



ECONOMIA CIRCULAR NO SETOR FOTOVOLTAICO BRASILEIRO: LACUNAS NA GESTÃO DE RESÍDUOS DE MÓDULOS IDENTIFICADAS POR REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA

Camila Bonatto de Melo¹, Cláudia Leites Luchese²

¹ Universidade Federal da Integração Latino-Americana - UNILA, Foz do Iguaçu, Brasil
(cb.melo.2026@aluno.unila.edu.br)

² Universidade Federal da Integração Latino-Americana - UNILA, Foz do Iguaçu, Brasil

Resumo: Esta revisão bibliográfica sistemática identifica três lacunas críticas na pesquisa sobre a gestão de resíduos de módulos fotovoltaicos no Brasil: (1) ausência de modelagem quantitativa com especificidade nacional por tecnologia de módulo fotovoltaico; (2) inexistência de instrumento padronizado e validado para avaliação da circularidade, integrando critérios técnicos, econômicos, ambientais e sociais; e (3) vácuo regulatório persistente desalinhado com marcos internacionais. Essas lacunas justificam a necessidade de pesquisas futuras.

Palavras-chave: resíduos fotovoltaicos; economia circular; reciclagem; revisão bibliográfica.

INTRODUÇÃO

O Brasil consolidou-se como uma das principais potências mundiais na geração de energia elétrica a partir da fonte solar com capacidade instalada de mais de 68,6 GW, representando 26,4% da matriz elétrica nacional (ABSOLAR, 2026). Embora esse crescimento represente um avanço significativo no contexto da transição energética, ele também implica um desafio ambiental ainda pouco discutido: a geração crescente de resíduos provenientes de módulos fotovoltaicos. Considerando que esses equipamentos possuem vida útil estimada entre 25 e 30 anos, espera-se que volumes expressivos de resíduos sejam gerados nas próximas décadas, demandando estratégias adequadas para sua gestão e destinação final.

Projeções da IRENA e do IEA-PVPS indicam acúmulo mundial de mais de 200 milhões de toneladas de resíduos fotovoltaicos até 2050 (IRENA e IEA-PVPS, 2016). No Brasil, a projeção da IRENA (2016) indica que, até 2050, o país poderá gerar cerca de 750 mil toneladas de resíduos fotovoltaicos, volume equivalente a aproximadamente 25 milhões de módulos ao final de sua vida útil. A composição dos módulos, cerca de 78% de vidros, 10% de alumínio, 7% de plásticos e 5% de metais e semicondutores, confere a esses resíduos expressivo potencial de recuperação de materiais estratégicos (Revolusolar, 2026).

O objetivo deste trabalho é apresentar uma revisão da literatura sobre gestão de resíduos fotovoltaicos no Brasil, mapeando o estado da arte, o panorama

regulatório e as lacunas críticas de conhecimento. Diferentemente das revisões anteriores, que tratam esses temas isoladamente, combina a análise de três componentes: modelagem quantitativa (previsão de volumes nacionais), avaliação de circularidade (critérios técnico-econômicos e ambientais) e fundamentação de políticas públicas. Essa articulação permite identificar gargalos específicos do contexto brasileiro que análises fragmentadas não captam.

MATERIAL E MÉTODOS

A revisão bibliográfica foi conduzida nas bases Portal de Periódicos da CAPES, *Web of Science*, Scopus e Google Scholar, com termos de busca em português e inglês combinando: “fotovoltaic waste” / “resíduos fotovoltaicos”; “circular economy” / “economia circular”; “end-of-life” / “fim de vida”; e “circularity index” / “índice de circularidade”. O recorte temporal priorizou as publicações de 2020 a 2026, incluindo trabalhos clássicos e fundamentais quando sua utilização for indispensável.

Foram analisados mais de 20 artigos em periódicos científicos, distribuídos entre publicações nacionais e internacionais, 5 relatórios técnicos de organismos internacionais e agências brasileiras (IRENA, IEA-PVPS, ANEEL, BNDES, ONS) e 9 documentos normativos nacionais e internacionais (Lei nº 12.305/2010, Decreto nº 10.240/2020, Decreto nº 11.043/2022, Diretiva WEEE 2012/19/UE, Diretiva (UE) 2024/884, normas ABNT NBR 10004 e NBR 10005, e norma EN 50419:2022).



Os estudos foram inicialmente selecionados por título e resumo. Posteriormente, realizou-se a leitura integral dos artigos elegíveis, sendo incluídos apenas aqueles que abordavam diretamente gestão de resíduos, economia circular, logística reversa ou políticas públicas. Trabalhos duplicados ou sem aderência ao objetivo foram excluídos. As categorias temáticas emergiram durante a análise indutiva do corpo de literatura, seguindo a categorização por eixo temático: (i) modelagem quantitativa de fluxos de resíduos; (ii) impactos ambientais e toxicológicos; (iii) ciclo de vida e emissões de CO₂; (iv) economia circular, logística reversa e MCDM; (v) marcos regulatórios nacionais e internacionais.

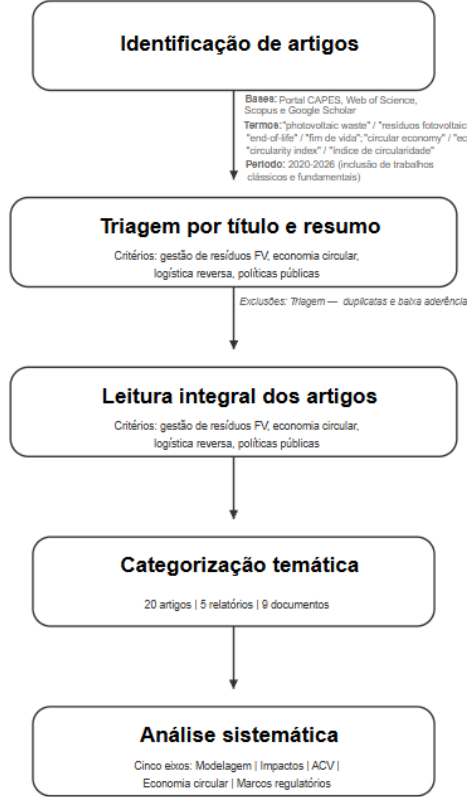


Figura 1 - Fluxograma Metodológico.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Panorama regulatório: assimetria entre União Europeia e Brasil

A análise comparativa revelou significativa assimetria regulatória entre os marcos normativos europeu e brasileiro. Na União Europeia, a Diretiva WEEE 2012/19/UE incluiu os módulos fotovoltaicos em seu escopo a partir de agosto de 2012, impondo a Responsabilidade Estendida do Produtor (REP) com metas de coleta de 85% e recuperação de materiais de 80% (Parlamento Europeu, 2012). Em março de 2024, a Diretiva (UE) 2024/884 consolidou a

responsabilidade financeira dos produtores pelos custos de gestão de resíduos de módulos comercializados após agosto de 2012, encerrando uma contradição jurídica originada por decisão do Tribunal de Justiça da UE em janeiro de 2022 (Parlamento Europeu, 2024). A nova Diretiva também determina revisão da norma de mercado dos equipamentos (EN 50419:2022) e prevê avaliação legislativa até dezembro de 2026 com foco em categoria específica para painéis fotovoltaicos.

No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) e seus decretos regulamentadores (nº 10.240/2020 e nº 11.043/2022) estabelecem a logística reversa obrigatória para eletroeletrônicos (Brasil, 2010, 2020, 2022). Contudo, a inclusão de painéis fotovoltaicos no Decreto nº 10.240/2020 gerou insegurança jurídica ao não os enquadrar conceitualmente, contradição que persiste e foi apontada no Projeto de Lei nº 3.784/2023 (Brasil, 2020; Senado Federal, 2023). Souza et al. (2024) identificam que, em 2030, 77% dos resíduos fotovoltaicos brasileiros decorrerão de perdas prematuras, reforçando a urgência da regulamentação específica ainda inexistente. Góes et al. (2023) acrescentam que os resíduos de painéis de silício cristalino foram classificados como perigosos (Classe I) pela NBR 10004/2004, dada a presença de chumbo acima dos limites de lixiviação permitidos, um dado que confere urgência adicional à formulação de política pública nacional. A Tabela 1, a seguir, mostra a comparação dos marcos regulatórios para resíduos fotovoltaicos entre a União Europeia e o Brasil.

Tabela 1. Matriz comparativa entre Brasil e UE.

Aspecto	UE	Brasil	Lacuna
Responsabilidade estendida do produtor	Consolidado	Parcial	Alta
Metas de reciclagem	Consolidado	Inexistente	Alta
Regulamentação específica	Consolidado	Inexistente	Muito Alta
Modelagem dos resíduos	Parcial	Incipiente	Alta
Indicadores de circularidade	Consolidado	Inexistente	Muito Alta

Estado da arte: modelagem, ACV e circularidade

Na frente de modelagem quantitativa, Rocha et al. (2024) constituem a principal contribuição nacional recente, utilizando dados da ANEEL e modelos de séries temporais, projetam capacidade instalada de 192 GW até 2040 e 12,9 milhões de toneladas de



resíduos até 2065, com concentração geográfica no Centro-Sul do país. Essa projeção não contempla, contudo, degradação por tecnologia de módulo nem cenários regulatórios alternativos.

Na frente da avaliação do ciclo de vida, Guerreiro e Pacca (2023) harmonizaram dados de 20 estudos internacionais de ACV para sistemas fotovoltaicos monocristalinos instalados no Brasil, revelando emissões evitadas de 346 a 366 g de CO₂ por kWh gerado e tempo de recuperação de energia com mediana entre 1,2 e 8,9 anos, conforme a irradiação solar do local. Esse estudo demonstra a viabilidade ambiental do fotovoltaico ao longo do ciclo de vida, mas também evidencia que o descarte inadequado compromete esse balanço positivo, reforçando a necessidade de gestão estruturada de fim de vida.

Os desafios de maior recorrência são a ausência de políticas específicas, a inviabilidade econômica da reciclagem (custo médio de US\$ 20-30 por módulo versus receita estimada de US\$ 6,72 por módulo reciclado no Brasil), os gargalos tecnológicos (particularmente na separação de encapsulantes poliméricos de vidro e silício) e os desafios logísticos.

Lacunas de pesquisa identificadas

A síntese da revisão permite delimitar três dimensões da lacuna de conhecimento. A primeira refere-se à ausência de modelos quantitativos com especificidade suficiente para o contexto brasileiro. Embora a projeção de Rocha et al. (2024) represente um avanço, ela não diferencia tecnologias de módulos, não considera cenários regulatórios alternativos nem incorpora taxas de falhas prematuras distintas entre sistemas de geração distribuída e centralizada.

A segunda lacuna diz respeito à inexistência de um instrumento padronizado para mensuração da circularidade de módulos fotovoltaicos que integre dimensões técnicas, econômicas, ambientais e sociais. Estudos como Bailey e Peiró (2022) e Papamichael e Zorpas (2022) estabelecem critérios relevantes para o contexto europeu, porém não propõem um índice validado e adaptado a mercados emergentes.

Por fim, observa-se uma lacuna na adaptação das recomendações internacionais ao contexto regulatório brasileiro. As diretrizes disponíveis são predominantemente fundamentadas em experiências europeias e norte-americanas, com limitada aderência à PNRS e às especificidades da cadeia produtiva nacional.

Em conjunto, esses resultados evidenciam que o principal desafio não reside na ausência de ferramentas isoladas, mas na ausência de uma abordagem integrada que articule projeções de geração de resíduos, avaliação de circularidade e subsídios à formulação de políticas públicas. Nesse contexto, o desenvolvimento de uma metodologia

integrada para mensuração da circularidade aplicada a módulos fotovoltaicos representa contribuição potencial, capaz de apoiar tanto a tomada de decisão empresarial quanto o aperfeiçoamento de políticas públicas alinhadas à PNRS e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável 7, 12 e 13.

CONCLUSÃO

A revisão bibliográfica sistemática confirma que a gestão de resíduos de módulos fotovoltaicos é um campo de pesquisa em rápida expansão, mas com lacunas críticas no contexto brasileiro. A combinação de crescimento acelerado da capacidade instalada, com 98% dos empreendimentos fotovoltaicos brasileiros tendo menos de quatro anos de operação (Rocha et al., 2024), vazio regulatório persistente, classificação dos resíduos como perigosos pela NBR 10004/2004 e inviabilidade econômica da reciclagem no volume atual cria uma janela de oportunidade para contribuições científicas de alto impacto acadêmico e político.

As prioridades de pesquisa emergentes incluem: (1) desenvolvimento de modelagem quantitativa de resíduos com MFA e distribuições de falha de Weibull, desagregada por tecnologia de módulo; (2) validação de metodologias de avaliação de circularidade baseadas em MCDM (AHP, TOPSIS); e (3) análise técnico-econômica de modelos de logística reversa adaptados ao contexto brasileiro. A experiência europeia com a Diretiva WEEE, consolidada pela Diretiva (UE), oferece referência concreta para a construção de uma estrutura regulatória nacional que transforme o descarte de painéis em oportunidade para economia circular e geração de empregos verdes.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade (PPGIES) da Universidade Federal da Integração Latino-Americana (UNILA).

REFERÊNCIAS

- ABSOLAR – Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica. Energia solar fotovoltaica no Brasil: infográfico ABSOLAR nº90. 2026. Disponível em: <https://www.absolar.org.br>. Acesso em :23 jun. 2026.
- Bailey, G.; Peiró, L. T. Circular economy of photovoltaic panels: opportunities and challenges for critical materials recovery. *Journal of Cleaner Production*, v. 357, p. 131833, 2022.



- BRASIL. Decreto nº 10.240, de 9 de fevereiro de 2020. Regulamenta a Política Nacional de Resíduos Sólidos mediante a implementação da Logística Reversa de Produtos Eletrônicos. Diário Oficial da União, Brasília, 10 fev. 2020.
- BRASIL. Decreto nº 11.043, de 13 de maio de 2022. Regulamenta a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial da União, Brasília, 16 maio 2022.
- BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, 3 ago. 2010.
- Góes, P. F. et al. Resíduos de painéis solares fotovoltaicos: uma revisão dos impactos ambientais e toxicológicos. *Revista de Gestão e Secretariado (GeSec)*, v. 14, n. 8, p. 12528-12553, 2023. DOI: 10.7769/gesec.v14i8.2553.
- Guerreiro, L. R.; Pacca, S. A. Emissões do ciclo de vida de CO₂, emissões evitadas e tempo de recuperação de energia para sistemas fotovoltaicos no Brasil. *Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação (REASE)*, v. 9, n. 6, p. 2834-2849, 2023. DOI: 10.51891/rease.v9i6.10456.
- IRENA; IEA-PVPS. End-of-Life Solar PV Panels. 2016. Disponível em: https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/IRENA_IEAPVPS_End-of-Life_Solar_PV_Panels_2016.pdf. Acesso em: 21 jun. 2026.
- Papamichael, I.; Zorpas, A. A. End-of-waste criteria in the framework of end-of-life PV panels concerning circular economy strategy. *Waste Management & Research*, v. 40, n. 12, p. 1726-1735, 2022.
- Parlamento Europeu. Diretiva (UE) 2024/884 de 13 de março de 2024 que altera a Diretiva 2012/19/UE sobre resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (RAEE). *Jornal Oficial da União Europeia*, 19 mar. 2024.
- REVOLUSOLAR. Economia circular aplicada aos módulos fotovoltaicos no Brasil. Rio de Janeiro: Revolusolar, 2026.
- PARLAMENTO EUROPEU. Diretiva 2012/19/UE de 4 de julho de 2012 relativa aos resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (RAEE). *Jornal Oficial da União Europeia*, L 197, p. 38-71, 24 jul. 2012.
- Rocha, A. G.; Barra Neto, A.; Oliveira, B. G. Resíduos da cadeia da energia fotovoltaica no Brasil: potencial para a economia circular. *Revista de Gestão Social e Ambiental (RGSA)*, v. 18, n. 10, e08787, 2024. DOI: 10.24857/rgsa.v18n10-035.
- SENADO FEDERAL. Projeto de Lei nº 3.784, de 2023. Propõe melhorias ao Decreto nº 10.240/2020 para adequação de painéis fotovoltaicos. Brasília, 2023.
- Souza, V.; Figueiredo, A. M. R.; Espejo, M. M. S. B. Challenges and strategies for managing end-of-life photovoltaic equipment in Brazil: learning from international experience. *Energy Policy*, v. 188, p. 114091, 2024. DOI: 10.1016/j.enpol.2024.114091.