298/11/7/140>. Acesso em: 25 out. 2025.

FRANZ, F.; PIRINGER, M. **Market development and consequences for compressed recycling of PV end-of-life waste in Europe**. *Renewable Energy*, Amsterdam, v. 157, p. 1273-1281, 2020. Disponível em: <https://energysustainsoc.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13705-020-00263-4>. Acesso em: 25 out. 2025.

FRANZONI, A.; LEGGERINI, C.; BANN, M. **A Predictive Framework for Photovoltaic Waste Quantities and Recovery Values: Insights and Application to the Italian Context**. *Environmental and Climate Technologies*, Riga, v. 28, n. 1, p. 243-257, 2024. Disponível em: <https://reference-global.com/article/10.2478/rtuct-2024-0020>. Acesso em: 25 out. 2025.

GOHR, C. F. et al. **Um método para a revisão sistemática da literatura em pesquisas de engenharia de produção**. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 33., 2013, Salvador. Anais [...]. Salvador: ABEPRO,

2013. Disponível em: https://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2013_TN_STO_191_008_21470.pdf. Acesso em: 20 out. 2025.

GOSS, M. E. **Políticas internacionais para o descarte de módulos fotovoltaicos: propostas para o cenário nacional**. [Trabalho de Conclusão de Curso - Engenharia de Energia]. Universidade Federal de Santa Catarina - Araranguá, 2024.

GRASSIA, P. et al. **Structural analysis of a mobile device for the End-of-Life treatment of PV panels**. Energy Reports, London, v. 4, p. 179-185, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321617305516>. Acesso em: 25 out. 2025.

MADRIGAL A. N.; YGER-RANIGA, U.; YANG, R. **Exploring design thinking processes in circular economy strategies for PV waste management in Australia**. Resources, Conservation & Recycling Advances, Amsterdam, v. 21, p. 200084, 2024. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1363/1/012051>. Acesso em: 25 out. 2025.

QUEK, G. Y. S. et al. **Life cycle assessment of a large-scale solar photovoltaic plant in Malaysia**. Environmental Science and Pollution Research, Heidelberg, v. 31, p. 8210-8227, 2024. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1372/1/012055>. Acesso em: 25 out. 2025.

SANSEVERINO, E. R. et al. **Life Cycle Land Use Requirement for PV in Vietnam**. Energies, Basel, v. 14, n. 24, p. 8474, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/24/8474>. Acesso em: 25 out. 2025.

SHRESTHA, N.; ZAMAN, A. **Decommissioning and Recycling of End-of-Life Photovoltaic Solar Panels in Western Australia**. Sustainability, Basel, v. 16, n. 2, p. 526, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/2/526>. Acesso em: 25 out. 2025.

SUNR. **Descomissionamento e Retrofit de Usinas Fotovoltaicas**. 2024. Disponível em: <https://sunr.com.br/descomissionamento-retrofit-usinas-fotovoltaicas/>. Acesso em: 07 nov. 2025.

TAN, V.; DIAS, P. R.; CHANG, N. **Estimating the Lifetime of Solar Photovoltaic Modules in Australia**. Sustainability, Basel, v. 14, n. 9, p. 5336, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/9/5336>. Acesso em: 25 out. 2025.

TRYPOLSKA, G. et al. **End-of-life equipment for wind and solar power plants: the perspective of waste management in Ukraine**. Environmental Science and Pollution Research, Heidelberg, v. 29, p. 59538–59559, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/5/1662>. Acesso em: 25 out. 2025.