



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE ANGICOS
CURSO DE BACHARELADO EM CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

ARIANE RANIKELLY DOMINGOS MELO

**NOVAS FRONTEIRAS EM ENERGIA SOLAR: UMA ANÁLISE DO USO DE
PEROVSKITAS EM CÉLULAS FOTOVOLTAICAS**

ANGICOS

2024

ARIANE RANIKELLY DOMINGOS MELO

**NOVAS FRONTEIRAS EM ENERGIA SOLAR: UMA ANÁLISE DO USO DE
PEROVSKITAS EM CÉLULAS FOTOVOLTAICAS**

Monografia apresentada à Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como requisito
para obtenção do título de Bacharel em
Ciência e Tecnologia

Orientador: Marcos Vinícius Cândido
Henriques, Prof. Dr.

ANGICOS

2024

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

M528n Melo, Ariane Ranikelly Domingos.
Novas fronteiras em energia solar: uma análise
do uso de perovskitas em células fotovoltaicas /
Ariane Ranikelly Domingos Melo. - 2024.
50 f. : il.

Orientador: Marcos Vinícius Cândido Henriques.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e
Tecnologia, 2024.

1. Energia Solar. 2. Célula Fotovoltaica. 3.
Perovskita. 4. Eficiência Energética. I.
Henriques, Marcos Vinícius Cândido, orient. II.
Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Biblioteca Campus Angicos
Bibliotecário: Helder Romero Maia Duarte
CRB: 15/673

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

ARIANE RANIKELLY DOMINGOS MELO

**NOVAS FRONTEIRAS EM ENERGIA SOLAR: UMA ANÁLISE DO USO DE
PEROVSKITAS EM CÉLULAS FOTOVOLTAICAS**

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Ciências e Tecnologia.

Defendida em: 17 / 10 / 2024.

BANCA EXAMINADORA

Marcos Vinícius Cândido Henriques, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente

Damilson Ferreira dos Santos, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

Gislene Micarla Borges de Lima, Profa. Dra. (UFERSA)
Membro Examinadora

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder sabedoria e força para vencer todos os dias longe de casa, pois sem sua graça e proteção, nada disso seria possível.

Sou imensamente grata a minha mãe, Ariadna Domingos, e aos meus avós, José Maria e Dalvinha, por todo o amor, apoio incondicional e sacrifícios para que eu chegasse até aqui, vocês sempre foram meu alicerce e a razão pela qual persisti nos momentos mais difíceis.

Quero também agradecer aos meus irmãos, Ranielly, Leiliane, Lucas e Bruno, por sempre torcerem por mim, pelas minhas conquistas e pelas realizações dos meus sonhos, obrigada por acreditar e estarem presentes em minha vida.

Sou muito grata ao meu orientador, Marcos Vinícius, por toda ajuda, orientação e por compartilhar comigo seus conhecimentos, que foi decisivo para a conclusão deste trabalho, sua dedicação e disponibilidade foram fundamentais para a minha evolução acadêmica.

Agradeço a todos os meus amigos, meus primos do Canaã/grupinho da janta, as pessoas que a ufersa me deu o prazer de conhecer, e sou grata por ter encontrado pessoas tão especiais ao longo desse tempo, todo apoio que foi me dado foram essenciais para manter minha motivação na conclusão desse curso.

A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo.

Albert Einstein

RESUMO

A energia solar é uma fonte renovável que vem se destacando mundialmente por sua capacidade de gerar eletricidade de forma limpa e sustentável, aproveitando a luz e o calor do sol. Com o aumento da demanda por fontes energéticas alternativas, a energia solar tem sido cada vez mais explorada, especialmente em países com alta incidência de radiação solar, como o Brasil, que possui condições geográficas favoráveis para a instalação de sistemas solares fotovoltaicos. Com isso, as células solares de perovskitas emergiram como uma tecnologia promissora da terceira geração de células fotovoltaicas, devido ao seu baixo custo de produção e elevada eficiência de conversão de energia. As perovskitas, materiais com estrutura cristalina maleável, permitem a personalização de suas propriedades ópticas, eletrônicas e magnéticas, favorecendo sua aplicação em dispositivos optoeletrônicos. Foram conduzidas buscas e revisões sistemáticas de artigos científicos publicados desde 2017, focando na aplicação de perovskitas em células fotovoltaicas. Os artigos selecionados atenderam a critérios de relevância, como número significativo de citações e clareza na apresentação das informações. Assim, foram catalogados dados como referência, eficiência, método de síntese, estabilidade, tipo de perovskita e configuração das células, além da temperatura de processamento. A análise buscou identificar tendências e avanços tecnológicos na área, contribuindo para otimizar o desenvolvimento desses materiais. Os resultados indicaram uma evolução significativa na eficiência e estabilidade das células solares de perovskita nos últimos anos. Dessa forma, revelou-se que o aumento na eficiência está associado a métodos de síntese inovadores e ao uso de novas configurações de dispositivos. A temperatura de processamento e o tipo de perovskita influenciam diretamente na durabilidade das células. As tendências apontam para o desenvolvimento de técnicas que melhoram a estabilidade sem comprometer a eficiência, o que pode contribuir para a viabilidade comercial dessas tecnologias no futuro. Com o progresso contínuo na pesquisa e desenvolvimento de materiais e técnicas inovadoras, espera-se que as células solares de perovskita contribuam significativamente para a redução dos custos da energia solar e sua maior adoção global, proporcionando uma solução eficiente e acessível para o crescimento das fontes renováveis e a transição para uma matriz energética mais sustentável.

Palavras-chave: Energia Solar, Célula Fotovoltaica, Perovskita, Eficiência Energética.

ABSTRACT

Solar energy is a renewable source that has been gaining worldwide recognition for its ability to generate electricity in a clean and sustainable way, using the sun's light and heat. With the increasing demand for alternative energy sources, solar energy has been increasingly explored, especially in countries with high incidence of solar radiation, such as Brazil, which has favorable geographical conditions for the installation of photovoltaic solar systems. As a result, perovskite solar cells have emerged as a promising technology for the third generation of photovoltaic cells, due to their low production cost and high energy conversion efficiency. Perovskites, materials with a malleable crystalline structure, allow the customization of their optical, electronic and magnetic properties, favoring their application in optoelectronic devices. Systematic searches and reviews of scientific articles published since 2017 were conducted, focusing on the application of perovskites in photovoltaic cells. The selected articles met relevance criteria, such as a significant number of citations and clarity in the presentation of information. Thus, data such as reference, efficiency, synthesis method, stability, type of perovskite and cell configuration, in addition to the processing temperature, were cataloged. The analysis sought to identify trends and technological advances in the area, contributing to optimizing the development of these materials. The results indicated a significant evolution in the efficiency and stability of perovskite solar cells in recent years. Thus, it was revealed that the increase in efficiency is associated with innovative synthesis methods and the use of new device configurations. The processing temperature and the type of perovskite directly influence the durability of the cells. Trends point to the development of techniques that improve stability without compromising efficiency, which may contribute to the commercial viability of these technologies in the future. With continued progress in the research and development of innovative materials and techniques, perovskite solar cells are expected to contribute significantly to the reduction of solar energy costs and its greater global adoption, providing an efficient and affordable solution for the growth of renewable sources and the transition to a more sustainable energy matrix..

Keywords: Solar Energy, Photovoltaic Cell, Perovskite, Energy Efficiency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	–	Gerações de células solares.....	25
Figura 2	–	Estrutura da perovskita cúbica ABC_3 , onde a esfera cinza é o cátion A e as esferas azuis e vermelhas representam os íons B e C.....	26
Figura 3	–	Estrutura da perovskita ABX_3 , apresenta um arranjo octaédrico BX_6 , enquanto o maior cátion A ocupa a posição cubo-octaédrico.....	27
Figura 4	–	Estrutura cristalina da perovskita $CaTiO_3$	28
Figura 5	–	Diagramas representativos de níveis de energia de semicondutores nanocristalinos em resultado do tamanho de partícula (PQs).....	30
Figura 6	–	Espectros de fluorescência em função do tamanho dos pontos quânticos.....	31

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	–	Evolução da fonte solar fotovoltaica no Brasil.....	21
Gráfico 2	–	Matriz elétrica do Rio Grande do Norte, julho de 2014.....	23

LISTA DE MAPAS

Mapa 1	–	Localização dos parques solares em operação no RN.....	24
--------	---	--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	–	Resultado da pesquisa cienciométrica sobre trabalhos aplicando o uso de perovskita em células fotovoltaicas.....	43
----------	---	--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CdTe	Telureto de cádmio
CIGS	Disseleneto de cobre, índio e gálio
CSPs	Células solares de perovskitas
CSSC	Célula solar sensibilizada por corante
ECE	Eficiência de conversão de energia
EUA	Estados Unidos da América
GWh	Gigawatt-hora
GW	Gigawatt
MW	Megawatt
PPQ	Pontos quânticos em perovskitas
PQ	Pontos quânticos
RN	Rio Grande do Norte

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
τ	Carga
μ	Mobilidade
Å	Angstrom

SUMÁRIO

1	Introdução.....	16
2	Energia Solar e Células fotovoltaicas.....	19
2.1	Energia Solar.....	19
2.2	Panorama da Energia Solar.....	20
2.2.1	Panorama da Energia Solar no Mundo.....	20
2.2.2	Panorama da Energia Solar no Brasil.....	21
2.2.3	Panorama da Energia Solar no Rio Grande do Norte.....	22
2.3	Células Fotovoltaicas.....	24
2.3.1	Tecnologias semicondutoras em células fotovoltaicas.....	24
2.3.2	Uso da Perovskita em Célula Fotovoltaica.....	25
3	Perovskitas.....	26
3.1	Introdução às Perovskitas.....	26
3.2	Propriedades Físicas e Químicas das Perovskitas.....	29
3.3	Estabilidade das Perovskitas.....	31
3.4	Síntese e Fabricação.....	33
3.5	Aplicações Potenciais das Perovskitas.....	34
3.6	Desafios Ambientais e de Sustentabilidade.....	36
3.7	Perspectivas Futuras para a Pesquisa em Perovskitas.....	37
4	Metodologia.....	39
5	Resultados.....	41
5.1	Catálogo de Estudos em Células Fotovoltaicas de Perovskitas.....	41
6	Considerações finais.....	45
	Referências.....	47

1 INTRODUÇÃO

A energia solar fotovoltaica, é um exemplo de energia limpa que mais cresce no mundo, e o Brasil possui níveis favoráveis em condições altamente propícias de irradiação solar para a produção de eletricidade. O país reúne características naturais e geográficas excepcionais que favorecem a geração de energia solar fotovoltaica. A aplicação dessa forma de geração elétrica tem potencial para atender às demandas energéticas em centros urbanos, em comunidades rurais e otimizar os processos produtivos industriais. Além disso, a energia solar fotovoltaica apresenta a vantagem de fornecer energia durante os horários de pico, contribuindo para o reforço da segurança energética, oferecendo oportunidades significativas para a criação de empregos (OTTONELLI, 2021).

O estado do Rio Grande do Norte (RN) possui uma localização privilegiada para a produção de energia solar, situando-se em latitudes próximas à linha do equador. Essa região geográfica, que recebe níveis consideráveis de radiação solar, torna o estado particularmente propício para a implementação de sistemas de geração de energia solar fotovoltaica, aproveitando suas características geográficas favoráveis (NASCIMENTO, 2023).

Com esforços futuros voltados para aprimorar os principais componentes das células solares incluindo CSPs de banda larga, contatos superiores transparentes, design específico da célula inferior e o acoplamento óptico e elétrico entre as células superior e inferior, além de uma modelagem detalhada é possível alcançar uma alta eficiência em dispositivos de película fina que utiliza tecnologias de perovskita. Aumentar a eficiência da tecnologia atual é fundamental para tornar o uso dessas fontes renováveis mais viável e competitivo em relação às fontes de energia convencionais, permitindo gerar mais energia com menos espaço e custo, o que amplia as possibilidades de aplicação. As CSPs de haleto metálico orgânico-inorgânico, com sua rápida melhoria de eficiência, ajuste da largura de banda proibida e baixo custo de processamento, surgem como candidatos promissores para uma ampla gama de dispositivos. As células de película fina policristalina (como as que utilizam células inferiores de perovskita) são atraentes devido a características como flexibilidade, leveza e facilidade de processamento (KIM, 2019).

Em uma busca contínua por dispositivos que demonstrem eficiências superiores na conversão de energia e que sejam economicamente viáveis, as células solares de terceira

geração surgiram como tecnologias emergentes promissoras, devido ao seu baixo custo de produção, possibilidade de modificação dos materiais que compõem estes dispositivos e altas eficiências. Onde foram adotados a estrutura de montagem de uma Célula solar sensibilizada por corante (CSSC), substituíram o corante por perovskitas MAPbBr_3 e MAPbI_3 , alcançando um rendimento de 3,8%. Em 2012, propôs-se a substituição do eletrólito líquido por um eletrólito sólido, resultando em eficiências superiores a 9% para as células solares de Perovskitas. E com resultados de pesquisas e desenvolvimentos contínuos, as eficiências atuais dessas células têm alcançado resultados superiores a 25% (SOUTO, 2022).

As células de perovskita têm o nome da estrutura cristalina dos absorvedores de luz, a estrutura do mineral CaTiO_3 , compostos com estequiometria ABX_3 , nos quais A e B são cátions com coordenadas 12 e 8, e X é o ânion, frequentemente adotam essa estrutura. Entre os muitos ABX_3 , apenas alguns são apropriados como absorvedores de luz eficientes para células solares devido a requisitos como *bandgap* adequado para uma boa absorção de luz, alinhamento de nível de energia/banda com materiais em contato, longa vida útil do portador de carga (τ), e alta mobilidade (μ) (ZUO, 2016).

Há uma extensa variedade de materiais em constante crescimento no cenário científico, que permitem aplicações em dispositivos optoeletrônicos, lasers, sensores biomédicos, entre outros. Devido às características únicas dos materiais que os compõem, destaca-se a inovação em nanomateriais, especialmente nos semicondutores nanocristalinos coloidais, cujas propriedades ópticas podem ser ajustadas alterando-se a composição e o tamanho das nanopartículas (MAYRINCK, 2020).

Uma das características mais notáveis desses nanocristais, do ponto de vista tecnológico, é sua intensa luminescência, que pode ser facilmente controlada por meio da manipulação do tamanho das partículas e da passivação da superfície. Entre os nanomateriais, os semicondutores nanocristalinos, também conhecidos como Pontos Quânticos (PQ) ou semicondutores nanocristalinos coloidais, têm ganhado destaque por suas fascinantes propriedades ópticas. A fluorescência dos PQ é uma de suas características mais marcantes, com propriedades de absorção e emissão dependentes do tamanho dos nanocristais, bandas de emissão e absorção estreitas (12-42 nm), alta intensidade de luminescência, elevados rendimentos quânticos de fotoluminescência (50-90%), boa estabilidade química e resistência à fotodegradação (MAYRINCK, 2020).

Um volume considerável de pesquisas científicas recentes têm se dedicado à investigação do aprimoramento da eficiência das células fotovoltaicas que empregam perovskita, além da melhoria de propriedades como a estabilidade do material. Os avanços na eficiência de conversão energética proporcionados pelo uso de perovskita são amplamente sustentados pela literatura especializada. Esse progresso é particularmente relevante ao se considerar as condições específicas do clima semi-árido do Nordeste brasileiro (OTTONELLI, 2021).

As células solares de perovskita podem ser criadas com a utilização de materiais e técnicas de baixo custo, o que as torna altamente atraente em termos de comercialização em escala. O próprio material absorvente apresenta características únicas que oferecem muitas vantagens para a ótico-eletrônica, uma vez que muitas delas vêm da estrutura cristalina da perovskita (RONG, 2018).

É importante mencionar a eficiência de conversão de energia e a estabilidade de células solares de perovskita, para a aplicação comercial. A partir dos primeiros relatos sobre as perovskitas e as células solares à base desses materiais, diversas pesquisas têm sido voltadas para aumentar a eficiência dos dispositivos, a partir de diversas modificações estruturais, novas composições e técnicas de fabricação dos mesmos (RAPHAEL, 2018).

Apesar das células solares de perovskitas terem alcançado altas eficiências em um curto período de tempo, sua aplicabilidade prática é comprometida pela falta de estabilidade a longo prazo. Devido à presença do grupo amina em sua estrutura molecular, é vulnerável à decomposição na presença de umidade e oxigênio. Em razão dessa sensibilidade, é necessário fabricar as CSPs em ambientes controlados de atmosfera e umidade, utilizando gás inerte, a fim de garantir um desempenho elevado (SILVA, 2016).

A eficiência de reciclagem pode chegar a 85%, o que é relevante, considerando que até 78 milhões de toneladas de resíduos de painéis solares de silício serão geradas até 2050. Mais de 95% do vidro e toda a estrutura externa de alumínio podem ser reaproveitados, e os materiais restantes são incinerados para eliminar o plástico de encapsulamento, enquanto é fundido novamente para a produção de novos módulos (RONG, 2018).

Uma perspectiva que se espera é reduzir a temperatura de processamento, permitindo, assim, o uso de diferentes substratos e materiais para formação do filme, além de reduzir o custo do dispositivo (PETROVIĆ, 2015).

2 ENERGIA SOLAR E CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

2.1 Energia Solar

A energia solar é uma fonte de energia renovável que é obtida da luz e do calor emitidos pelo sol. Ela pode ser aproveitada de muitas maneiras, principalmente através de tecnologias fotovoltaicas e térmicas. Com isso, a energia solar fotovoltaica utiliza painéis solares feitos de células fotovoltaicas que convertem a luz solar diretamente em eletricidade. E esta forma de energia pode ser usada em residências, indústrias e grandes usinas solares. Por outro lado, a energia solar térmica utiliza coletores solares para absorver o calor do sol e transferi-lo para um fluido, que pode ser usado para aquecer água ou gerar eletricidade em usinas térmicas. Essa tecnologia é frequentemente utilizada para aquecimento de água residencial e industrial, bem como para geração de eletricidade em larga escala (SHIMOMAEBARA, 2022).

Essa energia sendo uma alternativa, cujo potencial de produção no Brasil é elevado, uma vez que a insolação recebida é significativamente maior do que a incidida em países cuja implementação dessa fonte energética já se encontra relativamente avançada, a fonte solar, dentre as demais alternativas renováveis, possui benefícios da localização geográfica brasileira e também dispõe da matéria prima essencial para produção do silício utilizado na fabricação das células fotovoltaicas (SHIMOMAEBARA, 2022).

Os sistemas solares fotovoltaicos são uma forma de tecnologia de energia de baixo custo e são reconhecidos como uma fonte de energia confiável, deverá crescer a sua participação na produção mundial de energia renovável dos 16% em 2020 para 47% em 2050, tornando-se a maior fonte mundial de energia renovável. Apesar da operação típica de baixo impacto, isso não significa necessariamente que a energia solar seja completamente livre de impactos ambientais e de saúde humana ao longo de seu ciclo de vida (U.S, 2021).

O futuro da energia solar é promissor, com avanços constantes, rápida expansão e desenvolvimento, e inovações que estão tornando os painéis solares mais eficientes e acessíveis. Além disso, a integração de sistemas de armazenamento de energia e a combinação com outras fontes renováveis estão melhorando a confiabilidade e a viabilidade da energia solar como uma solução sustentável para o futuro (SANTOS, 2022).

2.2 Panorama da Energia Solar

2.2.1 Panorama da Energia Solar no Mundo

A energia solar cresceu impressionantes 20.771% entre 2010 e 2022, superando o crescimento da energia eólica (1.506%). A maior parte dessa expansão veio da energia solar fotovoltaica, que representou mais de 90% da geração solar global e atingiu 99% em 2022. Durante esse período, a energia solar fotovoltaica cresceu 22.788%, onde a China liderou a geração mundial de energia solar com 428.163 GWh, seguida pelos EUA com 187.071 GWh, uma diferença de mais de 241.000 GWh. Além desses, países como os Países Baixos, Japão, Índia, Alemanha, Espanha, Austrália, Brasil e Coreia do Sul também se destacaram na geração solar. A China, em particular, instalou 106 GW de capacidade solar em 2022, correspondendo a 44% do mercado global, enquanto a União Europeia adicionou 38,9 GW, os EUA 18,6 GW e a Índia 18,1 GW. O Brasil foi o maior mercado da América Latina, instalando 9,9 GW, ocupando a quarta posição global em capacidade anual instalada e a décima em capacidade acumulada (LIMA, 2024).

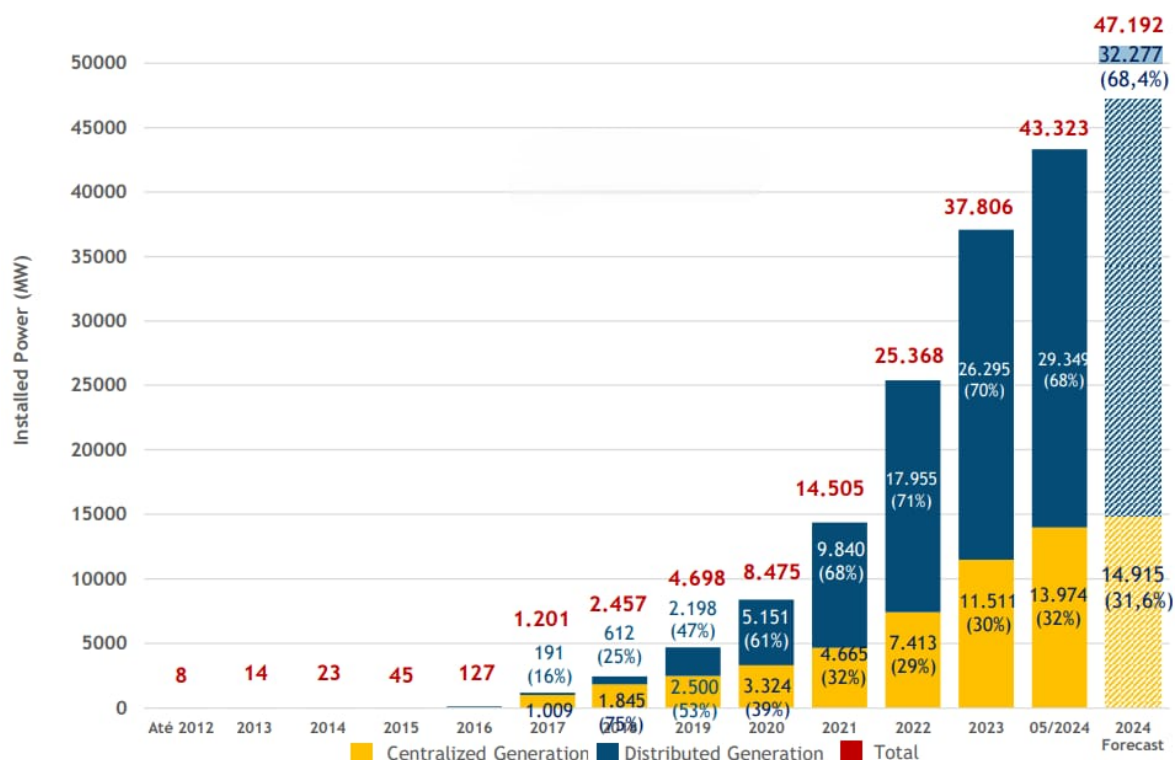
Para entrar no top 10 de países com maior capacidade instalada em 2022, era necessário adicionar pelo menos 3 GW de energia solar, um aumento em relação aos 1,5 GW de 2018. Polônia e Países Baixos entraram no ranking, substituindo Coreia do Sul e França. No entanto, existe uma grande diferença entre os cinco primeiros países do ranking e os seguintes, como Austrália, Espanha, Itália, Coreia e Brasil, cujas capacidades variam entre 20 e 30 GW, menos da metade da Alemanha, que ficou em quinto lugar.

Analisar a progressão da produção de energia solar fotovoltaica no sistema centralizado é fundamental no processo de diversificação da matriz energética do país. A energia solar fotovoltaica na rede elétrica brasileira, ressalta sua importância na capacidade de produção de eletricidade do país e as perspectivas futuras, tanto para projetos em andamento quanto para empreendimentos ainda não lançados. Dentro do cenário da atual transição energética, as fontes renováveis de produção de energia elétrica tem o foco na energia solar fotovoltaica no sistema centralizado, que envolve projetos de grande porte. Com a importância de residir um aumento da importância da energia solar fotovoltaica para o Brasil, que almeja uma matriz elétrica mais variada, incluindo fontes renováveis, como a eólica e a solar fotovoltaica (LIMA, 2024)

2.2.2 Panorama da Energia Solar no Brasil

O Brasil, atualmente ocupa o 6º lugar no ranking dos países que mais produzem energia solar no mundo, conforme dados da Agência Internacional de Energias Renováveis, sendo essa a segunda maior fonte de matriz elétrica nacional. Hoje, o país já conta com quase dois milhões e meio de sistemas solares instalados em residências, comércios, indústrias, propriedades rurais e prédios públicos. Pode-se perceber um aumento no interesse do brasileiro por investimento nessa fonte de energia para utilização nos lares, em pequenas empresas, mas também no interesse para a aplicação de capital em usinas solares. No último ano, as buscas por investimento em usina solar cresceram 271%, a procura por usina solar rentabilidade aumentou em 243%, e as buscas por usina fotovoltaica investimento ampliaram em 50%. A crescente tendência de utilização de energia solar no Brasil, percebe-se uma adequação do mercado para acompanhar o movimento do setor. O cenário energético brasileiro se destaca na importância de se explorar ainda mais o potencial do mercado de investimento em energia solar (BUSCAS, 2024).

Gráfico 1 - Evolução da fonte solar fotovoltaica no Brasil.



Fonte: Infográfico, 2024.

2.2.3 Panorama da Energia Solar no Rio Grande do Norte

A evolução da energia solar no Rio Grande do Norte tem se destacado no cenário energético local no ano de 2024. O crescimento acelerado da adoção da tecnologia impulsionou o estado como um dos principais polos de geração solar no Brasil. A potência instalada no estado do RN, no primeiro semestre de 2024, foi de 1.228 MW, o que o colocou na quinta posição entre os estados brasileiros. Em valores percentuais, tal potência corresponde a cerca de 8% de toda a potência solar no país, este é um resumo muito notável, já que a base para a expansão foi composta principalmente nos últimos anos.

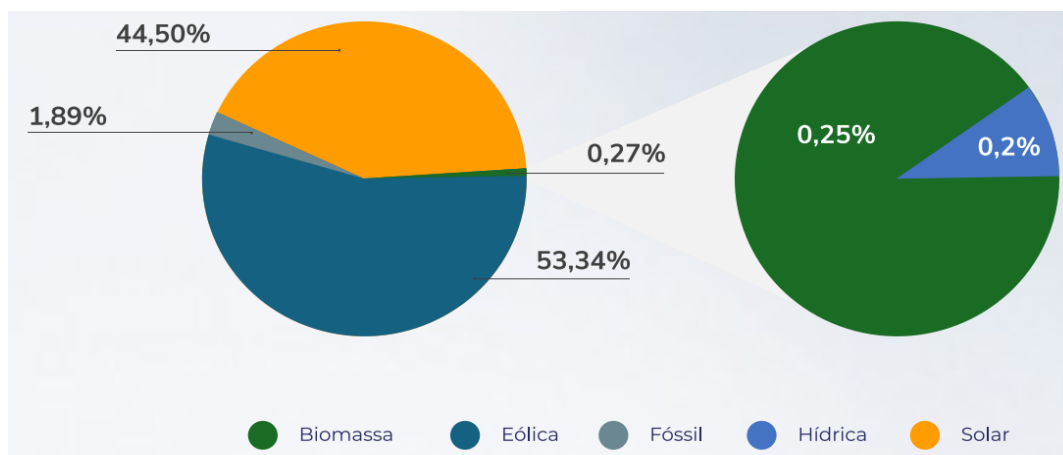
Os municípios de Açu e Serra do Mel são os maiores polos de energia solar do estado. Juntos, eles respondem por 75% da geração solar instalada, e Açu também é o município com maior quantidade de empreendimentos em construção e em operação. Atualmente, Açu tem 12 empreendimentos em construção, 15 em operação e mais 63 previstos para os próximos anos. Serra do Mel e Lajes contribuem para a complementação desse crescimento com o potencial híbrido, ou seja, solar e eólico. Com os dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), mais 177 usinas solares devem iniciar a operação no mesmo período, e o número representa um salto em relação ao que foi feito e mostra o comprometimento do estado com a diversificação de fontes energéticas. Essa rápida expansão na adoção da energia solar não é apenas o resultado da disponibilidade de recursos naturais pendentes no estado, mas também é o reflexo do investimento contínuo em infraestrutura e tecnologia. O estado, que lidera a energia eólica no Brasil, agora abraça a energia solar fotovoltaica e avança a passos largos para se tornar uma referência no país, tornando-se outro ator importante no processo de diversificação energética (BALANÇO, 2024).

O Rio Grande do Norte desempenha um papel fundamental na descarbonização da matriz elétrica brasileira. O estado já ultrapassou os 24 GW de potência outorgada¹ o que mostra no gráfico 2, composta exclusivamente por projetos de fontes renováveis. As fontes eólica e solar continuam a se destacar, representando 97,8% de toda a potência comercializada. Em 2024, a entrada em operação de usinas solares acelerou de forma expressiva, após um crescimento mais discreto em anos anteriores. A alta concentração de

¹Potência outorgada é a potência autorizada para operação pela agência reguladora, que concede uma licença ou concessão. Pode ser menor que a potência instalada devido a restrições técnicas, regulatórias ou ambientais que limitam a operação.

projetos solares tornou o município de Açu o líder em quantidade de empreendimentos com potência outorgada.

Gráfico 2 - Matriz elétrica do Rio Grande do Norte, julho de 2024

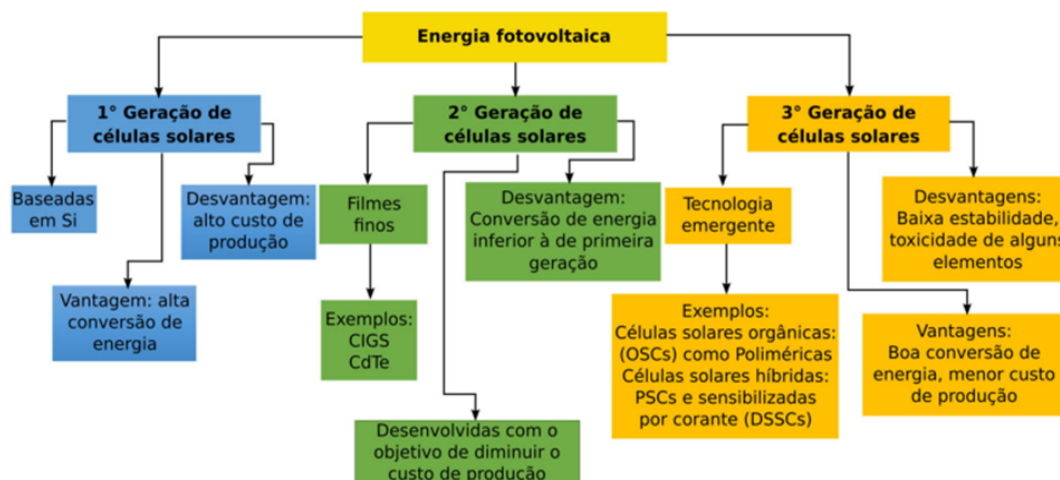


Fonte: Balanço, 2024

O Rio Grande do Norte conta com mais de mil usinas fotovoltaicas de micro e minigeração de energia em operação. Essas instalações são responsáveis pela geração de 15 MW de potência, com destaque para municípios como Caicó e Mossoró. A implementação dessas usinas não apenas amplia a capacidade energética do estado, mas também gera empregos e novas oportunidades de negócios, fortalecendo a economia local. Além disso, a expansão do setor solar contribui para diversificar a matriz energética do RN e reduzir os impactos ambientais. Em 2023, os investimentos em energia solar superaram 625 milhões, impulsionando um aumento de quase 47% na potência instalada² em relação ao ano anterior, e esse avanço está atrelado à queda nos custos dos equipamentos, com projeções otimistas de crescimento contínuo para 2024 (ENERGIA, 2024).

²Potência instalada refere-se à capacidade total de geração de energia elétrica que uma usina ou instalação pode produzir sob condições ideais, com todos os seus equipamentos funcionando no máximo. É a soma das potências nominais de todos os painéis instalados.

Figura 1 - Gerações de células solares.



Fonte: Adaptado de Araújo, 2022.

2.3.2 Uso da Perovskita em Célula Fotovoltaica

Com a introdução das perovskitas em dispositivos fotovoltaicos, diversos parâmetros foram ajustados e investigados para melhorar o desempenho desses dispositivos. Entre essas variáveis estão sua configuração, camada transportadora de buracos, camada de transporte de elétrons aplicado, ou mesmo a própria estrutura da perovskita. Diferentes arquiteturas de células solares de perovskita foram relatadas, com variações em eficiência e outros parâmetros fotovoltaicos. As perovskitas mais comuns em células solares são propensas à degradação na presença de umidade e oxigênio, devido ao grupo amina higroscópico em sua estrutura molecular, que desencadeia uma sequência de reações químicas que levam à degradação sob diferentes condições (RAPHAEL, 2018).

As células solares à base de perovskitas destacam-se entre as tecnologias emergentes devido ao seu elevado poder de conversão de energia. Além disso, possuem um custo de produção inferior ao das células de silício, uma vez que não requerem condições extremas de vácuo ou altas temperaturas durante sua fabricação (ARAÚJO, 2022).

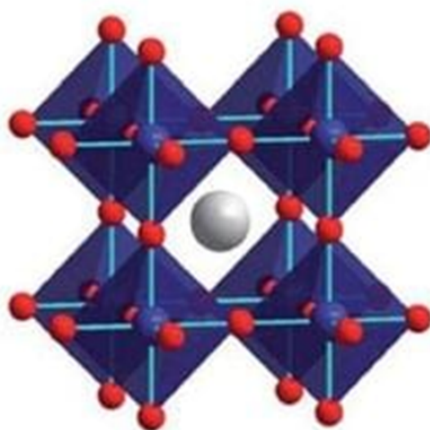
3 PEROVSKITAS

3.1 Introdução às Perovskitas

As perovskitas foram descobertas por Gustav Rose em 1839 e constituem uma classe de materiais com características únicas, que atualmente estão sendo exploradas em uma ampla variedade de dispositivos tecnológicos. O termo "perovskita" é utilizado para se referir a um grande grupo de compostos com uma estrutura cristalina similar à do mineral perovskita, titanato de cálcio (CaTiO_3). Sua fórmula geral é ABC_3 , onde A e B são cátions e C é um ânion, geralmente o íon óxido (O_2^-) ou íons haleto (Cl^- , Br^- , F^-), a estrutura cristalina da perovskita ilustrada na Figura 2, é cúbica. Embora a estrutura básica seja bastante simples, existe uma grande variedade de variações estruturais, pois as posições A e B podem acomodar diferentes elementos da tabela periódica, possibilitando inúmeras combinações de elementos que podem ocupar posições na grade cristalina da perovskita.

Devido à compatibilidade química e estrutural das perovskitas, sua estrutura maleável permite a personalização de propriedades eletrônicas, magnéticas e ópticas em filmes finos, algo que não é viável com semicondutores convencionais (SCHLOM, 2008).

Figura 2 - Estrutura da perovskita cúbica ABC_3 , onde a esfera cinza é o cátion A e as esferas azuis e vermelhas representam os íons B e C.

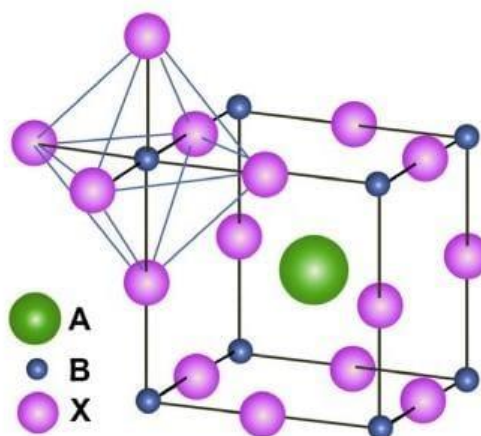


Fonte: Adaptado de Raphael, 2018.

Um exemplo amplamente utilizado de perovskita em células solares são baseados em haleto orgânico-inorgânicos, cuja fórmula geral é ABX_3 , onde A e B são cátions e X é um ânion, como mostra na figura 3, geralmente íons haleto ($\text{X} = \text{I}^-$, Br^- , Cl^-). O cátion A é

orgânico (tipicamente CH_3NH_3^+ , $\text{C}_2\text{H}_5\text{NH}_3^+$ ou $\text{HC}(\text{NH}_2)_2^+$), sendo geralmente maior e mais eletropositivo em comparação aos cátions B, que são tipicamente íons metálicos bivalentes (Pb^{2+} ou Sn^{2+}). O cátion A, maior, ocupa um sítio cubo-octaédrico compartilhado com doze ânions X, situado entre oito unidades octaédricas BX_6 , enquanto o cátion B, menor, está estabilizado em um sítio octaédrico compartilhado com seis ânions X (RAPHAEL, 2018).

Figura 3 - Estrutura da perovskita ABX_3 , apresenta um arranjo octaédrico BX_6 , enquanto o maior cátion A ocupa a posição cubo-octaédrico.

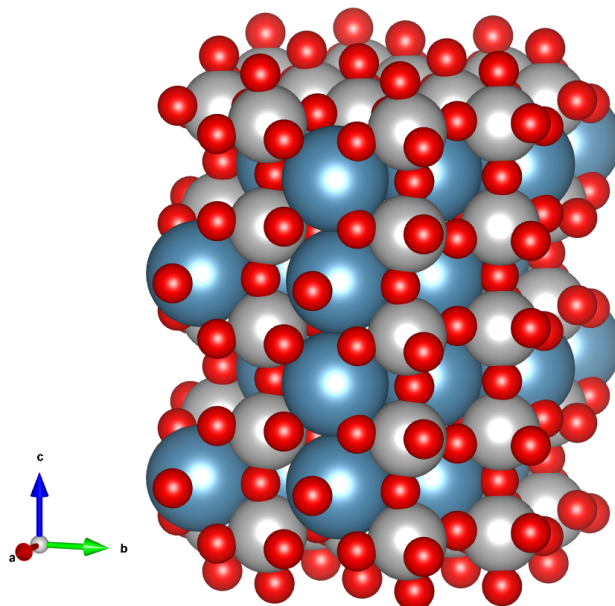


Fonte: Adaptado de Park, 2015

O tamanho dos íons A e B é essencial na determinação da estrutura cristalina, influenciando diretamente a estabilidade da perovskita. Essa estabilidade é avaliada por meio do fator octaédrico μ ($\mu = r_B / r_X$) e do fator de tolerância τ ($\tau = (r_A + r_X) / [2^{1/2}(r_B + r_X)]$), em que r_A , r_B e r_X representam os raios iônicos de A, B e X. A estrutura cúbica ideal é obtida quando $\tau = 1$. Valores de $\tau < 1$ indicam que o cátion A é muito pequeno, enquanto $\tau > 1$ sugere que A é grande demais para se acomodar nas cavidades entre as unidades octaédricas BX_6 . Quando $\tau < 1$, ocorre a distorção octaédrica, resultante do tamanho reduzido do cátion A, o que leva a uma diminuição na simetria do sistema.

Na figura 4, é mostrada a estrutura cristalina da perovskita CaTiO_3 , em que os átomos em vermelho correspondem a oxigênio, os átomos em cinza, a titânio, e os em azul, a cálcio.

Figura 4 - Estrutura cristalina da perovskita CaTiO_3 .



Fonte: Wikimedia Commons, 2024.

Cada octaedro deve girar sempre que houver uma mudança em sua posição em relação ao eixo normal da camada, resultando em inclinações *out of phase* (em direção oposta à fase) ou inclinações *in phase* (quando as rotações ocorrem na mesma direção) entre diferentes camadas. A distorção Jahn-Teller surge quando a configuração eletrônica do cátion está orbitalmente degenerada, levando a um estado de menor energia instável. Esse efeito provoca uma queda linear na energia, seguida por desarranjos no cristal, ao mesmo tempo em que a energia elástica do sistema aumenta. Rearranjos distorcidos podem se manifestar tanto por alongamento, quanto por encurtamento das ligações octaédricas, resultando na minimização da energia. Assim, uma variedade de elementos pode ser utilizada como substitutos nos materiais de perovskitas absorvedores de luz, aproveitando esses efeitos para otimizar as propriedades do material (WANG, 2014).

A perovskita adota uma estrutura cúbica quando os parâmetros de rede estão dentro dos intervalos de $0,81 < \tau < 1,11$ e $0,44 < \mu < 0,90$. Esses valores mais baixos de τ indicam uma estrutura menos simétrica, podendo ser tetragonal ou ortorrômica. Um exemplo disso é o composto $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$, onde os cálculos dos fatores τ resultam em valores de 0,85, 0,84 e 0,83, e os fatores μ são 0,66, 0,61 e 0,54, respectivamente, para $\text{X} = \text{Cl}^-$, Br^- e I^- . Portanto, é esperado que as perovskitas de haletos de chumbo e metilamônio apresentem

uma estrutura cúbica. Apesar dessas considerações, as transições de fase ocorrem no composto $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$ com a variação da temperatura (RAPHAEL, 2018).

Em temperaturas mais baixas, a estrutura tende a ser ortorrômica, transformando-se em tetragonal e, posteriormente, em cúbica à medida que a temperatura aumenta. À temperatura ambiente, as perovskitas contendo íons Cl^- e Br^- tendem a adotar uma estrutura cúbica, enquanto aquela com íons I^- é tetragonal. As perovskitas orgânico-inorgânicas de haleto despertam grande interesse em aplicações como células solares. O cátion A, geralmente, é o metilamônio ($\text{MA} (\text{CH}_3\text{NH}_3^+)$), com um raio de 1,80 Å, porém, o etilamônio ($\text{EA} (\text{CH}_3\text{CH}_2\text{NH}_3^+)$), com um raio de 2,30 Å, e o formamidínio ($\text{FA} (\text{NH}_2\text{CH}=\text{NH}_2^+)$), com um raio estimado entre 1,90 e 2,20 Å, também têm demonstrado desempenho satisfatório. Quanto ao ânion X, o iodeto, I^- , (com um raio de 2,20 Å) é o mais comum, embora o brometo, Br^- (com um raio de 1,96 Å), e o cloreto, Cl^- (com um raio de 1,81 Å), também sejam utilizados em materiais de haleto mistos (RAPHAEL, 2018).

As perovskitas inorgânicas são compostas por elementos metálicos, como óxidos de metais de transição, e são conhecidas por suas propriedades ferroelétricas, ferro magnéticas e supercondutoras. Elas têm sido amplamente estudadas para aplicações em dispositivos eletrônicos, fotovoltaicos e catalíticos devido à sua estabilidade química e ótima condutividade. Por outro lado, as perovskitas orgânicas, contêm íons orgânicos, como moléculas de amina ou compostos orgânicos complexos, incorporados na estrutura perovskita. Estes materiais são reconhecidos pelas suas propriedades de semicondutores orgânicos, e são alvo de investigação intensa para aplicações em eletrônica flexível, sensores e dispositivos optoeletrônicos devido à sua solubilidade, flexibilidade e processamento simplificado. Combinando os elementos inorgânicos com íons orgânicos, formando as perovskitas híbridas para formar estruturas únicas que combinam as melhores propriedades de ambos os tipos. Elas são famosas pela eficiência recorde em células solares de perovskitas, com elevadas eficiências de conversão de luz solar em eletricidade, juntamente com a facilidade de fabricação e ajustabilidade de *bandgap*.

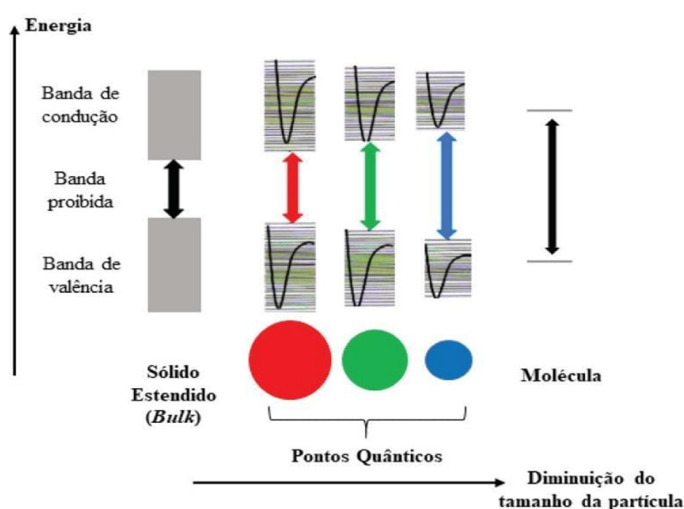
3.2 Propriedades Físicas e Químicas das Perovskitas

A primeira célula solar sensibilizada por corante, baseada em TiO_2 nanocristalino, foi desenvolvida em 1991 por Michel Grätzel, alcançando uma eficiência máxima de 7,9%. Desde então, os pesquisadores têm trabalhado para torná-la comercialmente viável,

buscando aumentar tanto a eficiência quanto a durabilidade desses dispositivos. Uma das vantagens desse tipo de célula, em comparação com as limitações de outras gerações, é o uso do corante como absorvedor de luz, aliado a materiais mais acessíveis que reduzem os custos de produção, e seu funcionamento é baseado em reações fotoeletroquímicas. O fotoanodo, que atua como o polo negativo na geração da corrente elétrica, é composto por um vidro coberto com um óxido condutor transparente, geralmente SnO_2 dopado com flúor ou índio. Sobre essa camada, é aplicado um semicondutor nanoporoso, frequentemente TiO_2 , que é sensibilizado com um corante. A escolha de semicondutores nanoporosos é fundamental para otimizar a adsorção do corante (MAGALHÃES, 2023).

Os vidros dopados com semicondutores como sulfeto de cádmio (CdS), selênio de cádmio (CdSe) e brometo de cobre (CuBr), descobriu que a presença de cristais em escala nanométrica resultava na absorção de luz em comprimentos de onda mais curtos. Mostrando que as propriedades dos semicondutores eram predominantemente determinadas pelo seu tamanho, concorrentemente, Louis Brus, trabalhando com CdS coloidal na mesma época, conseguiu controlar precisamente o tamanho desses nanomateriais, observando um significativo deslocamento dos espectros de absorção para comprimentos de onda menores em comparação com o CdS em grande quantidade. O confinamento dos portadores de carga em três dimensões resulta em materiais que exibem propriedades ópticas altamente dependentes do tamanho dos nanocristais, como ilustrado na Figura 5 (MAYRINCK, 2020).

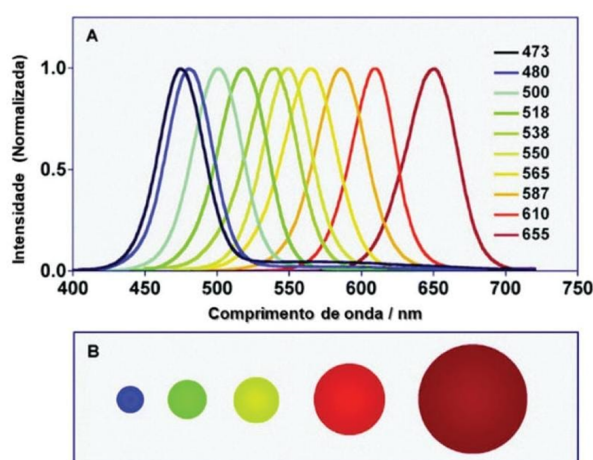
Figura 5 - Diagramas representativos de níveis de energia de semicondutores nanocristalinos em resultado do tamanho de partícula (PQs).



Fonte: Adaptado de Mayrinck, 2020

A formação de níveis discretos nas bandas de valência e de condução dos nanomateriais resulta no aumento da energia de *bandgap*, que pode ser alterada conforme o tamanho da nanopartícula. Quanto menor o tamanho, maior será a *bandgap* e, conseqüentemente, menor o comprimento de onda de emissão. Diante de suas importantes características para aplicações tecnológicas, os nanocristais de semicondutores continuaram em crescente desenvolvimento, destacando-se pela importância da estrutura das perovskitas, como mostrado na Figura 6 (MAYRINCK, 2020).

Figura 6 - Espectros de fluorescência em função do tamanho dos pontos quânticos.



Fonte: Adaptado de Mayrinck, 2020.

3.3 Estabilidade das Perovskitas

As perovskitas utilizadas na fabricação de células solares são consideradas um dos maiores avanços científicos. Os dispositivos fotovoltaicos baseados em perovskita combinam as vantagens das eficiências de conversão de energia das células solares de silício, CIGS e CdTe com um processo de fabricação econômico. A perovskita híbrida de haleto de alquilamônio tem sido estudada nos últimos anos, especialmente os plumbatos tri haleto de alquilamônio (como $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$), devido às suas excelentes propriedades como semicondutor no transporte de carga ambipolar, absorção de espectros (400-800 nm), intervalo de banda ajustável e longo comprimento de difusão. Esses materiais alcançaram grande sucesso na área de células solares, obtendo alta eficiência e baixo custo de fabricação. No entanto, a perovskita é altamente sensível à umidade, o que leva à sua degradação (COTA LEAL, 2017).

A síntese da perovskita ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$) pode ser realizada em uma única etapa, a partir de uma solução de iodeto de chumbo (PbI_2) e cloreto de metilamônio ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{Cl}$), que é depositada por fundição a 160°C e submetida a um tratamento térmico. Esse processo resulta na formação do filme de perovskita ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$). Além disso, uma célula solar sólida é fabricada utilizando camadas transportadoras de carga, como a camada de transporte de buracos e Al_2O_3 como camada de transporte de elétrons (COTA LEAL, 2017).

Os filmes de perovskita sem tratamento térmico apresentam superfície com furos e estruturas alongadas. Em filmes com tratamento térmico, as formas alongadas perdem definição nas bordas de suas estruturas, tornando a superfície mais homogênea e uma recristalização do material, o que é confirmado em padrão de DRX, a espessura dos filmes é determinada através de um perfilômetro.

Os filmes de perovskita sem tratamento térmico apresentam superfície com furos e estruturas alongadas. No caso dos filmes com tratamento térmico, observa-se que as formas alongadas perdem definição nas bordas de suas estruturas, tornando a superfície mais homogênea e pode-se observar uma recristalização do material, como pode ser confirmado em padrão de DRX.

Para os filmes com e sem tratamento, onde pode-se observar que entre a região de 600 a 800 nm pode apresentar menor percentual de reflexão o que pode ser traduzido também como absorção de fótons em comprimentos de onda. O percentual de reflectância diminui na faixa de 400 a 800 nm para filmes tratados termicamente, isso pode estar relacionado à recristalização e isso ocasionaria um maior aumento na absorção do material estudado (JIANG, 2015).

As perovskitas com mistura de haletos alcançaram um maior comprimento de difusão ($1\mu\text{m}$) em comparação com a perovskita $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ (100 nm). Isso definiu a direção para o rápido aumento da eficiência nas células solares baseadas em perovskita, ultrapassando uma eficiência de 15% (BURSCHKA, 2013). Onde a vida útil das células solares é limitada pela estabilidade da rede estrutural da perovskita. Verificando que na presença de umidade, a estrutura reticular de $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$, pode quebrar facilmente, seguido pela decomposição do material (N.-G, 2014).

3.4 Síntese e Fabricação

Algumas CSPs são fabricadas combinando um SnO_2 recém-desenvolvido camada de transporte de elétrons e a camada de perovskita aprimorada. Essas CSPs mostram uma Eficiência de Conversão de Energia (ECE) média de 24,7%, com alguns dispositivos excedendo uma ECE de 25%, quando medidos internamente. Os dispositivos de melhor desempenho são enviados para a instalação de testes de dispositivos de células solares, para certificação com os resultados de testes mostrados como pontos de dados vermelhos. O dispositivo de melhor desempenho atingiu uma ECE certificada de 25,2% a partir de uma medição de estado quase estacionário, com ECE determinados a partir da varredura de corrente-tensão (J-V) como 25,3% e 25,4% para a varredura reversa e direta, respectivamente. Com isso, o dispositivo certificado não apresenta quase nenhuma alteração na ECE. Além disso, o dispositivo encapsulado reteve cerca de 80% de sua ECE inicial após 500 h sob iluminação de luz contínua no ponto de potência máxima, sem um filtro de corte ultravioleta. Também são fabricados CSPs com áreas maiores; célula de grande área de melhor desempenho ($0,984 \text{ cm}^2$) exibe ECE de até 23,0% com um alto valor de 1.196 mV (YOO, 2021).

O desempenho e a estabilidade operacional de CSPs de *bandgap* Pb-Sn mistos sofrem com a alta densidade de defeitos (ou seja, vacâncias de Sn) no volume e nas superfícies de perovskitas Pb-Sn mistas devido à oxidação rápida de Sn^{2+} para Sn^{4+} , especialmente acontecendo nas soluções precursoras e sólidos de SnI_2 . Isso leva a uma curta vida útil do portador de carga e, portanto, a um curto comprimento de difusão em filmes de perovskita contendo estanho, resultando em transporte/extração de carga ruim e baixos valores em células solares (LIN, 2019).

Ao contrário das perovskitas totalmente baseadas em Sn, as perovskitas Pb-Sn mistas (em sua forma de filme sólido) são bem tolerantes à oxidação de Sn^{2+} mesmo no ar ambiente, e a oxidação de Sn^{2+} para Sn^{4+} poderia acontecer principalmente antes da formação do filme em sistemas de perovskitas Pb-Sn mistas. Com isso, a densidade de armadilhas em perovskitas Pb-Sn mistas poderia ser reduzida se o Sn^{4+} indesejado que já é formado na solução precursora de perovskita pudesse ser evitado na solução precursora antes da formação do filme. A redução dos defeitos de rede, ou seja, as vacâncias de Sn, nas perovskitas Pb-Sn também permite melhorar a estabilidade operacional das células solares (LIN, 2019).

Quando o chumbo é utilizado em células solares de perovskita (CSPs), a reciclagem dos módulos se torna essencial, e as lições aprendidas pela indústria fotovoltaica de CdTe fornecem orientações valiosas sobre o tratamento e reciclagem de chumbo e cádmio em absorvedores. Além disso, os painéis solares de perovskita contêm componentes como armações, vidros, materiais sintéticos (como HTMs) e materiais de encapsulamento, como o etileno vinil acetato, que demandam o desenvolvimento de estratégias de reciclagem específicas. Um dos métodos propostos envolve a remoção das camadas de CSPs com o uso de fita adesiva e a imersão do substrato em diferentes solventes orgânicos. O PbI_2 , após recristalização, pode ser recuperado dos painéis para dispositivos específicos, como a estrutura mesoscópica tripla imprimível, o andaime do dispositivo pode ser reutilizado, removendo as perovskitas e recarregando (RONG, 2018).

3.5 Aplicações Potenciais das Perovskitas

O campo dos dispositivos fotovoltaicos baseados em pontos quânticos em perovskitas (*quantum dots in perovskite* - PPQ) é relativamente novo, mas os resultados preliminares são altamente promissores. Embora os relatórios sobre células solares com PPQ ainda sejam limitados, especialmente em comparação com as perovskitas em massa e os filmes de perovskitas bidimensionais (2D), isso pode ser atribuído à instabilidade desses materiais (MAYRINCK, 2020).

Os PPQ têm o potencial de desempenhar um papel crucial no futuro dos dispositivos fotovoltaicos. O uso de PPQ de perovskitas híbridas (MAPbI_3) em células solares. Nanocristais foram formados a partir de uma mistura de iodeto de metilamônio e iodeto de chumbo aplicados em uma superfície de TiO_2 , servindo como sensibilizadores de luz em células solares, alcançando uma eficiência quântica externa de 6,5%. Foi alcançado ao tratar filmes finos de PPQ de CsPbI_3 com acetato de metila, estabilizando a estrutura cúbica e prolongando a estabilidade dos filmes em condições ambientais.

Foi possível alterar a energia de superfície dos nanocristais, evitando a agregação das partículas e mantendo suas propriedades ópticas e eletrônicas. Células solares fabricadas com esses filmes alcançaram uma eficiência de conversão de energia de 10%, o revestimento dos nanocristais de APbX_3 (onde A é formamidínio, metilamônio ou Cs, e X é I ou Br) foi demonstrado para aumentar ainda mais a mobilidade do portador de carga nos filmes, resultando em uma eficiência de conversão de energia de 13,4%. Esse controle

da composição criou uma heterojunção interna que facilita a separação de carga na interface interna, melhorando assim a eficiência geral do dispositivo.

As perovskitas apresentam um campo em expansão dentro dos materiais nanocristalinos. Inicialmente, os filmes finos de perovskitas híbridas orgânico-inorgânicas surgiram como um campo de pesquisa emergente. Galian e Pérez-Pietro aprofundaram os estudos com nanocristais de brometo de chumbo de metilamônio (MAPbBr_3), que são altamente emissivos no estado sólido, tornando-os promissores para aplicação em dispositivos emissores de luz e fotovoltaicos. Posteriormente, Zhong e seus colaboradores observaram em suas pesquisas que o aumento da energia de ligação do excíton e a sua passivação de superfície são responsáveis pela melhoria do rendimento quântico nos filmes finos de perovskitas. Isso confere um potencial altamente desejável para tecnologias de exibição no estado sólido, como displays, TVs e LEDs (ZHANG, 2015).

Filmes de perovskitas híbridas orgânico-inorgânicas combinam as características vantajosas dos semicondutores inorgânicos, que possuem portadores de carga com excelente mobilidade, com a flexibilidade e a processabilidade de baixa temperatura dos materiais orgânicos. Esses materiais exibem propriedades de confinamento quântico, embora estejam confinados em duas dimensões (2D) em vez de três dimensões (3D) como os pontos quânticos convencionais. O interesse crescente por esses semicondutores surgiu do sucesso alcançado ao utilizá-los como coletores de luz em células solares. Isso se deve aos resultados surpreendentes obtidos ao empregar materiais policristalinos com alta densidade de defeitos em dispositivos fotovoltaicos. Em 2015, pesquisas relacionadas aos semicondutores cristalinos coloidais à base de calcogeneto e aos filmes de perovskitas híbridas orgânico-inorgânicas deram origem aos semicondutores de haletos metálicos com estruturas cristalinas de perovskita (CsPbX_3 , onde $X = \text{Br}, \text{I}, \text{Cl}$ ou suas combinações), também conhecidos como pontos quânticos em perovskitas (PPQ, do inglês *perovskite quantum dots*). Esses materiais emergiram como altamente promissores e estão avançando rapidamente no campo científico (LEE, 2012).

Os pontos quânticos em calcogenetos metálicos têm sido úteis em produtos de exibição de cores, mas as excelentes propriedades sugerem que podem ser ainda mais adaptados para essas aplicações. No entanto, a eficiência dos nanocristais de perovskitas em dispositivos depende da otimização da injeção e transporte de carga nos filmes. Estudos recentes mostraram avanços nesse campo, como a demonstração de eletroluminescência

infravermelha e visível em perovskitas de halogeneto de chumbo e metilamônio. A estabilidade térmica desses dispositivos é limitada pelo uso de halogeneto de metilamônio. Substituir o metilamônio por cézio inorgânico oferece estabilidade térmica adicional, mas torna o processamento da solução mais desafiador. Recentemente, foram desenvolvidos LEDs baseados em perovskitas com emissões azuis, verdes e laranja, com linhas de emissão estreitas ideais para aplicações específicas.

A otimização das camadas de transporte de carga e controle da densidade do ligante na superfície levaram a um aumento significativo na eficiência quântica externa dos LEDs de perovskitas. O primeiro dispositivo foi desenvolvido para gerar LEDs com emissões nas cores azul, verde e laranja, apresentando linhas de emissão estreitas, o que é ideal para diversas aplicações. Inicialmente, o brilho dos LEDs era limitado, com valores abaixo de 1000 cd/m^2 , e a eficiência quântica externa (EQE) ficava em torno de 0,1%. Através da otimização das camadas de transporte de carga e do controle da densidade do ligante na superfície, foi possível aumentar a Eficiência Quântica Externa (EQE) dos LEDs baseados em CsPbBr_3 em mais de 50 vezes, alcançando valores de 6,27% e um brilho superior a 15.000 cd/m^2 . A EQE dos LEDs de perovskitas continuou aumentando, chegando a mais de 10%, e alguns dispositivos alcançaram uma eficiência quântica externa máxima de 12,9% (MAYRINCK, 2020).

3.6 Desafios Ambientais e de Sustentabilidade

A geração de energia por meio de células solares, uma vez que essa tecnologia é de fácil instalação e manutenção, ocupa menos espaço, podendo ser instalada no telhado e janelas dos edifícios, causa menos impactos ambientais durante sua fabricação e são menos dependentes de condições climáticas, uma vez que podem ser projetadas para operarem em condições de baixa radiação solar (ARAÚJO, 2022).

A crescente conscientização sobre os impactos ambientais causados pela emissão de gases de efeito estufa, aliada à necessidade de expandir a matriz elétrica global, levou governos ao redor do mundo a considerar a adoção de energias renováveis, com destaque para a energia solar fotovoltaica (LIMA, 2019).

Os painéis solares são formados por vários módulos, que, por sua vez, são compostos de células fotovoltaicas, responsáveis pela conversão da energia luminosa em energia elétrica. Atualmente, os painéis solares de silício monocristalino e policristalino

dominam o mercado devido à sua ampla disponibilidade, custo acessível, alta eficiência de conversão e vida útil estimada em 25 anos. No entanto, há um esforço crescente em pesquisa e desenvolvimento de novos materiais para sistemas fotovoltaicos, visando aprimorar a eficiência, aumentar a durabilidade, reduzir os custos de produção e utilizar materiais não prejudiciais ao meio ambiente (GÓES, 2023).

Surge o desafio do descarte das placas e dos resíduos gerados ao final de sua vida útil, o que representa um problema ambiental significativo, onde o acúmulo de materiais como vidro, metais e componentes tóxicos pode causar impactos negativos se não forem tratados e reciclados adequadamente. Por isso, há um esforço crescente em pesquisa e desenvolvimento de novos materiais para sistemas de energia solar fotovoltaica, com o objetivo de aprimorar a eficiência, aumentar a durabilidade, reduzir os custos de produção e utilizar materiais que sejam seguros para o meio ambiente, minimizando assim os problemas associados ao descarte (GÓES, 2023).

3.7 Perspectivas Futuras para a Pesquisa em Perovskitas

As Células Solares de Perovskitas podem ser fabricadas com materiais econômicos e por meio de processos simples, alcançando altas eficiências em ambiente de laboratório, com melhorias contínuas na estabilidade, essas células devem avançar em maturidade. Com isso, as CSPs apresentam baixo custo de material e um tempo de retorno de energia reduzido. A estabilidade a longo prazo no nível do módulo e a durabilidade em condições externas é um desafio atual para as CSPs, é preciso estabelecer consensos sobre protocolos de medição de estabilidade e desenvolver testes padronizados. Novos protocolos devem acelerar o envelhecimento sob condições operacionais e prever com precisão a vida útil das CSPs. Apesar de o encapsulamento adequado poder inibir a degradação devido à umidade e oxigênio, o desempenho afetado por iluminação e calor deve ser abordado através de materiais e interfaces estáveis (RONG, 2018).

Às CSPs têm um futuro promissor, com perspectivas de avanços significativos e elevadas eficiências de conversão de energia. No entanto, ainda são necessários estudos adicionais para aprimorar a estabilidade dos dispositivos e resolver desafios existentes, como a redução da temperatura de processamento, o que possibilitaria o uso de diferentes substratos e materiais na formação do filme, é crucial reduzir o custo desses dispositivos para viabilizar sua comercialização nos próximos anos (PETROVIĆ, 2015).

A eficiência das CSPs tende a diminuir com o aumento da área, com o esforço contínuo das comunidades de pesquisa e indústria, espera-se reduzir a diferença de eficiência entre células de laboratório e módulos industriais, aproximando-se dos níveis de outras tecnologias fotovoltaicas. Avanços no desenvolvimento de solventes verdes para soluções precursoras de perovskita, bem como para as camadas de transporte de carga e sua aplicação em ambiente também está em análises, sendo uma perspectiva geral apresentada e os principais desafios que limitam o desenvolvimento de rotas de fabricação de CSPs ecologicamente corretas são destacados (LI, 2024).

4 METODOLOGIA

O processo de revisão bibliográfica deste trabalho foi conduzido de forma sistemática, com o objetivo de identificar e analisar estudos relevantes sobre o uso de perovskitas em células fotovoltaicas. A busca e seleção de artigos científicos seguiram critérios específicos para garantir a qualidade e relevância dos dados coletados, como o período de publicação que foram selecionados de artigos publicados na última década, com o intuito de focar em estudos recentes e avanços tecnológicos mais atuais na área de perovskitas. O número de citações também foi visto como um critério importante para a quantidade significativa de citações dos trabalhos, apenas artigos com um número expressivo de citações foram considerados, uma vez que isso reflete a influência e o reconhecimento do estudo na comunidade científica.

Os artigos escolhidos apresentavam informações detalhadas e claras sobre os aspectos fundamentais do aparato desenvolvido, como referência e eficiência dos dados sobre a eficiência das células fotovoltaicas foram cruciais para a análise comparativa. Considerados métodos de síntese variados, com o objetivo de identificar tendências e inovações na produção de perovskitas, a durabilidade das células em termos de estabilidade foi um fator chave para determinar a viabilidade dos dispositivos a longo prazo. Os tipos de perovskitas e configuração da célula foram considerados para avaliar a diversidade e a eficácia das abordagens adotadas. No entanto, também foi considerada a temperatura de operação das células para entender sua relação com a eficiência e estabilidade dos dispositivos. Este processo metodológico garantiu uma revisão abrangente e focada em artigos de alta qualidade e impacto, permitindo uma análise profunda e relevante sobre o estado atual da pesquisa em perovskitas para células fotovoltaicas. Com isso, todos os artigos selecionados estavam disponíveis gratuitamente por meio de acesso na rede da UFERSA, facilitando o processo de revisão e garantindo o acesso.

A busca e revisão dos artigos científicos sobre o uso de perovskitas em células fotovoltaicas foi realizada de maneira rigorosa e estruturada. Esse processo incluiu a identificação, seleção e análise de estudos relevantes que abordam diferentes aspectos da aplicação de perovskitas em dispositivos fotovoltaicos. Para assegurar a organização e clareza das informações obtidas, foi realizada uma catalogação sistemática dos trabalhos revisados. A catalogação sistemática dos estudos envolveu a criação de uma tabela onde os principais dados e características de cada estudo foram registrados. A seguir, serão citados

e explicados, um a um, os campos da tabela de catalogação, explicando seu significado e importância.

Os dados que extraímos dos trabalhos analisados para formar os campos da tabela cientométrica são os seguintes:.

1. Autor(es): Nome(s) do(s) autor(es) do estudo, seguindo padrão ABNT.
2. Ano de Publicação: Ano em que o estudo foi publicado.
3. Tipo de Perovskita: Descrição do tipo de material perovskita utilizado (por exemplo, híbrido orgânico-inorgânico, inorgânico, etc.).
4. Configuração da Célula: Descrição da configuração da célula fotovoltaica (por exemplo, arquitetura planar, mesoestruturada, híbrida, etc.).
5. Eficiência Energética (%): Porcentagem de eficiência energética alcançada no estudo.
6. Método de síntese: Descrição do processo pelo qual a perovskita foi preparada ou depositada na célula.
7. Estabilidade: Informações sobre a estabilidade do dispositivo, incluindo tempo e condições de teste.
8. Temperatura: Relata as temperaturas de síntese ou operação das células, uma variável que pode impactar tanto a eficiência quanto a estabilidade dos dispositivos.

5 RESULTADOS

5.1 Catalogação de Estudos em Células Fotovoltaicas de Perovskita

A tabela 1 mostra o resultado da pesquisa, onde a partir do levantamento de dados incluindo as informações detalhadas sobre as principais referências, o número total de citações, os diferentes tipos de perovskitas utilizadas e as configurações das células, as eficiências alcançadas, os métodos de síntese empregados e as temperaturas de processamento. Pode-se destacar os trabalhos de maior eficiência da célula de perovskita de Kim et al. 2019, com uma eficiência de 25,9% e o trabalho de Chowdhury et al. 2023, com 25,8% de eficiência.

Os trabalhos com maior eficiência a temperaturas mais altas foram Chowdhury et al. (2023), com uma eficiência de 25,8% a 100°C, este estudo destaca a viabilidade de obter alta eficiência em temperaturas elevadas, um fator importante para a resistência das células em ambientes quentes. Seguido de Lin et al. (2019), relatando uma eficiência de 24,8% a 100°C com a perovskita $\text{FA}_{0.7}\text{MA}_{0.3}\text{Pb}_{0.5}\text{Sn}_{0.5}\text{I}_3$, utilizando o método de síntese de *precursor tin-reduced* (TRP).

Os trabalhos como os de Chowdhury et al. (2023) e Lin et al. (2019) mostram que é possível alcançar alta eficiência em temperaturas mais elevadas, o que é importante para aplicações em climas quentes ou em condições operacionais onde o controle de temperatura é limitado. No entanto, o desafio é manter a estabilidade a essas temperaturas sem comprometer a eficiência, pois em muitos casos, a eficiência das células fotovoltaicas baseadas em perovskitas tende a ser maior em temperaturas mais baixas. À medida que a temperatura aumenta, a estrutura da perovskita pode se tornar instável, levando à degradação dos materiais e, conseqüentemente, à perda de eficiência. Embora alguns estudos tenham conseguido manter alta eficiência em condições de temperatura elevada, há um limite além do qual a eficiência começa a declinar, isso ocorre devido à maior taxa de recombinação de portadores de carga e à degradação térmica dos componentes da célula.

Entre os trabalhos analisados, o estudo de Kim et al. (2019) destaca-se por apresentar a maior estabilidade registrada, com 4000 horas de operação em temperatura ambiente, combinada com uma eficiência de 25,9%, demonstrando um equilíbrio impressionante entre desempenho e longevidade, tornando esse trabalho um ponto de referência para futuras pesquisas na área. Seguido desse, temos o estudo de Yoo et al.

(2021), que alcançou uma estabilidade de 3600 horas a 45°C, mantendo uma eficiência notável de 25,2%. Embora essa estabilidade seja inferior à dos outros trabalhos destacados, a capacidade de manter eficiência de 23,3% em temperaturas mais altas evidencia a robustez do design da célula para aplicações em condições térmicas mais desafiadoras.

Os métodos de síntese utilizados na fabricação das células fotovoltaicas de perovskita apresentam um papel de grande importância no desempenho final, influenciando diretamente a eficiência, a estabilidade e a temperatura de operação. A deposição simples é o método utilizado por Correa-Baena et al. (2017), que resultou em uma eficiência de 22,1%. Este método é relativamente direto e eficiente em termos de custos, mas a eficiência atingida é moderada comparada a métodos mais avançados. Já o método de dopagem empregado por Yoo et al. (2021) e Peng et al. (2022), resultou em eficiências de 25,2% e 22,6%, respectivamente. A dopagem é eficaz para melhorar a captura de luz e a mobilidade dos portadores de carga, resultando em eficiências mais elevadas. No método de revestimento por Centrifugação utilizado por Chowdhury et al. (2023), resultou em uma alta eficiência de 25,8%. Este método permite um controle preciso sobre a espessura e a uniformidade do filme, favorecendo a eficiência.

Em relação ao método de síntese e a estabilidade, o trabalho de Kim et al. (2019), que utilizou um método de deposição, alcançou a maior estabilidade registrada, 4000 horas, em temperatura ambiente. Esse resultado sugere que a simplicidade e o controle do método contribuem para uma estrutura robusta e duradoura. Yoo et al. (2021), que também usou dopagem, alcançou uma estabilidade de 3600 horas. Isso indica que a dopagem, além de melhorar a eficiência, também pode contribuir para a durabilidade da célula. Já o método utilizado por Han et al. (2018) resultou em uma estabilidade moderada de 500 horas a 30°C, indicando que a estabilidade depende não só do método de síntese, mas também da configuração da célula e das condições de operação.

Os métodos avançados (e.g., TRP, Dopagem) nos estudos como o de Lin et al. (2019) e Yoo et al. (2021), mostram que métodos de síntese mais complexos, como o *precursor tin-reduced* (TRP) e a dopagem, conseguem manter alta eficiência e estabilidade mesmo em condições térmicas variáveis, sugerindo que esses métodos são mais adequados para aplicações em ambientes com flutuações de temperatura. Nos métodos de deposição simples e monolítica, tendem a ser menos sensíveis à temperatura e, quando combinados com materiais adequados, como no trabalho de Kim et al. (2019), podem oferecer uma

excelente estabilidade em temperatura ambiente, mas podem enfrentar desafios em temperaturas elevadas.

A escolha do método de síntese afeta diretamente a eficiência, a estabilidade e a temperatura operacional das células fotovoltaicas de perovskita, os métodos como a dopagem e o revestimento por centrifugação são eficazes para alcançar alta eficiência, enquanto a deposição simples pode resultar em excelente estabilidade a temperaturas mais baixas, a compreensão dessas inter-relações é essencial para otimizar o design e a aplicação de células fotovoltaicas baseadas em perovskitas para diferentes ambientes e exigências de desempenho.

Tabela 1 - Resultado da pesquisa cienciométrica sobre trabalhos aplicando o uso de perovskita em células fotovoltaicas

Referência	Número de citações no Scholar Google	Tipo de Perovskita / Config. da Célula Fotovoltaica	Eficiência	Método de síntese	Estabilidade	Temperatura
Raphael, 2018	48	$\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ / híbrida	22,10 %	dopagem	não informado	100°C
Peng et al., 2022	171	TiO_xN_y / planar	22,60 %	dopagem	250 horas	100°C
Yoo et al., 2021	2334	MAPbBr_3 / planar	25,20 %	dopagem	3600 horas	45°C
Chowdhury et al., 2023	114	$\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$ / híbrida	25,80%	revestimento por centrifugação	1000 horas	100°C
Mayrinck, 2020	1	$\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$ / híbrida	21,0%	coloidal	não informado	75°C
Correa-baena et al., 2017	1900	MAPbI_3 / plana	22,10%	deposição simples	500 horas	85°C
Lin et al., 2019	891	$\text{FA}_{0,7}\text{MA}_{0,3}\text{Pb}_{0,5}\text{Sn}_{0,5}\text{I}_3$ / planar	24,80%	<i>precursor tin-reduced</i> (TRP)	463 horas	100°C
Kim et al., 2019	279	$\text{FA}_{0,65}\text{MA}_{0,20}\text{Cs}_{0,15})\text{Pb}(\text{I}_{0,8}\text{Br}_{0,2})_3$ / planar	25,90%	deposição	4000 horas	temperatura ambiente
Bush et al., 2017	1552	$\text{Cs}_{0,17}\text{FA}_{0,83}\text{Pb}(\text{Br}_{0,1}\text{I}_{0,83})_3$ / planar	23,60%	deposição por solução	1000 horas	85°C
Han et al., 2018	394	$\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ (CIGS) / híbrida	22,40%	deposição por solução	500 horas	30°C

Fonte: Autoria Própria (2024)

Neste trabalho, foi calculada a Média de Citações por Ano (MCA) para cada estudo analisado, a fim de avaliar o impacto e a relevância científica ao longo do tempo. A fórmula utilizada para o cálculo da MCA é:

$$MCA = \frac{\text{número de citações}}{(2024-\text{ano})+1}$$

- Raphael (2018):

$$MCA = \frac{48}{(2024-2018)+1} = 6,9 \text{ citações/ano}$$

- Peng et al (2022):

$$MCA = \frac{171}{(2024-2022)+1} = 57 \text{ citações/ano}$$

- Yoo et al (2021):

$$MCA = \frac{2334}{(2024-2021)+1} = 583,5 \text{ citações/ano}$$

- Chowdhury et al (2023):

$$MCA = \frac{114}{(2024-2023)+1} = 57 \text{ citações/ano}$$

- Mayrinck (2020):

$$MCA = \frac{1}{(2024-2020)+1} = 1,25 \text{ citações/ano}$$

- Correa-baena et al (2017):

$$MCA = \frac{1900}{(2024-2017)+1} = 237,5 \text{ citações/ano}$$

- Lin et al (2019):

$$MCA = \frac{891}{(2024-2019)+1} = 148,5 \text{ citações/ano}$$

- Kim et al (2019):

$$MCA = \frac{279}{(2024-2019)+1} = 46,5 \text{ citações/ano}$$

- Bush et al (2017):

$$MCA = \frac{1552}{(2024-2017)+1} = 194 \text{ citações/ano}$$

- Han et al (2018):

$$MCA = \frac{394}{(2024-2018)+1} = 56,3 \text{ citações/ano}$$

Os trabalhos que obtiveram as maiores médias de citações (MCA) por ano foram, Yoo et al (2021) com MCA de 583,5 citações/ano, seguido por Correa-baena et al (2017) MCA de 237,5 citações/ano, com uma alta MCA, este trabalho também mostra grande relevância, mantendo sua influência ao longo dos anos, apesar de ter sido publicado há mais tempo, continua sendo uma referência importante no campo, como evidenciado pela sua alta média de citações. Bush et al. (2017) com MCA de 194 citações/ano, este trabalho também mantém uma posição de destaque, com uma média de citações robusta ao longo dos anos. E por fim, Lin et al (2019) com MCA de 148,5 citações/ano, apesar de ser relativamente recente, já acumulou uma quantidade significativa de citações, refletindo sua relevância.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho conduziu uma análise sobre o uso de perovskitas em células fotovoltaicas, utilizando uma abordagem cienciométrica para examinar estudos relevantes publicados desde 2017, com pesquisas que revelou avanços significativos na eficiência e na estabilidade das células fotovoltaicas de perovskita, considerando diferentes tipos de perovskitas, configurações celulares, métodos de síntese, e condições de temperatura de operação.

Os resultados indicam que as células fotovoltaicas de perovskita continuam a se destacar pelo seu elevado potencial de eficiência, com alguns estudos atingindo valores de eficiência superiores a 25%, como demonstrado por Kim et al. (2019) e Chowdhury et al. (2023), esses estudos destacam o papel fundamental do método de síntese no desempenho geral das células. Métodos avançados, como a dopagem e o revestimento por centrifugação, mostraram-se eficazes em otimizar a eficiência energética, enquanto métodos de síntese mais simples, como a deposição, ainda demonstram alto potencial para aplicações que exigem maior estabilidade a longo prazo.

Com a estabilidade das células fotovoltaicas de perovskita ainda sendo um problema, especialmente em altas temperaturas. Estudos como os de Kim et al. (2019) e Yoo et al. (2021) mostraram que é possível equilibrar a eficiência e a estabilidade mantendo um desempenho excepcional por longas horas. No entanto, a eficiência tende a diminuir com o aumento da temperatura, o que torna urgente a criação de novos materiais e métodos de síntese capazes de preservar a estrutura da perovskita e reduzir a degradação térmica. Além disso, a análise cienciométrica revelou que os artigos com alta média de citações anuais, como Yoo et al. (2021) e Correa-Baena et al. (2017), apresentam avanços significativos e contribuem para o progresso da pesquisa na área. Estes estudos destacam a importância da pesquisa científica contínua e do desenvolvimento tecnológico para o avanço das células solares de perovskita e servem como referência para o desenvolvimento de futuras tecnologias.

Portanto, este trabalho contribui para uma melhor compreensão do estado atual da pesquisa em células fotovoltaicas de perovskita, identificando avanços importantes e destacando áreas de oportunidade para melhoria. O estudo ressalta a necessidade de continuar explorando métodos de síntese inovadores e materiais mais estáveis, visando alcançar um desempenho ideal em diferentes condições ambientais. O progresso contínuo nesta área

poderá viabilizar o uso mais amplo de células solares de perovskita, contribuindo de maneira significativa para o aumento da eficiência e a redução dos custos de energia solar no futuro.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, Vivian Helene Diniz et al. Recentes avanços no uso do fulereno-C60 e seus derivados como aditivos e intercamadas em células solares de perovskita. **Revista Virtual de Química**, v. 14, n. 3, 2022.
- BALANÇO Energético Primeiro Semestre de 2024. **SEDEC/RN**. 1 set. 2024. Disponível em: <<http://www.adcon.rn.gov.br/ACERVO/sedec/DOC/DOC000000000339521.PDF>>. Acesso em: 1 out. 2024.
- BURSCHEKA, N. Pellet J., S.-J. Moon, R. Humphry-Baker, P. Gao, M. K. Nazeeruddin, and M. Grätzel. (2013). Sequential deposition as a route to high-performance perovskite-sensitized solar cells. **Nature**, 499 (7458), pp. 316–9.
- BUSCAS online por usinas solares saltam mais de 250% em um ano. **Absolar**. 27 mai. 2024. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/noticia/https-www-megapop-com-br-cidades-id-623314-buscas-online-por-usinas-solares-saltam-mais-de-250-em-um-ano/>>. Acesso em: 14 jun. 2024.
- BUSH, Kevin A. et al. 23.6%-efficient monolithic perovskite/silicon tandem solar cells with improved stability. **Nature Energy**, v. 2, n. 4, p. 1-7, 2017.
- CHOWDHURY, Tanzi Ahmed et al. Stability of perovskite solar cells: issues and prospects. **RSC advances**, v. 13, n. 3, p. 1787-1810, 2023.
- CORREA-BAENA, Juan-Pablo et al. Promises and challenges of perovskite solar cells. **Science**, v. 358, n. 6364, p. 739-744, 2017.
- COTA LEAL, M. A., Sotelo Lerma, M., & Quevedo López, M. (2017). Fabricación de películas de perovskita (CH₃NH₃PbI₃-xCl_x) por drop casting. **Biotecnia**, 19, 34–37.
- DE CARVALHO, Gabriel Bartholazzi Lugão et al. Cristalização de filmes de Perovskita depositados por Spray. In: **Anais Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS**. 2018.
- ENERGIA solar no Rio Grande do Norte. **Portal Solar**. 27 mai. 2024. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/energia-solar-fotovoltaica-no-rio-grande-do-norte>>. Acesso em: 1 out. 2024.
- GÓES, Patrícia Fagundes; TANIMOTO, Armando Hirohumi. Propriedades e uso de tecnologias de grafeno em painéis solares visando ao aprimoramento de seu desempenho. **Observatório de la Economía Latinoamericana**, v. 21, n. 7, p. 7358-7366, 2023.
- HAN, Qifeng et al. High-performance perovskite/Cu (In, Ga) Se₂ monolithic tandem solar cells. **Science**, v. 361, n. 6405, p. 904-908, 2018.
- IEEE SPECTRUM. Perovskite Solar Out-Bench Rivals in 2021.

INFOGRÁFICO. Absolar. 10 set. 2024. Disponível em:

<<https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>>. Acesso em: 1 out. 2024.

JIANG LIU, Cheng Ga and Xulin He. 2015. Improved Crystallization of Perovskite Films by Optimized Solvent Annealing for High Efficiency Solar Cell. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 7 (43), pp 24008–24015.

KIM, Dong Hoe, et al. "Bimolecular additives improve wide-band-gap perovskites for efficient tandem solar cells with CIGS." *Joule* 3.7 (2019): 1734-1745.

LANA, Luana Teixeira Costa et al. Energia solar fotovoltaica: revisão bibliográfica. **Engenharias On-line**, v. 1, n. 2, p. 21-33, 2015.

LEE, Michael M. et al. Efficient hybrid solar cells based on meso-superstructured organometal halide perovskites. **Science**, v. 338, n. 6107, p. 643-647, 2012.

LI, Xin et al. Dimensional diversity (0D, 1D, 2D, 3D) in Perovskite solar cells: Exploring the potential of mix-dimensional integrations. **Journal of Materials Chemistry A**, 2024.

LIMA, Ariane A. et al. Uma revisão dos princípios da conversão fotovoltaica de energia. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 42, p. e20190191, 2019.

LIMA, Ruth Albuquerque de. **Evolução da geração de energia solar fotovoltaica no contexto da diversificação da Matriz Energética Nacional**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

LIN, Renxing et al. Monolithic all-perovskite tandem solar cells with 24.8% efficiency exploiting comproportionation to suppress Sn (ii) oxidation in precursor ink. **Nature Energy**, v. 4, n. 10, p. 864-873, 2019.

MAGALHÃES, Letícia F. et al. Elaboração de um método lúdico para o ensino de química: um jogo baseado em células solares sensibilizadas por corante. **Química Nova**, v. 46, n. 10, p. 1015-1022, 2023.

MAYRINCK, Caroline de; FONSECA, André Felipe Vale da; SCHIAVON, Marco Antônio. Colloidal Perovskite Nanocrystals: History, Properties and Applicati. **Química Nova**, v. 43, p. 1264-1276, 2020

NASCIMENTO, Messias de Paiva. O panorama do desenvolvimento da energia solar fotovoltaica no estado do Rio Grande do Norte. 2023. 39 f.

N.-G. Park (2014). Perovskite solar cells: an emerging photovoltaic technology. **Materials Today**, 18 (2), pp. 65–72.

OTTONELLI, Janaina et al. Oportunidades e desafios do setor de energia solar fotovoltaica no Brasil. **Revista Econômica do Nordeste**, v. 52, n. 4, p. 8-26, 2021.

PARK, Nam-Gyu. Perovskite solar cells: an emerging photovoltaic technology. **Materials today**, v. 18, n. 2, p. 65-72, 2015.

PENG, Jun et al. Centimetre-scale perovskite solar cells with fill factors of more than 86 per cent. **Nature**, v. 601, n. 7894, p. 573-578, 2022.

PETROVIĆ, Miloš; CHELLAPPAN, Vijila; RAMAKRISHNA, Seeram. Perovskites: solar cells & engineering applications—materials and device developments. **Solar Energy**, v. 122, p. 678-699, 2015.

RAPHAEL, Ellen et al. Células solares de perovskitas: uma nova tecnologia emergente. **Química Nova**, v. 41, p. 61-74, 2018.

RONG, Yaoguang et al. Challenges for commercializing perovskite solar cells. **Science**, v. 361, n. 6408, p. eaat8235, 2018.

SANTOS, M. R. DOS; BRITO, J. L. R. DE; SHIBAO, F. Y. Economia circular e a energia solar fotovoltaica. **COLÓQUIO - Revista do Desenvolvimento Regional**, v. 19, n. 1, jan/mar, p. 293–311, 2022.

SCHLOM, Darrell G. et al. A thin film approach to engineering functionality into oxides. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 91, n. 8, p. 2429-2454, 2008.

SHIMOMAEBARA, L. A.; PEYERL, D. ENERGIA SOLAR NO BRASIL: histórico e planejamento energético. **Revista de Políticas Públicas**, v. 25, n. 2, p. 854, 13 jan. 2022.

SILVA, Mariana Nascimento. Células Solares de Perovskita: Uma nova Tecnologia emergente. Monografia de Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção do título Bacharel em Química. Universidade Federal de São João del-Rei-MG, v. 201..

SOUTO, Lucas Polimante. Preparação de Células Solares de Perovskitas para Geração de Energia Limpa. 2022.

U.S. Energy Information Administration (2021). **Annual Energy Outlook 2021 with Projections to 2050**. 2021. Disponível em: https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/AEO_Narrative_2021.pdf. Acesso em: 1 set. 2024.

WANG, Baohua; XIAO, Xudong; CHEN, Tao. Perovskite photovoltaics: a high-efficiency newcomer to the solar cell family. **Nanoscale**, v. 6, n. 21, p. 12287-12297, 2014.

WIKIMEDIA COMMONS. **Perovskite crystal structure (Yamanaka-Hirai-Komatsu 2002) crystallographic standard alignment**. Disponível em: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Perovskite_crystal_structure_\(Yamanaka-Hirai-Komatsu_2002\)_crystallographic_standard_alignment.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Perovskite_crystal_structure_(Yamanaka-Hirai-Komatsu_2002)_crystallographic_standard_alignment.png). Acesso em: 11 de abril de 2024.

YOO, Jason J. et al. Efficient perovskite solar cells via improved carrier management. **Nature**, v. 590, n. 7847, p. 587-593, 2021.

ZHANG, Feng et al. Brightly luminescent and color-tunable colloidal $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$ (X= Br, I, Cl) quantum dots: potential alternatives for display technology. **ACS nano**, v. 9, n. 4, p. 4533-4542, 2015.

ZUO, Chuantian et al. Avanços em células solares de perovskita. **Ciência Avançada**, v. 3, n. 7, pág. 1500324, 2016.