

# CÉLULAS FOTOVOLTAICAS E APLICAÇÃO DE NANOMATERIAIS: UMA VISÃO DO CENÁRIO ATUAL

F. L. Kadel<sup>1</sup>, M. M. Nunes<sup>1</sup>, T. G. Maraschin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil  
(felipe061603@gmail.com)

<sup>2</sup>Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil

As células solares são tecnologias de geração de energia limpa e referência se tratando de sustentabilidade. Porém, sua construção limita sua eficiência e seu caráter sustentável. Podem ser empregados nanomateriais e materiais avançados para otimização de seus desempenhos. Assim, este trabalho destaca a aplicação do grafeno e da perovskita nestes dispositivos. Além disso, o caráter sustentável das células depende de sua durabilidade e reciclagem, que também são abordados no presente estudo.

*Palavras-chave:* Nanomateriais; Grafeno; Perovskita; Células Solares; Energia Solar.

## INTRODUÇÃO

Relatado em 1839 por Alexandre-Edmond Becquerel, o efeito fotovoltaico foi uma das maiores descobertas de seu tempo e viabilizou o que conhecemos hoje como energia solar. Este fenômeno consistia na energia elétrica vinda da iluminação de cloreto de prata em meio ácido, e é estudado por incontáveis profissionais desde então (Szabó, 2017).

O engenheiro americano Charles Fritts é reconhecido atualmente como o inventor da primeira célula fotovoltaica. Passado-se 44 anos após a descoberta de Becquerel, Fritts criou uma célula aplicando selênio entre duas camadas metálicas, uma de ferro e outra de ouro (Szabó, 2017). Assim, mesmo tendo uma eficiência menor que 1%, este foi o ponto de partida para as descobertas que o sucederam (Fraas, 2014). Atualmente, a energia solar teve inúmeros avanços e modificações, se tornando uma referência quando se trata de geração de energia limpa.

Em 2015, a Organização das Nações Unidas (ONU) lançou o projeto chamado Agenda 2030, que serviria como um mobilizador para o desenvolvimento mundial, nela contendo 17 metas chamadas de Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e aplicadas às nações integrantes da organização (Kunz *et al.*, 2018). Dentre os 17 ODS, destaca-se o objetivo concernente à energia limpa e acessível (ODS 7) que visa à geração de energia sustentável de forma a suprir a demanda energética da sociedade sem exaurir os recursos do planeta ou prejudicar a fauna e flora nele presentes (Calzadilla e Mauger, 2017). Além disso, a ONU, através do Tratado de Paris e da *Net Zero Coalition*, visa reduzir o aquecimento global e as emissões de CO<sub>2</sub> até 2030, e atingir a neutralidade em 2050 (United Nations, 2024).

Assim, mais uma vez, a energia solar é tida como referência no setor energético, uma vez que não gera

poluentes ou gases x estufa e faz uso de um recurso ilimitado, já que o sol fornece  $3 \times 10^{24}$  J ao ano para o nosso planeta (Ranjan *et al.*, 2011). A geração de energia através de células solares e a discussão de tópicos descrevendo sua composição, eficácia e reciclagem, serão abordados no presente trabalho, uma vez que também definem o caráter sustentável deste método.

Paralelamente, a nanotecnologia é considerada como uma das mais relevantes do século e tem sido amplamente explorada pela comunidade científica. Esta tecnologia se dedica à compreensão e aplicação das propriedades da matéria em escala nanométrica ( $10^{-9}$  m) (Khan *et al.*, 2022). Uma de suas aplicações é a energia solar, que emprega em sua estrutura o uso de nanomateriais, *i. e.* materiais que possuem uma de suas dimensões em escala nanométrica (Wang *et al.*, 2022). Estes possuem o potencial de viabilizar ou otimizar a eficácia da célula em converter a energia luminosa à energia elétrica (Abdin *et al.*, 2013).

Diante disso, o presente trabalho visa prover uma visão geral do atual cenário onde a produção de células solares está inserida, e também da aplicação de nanomateriais na mesma. Analogamente, este estudo tem como objetivos específicos abordar tópicos como eficiência, construção e reciclagem dos dispositivos aqui estudados.

## MATERIAL E MÉTODOS

Para obter uma visão inicial do cenário explorado, foram realizadas buscas na plataforma Scopus, empregando os termos ALL("solar cells") para estudar as publicações relacionadas, e ALL("solar cells") AND ALL("nanomaterials") para estudar revisões publicadas no último ano (2023-presente) que abordaram o tema. Então, ao extrair os 4.479 resultados da última busca, empregou-se o software VOSviewer para gerar um mapa dos termos mais frequentes e suas co-ocorrências. Para visualização

mais clara dos termos relevantes, foram selecionados aqueles termos com mais de 41 ocorrências e que fossem relacionados com o tema da busca, desta forma gerando um mapa de 131 termos (Figura 5). O software empregado suportou compilar até 5 mil artigos em mapa, portanto, a busca realizada foi a mais adequada para tal.

Após isso, realizou-se buscas direcionadas pelos três termos mais relevantes sendo eles: Performance; Grafeno e Perovskita, além dos termos específicos deste estudo: Eficiência; Descarte e Reciclagem, em seus equivalentes na língua inglesa. Além disso, analisou-se estatísticas de busca fornecidas pela própria plataforma Scopus.

## CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

### Cenário de produção

Atualmente, a produção de células fotovoltaicas representa um grande mercado, tanto em escala nacional quanto mundial, com um volume de mercado mundial estimado em 1.84 mil gigawatts neste ano (2024), e com uma perspectiva de crescimento de 3,24 mil gigawatts nos próximos cinco anos (Mordor Intelligence, 2024).

De acordo com a mesma análise de mercado, o cenário comercial das células solares é altamente competitivo e não-concentrado, *i. e.* não é controlado por fornecedores majoritários. Mesmo assim, alguns dos líderes deste mercado são: SunPower Corporation, LONGi Green Energy Technology Co. Ltda. e Trina Solar Ltda., estimados em 500,14 milhões USD, 152.70 bilhões USD e 53.15 bilhões USD, respectivamente.

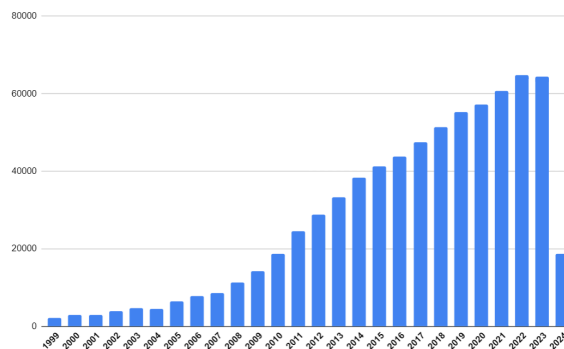
Majoritariamente, as células solares comerciais fazem uso de semicondutores de silício, como, por exemplo, a LONGi Green Energy Technology, que detém o recorde de maior eficiência de célula com heteroestruturas de silício a 27,1% (Figura 2).

O silício é um semimetal/metaloide conhecido por ser um bom semicondutor devido a sua distância de banda (*band gap*). Além disso, o silício é o segundo elemento mais abundante na crosta terrestre e tem processamento de baixo custo, o que torna sua aplicação economicamente viável (Sabatino *et al.*, 2024). Por isso, este semicondutor é amplamente aplicado em eletrônicos e, em especial, em células fotovoltaicas. No entanto, mesmo que abundante e promissor, a eficiência de conversão destas células pode ser um desafio, quando comparado a células com outros materiais e técnicas (Bagher *et al.*, 2015).

O silício (Si) tem um *band gap* de 1,1 eV, o que significa que fótons com a mesma quantidade de energia são capazes de excitar os elétrons da camada de valência para a camada de condução, através do efeito fotoelétrico, proposto por Becquerel (Ranjan *et al.*, 2011). Além disso, podem ser adicionadas impurezas ao Si como fósforo e boro, para que assim, ele possa ser utilizado como um sistema p-n, corroborando o fluxo de elétrons e lacunas na rede cristalina, que geram corrente elétrica e potencial elétrico. Dessa forma, o silício se tornou o principal material na produção das células solares comerciais (Sabatino *et al.*, 2024).

### Cenário de pesquisa e desenvolvimento

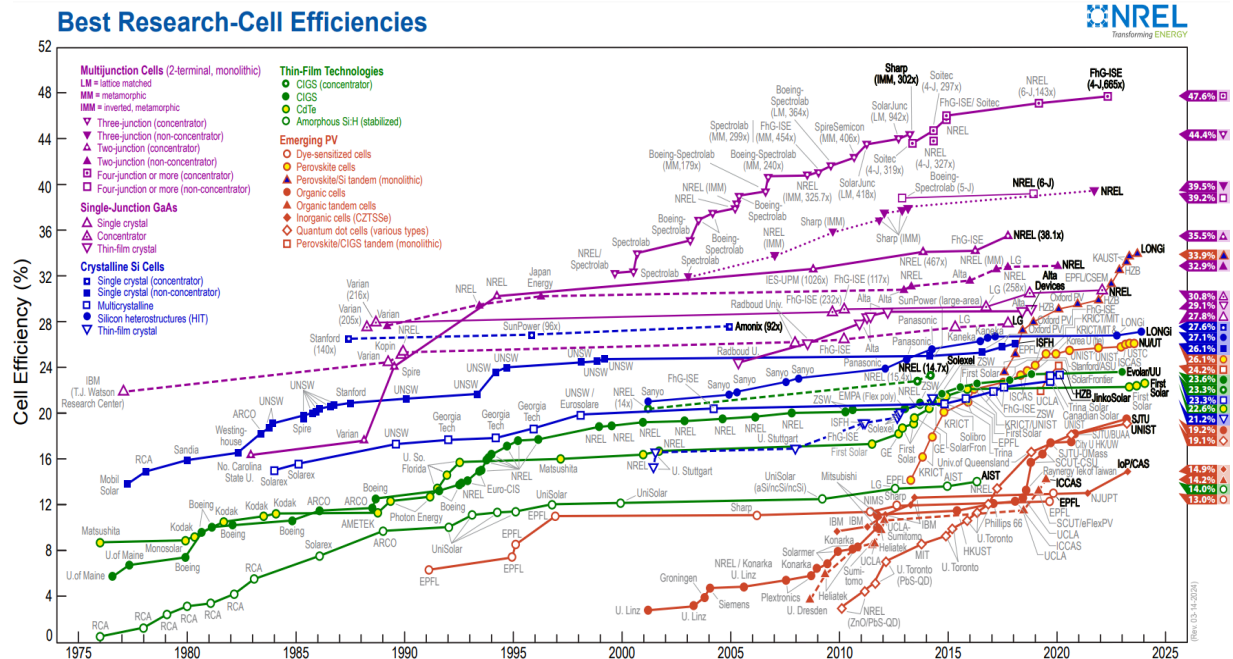
Ademais, o termo “células solares” ocupa uma extensa área no cenário científico. No último ano (2023) foram publicados 64,4 mil trabalhos com este tema, similarmente ao ano anterior. Na Figura 1, podemos ver a quantidade de publicações na plataforma Scopus com este termo e seu crescimento ao longo dos últimos 25 anos.



**Figura 1.** Gráfico de publicações com o tema “células solares” nos últimos 25 anos, de 1999 a Abril de 2024.

Desta forma, evidencia-se a constante ascensão da energia solar tanto em aspecto comercial quanto científico.

Com esta ascensão, as células solares tiveram um crescimento correspondente em seu desempenho e variedade, como evidenciado na Figura 2. Neste gráfico, provido pelo laboratório estadunidense *National Renewable Energy Laboratory*, podemos analisar o recorde de eficiência das células solares, e observar que a eficiência destes dispositivos andou um longo caminho desde os 1% iniciais. Atualmente, existe uma ampla variedade de células fotovoltaicas, atingindo o recorde de 47,6% de eficiência.



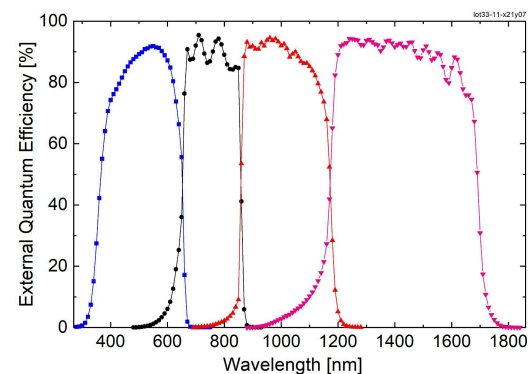
**Figura 2.** Gráfico de recordes de eficiência de diferentes tipos de células solares.

Como reportado pelo *National Renewable Energy Laboratory* (2024), o atual recorde de performance é de 47,6%, que é detido pelo grupo de cientistas alemães do *Fraunhofer-Institut*. Neste, o grupo apresenta uma célula solar de múltipla junção, *i. e.* uma célula composta por múltiplas camadas de materiais semicondutores, projetando as camadas para que a célula tenha absorção de uma faixa mais ampla do espectro solar (Bagher *et al.*, 2015). Essa configuração permite uma eficiência superior em comparação com as células solares tradicionais de silício.

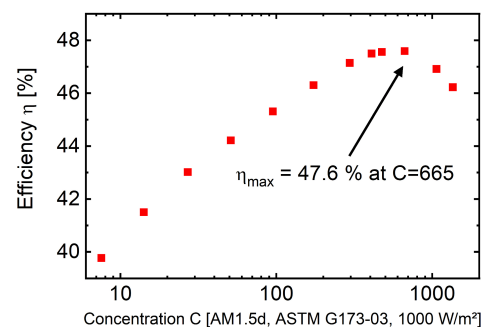
Como divulgado pelo *Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems* (2022), a célula criada é de junção quádrupla e faz uso de fosfeto de índio-gálio (GaInP) e arsenieto de alumínio-gálio (AlGaAs) em sua camada superior e fosfeto arsenieto de alumínio-gálio (GaInAsP) e arsenieto de índio-gálio (GaInAs) em sua camada inferior, assim se caracterizando como uma célula de junção quádrupla.

O arsenieto de gálio (GaAs) é um composto frequentemente usado como semicondutor, substituindo o silício, e possui propriedades favoráveis à sua aplicação em células solares, *e. g.* distância de banda (*band gap*) e mobilidade de elétrons (Blakemore, 1982). No entanto, este pode ter um mais alto custo de produção em comparação com o silício. A adição de outros elementos das famílias III e V permite a absorção de luz numa maior faixa de comprimento de onda, como evidenciado pelo *Fraunhofer Institute* em 2022 (Figura 3). Assim, a célula com recorde de *performance* é sensível à luz

na faixa de 300 e 1780 nanômetros com eficiência de absorção de 47,6% na luz concentrada de 665 sóis, como visto nas Figuras 3 e 4, providas pelo grupo do *Fraunhofer-Institut*.



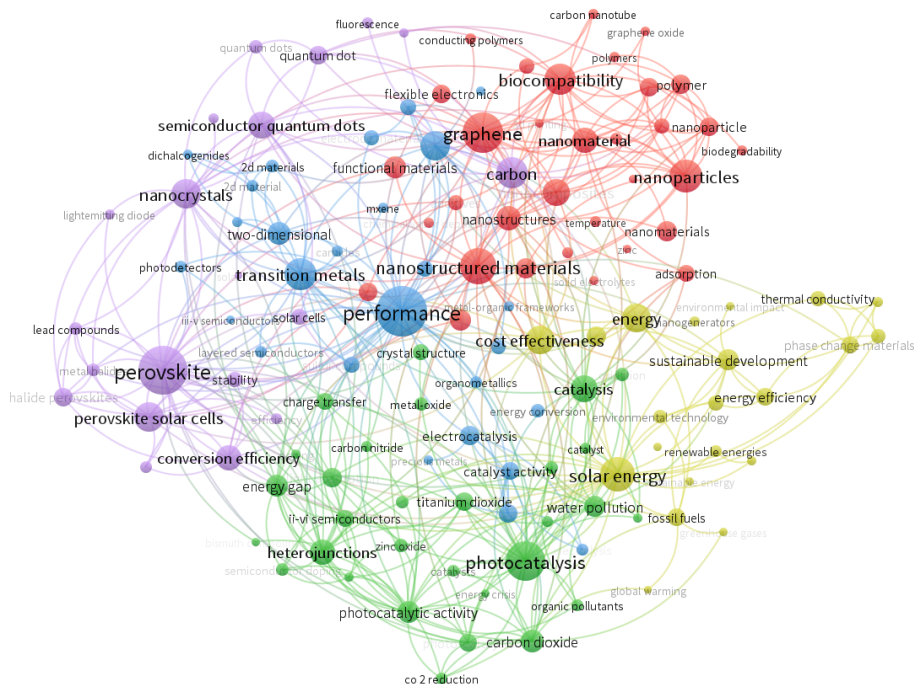
**Figura 3.** Eficiência quântica externa da célula recorde em diferentes comprimentos de onda.



**Figura 4.** Eficiência de conversão da célula recorde.

Visando prover uma visão geral do cenário científico atual onde o tema se encontra, gerou-se o mapa de co-ocorrências dos termos relevantes (Figura 5) que viabilizou nortear o presente trabalho.

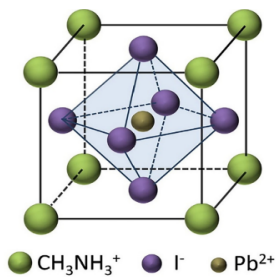
O grafeno e a perovskita são dois materiais avançados que vêm sendo aplicados a geração de energia solar, otimizando sua performance. Diante disso, o presente estudo tem maior foco nestes dois materiais.



**Figura 5.** Mapa de co-ocorrências dos termos mais frequentes no cenário científico.

# PEROVSKITA EM CÉLULAS SOLARES

Descoberta em 1839 pelo mineralogista Lev Perovski, a perovskita é um material avançado de grande relevância na área da mineralogia e ciência dos materiais. O que caracteriza este mineral é sua estrutura cristalina, como representado na Figura 6, que tem fórmula química  $ABX_3$ , sendo X um ânion normalmente haleto, e A e B cátions, *e.g.*  $CaTiO_3$ ,  $BaTiO_3$ ,  $CH_3NH_3PbX_3$ , e que pode ter um *band gap* entre 1,6 e 2,3 eV, dependendo de sua composição (Bagher *et al.*, 2015).



**Figura 6.** Representação da estrutura da perovskita.

“Células solares de perovskita são a área de pesquisa mais emergente dentro a nova geração de tecnologias fotovoltaicas, devido à sua super eficiência de conversão energética” (Kumar *et al.* 2018). A estrutura cristalina bem projetada e a composição química da perovskita permitem a eficiência quântica e absorção de luz eficiente em uma ampla faixa espectral (Kumar *et al.* 2018). Além destas vantagens, também ressalta-se sua facilidade de processamento e abundância de recursos, o que confere vantagem em relação a outros materiais semicondutores, como o silício (Bagher *et al.*, 2015). Por serem custo-eficientes, as perovskitas têm potencial para competir com o silício e se tornar a tecnologia de células fotovoltaicas mais usada no futuro (Ndalloka *et al.*, 2024).

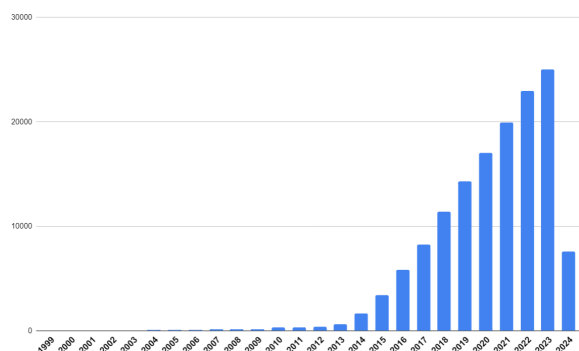
Em 2009, um estudo de Miyasaka *et al.* explorou o uso de perovskitas de haletos organometálicos ( $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  e  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ ) e se tornou um marco de referência. Neste estudo, as células produzidas apresentaram uma eficiência de conversão ( $\eta$ ) de 3,13% e 3,81%, respectivamente, resultados que incentivaram diversos estudos que exploraram o mesmo tema futuramente. No entanto, o trabalho



reporta baixa durabilidade da célula devido à exposição ao ar, e alude à necessidade de estudos futuros para otimização da mesma.

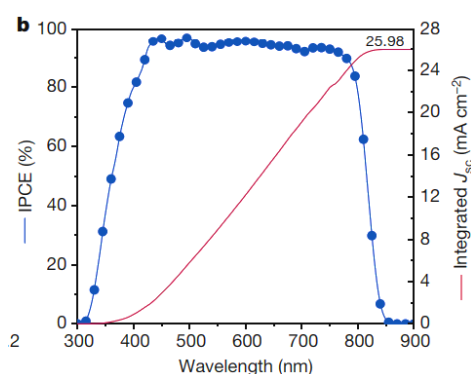
Então, o autor, Tsutomu Miyasaka, deu sequência em seu estudo ao lado de pesquisadores da Universidade de Oxford. Três anos após, estes publicaram o estudo de Lee *et al.* (2012) que reportou uma célula solar de baixo custo, empregando iodeto cloreto de chumbo metilamônio ( $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_2\text{Cl}$ ), que apresentou eficiência de conversão de 10,9%. Este trabalho representou um grande avanço nas células fotovoltaicas com perovskita e, assim como o estudo que o precedeu, teve grande influência no cenário atual do tema.

Assim, os estudos de Miyasaka *et al.* e Lee *et al.* proporcionaram um crescimento exponencial de publicações nos anos que sucederam, abrindo caminhos para pesquisas sobre a aplicação de perovskitas em células solares. Este efeito é evidenciado na Figura 7.



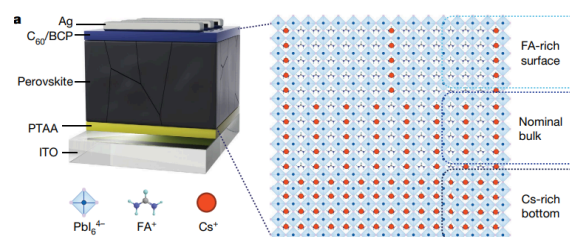
**Figura 7.** Gráfico de publicações sobre células solares com perovskita nos últimos 25 anos, de 1999 a Abril de 2024.

Recentemente, houveram melhorias significativas na eficácia de células solares com perovskitas, principalmente devido a novas estratégias de passivação da célula (Liang *et al.* 2023). Diante disso, o estudo de Liang *et al.* apresenta a célula de perovskita com maior eficiência até hoje. Neste, os autores fabricaram um dispositivo p-i-n com eficiência de conversão de até 26.1% na faixa de onda de 300 a 850 nanômetros (Figura 8), empregando uma perovskita de  $\text{FA}_{0.95}\text{Cs}_{0.05}\text{PbI}_3$ , onde FA representa formamidina. Na Figura 8, fornecida pelo estudo, observa-se a eficiência de conversão, em azul, a densidade de corrente integrada, em vermelho.



**Figura 8.** Gráfico de eficiência e densidade de corrente do dispositivo de no Liang *et al.* (2023).

Este dispositivo compreendeu camadas de perovskita sobre politriarilamina (PTAA) e óxido de índio e estanho (ITO), e sob camadas de fulereno ( $\text{C}_{60}$ ), batocuproína (BCP) e prata (Ag), como representado na Figura 9, provida pelo estudo. Além disso, o grupo usou 1-(fenil sulfonil) pirrol (PSP) como aditivo para evitar segregação dos cátions na perovskita de formamidina e cério.



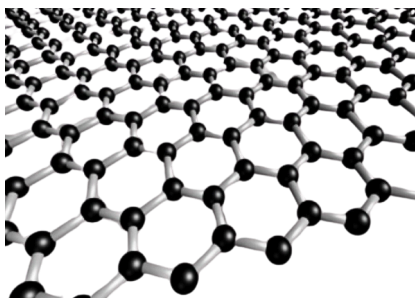
**Figura 9.** Representação da construção do dispositivo de Liang *et al.* (2023).

Também destaca-se a estabilidade do dispositivo, que manteve mais de 90% da eficiência, mesmo passado mais de 2.500 horas de rastreamento contínuo.

Assim, esses resultados indicam técnicas promissoras, incentivando a pesquisa e produção de células solares de perovskita. Tópicos como escalonamento de produção, durabilidade e sustentabilidade são oportunidades para estudos futuros neste campo (Afre e Pugliese, 2024).

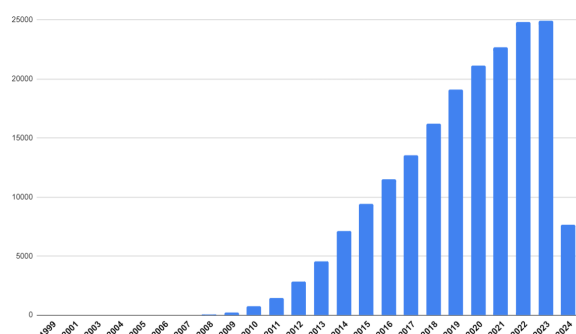
## GRAFENO EM CÉLULAS SOLARES

O grafeno é um nanomaterial alótropo do carbono constituído por camadas bidimensionais de átomos de carbono com hibridização  $\text{sp}^2$  (Allen *et al.*, 2010). Em sua estrutura, os átomos estão dispostos de maneira compacta em um retículo cristalino hexagonal com apenas um átomo de espessura, como representado pela Figura 10 (Mbayachi *et al.*, 2021). Assim, a conjugação  $\pi$  nas camadas de grafeno confere extraordinárias propriedades mecânicas, elétricas e térmicas, dentre elas, destacam-se sua alta resistência mecânica, flexibilidade e alta condutividade elétrica e térmica (Allen *et al.*, 2010; Mbayachi *et al.*, 2021).



**Figura 10.** Representação da estrutura do grafeno.

Assim, o grafeno mostra-se com um excelente potencial de aplicação em diversas áreas, especialmente na produção de células fotovoltaicas, como observado na Figura 11, que mostra a quantidade de publicações sobre células solares com grafeno nos últimos 25 anos.



**Figura 11.** Gráfico de publicações sobre células solares com grafeno nos últimos 25 anos, de 1999 a Abril de 2024.

A partir da Figura 11, podemos observar que o grafeno é um material emergente no cenário de energia solar. A ascensão deste gráfico é fortemente influenciada pelos eventos de 2004 e 2010. Nestes, os físicos Andre Geim e Konstantin Novoselov foram capazes de isolar o grafeno e estudá-lo, fato que até então havia apenas sido teorizado (Randviir et al., 2014). “Isto levou a uma explosão de interesse, em parte porque pensava-se que cristais bidimensionais eram termodinamicamente instáveis em temperaturas finitas” (Allen et al., 2010). Assim, tal descoberta lhes concedeu o Prêmio Nobel de Física seis anos depois, marcando o cenário científico da época. Nos anos seguintes, a pesquisa e aplicação do grafeno se intensificou, concomitantemente com a produção do mesmo (Randviir et al., 2014).

Como discutido anteriormente, o grafeno e seus derivados têm excelente condutividade elétrica, flexibilidade e estabilidade, o que permite sua aplicação em células solares. Diante disso, o estudo de Mahmoudi et al. (2018) realizou uma revisão da aplicação do grafeno em células solares. Neste, os autores reportam o grafeno como excelente condutor e uma alternativa promissora como eletrodo, realizando transporte de cargas (elétrons ou lacunas). Assim, o grafeno se mostra uma alternativa

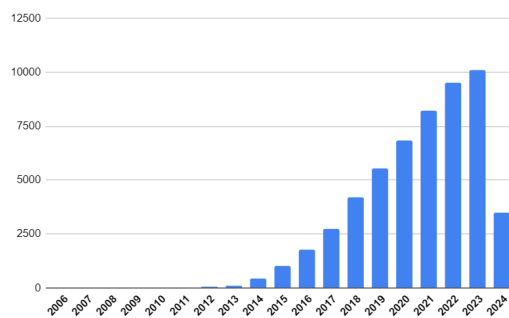
custo-eficiente para substituir materiais como óxidos de titânio e para produzir eletrodos flexíveis. Vale notar que as propriedades do grafeno e de seus derivados são delimitadas pela sua síntese, portanto é essencial a escolha adequada dos métodos e a engenharia deste material para sua aplicação nestes dispositivos (Mahmoudi et al., 2018).

O grafeno pode ser aplicado especialmente a células fotovoltaicas orgânicas, substituindo óxidos de titânio, como ITO e FTO, devido a sua condutividade, flexibilidade e transparência. Além disso, o grafeno e seus derivados podem ser empregados em células solares sensibilizadas por corantes, mais conhecidas como *dye-sensitized solar cells* (DSSCs), que são células que convertem fótons usando corante e absorvem a luz na faixa de comprimento de onda correspondente ao espectro de absorção do corante utilizado. Nestas, o grafeno é mais frequentemente aplicado como contra-eletrodo em seu estado oxidado (óxido de grafeno ou óxido de grafeno reduzido), provendo sítios ativos de reações catalíticas (Mahmoud et al., 2018).

Além disso, diversos outros nanomateriais podem ser aplicados às células fotovoltaicas, os quais devem ser estudados em trabalhos futuros, e.g. nanotubos de carbono e *quantum dots*, como visto na Figura 5 e estudado por Wang et al. (2022).

#### Grafeno em células solares de perovskita

Além disso, a aplicação do grafeno em células solares de perovskita, mesmo que recente, tem tomado grande relevância no cenário científico. Na Figura 12, evidencia-se o crescimento deste tema, e espera-se que esse fenômeno se perpetue nos próximos anos, devido à ascensão de ambos materiais.

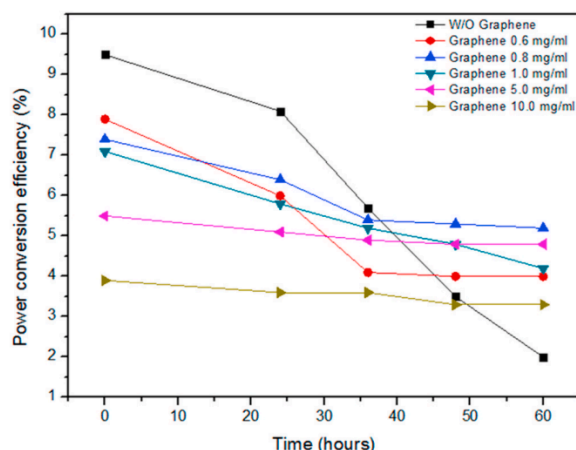


**Figura 12.** Gráfico de publicações sobre células solares com perovskita e grafeno, até abril de 2024.

Diante do exposto, o grafeno pode ser aplicado em células fotovoltaicas de perovskita, combinando efeitos de ambos materiais. Como reportado por Liang et al., estratégias de passivação corroboram a *performance* de células de perovskita. Do mesmo modo, o grafeno pode ser aplicado como agente de passivação células fotovoltaicas reduzindo sua degradabilidade e recombinação de cargas, como

previamente reportado por Huang *et al.* (2021) e Xie *et al.* (2013).

A combinação do grafeno a células solares de perovskita foi explorada por Ramli *et al.* (2021) que emprega grafeno, o material de carbono mais estável, para combater problemas de estabilidade em células fotovoltaicas de perovskita. Dessa forma, o grafeno age como uma camada de passivação, protegendo os materiais da umidade e oxigênio. Assim, o estudo de Ramli *et al.* revela melhora significativa na estabilidade da célula ao longo do tempo, mesmo que com uma ligeira perda de eficiência com o aumento da concentração de grafeno em isopropanol, como evidenciado pelos autores na Figura 13.



**Figura 13.** Gráfico de eficiência e estabilidade de células solares de perovskita passivadas com dispersão de grafeno.

Além disso, o estudo de Li *et al.* (2017) estudou a passivação de células solares de perovskita empregando óxido de grafeno reduzido e funcionalizado. Neste, os autores reportam efeito sinérgico destes materiais através do aumento de eficiência e redução da recombinação de cargas e da perda de energia.

Assim, conclui-se que a combinação destes dois materiais avançados pode ser vantajosa, uma vez que o efeito sinérgico desta combinação pode trazer eficiência e estabilidade. Também, vale notar o baixo custo de processamento das técnicas aplicadas, que torna a produção da célula projetada mais acessível.

### DURABILIDADE E RECICLAGEM

A energia solar é considerada um exemplo de geração de energia limpa. No entanto, aspectos como durabilidade e reciclagem também definem seu caráter sustentável. Células empregando arsenieto de gálio (GaAs) podem apresentar maior durabilidade devido à sua resistência a danos por radiação e ao superaquecimento, podendo variar de acordo com a sua produção (Ndalloka *et al.*, 2024). Também, as células solares de silício, devido a sua abundância e comercialização, têm maior durabilidade, tendo como

padrão industrial entre 25 e 30 anos de vida útil (Glover *et al.*, 2023).

Entretanto, as células de perovskita enfrentam um cenário diferente. Estabilidade a longo termo ainda é um dos maiores desafios para células solares de perovskita, pois a camada de perovskita é facilmente degradada por variáveis ambientais como temperatura, umidade e intensidade luminosa. (Afre e Pugliese, 2024). O mesmo trabalho reporta necessidade de estudos mais profundos sobre o impacto destes fatores em sua durabilidade para criar estratégias para mitigar estes efeitos.

Quanto à reciclagem destes dispositivos, existem diversos métodos para a reciclagem de células de silício, devido a sua preponderância na produção de painéis solares. A maioria destes métodos consiste em etapas de desmontagem, delaminação, separação dos materiais e recuperação dos componentes (Deng *et al.*, 2022). Muitos destes métodos combinam tratamento térmico, recuperando materiais como vidro, e tratamento químico, recuperando o silício e metais presentes na célula (Deng *et al.*, 2022).

Ademais, em março deste ano, Ndalloka *et al.* (2024) reportaram as atuais estratégias de reciclagem de diversos tipos de células solares, discutindo sua análise econômica e ambiental. Células de arsenieto de gálio, de acordo com o mesmo estudo, possuem menor necessidade de estratégias de reciclagem, devida a sua alta resistência e durabilidade, no entanto, este material não é abundante na natureza, portanto, ao fim do tempo de vida da célula, a sua reciclagem se faz necessária. Diante deste cenário, são aplicadas técnicas de reciclagem como pirólise de nitrogênio e decomposição a vácuo.

Em contraste, a reciclagem de células solares de perovskita se faz necessária devido a sua baixa estabilidade e toxicidade de resíduos plúmbricos. Reciclagem de células solares de perovskita em *loop* fechado e recristalização usando butilamina é um método promissor com 98,9% de eficiência na recuperação dos materiais da célula, destacam os autores de Ndalloka *et al.* (2024).

Assim, estudos indicam que as células fotovoltaicas são de fato uma referência de sustentabilidade e geração de energia limpa, uma vez que seus materiais podem ser recuperados e reutilizados ao fim do tempo de vida da célula. No entanto, vale notar que tanto o tempo de vida quanto o método mais adequado para a reciclagem dos materiais, podem variar de acordo com a construção da célula.

### CONCLUSÃO

Diante do exposto, é possível afirmar que a geração de energia usando células fotovoltaicas é uma referência de sustentabilidade e está em constante ascensão, tanto no cenário de produção quanto no cenário de pesquisa e desenvolvimento. É possível observar desafios de *performance*, como a eficiência

na conversão fotoeletrônica e a estabilidade dos dispositivos produzidos. Assim, há necessidade de futuros estudos explorando novas técnicas de síntese e novas composições para células solares que possam expandir os atuais horizontes do desenvolvimento destas tecnologias. Desta forma, nanomateriais e materiais avançados se destacam, melhorando a *performance* da célula.

O grafeno mostra-se como um excelente material condutivo a ser empregado nestes dispositivos, devido a sua alta condutividade e estabilidade, aumentando a eficiência e tempo de vida útil da célula. Assim, usa-se menos material, melhorando o desempenho e, muitas vezes, substituindo o uso de materiais metálicos.

Analogamente, a perovskita também mostra-se com alta eficiência, sendo um material avançado, que vem sendo intensamente explorado nos últimos anos. As células solares de perovskita apresentam alta eficiência, baixo custo de processamento e amplo espectro de absorção, as tornando tecnologias promissoras na produção de células solares. No entanto, ainda há necessidade de estudos abordando a otimização de sua estabilidade, visto que este ainda é um desafio em seu desenvolvimento.

Além disso, o cenário de produção de células solares faz uso de diversos outros materiais e técnicas, uma vez que este é um campo de estudo amplo e em constante inovação e crescimento.

## REFERÊNCIAS

- ABDIN, Z. et al. Solar energy harvesting with the application of nanotechnology. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 26, p. 837-852, Outubro 2013.
- AFRE, Rakesh A. e PUGLIESE, Diego. Perovskite Solar Cells: A Review of the Latest Advances in Materials, Fabrication Techniques, and Stability Enhancement Strategies. **Micromachines**, v. 15, n. 192, Janeiro 2024.
- ALLEN, Matthew J. et al. Honeycomb Carbon: A Review of Graphene. **Chemical Reviews**, v. 110, n. 1, p. 132-145, Janeiro, 2010.
- BAGHER, Askari Mohammad et al. Types of solar cells and application. **American Journal of optics and Photonics**, v. 3, n. 5 p. 94-113, 2015.
- BEST Research-Cell Efficiency Chart. **National Renewable Energy Laboratory**. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>>. Acesso em: 31/03/2024.
- DENG, Rong et al. Recent progress in silicon photovoltaic module recycling processes. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 187, n. 106612, Dezembro 2022.
- FRAAS, L. M. History of Solar Cell Development. In: FRAAS, L. M. **Low-Cost Solar Electric Power**. Bellevue, EUA: Springer Cham, 2014, p. 1-12.
- FRAUNHOFER ISE Develops the World's Most Efficient Solar Cell with 47.6 Percent Efficiency. **Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems**, 2022. Disponível em: <<https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/press-releases/2022/fraunhofer-ise-develops-the-worlds-most-efficient-solar-cell-with-47-comma-6-percent-efficiency.html>>. Acesso em: 01/04/2024.
- HUANG, Yu-Jie et al. Commercial Solar Cells With Graphene Oxide as the Passivation Film. **IEEE Journal of Photovoltaics**, v. 11, n. 4, p. 873-877, Julho 2021.
- KHAN, Salman et al. A review on nanotechnology: Properties, applications, and mechanistic insights of cellular uptake mechanisms. **Journal of Molecular Liquids**, v. 348, n. 118008, Fevereiro 2022.
- KUMAR, P. Mathan et al. Fabrication and Life Time of Perovskite Solar Cells. In: THOMAS, Sabu e THANKAPPAN, Aparna. **Perovskite Photovoltaics: Basic to Advanced Concepts and Implementation**. Local de publicação: Academic Press, 2018. p. 231-287.
- LEE, Michael M. et al. Efficient hybrid solar cells based on meso-superstructured organometal halide perovskites. **Science**, v. 338, n. 6107, p. 643-647, Novembro 2012.
- LI, Hao et al. Enhancing Efficiency of Perovskite Solar Cells via Surface Passivation with Graphene Oxide Interlayer. **ACS applied materials & interfaces**, v. 9, n. 44, p. 38967-38976, Outubro 2017.
- LIANG, Zheng et al. Homogenizing out-of-plane cation composition in perovskite solar cells. **Nature**, v. 624, p. 557-563, Novembro 2023.
- MAHMOUDI, Tahmineh et al. Graphene and its derivatives for solar cells application. **Nano Energy**, v. 47, p. 51-65, Maio 2018.
- MBAYASHI, Vestince B. et al. Graphene synthesis, characterization and its applications: A review. **Results in Chemistry**, v. 3, n. 100163, Janeiro 2021.
- MIYASAKA, Tsutomu et al. Organometal Halide Perovskites as Visible-Light Sensitizers for Photovoltaic Cells. **Journal of the American Chemical Society**, v. 131, n. 17, p. 6050 - 6051, Maio 2009.
- NDALLOKA, Zita Ngagoum et al. Solar photovoltaic recycling strategies. **Solar Energy**, v. 270, n. 112379, Março 2024.
- NET Zero Coalition. **United Nations**. Disponível em: <<https://www.un.org/en/climatechange/net-zero-coalition>>. Acesso em: 30/03/2024.
- RAMLI, N. F. Graphene dispersion as a passivation layer for the enhancement of perovskite solar cell stability. **Materials Chemistry and Physics**, v. 257, n. 123798, Janeiro 2021.
- RANJAN, S. et al. Silicon solar cell production. **Computers & Chemical Engineering**, v. 34, n. 8, p. 1439-1453, Agosto 2011.
- RANDVIIR, Edward P. et al. A decade of graphene research: production, applications and outlook. **Materials Today**, v. 17, n. 9, p. 426-432, 2014.
- SABATINO, Marisa Di et al. Silicon Solar Cells: Trends, Manufacturing Challenges, and AI Perspectives. **Crystals**, v. 14, n. 167, Fevereiro 2024.
- SZABÓ, Loránd. The History of Using Solar Energy. In: International Conference on Modern Power Systems



(MPS), 7, 2017, Cluj-Napoca, România. **Proceedings...** Cluj-Napoca: IEEE, 2017, p. 1-8.

TAMANHO do mercado de energia solar e análise de participação – Tendências e previsões de crescimento (2024 – 2029). **Mordor Intelligence**, 2024. Disponível em: <<https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/solar-energy-market>>. Acesso em: 25 de março de 2024.

WANG, Lina et al. A holistic and state-of-the-art review of nanotechnology in solar cells. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 54, n. 102864, Dezembro 2022.

XIE, Chao et al. Surface passivation and band engineering: a way toward high efficiency graphene-planar Si solar cells. **Journal of Materials Chemistry A**, v. 1, n. 30, p. 8567–8574, 2013.