

ESTUDOS SOBRE ECONOMIA CIRCULAR APLICADA A USINAS

FOTOVOLTAICAS

Juliana Werneck de Mendonça¹, Monique Silvaes Misságia², Rochkhudson Batista de Faria³,

Thiago Padovani Xavier⁴

Ciências Sociais Aplicadas

Introdução e Objetivo

A transição para fontes de energia renováveis é uma prioridade global para combater as mudanças climáticas, e a energia solar fotovoltaica desponta como uma das soluções mais promissoras. O Brasil, com seu vasto potencial solar, tem expandido significativamente sua capacidade instalada, projetando alcançar entre 27 a 90 GW até 2050. Contudo, esse crescimento exponencial traz um desafio iminente: a gestão dos resíduos de painéis fotovoltaicos ao final de sua vida útil, estimada em 25 anos. As práticas atuais de descarte raramente consideram a recuperação de materiais valiosos, gerando perdas econômicas e sérios riscos ambientais. A economia circular surge como um modelo estratégico para enfrentar este problema, promovendo a reutilização e a reciclagem de componentes.

Uma abordagem de economia circular é cada vez mais reconhecida como essencial para a gestão sustentável da energia fotovoltaica (FV) no Brasil. Isso se torna ainda mais importante com o rápido crescimento do setor e o aumento projetado de resíduos fotovoltaicos. A integração dos princípios da economia circular nas usinas fotovoltaicas pode mitigar significativamente os impactos ambientais e aumentar a eficiência dos recursos. O conceito central que norteia esta pesquisa é a avaliação de perspectivas da economia circular para mitigar os impactos ambientais da cadeia fotovoltaica. A ideia fundamental é transformar o que seria resíduo em recurso, reintegrando materiais como silício, prata e cobre no ciclo produtivo. Mesmo sabendo que a ausência de uma regulamentação específica no Brasil e a dependência da importação de tecnologias de reciclagem são barreiras significativas.

¹ Graduanda em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Espírito Santo - UFES, juliana.mendonca@edu.ufes.br;

² Mestranda em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo - UFES, monique.missagia@edu.ufes.br;

³ Doutor em Ciências Técnicas Nucleares, Universidade Federal do Espírito Santo - UFES, rochkhudson.faria@ufes.br

⁴ Doutor em Engenharia Química, Universidade Federal do Espírito Santo - UFES, thiago.p.xavier@ufes.br;

Diante deste cenário, o objetivo deste trabalho é realizar uma análise aprofundada sobre a aplicação da economia circular no setor de energia solar fotovoltaica no Brasil, com foco na reciclagem de módulos, identificando os principais desafios, oportunidades e propondo caminhos para um desenvolvimento tecnológico e sustentável.

Método e Metodologia

Para atingir o objetivo proposto, a pesquisa foi caracterizada como exploratória e descritiva, com uma abordagem qualitativa baseada em análise documental e bibliográfica. O desenvolvimento do trabalho ocorreu em duas etapas principais entre 2022 e 2024.

Primeiramente, foi realizada uma revisão sistemática da literatura nas bases de dados *Web of Science* e *Scopus*, utilizando palavras-chave como "energia solar fotovoltaica", "reciclagem" e "economia circular". Foram selecionados 152 documentos, incluindo artigos, revisões e trabalhos de conferência, que foram analisados por meio de técnicas bibliométricas para identificar tendências, principais autores, países e temas emergentes.

Em segundo lugar, foram coletados e analisados dados secundários de fontes oficiais, como a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR). Esses dados, referentes à capacidade instalada e à distribuição de usinas no Brasil, foram organizados em planilhas eletrônicas para permitir uma análise panorâmica do setor. A análise dos dados combinou a interpretação dos resultados bibliométricos com os dados do panorama nacional, confrontando-os com a literatura para construir uma discussão robusta sobre o tema.

Discussão e Resultados

A análise bibliométrica revelou um crescimento notável na produção científica sobre o tema a partir de 2023, com China e Índia liderando as publicações, o que reflete seus investimentos em energias renováveis. O Brasil aparece com um potencial de crescimento significativo. Os termos mais frequentes, como "Reciclagem", "Avaliação do Ciclo de Vida" e "Economia Circular", confirmam a centralidade desses conceitos na pesquisa atual.

Já a análise de dados da ANEEL (Quadro 1) mostra um crescimento expressivo da capacidade instalada no Brasil, porém com uma forte concentração geográfica em estados como Minas Gerais, São Paulo e Bahia. Essa distribuição desigual representa um desafio logístico para a futura implementação de sistemas de reciclagem, pois o transporte de módulos em fim de vida de regiões remotas para centros de tratamento pode inviabilizar economicamente o processo.

Quadro 1 – Detalhamento energético do Brasil (2025)

Estado	Operando	Construindo	Não iniciada	Paralisada	Revogação	Extinção	Cancelado
Brasil total	33.346	5.065	123.531	0	0	0	0
Acre (AC)	105	0	0	0	0	0	0
Alagoas (AL)	425	0	103	0	528	0	0
Amapá (AP)	88	0	0	0	0	0	0
Amazonas (AM)	210	0	0	0	0	0	0
Bahia (BA)	1.293	364	23.898	0	4.460	0	0
Ceará (CE)	1.116	791	16.259	0	1.978	0	0
Distrito Federal (DF)	445	0	0	0	0	0	0
Espírito Santo (ES)	868	0	0	0	0	0	0
Goiás (GO)	1.634	350	5.808	0	1.310	0	0
Maranhão (MA)	712	0	226	0	0	0	0
Mato Grosso (MT)	2.137	0	1.247	0	779	0	0
Mato Grosso do Sul (MS)	1.388	0	3.484	0	2.009	0	0
Minas Gerais (MG)	4.252	1.532	33.976	0	7.912	0	0
Pará (PA)	1.136	0	0	0	0	0	0
Paraíba (PB)	432	200	4.175	0	131	0	0
Paraná (PR)	3.041	0	0	0	0	0	0
Pernambuco (PE)	1.012	230	3.950	0	2.772	0	0
Piauí (PI)	638	800	19.370	657	2.736	0	0
Rio de Janeiro (RJ)	1.283	0	175	0	0	0	0
Rio Grande do Norte (RN)	752	798	8.854	0	2.721	0	0
Rio Grande do Sul (RS)	3.066	0	0	0	0	0	0
Rondônia (RO)	424	0	0	0	24	0	0
Roraima (RR)	81	0	0	0	0	0	0
Santa Catarina (SC)	1.439	0	0	0	0	0	0
São Paulo (SP)	4.728	0	96	0	186	0	0
Sergipe (SE)	204	0	1.332	0	0	0	0
Tocantins (TO)	437	0	578	0	180	0	0

Fonte: Elaborado pela autora com base em dados da ANEEL e ABSOLAR.

A composição dos módulos fotovoltaicos é rica em materiais de alto valor (Quadro 2). Embora o vidro represente a maior parte do peso (69-75%), seu valor econômico é baixo. Em contrapartida, materiais como a prata (0,006-0,06% do peso) e o cobre (0,6-1%) possuem um valor econômico por quilograma extremamente elevado (USD 446-702 e USD 4,4-7, respectivamente), justificando investimentos em tecnologias de recuperação. A análise do ciclo de vida (ACV) calculou um Tempo de Retorno Energético (EPBT) de aproximadamente 2,94 anos, indicando que, para uma vida útil de 25 anos, o painel gera energia limpa por mais de 22 anos. Contudo, a produção dos módulos ainda é altamente dependente de fontes não renováveis,

especialmente da matriz energética chinesa, e gera impactos de ecotoxicidade, reforçando a necessidade de processos de reciclagem mais eficientes.

Quadro 2 – Materiais contidos em um módulo fotovoltaico de silício, sua distribuição de peso, seu valor econômico e decisão de interesse para reciclagem.

Componente	Porcentagem de peso no módulo (%)	Preço (USD/kg de material)	É de interesse para reciclagem?
Caixa de junção	2	0,28 – 1 (cada) <i>b</i>	Sim
Silício	2-3	1,7 – 2,7 <i>c</i>	Sim
Vidro	69-75	0,04 – 0,167	Sim
Polímeros (EVA, PVF)	7	-	Não
Cobre	0,6-1	4,4 - 7	Sim
Prata	0,006-0,06	446 - 702	Sim
Alumínio	10-20	1 - 2	Sim
Boro	<0,1	-	Não
Fósforo	<0,1	-	Não
Dióxido de Estanho	<0,1	-	Não
Chumbo	<0,1	-	Não

Fonte: Dias et al. (2021).

Considerações Finais

Conclui-se que o Brasil, apesar do avanço na energia solar, enfrenta desafios cruciais para implementar uma economia circular no setor. A ausência de um marco regulatório para a reciclagem de módulos e a dependência de tecnologia externa são as principais barreiras, resultando em perdas econômicas e ambientais. Este estudo cumpriu seu objetivo ao fornecer um panorama detalhado dos desafios e oportunidades, integrando dados de mercado e da produção científica. Como próximos passos, sugere-se aprofundar a análise de viabilidade econômica de tecnologias de reciclagem adaptadas à realidade brasileira e investigar modelos de negócio para a logística reversa no país.

Agradecimentos/Apoio Técnico (opcional)

Agradecemos ao Programa Institucional de Iniciação Científica (PIIC) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) pelo fomento e suporte essenciais à realização deste trabalho.

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Reports ANEEL**. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://portalrelatorios.aneel.gov.br/Ralie>. Acesso em: 16 jan. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Tabela de atos ANEEL.** [S. l.], 2025. Disponível em:

<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoibWJlXmDFINjAtOGEyNC00Y2EwLTlmMzUtOWJjN2I2MTEzYzM0IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBlMSIsImMiOjR9>. Acesso em: 20 fev. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA (ABSOLAR).

Infográfico ABSOLAR. [S. l.], 2025. Disponível em:

<https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>. Acesso em: 12 fev. 2025.

DIAS, P. et al. Comprehensive recycling of silicon photovoltaic modules incorporating organic solvent delamination – technical, environmental and economic analyses. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 165, p. 105241, 2021.

FTENAKIS, V.; KIM, H. C.; ALSEMA, E. A. Life Cycle Assessment of Photovoltaic Electricity Generation Systems: An Overview. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, v. 16, n. 5, p. 399-416, 2008.

GOEDKOOP, M. J. et al. **ReCiPe 2008: A review of the methodology and its application.** The Hague: PRé Consultants, 2009.

LI, F. et al. Effect of outdoor ageing on pyrolytic characteristics and kinetics of different organic components in waste photovoltaic panels. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 180, p. 106565, 2024.

MAO, D. et al. Overview of life cycle assessment of recycling end-of-life photovoltaic panels: a case study of crystalline silicon photovoltaic panels. **Journal of Cleaner Production**, v. 434, p. 140320, 2024.

MURPHY, R. What is undermining climate change mitigation? How fossil-fuelled practices challenge low-carbon transitions. **Energy Research & Social Science**, v. 108, p. 103390, 2024.

NASCIMENTO, R. L. **Energia solar no Brasil: situação e perspectivas.** Brasília, DF: Câmara dos Deputados, 2017.

SÁNCHEZ-BALSECA, J.; PINEIROS, J. L.; PÉREZ-FOGUET, A. Influence of environmental factors on the power produced by photovoltaic panels artificially weathered. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 188, p. 113831, 2023.

VINAYAGAMOORTHY, R. et al. Recycling of end-of-life photovoltaic solar panels and recovery of valuable components: a comprehensive review and experimental validation. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, p. 111715, 2024.