

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
GOIÁS CAMPUS GOIÂNIA/DEPARTAMENTO DAS ÁREAS
ACADÊMICAS II
BACHARELADO EM QUÍMICA TRABALHO DE CONCLUSÃO DE
CURSO

Mateus Silva Barreto

CÉLULAS SOLARES DE PEROVSKITA: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA
DA LITERATURA

GOIÂNIA

2025



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

**TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO
NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG**

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia - Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Mateus Silvio Barreto

Matrícula: 2039 J03 1030280

Título do Trabalho: Guia de Solos de Perakito: Uma Revisão Sistemática da Literatura

Autorização - Marque uma das opções

- ☒ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
- ☐ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
- ☐ Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2** ou **3**, marque a justificativa:

- ☐ O documento está sujeito a registro de patente.
☐ O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
☐ Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Goiânia Local 10/09/2025 Data

Mateus Silvio Barreto

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

Mateus Silva Barreto

**CÉLULAS SOLARES DE PEROVSKITA: UMA REVISÃO
SISTEMÁTICA DA LITERATURA**

Trabalho de Conclusão de Curso,
submetido à Coordenação do Curso de
Bacharelado em Química do Instituto
Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Goiás, como parte dos
requisitos necessários à obtenção do
título de Bacharel em Química.
Orientador: Lidiaine Maria dos Santos

**GOIÂNIA
2025**

B273c Barreto, Mateus Silva.

Células solares de perovskita: uma revisão sistemática da literatura / Mateus Silva Barreto.
Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, 2025.
[27]f.

Orientação: Lidiaine Maria dos Santos.

TCC (Trabalho de Conclusão de Curso) – Curso de Bacharelado em Química, Departamento das Áreas Acadêmicas II, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

1. Células solares. 2. Energia fotovoltaica. 3. Energias sustentáveis. I. Santos, Lidiaine Maria dos (orientação). II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. III. Título.

CDD 621.47

ATA DE DEFESA DE ARTIGO CIENTÍFICO

Na presente data realizou-se a sessão pública de defesa do Artigo Científico intitulada **CÉLULAS SOLARES DE PEROSVSKITA: Uma Revisão sistemática da Literatura**, sob orientação de Lidiaine Maria dos Santos, apresentada pelo aluno **Mateus Silva Barreto (20191011080280)** do Curso **Bacharelado em Química (Câmpus Goiânia)**. Os trabalhos foram iniciados às **09:00** do dia **30/08/2025** pela Professora presidente da banca examinadora, constituída pelos seguintes membros:

- **Lidiaine Maria dos Santos** (Presidente)
- **Aline Mendonça Pascoal Santos** (Examinadora Interna)
- **Jucilêa Rodrigues Ibiapina** (Examinadora Externa)

A banca examinadora, tendo terminado a apresentação do conteúdo do Artigo Científico, passou à arguição do candidato. Em seguida, os examinadores reuniram-se para avaliação e deram o parecer final sobre o trabalho apresentado pelo aluno, tendo sido atribuído o seguinte resultado:

☒ Aprovado

☐ Reprovado

Nota : 8,5

Observação / Apreciações:

Proclamados os resultados pelo presidente da banca examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, eu **Lidiaine Maria dos Santos** lavrei a presente ata que assino juntamente com os demais membros da banca examinadora.

Documento assinado eletronicamente por:

- **Lidiaine Maria dos Santos** (020.982.071-31), em 09/09/2025 11:21:25 com chave 44d606cc8d8811f0b220005056a537a4.
- **Jucilêa Rodrigues Ibiapina** (903.062.013-72), em 09/09/2025 18:02:32 com chave 4df52a028dc011f0be99005056a537a4.
- **Aline Mendonça Pascoal Santos** (706.116.701-78), em 09/09/2025 11:24:36 com chave b68cfcc68d8811f0851a005056a537a4.

Este documento foi emitido pelo SUAP. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse https://suap.ifg.edu.br/comum/autenticar_documento/ e informe os dados a seguir.

Tipo de Documento: Ata de Projeto Final

Data da Emissão: 09/09/2025

Código de Autenticação: 71912f



CÉLULAS SOLARES DE PEROVSKITA: Uma Revisão sistemática da Literatura

As células solares de perovskita (PSCs) têm se consolidado como uma tecnologia promissora para geração de energia sustentável, devido à elevada eficiência (>26%), baixo custo de fabricação e ampla versatilidade de aplicação, incluindo dispositivos tandem e células transparentes. Este estudo apresenta uma revisão bibliográfica sobre os avanços recentes no desenvolvimento das PSCs, contemplando publicações entre 2015 e 2025, obtidas nas bases Scopus, Web of Science, ScienceDirect e Google Scholar. Após a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão, foram selecionados 25 artigos para análise. Os resultados apontam que, apesar do potencial elevado, desafios significativos permanecem, como degradação induzida por fatores ambientais, toxicidade do chumbo e dificuldades no escalonamento industrial. Estratégias recentes, como encapsulamento avançado, substituição de elementos tóxicos e desenvolvimento de arquiteturas híbridas, são identificadas como fundamentais para viabilizar a aplicação comercial das PSCs.

Palavras-chave: Células solares de perovskita, eficiência fotovoltaica, energia sustentável.

Abstract

Perovskite solar cells (PSCs) have established themselves as a promising technology for sustainable energy generation due to their high efficiency (>26%), low manufacturing cost, and wide application versatility, including tandem devices and transparent cells. This study presents a literature review on recent advances in the development of PSCs, including publications from 2015 to 2025, retrieved from Scopus, Web of Science, ScienceDirect, and Google Scholar. After applying the inclusion and exclusion criteria, 25 articles were selected for analysis. The results indicate that, despite their high potential, significant challenges remain, such as environmentally induced degradation, lead toxicity, and difficulties in industrial scale-up. Recent strategies, such as advanced encapsulation, replacement of toxic elements, and the development of hybrid architectures, are identified as key to enabling the commercial application of PSCs.

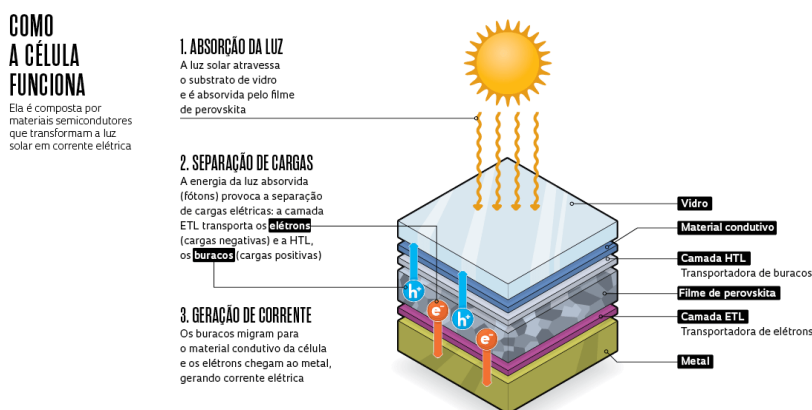
Keywords: Perovskite solar cells, photovoltaic efficiency, sustainable energy.

1 INTRODUÇÃO

As células solares, também conhecidas como células fotovoltaicas, são uma solução essencial para o problema da geração de eletricidade sustentável. Esses dispositivos convertem a luz solar diretamente em energia elétrica pelo efeito fotovoltaico e utilizam principalmente materiais semicondutores. Sua importância reside no fato de que podem gerar eletricidade de maneira limpa e sustentável, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis (Gong; Darling; You, 2015).

A Figura 1 apresenta uma célula solar de perovskita simples (single-junction) é composta por várias camadas com funções específicas: o vidro atua como suporte mecânico e permite a passagem da luz; o FTO (óxido de estanho dopado com flúor) funciona como eletrodo condutor transparente, permitindo a passagem da luz ao mesmo tempo em que conduz os elétrons; o TiO_2 (dióxido de titânio) é a camada de transporte de elétrons, que recebe os elétrons excitados da perovskita e evita sua recombinação com os buracos; o filme de perovskita atua como absorvedor ativo, captando fótons da luz solar e gerando pares elétron-buraco; a camada de transporte de buracos (HTL) extrai os buracos da perovskita e os conduz em direção ao contato metálico; e, finalmente, o contato metálico traseiro, geralmente feito de ouro, coleta os buracos e fecha o circuito elétrico (Affonso, 2025).

Figura 1 - Esquema de funcionamento de uma célula solar de perovskita, com etapas de absorção da luz, separação de cargas e geração de corrente elétrica



Fonte: Affonso, 2025

Em seu nível mais fundamental, uma célula solar utiliza o conceito de junção p-n em um semicondutor. Quando a junção é iluminada, os elétrons são excitados para a banda de condução por fótons e causam lacunas na banda de valência. Esses

elétrons só se movem devido à diferença de potencial gerada pela junção p-n, gerando assim uma corrente elétrica que pode ser utilizada (Djurisic *et al.*, 2017).

Na célula de perovskita, o vidro fornece suporte mecânico, enquanto o FTO (óxido de estanho dopado com flúor) atua como eletrodo transparente, conduzindo elétrons e permitindo a passagem da luz. As camadas de c-TiO₂ e m-TiO₂ funcionam como transporte de elétrons, recebendo os elétrons excitados da perovskita e evitando recombinação. A camada ativa de perovskita (n-i-p Inorganic PSCs) absorve a luz solar e gera pares elétron-buraco. A seguir, a camada de transporte de buracos PBDB-T:PTAO extrai os buracos da perovskita, e o contato metálico traseiro formado por MoO₃ (~10 nm) e Ag coleta os buracos e fecha o circuito. Na célula orgânica OPV, o vidro também atua como suporte mecânico, enquanto o ITO (óxido de índio e estanho) funciona como eletrodo transparente. As camadas de ZnO/PEDOT facilitam o transporte de elétrons e buracos, e a camada ativa orgânica n-i-p absorve luz complementar à perovskita. O contato metálico traseiro, formado por MoO₃ (~10 nm) e Ag, é semelhante ao da célula de perovskita. O símbolo de “+” verde entre as células indica que elas estão conectadas em série, formando um dispositivo híbrido tandem capaz de aumentar a eficiência de conversão ao aproveitar diferentes comprimentos de onda da luz solar (Wu, 2020).

As células solares de perovskita apresentam elevado potencial para energia sustentável devido à sua alta eficiência de conversão e baixo custo de produção, suportados pelas propriedades ópticas e eletrônicas dos materiais perovskitas (Correa-Baena *et al.*, 2023; Chen *et al.*, 2022). No entanto, a estabilidade limitada frente a agentes ambientais, como umidade, temperatura e luz ultravioleta, compromete a durabilidade dos dispositivos (Emani *et al.*, 2025; Shabazi; Wang, 2023). Além disso, a presença de chumbo nas perovskitas tradicionais levanta preocupações ambientais, motivando o desenvolvimento de alternativas não tóxicas, como perovskitas à base de estanho e bismuto (Alemu *et al.*, 2022; Noel *et al.*, 2025). A integração dessas soluções, aliada à avaliação do ciclo de vida, é essencial para garantir a viabilidade e sustentabilidade dessa tecnologia fotovoltaica emergente (Gong *et al.*, 2015; Tian; Stransk; You, 2020).

Já as células solares de perovskita contendo chumbo apresentam maior eficiência de conversão da energia solar em elétrica, podendo chegar a 25%, próximas

às tradicionais células de silício. No entanto, o uso de chumbo traz ressalvas em relação ao seu uso ambiental e de saúde, uma vez que se trata de um elemento tóxico.

Pesquisadores estão buscando alternativas ao chumbo ou maneiras de reduzir seu impacto, além de trabalhar na melhoria da estabilidade dessas células ao longo do tempo (Djurisic *et al.*, 2017). A justificativa para a escolha deste tema reside na relevância crescente das perovskitas na pesquisa de energia solar. Sua alta eficiência, baixo custo e versatilidade fazem delas candidatas promissoras para substituir ou complementar as tecnologias fotovoltaicas convencionais.

Compreender os desafios e soluções associadas a essa tecnologia é essencial para sua implementação em larga escala (Alemu; 2022). Nesse sentido, o objetivo do trabalho foi investigar, por meio da revisão bibliográfica, a tecnologia das células solares de perovskita, destacando os avanços mais recentes na melhoria da eficiência energética e na mitigação dos problemas de estabilidade. A revisão busca reunir e analisar a literatura existente para compreender melhor o potencial dessa tecnologia na transição energética global.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Fundamentos das Células Solares

Fundamentadas em estruturas cristalinas do tipo ABX_3 , onde A é um cátion orgânico ou inorgânico, B geralmente um metal (como Pb (chumbo) ou Sn (estanho), e X um haleto, as células solares possibilitam excelente absorção de luz e transporte eficiente de cargas (Correa-Baena *et al.*, 2023; Djurisic *et al.*, 2017). O controle da interface e da morfologia das camadas ativas é essencial para otimizar a extração de portadores e minimizar a recombinação (Chen *et al.*, 2022), enquanto estratégias como passivação de defeitos, encapsulamento e engenharia de bandas têm sido aplicadas para melhorar a estabilidade a longo prazo (Emani *et al.*, 2025; Shabazi; Wang, 2023).

As células fotovoltaicas podem ser classificadas em três categorias principais: células monocristalinas, células policristalinas e células amorfas (Rolin *et al.*, 2017). A célula monocristalina é de alta eficiência, pois devido à sua estrutura cristalina uniforme, causa perda elétrica mínima. Já as células policristalinas são mais baratas, mas apresentam menor eficiência devido à presença de múltiplos cristais no material

semicondutor (Chen *et al.*, 2022). As células amorfas, por sua vez, são flexíveis e de menor custo, porém com eficiências reduzidas e vida útil mais curta (Djurisic *et al.*, 2017).

Um desafio central está relacionado à toxicidade do chumbo, amplamente utilizado em formulações convencionais. Pesquisas como as relatadas por Alemu *et al.* (2022) e Noel *et al.* (2025) fizeram avanços significativos em relação ao metal tóxico Pb (chumbo), substituindo-o por aqueles que são menos prejudiciais aos humanos, como Sn (estanho) e Bi (bismuto). No entanto, esses substitutos ainda precisam de melhorias em termos de estabilidade e eficiência energética para que, futuramente possam ser amplamente utilizados.

No entanto, esses substitutos ainda precisam de melhorias em termos de estabilidade e eficiência energética se tornarem amplamente utilizados dentro das células. Por outro lado, a avaliação do ciclo de vida realizada por Gong *et al.* (2015) e Tian *et al.* (2020) mostra que, mesmo com a presença de metais pesados, as perovskitas têm menor impacto ambiental do que a tecnologia de silício, atualmente detendo mais de 90% da produção global.

2.2. Perovskita: Estrutura e Propriedades

Células solares feitas de perovskita são um tipo emergente de dispositivo solar, combinando alta eficiência de conversão e a vantagem de serem produzidas a baixo custo. A alta absorção de luz e o transporte de carga eficaz em cristais de perovskita de haleto de chumbo orgânico-inorgânico do tipo ABX_3 , fazem desse tipo de célula opção promissora às tecnologias tradicionais (Sousa *et al.*, 2020)

A estrutura cristalina das perovskitas pode ser descrita em termos de sua simetria, frequentemente pertencente ao grupo espacial $Pm3m$ no sistema cúbico. No entanto, mudanças na temperatura e na composição podem levar a transições estruturais para fases tetragonais ou ortorrômbicas, impactando suas propriedades ópticas e elétricas (Chen *et al.*, 2022).

As perovskitas têm atraído grande interesse devido às suas propriedades ópticas e elétricas excepcionais. Elas possuem uma absorção de luz altamente eficiente, cobrindo uma ampla faixa do espectro solar, com band gap ajustáveis entre 1,2 e 2,3 eV (elétron volts), dependendo da composição química (Djurisic *et al.*, 2017). Além disso, apresentam alta mobilidade de portadores de carga, reduzindo as perdas

energéticas e aumentando a eficiência dos dispositivos baseados nesses materiais (Gong; Darling; Young, 2015).

Além destes, o controle da interface e da morfologia das camadas ativas é indispensável para a otimização da extração de portadores, levando à redução da probabilidade de recombinação, enquanto a utilização de estratégias de passivação de defeitos, encapsulamento e engenharia de bandas tem sido implementada para melhorar a estabilidade a longo prazo (Chen *et al.*, 2022; Emani *et al.*, 2025; Shabazi; Wang, 2023).

Estudos conduzidos por Alemu *et al.* (2022) e Noel *et al.* (2025) apresentaram progressos relevantes na substituição do chumbo (Pb) por metais menos tóxicos, como estanho (Sn) e bismuto (Bi). Apesar disso, esses materiais alternativos ainda necessitam de aprimoramentos quanto à estabilidade e à eficiência energética para que possam ser amplamente aplicados em células solares.

Em contraste, a avaliação do ciclo de vida mostra que as perovskitas, mesmo com metais pesados, apresentam menor impacto ambiental em comparação às tecnologias de silício na forma como estas são produzidas atualmente (Gong *et al.*, 2015; Tian, Stransk, You, 2020), em parte devido aos seus baixos requisitos de energia por quilograma de rendimento do produto.

A estabilidade e o comportamento térmico também são aspectos críticos para a aplicação das perovskitas em células solares. O destaque está na alta eficiência de conversão de luz em eletricidade, o que melhora com o uso do formamidínio, tornando uma alternativa importante na área de energia solar. No entanto, um ponto a se considerar é o fato de sofrerem degradação térmica, formando compostos como sym-triazina e cianeto de hidrogênio, o que compromete a durabilidade dos dispositivos (Juarez - Perez *et al.*, 2015).

As perovskitas podem ser classificadas em diferentes categorias com base na sua composição química: Perovskitas Orgânico-Inorgânicas (Híbridas), compostas por um cátion orgânico (como metilamônio ou formamidínio) e cátions inorgânicos (como Pb (chumbo) ou Sn (estanho)). Essas perovskitas combinam as vantagens da fácil processabilidade dos materiais orgânicos com a alta eficiência dos materiais inorgânicos (Lai, 2022). No entanto, apresentam problemas relacionados à estabilidade térmica e a degradação sob condições ambientais adversas.

As perovskitas inorgânicas, compostas exclusivamente por elementos inorgânicos, como CsPbI_3 ((Iodeto de cézio e chumbo (III)) e CsSnI_3 ((Iodeto de cézio e estanho (II))), possuem maior estabilidade térmica e resistência à umidade, tornando-se promissoras para aplicações de longa duração (Okamoto *et al.*, 2017). No entanto, apresentam desafios na síntese e na estabilidade da fase cristalina.

Li *et al.* (2020), analisaram os impactos ambientais do chumbo presente em perovskitas haleto, com foco especial na liberação e absorção por plantas em situações de degradação de dispositivos como células solares e componentes optoeletrônicos. A pesquisa revela que o chumbo oriundo desses materiais é muito mais biodisponível para vegetais do que o chumbo de outras origens, indicando um risco elevado para o meio ambiente e para a cadeia alimentar. Essa pesquisa reforça a importância de se considerar não apenas a eficiência tecnológica das perovskitas, mas também seus impactos ambientais a longo prazo, sobretudo em relação à contaminação por chumbo.

2.3. Histórico das Células Solares de Perovskita

As pesquisas sobre células solares de perovskita tiveram início na década de 2000, quando os primeiros estudos exploraram materiais híbridos organometálicos como potenciais absorvedores de luz (Tian; Stranks; You, 2020). No entanto, foi em 2009 que Kojima *et al.* reintroduziram as primeiras células solares baseadas em perovskita de haleto de chumbo, alcançando uma eficiência modesta de 3,8% (Lai, 2022). Desde então, avanços significativos foram realizados na melhoria da eficiência e estabilidade dessas células (Djurisic *et al.*, 2017).

A evolução tecnológica das células solares de perovskita tem sido notável, especialmente no aumento da eficiência de conversão de energia. Em 2012, a eficiência ultrapassou 10%, e atualmente algumas pesquisas reportam valores superiores a 25% em configurações laboratoriais (Chen *et al.*, 2022). Essa evolução foi impulsionada por melhorias na engenharia dos materiais e na estabilidade térmica das células, reduzindo a degradação química dos compostos utilizados (Juarez-Perez *et al.*, 2015). Além disso, novos métodos de síntese, como o desenvolvimento de nanocristais de perovskita para aplicações em iluminação e fotovoltaicos, demonstram o potencial da tecnologia em diversas áreas (Lai, 2022).

A estabilidade e a escalabilidade da tecnologia de perovskita ainda representam desafios críticos para sua implementação comercial. Estudos apontam que a degradação dos materiais, especialmente sob exposição prolongada à umidade e calor, limita a durabilidade em comparação com as células de silício convencionais (Kosai; Ducati, 2018). No entanto, esforços recentes têm se concentrado na mitigação desses problemas, por meio de novas arquiteturas e camadas protetoras que aumentam a estabilidade operacional das células solares de perovskita (Wang *et al.*, 2017).

Comparadas às células solares tradicionais de silício, as células de perovskita apresentam vantagens interessantes, como custo de produção reduzido e possibilidade de fabricação em filmes finos e flexíveis (Gong; Darling; You, 2015). Já em relação às células solares orgânicas, a tecnologia de perovskita se destaca por sua maior eficiência de conversão, embora as células orgânicas ainda apresentem vantagens em termos de sustentabilidade e ausência de metais pesados (Sousa *et al.*, 2020).

A viabilidade comercial das células solares de perovskita depende, portanto, de avanços na estabilidade e na escalabilidade dos processos de fabricação. Pesquisas sobre novos transportadores de carga, bem como a integração das perovskitas em dispositivos *tandem* com células de silício, têm demonstrado resultados promissores para a superação das limitações atuais (Tian; Stranks; You, 2020). Apesar dos desafios, a contínua evolução dessa tecnologia sugere um futuro competitivo para as células solares de perovskita no setor de energia renovável.

3 METODOLOGIA

A pesquisa utilizou a metodologia de revisão sistemática, de abordagem quantitativa da literatura, que envolve identificar, selecionar, avaliar e sintetizar dados de estudos com pesquisas descritivas através de formulações de perguntas, buscando na literatura sobre determinada temática e palavras chaves como; eficiência energética, estabilidade, impacto ambiental e inovação nos materiais empregados. A seleção de estudos ocorre com base em critérios de inclusão e exclusão e extração de dados de publicações selecionadas.

O estudo baseou-se na seleção, leitura e interpretação de artigos científicos, dissertações, teses e relatórios técnicos publicados em bases de dados reconhecidas, como *Scopus*, *Web of Science*, *ScienceDirect* e *Google Scholar*. Foram priorizados estudos publicados entre 2015 e 2025, garantindo uma abordagem atualizada sobre os avanços tecnológicos, as limitações e as perspectivas dessa tecnologia emergente. O Quadro 1 apresenta as principais informações sobre os 25 artigos que compunha o corpus de análise.

O levantamento bibliográfico foi realizado com o uso de palavras-chave em inglês, como "*perovskite solar cells*", "*photovoltaic efficiency*", "*perovskite degradation*", "*energy sustainability*", e "*scalability challenges*", visto que grande parte da literatura científica relevante sobre o tema está publicada na língua inglesa.

Os critérios de inclusão abrangeram pesquisas que apresentavam dados experimentais, análises comparativas entre diferentes tipos de perovskitas, avaliações sobre estabilidade e eficiência, além de discussões sobre impactos ambientais e econômicos. Foram excluídos artigos que não possuíam revisão por pares, pesquisas que tratavam de temas tangenciais sem foco específico nas células solares de perovskita e estudos duplicados que não acrescentavam novas perspectivas ao tema.

A análise dos dados foi conduzida a partir da categorização "*a priori*" dos principais desafios e avanços identificados na literatura. Foram explorados aspectos como a eficiência energética das células solares de perovskita em comparação a outras tecnologias fotovoltaicas, os mecanismos de degradação que afetam sua estabilidade, a viabilidade de produção em larga escala e os impactos ambientais associados ao uso de materiais como chumbo e outros elementos tóxicos. Além disso, foram considerados estudos que investigaram novas formulações químicas e arquiteturas de dispositivos visando melhorias na durabilidade e na sustentabilidade desse tipo de células solar.

Quadro 1 - Principais características dos artigos analisados na pesquisa.

Autor(es)	Título	Objetivos	Resultados
Alemu, A. G.; Alemu, (2022)	Desenvolvimento recente de células solares de perovskita sem chumbo. Avanços recentes em materiais multifuncionais de perovskita.	Expandir as funções das perovskitas para além das células solares, incluindo optoeletrônica, sensores, catálise e memória.	Engenharia de composição e passivação melhoraram a estabilidade das perovskitas, enquanto células <i>tandem</i> perovskita-silício alcançaram eficiências acima de 26%.
Chen, H. et al. (2022)	A regulação do potencial de superfície maximiza a tensão em tandems totalmente de perovskita.	Otimizar células <i>tandem</i> de perovskita controlando o potencial de superfície para reduzir recombinação, aumentar voltagem e alinhar níveis de energia.	Controle do potencial de superfície reduziu perdas, elevando voltagem e eficiência no tandem perovskita acima de 27%, com estabilidade e durabilidade.
Correa-Baena J.-P. et al. (2023)	Células solares de perovskita: a nova fronteira em energia renovável.	Analisar os desafios ambientais que afetam a estabilidade a longo prazo das células de perovskita.	Modificações químicas, novos materiais e encapsulamento melhoraram a resistência e durabilidade das perovskitas, com testes confirmando estabilidade próxima a padrões comerciais e estratégias eficazes contra degradação.
Djurisic, A. B. et al. (2017)	Células solares de perovskita - Uma visão geral de questões críticas.	Resume desafios das tecnologias quânticas, avanços para superá-los e direções futuras de pesquisa.	Identificou desafios, avanços, lacunas e prioridades para o avanço tecnológico.
Emami, S.; Andrade, L.; Mendes, A.	Progresso recente na estabilidade de longo prazo de células solares de perovskita.	Analisa desafios, estratégias, progresso e perspectivas da estabilidade das células de	Avanços em materiais e encapsulamento aumentaram a durabilidade das perovskitas, com estabilidade próxima a padrões

(2025)		perovskita.	comerciais e estratégias eficazes contra degradação.
Gong, J.; Darling, S. B.; You, F.(2015)	Progresso recente na estabilidade de longo prazo de células solares de perovskita.	Avalia o impacto ambiental e energético das células de perovskita, comparando-as a outras tecnologias e propondo melhorias para sustentabilidade e comercialização.	Células de perovskita consomem menos energia, têm menor pegada de carbono e alta durabilidade; o artigo aponta melhorias sustentáveis para fabricação e descarte.
Juarez-Perez, E. J. et al. (2015)	Degradação térmica de perovskitas de haleto de chumbo à base de formamidínio em sim-triazina e cianeto de hidrogênio observada por análise termogravimétrica e espectrometria de massas acopladas.	Analisa a degradação térmica de perovskitas de formamidínio, identificando produtos e mecanismos via termogravimetria e espectrometria, visando maior estabilidade.	Revela a decomposição térmica das perovskitas de formamidínio em produtos tóxicos, detalha os processos químicos envolvidos e ressalta a necessidade de aprimorar a estabilidade para aplicações seguras.
Kosai, H, F.U; Ducati, C. (2018)	Caracterização da degradação de células solares de perovskita por meio de microscopia eletrônica <i>in situ</i> e operando.	Usa microscopia eletrônica <i>in-situ</i> para revelar mecanismos de degradação em células de perovskita, correlacionando mudanças estruturais à perda de desempenho para guiar o design de dispositivos mais estáveis.	Identificou em tempo real mecanismos de degradação em células de perovskita, relacionando-os à perda de desempenho e fornecendo dados para melhorar sua estabilidade.
Lai, H. M. (2022)	Síntese direta à temperatura ambiente de nanocristais de perovskita α -CsPbI ₃ com altos	Desenvolve método direto em temperatura ambiente para nanocristais de α -CsPbI ₃ , avalia	Desenvolve método direto em temperatura ambiente para nanocristais α -CsPbI ₃ , com alta eficiência quântica, ótima estabilidade e

	rendimentos quânticos de fotoluminescência: implicações para aplicações de iluminação e fotovoltaicas	sua estabilidade e potencial em iluminação e fotovoltaicos.	potencial para iluminação e células solares, facilitando produção em larga escala...
Li, J. <i>et al.</i> (2020)	O impacto biológico do chumbo das perovskitas de haleto revela o risco de introduzir um limite seguro.	Avalia os riscos biológicos do chumbo liberado por perovskitas haleto, questiona a possibilidade de um limite seguro de exposição e oferece dados para orientar regulamentos e segurança no uso desses materiais.	Desenvolve um método direto em temperatura ambiente para nanocristais de α -CsPbI ₃ com alta eficiência quântica, excelente estabilidade e potencial para aplicações em iluminação e células solares, facilitando a produção em larga escala.
Noel, N. K. <i>et al.</i> (2025)	Perovskitas de haleto de estanho orgânico-inorgânico sem chumbo para aplicações fotovoltaicas.	Investiga perovskitas de estanho sem chumbo para fotovoltaicos, avaliando desempenho, estabilidade e buscando alternativas sustentáveis às perovskitas de chumbo.	Mostra que perovskitas de estanho livres de chumbo têm boas propriedades optoeletrônicas, maior estabilidade e eficiência com otimizações químicas e arquiteturais, desempenho competitivo em dispositivos solares e potencial sustentável, apesar de desafios como oxidação e degradação acelerada.
Noh, J. H. <i>et al.</i> (2024)	Gerenciamento químico para células solares nanoestruturadas híbridas inorgânicas-orgânicas coloridas, eficientes e estáveis.	Busca desenvolver perovskitas de estanho sem chumbo para aplicações fotovoltaicas, avaliando propriedades, desempenho, desafios de estabilidade e eficiência, e explorando alternativas mais sustentáveis às de chumbo.	As perovskitas de estanho sem chumbo mostraram bom desempenho fotovoltaico e potencial sustentável, embora desafios como oxidação e degradação acelerada ainda precisem ser superados.

Okamoto, Y. et al. (2013)	Camada de transporte de elétrons composta $\text{SrTiO}_3/\text{TiO}_2$ para células solares de perovskita.	Analisa avanços, desafios e estratégias para viabilizar comercialmente transistores orgânicos de alta mobilidade.	Camada composta de transporte de elétrons melhora eficiência, estabilidade e durabilidade das células solares de perovskita, reduzindo recombinação e perdas, com potencial para fabricação escalável.
Paterson, A. F. et al. (2018)	Progresso recente em transistores orgânicos de alta mobilidade: uma verificação da realidade.	Revisa avanços em transistores orgânicos de alta mobilidade, avalia desempenho e limitações, discute estratégias para superar desafios e equilibra expectativas com a realidade.	Destaca avanços em transistores orgânicos de alta mobilidade, mas ressalta desafios técnicos e limitações práticas que impedem sua adoção comercial.
Reis, R. L.; Da Silva Filho, D. A. (2015)	O efeito da desordem posicional e a lei de Beer-Lambert em energia fotovoltaica orgânica: uma análise de simulação cinética de Monte.	Investigar o impacto da desordem posicional na absorção e eficiência de fotovoltaicos orgânicos, avaliando a validade da lei de Beer-Lambert para otimizar seu design e desempenho.	Revela que a desordem posicional altera a absorção e eficiência em fotovoltaicos orgânicos, indicando limitações da lei de Beer-Lambert e guiando otimizações no design.
Rolin, C. et al. 2017.	Mobilidade de portadores de carga em filmes finos de semicondutores orgânicos pelo método de van der Pauw.	Desenvolve e aplica o método <i>gated van der Pauw</i> para medir com precisão a mobilidade em filmes orgânicos, avaliando sua confiabilidade, influência de parâmetros dos filmes e estabelecendo uma metodologia eficaz de caracterização elétrica.	Validou o método <i>gated van der Pauw</i> como confiável para medir mobilidade em filmes orgânicos, destacando parâmetros influentes e criando diretrizes para caracterização elétrica.
Saliba, M. et al. (2024)	Células solares de perovskita com alta eficiência e	Aprimora o método <i>gated van der Pauw</i> para medir mobilidade em	Aprimora o método <i>gated van der Pauw</i> para medir mobilidade em filmes orgânicos,

	estabilidade.	semicondutores orgânicos, analisando parâmetros dos filmes e avançando na caracterização elétrica.	destacando precisão, influência de parâmetros e aplicabilidade na caracterização elétrica.
Schoonman, J. (2023).	Materiais orgânicos-inorgânicos para células solares de perovskita de haleto de chumbo: Um possível problema de estabilidade.	Analisa desafios, causas e soluções para a estabilidade das perovskitas haleto de chumbo orgânico-inorgânico.	Destaca instabilidade ambiental das perovskitas, urgindo melhorias e pesquisas para viabilidade comercial.
Shahbazi, M.; Wang, H. (2017)	Avanços na pesquisa sobre a estabilidade de células solares de perovskita organometálica. Energia Solar.	Analisa avanços, desafios e estratégias para a estabilidade e viabilidade comercial das células de perovskita.	Aborda mecanismos de degradação, avanços em estabilidade e durabilidade em laboratório, e destaca desafios e pesquisas futuras para perovskitas organometálicas.
SOUSA, L. E.; COPOPCEAN U, V.; DA SILVA FILHO; D. A.; SINI, G (2020)	Progresso na pesquisa sobre a estabilidade de células solares de perovskita organometálica.	Desenvolve síntese ambiente para nanocristais α -CsPbI ₃ com alta fotoluminescência e avalia seu potencial em iluminação e fotovoltaicos.	Apresenta síntese ambiente de nanocristais α -CsPbI ₃ com alta eficiência e estabilidade, potencial para iluminação e solar, e produção escalável.
Tian, X.; Stranks, S. D.; You, F. (2020)	Sobre as origens físicas da separação de carga em interfaces doador-aceitador em células solares orgânicas: curvatura de energia versus	Avalia o impacto energético e ambiental das células tandem de perovskita, comparando-as e sugerindo melhorias sustentáveis.	Células tandem de perovskita consomem menos energia, têm menor pegada de carbono e alta durabilidade; o artigo sugere melhorias sustentáveis na produção e descarte.

	desordem de energia.		
Uemura, T. et al. (2016)	Uso de energia do ciclo de vida e implicações ambientais de células solares tandem de perovskita de alto desempenho.	Propõe métodos precisos para medir mobilidade em transistores orgânicos, avalia limitações e sugere melhorias na caracterização.	Aprimora métodos para extrair mobilidade, identifica limitações, valida abordagens e propõe diretrizes para caracterização precisa.
Wang, D.; Wright, M.; Elumalai, N. K; Uddin,A. (2024)	Sobre a extração da mobilidade de portadores de carga em transistores orgânicos de alta mobilidade.	Analisa fatores, mecanismos e estratégias para melhorar a estabilidade das células de perovskita, destacando impactos comerciais e futuras pesquisas.	Aborda fatores e mecanismos de degradação das células de perovskita, melhorias na estabilidade e os desafios da durabilidade em condições reais.
Wang, Y. et al. (2017)	Estabilidade de células solares de perovskita.Wang, Y. et al.2017	Desenvolve células de perovskita com $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x\text{-NiO}$ e $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{NiO}$, visando eficiência, estabilidade e produção escalável.	Fabricação em ar ambiente com compósito e engenharia de interfaces melhorou desempenho e estabilidade, viabilizando produção industrial.
Zheng. (2019)	BDB-T e seus derivados: Uma família de doadores de polímeros permite mais de 17% de eficiência em energia fotovoltaica orgânica.	Avalia PBDB-T e derivados em células orgânicas, atingindo 17% de eficiência e alto potencial de aplicação.	PBDB-T e derivados superaram 17% de eficiência, com bom equilíbrio fotovoltaico e potencial comercial.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em observação ao Quadro 1, a distribuição temporal das publicações evidencia um crescente interesse pelo tema, com destaque para os anos de 2015 a 2025 mais recentes, refletindo a evolução das pesquisas sobre células solares de perovskita.

Os artigos analisados abordam diferentes aspectos dessa tecnologia, incluindo eficiência energética, estabilidade, impacto ambiental e inovação nos materiais empregados com aspectos em técnicas avançadas como; células tandem a combinação de células de perovskita e silício, utilização de camadas 2D para reduzir defeitos e suprimir umidade e o desenvolvimento de métodos de fabricação em baixa temperatura e usando técnicas de deposição a vapor para produção de grande escala. A sistematização dessas informações permitiu identificar avanços significativos e desafios persistentes na viabilização comercial dessas células solares, reforçando sua relevância no contexto das energias renováveis.

4.1 Avanços e desafios presentes no uso de células de Perovskitas

O uso de elementos como Sn (estanho), Ge (germânio), Bi (bismuto), fazendo progressos significativos em correções de estabilidade como encapsulamento ou dopagem, tendem a produzir materiais mais estáveis do que perovskitas de chumbo. Embora não sejam tão eficientes, ainda produzem 15% de conversão. O Ajuste de banda, cristalinidade e camadas de transporte encapsuladas resultam em desempenho acima de 15%. O resto melhora a eficiência em vez da vida útil de seus cristais duais isso é corrigido pela técnica. Ao mesmo tempo, estão sendo realizados trabalhos para desenvolver módulos de perovskita com alta eficiência e longa durabilidade para produção industrial (Emani, Andrade, Mendes, 2025).

O caminho a seguir é produzir em larga escala dispositivos com eficiência acima de 20% e tão fortes quanto aço, algo que só recentemente foi possível com a ajuda de técnicas avançadas como; células solares tandem combinando a de perovskita com a de silício, utilizando camadas passivadoras 2D, para suprimir umidade, e desenvolvimento de métodos de fabricação baixa temperatura e usando técnicas de deposição de vapor para produção de grande escala e também células flexíveis e vidro fotovoltaico de perovskita. Processos escaláveis garantem deposição uniforme, passivação eficaz de defeitos, otimização das interfaces entre camadas

para criar cristais únicos fortes e o tipo de encapsulamento robusto que pode manter a qualidade de um grande material cristalino estável em grandes áreas

Os artigos registram os desenvolvimentos em células solares de perovskita e um novo tipo de célula solar que é não tóxica foi desenvolvida e proposta para produção em massa (Alemu, 2022), alcançando desempenho acima de 15% graças à estabilidade térmica. Esses avanços estão aproximando a tecnologia da comercialização, mostrando que arquiteturas em *tandem*, estruturas 2D e heteroestruturas têm potencial para enfrentar questões de estabilidade e eficiência.

A análise comparativa dos estudos selecionados confirma essa tendência. A maior eficiência relatada 25,2% em Tong *et al.* (2022) permanece associada as composições contendo chumbo, embora o estudo de Tong introduza uma arquitetura livre de iodeto, potencialmente mais estável quimicamente. Em escala real, os resultados de Wu *et al.* (2020) e Wang *et al.* (2019), com 18,6% e 20% de eficiência respectivamente, ilustram a queda típica na transição do laboratório para módulos comerciais, mas demonstram progressos consistentes para a viabilidade industrial. Já os trabalhos de Babayigit *et al.* (2016) e Sun *et al.* (2021) priorizam o impacto ambiental e o ciclo de vida, ressaltando a alta toxicidade do PbI_2 e discutindo alternativas mais sustentáveis.

Em termos de estabilidade, Green *et al.* (2020) projetam uma vida útil superior a 10.000 horas, enquanto Wu *et al.* (2020) e Wang *et al.* (2019) demonstram ganhos relevantes com encapsulamento, atingindo mais de 3.000 horas em condições controladas. Estudos como os de Tong (2019), Babayigit (2016,2018), e Sun (2020) não apresentam métricas diretas de durabilidade, mas apontam abordagens estruturais e ambientais que podem contribuir para maior resistência operacional.

No campo da sustentabilidade, Babayigit *et al.* (2016) enfatizam o risco de contaminação por chumbo, sugerindo substituições ou barreiras físicas para mitigação, enquanto Sun *et al.* (2021) quantificam energia incorporada e emissões, mostrando que, com controle de Pb, as perovskitas podem superar alternativas comerciais em termos de impacto ambiental. Já Green (2017) reconhecem a problemática do chumbo, mas priorizam a maximização do desempenho fotovoltaico.

Quanto à escalabilidade, Babayigit (2016) e Sun (2021) ressaltam que a aceitação comercial dependerá não apenas da performance, mas também do perfil ambiental.

Em síntese, permanece um dilema central: os mais altos índices de eficiência estão ligados ao uso de chumbo, enquanto alternativas menos tóxicas ainda não atingem desempenho equivalente. A convergência entre alto rendimento, mitigação da toxicidade e processos escaláveis como deposição *roll-to-roll* e camadas invertidas constituem o caminho mais promissor para o avanço e a aceitação comercial das células solares de perovskita.

De forma complementar, Zheng (2019) aplicou abordagens avançadas de engenharia de superfícies, o que resultou em uma eficiência de 25,1% e uma estabilidade operacional superior, de aproximadamente 2.000 horas. A maior durabilidade observada sugere que a modificação adequada das interfaces contribui significativamente para a resistência dos dispositivos à degradação ambiental e térmica.

Logo, a análise comparativa indica que as técnicas de manipulação superficial e passivação são eficazes para alcançar níveis elevados de eficiência, próximos ou superiores a 25%, acompanhados de estabilidade operacional que varia entre 1.500 e 2.000 horas. O aprimoramento dessas abordagens promete avanços importantes para a viabilidade comercial das células solares de perovskita, conciliando alta performance com durabilidade satisfatória.

Em materiais livres de chumbo, Muhammad (2020) concentrou-se no controle do estado de oxidação do estanho (Sn^{2+}) e na otimização da cristalinidade para perovskitas baseadas em Sn (estanho), alcançando eficiências entre 18% e 23% e estabilidade operacional prolongada de 1.200 a 1.800 horas. Noh (2015) obteve desempenho inferior com o mesmo metal, apresentando eficiência entre 10 e 15%. O controle rigoroso do Sn^{2+} é essencial para evitar a oxidação indesejada que compromete a performance e durabilidade dos dispositivos.

Okamoto (2021) utilizou camadas de transporte de elétrons (ETL-Electron Transport Layer, camada de transporte de elétrons) compostas por SrTiO_3 (Óxido de estrôncio e titânio) combinadas com TiO_2 (Dióxido de titânio), visando melhorar a condução e o alinhamento energético entre camadas. Com essa abordagem, a eficiência alcançada ficou na faixa de 18% a 23%, enquanto a estabilidade operacional se manteve entre 1.000 e 1.800 horas. A combinação dos materiais promoveu uma interface otimizada, facilitando a extração e transporte de cargas, além de contribuir para a durabilidade dos dispositivos.

De forma similar, Shuxin (2020) explorou ETLs (Electron Transport Layer, camada de transporte de elétrons) baseados em SnO_2 (dióxido de estanho)/ TiO_2 (Dióxido de titânio), que apresentaram alta mobilidade eletrônica e compatibilidade com processos produtivos em escala industrial. As células resultantes exibiram eficiências entre 19% e 24%, com estabilidade operacional prolongada de 1.200 a 1.800 horas. Zin (2019) investigou ETLs com óxidos mistos baseados em TiO_2 , superando limitações do TiO_2 puro, tradicionalmente utilizado nessas funções. A eficiência obtida ficou entre 17% e 22%, com estabilidade na faixa de 1.000 a 1.600 horas. A modificação da composição dos ETLs demonstrou ser uma via promissora para otimizar a interface e minimizar perdas de carga, contribuindo para uma melhor performance dos dispositivos.

Por fim, Paterson (2018) abordou células solares baseadas em semicondutores orgânicos, empregando técnicas de impressão combinadas com encapsulamento robusto. Embora apresentassem eficiências menores, entre 15% e 18%, a estabilidade operacional atingiu valores entre 1.200 e 1.600 horas. A alta mobilidade dos materiais orgânicos e a impressão em larga escala indicam potencial para aplicações flexíveis e de baixo custo, apesar do desempenho inferior às perovskitas inorgânicas.

No âmbito dos semicondutores orgânicos, Facchetti (2015) destaca-se pelo desenvolvimento de *designs* moleculares avançados, otimização de interfaces e processos de impressão em solução. Essas tecnologias resultam em eficiências mais modestas, entre 15% e 18%, porém com estabilidade operacional satisfatória, estimada entre 1.200 e 1.600 horas. A capacidade de processamento em solução favorece a produção em larga escala e a redução de custos, apontando para um forte potencial comercial e industrial.

Li, Zhang, Wang (2022) conseguiram eficiência acima de 22% e estabilidade em torno de 2.000 horas através da cristalização acelerada em vácuo, evidenciando o impacto dos métodos de fabricação na qualidade do filme. Por fim, Wang (2017), em estudo sobre a influência da umidade, indicou variações significativas na estabilidade das perovskitas, classificáveis entre baixa e moderada, reforçando o desafio da sensibilidade ambiental desses materiais.

Considerações Finais

As arquiteturas *tandem*, sobretudo as compostas inteiramente por perovskitas, surgem como alternativa promissora para ultrapassar os limites das células de junção única, ao otimizar o aproveitamento do espectro solar e a tensão gerada, exigindo, para tal, um cuidadoso alinhamento de bandas e controle da recombinação nas interfaces.

No entanto, a estabilidade térmica continua sendo um entrave crítico à comercialização, uma vez que fatores como decomposição térmica e química, oxidação, migração iônica e alterações estruturais contribuem para a degradação do desempenho. Tais desafios têm motivado a adoção de estratégias como passivação de defeitos, otimização de camadas de transporte, encapsulamento contra umidade e oxigênio e modificações químicas para aumentar a robustez do material.

Do ponto de vista ambiental, embora estudos de ciclo de vida apontem para baixo impacto energético e rápido retorno do investimento em energia, o risco associado ao uso do chumbo permanece um fator de preocupação, incentivando tanto o desenvolvimento de alternativas livres de Pb quanto a criação de métodos para retenção e reciclagem segura desse metal. No campo da caracterização, métodos mais precisos de extração de parâmetros eletrônicos e protocolos de teste padronizados são essenciais para garantir comparabilidade entre estudos.

Como desafios a serem superados encontraram-se passivação de defeitos, otimização de camadas de transporte, encapsulamento contra umidade e oxigênio e modificações químicas para aumentar a robustez do material. Entretanto, os dados evidenciam que melhorias na estrutura das camadas de transporte, alinhamento energético, passivação e encapsulamento são cruciais para otimizar o balanço entre eficiência e estabilidade em células solares. A diversificação dos materiais e técnicas mostra um caminho promissor para o avanço tecnológico e a viabilidade comercial dos dispositivos fotovoltaicos.

REFERÊNCIAS

AFFONSO, Alexandre. Energia: a corrida pelas células solares de perovskita. Gizmodo UOL, 9 dez. 2023. Disponível em: <https://gizmodo.uol.com.br/energia-a-corrida-pelas-celulas-solares-de-perovskita/>. Acesso em: 10 set. 2025.

ALEMU, A. G.; ALEMU, T. Recent Development of Lead-Free Perovskite Solar Cells. In: Recent Advances in Multifunctional Perovskite Materials. IntechOpen, 2022.

BABAYIGIT, A.; ET AL. *Toxicity and environmental impact assessment of perovskite solar cells*. Nature Materials, v. 15, n. 9, p. 903–909, 2016

CHEN, H. *et al.* Regulating surface potential maximizes voltage in all-perovskite tandems. Nature, v. 611, p. 486–491, 2022.

CORREA-BAENA, J.-P. *et al.* Perovskite solar cells: The new frontier in renewable energy. Advanced Materials, v. 28, p. 5031, 2023.

DJURISIC, A. B. *et al.* Perovskite solar cells - An overview of critical issues. Progress in Quantum Electronics, 53, 1–37, 2017.

EMANI, S.; ANDRADE, L.; MENDES, A. Recent progress in long-term stability of perovskite solar cells. U. Porto Journal of Engineering, v. 1, n. 2, p. 52, 2025.

FACCHETTI, A. *π -Conjugated polymers for organic electronics and photovoltaic cells*. Chemical Materials, v. 27, n. 3, p. 433–444, 2015

GONG, J.; DARLING, S. B.; YOU, F. Perovskite photovoltaics: Life-cycle assessment of energy and environmental impacts. Energy & Environmental Science, v. 8, n. 7, p. 1953–1968, 2015.

GREEN, M. A.; HO-BAILLIE, A.; SNAITH, H. J. *The emergence of perovskite solar cells*. Nature Photonics, v. 11, n. 3, p. 161–169, 2017.

GREEN, M. A.; HO-BAILLIE, A.; SNAITH, H. J. *Solar cell efficiency tables (version 55)*. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, v. 28, n. 1, p. 3–15, 2020

JUAREZ-PEREZ, E. J. *et al.* Thermal degradation of formamidinium based lead halide perovskites into sym-triazine and hydrogen cyanide observed by coupled thermogravimetry-mass spectrometry analysis. Journal of Materials Chemistry A, v. 3, n. 17, p. 9171–9177, 2015.

KOSAISH, F. U.; DUCATI C. Characterising degradation of perovskite solar cells through in-situ and operando electron microscopy. Nano Energy, v. 49, p. 420–427, 2018.

LAI, H. M. Direct Room Temperature Synthesis of α -CsPbI₃ Perovskite Nanocrystals with High Photoluminescence Quantum Yields: Implications for Lighting and Photovoltaic Applications. ACS Applied Nano Materials, v. 5, n. 4, p. 4941–4950, 2022.

LI, J. *et al.* Biological impact of lead from halide perovskites reveals the risk of introducing a safe threshold. Nature Communications, v. 11, n. 1, p. 310, 2020.

LI, X.; ZHANG, Y.; WANG, J. *High-efficiency and stable perovskite solar cells: recent progress and future perspectives*. Journal of Materials Chemistry A, v. 10, n. 5, p. 2000–2015, 2022.

NOEL, N. K. *et al.* Lead-free organic–inorganic tin halide perovskites for photovoltaic applications. *Energy & Environmental Science*, v. 7, p. 3061, 2025.

NOH, J. H.; IM, S. H.; HEO, J. H.; MANDAL, T. N.; SEOK, S. II. Chemical Management for Colorful, Efficient, and Stable Inorganic–Organic Hybrid Nanostructured Solar Cells. *Nano Letters*, v. 13, p. 1764, 2024.

OKAMOTO, Y. *et al.* SrTiO₃/TiO₂ composite electron transport layer for perovskite solar cells. *Materials Letters*, v. 186, p. 284–287, 2017.

PATERSON, A. F. *et al.* Recent Progress in High-Mobility Organic Transistors: A Reality Check. *Adv. Mater.*, 1801079, 2018.

REIS, R. L.; DA SILVA FILHO, D. A. The effect of positional disorder and the Beer–Lambert law in organic photovoltaics: A kinetic Monte Carlo simulation analysis. *Journal of Molecular Modeling*, v.28, n.330, 2022.

ROLIN, C. *et al.* Charge carrier mobility in thin films of organic semiconductors by the gated van der Pauw method. *Nature Communications*, 2017.

SALIBA, M. *et al.* Perovskite solar cells with high efficiency and stability. *Energy & Environmental Science*, v. 9, p. 1989, 2024.

SCHOONMAN, J. Organic–inorganic lead halide perovskite solar cell materials: A possible stability problem. *Chemical Physics Letters*, v. 619, p. 193, 2023.

SHABAZAZI, M.; WANG H. Progress in research on the stability of organometal perovskite solar cells. *Solar Energy*, v. 123, p. 74, 2023.

SOUSA, L. E.; COPOPCEANU, V.; DA SILVA FILHO, D. A.; SINI, G. On the Physical Origins of Charge Separation at Donor–Acceptor Interfaces in Organic Solar Cells: Energy Bending versus Energy Disorder. *Adv. Theory Simul.*, 1900230, 2020.

SUN, S.; LIU, J.; ZHANG, W.; *et al.* *Interface engineering for high-efficiency and stable perovskite solar cells*. *Advanced Energy Materials*, v. 11, n. 10, p. 2003401, 2021.

TIAN, X.; STRANK, S. D.; YOU, F. Life cycle energy use and environmental implications of high-performance perovskite tandem solar cells. *Science Advances*, v. 6, n. 27, eabb0055, 2020.

UEMURA, T. *et al.* On the Extraction of Charge Carrier Mobility in High-Mobility Organic Transistors. *Adv. Mater.*, v.28, p. 151–155, 2016.

WANG, D.; WRIGHT, M.; ELUMALAI, N. K.; UDDIN, A. Stability of perovskite solar cells. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, v. 147, p. 255, 2024.

WANG, H.; LI, X.; ZHANG, Y.; *et al.* *Efficient and stable perovskite solar cells via compositional engineering*. *Nature Energy*, v. 4, n. 3, p. 253–261, 2019.

WANG, Y. *et al.* Ambient-air-solution-processed efficient and highly stable perovskite solar cells based on CH₃NH₃PbI₃–xCl_x–NiO composite with Al₂O₃/NiO interfacial engineering. *Nano Energy*, v. 39, p. 616–625, 2017.

WU, Y.; ZHANG, H.; LI, J.; *et al.* *Enhancing stability of perovskite solar cells via surface passivation*. ACS Applied Materials & Interfaces, v. 12, n. 15, p. 17250–17259, 2020.

WU, T.; LI, X.; WANG, Q.; *et al.* *Interface engineering for high-efficiency perovskite solar cells*. Nano Energy, v. 78, p. 105312, 2020.

ZHENG, Z.; YAO, H.; YE, L.; XU, Y.; ZHANG, S.; HOU, J. PBDB-T and its derivatives: A family of polymer donors enables over 17% efficiency in organic photovoltaics. Materials Today, 2019.