

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
CAMPUS NEPOMUCENO**

Cristhian Barbosa

A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DAS CÉLULAS SOLARES DE PEROVSKITA

NEPOMUCENO

2025

CRISTHIAN BARBOSA

A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DAS CÉLULAS SOLARES DE PEROVSKITA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: André Luís Marcomini

Co-orientador: Juliana Vilela Lourençoni Botega

NEPOMUCENO

2025

CRISTHIAN BARBOSA

A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DAS CÉLULAS SOLARES DE PEROVSKITA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovado em 18 de julho de 2025.

Prof. Dr. André Luís Marcomini
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof.^a Dra. Juliana Vilela Lourençoni Botega
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof.^a Ma. Ludmila Aparecida de Oliveira
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

A Deus, minha família e amigos,
por todo o apoio constante.
DEDICO

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, no qual sempre me deu forças quando precisei para continuar batalhando em busca dos meus sonhos, muitas vezes não foram dias fáceis, e sim dias solitários e distantes de familiares e amigos. Porém, ele sempre esteve ao meu lado para seguir em frente diante dos desafios que a vida me apresentava.

Agradeço a minha mãe, Nalva, e meu pai, Elio, pelo amor, carinho, dedicação, suporte, educação e por sempre me apoiarem tanto financeiramente, como também emocionalmente, sempre querendo o meu melhor, obrigado por acreditarem em mim e no meu potencial.

Agradeço a todos os meus amigos e colegas, que fizeram parte dessa minha trajetória, aos que estavam longe, obrigado por sempre me apoiarem e brincarem comigo perguntando a cada volta de feriado e férias, quanto tempo faltava para eu retornar pra casa, aos que estavam perto, obrigado por tornar meus dias mais leves e simples, vocês foram primordiais para suportar a distância que é estar longe de casa e em uma cidade totalmente diferente.

Agradeço ao meu orientador, André, e minha coorientadora Juliana, por se dispor a me auxiliar no meu trabalho, independente da correria, sempre solícitos e atenciosos. Aos professores e funcionários do CEFET e do departamento de Engenharia Elétrica, que durante todos esses anos de curso contribuíram para o meu crescimento pessoal e profissional.

*“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito.
Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes.”*

Marthin Luther King

RESUMO

A crescente demanda por energia elétrica vem impulsionando o desenvolvimento e a adoção de fontes renováveis de energia, como por exemplo a energia solar fotovoltaica. Esse tipo de tecnologia se baseia no efeito fotovoltaico, fenômeno físico em que a luz solar é convertida em eletricidade ao atingir um material semicondutor presente nas células solares, com isso, este projeto tem como objetivo estudar a eficiência energética das células solares de perovskita, uma tecnologia emergente no campo da energia fotovoltaica. As células solares de perovskita também se destacam por suas características promissoras, como alta eficiência de conversão de energia, baixo custo de produção e flexibilidade em aplicações. O trabalho aborda os princípios de funcionamento dessas células, os materiais utilizados, os avanços tecnológicos e os desafios relacionados à estabilidade e à fabricação em larga escala. A pesquisa busca analisar como essas características contribuem para a transição energética, avaliando seu potencial impacto no mercado de energias renováveis. Nessas condições, este estudo se mostrou relevante para o campo da engenharia elétrica, especialmente na busca por soluções inovadoras para ampliar a geração de energia sustentável e atender à crescente demanda global por fontes limpas e acessíveis.

Palavras-chave: Células solares de perovskita. Eficiência energética. Energia fotovoltaica.

ABSTRACT

The growing demand for electricity has been driving the development and adoption of renewable energy sources, such as solar photovoltaics. This type of technology is based on the photovoltaic effect, a physical phenomenon in which sunlight is converted into electricity when it hits a semiconductor material present in solar cells. Therefore, this project aims to study the energy efficiency of perovskite solar cells, an emerging technology in the field of photovoltaics. Perovskite solar cells also stand out for their promising characteristics, such as high energy conversion efficiency, low production costs, and application flexibility. The work addresses the operating principles of these cells, the materials used, technological advances, and the challenges related to stability and large-scale manufacturing. The research seeks to analyze how these characteristics contribute to the energy transition, assessing their potential impact on the renewable energy market. Under these conditions, this study has proven relevant to the field of electrical engineering, especially in the search for innovative solutions to expand sustainable energy generation and meet the growing global demand for clean and affordable sources.

Keywords: Perovskite solar cells. Energy efficiency. Photovoltaic energy.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. Matriz elétrica mundial 2022.....	16
FIGURA 2. Potencial de produção de energia de fontes renováveis.....	17
FIGURA 3. Potencialidade de utilização de energia solar no planeta Terra.....	17
FIGURA 4. Diagrama das principais tecnologias de células fotovoltaicas existentes atualmente.....	19
FIGURA 5. Célula fotovoltaica de silício monocristalino.....	20
FIGURA 6. Célula fotovoltaica de silício policristalino.....	20
FIGURA 7. Célula de silício amorfo.....	21
FIGURA 8. Célula fotovoltaica de telureto de cádmio (CdTe).....	22
FIGURA 9. Célula Fotovoltaica de cobre, índio e seleneto gálio.....	22
FIGURA 11. Representação esquemática de células fotovoltaicas estruturada em monocamada.....	24
FIGURA 12. Eficiência dos módulos de silício cristalino (mono ou poli).....	25
FIGURA 13. Eficiência em módulos de filmes finos.....	26
FIGURA 14. Projeção de uma fachada com vidros de Perovskita.....	27
FIGURA 15. Desempenho das células solares comparadas às células de Perovskita.....	28
FIGURA 16. Evolução da eficiência das células solares de Perovskita.....	32

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. Comparação de eficiência das tecnologias fotovoltaicas inorgânicas.....	21
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
UV	Radiação Ultravioleta
CSEM Brasil	Centro Suíço de Eletrônica e Microtecnologia Brasil

LISTA DE SÍMBOLOS

CO_2 Dióxido de carbono

TW Terawatts

μm Micrômetro

US\$ Dólar

η Eficiência

P_{in} Potência de entrada

P_{out} Potência de saída

W Watts

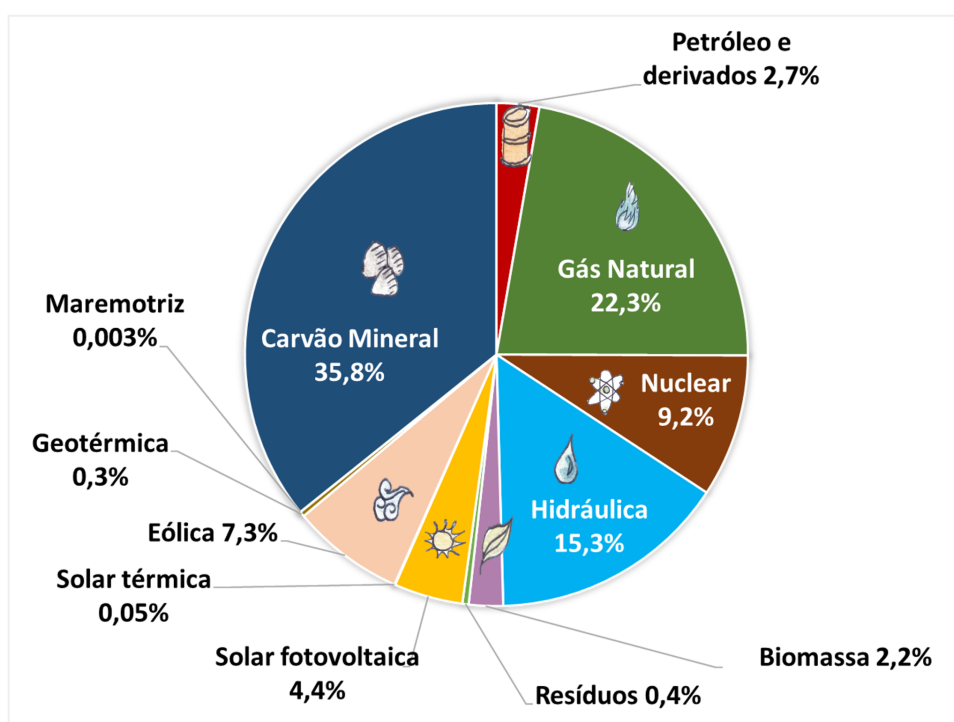
SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	16
1.1. Objetivos.....	18
1.1.1. Objetivo Geral.....	18
1.1.2. Objetivo Específico.....	18
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	19
2.1. Células Solares.....	19
2.1.1. Primeira geração das células solares.....	20
2.1.2. Segunda geração das células solares.....	21
2.1.3. Terceira geração das células solares.....	22
2.1.3.1 Células solares de perovskita.....	23
2.1.2. Módulos e Painéis Fotovoltaicos.....	24
2.1.3. Eficiência das células solares.....	25
2.2. Características dos módulos de perovskita comercializados.....	26
2.2.1. Aplicação e comercialização da perovskita.....	27
2.3. Comparação entre células de silício e perovskita.....	27
2.4. Projeção de viabilidade econômica.....	28
3. METODOLOGIA.....	30
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	31
5. CONCLUSÃO.....	35
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	36

1. INTRODUÇÃO

Diante de um cenário mundial no qual os governos têm uma preocupação crescente com o meio ambiente, os três principais tipos de combustíveis fósseis (carvão, gás natural e petróleo) vem paradoxalmente diminuindo progressivamente suas reservas. As fontes de energias renováveis tem sido uma solução para suprir essa geração, com intuito de atender a demanda, além de diminuir a poluição do ar e as emissões de CO_2 , que é o principal gás de efeito estufa responsável pelas mudanças climáticas. A Figura 1 ilustra a geração de energia elétrica mundial por recurso em 2022.

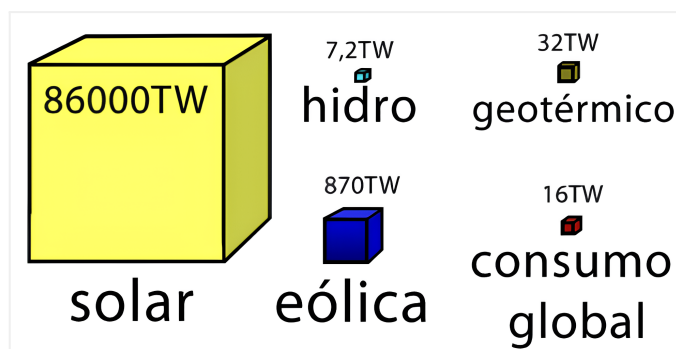
FIGURA 1. Matriz elétrica mundial 2022.



Fonte: IEA (2023).

Na Figura 1 é mostrada a matriz elétrica mundial em 2022 e expõe a dependência dos combustíveis fósseis para geração de energia elétrica no mundo. Nos dias atuais, existem vários receios, tais como: a demanda crescente por energia, o aumento no preço dos combustíveis fósseis e a preocupação ambiental, resultando em um progresso significativo na área de geração de energia a partir de fontes renováveis. Assim, as fontes de energia renováveis aumentaram significativamente em todo o mundo, resultando no aumento da energia solar como uma das principais opções para a geração de eletricidade, graças ao seu vasto potencial de produção - 86000 TW (DIENSTMANN, 2009). Esse esquema é representado na Figura 2.

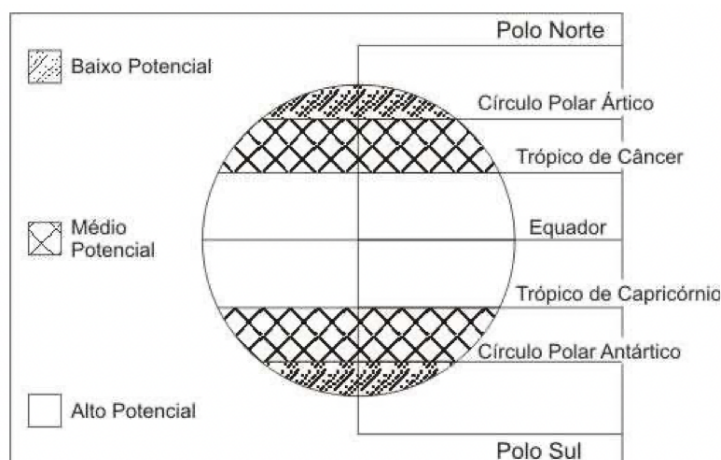
FIGURA 2. Potencial de produção de energia de fontes renováveis.



Fonte: DIENSTMANN (2009).

A Figura 3 indica que o potencial de energia solar que incide sobre a Terra difere conforme a posição no planeta e, uma análise simplificada, as áreas polares são vistas como de baixo potencial, aquelas entre os círculos polares e os trópicos têm potencial médio, e as zonas entre as linhas tropicais são consideradas as de maior aproveitamento da incidência solar.

FIGURA 3. Potencialidade de utilização de energia solar no planeta Terra.



Fonte: Adaptada de Rosa e Filho (2007).

A energia solar fotovoltaica é uma fonte renovável e limpa, na qual os painéis fotovoltaicos transformam a radiação solar em eletricidade diretamente por meio de um fenômeno chamado efeito fotoelétrico, gerando, dessa forma, energia elétrica (ALVES, 2019; DIENSTMANN, 2009). Em termos diferentes, afirma-se que “a energia solar fotovoltaica resulta da conversão direta da radiação solar em eletricidade por meio de materiais semicondutores, comumente chamados de células fotovoltaicas, que empregam o efeito fotoelétrico ou fotovoltaico” (IMHOFF, 2007, p. 121, apud ALVES, 2019, p. 2).

A energia solar está amplamente espalhada na sociedade contemporânea, e isso, por sua vez, possibilitou o aparecimento de outros conceitos que estão diretamente relacionados a ela. Entre esses conceitos, a pesquisa sobre células solares é o foco, uma vez que a energia solar fotovoltaica se destaca entre as fontes alternativas graças à sua baixa emissão de poluentes, à exigência de pouca manutenção e, principalmente, por produzir energia localmente, ou seja, não requer linhas de transmissão que causam perdas e impactos ambientais (Oliveira *et al.*, 2017).

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo Geral

Analisar a eficiência energética das células solares de perovskita, investigando suas características técnicas, avanços tecnológicos e desafios para implementação em larga escala, visando avaliar seu impacto no setor de energia renovável e sua viabilidade como alternativa às tecnologias fotovoltaicas tradicionais.

1.1.2. Objetivo Específico

São objetivos deste trabalho:

- Compreender os fundamentos do funcionamento das células solares de perovskita, bem como os materiais que compõem sua estrutura;
- Identificar e analisar os principais fatores que afetam a eficiência energética e a estabilidade desse tipo de célula solar;
- Avaliar os desafios associados à produção em larga escala, incluindo aspectos relacionados ao custo, durabilidade e impactos ambientais;
- Realizar uma comparação entre o desempenho das células de perovskita e outras tecnologias fotovoltaicas que atualmente estão no mercado;
- Discutir as possibilidades de aplicação das células solares de perovskita em projetos voltados à geração de energia sustentável no Brasil e no mundo.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

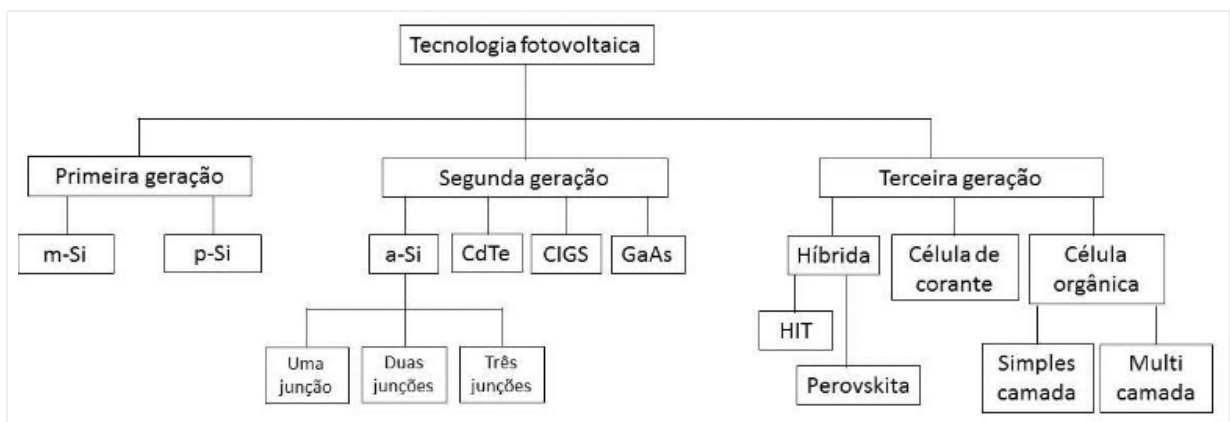
2.1. Células Solares

As células solares foram descobertas em 1839, quando um físico francês chamado Edmond Becquerel observou que a partir de duas placas de latão imersas em um eletrólito líquido produziam eletricidade quando expostas à luz solar, fenômeno que ficou conhecido como efeito fotovoltaico. Já no ano de 1883, o americano Charles Fritts, desenvolveu a primeira bateria solar feita de folhas de selênio, ela tinha eficiência de 1%, porém superou uma barreira de expectativas visto que a sociedade não acreditava na possibilidade de gerar energia se não fosse através da queima de combustíveis fósseis (MACHADO, C. T.; MIRANDA, F. S, 2015).

Já na década de 1950, a Bell Labs, uma empresa de pesquisa industrial e desenvolvimento científico dos Estados Unidos, criou a primeira célula solar fotovoltaica, a base de silício, que tinha eficiência de 6%. Decorrente de uma crise energética mundial em 1973 começou-se a produzir painéis fotovoltaicos com o interesse de ter uma produção limpa e mais acessível (SERODIO, 2009).

Por meio das categorias de tecnologias para a construção de células fotovoltaicas, organizadas em três gerações, é viável efetuar uma análise comparativa baseada em pesquisas bibliográficas, como demonstrado na Figura 4.

FIGURA 4. Diagrama das principais tecnologias de células fotovoltaicas existentes atualmente.



Fonte: BÜHLER *et al.* (2004).

2.1.1. Primeira geração das células solares

As células da primeira geração utilizam silício monocristalino (m-Si, monocrystalline silicon) ou policristalino (p-Si, polycrystalline silicon). Essas representam cerca de 50% do mercado desde a década de 1970 graças à robustez, eficiências comerciais que flutuam entre 15% e 25% e vida útil que conserva a potência mesmo após anos. Contudo, o processo Czochralski, que é um método para a cultura de cristais que são usados para a produção industrial de monocristais de vários tipos de materiais cristalinos que necessitam de uma elevada pureza e de cristais que necessitam que sejam isentos de defeitos, exige fundição a aproximadamente 1420 °C e elevado grau de pureza; isso aumenta consumo energético, emissões e custo final do produto (OLIVEIRA, 2021). Abaixo, a Figura 5 e 6 ilustra as células fotovoltaicas de silício monocristalino e silício policristalino, respectivamente, cortada e pronta para ser instalada com outras da mesma para formarem um módulo fotovoltaico.

FIGURA 5. Célula fotovoltaica de silício monocristalino.



Fonte: Adaptado de HENRIQUE, 2021.

FIGURA 6. Célula fotovoltaica de silício policristalino.



Fonte: Adaptado de HENRIQUE, 2021.

A Tabela 1 a seguir apresenta uma comparação entre células de silício monocristalino e policristalino para melhor compreensão:

TABELA 1. Comparação de eficiência das tecnologias fotovoltaicas inorgânicas.

Material	Eficiência		
	Máxima Teórica	Em Laboratório	Produção em Série
Silício Monocristalino (Si-Mono)	24,7%	18%	14%
Silício Policristalino (Si-Poli)	19,8%	15%	13%

Fonte: Adaptado de HENRIQUE, 2021.

2.1.2. Segunda geração das células solares

A segunda geração de células solares ocorreu para reduzir a espessura e o material, sendo assim, surgiram as tecnologias de filme fino que são as películas finas aplicadas sobre substratos rígidos como o silício amorfo (a-Si), o Telureto de Cádmio (CdTe) e o Seleneto de Cobre, Índio e Gálio (CIS/CIGS). Tais módulos respondem por cerca de 10% do mercado, oferecem custos menores porém eficiências médias menores quando comparados à geração anterior e utilizam metais tóxicos ou pouco abundantes (Cd, In, Te). As células CdTe, por exemplo, alcançam cerca de 9-16% de eficiência e requerem encapsulamento rigoroso contra umidade (SANTOS, 2018).

A célula de silício amorfo revela-se uma tecnologia robusta no que se refere ao custo reduzido. Entretanto, questões de estabilidade fazem com que essas células entrem em um processo de degradação bastante rápida (6 a 12 meses), quando sujeitas à luz solar. Seu desempenho diminui neste intervalo, até que se torne estável.

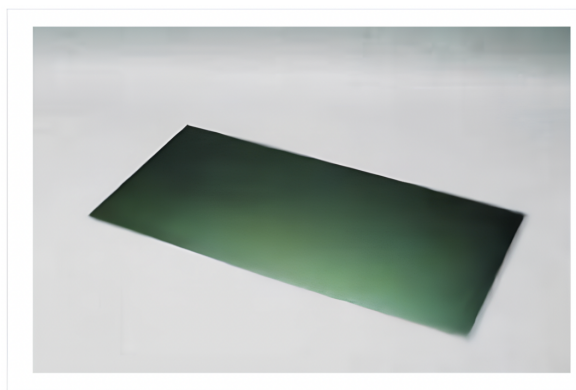
FIGURA 7. Célula de silício amorfo.



Fonte: Adaptado de SANTOS, 2018.

A célula de Telureto de Cádmio (CdTe) é vulnerável à umidade, necessitando ser encapsulados com vidros e filmes poliméricos, e hermeticamente fechados para prevenir sua deterioração antecipada.

FIGURA 8. Célula fotovoltaica de telureto de cádmio (CdTe).



Fonte: (Energia Fotovoltaica: Manual sobre tecnologias, projeto e instalação, 2004).

As células de cobre, índio e seleneto de gálio tem novos métodos de fabricação que vêm sendo desenvolvidos para aumentar a eficiência e minimizar os custos de produção, onde camadas de diferentes materiais são depositadas uma a uma em toda a superfície da placa.

FIGURA 9. Célula Fotovoltaica de cobre, índio e seleneto gálio.



Fonte: Adaptado de SANTOS, 2018.

2.1.3. Terceira geração das células solares

Já a terceira geração são de películas finas aplicadas sobre substratos flexíveis (como o híbrido – HJT ou termo-fotovoltaica). A terceira geração agrega conceitos como CPV (concentrated photovoltaics), células multijunção, DSSC (dye-sensitized solar cell), OPV (organic photovoltaic) e, sobretudo, as células de perovskita (PER). O composto híbrido

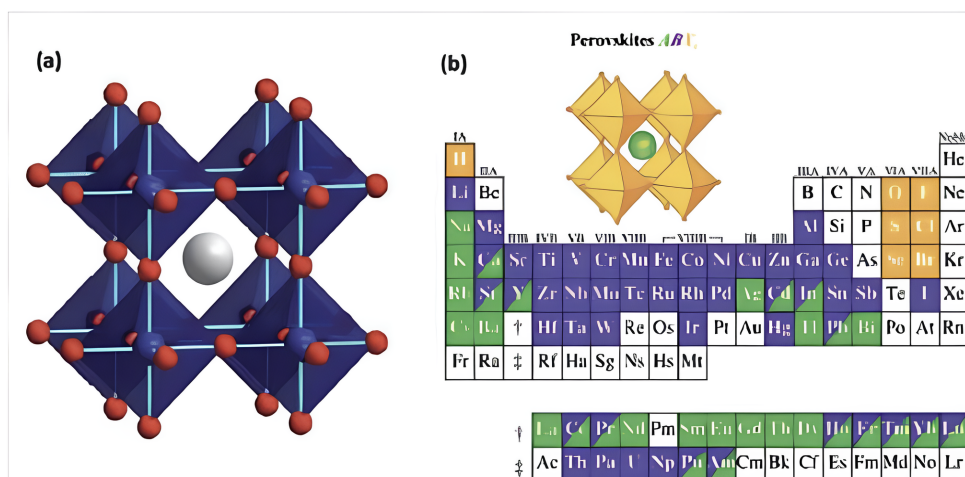
$\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ possui band gap (que é uma faixa de energia em um material onde não existem estados eletrônicos) direto ajustável, coeficiente de absorção de aproximadamente 100 vezes superior ao silício e pode ser depositado abaixo de 120 °C, inclusive sobre filmes PET flexíveis. Em apenas uma década as eficiências de laboratório saltaram de 3,8 % (2009) para mais de 25 % (2022), ritmo que superou o histórico do silício (OLIVEIRA, 2021).

Portanto, destacam-se os aspectos mais importantes dos mesmos, na qual o estudo de células fotovoltaicas é totalmente interessante para a população, que lida, a cada dia, com o aumento do preço da energia elétrica (GARRIDO, 2010).

2.1.3.1 Células solares de perovskita

As células solares de perovskita representam a terceira geração de dispositivos fotovoltaicos: são filmes finos sintetizados em laboratório a partir de precursores químicos de baixo custo, dispensando a extração mineral direta (VASCONCELOS, 2017). Descoberta por Gustav Rose em 1839 e batizada em homenagem ao mineralogista Lev Perovski, a perovskita designa hoje uma ampla família de materiais com estrutura cristalina do tipo ABC_3 (A e B = cátions; C = ânion O^{2-} ou haletos), conforme observado na a Figura 10, o que admite inúmeras combinações de elementos, permitindo ajustar propriedades para aplicações que vão de sensores magnéticos a emissores de luz (RAPHAEL, 2017; INOVAÇÃO TECNOLÓGICA, 2016). A variante empregada em células solares, $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$, é sintetizada em laboratório, não minerada, e forma dispositivos de terceira geração na categoria de filmes finos orgânicos (VASCONCELOS, 2017).

FIGURA 10. (a) - Estrutura da perovskita cúbica ABC_3 , em que a esfera cinza é o cátion A e as esferas azuis e vermelhas representam os íons B e C, respectivamente; (b) possível combinação de elementos que podem ocupar sítios na grade cristalina da perovskita.



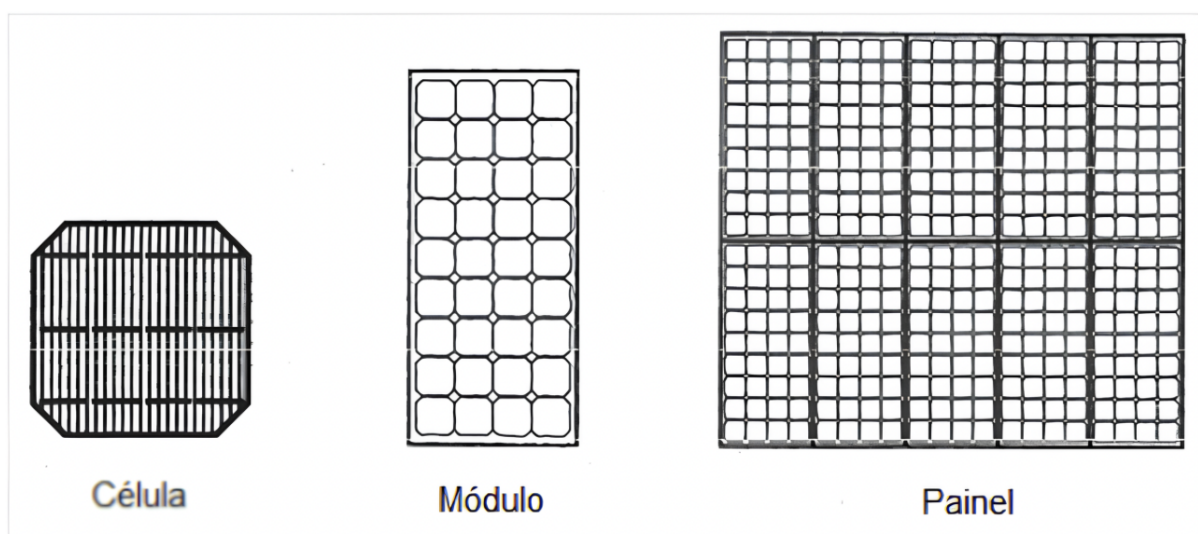
Fonte: Adaptada de OLIVEIRA (2021).

Cada célula é constituída por múltiplas camadas nanométricas e apresenta espessura total de cerca de 1 μm , valor quase 180 vezes menor que o dos wafers de silício, isso resulta em dispositivos ultraleves, flexíveis e até semitransparentes (VASCONCELOS, 2017). A produção comercial, liderada pela polonesa Saule Technologies, emprega um processo patenteado de impressão a jato de tinta em folhas de PET, realizado abaixo de 120 °C. Tal rota “roll-to-roll” consome até 20 vezes menos carbono em relação ao silício tradicional e praticamente não emite CO_2 , configurando-se como alternativa ambientalmente benigna (SAULE TECHNOLOGIES, 2021; VASCONCELOS, 2017). Graças a essa combinação de baixo custo de precursores, manufatura ecológica e versatilidade mecânica, as células de perovskita emergem como plataforma promissora para expandir a geração fotovoltaica em superfícies diversas e contextos onde peso, forma e sustentabilidade são críticas.

2.1.2. Módulos e Painéis Fotovoltaicos

Um módulo pode ter uma quantidade diversa de células, essa quantidade varia de acordo com a demanda de tensão e corrente (CASTRO, 2002). Portanto, um O Módulo Solar Fotovoltaico é definido na norma NBR 10899 (ABNT, 2013). como um arranjo de células fotovoltaicas, constituindo a unidade fundamental de um sistema de painéis solares. A Figura 11 a seguir apresenta de forma simples as distinções entre célula fotovoltaica, módulo fotovoltaico e painel fotovoltaico.

FIGURA 11. Representação esquemática de células fotovoltaicas estruturada em monocamada.



Fonte: PATEL, 1999.

2.1.3. Eficiência das células solares

Os estudos dos painéis fotovoltaicos são viáveis e importantes dentro desse tema, e podem trazer uma solução de problemas como a economia de energia, a qual as residências, comércio e indústria possuem grandes dependências. Inicialmente, é necessário conhecer os tipos de placas solares disponíveis no mercado, a fim de comprar o painel solar mais adequado à demanda do consumidor. Porém existem diversos modelos de painéis fotovoltaicos, os quais se diferenciam, principalmente, pela eficiência energética (a porcentagem de energia solar transformada em energia elétrica).

Sob condições padrão (STC - standard test conditions: 25 °C, 1000 W/m², espectro AM 1.5 G – Air Mass 1.5 Global) a eficiência (η) é dada por:

$$\eta = \frac{P_{in}}{P_{out}} \times 100\% \quad (1)$$

A eficiência de um painel solar refere-se essencialmente à fração da energia da luz solar que incide na superfície do painel fotovoltaico e é transformada em energia elétrica por metro quadrado. É necessário entender que a eficiência dos painéis solares é avaliada em condições laboratoriais, STC (Standard Testing Conditions) (PORTAL SOLAR, 2014). A célula fotovoltaica apresenta uma eficiência superior à do painel solar, pois quando é "encapsulada" em um painel solar, ocorre uma perda de eficiência durante seu processo de fabricação por diversos fatores (PORTAL SOLAR, 2014).

A eficiência energética das células fotovoltaicas é separada pelo INMETRO utilizando uma classificação que é dividida em A, B, C, D e E, sendo que quanto mais próxima da letra A, maior a eficiência. Essa classificação leva em consideração dois tipos de módulos, os de silício cristalino (mono ou poli) que se pode verificar na Figura 12 e o filme fino que se encontra na Figura 13 (OLIVEIRA, 2021).

FIGURA 12. Eficiência dos módulos de silício cristalino (mono ou poli).

CLASSES	ÍNDICE DE MÓDULO		EFICIÊNCIA ENERGÉTICA
	SILÍCIO CRISTALINO	FILMES FINO	
A	EE > 13,5	EE > 9,5	 Mais eficiente
B	13,5 >= EE > 13,0	9,5 >= EE > 7,5	
C	13,0 >= EE > 12,0	7,5 >= EE > 6,5	
D	12,0 >= EE > 11,0	6,5 >= EE > 5,5	
E	EE < 11,0	EE < 5,5	
			Menos eficiente

Fonte: Adaptada de OLIVEIRA (2021).

FIGURA 13. Eficiência em módulos de filmes finos.

CLASSES	FILMES FINOS			EFICIÊNCIA ENERGÉTICA
	ÍNDICE	TOTAL	%	
A	EE > 9,5	15	57,69230769	
B	9,5 >= > 7,5	3	12	
C	7,5 >= EE > 6,5	1	3,846153846	
D	6,5 >= EE > 5,5	3	11,53846154	
E	EE < 5,5	4	15	
		26	100	

Fonte: Adaptada de OLIVEIRA (2021).

2.2. Características dos módulos de perovskita comercializados

Desde 2021 a Saule Technologies mantém uma linha-piloto em regime *B2B* (*business to business*) que imprime módulos solares de perovskita sobre folhas flexíveis de PET (polietileno tereftalato), em processo totalmente realizado abaixo de 120 °C (SAULE TECHNOLOGIES, 2021; OLIVEIRA, 2021). Essa temperatura moderada elimina etapas de fusão de silício e permite ciclos de produção mais curtos, reduzindo drasticamente o consumo energético (VASCONCELOS, 2017; OLIVEIRA, 2021).

Os módulos atuais atingem 10 % de eficiência sob irradiância padrão (1000 W/m²) e até 20 % em condições de baixa iluminância; a empresa projeta padronizar 16,5 % nos próximos lotes comerciais (SAULE TECHNOLOGIES, 2021; OLIVEIRA, 2021). A tecnologia apresenta vantagens distintivas, sendo elas:

- (i) leveza e flexibilidade — massa típica de 200 g/m², podendo ser laminada em superfícies curvas (SAULE TECHNOLOGIES, 2021);
- (ii) transparência seletiva, que viabiliza integração em fachadas ou janelas sem bloquear a luz natural (VASCONCELOS, 2017);
- (iii) pegada de carbono reduzida, com emissões de CO₂ até vinte vezes menores que a rota do silício, graças ao processamento em baixas temperaturas (SAULE TECHNOLOGIES, 2021);
- (iv) aplicações já comercializadas, como persianas fotovoltaicas, “cortinas solares” para sombreamento ativo de edifícios e lâminas energéticas para dispositivos IoT (Internet of Things) (SAULE TECHNOLOGIES, 2021).

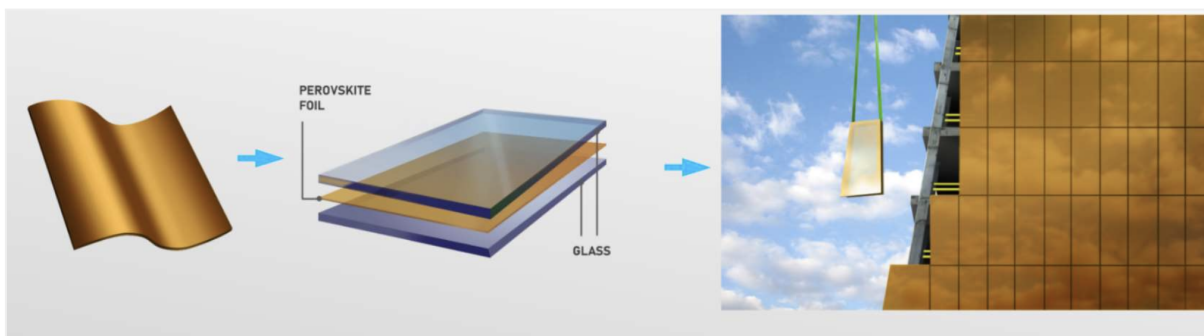
Problemas clássicos, como a sensibilidade à umidade, oxigênio e radiação UV, vêm sendo mitigados por um encapsulamento multibarreira patenteado pela empresa, que objetiva vida útil inicial de “vários anos”, com expectativa de extensão à medida que avançam as formulações de tinta e os métodos de selagem (SAULE TECHNOLOGIES, 2021; OLIVEIRA, 2021).

Em síntese, os módulos de perovskita já no mercado combinam baixo custo por watt, versatilidade de aplicação e impacto ambiental mínimo, despontando como solução promissora para fachadas ativas, dispositivos portáteis e geração distribuída em interiores, ainda que a comprovação de durabilidade em campo permaneça o principal desafio de curto prazo.

2.2.1. Aplicação e comercialização da perovskita

Graças à transparência seletiva, baixo peso (cerca de 200 g/m²) e flexibilidade, módulos PER já são integrados a fachadas envidraçadas (*building-integrated PV*), cortinas fotovoltaicas, tetos automotivos e IoT (*Internet of Things*) que operam com luz ambiente. A Figura 14 mostra um exemplo de projeto elaborado pela Saule Technologies. A tecnologia imprime diretamente sobre vidro, metal ou polímeros, possibilitando produção roll-to-roll e formatos personalizados para edifícios, automotivos ou *wearables* (SAULE Technologies, 2021; OLIVEIRA, 2021).

FIGURA 14. Projeção de uma fachada com vidros de Perovskita.



Fonte: Saule Technologies, 2021.

2.3. Comparação entre células de silício e perovskita

Em relação às células de silício, as células de perovskita apresentam propriedades interessantes, em um curto período de tempo, os níveis de eficiência são semelhantes e, em algumas situações, até superiores. Esses resultados ocorreram devido à composição da perovskita, que com uma fina camada de material é capaz de absorver a maior parte da radiação solar, sendo que 35 Kg de perovskita produzem energia equivalente a sete toneladas

de silício (OXFORD PV,2021), um fato viável graças à alta capacidade de absorção da perovskita (BRENNER, ET AL, 2016).

Por ser um material de gap direto, a perovskita consegue absorver uma maior fração do espectro solar e possui um excelente coeficiente de absorção, tornando-a um material capaz de proporcionar maior eficiência energética aos sistemas fotovoltaicos, na Figura 15, é possível observar algumas vantagens deste material em relação às outras células disponíveis no mercado (SAULE TECHNOLOGIES, 2021).

FIGURA 15. Desempenho das células solares comparadas às células de Perovskita.

	a-Si	c-Si	III / V	Perovskite
Desempenho a Luz do Sol	Baixo	Alto	Alto	Alto
Desempenho em baixa luz	Alto	Baixo	Alto	Alto

Legenda: a-Si – silício amorfo, c-Si - silício cristalino, III / V - células de multijunção;

Fonte: saule tech 2021 adaptado.

As células perovskita-silício oferecem uma eficiência energética mais alta, pois a combinação desses materiais possibilita a absorção de um amplo espectro de luz visível, unindo, portanto, as propriedades de ambos os materiais. Com essa configuração, a fração do espectro solar que não é absorvida pelo silício é utilizada pela perovskita e o inverso também ocorre, levando a recordes de eficiência na conversão de energia (OXFORD PV, 2021).

2.4. Projeção de viabilidade econômica

Os estudos mais recentes de CSEM-Brasil indicam um LCOE (levelized cost of energy) de 0,04 US\$/kWh para módulos de perovskita impressos em escala piloto, valor que representa menos da metade dos 0,10 - 0,20 US\$/kWh praticado pelos painéis de silício cristalino convencionais (DIÁRIO DO COMÉRCIO, 2019; OLIVEIRA, 2021). Esse diferencial decorre principalmente do processamento em baixas temperaturas (menores que 120 °C), da eliminação do lingotamento de silício e do menor investimento de capital (CAPEX).

A Universidade de Stanford calculou o custo de fabricação de filmes de perovskita em 0,25 US\$/ft² (aproximadamente 2,70 US\$/m²), enquanto wafers de silício grau solar ultrapassam 2,50 US\$ por 30cm² (aproximadamente 83 US\$/m²), ou seja, mais de trinta vezes

maior (RAMOS, 2020; OLIVEIRA, 2021). Nessa faixa de preço-por-área, um módulo de perovskita com 20 % de eficiência atingiria 0,25 US\$/W, valor competitivo ou inferior ao intervalo atual de 0,20 - 0,40 US\$/W dos módulos de silício (SAULE TECHNOLOGIES, 2021; OLIVEIRA, 2021).

A curva de aprendizagem do silício - redução aproximada de 99,8 % no preço por watt em meio século - sugere tendência semelhante (ou mais íngreme) para a perovskita, já que a rota roll-to-roll demanda instalações industriais de baixo custo e permite ciclos rápidos de otimização. Projeções do setor situam o CAPEX de uma linha de impressão em $\leq 0,25$ US\$/W instalado, comparado aos 1 - 1,2 US\$/W exigidos por plantas de wafers cristalinos (CSEM-BRASIL, 2020; OLIVEIRA, 2021).

No tocante ao impacto ambiental, o processo de impressão reduz emissões de CO₂ em até 20 vezes e estabelece um EPBT (energy-payback time) inferior a seis meses, antes 1,5 - 2 anos para o silício. Esse desempenho confere à perovskita o potencial de se tornar a tecnologia fotovoltaica de menor custo e menor pegada de carbono na próxima década. Entretanto, estabilidade a longo prazo - especialmente frente a umidade e radiação UV - e padronização industrial permanecem como desafios centrais a serem superados nos primeiros gigawatts de produção comercial.

Em síntese, a perovskita reúne alta eficiência, baixo custo e menor impacto ambiental, mostrando-se uma alternativa economicamente viável. A consolidação do mercado, porém, dependerá da validação em campo dos encapsulamentos avançados e da expansão das linhas piloto para fábricas em escala gigawatt.

3. METODOLOGIA

Para a realização deste projeto, se fez necessário a condução de uma pesquisa de caráter descritivo, uma vez que se emprega um processo organizado para realizar uma análise repleta de detalhes acerca do objeto de estudo que seriam, os diferentes tipos de tecnologias das células solares de perovskita. É essencial destacar que este tema é conhecido, porém raramente discutido, por isso, busca-se um maior aprofundamento. O objetivo principal da pesquisa de caráter descritivo é analisar os dados ou fatos coletados sem a influência do pesquisador, ou seja, sem alterá-los.

Esta pesquisa apresenta natureza qualitativa-quantitativa ou mista, sendo que a dimensão qualitativa é observada, uma vez que seu progresso está centrado na obtenção e na extração de dados qualitativos. Esses dados são utilizados porque possibilitam entender a complexidade das informações obtidas através de estudos descritivos, já que se analisam e descrevem as características e/ou propriedades dessas tecnologias de células fotovoltaicas, abrangendo tanto uma investigação desse problema quanto a descrição detalhada do mesmo. Assim, observa-se também o aspecto quantitativo, que mostrará informações quantificadas (numéricas), as quais serão focadas na objetividade, visando realizar análises e tirar conclusões, como por exemplo a eficácia das células de perovskita desde sua descoberta até os dias atuais.

Para reunir todas as informações, é indispensável a aplicação de um método, que neste caso é somente a pesquisa bibliográfica, já que o progresso deste projeto se dará por meio de materiais disponíveis em livros, artigos, dissertações, teses e sites confiáveis de empresas que falam sobre esses tipos de células solares, com o objetivo de desvendar, coletar e examinar as principais contribuições sobre este objeto de estudo.

Assim, é fundamental a aplicação de certas técnicas de coleta de dados, como: a obtenção de dados qualitativos por meio de bibliografias, a avaliação dos conteúdos de artigos e sites especializados que apresentam a descrição dessas tecnologias de fabricação das células solares, e, acima de tudo, a análise de imagens que enriquece o estudo em destaque. Todas as metodologias mencionadas permitem atingir a meta deste projeto, que é a eficácia energética das células solares de perovskita.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

No ano de 2009 Kojima *et al*, fez o desenvolvimento da primeira célula híbrida de Perovskita no qual utilizaram os compostos químicos do tipo MAPbBr₃ e MAPbI₃, e com isso obtiveram valores de eficiência de 3,13% e 3,81% respectivamente. Em 2011, Im *et al*, utilizaram perovskita do tipo MAPbI₃ e obtiveram eficiência de 6,5%.

Já em 2012, Henry Snaith e sua equipe na universidade de Oxford alcançaram um patamar elevado no desenvolvimento das células solares de perovskita conseguindo uma eficiência energética de 10,9%, o resultado positivo foi possível pois substituíram o líquido eletrólito anteriormente utilizado por Kojima *et al*, e Im *et al*.

Já em 2013, Burschka *et al*, elevaram a eficiência para 15% ao introduzirem uma nova configuração, denominada perovskita mesoporosa. No mesmo ano, Ball *et al*, demonstraram a viabilidade de empregar uma arquitetura planar, semelhante à dos filmes finos amorfos de silício. Com base nessa abordagem, Liu *et al*, conseguiram alcançar também 15% de eficiência, evidenciando o potencial da estrutura planar. Ambas as configurações, mesoporosa e planar, foram desenvolvidas pelo grupo de pesquisa de Henry Snaith e, desde então, têm apresentado avanços contínuos, atingindo, em determinados estudos, eficiências superiores a 22,1%.

Ainda em 2013, Jeng *et al*. introduziram uma nova proposta ao preparar células solares de perovskita com arquitetura invertida, assemelhando-se às células solares orgânicas convencionais. Essa configuração inicial apresentou eficiência de 4%, mas os aprimoramentos ao longo dos anos permitiram que essa estrutura alcançasse atualmente valores em torno de 18%.

A pesquisadora Ana Flávia Nogueira aprimora, desde 2016, em seu laboratório no Instituto de Química da Unicamp (Universidade Estadual de Campinas), a perovskita híbrida orgânico-inorgânica. Ela é sintetizada a partir do uso de compostos químicos como brometo de chumbo, iodeto de chumbo e brometo de cério e uma de suas fórmulas é CH₃NH₃PbI₃, atingindo uma eficiência de 26%.

Em 2023, cientistas na Tailândia construíram uma célula solar de perovskita interna com arquitetura de eletrodos de carbono de baixo custo. O processo de fabricação é baseado na deposição de anti solvente e processamento térmico a vácuo (VTA) e supostamente resulta em maior qualidade de filme de perovskita. O VTA leva a uma morfologia compacta, densa e dura, enquanto suprime os estados em superfícies e limites de grãos, que são os principais

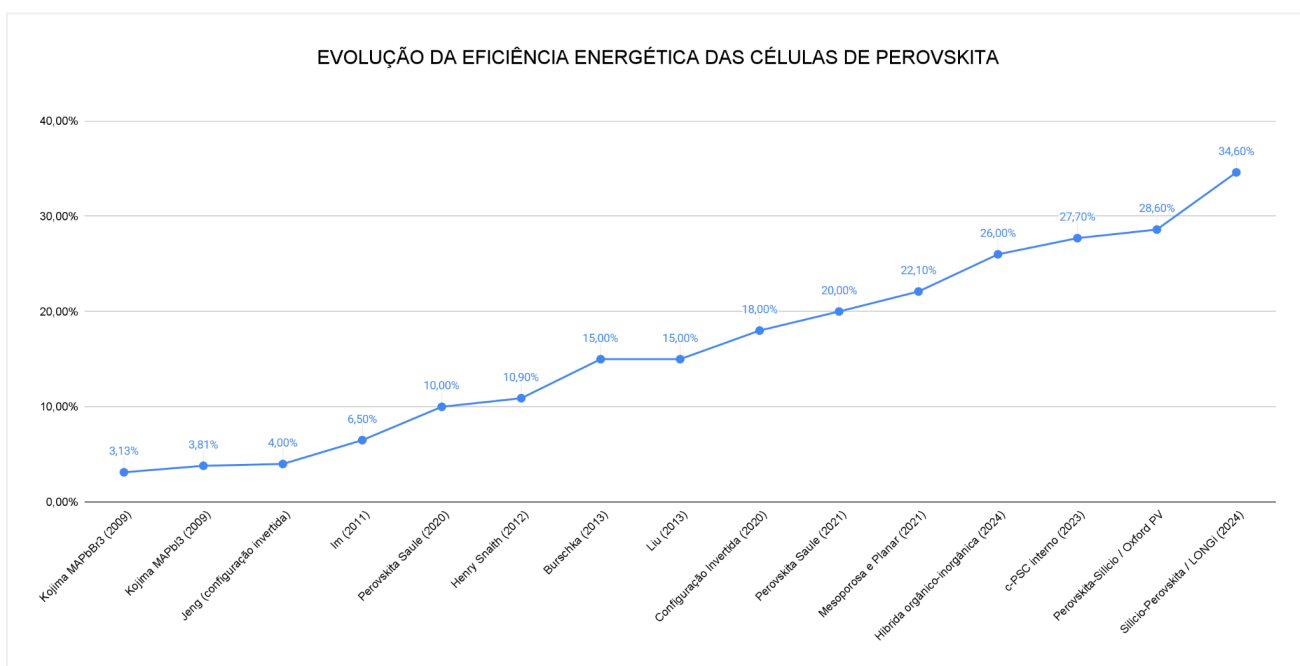
culpados pelas perdas de excitação. Eles usaram um material de perovskita conhecido como $FA0.45MA0.49Cs0.06Pb(I0.62Br0.32Cl0.06)_3$ tratado com brometo e cloreto e a célula mostrou uma eficiência de conversão de energia de 27,7%.

A empresa Saule Technologies conseguem ter células fabricadas e comercializadas que são impressas e sua composição é 100% de Perovskita, tendo uma eficiência de 10% a plena luz, 20% em condição de baixa luz (SAULE TECHNOLOGIES,2021). Já a Oxford PV fabrica células da junção de perovskita – silício alcançando valores recordes de conversão energética, com valores de 28,6%.

O recorde mundial de eficiência energética atualmente registrado é da equipe LONGi que alcançou uma eficiência de 34,6%. A célula solar tandem de silício-perovskita, tem como a principal rota tecnológica para células solares ultra eficientes de próxima geração, possui uma eficiência máxima teórica de até 43%, superando de longe o limite de eficiência de Shockley-Queisser das células solares de junção única (33,7%).

Um representante da LONGi afirmou: “Nossa tecnologia de célula tandem desenvolvida pode se integrar com os processos existentes de células baseadas em silício, possibilitando uma atualização e interação das tecnologias atuais de células solares”. Na Figura 16 pode-se verificar a evolução da eficiência energética da perovskita.

FIGURA 16. Evolução da eficiência das células solares de Perovskita.



Fonte: O próprio autor.

A análise dos dados coletados demonstra que as células solares de perovskita vêm evoluindo rapidamente em termos de eficiência energética, tornando-se superiores às tecnologias convencionais. Em experimentos laboratoriais, superaram os 34,60% de eficiência, e em configurações tandem, podem chegar a 43% (LONGi, 2024). Entretanto, esses valores ainda são limitados à escala de laboratório e a produção em escala industrial enfrenta desafios de estabilidade, padronização e segurança ambiental.

A literatura consultada destaca que esforços conjuntos entre universidades e empresas têm acelerado o desenvolvimento de soluções técnicas para encapsulamento e substituição de materiais tóxicos. Há também uma tendência crescente na aplicação dessa tecnologia em contextos urbanos, como fachadas solares, integradas com arquitetura sustentável.

A Saule Technologies Inc. tornou-se pioneira de uma nova tecnologia solar que recebeu reconhecimento internacional, na qual desenvolve painéis solares que além de impressos, são flexíveis e podem ser colocados em qualquer superfície para transformá-la numa fonte de energia. Com isso, conseguem combinar o conhecimento especializado e uma sólida abordagem de negócios para o desenvolvimento eficaz de produtos.

Em suma, há alguns principais pontos que podem ser analisados quando se compara células de silício que estão atualmente no mercado e a perovskita:

Eficiência: Módulos comerciais de silício cristalino entregam hoje 15 - 22% de conversão (INMETRO, 2017; OLIVEIRA, 2021), enquanto protótipos industriais de perovskita já operam entre 10 - 20%, e células de pesquisa ultrapassam 25% (SAULE TECHNOLOGIES, 2021; OLIVEIRA, 2021). A velocidade de ganho da perovskita é notável: em apenas 16 anos a eficiência laboratorial passou de 3,8% para a faixa de 34%.

Custo por watt: O avanço do silício ao longo de meio século reduziu seu preço de 70 US\$/W para 0,20 - 0,40 US\$/W nos módulos padrão (PORTAL SOLAR, 2020; OLIVEIRA, 2021). Perovskitas impressas em rolo têm meta industrial de 58,5 US\$/m²; isso se traduz em 0,58 US\$/W para painéis de 10% e 0,29 US\$/W para 20%, valor aproximadamente 28% menor que o silício em eficiência equivalente (SAULE TECHNOLOGIES, 2021; OLIVEIRA, 2021).

Pegada de carbono: A rota Czochralski do silício requer fusão de SiO₂ a 1500 °C, liberando grande quantidade de CO₂; já a impressão de perovskita ocorre em menos de 120°C

e pode cortar as emissões em até vinte vezes (VASCONCELOS, 2017; SAULE TECHNOLOGIES, 2021; OLIVEIRA, 2021).

Durabilidade e estabilidade: Células de silício mantém pelo menos 80% da potência inicial por mais de 25 anos em campo. As perovskitas, embora ainda suscetíveis à umidade, oxigênio e radiação UV, já contam com encapsulamento multibarreira patenteado que projeta “vários anos” de vida útil inicial, com tendência de aumento conforme evoluem as barreiras protetoras (SAULE TECHNOLOGIES, 2021; OLIVEIRA, 2021).

Síntese: Perovskitas oferecem ganhos claros de leveza, custo e sustentabilidade, além de trajetória de eficiência ascendente; entretanto, a consolidação comercial depende da validação de estabilidade de longo prazo. No cenário atual, elas se posicionam como forte candidata a complementar - e, em nichos de aplicação, até mesmo substituir - o silício na próxima geração de sistemas fotovoltaicos.

O principal desafio no avanço contínuo da tecnologia fotovoltaica é elevar o desempenho das células, diminuir o preço de mercado dos módulos e aprimorar a eficiência e o custo dos métodos de produção.

5. CONCLUSÃO

Embora o silício continue sendo muito utilizado, ocorreu uma estagnação no aumento de sua eficiência devido ao avanço acelerado da perovskita, o que mostra uma tendência de mudança no setor fotovoltaico. Os dados coletados indicam que, enquanto o silício se aproxima de seus limites técnicos, a perovskita ainda possui uma margem para melhorias significativas, tais melhorias podem representar um novo capítulo na história da geração solar.

As células solares de perovskitas mostraram um rápido progresso e crescimento em sua eficiência energética (EE). Desde que foram descobertas em 2009 por Kojima, apresentavam cerca de 3,13% de eficiência energética, aumentando para 34,60% de eficiência e começando a ser comercializadas pela empresa Saule Technologies apenas 12 anos após sua descoberta. Em relação aos outros tipos de tecnologia solar, a perovskita foi a que apresentou o maior aumento na eficiência energética em um curto período de tempo. Em 16 anos, as células solares de perovskitas alcançaram um aumento de eficiência energética de 1005,43%.

Outro ponto que deve ser considerado é a questão ambiental, a perovskita, de modo geral, demanda menos energia para ser produzida, pois a rota Czochralski do silício requer fusão de SiO_2 a 1500 °C, liberando grande quantidade de CO_2 , já a impressão de perovskita ocorre em menos de 120°C e pode cortar as emissões em até vinte vezes. Esse aspecto reforça seu alinhamento com as exigências atuais por soluções mais sustentáveis e menos agressivas ao meio ambiente. Além disso, o interesse crescente da indústria, com empresas já apostando em linhas de produção baseadas nessa tecnologia, é um indicativo de que ela tende a aumentar a competitividade do setor, estimulando outras inovações que podem beneficiar diretamente o consumidor final.

Os resultados alcançados por meio deste trabalho constatou um significativo progresso na área dos dispositivos fotovoltaicos e além disso, vale ressaltar que as células solares de perovskita demonstraram alto potencial para implementação em grande escala em um intervalo de tempo relativamente curto.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

34,6%! Quebra de Recorde: LONGi estabelece novo recorde mundial de eficiência para células solares Tandem de Silício-Perovskita. Disponível em: <<https://www.longi.com/br/news/2024-snec-silicon-perovskite-tandem-solar-cells-novo-recorde/>>. Acesso em: 4 jul. 2025.

AHMAD, Lujean *et al.* **Recent advances and applications of solar photovoltaics and thermal technologies.** Energy, v. 207, p. 118254, 2020.

ALVES, Jaciel Franco; CARVALHO, Laísa Cristina. **IMPLANTAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA: análise da viabilidade econômica em supermercado de porte médio.** -, 2019.

ANTÔNIO, M.; OLIVEIRA, J. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://bib.pucminas.br:8080/pergamumweb/vinculos/00009f/00009f67.pdf>>. Acesso em: 12 jul. 2025.

Brasileiros desenvolvem material que promete células solares mais eficientes - ABSOLAR. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/noticia/https-vitorianews-com-br-brasileiros-desenvolvem-material-que-promete-celulas-solares-mais-eficientes/>>. Acesso em: 5 jul. 2025.

BRIVIO, F., Butler, K. T., Walsh, A. & van Schilfgaarde, M. **Relativistic quasiparticle self-consistent electronic structure of hybrid halide perovskite photovoltaic absorbers.** Phys. Rev. B 89, 155204 (2014).

BÜHLER, Alexandre José; DOS SANTOS, Fernando Hoefling; GABE, Ivan Jorge. **Uma revisão sobre as tecnologias fotovoltaicas atuais.** In: Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS. 2018.

Burschka, J. *et al.* **Sequential deposition as a route to high-performance perovskite-sensitized solar cells.** Nature 499, 316–320 (2013).

CASARIN, R. **Célula solar com película de perovskita quebra recorde de eficiência.** Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/noticias/tecnologia/equipamentos-fv/celula-solar-com-película-de-perovskita-quebra-recorde-de-eficiencia>>. Acesso em: 6 jul. 2025.

CASTRO, Rui M.G. **Introdução à Energia Fotovoltaica.** 2002. Energias Renováveis e Produção Descentralizada, Universidade Técnica De Lisboa - Instituto Superior Técnico.

CSEM BRASIL – centro de pesquisa e desenvolvimento gerando soluções inovadoras para empresas - Petrobras e CSEM Brasil unem forças para entregar a próxima geração de energia solar usando filmes fotovoltaicos impressos. Disponível em: <https://csembrasil.com.br/petrobras-and-csem-brasil-join-forces-to-deliver-next-generation-of-solar-energy-using-printed-photovoltaic-films/> Acesso em: 6 jul. 2025.

DIÁRIO DO COMÉRCIO. Perovskita pode baixar custo da energia solar no Brasil. São Paulo, 22 jul. 2019. Disponível em: <https://www.diariodocomercio.com.br>. Acesso em: 6 jul. 2025.

DIENSTMANM, Gustavo. **Energia Solar: uma comparação de tecnologias.** 2009. 92 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

DURGANJALI, C. Santhi *et al.* **Recent developments and future advancements in solar panels technology.** In: Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2020. p. 012018.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **MATRIZ ENERGÉTICA.** Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>.

ENERGIA, Neosolar. **O QUE É ENERGIA SOLAR: TUDO SOBRE,** 2012. Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/energia-solar#>.

Energia Fotovoltaica: Manual sobre tecnologias, projeto e instalação. (2004).

EVEN3. **Diferença entre pesquisa exploratória, descritiva e explicativa.** Disponível em: <https://blog.even3.com.br/pesquisas-exploratoria-descritiva-e-explicativa/>.

FERNANDES, Silvia Leticia. **Desenvolvimento de células solares de perovskita baseadas em filmes de óxidos nanoestruturados.** 2016. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia dos Materiais) – Instituto de Química de Araraquara, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Araraquara, 2016.

GARRIDO, Emmanuel Loureiro. **Concepção e certificação de nova geração de candeeiros de iluminação pública.** 2010. 98 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Electrotécnica e de Computadores Major de Energia, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2010.

HENRIQUE, P.; MARTINEZ, N.; FERREIRA, S. **UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ MURILO GONÇALVES ANTUNES ESTUDO COMPARATIVO ENTRE AS CÉLULAS SOLARES FOTOVOLTAICAS INORGÂNICAS E ORGÂNICAS CURITIBA 2021.** [s.l.: s.n.]. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/34474/1/celulassolaresinorganicasorganicas.pdf>.

HONSBURG, C.; BOWDEN, S. **Solar Cell Structure | PVEducation.** Disponível em: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/solar-cell-structure> Acesso em 02 de fevereiro de 2025.

IEA. **World Energy Outlook 2023 – Analysis.** Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>.

IM, J.-H., Lee, C.-R., Lee, J.-W., Park, S.-W. & Park, N.-G. **6.5% Efficient Perovskite Quantum-Dot-Sensitized Solar Cell.** Nanoscale 3, 4088 (2011).

Indoor perovskite PV solar cells with 32.0% efficiency. Disponível em: <<https://www.pv-magazine.com/2023/07/07/indoor-perovskite-pv-solar-cells-with-32-0-efficiency/>>. Acesso em: 5 jul. 2025.

INMETRO/GOV. **Tabelas de eficiência energética.** Disponível em: <https://www.gov.br/inmetro/pt-br/assuntos/avaliacao-da-conformidade/programa-brasileiro-de-etiquetagem/tabelas-de-eficiencia-energetica>. Acesso em: 06 jul. 2025.

INOVAÇÃO TECNOLÓGICA. **Material do futuro é sintetizado por mecanoquímica.** Disponível em: <<https://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=perovskitas-material-futuro-sintetizado-mecanoquimica&id=010115160125>>. Acesso em: 10 jul. 2025.

JENG, J. Y. *et al.* **CH₃NH₃PbI₃ perovskite/fullerene planar-heterojunction hybrid solar cells.** Adv. Mater. 25, 3727–3732 (2013).

KOJIMA, A., Teshima, K., Shirai, Y. & Miyasaka, T. **Organometal Halide Perovskites as Visible-Light Sensitizers for Photovoltaic Cells.** J. Am. Chem. Soc. 131, 6050–6051 (2009).

MACHADO, C. T.; MIRANDA, F. S. Energia Solar Fotovoltaica: Uma Breve Revisão. **Revista Virtual de Química**, v. 7, n. 1, p. 126–143, 2015.

MONKEY, Survey. **Diferença entre a pesquisa quantitativa e a qualitativa.** Disponível em: <https://pt.surveymonkey.com/mp/quantitative-vs-qualitative-research/>.

MORAES, Caio. **CÉLULA FOTOVOLTAICA: TUDO QUE VOCÊ PRECISA SABER.** Disponível em: <https://eletronicadepotencia.com/celula-fotovoltaica/>.

MUTERI, Vincenzo *et al.* **Review on life cycle assessment of solar photovoltaic panels.** Energies, v. 13, n. 1, p. 252, 2020.

OLIVEIRA, J. P. de. **Avaliação dos custos nivelados de energia para diferentes tecnologias fotovoltaicas.** 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

OLIVEIRA, Marco Antônio Junior Souza. Estudo comparativo entre células solares perovskita e silício. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Contagem, 2021. Disponível em: <http://bib.pucminas.br:8080/pergamumweb/vinculos/00009f/00009f67.pdf>. Acesso em: 7 jul. 2025.

OLIVEIRA, Othon Garcia; OLIVEIRA, Rafael Henrique; GOMES, Renato Oliveira. **Energia solar: um passo para o crescimento.** REGRAD-Revista Eletrônica de Graduação do UNIVEM-ISSN 1984-7866, v. 10, n. 01, p. 377-389, 2017.

Oxford PV sets new solar panel efficiency world record | Oxford PV. Disponível em: <https://www-oxfordpv-com.translate.goog/news/oxford-pv-sets-new-solar-panel-efficiency-world-record-0?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=pt&_x_tr_hl=pt&_x_tr_pto=sge>. Acesso em: 5 jul. 2025.

PATEL, M. R. **Wind and solar power systems**. Boca Raton: CRC Press LLC, 1999.

PROJETO DE UM SISTEMA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICO PARA APLICAÇÃO EM RESIDÊNCIA. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.sorocaba.unesp.br/Home/Graduacao/EngenhariadeControleeAutomacao/galdenoro1906/galdenoro-tcc-luiz-gustavo-tiba-tguniversidade-estadual-paulista-julio-de.pdf>>.

RAMOS, Ademilson. **ENGENHARIA E. Cientistas desenvolvem uma maneira ultrarrápida de fabricar módulos solares de perovskita.** Disponível em: <https://engenhariae.com.br/editorial/energia-verde/cientistas-desenvolvem-uma-maneira-ultrarapida-de-fabricar-modulos-solares-de-perovskita>. Acesso em: 6 jul. 2025.

RAPHAEL, Ellen. SILVA, Mariana Nascimento, SZOSTAK, Rodrigo. SCHIAVON, Marco Antônio. NOGUEIRA, Ana Flávia - **CÉLULAS SOLARES DE PEROVSKITAS: UMA NOVA TECNOLOGIA EMERGENTE**. Quim. Nova, Vol. 41, No. 1, 61-74, 2018.

Rosa, C.A; Filho, G.L.T. **Série Energia Renováveis Solar**. Itajubá: Cerpch, 2007.

SANTOS, Alana Santiago dos. **O estado da arte das células fotovoltaicas**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2018.

SAULE TECHNOLOGIES - **Células solares totalmente impressas**. Disponível em: <https://sauletech.com/technology/>. Acesso em 5 de julho de 2025.

SERODIO, Leonardo Moutinho. Estado da arte da obtenção de Silício Grau Solar. 2009.

SOLAR, Nhs. **Conheça as principais tecnologias de painel solar disponíveis no mercado**. Disponível em: <https://www.nhssolar.com.br/conheca-as-principais-tecnologias-de-painel-solar-disponiveis-no-mercado/>.

SOLAR, Portal. **Energia Solar: Desvantagens**, 2014. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/energia-solar-desvantagens>.

SOLAR, Portal. **Painel solar: o que é, como funciona e tipos**. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/painel-solar>.

SOLAR, Portal. **Vantagens da energia solar: descubra todas aqui**, 2014. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/vantagens-da-energia-solar>.

UFRJ – Universidade federal do rio de janeiro - **Semicondutores**. Disponível em: <https://www.if.ufrj.br/~capaz/fmc/cap8-semicondutores.pdf>. Acesso em: 5 de julho de 2025.

VASCONCELOS, Yuri. **Luz mais eficiente**. *Pesquisa FAPESP*, São Paulo, n. 260, 2017. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/luz-mais-eficiente/>. Acesso em: 06 jul. 2025.

GLOSSÁRIO

Band gap: É a diferença de energia entre a banda de valência e a banda de condução de um material semicondutor. Essa diferença determina a quantidade de energia necessária para que um elétron seja excitado da banda de valência para a banda de condução, onde pode participar da condução elétrica.

Célula Tandem: É um tipo de célula fotovoltaica que combina duas ou mais células solares em camadas, cada uma com uma banda proibida diferente, para melhorar a eficiência da conversão de luz solar em eletricidade.

Wafers de silício: São finas lâminas circulares de silício cristalino usadas como substrato para a fabricação de dispositivos eletrônicos, como circuitos integrados e células solares.



RELATÓRIO Nº 4/2025 - DCMNP (11.62.05)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 26/07/2025 11:54)

ANDRE LUIS MARCOMINI

PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO

DCMNP (11.62.05)

Matrícula: ###472#9

Visualize o documento original em <https://sig.cefetmg.br/documentos/> informando seu número: **4**, ano: **2025**, tipo:
RELATÓRIO, data de emissão: **26/07/2025** e o código de verificação: **1ccb6c457b**