



RELISE

DESCARTE E RECICLAGEM DE PEROVSKITAS COM CHUMBO: UM OLHAR AMBIENTAL SOBRE A SUSTENTABILIDADE FOTOVOLTAICA¹

DISPOSAL AND RECYCLING OF LEADED PEROVSKITES: AN ENVIRONMENTAL LOOK AT PHOTOVOLTAIC SUSTAINABILITY

Gabriel Souza de Paula Oliveira² Lucas Lopes da Silva³

Lucas Souza da Silva⁴ Moacir Porto Ferreira⁵

RESUMO

O presente estudo analisa a relevância das células solares de perovskita com chumbo como materiais fotovoltaicos emergentes e os desafios associados, com foco especial no descarte de chumbo. A pesquisa destaca que, embora promissoras para a sustentabilidade fotovoltaica, a utilização desses materiais levanta preocupações significativas sobre a poluição por metais pesados. A metodologia, baseada em revisão de literatura e análise de dados, aponta a importância da reciclagem de materiais fotovoltaicos como solução estratégica. Análises de ciclo de vida demonstram que a reciclagem pode reduzir drasticamente o esgotamento de recursos e a toxicidade humana. Conclui-se que a gestão eficaz do fim da vida útil desses dispositivos, apoiada por regulamentações e tecnologias de reciclagem eficientes, é crucial para mitigar os riscos ambientais e alinhar a inovação tecnológica com a responsabilidade ambiental no setor.

Palavras-chave: perovskita com chumbo, descarte de chumbo, materiais fotovoltaicos emergentes, reciclagem de materiais fotovoltaicos, poluição por metais pesados.

ABSTRACT

This study analyzes the significance of lead-based perovskite solar cells as emerging photovoltaic materials and their associated challenges, with a particular

¹ Recebido em 27/06/2025. Aprovado em 16/07/2025. DOI: doi.org/10.5281/zenodo.22729217

² Universidade Federal do Rio de Janeiro. gabrielsouza.20222@poli.ufrj.br

³ Universidade Federal do Rio de Janeiro. lucaslopesrj.20222@poli.ufrj.br

⁴ Universidade Federal do Rio de Janeiro. lucas.souza.20222@poli.ufrj.br

⁵ Universidade Federal do Rio de Janeiro. moacir.ferreira@poli.ufrj.br



RELISE

focus on lead disposal. The research highlights that while these materials are promising for photovoltaic sustainability, their use raises significant concerns regarding heavy metal pollution. The methodology, based on a literature review and data analysis, underscores the importance of recycling photovoltaic materials as a strategic solution. Life cycle analyses demonstrate that recycling can drastically reduce resource depletion and human toxicity. It is concluded that effective end-of-life management for these devices, supported by regulations and efficient recycling technologies, is crucial for mitigating environmental risks and aligning technological innovation with environmental responsibility in the sector.

Keywords: lead-based perovskite, emerging photovoltaic materials, lead disposal, heavy metal pollution, recycling photovoltaic materials.

INTRODUÇÃO

O avanço das células solares de perovskita à base de chumbo as posicionou como candidatas para tecnologias fotovoltaicas de próxima geração devido à sua alta eficiência e baixos custos de produção. No entanto, a presença de chumbo tóxico nesses dispositivos levanta preocupações ambientais e de saúde significativas, especialmente no que diz respeito ao seu descarte ao final de sua vida útil. O manuseio inadequado pode resultar na lixiviação de chumbo para o meio ambiente, representando riscos aos ecossistemas e à saúde humana, visto que o chumbo das perovskitas pode entrar na cadeia alimentar de forma mais eficiente do que outras fontes de contaminação por chumbo (Torrence et al., 2022; Li et al., 2020).

Para enfrentar esses desafios, pesquisas recentes têm se concentrado no desenvolvimento de métodos sustentáveis de reciclagem e descarte que permitam a recuperação e a reutilização de chumbo e outros materiais valiosos, minimizando o impacto ambiental e cumprindo as regulamentações de resíduos eletrônicos (Binek et al., 2016; Chen et al., 2021; Chhillar et al., 2019; Khac et al., 2024; Schmidt et al., 2023; Yazawa et al., 2024). Esses esforços incluem técnicas inovadoras de remoção camada por camada, recuperação de resina de troca iônica e processos de extração sem solventes, todos visando reduzir o



RELISE

desperdício de chumbo e apoiar a comercialização segura da tecnologia de células solares de perovskita.

Ao longo da pesquisa, serão analisadas alternativas de encapsulamento seguro, métodos emergentes de reciclagem e políticas públicas voltadas ao tratamento adequado desses resíduos — conforme discutido por Ustulin (2024) em sua análise do cenário legislativo nacional e internacional. Além disso, será realizada uma reflexão crítica sobre o papel do engenheiro eletricista na construção de soluções energéticas sustentáveis, integrando inovação tecnológica e responsabilidade ambiental.

A presente pesquisa tem como objetivo central analisar os desafios e oportunidades associados ao descarte e à reciclagem de perovskitas contendo chumbo, à luz das exigências ambientais e dos princípios da sustentabilidade fotovoltaica.

Para tanto, examina-se o papel dessas perovskitas no avanço da energia solar, destacando suas propriedades estruturais, ópticas e eletrônicas, e refletindo sobre como tais características impactam sua viabilidade comercial e seu potencial de risco ambiental.

Por fim, propõe-se contribuir com uma análise crítica acerca da seguinte indagação: “De que maneira o setor elétrico pode contribuir para o desenvolvimento de processos seguros de descarte e reciclagem das perovskitas contendo chumbo?”, de maneira a auxiliar na construção de soluções viáveis, responsáveis e alinhadas aos princípios éticos da engenharia elétrica contemporânea.

REFERENCIAL TEÓRICO

Com o objetivo de compreender os principais desafios ambientais associados às células solares de perovskita, especialmente no que diz respeito ao descarte de compostos contendo chumbo, esta seção apresenta uma revisão



RELISE

da literatura científica focada nas soluções tecnológicas propostas para recuperação e reciclagem desses materiais. Partindo da compreensão do papel das perovskitas no desenvolvimento da energia solar, discute-se como suas propriedades estruturais e funcionais contribuem tanto para sua eficiência quanto para os riscos ambientais. Além disso, analisam-se os fatores que influenciam a viabilidade de implementação dessas soluções, incluindo incentivos estatais, disponibilidade de matéria-prima e impactos no mercado fotovoltaico já estabelecido, consolidando assim o estado da arte sobre o tema.

Células solares de perovskita: funcionamento, vantagens e desafios

Nos últimos anos, as células solares à base de perovskitas que utilizam haleto de chumbo orgânico-inorgânico vêm atraindo a atenção mundial devido à impressionante eficiência de conversão de energia (PCE) e à fabricação processável em solução em baixa temperatura (Zhang, 2023). Com fatores impactantes como esses, torna-se visível que previsões feitas na década passada (em relação à garantia de um futuro uso em larga escala da energia fotovoltaica), possuem grande potencial de se concretizar, se implementadas. Dados recentes demonstram que ainda há um longo caminho a se percorrer, visto que, atualmente, a energia fotovoltaica representa cerca de 4 a 5% da geração total de eletricidade no mundo que, embora represente um aumento significativo em relação aos anos anteriores, ainda representa uma pequena parcela da matriz energética global. (Green, 2014; Haegel, 2023).

Embora não implementado de maneira extensa, o crescimento acelerado das células solares de perovskita (doravante CSP) está intimamente relacionado às suas propriedades físico-químicas únicas. Isso se deve, de acordo com a pesquisa desenvolvida por Casarin (2024), não apenas por conta de sua composição original, mas sim da capacidade dessa ser replicada sinteticamente com diferentes combinações de elementos, o que permite



RELISE

inúmeras aplicações tecnológicas, fotovoltaica inclusive.

De um ponto de vista estrutural, os materiais de perovskita utilizados nas CSPs seguem a fórmula geral ABX_3 , onde A é um cátion orgânico pequeno como Formamidínio (FA^+) ou um cátion inorgânico grande como Césio(Cs^+), B é um cátion bivalente, geralmente chumbo (Pb^{2+}) ou estanho (Sn^{2+}), e X representa um haleto (I^- , Br^- ou Cl^-) (Zhang, 2023; Jena, 2019; Zhao, Tan, 2020). Essa estrutura confere ao material excelentes propriedades optoeletrônicas (estudo de dispositivos que geram ou detectam a luz), como alto coeficiente de absorção, longa difusão de portadores e baixa densidade de defeitos (Green, 2014; Jena, 2019). Conforme Teixeira (2023), a simples presença de chumbo nessa estrutura confere alta eficiência de conversão de energia, que ultrapassam atualmente 25% em laboratórios, número que está entre os mais elevados para tecnologias fotovoltaicas emergentes.

Do ponto de vista da engenharia de aparelhos, as CSPs podem ser arrumadas em variadas estruturas, sendo as mais comuns a n-i-p (positivo tradicional) e a p-i-n (inverso). Ambos são formados basicamente por três partes que trabalham juntas: (i) uma camada que move elétrons (ETL), (ii) a parte ativa de perovskita, responsável por absorver luz e criar pares elétrons-buraco e (iii) uma camada que transporta buracos (HTL) (Zhao, Tan, 2020; Jena, 2019), exemplificando como as perovskitas estão presentes em células solares.

Além disso, os processos de transporte de carga dentro desses aparelhos estão muito ligados à qualidade cristalina da perovskita e às propriedades das interfaces. As formas de recombinação, sejam elas radioativas, não radioativas ou interfaciais, limitam diretamente a eficiência quântica dos aparelhos (Correa-Baena, 2017; Tress, 2017).

Entretanto, apesar da existência de avanços expressivos nas eficiências laboratoriais — que, conforme será discutido mais a frente em demais tópicos, já ultrapassam os 27,8% em células de perovskita *single-junction* (utilizam uma



RELISE

única camada de material semicondutor para absorver a luz e gerar eletricidade) e 34.9% em dispositivos *tandem* (perovskita-silício) (NREL, 2025) —, desafios relacionados à estabilidade térmica, fotodegradação, sensibilidade à umidade e à presença de metais tóxicos, como o chumbo, ainda representam barreiras significativas para a consolidação dessa tecnologia em escala comercial (Jena, 2019; Tress, 2017; Zhao, Tan, 2020).

Em tese, a perovskita é um material revolucionário que combina alta performance, baixo custo de produção e flexibilidade de aplicação, mas que exige cautela quanto à sua durabilidade e ao impacto ambiental, principalmente em razão do uso de metais pesados como o chumbo. Esses fatores tornam essencial o desenvolvimento de estratégias de encapsulamento, reciclagem e substituição do chumbo por elementos menos nocivos à saúde e ao meio ambiente (Silva, 2016).

Formação do filme de perovskita

A formação do filme de perovskita é uma etapa fundamental na fabricação de células solares baseadas nesse material, influenciando diretamente no desempenho, na estabilidade e na eficiência do dispositivo fotovoltaico. Essa condiz com um processo que envolve a deposição controlada de uma camada fina do composto perovskita sobre um substrato condutor, formando uma película uniforme e cristalina capaz de absorver luz solar e gerar corrente elétrica (Cruz; Isidoro; Fernandes, 2020).

Para Ustulin (2024), o sucesso na formação do filme de perovskita depende de diversos fatores físico-químicos, como a escolha do precursor, o método de deposição, a taxa de evaporação do solvente, a temperatura de cristalização e o controle de umidade. Os precursores geralmente utilizados são iodeto de chumbo (PbI_2) combinado com cátions orgânicos em solventes como dimetilformamida (DMF), dimetilsulfóxido (DMSO) ou uma combinação de



RELISE

ambos.

De acordo com Yin (2023), a solução apresentada anteriormente precursora é então depositada sobre o substrato, e o filme se forma à medida que os solventes evaporam e os cristais se organizam em estrutura perovskítica.

O processo de formação do filme de perovskita é um equilíbrio complexo entre química dos materiais, engenharia de processos e controle ambiental, sendo determinante não apenas para o desempenho das células solares, mas também para sua durabilidade e impacto ambiental. Investimentos em pesquisa e desenvolvimento voltados à melhoria desse processo são indispensáveis para tornar essa tecnologia não apenas eficiente, mas também sustentável e segura para aplicação em larga escala (Machado; Miranda, 2015).

Aspectos tecnológicos das perovskitas no contexto fotovoltaico

No estudo desenvolvido por Casarin (2024), a tecnologia da perovskita em células solares tem se consolidado como uma das mais promissoras inovações no campo da energia renovável, especialmente no setor fotovoltaico, que se baseia no uso de compostos com estrutura cristalina do tipo perovskita que, assim como abordado no estudo de Green (cf. p. 4), possuem propriedades optoeletrônicas excepcionais, de forma a impulsionar um novo arquétipo na forma de captar e converter energia solar.

No entanto, é pertinente mensurar que a tecnologia ainda enfrenta desafios consideráveis, o primeiro diz respeito à estabilidade das células solares de perovskita, o material é sensível à umidade, à exposição prolongada à luz UV e à temperatura elevada, fatores que contribuem para sua degradação ao longo do tempo (Casarin, 2024). Nesse viés, soluções como o encapsulamento eficiente, a modificação da composição química e o uso de aditivos estabilizantes têm sido adotadas com sucesso parcial, mas ainda não atingem plenamente os requisitos de durabilidade para aplicações comerciais de longo prazo (Teixeira,



RELISE

2023).

Outro ponto crítico é o uso de chumbo, um metal tóxico, como componente principal da maioria das formulações de perovskita, apesar da quantidade empregada por célula ser pequena, a possibilidade de vazamento durante o uso, transporte ou descarte representa um risco ambiental, por isso, a pesquisa busca ativamente alternativas menos tóxicas, como o uso de estanho, bismuto ou antimônio, no entanto, até o momento, essas alternativas ainda não demonstraram a mesma eficiência ou estabilidade das células com chumbo (Pinto, 2022), dado que essas substituições geralmente reduzem a vida útil do dispositivo e apresentam dificuldades na síntese e no controle da qualidade do filme de perovskita (Hao et al., 2014).

Impactos do descarte indevido

As CSPs, de acordo com dados obtidos no gráfico do laboratório NREL (cf. p. 5), representam uma tecnologia emergente e promissora para a produção de energia renovável, devido à sua alta eficiência e potencial para baixos custos de fabricação, especialmente através de métodos de processamento em solução (Schmidt et al., 2023). Melhorias significativas na eficiência de conversão de energia, pavimentaram o caminho para a comercialização desta tecnologia (Torrence et al., 2023). No entanto, a maioria das CSPs mais eficientes depende criticamente do uso de chumbo (Pb) (Schmidt et al., 2023).

Embora alternativas de metais como Sn e composições sem chumbo (por exemplo, perovskitas duplas como $\text{Cs}_2\text{AgBiBr}_6$) estejam sendo consideradas, elas geralmente não alcançam o mesmo desempenho em termos de eficiência ou estabilidade comparadas às suas contrapartes à base de Pb (Torrence et al., 2023). O uso de chumbo em larga escala representa uma preocupação ambiental e de aceitação social que pode limitar a comercialização da tecnologia (Schmidt et al., 2023).



RELISE

O chumbo é um metal poluente bem conhecido e é altamente regulamentado. A legislação ambiental brasileira exige que fabricantes e importadores garantam a logística reversa de baterias chumbo-ácido, assegurando sua destinação adequada (CONAMA, 2008). O descarte inadequado de CSPs que contêm chumbo levanta sérias preocupações ambientais e de saúde. Eventos como acidentes durante a fabricação ou transporte, danos causados por condições climáticas severas (granizo, tornados, furacões) ou acidentes (colisões, objetos arremessados) e o descarte ao final da vida útil podem resultar na liberação de chumbo para o meio ambiente (Torrence et al., 2023).

A principal preocupação toxicológica é a mobilidade do chumbo no ambiente, que pode ocorrer por lixiviação, contaminando o solo e as águas subterrâneas (Schmidt et al, 2023). Estudos de lixiviação, como o Procedimento de Lixiviação de Características de Toxicidade (TCLP) nos EUA ou testes semelhantes em outros países, simulam o comportamento de resíduos em aterros sanitários. Dados compilados mostram que, em média, a lixiviação de chumbo de um módulo CSP (componente eletrônico) quebrado pode exceder os limites seguros, a menos que uma camada de sequestro de chumbo seja incluída no módulo (Torrence et al., 2023).

Em alguns testes TCLP com módulos quebrados e encapsulados ou não encapsulados, concentrações de chumbo lixiviado variaram significativamente, com alguns valores excedendo em muito o limite regulatório de 5 mg/L para classificação como resíduo perigoso nos EUA (Dias, 2015). Por exemplo, módulos em substratos de polímero, em alguns testes realizados por Li et. al. (2022), Li et al. (2021) e Moody et al. (2020), liberaram quantidades muito maiores de chumbo (até 127 mg/L ou 713 mg/L) em comparação com substratos de vidro (até 16 mg/L ou 14,2 mg/L). A presença de chumbo lixiviado acima dos limites regulatórios classifica os resíduos de CSPs como resíduos perigosos



RELISE

(Classe I na norma brasileira NBR 10004/2004).

O chumbo é uma substância altamente tóxica. Uma vez dentro do corpo, ele é armazenado em tecidos moles e, após exposição contínua, é eventualmente absorvido nos ossos e dentes, onde possui uma meia-vida de eliminação de 20 a 30 anos (BRASIL, 2023).

A bioacumulação em plantas e a biomagnificação na cadeia alimentar também são riscos associados à contaminação do solo por chumbo (Torrence et al., 2023). Além do chumbo, outros elementos presentes nas CSPs, como estanho (Sn), cromo (Cr), cádmio (Cd) e cério (Ce), bem como solventes tóxicos usados na fabricação (como DMF, DMSO, NMP e clorofórmio), também representam riscos à saúde e ao meio ambiente. O cádmio, em particular, é classificado como provável ou conhecido carcinógeno humano (Goes, 2023).

A classificação como resíduo perigoso implica em custos significativamente mais altos para descarte em aterros específicos (Goes, 2023). Estima-se que o descarte de resíduos perigosos possa custar cerca de US\$ 3.300/t em comparação com US\$ 40/t para resíduos municipais. Essa diferença de custo torna a gestão do fim de vida um fator importante a ser considerado para a sustentabilidade econômica e ambiental das CSPs (Schmidt et al., 2023).

Gestão de resíduos através da reciclagem

A gestão sustentável do chumbo em CSPs, especialmente no fim de sua vida útil, é crucial para a aceitação e comercialização em larga escala da tecnologia. O desenvolvimento de um programa de reciclagem robusto reduziria o impacto ambiental, evitando o descarte em aterros (Torrence et al., 2023). A reciclagem visa recuperar materiais valiosos e/ou tóxicos, minimizando a necessidade de mineração primária e mitigando riscos de poluição. Dessa maneira, diversas abordagens de reciclagem para CSPs têm sido investigadas, dentre elas:



RELISE

Dissolução Seletiva em Solventes Orgânicos: Métodos iniciais focaram na dissolução seletiva em diferentes solventes orgânicos para recuperar componentes da pilha de dispositivo. Por exemplo, algumas abordagens usaram DMF para extrair PbI_2 (Schmidt et al., 2023). No entanto, o uso de solventes como DMF é altamente regulamentado devido à sua toxicidade (por exemplo, toxicidade reprodutiva) (Torrence et al., 2023). A recuperação eficiente de solventes é necessária, aumentando os custos. Estudos mostram que métodos baseados em solventes orgânicos podem ter maior impacto ambiental e toxicológico do que os materiais originais devido à quantidade de solventes utilizados (Schmidt et al., 2023).

Eletrólise em Sal Fundido: Outra abordagem utilizada foi a eletrólise em sal fundido para recuperação eletroquímica subsequente. Esses métodos podem ser dispendiosos em energia, por isso não são amplamente utilizados (Schmidt et al., 2023).

Lixiviação e Materiais Adsorventes: Lixiviação seguida pelo uso de resinas de troca iônica ou materiais compósitos para concentrar Pb tem sido explorada (Torrence et al., 2023). Esses métodos podem ser custosos devido à demanda por materiais e efluentes (Schmidt et al., 2023). Abordagens mais recentes demonstram o uso de resinas de troca iônica, como resina de troca catiônica fracamente ácida (WAC) com grupos funcionais de ácido carboxílico, para adsorver íons Pb^{2+} de soluções em solventes orgânicos (como DMF) e depois liberá-los em solução aquosa. Este método demonstrou eficiências de recuperação de Pb superiores a 99%. A resina pode ser regenerada e reutilizada (Chen, 2021; Schmidt et al., 2023; Yazawa, 2024).

Extração com água quente: Uma rota de reciclagem novel e ambientalmente benigna explora a forte dependência da temperatura da solubilidade do PbI_2 em água. O processo envolve pré-tratamento mecânico (corte ou quebra), extração da camada de perovskita com água quente,



RELISE

separação dos resíduos sólidos (vidro, plástico) da água contendo Pb dissolvido, e cristalização de PbI_2 em alta pureza ($> 95,9\%$) por resfriamento. Este método demonstrou altas eficiências de extração de Pb ($92,6 - 100\%$) e recuperação quantitativa de Pb de CSPs baseadas em vidro após dois ciclos de extração/precipitação. Os resíduos sólidos após a extração ficam suficientemente pobres em metais para não serem classificados como materiais perigosos. O uso de água como único extratante é considerado ambientalmente benigno (Schmidt et al., 2023).

Decomposição Térmica: Em alguns estudos, filmes de perovskita foram termicamente decompostos em PbI_2 , que foi então reciclado e convertido de volta em perovskita. A viabilidade dessa abordagem depende da rota de fabricação original do filme de perovskita (Chhillar, 2019)

Além da recuperação de PbI_2 , outros materiais podem ser reciclados. O ouro (Au) dos eletrodos superiores pode ser removido mecanicamente (por exemplo, com fita adesiva) ou por dissolução da camada de transporte de orifícios, seguido por filtração (Yazawa, 2024). Substratos como vidro/FTO/ TiO_2 podem ser reciclados e reutilizados para fabricação de novos dispositivos (Chhillar, 2019). Métodos como delaminação térmica podem separar módulos encapsulados, recuperando o vidro frontal (com condutor transparente, como ITO) e o vidro traseiro (Chen et al., 2021). A recuperação de outros metais como índio (In) e prata (Ag) também é possível a partir dos resíduos sólidos remanescentes após a extração de Pb (Schmidt et al., 2023).

A reusabilidade dos materiais recuperados é importante para a sustentabilidade e viabilidade econômica. PbI_2 recuperado através do processo de extração com água quente foi incorporado com sucesso em novas camadas de perovskita com propriedades optoeletrônicas semelhantes ao PbI_2 comercial (Schmidt et al., 2023). CSPs fabricadas com PbI_2 reciclado por resina de troca iônica também mostraram desempenho comparável a dispositivos feitos com



RELISE

PbI₂ comercial de alta pureza (Chen et al., 2021).

O principal motor econômico para a reciclagem de CSPs é a evitação dos altos custos associados ao descarte de resíduos perigosos (Schmidt et al., 2023). A recuperação de materiais valiosos como FTO/vidro (que pode ser o componente mais caro do módulo) e ouro (Au) também contribui para a viabilidade econômica. O valor do PbI₂ recuperado em si pode não ser o principal impulsionador econômico (Schmidt et al., 2023; Chhillar, 2019; Binek, 2023).

Regulamentações como a diretiva europeia WEEE (Waste from Electrical and Electronic Equipment) e ações estaduais nos EUA (por exemplo, Washington, Califórnia) que exigem a gestão de fim de vida para módulos fotovoltaicos também incentivam o desenvolvimento de programas de reciclagem (Schmidt et al., 2023; Torrence et al., 2023).

Além da reciclagem pós-uso, a incorporação de camadas de sequestro de chumbo nos módulos é uma solução promissora para mitigar a liberação de chumbo em caso de danos durante a operação, aumentando a segurança (Torrence et al., 2023). Essas camadas podem capturar e imobilizar o chumbo. No entanto, a durabilidade e o impacto dessas camadas no desempenho da CSP a longo prazo ainda precisam de validação (Torrence et al., 2023).

Enquanto as perovskitas sem chumbo são uma rota ideal para evitar o problema na origem, os desafios atuais em eficiência e estabilidade sugerem que as CSPs à base de Pb provavelmente chegarão primeiro ao mercado em grande escala. Portanto, o desenvolvimento de tecnologias eficazes de sequestro e reciclagem de chumbo é fundamental (Torrence et al., 2023).

Análise da viabilidade de implementação de soluções sustentáveis para o descarte no mercado de energia fotovoltaica

O crescimento acelerado do uso de sistemas fotovoltaicos como fonte de energia renovável tem gerado preocupações quanto ao descarte de seus



RELISE

componentes, especialmente os painéis solares ao fim de sua vida útil (em torno de 25 a 30 anos). Embora a energia solar seja limpa, o descarte inadequado pode representar um risco ambiental significativo, por exemplo, as perovskitas que contém chumbo em sua composição. De acordo com IRENA e IEA-PVPS (2016) estima-se que em 2050 existirão cerca de 60 milhões a 78 milhões de toneladas de painéis fotovoltaicos no fim da sua vida útil gerados, e no Brasil cerca de 300 mil a 750 mil toneladas, demandando soluções sustentáveis e economicamente viáveis.

Uma solução com potencial de suprir essa necessidade é a implementação da economia circular. A economia circular é concebida como um sistema regenerativo que visa substituir os conceitos tradicionais de descarte e obsolescência por estratégias voltadas à restauração e reutilização de recursos, promovendo práticas como simbiose industrial, design eficiente de produtos, modelos de negócio sustentáveis e logística reversa (LILLIESKOLD et al., 2019).

A proposta é gerenciar os recursos finitos, visando a recuperação de seu valor, a regeneração e a redução no uso de novos materiais. A análise dos relatórios de sustentabilidade corporativa sugere que empresas atuantes no Brasil estão direcionando esforços significativos para uma economia circular sustentável. Apesar do avanço de algumas iniciativas empresariais, a ausência de políticas públicas e regulamentações específicas ainda representa um obstáculo à transição para a economia circular no Brasil, evidenciando um vazio institucional em nível macro (SANCHES et al., 2022).

Para a implementação da economia circular no mercado de energia fotovoltaico é necessário avaliar pontos da cadeia de valor (*value chain*) onde estratégias circulares possam ser implementadas, promovendo assim a transição da indústria fotovoltaica para a circularidade (Franco & Groesser, 2021). A economia circular pode ser aplicada no design dos painéis fotovoltaicos pois, atualmente, estes não permitem fácil desmontagem e separação dos



RELISE

materiais.

Análise das políticas de sustentabilidade e os benefícios oferecidos pelos governos

A demanda de energia renovável tem aumentado em grande escala pelo mundo. De acordo com Global Energy Review da International Energy Agency (IEA), em 2024 a adição da capacidade de energia renovável teve um aumento de 25% chegando à marca de 700 GW instalado, indicando o 22º ano consecutivo que as energias renováveis atingiram novo recorde de expansão, com a energia solar fotovoltaica sendo responsável por mais de três quartos da adição da capacidade de energia renovável. “No entanto, a proliferação de instalações fotovoltaicas levou a uma preocupação com a crescente quantidade de módulos fotovoltaicos produzidos e com a sua fase de fim de vida (EoL).” (YU et al., 2022, p. 1).

Diante desse cenário de crescimento acelerado, torna-se fundamental compreender como diferentes países estão se preparando para lidar com o descarte adequado desses equipamentos ao final de sua vida útil. Faz-se necessário analisar as medidas adotadas por líderes no setor:

Estados Unidos: A Resource Conservation and Recovery Act (RCRA) tem como objetivo reduzir a geração de resíduos, promover a reciclagem e reutilização, assegurar o tratamento e descarte seguro de resíduos, controlar os resíduos perigosos do “berço ao túmulo”. A RCRA adota medidas específicas para cada classificação do resíduo sólido e sua gestão:

Resíduos sólidos perigosos - identificação e classificação de resíduos de acordo com seu potencial risco; registro e rotulagem de geradores junto à EPA; controle de transporte rastreável do ponto de origem ao destino final; armazenamento e tratamento por instalações licenciadas; responsabilidade contínua do gerador, mesmo após o descarte; promoção da minimização de



RELISE

resíduos e incentivo à reciclagem e reutilização; fiscalização e sanções, incluindo inspeções, multas e ações criminais em caso de descumprimento.

Resíduos sólidos não perigosos: Estados e municípios responsáveis pela gestão desses resíduos com apoio e diretrizes gerais da EPA; planejamento local para o manejo adequado dos resíduos; incentivo de práticas que evitem a geração de resíduos desde a produção; incentivo à reciclagem, reutilização e compostagem; requisitos para aterros sanitários com a finalidade de proteger o meio ambiente e a saúde pública; educação pública e programas de conscientização para estimular a participação da população na separação e redução de resíduos.

União Europeia: A Diretiva 2012/19/EU consiste na gestão de Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (REEE) atribuindo responsabilidades aos produtores da gestão de REEE, obrigação de registro e marcação dos equipamentos; estados-membros devem assegurar sistemas eficazes de recolha seletiva gratuita; tratamento e valorização afirmando que os REEE devem ser tratados com remoção de fluidos perigosos e componentes críticos; devem ser atingidas metas de valorização, reciclagem e preparação para reutilização; realização de Relatórios anuais sobre EEE colocados no mercado e REEE tratados; estados-membros devem garantir inspeções e aplicar sanções eficazes em caso de infração.

Brasil: Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) prevê a responsabilidade compartilhada de todos envolvidos no ciclo de vida dos produtos (de fabricante a consumidor); devem contribuir para a gestão adequada dos resíduos; logística reversa permitindo o retorno dos produtos pós-consumo ao setor empresarial, para reaproveitamento, reciclagem ou descarte correto; gestão integrada dos resíduos sendo coleta, transporte, tratamento e destinação final ambientalmente correta dos resíduos; não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento: hierarquia de prioridade na gestão dos resíduos



RELISE

(conhecida como 3Rs + tratamento e disposição final); gestão de resíduos sólidos deve ser elaborada por prefeituras, empresas e setores específicos; proibição dos lixões que determina a eliminação de lixões e sua substituição por aterros sanitários licenciados.

China: Segundo relatório da IEA PVPS, atualmente a China não possui regulamentações específicas para módulos fotovoltaicos em fim de vida útil. No entanto, pesquisas tecnológicas relacionadas foram iniciadas, nos planos quinquenais que acontecem na China para discutir metas e estratégias para o desenvolvimento do país. Começou a discutir a importância da reciclagem de painéis fotovoltaicos, mas ainda não possui regulamentação específicas para este assunto. Mostra-se que a China ainda está nos estágios iniciais de planejamento para gestão de resíduos provenientes da indústria de energia solar.

METODOLOGIA

Trata-se de uma pesquisa de caráter exploratório com abordagem metodológica mista, desenvolvida com base na integração de métodos quantitativos e qualitativos. Essa escolha é fundamentada na concepção de que, em contextos de investigação complexa, a combinação de diferentes estratégias analíticas permite uma compreensão mais ampla e profunda do objeto de estudo. Segundo Creswell et al. (2018), o método misto é especialmente apropriado quando nenhuma abordagem isolada é suficiente para compreender plenamente o problema, sendo ideal para pesquisas que envolvem variáveis técnicas, sociais e ambientais interdependentes.

Essa perspectiva é corroborada por Galvão et al. (2016), ao destacarem que a pesquisa mista não apenas soma técnicas, mas integra lógicas distintas de investigação em uma abordagem complementar, característica indispensável quando se busca analisar tecnologias emergentes sob múltiplos ângulos, como



RELISE

é o caso das células solares de perovskita contendo chumbo. De forma similar, Fethers (2019) enfatiza que a pesquisa mista é eficaz para identificar contradições, aprofundar a compreensão e gerar inferências mais robustas, o que é crucial para áreas marcadas por incertezas técnicas e regulatórias.

No presente estudo, a dimensão quantitativa envolve a coleta e análise de dados sobre níveis de lixiviação, eficiência de recuperação de materiais e custos de descarte e reciclagem, permitindo a comparação objetiva entre diferentes rotas tecnológicas. Essa estratégia se alinha ao que Creswell et al. (2018) classifica como um desenho de métodos mistos com prioridade convergente, no qual dados quantitativos e qualitativos são coletados separadamente, mas integrados na fase de interpretação.

Já no componente qualitativo, são examinados os riscos ambientais e à saúde pública, os desafios regulatórios vigentes e os papéis estratégicos da engenharia elétrica na proposição de soluções sustentáveis. Essa etapa segue a proposta de Galvão et al. (2016), que defendem a análise crítica da literatura como forma de enriquecer a interpretação dos dados empíricos dentro de contextos regulatórios, sociais e institucionais.

Assim, a abordagem mista adotada neste trabalho se justifica não apenas pela complexidade do tema, mas também pelo objetivo de produzir uma leitura crítica dos desafios e oportunidades associados à sustentabilidade das perovskitas com chumbo no setor fotovoltaico. A metodologia proposta permite não apenas avaliar a viabilidade técnica das soluções, mas também compreender as limitações impostas pelos contextos regulatórios e socioambientais, conforme orientam os autores citados.

Estrutura metodológica

A revisão da literatura seguiu uma estrutura organizada e sistemática, composta pelas seguintes etapas:



RELISE

Definição do Problema: A problemática central foi a identificação dos impactos ambientais e à saúde decorrentes do chumbo em Células Solares de Perovskita (CSPs), considerando aspectos técnicos, regulatórios, ambientais e econômicos.

Coleta de Dados: Foram selecionadas fontes relevantes com base em critérios temáticos e temporais, com foco em estudos experimentais, análises de risco e avaliações regulatórias.

Análise dos Dados: Aplicaram-se análises de conteúdo, quantitativas e comparativas sobre os dados extraídos das fontes selecionadas.

Síntese e Discussão: Os resultados foram integrados para discutir soluções propostas na literatura, além dos desafios técnicos, econômicos e regulatórios ainda existentes.

A estrutura metodológica adotada possibilitou a compilação, análise crítica e síntese da literatura, oferecendo uma base sólida para discutir os desafios e oportunidades na gestão sustentável de Células Solares de Perovskita com chumbo.

Método de coleta de dados

Os dados e informações que fundamentaram a pesquisa foram obtidos a partir de três fontes principais:

Revisão de Literatura Científica: Foram analisados artigos e documentos de instituições como NREL, CONAMA, IEA, IRENA, EPA e IEA-PVPS, fornecendo uma visão sobre os desafios, alternativas e impactos ambientais da energia fotovoltaica sustentável.

Dados Secundários de Estudos Experimentais: Dados quantitativos sobre aspectos ambientais, econômicos e políticos foram extraídos de artigos e revistas acadêmicas, apoiando a análise com base numérica sólida.

Fontes Institucionais e Relatórios: Utilizaram-se dados de agências



RELISE

regulatórias (EPA, CONAMA, CDC, entre outras), organizações internacionais (IRENA, WHO) e diretrizes como EU WEEE, RoHS, REACH e NBR 10004, permitindo contextualizar riscos, gestão de resíduos e o mercado da energia fotovoltaica.

Amostragem e critérios de seleção

A seleção das fontes e dos dados para esta revisão seguiu critérios temáticos e temporais para assegurar a relevância e a atualidade das informações:

Critério Temático: Foram priorizados estudos focados na reciclagem e descarte de células solares de perovskita, especialmente os que detalham métodos experimentais, testes de lixiviação e análises de custos.

Critério Temporal: Deram-se preferência a publicações dos últimos 10 anos, com ênfase nos últimos 5, visando refletir os avanços mais recentes em tecnologias de reciclagem e avaliação de riscos.

Participantes Indiretos: A análise considerou resultados de grupos de pesquisa e instituições com expertise em materiais fotovoltaicos, química ambiental e gestão de resíduos, identificados na revisão bibliográfica.

Ferramentas e técnicas de análise

A análise das informações e dados coletados foi realizada em múltiplas etapas, combinando técnicas qualitativas e quantitativas.

Análise de Conteúdo: Foram identificados os principais métodos de reciclagem, materiais tóxicos envolvidos, riscos ambientais e à saúde, regulamentações aplicáveis, desafios técnicos e econômicos, estratégias de mitigação e viabilidade financeira.

Análise Quantitativa: Dados sobre rendimento dos processos, concentração de lixiviados, pureza dos materiais recuperados e custos



RELISE

associados foram sintetizados. As concentrações foram comparadas a limites legais para classificar os resíduos de CSPs.

Estudos Comparativos: As abordagens de reciclagem foram comparadas quanto à eficiência na recuperação de chumbo e outros materiais, pureza obtida, viabilidade para diferentes tipos de CSPs e impactos ambientais e econômicos em contextos nacionais e internacionais.

ANÁLISE DE DADOS

O rápido crescimento da capacidade fotovoltaica global nos últimos anos levanta uma preocupação crescente sobre o volume de resíduos gerados por painéis solares ao final de sua vida útil. Estima-se que, em 2050, a produção anual de resíduos de painéis fotovoltaicos possa atingir volumes expressivos, variando de 60 a 78 milhões de toneladas (IRENA et al.; 2016).

Embora as células solares de perovskita (CSPs) representem uma tecnologia emergente e promissora devido à sua alta eficiência e potencial de baixo custo, a dependência do uso de chumbo em suas formulações mais eficientes introduz significativas preocupações ambientais e de saúde pública (Torrence et al. et al., 2022; Li et al., 2020). Nesse viés, faz-se necessário justificar o porquê de se utilizar chumbo ao invés de soluções menos nocivas ao meio ambiente e a sociedade.

O chumbo ainda é utilizado nas células solares de perovskita principalmente porque, até o momento, ele oferece uma combinação única de propriedades que nenhum outro material conseguiu igualar em termos de eficiência e estabilidade, tornando essencial para o desempenho elevado desses dispositivos (Torrence et al., 2023). Isso é demonstrado pelas taxas de eficiência de conversão de energia, que ultrapassam, atualmente, 25% em laboratórios, conforme estudos de Teixeira (cf. p. 5).

Nota-se isso ao ver que, apesar da toxicidade reconhecida do chumbo,



RELISE

as alternativas testadas, como o estanho (Sn), bismuto (Bi) e antimônio (Sb), ainda não atingiram a mesma performance. O estanho, por exemplo, sofre oxidação rápida, o que compromete a estabilidade e a eficiência da célula, além disso, essas substituições geralmente reduzem a vida útil do dispositivo e apresentam dificuldades na síntese e no controle da qualidade do filme de perovskita (Jena et al., 2019).

No entanto, mesmo com esses fatores, dados compilados mostram que a lixiviação de chumbo de módulos CSPs danificados ou quebrados pode exceder os limites regulatórios para classificação como resíduo perigoso, por exemplo, 1 mg/L no Brasil (ABNT, 2004), de maneira que torna-se imprescindível uma análise com cautela do descarte desse tipo de material.

Tabela – Concentração de metais em resíduos de painéis solares fotovoltaicos					
Parâmetro	Unidade	Resultado A	Resultado B	Limite de Detecção (LD)	Limite Máximo (NBR 10004)
Cádmio	mg/L	ND ¹	ND	0,017	0,5
Chumbo	mg/L	5,50	21,6	0,054	1,0
Cromo	mg/L	0,016	0,025	0,012	5,0
Prata	mg/L	ND	ND	0,015	5,0

Tabela 1. Comparativo entre resultados de testes de lixiviação com diferentes CSPs e padrões regulatórios. Fonte: Adaptado de Dias (2015).

Alguns países, como os Estados Unidos, possuem limites de concentração de substâncias tóxicas, como o chumbo, mais elevados. Segundo o regulamento RCRA da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA), publicado em 1990, a concentração máxima de chumbo em resíduos não perigosos é de 5 mg/L, ou seja, cinco vezes mais que no Brasil. Apesar dessa maior permissividade, algumas técnicas de sequestro de Pb são utilizadas para diminuir as concentrações da substância.

A classificação como resíduo perigoso implica custos de descarte significativamente mais altos em aterros específicos (estimativas de US\$3.300/t para resíduos perigosos versus US\$40/t para resíduos municipais) (Schmidt et



RELISE

33

al., 2023). Isso torna a gestão de fim de vida um fator importante para a sustentabilidade econômica das CSPs (Góes, 2023).

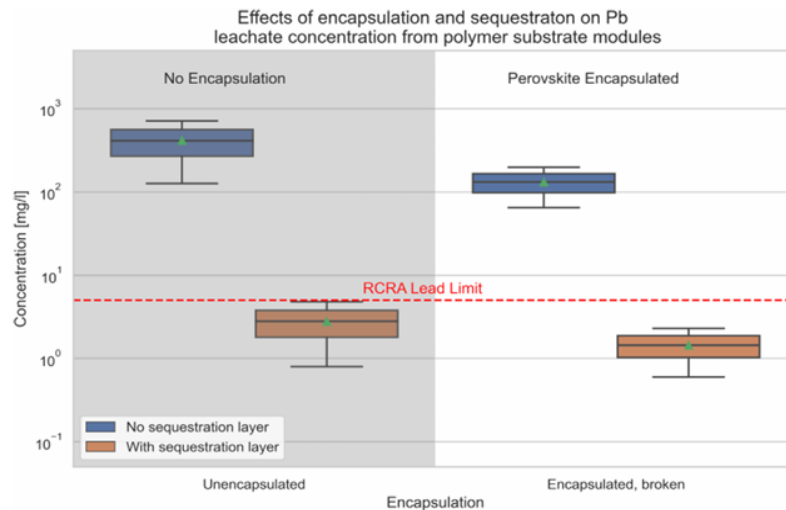


Figura 1. Dados de lixiviação para células/módulos em substrato de polímero, mostrando a variabilidade e a influência de fatores como encapsulamento e camadas de sequestro. Fonte: Torrence et al. et al. (2023).

Para mitigar esses riscos e custos, o desenvolvimento de um programa de reciclagem robusto é crucial. A reciclagem visa recuperar materiais valiosos e/ou tóxicos, minimizando a necessidade de mineração e reduzindo os riscos de poluição. Diversas abordagens de reciclagem para CSPs têm sido investigadas como a Dissolução Seletiva em Solventes, Extração com Água Quente, Resinas de Troca Iônica e Adsorventes e Decomposição Térmica.

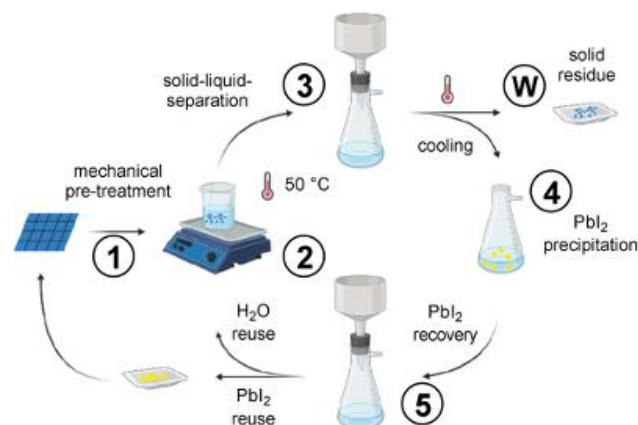


Figura 2. Esquema de reciclagem de chumbo (PbI₂) utilizando água quente. Fonte: Schmidt et



RELISE

34

al. (2023).

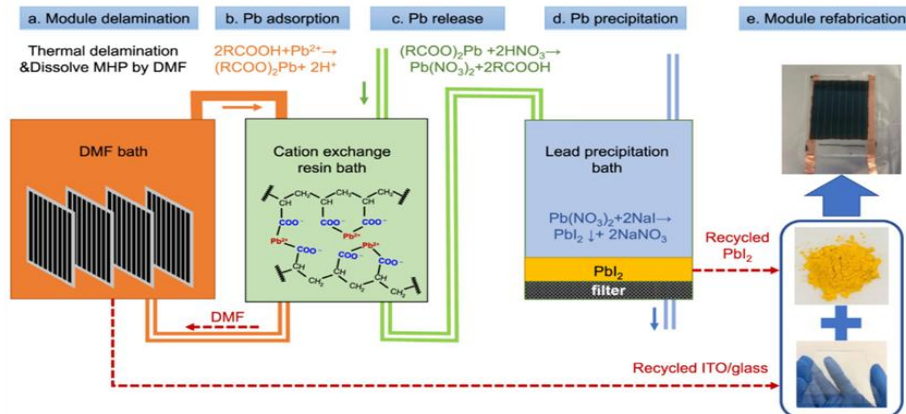


Figura 3. Processo de reciclagem de módulos solares de perovskita encapsulada, utilizando resinas de troca e adsorventes. Fonte: Retirado de Suo et al. (2024).

A reusabilidade dos materiais recuperados é crucial para a sustentabilidade e viabilidade econômica, levando em conta que, além do PbI_2 , outros materiais como substratos, eletrodos e camadas valiosas também podem ser recuperados. O PbI_2 recuperado, por exemplo, através da extração com água quente ou resina de troca iônica, demonstrou propriedades optoeletrônicas e pureza comparáveis ao material comercial e foi reincorporado com sucesso em novas camadas de perovskita com desempenho similar (Suo, 2024; Schmidt, 2023), onde corrobora para a deposição do filme de perovskita nas células solares (Ustulin, 2024).

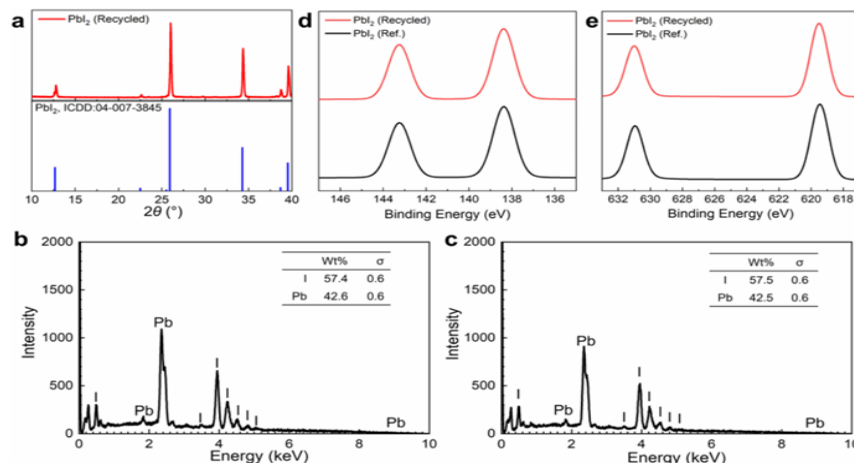


Figura 4. Padrões XRD (X-ray diffraction) que medem o desempenho da estrutura cristalina do



RELISE

PbI₂ reciclado em comparação com os padrões XRD do chumbo virgem (referência). Fonte: Retirado de Suo et al. (2024).

Os benefícios ambientais da reciclagem são claros. Análises de ciclo de vida (LCA) demonstram que a reciclagem de CSPs pode reduzir significativamente o esgotamento de recursos (em 96,6% em comparação com o aterro), a toxicidade humana (cancerígena em 68,8%, não cancerígena em 57,6%) e outros impactos ambientais (Xiao, 2024).

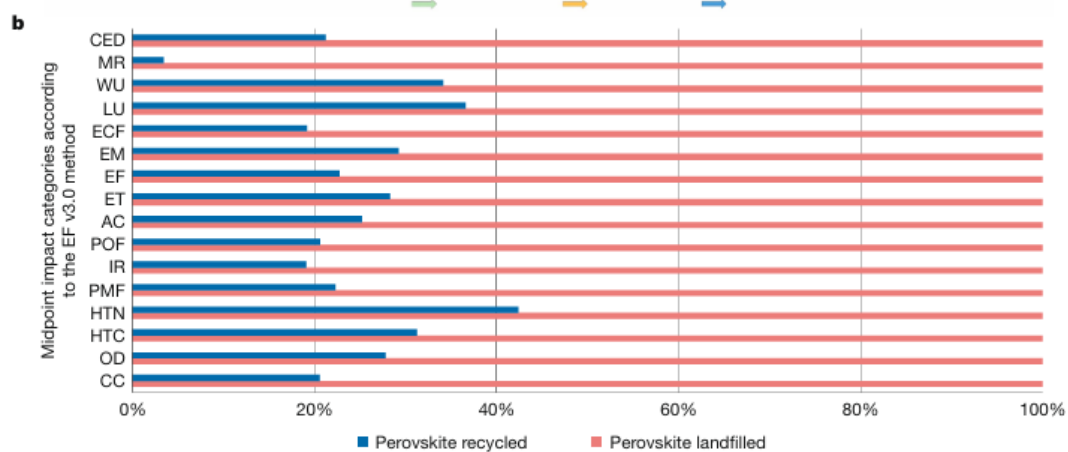


Figura 5. Comparação dos impactos ambientais entre cenários de reciclagem e aterro. CED, cumulative energy demand; MR, material resources: metals/minerals; WU, water use; LU, land use; ECF, ecotoxicity: freshwater; EM, eutrophication: marine; EF, eutrophication: freshwater; ET, eutrophication: terrestrial; AC, acidification; POF, photochemical oxidant formation: human health; IR, ionizing radiation: human health; PMF, particulate matter formation; HTN, human toxicity: non-cancer effect; HTC: human toxicity: cancer effect; OD, ozone depletion; CC, climate change. Fonte: Retirado de Xiao et al.(2024)

As regulamentações, como a diretiva europeia WEEE (Waste from Electrical and Electronic Equipment) e leis nacionais (por exemplo, RCRA nos EUA, NBR/10004 no Brasil), que exigem a gestão de fim de vida para módulos fotovoltaicos, incentivam o desenvolvimento de programas de reciclagem.

As normas citadas são responsáveis por estabelecer diretrizes sobre a responsabilidade dos fabricantes, importadoras e usuários finais no descarte adequado dos resíduos provenientes de painéis solares, impulsionando a criação de infraestrutura para coleta e tratamento. Por exemplo, de acordo com a base de dados da EUROSTAT, no ano de 2022 foram coletadas cerca de 47,8



RELISE

toneladas de resíduos de painéis fotovoltaicos e aproximadamente 43,6 toneladas foram recicladas (EUROSTAT, 2024). O surgimento de empresas e organizações sem fins lucrativos especializadas na coleta e tratamento dos materiais que compõem os painéis fotovoltaicos também foi impulsionado por essas normas, por exemplo a PV cycle uma organização sem fins lucrativos que no ano de 2023 coletou cerca de 14,5 toneladas de resíduos gerados por sistemas de energia fotovoltaica (PV Cycle, 2023).

DISCUSSÃO

No contexto ambiental e tecnológico mundial, a crescente participação das perovskitas de chumbo para produção das células solares vêm trilhando um caminho de destaque (Casarin, 2024), dada as diversas vantagens — frente a comparação com outros materiais — (Torrence et al., 2023) apresentadas ao longo do presente artigo.

No entanto, tal avanço, impulsionado pelo crescente mercado fotovoltaico, apresenta desafios e oportunidades relacionados à sua sustentabilidade (cf. p. 19). Embora o chumbo seja um metal tóxico extremamente regulamentado (CONAMA, 2008), esse corrobora para os principais desafios da implementação das perovskitas nas placas solares, tanto no quesito de desafios tecnológicos (como seu tempo de vida útil, o qual exige técnicas de encapsulamento e derivados) (Teixeira, 2023), quanto na preservação do meio ambiente e, conseqüentemente, da sociedade (Torrence et al., 2023).

Um dos aspectos mais desafiadores do ponto de vista ambiental da sustentabilidade fotovoltaica refere-se à expressiva geração de resíduos oriundos do descarte de painéis solares — estimada entre 60 e 78 milhões de toneladas até 2050 (IRENA, 2016). Nesse contexto, a eventual aplicação de perovskitas à base de chumbo poderia acarretar impactos ambientais



RELISE

significativos, em virtude da toxicidade desse elemento que, por sua vez, se trata da melhor alternativa frente às outras soluções, conforme estudos de Jena, et. al. (2019).

Assim sendo, a gestão do fim da vida útil desses dispositivos, especialmente no que condiz à reciclagem, torna-se o ponto chave para o beneficiamento socioeconômico e ambiental (Schmidt et al., 2023). Tendo isso em vista, a adoção de normas como a WEEE (União Europeia), a RCRA (Estados Unidos) e a NBR 10004 (Brasil) tem desempenhado um papel fundamental no desenvolvimento de estratégias de descarte e reciclagem de módulos fotovoltaicos que estão em sua fase final de operação.

O foco na gestão do fim de vida dos painéis tem impulsionado o surgimento de tecnologias de encapsulamento (Teixeira, 2023), rotas de recuperação e iniciativas de logística reversa (CONAMA, 2008; LILLIESKOLD et al., 2019). A inclusão explícita de módulos fotovoltaicos na WEEE estabeleceu metas de reciclagem e reutilização que fomentaram projetos industriais, como o PV Cycle, e contribuíram para taxas de recuperação que ultrapassam 85%. Levando em consideração que a reusabilidade dos materiais recuperados é crucial para a sustentabilidade e viabilidade econômica (Suo, 2024; Schmidt et al, 2023), taxas de recuperação de tal calibre contribuem fortemente para a sustentabilidade fotovoltaica de placas compostas por CSPs de chumbo.

Ademais, a análise de dados revela que, embora o descarte de CSPs contendo chumbo represente um risco ambiental significativo devido à lixiviação, diversas tecnologias de reciclagem estão sendo desenvolvidas para recuperar chumbo e outros materiais valiosos. Essas abordagens não apenas mitigam os riscos ambientais e de saúde, mas também oferecem benefícios econômicos substanciais, principalmente pela revalorização de componentes caros como os substratos e pela redução dos custos de descarte perigoso. A demonstração da reutilização dos materiais reciclados em novas células com desempenho



RELISE

comparável e os resultados positivos de *Life Cycle Assessment* (LCA) sublinham o potencial da reciclagem para tornar a tecnologia de CSPs mais sustentável e competitiva no mercado de energia solar, alinhando-se às metas de sustentabilidade (Wu et al., 2024).

Em suma, a consolidação de CSPs a base de chumbo como uma alternativa dominante no setor fotovoltaico depende de diversos fatores, sendo um processo hermético e multifacetado, cuja relevância não compreende apenas a esfera ambiental (Casarin, 2024). O gerenciamento eficaz do final da vida útil desses painéis, apoiado por regulamentações rígidas e, também, tecnologias de reciclagem eficientes, é o que vai corroborar na redução dos riscos ao meio ambiente ligados à toxicidade do chumbo. Dessa maneira, os desafios tecnológicos e ambientais se convertem em oportunidades para inovar em processos de recuperação, fortalecendo a viabilidade econômica e assegurando que a transição para fontes de energia mais limpas seja, de fato, sustentável em todo seu ciclo de vida (Torrence et al., 2023).

CONCLUSÃO

A presente pesquisa alcançou os objetivos propostos, descrevendo que a partir da perspectiva da engenharia elétrica, a tecnologia das células solares de perovskita representa uma oportunidade transformadora para o setor energético, ao oferecer soluções inovadoras e eficientes para a geração de energia renovável.

O desenvolvimento e a otimização desses dispositivos exigem um aprofundamento técnico que contemple não apenas o desempenho elétrico, mas também a integração desses sistemas aos grids modernos, garantindo estabilidade, confiabilidade e eficiência energética.

O desafio da toxicidade do chumbo e as questões relativas à durabilidade e ao descarte dos materiais destacam a necessidade de



RELISE

engenheiros elétricos atuem de forma multidisciplinar, colaborando com áreas como materiais, meio ambiente e sustentabilidade para viabilizar tecnologias mais seguras e duradouras.

Foi concluído que a engenharia elétrica, ao promover avanços em circuitos, sistemas de armazenamento, conversão de energia e monitoramento inteligente, tem papel crucial para que as células de perovskita atinjam seu potencial máximo na matriz energética, contribuindo para um futuro sustentável e tecnológico, assim, a conjugação entre inovação tecnológica e responsabilidade ambiental torna-se essencial para consolidar as perovskitas com chumbo como protagonistas na transição energética global, reforçando o compromisso da engenharia elétrica com soluções que aliem eficiência e sustentabilidade.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004:2004 — Resíduos sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

BINEK, A. et al. Recycling perovskite solar cells to avoid lead waste. **ACS Applied Materials & Interfaces**, v. 8, n. 20, p. 12881-12886, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsami.6b03767>.

BRASIL. Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional. **REIDI – Regime Especial de Incentivos para o Desenvolvimento da Infraestrutura**. Disponível em: <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/fundos-regionais-e-incentivos-fiscais/reidi>. Acesso em: 4 jun. 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos/politica-nacional-deresiduos-solidos.html>. Acesso em: 4 jun. 2025.

CASARIN, R. **Perovskita: o que é e o futuro da energia solar fotovoltaica**. Portal Solar, 2024. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/perovskita>. Acesso em: 2 jun. 2025.

CHEN, B. et al. Recycling lead and transparent conductors from perovskite solar



RELISE

modules. **Nature Communications**, v. 12, n. 1, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26121-1>.

CHHILLAR, P. et al. Recycling of perovskite films: route toward cost-efficient and environment-friendly perovskite technology. **ACS Omega**, v. 4, p. 11880-11887, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b01053>.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 401, de 4 de novembro de 2008. Dispõe sobre o recolhimento, a reutilização, a reciclagem e a destinação final de pilhas e baterias. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 5 nov. 2008.

CORREA-BAENA, J.-P. et al. The rapid evolution of highly efficient perovskite solar cells. **Energy & Environmental Science**, v. 10, p. 710–727, 2017.

CRUZ, F. T.; ISIDORO, M. H.; FERNANDES, I. S. Descarte, reciclagem e logística reversa: análise do fim de vida útil dos painéis fotovoltaicos. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 9, p. 73294–73309, 2020.

CRESWELL, J. W., & CRESWELL, J. D. (2018). **Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches (5th ed.)**. SAGE Publications. Disponível em: spada.uns.ac.id/pluginfile.php/510378/mod_resource/content/1/creswell.pdf.

DIAS, P. R. **Caracterização e reciclagem de materiais de módulos fotovoltaicos (painéis solares)**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

EUROSTAT. **Waste statistics – electrical and electronic equipment (dataset ENV_WASELEEOS)**. [S. l.], out. 2024. Disponível em: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ENV_WASELEEOS_custom_17138642/default/table?lang=en. Acesso em: 4 jun. 2025.

FETTERS, M. D. (2019). **The Mixed Methods Research Workbook: Activities for Designing, Implementing, and Publishing Projects**. SAGE Publications. Disponível em: [Sage Research Methods - The Mixed Methods Research Workbook: Activities for Designing, Implementing, and Publishing Projects](#).

FRANCO, M. A.; GROESSER, S. N. A systematic literature review of the solar photovoltaic value chain for a circular economy. **Sustainability**, Basel, v. 13, n. 17, p. 9615, 2021. DOI: 10.3390/su13179615.



RELISE

GALVÃO, M. C. B.; PLUYE, P.; RICARTE, I. L. M. Métodos de pesquisa mistos e revisões de literatura mistas: conceitos, construção e critérios de avaliação. **InCID: Revista de Ciência da Informação e Documentação**, Ribeirão Preto, v. 7, n. 2, p. 6–24, jul./dez. 2016. Disponível em: <https://revistas.usp.br/incid/article/view/121879>. Acesso em: 11 jun. 2025.

GÓES, P. F. et al. Resíduos de painéis solares fotovoltaicos: uma revisão dos impactos ambientais e toxicológicos. **Revista de Gestão e Secretariado**, São Paulo, v. 14, n. 8, p. 12528–12553, 2023.

GREEN, M. A. et al. Solar cell efficiency tables (version 56). **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, v. 28, p. 629–638, 2020.

HAEGEL, N. et al. Photovoltaics at multi-terawatt scale: waiting is not an option. **Science**, v. 380, p. 39-42, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.adf6957>.

HAO, F. et al. Lead-free solid-state organic–inorganic halide perovskite solar cells. **Nature Photonics**, London, v. 8, p. 489–494, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1038/nphoton.2014.82>. Acesso em: 11 jun. 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **World Energy Outlook 2024**. Paris: IEA, 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>. Acesso em: 4 jun. 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEMS PROGRAMME (IEA PVPS). **End-of-Life Management of Photovoltaic Panels: Trends in PV Module Recycling Technologies**. Task 12. [S. l.]: IEA-PVPS, jan. 2020. Disponível em: https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/End_of_Life_Management_of_Photovoltaic_Panels_Trends_in_PV_Module_Recycling_Technologies_by_task_12.pdf. Acesso em: 4 jun. 2025.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA); INTERNATIONAL ENERGY AGENCY PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEMS PROGRAMME (IEA-PVPS). **End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels**. Abu Dhabi: IRENA; IEA-PVPS, 2016. Disponível em: <https://iea-pvps.org/key-topics/irena-iea-pvps-end-of-life-solar-pv-panels-2016/>. Acesso em: 4 jun. 2025.

JENA, A. K.; KULKARNI, A.; MIYASAKA, T. Halide perovskite photovoltaics: background, status, and future prospects. **Chemical Reviews**, Washington, DC,



RELISE

42

v. 119, n. 5, p. 3036–3103, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00539>. Acesso em: 11 jun. 2025.

KHAC, D. et al. Efficient laboratory perovskite solar cell recycling with a one-step chemical treatment and recovery of ITO-coated glass substrates. **Solar Energy**, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.112214>.

LI, J. et al. Biological impact of lead from halide perovskites reveals the risk of introducing a safe threshold. **Nature Communications**, v. 11, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13910-y>.

LI, Z. et al. An effective and economical encapsulation method for trapping lead leakage in rigid and flexible perovskite photovoltaics. **Nano Energy**, v. 93, 106853, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.106853>.

LI, Z. et al. Sulfonated graphene aerogels enable safe-to-use flexible perovskite solar. **Nano Energy**, 2021.

LILLIESKOLD, J. et al. Sustainable energy storage for solar home systems in rural Sub-Saharan Africa – A comparative examination of lifecycle aspects of battery technologies for circular economy, with emphasis on the South African context. **Energy**, v. 166, p. 1207–1215, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544218320437>.

MACHADO, C. T.; MIRANDA, F. S. Photovoltaic solar energy: A briefly review. **Revista Virtual de Química**, v. 7, n. 1, p. 126–143, 2015.

MIRANDA, R. T.; LEANDRO, F. S.; SILVA, T. C. Gestão do Fim de Vida de Módulos Fotovoltaicos. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 8, n. 1, p. 364–383, 2019.

MOODY, N. et al. Assessing the regulatory requirements of lead-based perovskite photovoltaics. **Joule**, v. 4, p. 970–974, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.03.018>.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY (NREL). **Best research-cell efficiency chart**. 2025. Disponível em: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency>. Acesso em: 28 maio 2025.

PINTO, F. Emerging Metal-Halide Perovskite Materials for Enhanced Solar Cells and Light-Emitting Applications. In: **Research Topics in Bioactivity, Environment and Energy: Experimental and Theoretical Tools**. Springer



RELISE

International Publishing, 2022.

PV CYCLE. **Annual report 2023**. [S.l.]: PV CYCLE, 2023. Disponível em: <https://pvcycle.org/web/content/website.annualreport/17/attachedpdf?filename=2023 - annual report.pdf>. Acesso em: 4 jun. 2025.

SANCHES, Julia Romano et al. Sustainable circular economy strategies: an analysis of Brazilian corporate sustainability reporting. *Sustainability*, Basel, v. 14, n. 10, p. 5808, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14105808>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/10/5808>

SCHMIDT, F. et al. Organic solvent free PbI₂ recycling from perovskite solar cells using hot water. **Journal of Hazardous Materials**, v. 447, p. 130829, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.130829>.

SILVA, M. N. **Células solares de perovskita: uma nova tecnologia emergente**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal de São João del Rei, São João del Rei, 2016.

SUO, J.; PETTERSSON, H.; YANG, B. **Sustainable approaches to address lead toxicity in halide perovskite solar cells**: A review of lead encapsulation and recycling solutions. Uppsala: Ångström Laboratory, Uppsala University, 2024.

TEIXEIRA, C. Fabrication of low-cost and flexible perovskite solar cells by slot-die coating for indoor applications. **Materials Advances**, p. 3863-3873, 2023.

TORRENCE, C.; LIBBY, C.; NIE, W.; STEIN, J. Environmental and health risks of perovskite solar modules: case for better test standards and risk mitigation solutions. **iScience**, v. 26, 105807, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.105807>.

TORRENCE, C. E. et al. Environmental and health risks of perovskite solar modules: Case for better test standards and risk mitigation solutions. **iScience**, v. 26, n. 1, p. 105807, 20 jan. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.105807>. Acesso em: 2 jun. 2025.

TRESS, W. Perovskite Solar Cells on the Way to Their Radiative Efficiency Limit – Insights Into a Success Story of High Open-Circuit Voltage and Low Recombination. **Advanced Energy Materials**, v. 7, n. 14, 2017.

UNIÃO EUROPEIA. Directive 2012/19/EU of the European Parliament and of the



RELISE

Council of 4 July 2012 on waste electrical and electronic equipment (WEEE). **Official Journal of the European Union**, L 197, p. 38–71, 24 jul. 2012. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2012/19/oj/eng>.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). **Resource Conservation and Recovery Act (RCRA) Overview**. Washington, D.C.: U.S. EPA, 2024. Disponível em: <https://www.epa.gov/rcra/resource-conservation-and-recovery-act-rcra-overview>. Acesso em: 4 jun. 2025.

USTULIN, G. **Resíduos de módulos fotovoltaicos**: uma análise do cenário legislativo no brasil e no mundo. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto de Geociência e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2024.

WU, Z. et al. Closing the loop: recycling of MAPbI₃ perovskite solar cells. **Energy & Environmental Science**, [S.l.], v. 17, p. 4248, 2024. Royal Society of Chemistry. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2024/ee/d4ee01071j>. Acesso em: 11 jun. 2025.

XIAO, X. et al. **Aqueous-based recycling of perovskite photovoltaics**. *Nature*, [S. l.], Published online: 12 Feb. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41586-024-08408-7>.

YAZAWA, R. et al. Recovery of lead from perovskite solar cells using ion-exchange resin. **Japanese Journal of Applied Physics**, 2024. DOI: <https://doi.org/10.35848/1347-4065/ad8891>.

YIN, J. Recent progress in sustainable recycling strategies for lead-based perovskite solar cells. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 182, 113275, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113275>.

YU, H. F. et al. Global challenges and prospects of photovoltaic materials disposal and recycling: a comprehensive review. **Sustainability**, Basel, v. 14, n. 14, p. 8567, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14148567>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/14/8567>. Acesso em: 4 jun. 2025.

ZHANG, C. et al. Magneto-optical effects in lead halide perovskites. **Advances in Physics: X**, v. 8, 2023. <https://doi.org/10.1080/23746149.2023.2258951>.

ZHAO, Y.; TAN, H. Structural and chemical stability of perovskite solar cells: degradation mechanisms and mitigation strategies. **Energy & Environmental Science**, v. 13, p. 1176-1206, 2020.