

Análise Comparativa do Ciclo de Vida Produtivo da Perovskita e do Silício Aplicados a Placas Fotovoltaicas em Caráter Sustentável

Comparative Analysis of the Production Life Cycle of Perovskite and Silicon Applied to Photovoltaic Panels in a Sustainability Character

Augusto Machado Pessoa, Mestrando, Universidade Federal de Juiz de Fora

augusto.machado@estudante.ufjf.br

Carlos Victor Rosa de Lima, Mestrando, Universidade Federal de Juiz de Fora

carlos.victor@estudante.ufjf.br

Lucas Façanha Mendes, Mestrando, Universidade Federal de Juiz de Fora

lucas.facanha@estudante.ufjf.br

Moisés Luiz Lagares Júnior, Doutor, Universidade Federal de Juiz de Fora

moises.lagares@ufjf.br

Paulo Miranda de Oliveira, Doutor, Universidade Federal de Juiz de Fora

paulo.miranda@ufjf.br

Número da sessão temática da submissão – [4]

Resumo

A transição energética global exige avaliações rigorosas sobre a sustentabilidade e o ciclo de vida das tecnologias fotovoltaicas. Assim, o artigo compara, através de 28 artigos selecionados, o ciclo de vida das tecnologias fotovoltaicas de silício e perovskita sob a ótica da sustentabilidade. Utilizando a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e dados de estudos publicados entre 2022 e 2025, analisa impactos ambientais, eficiência, durabilidade e reciclabilidade. O silício é eficiente e consolidado, mas demanda alta energia na produção e apresenta dificuldades no descarte. Já a perovskita é promissora, porém enfrenta problemas de estabilidade e toxicidade. O estudo aponta que ecodesign, reciclagem e uso de energias renováveis na fabricação podem reduzir a pegada de carbono. A escolha mais sustentável dependerá de avanços em reciclagem, menor impacto produtivo e maior durabilidade, destacando-se o potencial das células híbridas silício/perovskita para desempenho superior e menor impacto ambiental.

Palavras-chave: Avaliação do ciclo de vida; energia fotovoltaica; sustentabilidade.

Abstract

The article compares, through a systematic review, the life cycle of silicon and perovskite photovoltaic technologies from a sustainability perspective. Using the Life Cycle Assessment (LCA) methodology and data from studies published between 2022 and 2025, it analyzes environmental impacts, efficiency, durability, and recyclability. Silicon is efficient and well-established but requires high energy consumption during production and faces disposal challenges. Perovskite, while promising, still has issues related to stability and toxicity. The study indicates that eco-design, recycling, and the use of

renewable energy in manufacturing can significantly reduce the carbon footprint. The most sustainable choice will depend on advancements in recycling, lower production impacts, and improved durability, with hybrid silicon/perovskite cells showing potential for higher performance and reduced environmental impact.

Keywords: *Life cycle assessment; photovoltaic energy; sustainability.*

1. Introdução

A crescente demanda global por fontes de energia limpa e renovável tem impulsionado o avanço das tecnologias fotovoltaicas como alternativas viáveis e sustentáveis frente aos sistemas convencionais de geração de energia baseados em combustíveis fósseis. A energia solar fotovoltaica, em especial, tem sido protagonista nesse processo, sendo amplamente reconhecida por seu potencial de contribuição para a transição energética e a mitigação das mudanças climáticas. Nesse contexto, duas tecnologias se destacam: as células solares à base de silício, amplamente consolidadas no mercado, e as emergentes células de perovskita, que vêm ganhando atenção devido ao seu elevado potencial de eficiência e custo reduzido de produção (Yang et al., 2021).

Contudo, além do desempenho energético, é indispensável considerar os impactos ambientais associados ao ciclo de vida dessas tecnologias. A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), ou *Life Cycle Assessment* (LCA), é uma metodologia comumente adotada para mensurar os efeitos ambientais de produtos ou processos ao longo de todas as suas fases, desde a extração da matéria-prima até o descarte ou reciclagem (Shah et al., 2023). No caso das tecnologias fotovoltaicas, essa abordagem é essencial para avaliar os fatores ambientais associados à geração de energia limpa e os fatores de comprometimento ao longo da cadeia produtiva.

O silício, material base da maioria dos módulos fotovoltaicos comerciais, apresenta uma trajetória de maturidade tecnológica, no entanto, sua produção requer elevado consumo energético, especialmente nas etapas de purificação e cristalização, além do uso de substâncias tóxicas, durante o processamento (Diniz, 2023).

Em contraponto, as células solares de perovskita (PSCs) demonstram um potencial notável devido à sua alta eficiência de conversão de energia, apresentando vantagens como alta absorção de luz e facilidade de fabricação (Chen et al., 2021). No entanto, a perovskita ainda enfrenta desafios significativos, especialmente relacionados à estabilidade, ao uso de chumbo em sua formulação e à ausência de estratégias consolidadas de descarte ou reciclagem ao final de sua vida útil (Diniz, 2023).

A avaliação do ciclo de vida (ACV) de painéis de silício revela que, embora o impacto ambiental durante a operação seja mínimo, as fases de manufatura e, crucialmente, de descarte no final da vida útil (*end-of-life*) apresentam desafios significativos que precisam ser abordados para garantir a sustentabilidade completa da tecnologia (Choudhary; Srivastava, 2019). A comparação entre as duas tecnologias requer uma análise de caráter sistêmico e multidimensional. Nesse contexto, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) permite quantificar não apenas os impactos ambientais globais como o aquecimento global, a toxicidade e o uso de

recursos, mas também o ciclo energético, isto é, a energia incorporada em cada etapa de produção e operação dos módulos (Lima et al., 2019). Quando associada aos princípios do design sistêmico, essa abordagem amplia a compreensão sobre como as decisões relacionadas ao projeto e aos materiais repercutem em todo o sistema energético, ambiental e socioeconômico.

Diante do exposto, o presente artigo tem como objetivo geral analisar comparativamente o ciclo de vida dos materiais perovskita e silício em aplicações de placas fotovoltaicas resultando em uma avaliação comparativa através do design sistêmico e contribuir para o debate técnico e acadêmico sobre os caminhos mais sustentáveis para o futuro da energia solar, considerando as especificidades e os desafios tanto das tecnologias consolidadas quanto nas emergentes. Para atingir este propósito, estabelecem-se os seguintes objetivos específicos: (1) Levantar o nível de pesquisas relacionados a esses materiais; (2) Determinar os diferentes ciclos energéticos dentre as ACVs; e (3) Analisar a sustentabilidade de cada material e compará-los entre eles.

2. Metodologia

Este estudo se configura como uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL), focada em encontrar, examinar a fundo e reunir os dados científicos existentes sobre a Análise do Ciclo de Vida (ACV) e o caráter sustentável de duas importantes tecnologias fotovoltaicas: silício e perovskita. A metodologia rigorosa utilizada segue as orientações de Gil (2022), com adaptações do protocolo PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*). Esse método visa garantir que a escolha dos estudos para esta revisão seja clara e possa ser replicada.

O caminho metodológico adotado é apresentado na Figura 1, dividido em três etapas que se seguem e se complementam: Identificação, Seleção (ou Triagem) e Elegibilidade.

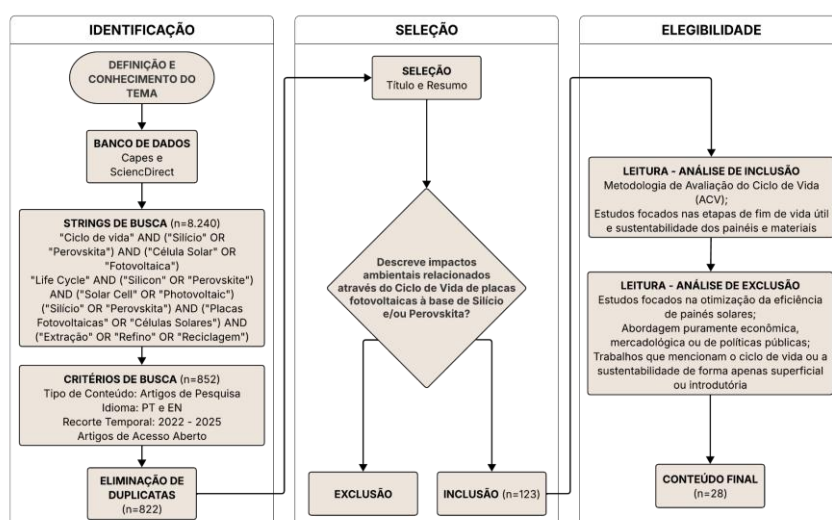


Figura 1: Fluxograma metodológico de pesquisa. Fonte: Autores (2025).

2.1. Identificação

Inicialmente, a pesquisa definiu precisamente o tema para, em seguida, buscar os devidos estudos sobre o mesmo. Os dados foram procurados em duas grandes fontes acadêmicas: o Portal de Periódicos da CAPES e o ScienceDirect. A escolha dessas fontes permitiu encontrar uma ampla gama de publicações, desde estudos científicos relevantes do Brasil e do exterior até pesquisas emergentes e menos citadas. Para identificar os artigos, foram utilizadas combinações de palavras-chave com os operadores "E" e "OU", ajustadas para cada base. Nos portais CAPES e ScienceDirect, as buscas foram realizadas em português e inglês com as seguintes combinações: "Ciclo de vida" E ("Silício" OU "Perovskita") E ("Célula Solar" OU "Fotovoltaica") e "*Life Cycle*" E ("*Silicon*" OU "*Perovskite*") E ("*Solar Cell*" OU "*Photovoltaic*").

Essa primeira busca, de escopo amplo, resultou em aproximadamente 8.240 publicações. Em seguida, foram aplicados filtros para refinar a seleção, considerando apenas Artigos de Pesquisa publicados entre 2022 e 2025 para abranger os trabalhos mais recentes da área. Os idiomas selecionados foram português e inglês. Adicionalmente, foi dada preferência a artigos de Acesso Aberto para garantir que todo o conteúdo referenciado fosse acessível e o processo, transparente e verificável. Com a aplicação desses critérios, obteve-se 852 artigos e, após a eliminação de duplicatas, o número foi reduzido para 822 artigos únicos.

2.2. Triagem

Posteriormente, os 822 artigos foram avaliados por meio da leitura de seus títulos e resumos. O objetivo principal desta etapa foi eliminar os artigos que não respondiam diretamente à pergunta de pesquisa: "Relata impactos ambientais relacionados através do Ciclo de Vida de placas fotovoltaicas à base de Silício e/ou Perovskita?". Esse processo resultou na exclusão de 699 trabalhos, restando 123 estudos para a análise subsequente.

Na fase final, os 123 artigos pré-selecionados foram analisados a fim de verificar a coerência geral da pesquisa. Para serem incluídos, os artigos precisavam atender a pelo menos um dos seguintes requisitos: adotar a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), em conformidade com as normas da ISO 14040, ou apresentar como foco primário a análise de etapas de fim de vida (como reciclagem e descarte) ou a sustentabilidade intrínseca dos materiais constituintes.

Foram excluídos os artigos de revisão que se enquadram em uma ou mais das seguintes situações: estudos cujo enfoque se restringia a otimizações de eficiência energética sem a devida análise de ciclo de vida; trabalhos de natureza estritamente econômica, regulatória ou de política pública; e publicações que abordavam os termos "sustentabilidade" ou "ciclo de vida" de maneira marginal ou incidental, sem aprofundamento analítico.

Após a aplicação desses critérios, 28 estudos foram considerados aptos para revisão e análise completa.

3. Resultados

Os 28 artigos selecionados através da metodologia foram organizados através de diferentes dados coletados, como demonstrado no Quadro 1.

Cada artigo foi categorizado nos seguintes três grupos temáticos:



Grupo 1: Impactos ambientais na fase de produção e fabricação

Grupo 2: Gestão de fim de vida e reciclagem de placas de perovskita e silício

Grupo 3: Análise comparativa de indicadores de sustentabilidade

No Quadro 1 também se organiza o tipo de material estudado e a relação do estudo.

Autor/Ano	Grupo Temático	Material estudado	Conteúdo da ACV relacionado
Alves e Branchini (2025)	Grupo 2	Silício	Descarte
Bhati e Nazeeruddin e Maréchal (2024)	Grupo 3	Perovskita	Impacto Ambiental
Brito e Santos e Shibao (2023)	Grupo 2	Silício	Descarte
Cardoso et al. (2024)	Grupo 1	Silício	Sustentabilidade
Costa e Camargo e Alves (2024)	Grupo 1	Silício	Impacto Ambiental
Devade et al. (2023)	Grupo 3	Nanomateriais	Inovação
Fontana et al. (2025)	Grupo 2 e 3	Silício	Inovação
Goldroudbary e Lundstrom e Wilson (2024)	Grupo 1	Silício	Custo Ambiental
Gressler et al. (2022)	Grupo 2	Perovskita	Pontos Críticos
Hottenhort e Viere (2024)	Grupo 1 e 2	Silício	Análise Abrangente
Hulst et al. (2025)	Grupo 2 e 3	Silício e Perovskita	Análise Abrangente
Kansal et al. (2024)	Grupo 1	Silício	Sustentabilidade
Lassio et al. (2022)	Grupo 1	Silício	Sistema de Rastreamento
Leda e Szala e Piaskeca (2024)	Grupo 2	Silício	Qualidade do Ecossistema
Maia e Varella (2022)	Grupo 2	Silício	Descarte
Mazzi et al. (2024)	Grupo 2	Silício	Sustentabilidade
McCalmont et al. (2023)	Grupo 2	Perovskita	Sustentabilidade

Autor/Ano	Grupo Temático	Material estudado	Conteúdo da ACV relacionado
Okoroafor et al. (2022)	Grupo 1 e 3	Perovskita	Produção
Pedroso e Santos e Pires (2023)	Grupo 2	Silício	Descarte
Pincelli e Hinkley e Brent (2024)	Grupo 2	Silício	Impacto Ambiental
Pivatto et al. (2024)	Grupo 1	Silício e Perovskita	Impacto Ambiental
Ravilla. et al. (2024)	Grupo 3	Silício	Análise Abrangente
Roffeis et al. (2024)	Grupo 3	Silício e Perovskita	Impacto Ambiental
Shah et al. (2023)	Grupo 2	Silício	Descarte
Singh et al. (2023a)	Grupo 2	Perovskita	Impacto Ambiental
Singh et al. (2023b)	Grupo 2 e 3	Perovskita	Impacto Ambiental
Singh e Dhar e Powar (2024)	Grupo 1	Silício	Sustentabilidade
Singh e Powar e Dhar. (2023)	Grupo 2	Silício	Análise Abrangente
Yin et al. (2022)	Grupo 1 e 3	Silício	Impacto Ambiental

Quadro 1: Categorização dos Artigos pela Avaliação do Ciclo de Vida. Fonte: Autores (2025).

Além disso, a fim de abranger a variedade de estudos, as pesquisas, como mostrado na Figura 2, receberam categorização segundo os limites do escopo (fronteiras do sistema) empregados, com prevalência das metodologias do berço ao portão (*cradle-to-gate*), centradas na produção, do berço ao túmulo (*cradle-to-grave*), as quais englobam as fases de consumo e descarte final, e berço ao berço (*cradle-to-cradle*), formando um processo cíclico com reciclagem após o descarte final.

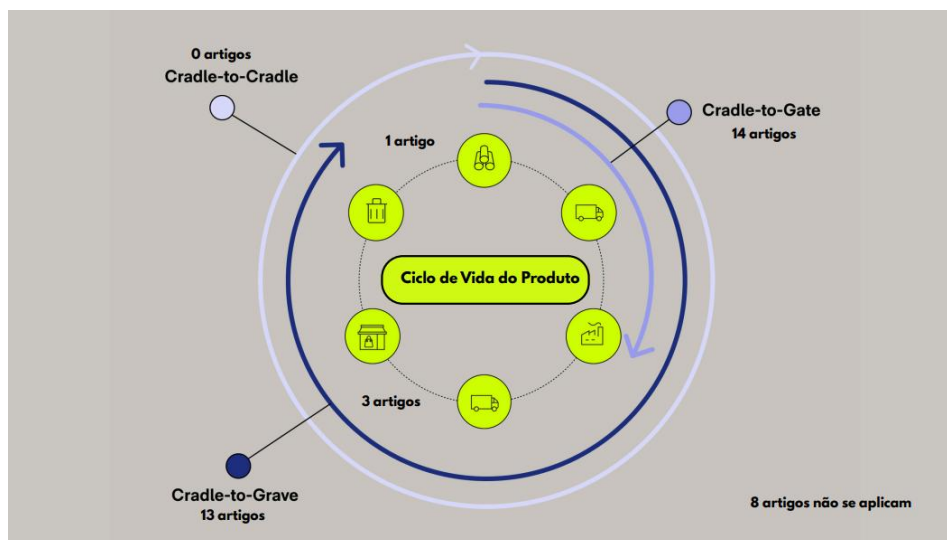


Figura 2: Categorização dos Artigos pela Avaliação do Ciclo de Vida. Fonte: Autores (2025).

Os dados exibidos na Figura 1 sugerem uma concentração significativa de pesquisas na etapa inicial, do berço ao portão (14 artigos), o que evidencia como a produção bibliográfica vigente dá preferência às consequências diretas da fabricação e do tratamento das matérias-primas. Essa tendência é consequência do estágio avançado da produção do silício e da necessidade urgente de otimizar procedimentos químicos usados na extração de sílica, conforme discutido por Costa et al. (2024). Contudo, a presença dos 13 artigos abordando o ciclo completo, do berço ao túmulo, sinaliza um amadurecimento na percepção da sustentabilidade fotovoltaica, admitindo que o ponto final, o descarte, representa atualmente um dos maiores gargalos ambientais da tecnologia.

Entretanto, a pouca quantidade de investigações do berço ao berço (1 artigo) é notável. Essa lacuna sugere que, mesmo com a economia circular defendida em teoria como essencial para administrar os 'resíduos solares' (Brito et al., 2023), a aplicação real e a criação de modelos de ciclos fechados de reciclagem de materiais como a perovskita permanecem em fases iniciais. A predominância das análises concentradas no 'berço ao portão' sugere a necessidade do setor migrar para avaliações mais amplas, contemplando a recuperação de metais preciosos como a prata e o silício refinado, reduzindo os perigos de toxicidade no fim da vida útil dos módulos (Hulst et al., 2024; Mazzi et al., 2024).

4. Análise e Discussão

A transição para fontes de energia renováveis exige mais do que apenas a adoção de tecnologias limpas, demanda um olhar criterioso por todo o seu ciclo de vida. No caso da energia solar fotovoltaica, a sustentabilidade está diretamente vinculada não apenas ao desempenho durante a operação, mas também às estratégias adotadas nas etapas de produção, manutenção e destinação final dos módulos.

4.1. Impactos ambientais na fase de produção e fabricação

Aprimorar a produção e o conceito ecológico são vitais para a perenidade do segmento. A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) em tecnologias de silício (mono-Si, poli-Si, PERC) e películas finas (CIGS, CdTe) aponta a confecção dos painéis como a principal fonte de danos ecológicos, dado o consumo energético elevado (Singh et al., 2024; Hottenroth; Viere, 2024). Películas finas como CdTe demonstram menor efeito, embora o aperfeiçoamento dos processos diminua a disparidade entre os tipos de tecnologia (Hottenroth; Viere, 2024). A incorporação de fontes renováveis na montagem e melhorias no desenho suavizam a pegada carbônica (Singh et al., 2024).

Golroudbary et al. (2024) contrastam os percursos do silício entre China e EUA, projetando elevação no uso de energia e água na China para produzir MG-Si, SoG-Si e células até 2030, mesmo com o avanço da eficácia técnica. O processamento do SoG-Si requer mais energia que o MG-Si. O encargo ambiental anual declina após 2021, mas o prejuízo total cresce devido ao volume fabricado. Gases de Efeito Estufa (GEE), SO_x e NO_x são os mais emitidos na fase de fabricação, com ônus maior na China, o que exige uma matriz elétrica mais limpa (Golroudbary et al., 2024).

Lassio et al. (2022) compararam sistemas multi-Si fixos e os que utilizam rastreador (SATS) no território brasileiro. O arranjo da central impacta diretamente no desempenho ambiental por quilowatt-hora gerado. O rastreador, apesar de exigir mais dispêndio energético inicial, reduz em 17% o prejuízo ecológico médio (aquecimento global, uso do solo, água) graças à maior produtividade elétrica. A confecção dos painéis origina mais de 95% dos GEE liberados. A montagem local diminuiria as emissões de GEE em 1,5%, mas elevaria a demanda hídrica em quase 1,0% (Lassio et al., 2022).

Cardoso et al. (2024) enfatizam a dependência de métodos que consomem muita energia e utilizam substâncias tóxicas, propondo a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para diminuir os "pontos críticos". Pivatto et al. (2024) identificam a fase de refino do silício como o principal ponto crítico (50% da energia acumulada), demandando um planejamento focado em encurtar o Tempo de Retorno de Energia (TRE). Costa et al. (2024) corroboram que a extração/purificação da sílica e o emprego de químicos (como ácido fluorídrico e cádmio) requerem uma produção mais limpa e um exame completo do ciclo de vida.

Em relação às tecnologias que estão surgindo, Okoroafor et al. (2022) demonstram que células de perovskita (PSCs) fabricadas por impressão a jato de tinta reduzem o Potencial de Aquecimento Global (GWP) e a Demanda de Energia Cumulativa (CED) quando comparadas à técnica de *spin-coating*, eliminando a necessidade de solventes nocivos. Kansal et al. (2024) indicam que a criação sustentável (usando solventes amigáveis e dispensando chumbo) diminui o consumo de energia (em 25%), os resíduos (em 20%) e as emissões de CO₂ (em 30%) sem prejudicar a performance.

4.2. Gestão de fim de vida e reciclagem de placas de perovskita e silício

Com uma longevidade estimada de 25 a 30 anos, a administração de painéis fotovoltaicos atenua prejuízos e possibilita a recuperação de componentes (McCalmont et al., 2023). Reciclar silício cristalino (c-Si) e telureto de cádmio (CdTe) traz benefícios ambientais ao resgatar alumínio, cobre, prata e silício. A obtenção de materiais das perovskitas mostra-se

economicamente viável, diminuindo o volume de lixo (McCalmont et al., 2023; Singh et al., 2023a). Brito, Santos e Shibao (2023) defendem que a economia circular é essencial para gerenciar o entulho solar (período de 2012 a 2020), transformando problemas ecológicos em fontes de matéria-prima.

A ausência de planejamento adequado para o descarte final eleva os perigos de resíduos contaminantes, necessitando de diretrizes de logística reversa no território brasileiro (Pedroso et al., 2023). Maia e Varella (2022) calculam que reaproveitar painéis c-Si (com durabilidade de aproximadamente 25 anos) economiza 43 quilowatts-hora por unidade frente à obtenção de matéria-prima virgem, fomentando a Economia Circular. Leda et al. (2024) apontam que os painéis feitos de silício provocam o maior efeito na Avaliação do Ciclo de Vida; a recuperação após o uso atenua as liberações tóxicas, sendo necessária regulamentação para impedir o acúmulo em aterros até 2050.

Gressler et al. (2022) examinam materiais inovadores (como a perovskita), enfatizando "fases críticas" durante a fabricação e o encerramento do ciclo de vida por causa dos metais pesados presentes. Eles advogam pelo reprocessamento para permitir o uso em larga escala. O desenho ecológico reduz os efeitos ambientais por meio da escolha dos componentes e simplifica a separação das peças (Hottenroth; Viere, 2024). Pesquisas realizadas no Paquistão (Shah et al., 2023) e na Nova Zelândia (Pincelli, 2024) confirmam que o Tempo de Retorno Energético do sistema fotovoltaico é bem menor que sua vida útil.

Fontana et al. (2024) advertem que a nanotecnologia complica o processo de reciclagem, forçando a criação de novas metodologias e regulamentações. Hulst et al. (2024) modelaram a reciclagem de painéis híbridos silício/perovskita em cascata: a reutilização de prata e silício atenua a toxicidade, mas gera um custo ambiental. A renovação de painéis baseados em perovskita é crucial devido à sua durabilidade reduzida, o que exige um projeto focado na reutilização (Hulst et al., 2024).

Alves e Branchini (2025) debatem a logística reversa no contexto brasileiro: o descarte precoce em lixões acarreta desperdício de recursos e liberação de gases de efeito estufa. As alternativas incluem esquemas de devolução e a instalação de centros de reciclagem. O montante mundial de lixo pode chegar a 78 milhões de toneladas até 2050 (Singh et al., 2023b). Métodos térmicos e hidrometalúrgicos possibilitam a recuperação de materiais de alto grau de pureza, abrindo caminhos econômicos na transição para a circularidade (Mazzi et al., 2024).

4.3. Análise comparativa de indicadores de sustentabilidade

Yin et al. (2022) fizeram um estudo comparativo entre os painéis solares PERC, um do tipo P monocristalino e outro policristalino. A versão mono-Si libera dez por cento a mais de carbono ao longo de sua existência, por conta da energia gasta no fabrico dos blocos. O arranjo policristalino (com potência de 1 MWp) demonstra uma marca inferior (vinte vírgula cinquenta e três gramas comparado a vinte e dois vírgula setenta e três gramas de CO₂ por quilowatt-hora) e um tempo de retorno energético (EPBT) mais curto (um vírgula zero sete contra um vírgula dezoito anos), sendo, portanto, mais vantajoso ecologicamente segundo a avaliação.

Okoroafor et al. (2022) examinaram películas finas (a-Si, CIGS, CdTe, GaAs) e as tecnologias em desenvolvimento (PSC, OPV). Via de regra, as películas finas necessitam de menos eletricidade (um CED menor) e um Potencial de Aquecimento Global (GWP) reduzido se comparadas ao silício cristalino (c-Si), mas o EPBT delas pode ser maior. As OPV e as CZTS se sobressaem no aspecto ambiental; o GaAs apresenta um custo energético superior. Espera-se um avanço das inovações de terceira geração até o ano de 2030.

As células feitas de perovskita alcançam a mesma performance do silício com despesas menores, porém lidam com problemas relacionados à durabilidade e à presença de elementos nocivos como o chumbo (Bhati et al., 2024). Roffeis et al. (2022) investigam as células duplas de perovskita/silício (PST): os passos extras elevados o ônus da fabricação em sete por cento em contraste com as junções heteropolares (SHJ), mas a maior eficiência melhora a performance ambiental por kWh em seis a dezoito por cento. Hulst et al. (2024) confirmam que os módulos duplos terão um impacto reduzido (oito a dez gramas de CO₂-equivalente por quilowatt-hora em 2050) em comparação ao silício (onze a treze gramas), contanto que a queda anual de desempenho seja menor que 1-3%.

A pesquisa de Singh et al. (2023b) estabeleceu um paralelo entre os painéis de perovskita com carbono (CPSMs) e os de silício mono-cristalino. Para que os CPSMs atinjam o mesmo impacto de aquecimento global do silício (de 25 anos), eles necessitam de um tempo de operação de 11 a 16 anos, contudo, apresentam menor perigo à saúde humana. Fontana et al. (2024) mencionam os pontos quânticos com uma eficácia máxima teórica de 66%, todavia, alertam sobre os riscos tóxicos inerentes ao CdTe. Materiais em escala nanométrica, como grafeno e prata, elevam o desempenho (Devade et al., 2024), ao passo que a aplicação da nanotecnologia ecológica diminui a emissão de carbono e amplia as fontes de energia disponíveis (Ravilla, 2024).

5. Conclusão

Os resultados demonstram que, embora o silício seja uma tecnologia consolidada e eficiente, sua produção demanda um alto consumo energético e apresenta desafios significativos no descarte ao final da vida útil. A acumulação de resíduos de painéis fotovoltaicos de silício representa uma preocupação crescente, exigindo soluções robustas para reciclagem e revalorização de materiais, bem como políticas públicas eficazes para incentivar a economia circular. Por outro lado, as células de perovskita surgem como uma alternativa promissora, com alto potencial de eficiência e menor custo de fabricação. No entanto, ainda enfrentam desafios relacionados à estabilidade, à presença de chumbo em sua composição e à ausência de estratégias consolidadas de descarte e reciclagem. A pesquisa acadêmica avança rapidamente, mas a implementação de rotas seguras de produção e reaproveitamento é crucial para garantir o desempenho ambiental da perovskita em escala comercial.

A análise comparativa ressalta a importância da otimização da performance ambiental na produção de células fotovoltaicas. A fase de fabricação dos módulos é a maior contribuinte para os impactos ambientais em ambas as tecnologias, principalmente devido ao consumo intensivo de energia. A adoção de energias renováveis na fabricação e o desenvolvimento de

processos mais limpos são essenciais para reduzir a pegada de carbono da indústria fotovoltaica.

Em suma, a escolha da tecnologia fotovoltaica mais sustentável dependerá de avanços contínuos em reciclagem, redução do impacto produtivo e melhoria da durabilidade. As células híbridas silício/perovskita se destacam como uma solução com potencial para oferecer desempenho superior e menor impacto ambiental, combinando as vantagens de ambas as tecnologias. O futuro da energia solar reside na busca por um equilíbrio entre eficiência técnica e responsabilidade ambiental, impulsionando a inovação e a implementação de práticas que promovam a sustentabilidade em todo o ciclo de vida das placas fotovoltaicas.

6. Agradecimentos

Agradecemos à Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) pelo suporte e infraestrutura disponibilizada para a realização deste estudo. Além disso, o presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Referências

- ALVES, A; BRANCHINI, L. Placas fotovoltaicas: um futuro brilhante com um pós-vida sombrio. GVCasos - Revista Brasileira de Casos de Ensino em Administração, v. 15, n. 1, p. 1-10, jan./jun. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.12660/gvcasosv15n1cr1>.
- BHATI, N; NAZEERUDDIN, M; MARÉCHAL, F. Environmental impacts as the key objectives for perovskite solar cells optimization. Energy, v. 299, p. 131492–131492, 1 jul. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131492>.
- BRITO, J; SANTOS, M; SHIBAO, F. Gestão e valorização de resíduos de sistemas de geração de energia fotovoltaica. Contemporânea - Contemporary Journal, v. 3, n. 9, p. 16062-16083, 2023. Disponível em: 10.56083/RCV3N9-136.
- CARDOSO, P. et al. (2024). Paradigmas da sustentabilidade ambiental na geração de energia fotovoltaica. DELOS: Desarrollo Local Sostenible, 17(52), 01-23. Disponível em: <https://doi.org/10.55905/rdelosv17.n52-002>.
- COSTA, H; CAMARGO, P; ALVES, F. (2024). Impactos ambientais causados pelo ciclo de vida de painéis fotovoltaicos. Forscience, 11(1), e1210. Disponível em: <https://doi.org/10.29069/forscience.2023v11n1.e1210>.
- CHEN, B., FEI, C., CHEN, S. et al. Recycling lead and transparent conductors from perovskite solar modules. Nat Commun 12, 5859 (2021). Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26121-1>.
- CHOUDHARY, P.; SRIVASTAVA, R. K. Sustainability perspectives: a review for solar photovoltaic trends and growth opportunities. Journal of Cleaner Production, v. 227, p. 589–612, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.107>. Acesso em: 15 jul. 2025.

DEVADE et al. Green Nanotechnology Based Sustainable Energy Solutions and Environmental Impacts. E3S Web of Conferences, v. 511, p. 01031–01031, 1 jan. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202451101031>.

DINIZ, M. A. P. Avaliação do Ciclo de Vida como ferramenta de apoio ao design sustentável: estudo de caso em painéis solares fotovoltaicos. 2023. TCC (Graduação em Engenharia de Energia) — Universidade Federal de Itajubá.

FONTANA, T. et al. Nanotecnologia e os desafios das fotocélulas: eficiência, descarte e impacto ambiental. *Disciplinarum Scientia. Série: Naturais e Tecnológicas*, Santa Maria, v. 25, n. 3, p. 173-188, 2024. Disponível em: doi.org/10.37779/nt.v25i3.5233.

GIL, A. C. Como elaborar projetos de pesquisa. 7. ed. São Paulo, SP: Atlas, 2022.

GOLROUDBARY, S. R.; LUNDSTRÖM, M.; WILSON, B. P. Analogical environmental cost assessment of silicon flows used in solar panels by the US and China. *Scientific Reports*, v. 14, n. 9538, p. 1-12, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-60270-9>.

GRESSLER, S. et al. Advanced materials for emerging photovoltaic systems – Environmental hotspots in the production and end-of-life phase of organic, dye-sensitized, perovskite, and quantum dots solar cells. *Sustainable Materials and Technologies*, [S.l.], v. 34, e00501, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2022.e00501>.

HOTTENROTH, H.; VIERE, T. Comparative life cycle assessment of photovoltaic systems: An evaluation of environmental impacts over time. *Procedia CIRP*, v. 122, p. 79–84, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.02.005>.

HULST, M. K. et al. Comparing Environmental Impacts of Single-Junction Silicon and Silicon/Perovskite Tandem Photovoltaics—A Prospective Life Cycle Assessment. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, v. 12, p. 8860-8870, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.4c01952>.

KANSAL, L. et al. (2024). Sustainable Synthesis of Perovskite Solar Cells Using Green Materials. E3S Web of Conferences, 537, 07016. Disponível em: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202453707016>

LASSIO, J. G. et al. Environmental life cycle-based analysis of fixed and single-axis tracking systems for photovoltaic power plants: A case study in Brazil. *Cleaner Engineering and Technology*, v. 11, n. 100586, p. 1-10, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100586>.

LEDA, P; SZALA, G; PIASECKA, I. Assessment of the Influence of the Life Cycle of Solar Power Plant Materials and Components on Ecosystem Quality. *Materials*, [S.l.], v. 17, n. 24, p. 6028, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma17246028>. Acesso em: 7 ago. 2025.

LIMA, A. M. P. et al. Integral ecology approach to life cycle assessment of solar arrays. *Ecological Indicators*, v. 103, p. 665–679, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.04.039>. Acesso em: 15 jul. 2025.

- MAIA, A; VARELLA, F. Potencial de conservação de energia a partir do descarte de módulos fotovoltaicos no Brasil. *Revista Eletrônica de Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica*, [S.l.], v. 4, n. 1, p. 66–76, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.21708/issn27635325.v4n1.a11149.2022>.
- MAZZI, A. et al. Life cycle assessment of Al-Cu-Ag-Si recycling process from photovoltaic waste. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 211, p. 107885, dez. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107885>.
- MCCALMONT, E. et al. Life cycle cost assessment of material recovery from perovskite solar cells. *MRS Advances*, 15 mar. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1557/s43580-023-00542-0>.
- OKOROAFOR, T. et al. (2022). Life cycle assessment of inkjet printed perovskite solar cells. *Journal of Cleaner Production*, 373, 133665. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133665>
- PEDROSO, R. et al. Um futuro problema com o descarte de painéis solares. In: *CONSTRUÇÃO CIVIL: ENGENHARIA E INOVAÇÃO – VOL. 5*. Rio de Janeiro: Editora Eptaya, 2023. cap. 14, p. 204–210. ISBN: 978-65-87809-72-4.
- PINCELLI, I; HINKLEY, J; BRENT, A. Carbon, materials and energy footprint of a utility-scale solar plant in Aotearoa New Zealand. *Solar energy*, v. 273, p. 112535–112535, 1 maio 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112535>.
- PIVATTO, M. et al. (2024). Estado da arte de indicadores ambientais do ciclo de vida da energia solar fotovoltaica: energia embutida e tempo de retorno da energia. *X Congresso Brasileiro de Energia Solar*, Natal.
- RAVILLA, A. et al. Life Cycle Assessment of Low-Dimensional Materials for Perovskite Photovoltaic Cells. *Energy Advances*, 1 jan. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/d3ya00540b>.
- ROFFEIS, M. et al. New insights into the environmental performance of perovskite-on-silicon tandem solar cells – a life cycle assessment of industrially manufactured modules. *Sustainable Energy & Fuels*, [S.l.], v. 6, p. 2924–2940, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/d2se00096b>. Acesso em: 7 ago. 2025.
- SINGH, S. et al. Reduced global warming potential in carbon-based perovskite solar modules: Cradle-to-gate life cycle analysis. *Journal of Cleaner Production*, [S.l.], v. 426, 139136, 2023a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139136>. Acesso em: 7 ago. 2025.
- SINGH, S; POWAR, S; DHAR, A. End of life management of crystalline silicon and cadmium telluride photovoltaic modules utilising life cycle assessment. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 197, p. 107097–107097, 1 out. 2023b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107097>.
- SINGH, S; DHAR, A; POWAR, S. Perspectives on life cycle analysis of solar technologies with emphasis on production in India. *Journal of Environmental Management*, v. 366, p.

121755–121755, 1 ago. 2024. Disponível em:
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121755>.

SHAH, H. et al. Environmental Life Cycle Analysis and Energy Payback Period Evaluation of Solar PV Systems: The Case of Pakistan. *Energies*, v. 16, n. 17, p. 6400, 1 jan. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en16176400>.

YANG, Z. et al. Life cycle energy use and environmental implications of perovskite photovoltaic systems. *Nature Communications*, v. 12, art. 6148, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26121-1>. Acesso em: 15 jul. 2025.

YIN, A. et al. Carbon emission analysis of two crystalline silicon components throughout the life cycle. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, v. 983, n. 012111, p. 1-11, 2022. Disponível em: [10.1088/1755-1315/983/1/012111](https://doi.org/10.1088/1755-1315/983/1/012111).