



Análise Comparativa do EPBT em Módulos Fotovoltaicos Flexíveis e Convencionais via Avaliação de Ciclo de Vida

Hugo Alexandre Garrido Aguiar

Unidade de Pós Graduação, Extensão e Pesquisa (UPEP - CEETEPS) /
hugo.garrido@calibracao.com.br

Francisco Tadeu Degasperi

Unidade de Pós Graduação, Extensão e Pesquisa (UPEP - CEETEPS) / FATEC São
Paulo / ftd@fatecsp.br

Francisco del Moral Hernandez

Unidade de Pós Graduação, Extensão e Pesquisa (UPEP - CEETEPS) / FATEC
Campinas / francisco.hernandez@cpspos.sp.gov.br

Resumo

Este artigo apresenta uma análise comparativa entre módulos fotovoltaicos flexíveis e convencionais com base na metodologia de ciclo de vida, focando no indicador de *Energy Payback Time* (EPBT). O objetivo foi avaliar o desempenho energético e ambiental de cada sistema a partir de dados extraídos da literatura científica. Os resultados demonstram que os módulos flexíveis, especialmente os de perovskita, possuem EPBT inferior 6 meses, enquanto os convencionais de silício apresentam valores próximos a 4 anos. Além disso, os sistemas flexíveis mostraram menor energia incorporada e emissões de CO₂. Conclui-se que os módulos flexíveis representam uma alternativa sustentável e eficiente para aplicações fotovoltaicas, embora aspectos como estabilidade e durabilidade ainda demandem atenção.



Palavras-chave: Energia solar, análise de ciclo de vida, EPBT, perovskita, sustentabilidade.

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por fontes de energia sustentáveis tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias fotovoltaicas com menor impacto ambiental e maior eficiência energética. Dentre as opções disponíveis, os módulos fotovoltaicos flexíveis, especialmente os baseados em perovskitas, têm se destacado por apresentarem custo de fabricação menor do que os módulos convencionais, leveza, pensando até 10 vezes menos e versatilidade de aplicação, pois sua espessura permite se acomodar em diferentes superfícies, além de apresentar desempenho energético compatível aos painéis rígidos (MOHAN, 2025; RAVILLA et al., 2024). Em paralelo, os sistemas convencionais, majoritariamente compostos por silício monocristalino, ainda dominam o mercado global devido à sua maturidade tecnológica e confiabilidade (MAALOUF et al., 2023). No entanto, o elevado consumo energético na fabricação desses módulos e seu maior tempo de retorno energético (EPBT) levantam questionamentos sobre sua sustentabilidade em longo prazo (LAMNATOU et al., 2023; SOLER et al., 2025). Este estudo tem como objetivo comparar o desempenho energético entre os sistemas fotovoltaicos flexíveis e convencionais por meio da análise de ciclo de vida (ACV), com foco no cálculo do EPBT.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A análise de ciclo de vida (ACV) é uma ferramenta consolidada para avaliação dos impactos ambientais de produtos e processos ao longo de seu ciclo completo, desde a extração de matéria-prima até o descarte ou reciclagem (TRIVEDI et al., 2023). No contexto fotovoltaico, o EPBT é um dos indicadores mais utilizados para mensurar a sustentabilidade energética de um sistema, representando o tempo necessário para que a energia gerada pelo módulo compense a energia consumida em sua fabricação (CHAKRABORTY et al., 2021). Os módulos flexíveis, como os de perovskita, têm demonstrado EPBTs menores que os sistemas convencionais, com valores inferiores a 6 meses em alguns casos (PURKAYASTHA et al., 2023; MOHAN, 2025). Já os módulos

rígidos de silício apresentam EPBTs variando entre 1,3 e 6,9 anos, dependendo da eficiência e do local de instalação (SOLER et al., 2025; LAMNATOU et al., 2023). Além disso, fatores como taxa de reciclagem, emissões de CO₂ e energia incorporada (*embodied energy*) são fundamentais para uma avaliação comparativa robusta (TRIVEDI et al., 2023; RAVILLA et al., 2024).

Estudos nacionais também reforçam a relevância do EPBT como indicador de sustentabilidade energética, com valores variando entre 1.1 e 2.3 anos para sistemas fotovoltaicos instalados em diferentes regiões do Brasil (GUERREIRO; PACCA, 2023).

3. MÉTODO

Este estudo adotou uma abordagem comparativa baseada em ACV simplificada, utilizando dados extraídos de literatura científica recente.

A escolha pela metodologia de Análise de Ciclo de Vida (ACV) neste estudo se justifica pela sua capacidade de avaliar de forma abrangente os impactos ambientais e energéticos associados a cada etapa do sistema fotovoltaico — desde a extração de matéria-prima até a instalação e operação dos módulos. O EPBT, indicador central da pesquisa, é diretamente derivado da ACV e permite comparar tecnologias distintas com base em sua eficiência energética e sustentabilidade. Para garantir a robustez dos dados utilizados no estudo de caso comparativo entre módulos flexíveis e convencionais, foram consultadas bases científicas consolidadas e multidisciplinares, como IEEE Xplore, Web of Science e ScienceDirect. Essas plataformas forneceram acesso a artigos revisados por pares, estudos técnicos e análises ambientais recentes, com foco em tecnologias fotovoltaicas emergentes (como perovskitas) e sistemas tradicionais de silício. A seleção criteriosa das fontes permitiu construir inventários confiáveis e contextualizados, alinhados com práticas internacionais de avaliação ambiental e energética.

Foram modelados dois sistemas fotovoltaicos: um módulo flexível baseado em perovskita (Cs₂TiI₆), conforme Tabela 1 e um módulo convencional rígido de silício monocristalino, conforme Tabela 2.

Tabela 1 – Inventário de fabricação de módulo fotovoltaico convencional.

Flow name	Flow	Direction	Qt	Unit	Reference source
Silício monocristalino (ingot)	Product	Input	2,5	kg	Maalouf et al. (2023)
Vidro temperado (cobertura)	Product	Input	3	kg	Soler et al. (2025)
Alumínio (estrutura de suporte)	Product	Input	15	kg	Lamnatou et al. (2023)
Energia elétrica (produção)	Energy	Input	5000	MJ	Lamnatou et al. (2023)
Água desionizada (limpeza)	Product	Input	3	L	Base em práticas ind.
Transporte médio de materiais	Service	Input	500	t.km	Soler et al. (2025)
Módulo fotovoltaico rígido	Product	Output	1	m ²	Unidade funcional
Emissão de CO ₂ equivalente	Emission	Output	33,1	kg	Soler et al. (2025)
Resíduo de silício (serragem)	Waste	Output	0,2	kg	Trivedi et al. (2023)
Resíduo de vidro	Waste	Output	0,1	kg	Trivedi et al. (2023)

Fonte: Autor, 2025.

Tabela 2 – Inventário de fabricação de módulo fotovoltaico flexível.

Flow name	Flow	Direction	Qt	Unit	Reference source
Filme de perovskita (Cs ₂ TiBr ₆)	Product	Input	0,5	kg	Chakraborty et al. (2021)
Substrato PET	Product	Input	0,3	kg	Ravilla et al. (2024)
Energia elétrica (produção)	Energy	Input	110,5	MJ	Chakraborty et al. (2021)
Água desionizada (lavagem)	Product	Input	2	L	Base em práticas industriais
Solventes orgânicos (DMSO, DMF)	Product	Input	0,05	kg	Ravilla et al. (2024)
Transporte médio de materiais	Service	Input	150	t.km	Trivedi et al. (2023)
Módulo fotovoltaico flexível	Product	Output	1	m ²	Unidade funcional
Emissão de CO ₂ equivalente	Emission	Output	0,065	kg	Purkayastha et al. (2023)

Resíduo de solventes orgânicos	Waste	Output	0,01	kg	Ravilla et al. (2024)
Recortes de substrato PET	Waste	Output	0,02	kg	Trivedi et al. (2023)

Fonte: Autor, 2025.

A unidade funcional adotada foi 1 m² de módulo fotovoltaico, com vida útil de 20 anos para o sistema flexível e 25 anos para o convencional. Os dados de *embodied energy*, eficiência de conversão, geração anual e EPBT foram extraídos de fontes como (CHAKRABORTY et al., 2021; SOLER et al., 2025; LAMNATOU et al., 2023; RAVILLA et al., 2024). O cálculo do EPBT seguiu a fórmula:

$$EPBT = \frac{\text{Primary (embodied energy)}}{\text{Annual energy generated by the system}} \quad \text{Eq 01}$$

Os valores foram organizados em tabelas de inventário por etapa do ciclo de vida (extração, fabricação, transporte, instalação), e os resultados foram comparados em termos de desempenho energético e impacto ambiental.

4. RESULTADOS

Os resultados demonstram que o módulo fotovoltaico flexível apresenta um EPBT de aproximadamente 0,43 anos, considerando uma *embodied energy* de 110,46 MJ/m² e geração anual de 254,9 MJ/m² (CHAKRABORTY et al., 2021).

$$EPBT = \frac{110,46}{254,9} = 0,43 \text{ anos}$$

Já o módulo convencional rígido apresentou EPBT de 3,70 anos, com *embodied energy* de 5000 MJ/m² e geração anual de 1350 MJ/m² (LAMNATOU et al., 2023; SOLER et al., 2025).

$$EPBT = \frac{5000}{1350} = 3,7 \text{ anos}$$

Em termos de emissões de CO₂, o sistema flexível apresentou 0,065 kg CO₂/kWh (PURKAYASTHA et al., 2023), enquanto o sistema rígido variou entre 33,1 e 76 kg

CO₂/kWh (SOLER et al., 2025; LAMNATOU et al., 2023). A taxa de recuperação de materiais no fim da vida útil foi estimada em até 80% para ambos os sistemas, com destaque para os avanços em reciclagem de perovskitas (TRIVEDI et al., 2023; ZHANG; PARK, 2022).

5. DISCUSSÕES

A análise comparativa evidencia que os módulos flexíveis, especialmente os de perovskita, apresentam vantagens em termos de retorno energético e impacto ambiental. O EPBT inferior a meio ano torna esses sistemas atrativos para aplicações urbanas, e imóveis em regiões com alta irradiância solar (PURKAYASTHA et al., 2023; MOHAN, 2025). Além disso, seu menor custo energético e as emissões reduzidas de CO₂ reforçam o potencial como tecnologia sustentável (RAVILLA et al., 2024; LI et al., 2022). Por outro lado, os módulos convencionais ainda oferecem maior estabilidade e durabilidade, o que pode compensar seu maior EPBT em projetos de longo prazo (SOLER et al., 2025; AGHAEI et al., 2022). Em cenários brasileiros, o EPBT de sistemas convencionais pode ser reduzido significativamente em regiões com alta irradiância, como o Nordeste, conforme demonstrado por (GUERREIRO; PACCA, 2023), que também destacam o potencial de emissões evitadas de até 50 g CO₂/kWh. A escolha entre os sistemas deve considerar o contexto de aplicação, disponibilidade de materiais e infraestrutura de reciclagem.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo comparou o desempenho energético de módulos fotovoltaicos flexíveis e convencionais por meio da análise de ciclo de vida com foco no EPBT. Os resultados indicam que os sistemas flexíveis, especialmente os de perovskita, apresentam EPBTs significativamente menores, menor *embodied energy* e menores emissões de CO₂. Embora os módulos rígidos ainda sejam amplamente utilizados, os avanços tecnológicos e ambientais dos sistemas flexíveis os posicionam como alternativas promissoras para a transição energética sustentável. Recomenda-se que futuras pesquisas aprofundem a análise de estabilidade, reciclagem e viabilidade econômica desses sistemas em diferentes contextos geográficos e climáticos.

7. REFERÊNCIAS / REFERENCES / REFERENCIAS

AGHAEI, M. et al. Review of degradation and failure phenomena in photovoltaic modules. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 159, p. 112160, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112160>.

CHAKRABORTY, S. et al. Energy payback time and life cycle assessment of Cs₂TiI₆-based perovskite solar cells. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 2021.

LAMNATOU, Chr. et al. Photovoltaic power plants with hydraulic storage: Life-cycle assessment focusing on energy payback time and greenhouse-gas emissions – a case study in Spain. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, v. 60, p. 103468, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103468>.

LI, Q. et al. Life cycle assessment of organic solar cells and perovskite solar cells with graphene transparent electrodes. *Renewable Energy*, v. 195, p. 906–917, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.06.075>.

MAALOUF, A. et al. A comprehensive review on life cycle assessment of commercial and emerging thin-film solar cell systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 186, p. 113652, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113652>.

MOHAN, M. Perovskite photovoltaics: lifecycle assessment. In: THANKAPPAN, A.; THOMAS, S.; WANG, Y. (ed.). *Perovskite Photovoltaics*. 2. ed. London: Academic Press, 2025. cap. 19, p. 553–586. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-21983-2.00021-5>.

PURKAYASTHA, A. et al. Comparative life cycle assessment of bifacial and monofacial perovskite solar modules. *IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 2023.



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

RAVILLA, A. et al. Life cycle assessment of low-dimensional materials for perovskite photovoltaic cells. *Energy Advances*, v. 3, n. 4, p. 800–811, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1039/d3ya00540b>.

SOLER, D. et al. Environmental performance of a 1 MW photovoltaic plant in the Atacama Desert: A life cycle assessment study. *Solar Energy*, v. 292, p. 113454, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2025.113454>.

TRIVEDI, H. K.; MESHRAM, A.; GUPTA, R. Recycling of photovoltaic modules for recovery and repurposing of materials. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 11, n. 2, p. 109501, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109501>.

ZHANG, H.; PARK, N.-G. Towards sustainability with self-healing and recyclable perovskite solar cells. *eScience*, v. 2, n. 6, p. 567–572, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esci.2022.11.001>.

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 de Avaliação de Sustentabilidade e Energia*, v. 9, n. 6, p. 1–15, 2023. DOI: <https://doi.org/10.51891/rease.v9i6.10456> Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/003146162>. Acesso em: 20 out. 2025.