

NANOTECNOLOGIA E OS DESAFIOS DAS FOTOCÉLULAS: EFICIÊNCIA, DESCARTE E IMPACTO AMBIENTAL

NANOTECHNOLOGY AND THE CHALLENGES OF PHOTOCELLS: EFFICIENCY, DISPOSAL, AND ENVIRONMENTAL IMPACT

Tuyla Fontana¹, Andreia Swierczynski², Patrícia Gomes³ e Solange Binotto Fagan⁴

RESUMO

Recentemente, a nanotecnologia tem desempenhado um papel fundamental nos avanços significativos na geração de energia renovável, especialmente no desenvolvimento das fotocélulas, que convertem luz solar em eletricidade. As células fotovoltaicas podem ser de silício cristalino ou filme fino, com diferentes vantagens e limitações em termos de eficiência, custo e impacto ambiental. O silício amorfo é flexível e barato, mas com eficiência limitada, enquanto o telureto de cádmio tem maior eficiência, mas é tóxico. A nanotecnologia tem o potencial de melhorar a eficiência dessas células, mas o aumento do uso de materiais como nanofios e grafeno também traz desafios relacionados ao descarte de resíduos tóxicos. A pesquisa revelou a importância da reciclagem de nanomateriais e a necessidade de regulamentação para mitigar impactos ambientais. A adoção de soluções como economia circular e a melhoria da fotocatalise são essenciais para garantir a sustentabilidade das tecnologias, alinhando-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente os relacionados à energia limpa e produção responsável.

Palavras-chave: Nanomateriais; meio ambiente; células solares.

ABSTRACT

Recent advancements in nanotechnology have significantly boosted the generation of renewable energy, especially in photovoltaic cells, which convert sunlight into electricity. Photovoltaic cells can be made from crystalline silicon or thin films, with different advantages and limitations in terms of efficiency, cost, and environmental impact. Amorphous silicon is flexible and inexpensive but has limited efficiency, while cadmium telluride has higher efficiency but is toxic. Nanotechnology has the potential to improve the efficiency of these cells, but the increased use of materials such as nanowires and graphene also presents challenges related to the disposal of toxic waste. The research highlighted the importance of recycling nanomaterials and the need for regulation to mitigate environmental impacts. The adoption of solutions such as circular economy and the improvement of photocatalysis are essential to ensure the sustainability of these technologies, aligning with the Sustainable Development Goals (SDGs), particularly those related to clean energy and responsible production.

Keywords: *Nanomaterials; environment; solar cells.*

1 Estudante de Doutorado do Programa de Pós-Graduação da Universidade Franciscana (UFN). E-mail: tuyla.fontana@ufn.edu.br. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-3375-1929>

2 Estudante de Doutorado do Programa de Pós-Graduação da Universidade Franciscana (UFN). E-mail: andreia.pitombo@ufn.edu.br. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5339-4375>

3 Professora do Programa de Pós-Graduação da Universidade Franciscana (UFN). E-mail: patriciagomes@ufn.edu.br. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7587-2028>

4 Professora do Programa de Pós-Graduação da Universidade Franciscana (UFN). E-mail: solange.fagan@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8719-4228>

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a nanotecnologia tem promovido uma verdadeira revolução em várias áreas do conhecimento, especialmente na geração de energia renovável (Lobo & Sequeira, 2024). A utilização de nanomateriais em dispositivos fotovoltaicos, como as fotocélulas, demonstrou um grande potencial para aumentar a eficiência na conversão de energia solar em eletricidade (Dutta, 2012).

As fotocélulas são dispositivos eletrônicos que convertem luz em eletricidade por meio do efeito fotovoltaico e são amplamente aplicadas em diversos contextos. Um dos usos mais comuns das fotocélulas é em painéis solares, onde transformam a luz solar em energia elétrica, contribuindo significativamente para a geração de energia renovável. Além disso, as fotocélulas são frequentemente utilizadas como sensores de luz em sistemas de iluminação pública e automação residencial, ligando ou desligando, conforme a intensidade da luz ambiente (Ballif *et al.* 2022)

As placas solares, ou módulos fotovoltaicos, operam com base no efeito fotovoltaico, que converte diretamente a luz solar em energia elétrica. Segundo Ballif *et al.* (2022) e Okil *et al.* (2021), essas tecnologias são classificadas em dois grupos principais: as placas de silício cristalino e as de película fina, cada uma com características próprias. As de silício cristalino incluem o silício monocristalino, conhecido por sua alta eficiência (20% a 25%) e longa durabilidade, embora a um custo elevado (Saga, 2010), e o silício policristalino, que é mais acessível, mas apresenta eficiência ligeiramente menor (15% a 20%) e desempenho inferior em altas temperaturas (Sekar *et al.*, 2023; Okil *et al.*, 2021). Já as de película fina utilizam materiais como silício amorfo (Si-a), telureto de cádmio (CdTe) e seleneto de cobre, índio e gálio (CIS/CIGS), oferecendo vantagens como flexibilidade e custo reduzido, embora enfrentem limitações de eficiência e desafios como toxicidade ou uso de metais raros (Choudhary *et al.*, 2019; Buonomenna, 2023). A escolha entre essas tecnologias depende de fatores como custo, eficiência, durabilidade e aplicação desejada (Doni *et al.*, 2010).

Feita de materiais semicondutores, como silício, a fotocélula absorve a luz solar, resultando na excitação de elétrons, que são liberados de seus átomos. Essa liberação gera pares de elétrons e lacunas. As fotocélulas possuem uma junção de camadas do tipo N e P, criando um campo elétrico interno que orienta o movimento dos elétrons e lacunas. A junção de camadas do tipo N e P em fotocélulas é um conceito central para o funcionamento das células solares. A camada do tipo N (de “negative”, negativa) é dopada com átomos que possuem elétrons extra, ou seja, é rica em elétrons livres. Isso faz com que essa camada tenha uma alta concentração de elétrons. A camada do tipo P (de “positive”, positiva) é dopada com átomos que têm lacunas, ou seja, faltam elétrons em sua estrutura, criando regiões positivas chamadas de lacunas.

Quando as camadas N e P de um material semicondutor são colocadas em contato, ocorre um movimento natural de elétrons da camada N para a camada P devido à diferença na concentração de elétrons entre elas. Esse movimento resulta na formação de uma região de depleção na interface entre

as camadas, onde a migração de elétrons é bloqueada. Essa barreira gera um campo elétrico interno que desempenha um papel crucial no funcionamento das fotocélulas. Ao ser exposto à luz solar, esse campo elétrico permite a separação de pares elétron-buraco gerados pela luz, criando um fluxo ordenado de cargas. Esse fluxo gera uma corrente elétrica, que pode ser coletada e utilizada para alimentar dispositivos elétricos. Esse processo é o princípio fundamental por trás do funcionamento das fotocélulas, dispositivos essenciais na conversão da energia solar em eletricidade de forma renovável (Agarwal *et al.*, 2023; Tsuyoshi, 2016).

As células fotovoltaicas de película fina, baseadas no efeito fotovoltaico, representam uma alternativa promissora às tradicionais células de silício cristalino. Elas se destacam pela flexibilidade, leveza e custos de produção reduzidos, sendo amplamente pesquisadas e aplicadas em diversas áreas. Entre as principais tecnologias de película fina, destacam-se o silício amorfo (Si-a), o telureto de cádmio (CdTe) e o seleneto de cobre, índio e gálio (CIS/CIGS), cada uma com características únicas quanto à eficiência, custo, impacto ambiental e disponibilidade de materiais (Butt *et al.*, 2023; Mazur *et al.*, 2023; Sivaraj *et al.*, 2022). Esses fatores determinam a aplicação e o potencial de cada tecnologia, indicando sua relevância no contexto da transição energética global e da adoção de fontes renováveis. As inovações trazidas por nanofios semicondutores e nanopartículas ampliam a capacidade de captura de radiação (luz), aumentando o rendimento das fotocélulas em comparação com modelos convencionais (Wegner *et al.*, 2013). Esses avanços contribuem diretamente no apoio para atingir os Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável (ODS), dos quais podemos citar o ODS 7 que visa a produção de Energia Acessível e Limpa, ao melhorar a eficiência energética das tecnologias renováveis, como a captação de energia solar. No entanto, com o crescimento do uso de fotocélulas, surgem desafios ambientais significativos relacionados ao descarte inadequado desses dispositivos.

A presença de semicondutores e materiais tóxicos nas fotocélulas exige métodos específicos de reciclagem para evitar a contaminação ambiental, o que está relacionado à ODS 12 - Produção e Consumo Responsáveis (Aleksandra *et al.*, 2024).

Portanto, este artigo aborda os avanços proporcionados pela nanotecnologia nas fotocélulas, os desafios de descarte e os impactos ambientais associados, a partir de uma revisão de literatura, com foco na implementação de soluções sustentáveis e na adaptação das tecnologias às necessidades globais de sustentabilidade.

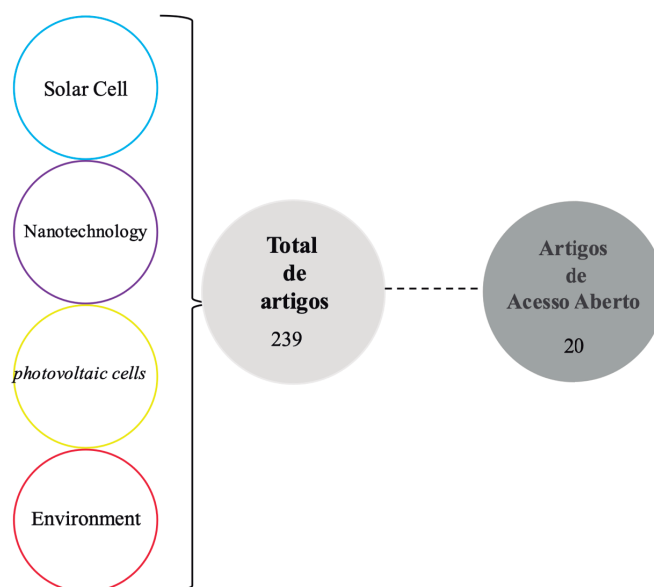
METODOLOGIA

A pesquisa foi conduzida por meio de uma revisão de literatura, com foco em estudos sobre nanotecnologia aplicada a fotocélulas e os impactos ambientais do descarte de resíduos eletrônicos. Foram utilizadas as bases de dados Periódico Capes para a busca de artigos, utilizando as palavras-chave: *solar cell; nanotechnology; photovoltaic cells; environment*. Dos 239 artigos encontrados,

após a análise inicial da temática proposta foram selecionados 20 artigos de acesso aberto. A análise se concentrou em artigos que discutem a eficiência energética das fotocélulas, a reciclagem de nanomateriais e o impacto da fotocatalise no meio ambiente, correlacionando com as temáticas das ODS.

A figura 2 apresenta um esquema da metodologia de seleção para a temática apresentada.

Figura 1 - Ilustração da metodologia mostrando a análise de artigos científicos sobre células solares, nanotecnologia, fotocatalise e meio ambiente, incluindo o total de artigos (239), sendo 20 de acesso aberto.



Construção dos autores (2025).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A crescente demanda por tecnologias sustentáveis impulsionou avanços significativos em materiais e processos inovadores, especialmente no campo da energia renovável. O desenvolvimento de novos materiais e suas propriedades, como nanofios semicondutores e grafeno, tem permitido a melhoria da eficiência de dispositivos fotovoltaicos e sistemas de conversão de energia (Saini *et al.*, 2023). Paralelamente, novos desenvolvimentos tecnológicos, como células solares sensibilizadas por corantes e a otimização de nanopartículas, visam aprimorar a eficiência e reduzir o custo das tecnologias (Pugazhenthiran *et al.*, 2023; Singhal *et al.*, 2024).

No entanto, desafios ambientais, como o descarte de materiais tóxicos e a contaminação por resíduos eletrônicos, continuam a representar obstáculos significativos (Santos *et al.*, 2024; Spytka, 2022; Belhouchet *et al.*, 2022). Para mitigar esses problemas, soluções como a economia circular e a pesquisa em fotocatalise na remediação destes efeitos ambientais têm se mostrado promissoras (Boxi, 2024; Gaur *et al.*, 2023). Apesar dos avanços, desafios regulatórios surgem, como a ausência de políticas específicas para nanomateriais, dificultando a implementação eficaz de tecnologias sustentáveis (Mahardhani, 2023; Nyffenegger *et al.*, 2024).

Portanto, discussões a cerca destes desafios se apresentam nos trabalhos selecionados nesta revisão de literatura. A Tabela 1 apresenta a distribuição dos trabalhos selecionados em função de destaques identificados como relevantes para correlacionar a importância da área de fotocélulas e o impacto nanotecnológico e ambiental.

Tabela 1 - Nanotecnologia e Fotocélulas.

Destaque	Descrição	Referências
Materiais utilizados e suas propriedades	- Nanofios semicondutores para maior absorção de luz.	Saini <i>et al.</i> , 2023; Qadir, 2021; Ahmed <i>et al.</i> , 2024; Ahmed <i>et al.</i> , 2024; Avilés-Betanzos <i>et al.</i> , 2023
	- Nanopartículas (ouro, TiO ₂ , pontos quânticos).	
	- Grafeno em dispositivos fotovoltaicos.	
	- Alta eficiência de conversão de energia (até 66% com pontos quânticos).	
	- Ajuste de faixa espectral com nanopartículas.	
Desenvolvimento Tecnológico	- Sensibilidade em baixa luminosidade.	Pugazhenthiran <i>et al.</i> , 2023; Singhal <i>et al.</i> , 2024
	- Células solares sensibilizadas por corantes.	
	- Otimização da eficiência por nanopartículas.	
Desafios Ambientais	- Processamento a temperaturas mais baixas.	Santos <i>et al.</i> , 2024; Spytska, 2022; Belhouchet <i>et al.</i> , 2022
	- Descarte de materiais tóxicos como cádmio e chumbo.	
	- Contaminação de solos e água por resíduos eletrônicos.	
	- Toxicidade de subprodutos da fotocatalise.	
Soluções Propostas	- Economia circular para reciclagem de materiais.	Liang <i>et al.</i> , 2023; Hernández-Ruiz <i>et al.</i> , 2023
	- Desenvolvimento de métodos de reciclagem eficientes (físicos, químicos, térmicos).	
Desafios Regulatórios	- Catalisadores menos tóxicos.	Mahardhani, 2023; Nyffenegger <i>et al.</i> , 2024
	- Falta de políticas públicas específicas para nanomateriais.	
	- Complexidade na reciclagem de materiais avançados.	

Construção dos autores (2025).

Os avanços nas fotocélulas, impulsionados pela nanotecnologia, têm contribuído para um aumento expressivo na eficiência energética. A introdução de nanofios tem expandido a área de interação com a luz solar, melhorando a captação de uma ampla variedade de comprimentos de onda. Como resultado, essas inovações superam as tecnologias tradicionais, oferecendo maior eficiência na conversão de energia é o que destaca o trabalho de Saini *et al.* (2023).

Tecnologias emergentes, como as células solares sensibilizadas por corantes e as fotocélulas quânticas, também prometem avanços importantes. As células solares sensibilizadas por corantes utilizam materiais flexíveis e de baixo custo para capturar a luz, proporcionando uma sensibilidade mais ampla ao espectro solar, o que é vantajoso em regiões com menor incidência solar (Pugazhenthiran *et al.*, 2023). O emprego de corantes orgânicos e o processamento em temperaturas mais baixas diminuem os custos de produção em relação às células solares convencionais de silício (Avilés-Betanzos *et al.*, 2023). Avanços recentes demonstraram que as células solares sensibilizadas por corantes mantêm uma eficiência satisfatória mesmo em condições de baixa luminosidade, o que as torna viáveis para uso em ambientes com menos incidência de sol (Avilés-Betanzos *et al.*, 2023). Estes trabalhos demonstram que é possível melhorar a eficiência, reduzindo a quantidade de material que será exposto no meio ambiente.

As fotocélulas utilizam nanopartículas para otimizar a absorção de luz, demonstrando um aumento significativo na eficiência, especialmente no aproveitamento de fótons de baixa energia que outras tecnologias não conseguem utilizar (Hoda, 2022). A tecnologia de pontos quânticos é especialmente promissora porque pode gerar mais de um par exciton por fóton, permitindo uma maior conversão de energia. Isso significa que a eficiência teórica máxima das células solares baseadas em pontos quânticos pode chegar até 66%, em comparação com 31% das células solares convencionais (Ahmed *et al.*, 2024). Os pontos quânticos têm o potencial de promover a geração múltipla de éxcitons, um fator essencial para aumentar a eficiência na conversão de energia. Estudos sugerem que a otimização dos parâmetros relacionados à geração múltipla de éxcitons pode elevar substancialmente a eficiência das células solares na conversão de energia (Singhal *et al.*, 2024). Ao mesmo tempo, ao variar o tamanho das nanopartículas, é possível ajustar a faixa espectral de luz que elas podem absorver, otimizando ainda mais a eficiência de conversão.

As nanopartículas de ouro à medida que o tamanho aumenta, a ressonância plasmônica de superfície se desloca para comprimentos de onda mais longos, o que pode influenciar sua eficiência de conversão fototérmica. Um estudo, por exemplo, mostrou uma redução na eficiência de 70% para 55% quando o tamanho das partículas aumentou de 8 nm para 16 nm (Depciuch *et al.*, 2022). Em células solares sensibilizadas por corantes, o tamanho ideal das nanopartículas de ouro foi determinado em 85 nm, o que resultou na maximização da absorção óptica e da eficiência de conversão de energia, devido aos fortes efeitos de acoplamento plasmônico (Qadir, 2021).

Uma fotocélula em uma placa solar opera por meio do efeito fotovoltaico, que converte a luz solar em eletricidade e podem ser classificadas em diferentes tipos. As de silício cristalino incluem o silício monocristalino, com alta eficiência (20% a 25%) e maior custo, e o silício policristalino, mais acessível, porém menos eficiente (15% a 20%) (Ballif *et al.*, 2022)(Okil *et al.*, 2021). Já as de filme fino utilizam materiais como silício amorfo (Si-a), com baixo custo e flexibilidade, mas eficiência reduzida (6% a 10%), telureto de cádmio (CdTe), que oferece alta eficiência (16% a 18%), porém com toxicidade elevada, e seleneto de cobre, índio e gálio (CIS/CIGS), que combina alta eficiência (15% a 18%) e flexibilidade, mas enfrenta desafios de produção devido ao uso de metais raros (Buonomenna, M.G.,2023). Cada tecnologia possui vantagens e limitações, sendo escolhida com base em custo, eficiência e aplicação.

Além disso, as placas solares podem ser divididas em dois grandes grupos convencionais de silício cristalino e as de películas fina. As placas de silício cristalino são as mais comuns no mercado e dividem-se em dois tipos principais. O silício monocristalino é feito de um único cristal de silício, oferecendo alta eficiência (20% a 25%) e longa durabilidade, mas a um custo mais elevado (Saga, 2010). Já o silício policristalino é composto por múltiplos cristais, sendo mais acessível, porém com eficiência ligeiramente menor (15% a 20%) e desempenho inferior em condições de altas temperaturas (Sekar *et al.*, 2023; Okil *et al.*, 2021). Ambas são amplamente utilizadas em aplicações residenciais, comerciais e industriais.

As placas de película fina utilizam camadas muito finas de materiais semicondutores depositadas sobre substratos como vidro, plástico ou metal. Entre as principais tecnologias estão o silício amorfo, que é flexível, leve e de baixo custo, mas com eficiência limitada (6% a 10%); o telureto de cádmio, que apresenta maior eficiência (16% a 18%) e baixo custo, embora enfrente questões de toxicidade e escassez de materiais; e o seleneto de cobre, índio e gálio (CIS/CIGS), que combina flexibilidade e alta eficiência (15% a 18%), mas é mais caro e exige materiais raros (Choudhary *et al.*, 2019). A escolha entre os tipos de placas depende de fatores como custo, eficiência, durabilidade e a aplicação desejada, sendo as placas de silício cristalino mais indicadas para projetos tradicionais e as de película fina para usos específicos, como superfícies curvas ou aplicações portáteis (Doni *et al.*, 2010).

As células fotovoltaicas de película fina, que utilizam esse princípio, oferecem uma alternativa às tradicionais células de silício cristalino, destacando-se por sua flexibilidade, leveza e menor custo de produção. Dentre as principais tecnologias de filme fino, destacam-se as feitas de silício amorfo, telureto de cádmio e seleneto de cobre, índio e gálio. Cada uma dessas tecnologias apresenta características específicas, que envolvem diferenças em eficiência, custo, impacto ambiental e disponibilidade de materiais (Butt *et al.*, 2023; Mazur *et al.*, 2023; Sivaraj *et al.*, 2022).

O silício amorfo, uma forma não cristalina de silício, é aplicado em filmes finos sobre substratos como vidro ou plástico. Essa tecnologia é vantajosa devido ao seu baixo custo de produção, flexibilidade e baixa toxicidade, já que o silício é abundante e tem um impacto ambiental reduzido (Lee *et al.*, 2024). Porém, sua eficiência energética é relativamente baixa, variando entre 6% e 10%, e sua performance pode degradar ao longo do tempo devido ao efeito Staebler-Wronski. Essa tecnologia é amplamente utilizada em dispositivos de baixa potência, telhados solares e aplicações portáteis (Okorieimoh *et al.*, 2020).

O telureto de cádmio por sua vez, destaca-se por sua alta capacidade de absorção de luz, o que permite a produção de filmes extremamente finos. Com eficiências comerciais de 16% a 18%, o CdTe é uma das opções mais econômicas entre as tecnologias de filme fino. Contudo, apresenta desvantagens significativas, como a alta toxicidade do cádmio e a escassez de telúrio, um elemento raro. Apesar desses desafios, o CdTe é amplamente utilizado em usinas solares de grande porte e instalações comerciais (Butt *et al.*, 2023; Sultan *et al.*, 2023).

Por fim, o seleneto de cobre, índio e gálio oferece alta eficiência, podendo alcançar valores entre 15% e 18% comercialmente. Além disso, essa tecnologia é flexível, o que a torna ideal para aplicações em superfícies curvas e dispositivos portáteis (Hwang *et al.*, 2024; Hasan *et al.*, 2023). No entanto, a fabricação de células CIGS é mais complexa e cara, devido à dificuldade de deposição uniforme dos materiais e à dependência de metais raros, como índio e gálio. Embora seja menos tóxico que o CdTe, o CIGS requer cuidados no descarte para minimizar impactos ambientais (Yan *et al.*, 2024; Jeong *et al.*, 2023).

De maneira geral, a escolha entre essas tecnologias de células fotovoltaicas depende de fatores como custo, eficiência, toxicidade e disponibilidade dos materiais (Ogundipe *et al.*, 2024). O silício

amorfo destaca-se por sua sustentabilidade e flexibilidade, enquanto o CdTe e o CIGS oferecem maior eficiência, mas enfrentam desafios relacionados à toxicidade e à escassez de recursos. Com o avanço das pesquisas, espera-se que novos materiais e técnicas de reciclagem reduzam os impactos ambientais e tornem essas tecnologias mais acessíveis e sustentáveis (Saad, 2024; Bartie *et al.*, 2023).

O descarte inadequado de fotocélulas em fim de vida útil representa um desafio crescente, pois os materiais utilizados, como semicondutores e componentes eletrônicos, podem liberar substâncias tóxicas, como cádmio e chumbo, no meio ambiente. Estudos indicam que esses elementos podem causar contaminação do solo e da água, além de serem prejudiciais à saúde humana e à vida (Santos *et al.*, 2024). O descarte incorreto de resíduos eletrônicos, incluindo células fotovoltaicas, resulta na contaminação do solo e da água, principalmente devido à liberação de metais pesados (Santos *et al.*, 2024). Cádmio e chumbo, frequentemente presentes em módulos fotovoltaicos, podem infiltrar-se no meio ambiente, gerando riscos tanto para a saúde humana quanto para os ecossistemas (Spytska, 2022) (tabela 2).

Tabela 2 - Tipos de Células Fotovoltaicas e Processos de Recuperação/Tratamento/Descarte

Tipo de Célula Fotovoltaica	Características	Processos de Recuperação/ Tratamento/Descarte	Referências
Silício Amorfo (Si-a)	Flexível, baixo custo, eficiência de 6% a 10%. Aplicado em dispositivos de baixa potência.	Material de silício pode ser reciclado, mas apresenta desafios de eficiência econômica no processo de separação. Impacto ambiental reduzido devido à baixa toxicidade.	Lee <i>et al.</i> (2024); Okorieimoh <i>et al.</i> (2020).
Telureto de Cádmio (CdTe)	Alta eficiência (16% a 18%), baixo custo, alta toxicidade do cádmio e escassez de telúrio.	Tratamento especializado para evitar contaminação por cádmio; reciclagem limitada devido à complexidade técnica. Utilização de técnicas para extração de telúrio.	Butt <i>et al.</i> (2023); Sultan <i>et al.</i> (2023).
Seleneto de Cobre, Índio e Gálio (CIS/CIGS)	Alta eficiência (15% a 18%), flexibilidade, uso de metais raros (índio e gálio).	Recuperação complexa devido à dificuldade de separar os metais raros; processos de reciclagem ainda em desenvolvimento. Controle rigoroso no descarte para evitar toxicidade. Reciclagem bem estabelecida para	Hwang <i>et al.</i> (2024); Hasan <i>et al.</i> (2023); Jeong <i>et al.</i> (2023).
Silício Monocristalino	Alta eficiência (20% a 25%), longa durabilidade, custo elevado.	recuperação do silício e outros materiais; o silício pode ser reutilizado em novas células.	Saga (2010); Sekar <i>et al.</i> (2023).
Silício Policristalino	Eficiência moderada (15% a 20%), custo mais acessível que o monocristalino.	Semelhante ao silício monocristalino, com foco na recuperação de materiais; processos de reciclagem menos econômicos devido à menor pureza do material.	Okil <i>et al.</i> (2021); Sekar <i>et al.</i> (2023).

Construção dos autores (2025).

O desenvolvimento de métodos eficientes de reciclagem é crucial para recuperar materiais valiosos e reduzir os impactos ambientais. Técnicas como tratamentos físicos, químicos e térmicos

estão sendo investigadas (Liang *et al.*, 2023). A adoção de uma abordagem de economia circular é proposta para otimizar a recuperação de recursos e diminuir a pegada ecológica dos sistemas de energia solar (Spytska, 2022). Apesar da urgência de implementar métodos eficazes de reciclagem e descarte, a transição para práticas sustentáveis enfrenta desafios tecnológicos e regulatórios. Superar esses obstáculos é fundamental para o futuro da energia solar e a preservação ambiental.

Outro aspecto relevante relacionado à nanotecnologia é a aplicação de processos fotocatalíticos para a remediação ambiental. A fotocatalise, que utiliza nanomateriais semicondutores para acelerar a decomposição de poluentes orgânicos sob luz solar, tem mostrado grande potencial na purificação de águas e solos contaminados (Boxi, 2024). Um estudo discute como a fotocatalise pode ser aplicada para a degradação de poluentes emergentes em águas, destacando o potencial de materiais semicondutores como TiO_2 na remoção de contaminantes orgânicos. Outra pesquisa investiga o uso de nanomateriais em sistemas fotocatalíticos, ressaltando a eficácia desses materiais na purificação ambiental (Gatou *et al.*, 2024).

Além disso, Gaur *et al.* (2023) abordam a importância da fotocatalise na remediação de solos, demonstrando como processos fotocatalíticos podem ser utilizados para eliminar compostos tóxicos em ambientes contaminados. Esses estudos ressaltam a viabilidade da fotocatalise como uma solução inovadora e sustentável para problemas ambientais. Esse fenômeno é particularmente preocupante em ecossistemas aquáticos, onde os subprodutos gerados pela fotocatalise podem ser ainda mais tóxicos que os poluentes originais. Para mitigar esse impacto, pesquisas estão sendo conduzidas com o objetivo de desenvolver catalisadores mais eficientes e menos prejudiciais ao meio ambiente. Mesmo assim, são necessários mais estudos para compreender os efeitos a longo prazo da fotocatalise sobre os ecossistemas (Belhouchet *et al.*, 2022).

Pesquisas têm sido realizadas para desenvolver catalisadores que sejam não apenas mais eficientes, mas também menos prejudiciais ao meio ambiente. Um estudo de Belhouchet *et al.*, (2022) examina o impacto dos subprodutos da fotocatalise em organismos aquáticos, destacando a necessidade de um melhor entendimento sobre como esses compostos afetam a biota. Além disso, a pesquisa de Gao *et al.*, (2021) discute a importância de estudos a longo prazo sobre os efeitos da fotocatalise, enfatizando que a avaliação contínua da toxicidade dos subprodutos é crucial para garantir a segurança ambiental.

Diante desses desafios, a promoção de uma economia circular se torna fundamental para maximizar os benefícios da nanotecnologia nas fotocélulas e minimizar seus impactos negativos. A economia circular propõe o prolongamento do ciclo de vida dos produtos por meio da reutilização e reciclagem de materiais, em vez de descartá-los prematuramente (Pan & Hashemizadeh, 2023). Um estudo conduzido por Hernández-Ruiz *et al.* (2023) apresentou um processo econômico de reciclagem para células solares de silício, obtendo sucesso na recuperação de silício e metais preciosos em alta pureza por meio de um método de desmetalização alcalina. No entanto, para que isso ocorra de forma

efetiva, é necessária a criação de políticas públicas e o desenvolvimento de tecnologias de reciclagem capazes de lidar com os desafios impostos pelos nanomateriais.

Um estudo de Mamudu *et al.*, (2024) discutem a importância da economia circular na sustentabilidade, destacando como a reintrodução de materiais valiosos, como metais raros e semicondutores, pode ajudar a mitigar os impactos ambientais da indústria eletrônica. Além disso, o estudo de Mahardhani (2023), enfatiza que políticas públicas e inovações tecnológicas são necessárias para enfrentar os desafios da reciclagem, especialmente em relação aos materiais avançados e à nanotecnologia. De acordo com Nyffenegger *et al.*, (2024), também exploram como a economia circular pode ser implementada em setores como a energia solar, propondo estratégias de recuperação de materiais que podem ser benéficas para a indústria de fotocélulas.

Os avanços na nanotecnologia têm impulsionado significativamente a eficiência das fotocélulas, tornando-as uma opção mais viável e competitiva para a geração de energia renovável. Estudos demonstram que nanomateriais, como o grafeno e os pontos quânticos, podem aumentar a eficiência na conversão de energia e diminuir os custos de produção. Com esses materiais, as células solares alcançam eficiências de até 25% (Saini *et al.*, 2023). Entretanto, ainda há preocupações quanto às implicações ambientais dessas tecnologias, especialmente em relação ao descarte de materiais e ao impacto ecológico dos processos fotocatalíticos, o que demanda soluções mais sustentáveis. O desenvolvimento de tecnologias de reciclagem, políticas públicas voltadas à economia circular e mais pesquisas sobre os efeitos da fotocatalise são essenciais para garantir que os benefícios trazidos pela nanotecnologia possam ser plenamente realizados, sem comprometer a sustentabilidade ambiental.

Um estudo de Alalm *et al.*, (2021) analisam os impactos da fotocatalise no ambiente, enfatizando a necessidade de mais pesquisas sobre suas consequências a longo prazo. O estudo conclui que, para assegurar a sustentabilidade, é crucial desenvolver tecnologias de reciclagem eficientes e adotar uma abordagem integrada que leve em conta tanto a eficiência energética quanto a responsabilidade ambiental. A reciclagem de painéis solares contribui significativamente para a redução das emissões de CO₂ e do consumo de energia em comparação com o descarte, destacando a relevância da recuperação de materiais como silício e alumínio para garantir a sustentabilidade (Gera *et al.*, 2023).

Apresenta uma análise abrangente sobre os avanços tecnológicos em fotocélulas, destacando como a nanotecnologia tem impulsionado a eficiência energética e promovido soluções inovadoras para a geração de energia renovável. A integração de nanofios, pontos quânticos e nanopartículas ilustra a capacidade dessas tecnologias de ampliar a absorção solar e reduzir custos, alinhando-se aos ODS. Além disso, aborda questões cruciais como o impacto ambiental do descarte inadequado de fotocélulas e os desafios associados à reciclagem de nanomateriais.

Contudo, enquanto os avanços promovem benefícios significativos, os riscos ambientais relacionados aos resíduos eletrônicos e subprodutos de fotocatalise exigem atenção urgente. Nesse contexto, a adoção de políticas públicas, a implementação de uma economia circular e o desenvolvimento

de catalisadores mais sustentáveis são fundamentais para mitigar impactos negativos e garantir que os benefícios da nanotecnologia sejam plenamente aproveitados, promovendo um equilíbrio entre progresso tecnológico e responsabilidade ambiental, e apontando caminhos para um futuro mais sustentável.

CONCLUSÃO

Os avanços tecnológicos impulsionados pela nanotecnologia nas fotocélulas têm transformado o setor de energia renovável, promovendo maior eficiência na conversão de energia solar e viabilizando soluções inovadoras e acessíveis. Os resultados evidenciam que a incorporação de nanofios, nanopartículas e pontos quânticos podem aumentar significativamente o desempenho das fotocélulas, reduzindo custos e ampliando a acessibilidade às energias limpas. Estudos também destacam que tecnologias emergentes, como as células solares sensibilizadas por corantes e dispositivos baseados em pontos quânticos, apresentam enorme potencial para melhorar a eficiência e a sustentabilidade do setor.

Por outro lado, os desafios ambientais relacionados ao descarte inadequado de fotocélulas e aos subprodutos da fotocatalise são preocupações cruciais que exigem soluções urgentes. A pesquisa de literatura revelou que práticas inadequadas de descarte podem gerar impactos significativos ao meio ambiente, com destaque para a contaminação por metais pesados. Nesse cenário, a adoção de políticas públicas específicas, o avanço de tecnologias de reciclagem e a promoção de uma economia circular são ações indispensáveis para mitigar os efeitos negativos dessas tecnologias. Portanto, o equilíbrio entre inovação tecnológica e responsabilidade ambiental deve ser priorizado, permitindo que os benefícios da nanotecnologia sejam explorados plenamente de forma sustentável.

A continuidade de estudos focados na eficiência das fotocélulas, nos métodos de reciclagem e no impacto ambiental das tecnologias fotocatalíticas será essencial para assegurar um futuro onde o progresso científico caminhe lado a lado com a preservação ambiental e o desenvolvimento sustentável. Esse equilíbrio entre inovação e sustentabilidade contribui diretamente para os ODS, como o ODS 7 (Energia Limpa e Acessível), ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura), ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis) e ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima), promovendo uma transição energética justa e responsável.

REFERÊNCIAS

AAYUSH, Kumar, *et al.*, (2019). A Systematic Study of the Novel Materials used in Solar Cell Technologies, **Opportunities and Challenges**. *11(1):28-35*. DOI: 10.3844/ERJSP.2020.28.35

A. K. Dutta, "Prospects of nanotechnology for high-efficiency solar cells," 2012 7th International Conference on Electrical and Computer Engineering, Dhaka, **Bangladesh**, 2012, pp. 347-350, DOI: 10.1109/ICECE.2012.6471558.

AOUATIF, Saad. (2024). Analyzing the lifecycle of solar panels including raw material sourcing, manufacturing, and end-of-life disposal. *World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences*, 13(1):966-978. DOI: 10.30574/wjaets.2024.13.1.0478

ANIC, VUCINIC, ALEKSANDR., *et al.* (2024). Recycling of photovoltaic cells - a review. *Detritus*. DOI: 10.31025/2611-4135/2024.18385

A. Doni, F. Dughiero and A. Lorenzoni, "A comparison between thin film and c-Si PV technologies for MW size applications," 2010 35th IEEE **Photovoltaic Specialists Conference, Honolulu, HI, USA, 2010**, pp. 002380-002385, DOI: 10.1109/PVSC.2010.5614382.

A., F., Butt., *et al.*, (2023). Chemically processed CdTe thin films for potential applications in solar cells - **Effect of Cu doping**. *Heliyon*. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e24492

MARDHANA, Januar, Mahardhani .(2023). The Role of Public Policy in Fostering Technological Innovation and Sustainability. *Journal of Contemporary Administration and Management (ADMAN)*, 1(2), 47-53. <https://doi.org/10.61100/adman.v1i2.22>

BALLIF C., *et al.* (2022). Status and perspectives of crystalline silicon photovoltaics in research and industry. *Nat Rev Mater*, 7, 597-616. <https://doi.org/10.1038/s41578-022-00423-2>

Buonomenna, M.G. (2023). Inorganic Thin-Film Solar Cells: Challenges at the Terawatt-Scale. *Symmetry*, 15, 1718. <https://doi.org/10.3390/sym15091718>

Chibuisi, Chinasaokwu, Okorieimoh., Brian, Norton., Michael, Conlon. (2020). The effects of the transient and performance loss rates on PV output performance. DOI: 10.6084/M9.FIGSHARE.14736087.V1

HUI, Yan. *et al.*, (2024). Expanding the Notch Region by Adjusting the Copper Growth Profile for High-Efficiency Flexible Cu(In,Ga)Se₂ Solar Cells. *ACS Applied Materials & Interfaces*. DOI: 10.1021/acsami.4c11408

IMAN, Mohsen, ahmed, *et al.*, (2024). 1. The Effect of Quantum Dots on the Performance of the **Solar Cell**. Al-mağallaġ al-‘irāqiyyaġ al-handasaġ alkahrabā’iyyaġ wa-al-iliktrūniyyaġ, DOI: 10.37917/ijeee.20.2.20

INROW, Hwang., *et al.*, (2024). Scalable CIGS Solar Cells Employing a New Device Design of Nontoxic Buffer Layer and Microgrid Electrode. *ACS Applied Materials & Interfaces*. DOI: 10.1021/acsami.4c05871

JU, Lee., *et al.*, (2024). Novel Fabrication Techniques for Ultra-thin Silicon Based Flexible Electronics. *International Journal of Extreme Manufacturing*. DOI: 10.1088/2631-7990/ad492

JOANNA, Depciuch., *et al.*, (2022). Size-dependent theoretical and experimental photothermal conversion efficiency of spherical gold nanoparticles. *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*, DOI: 10.1016/j.pdpdt.2022.102979

JULIA, Hernandez-ruiz., *et al.*, (2023). 1. Recovery of Silicon and Metal Contacts as Part of the **Recycling of Photovoltaic Modules**. DOI: 10.1109/cde58627.2023.10339518

KARWAN, Wasman, Qadir. (2021). A simulation study on the effect of size gold nanoparticles on broadband light absorption in dye-sensitised solar cells. *Revista Mexicana De Fisica*, DOI: 10.31349/REVMEXFIS.67.509

LIANA, Spytka. (2022). Recycling of Discarded Photovoltaic Solar Modules for Metal Recovery: **A Review and Outlook for the Future**. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.2c02847

MARIA-ANNAM GATOU., *et al.*, (2024). Photocatalytic TiO₂-Based Nanostructures as a Promising Material for Diverse Environmental Applications: A Review. *Reactions (Auckland)*, DOI: 10.3390/reactions5010007

MOHAMED, Gar, *et al.*, (2021). 3. Towards Scaling-up Photocatalytic Process for Multiphase Environmental Applications: **A Review**. DOI:10.20944/PREPRINTS202104.0258.V1

MD, Kamrul, Han *et al.*, (2023). A qualitative Design and optimization of CIGS-based Solar Cells with Sn₂S₃ Back Surface Field: A plan for achieving 21.83 % efficiency. *Heliyon*. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e22866

M., OKIL., Mona *et al.*, (2021). From Crystalline to Low-cost Silicon-based Solar Cells: a Review. *Silicon*, 1-17. DOI: 10.1007/S12633-021-01032-4

NAJMUL, Hoda.(2022). Quantum Dot Solar cells. **Electrical Engineering and Systems Science**. DOI:10.48550/arxiv.2211.06898

NASSIMA, Belhouchet., *et al.*, (2022). 1. Toxicological Evaluation of Intermediate Products of Tetracycline Photocatalytic Treatment Using Brine Shrimp (*Artemia salina*) Model System. **Advances in science, technology & innovation**, DOI: 10.1007/978-3-031-42917-0_22

NOEMI, Gainza, Santos, *et al.*, (2024). Environmental Impacts of Inadequate Disposal of Heavy Metals in Soil, Water, and Air. **Journal of Bioengineering, technologies and health**. DOI: 10.34178/jbth.v6isuppl2.355

N., PUGAZHENTHIRAN.,*et al.*, (2023). 2. Developments in Dye-Sensitized Solar Cells - **An Overview**. DOI: 10.1016/b978-0-323-93940-9.00168-7

NULL Author ID., Ahmed, *et al.*, (2024). 5. Sustainable Strategies for Crystalline Solar Cell Recycling: A Review on Recycling Techniques, Companies, and Environmental Impact Analysis. **Sustainability**, DOI: 10.3390/su16135785

OLORUNSHOGO, Benjamin, *et al.*,(2024). Recent advances in solar photovoltaic technologies: Efficiency, materials, and applications. **GSC Advanced Research and Reviews**, 20(1):159-175. DOI: 10.30574/gscarr.2024.20.1.0259

RAMA, Gaur *et al.*,. (2023). Photocatalysis as an effective and sustainable approach for environmental remediation. **Scientific Reports**, 2021, № 1. DOI: 10.1016/b978-0-443-18618-9.00014-0

RAJAT, GERA., *et al.*, (2023). 4. Recycling of Solar Panels: Sustainable Disposal of Photovoltaic Materials. **E3S web of conferences**, DOI: 10.1051/e3sconf/202454702011

RIFAT, Bin,*et al.*, (2023). Use of Nano-Grating Structures Embedded within the Absorbing Substrate to Optimize the Efficiency of Cadmium Telluride Thin-Film Solar Cells. **TENCON 2023 - 2023 IEEE Region 10 Conference (TENCON)**, Chiang Mai, Thailand, 2023, pp. 1234-1239,1234-1239. DOI: 10.1109/tencon58879.2023.10322462

ROBERTO, C, Avilés-betanzos., *et al.*, (2023). 3. Low-Temperature Fabrication of Flexible Dye-Sensitized Solar Cells: Influence of Electrolyte Solution on Performance under Solar and Indoor Illumination. **Energies**, DOI: 10.3390/en16155617

ROGER, Nyffenegger., *et al.*,(2024). 4. How circular is the European photovoltaic industry? Practical insights on current circular economy barriers, enablers, and goals. **Journal of Cleaner Production**, DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.141376

RUI, F., M., LOBO., C., A., C., SEQUEIRA. (2024). Nanophysics Is Boosting Nanotechnology for Clean Renewable Energy. **Materials**, 17(21):5356-5356. DOI: 10.3390/ma17215356

SEONGHOON,Jeong., Seung, *et al.*, (2023). Enhanced Mechanical Stability of CIGS Solar Module with Glass/Polyimide/Indium Tin Oxide for Potentially Flexible Applications. **ACS Applied Energy Materials**, 6(7):3745-3755. DOI: 10.1021/acsaem.2c03957

SIDDHARTHA, Sanka, Boxi (2024). Degradation of Organic Compounds in Aqueous Media using Semiconductor Nanomaterials. **Deleted Journal**, DOI: 10.37256/ujgc.2120244321

SHIVANGI, Agarwal *et al.*, (2023). 1. **A Review of Solar Cells and their Applications**. DOI: 10.21467/proceedings.161.26

SUGUNRAJ, Sekar., *et al.*,(2023). A Critical Review of The Process and Challenges of Silicon Crystal Growth for Photovoltaic Applications. **Crystal Research and Technology**, 59. DOI: 10.1002/crat.202300131

TATSUO, Saga. (2010). Advances in crystalline silicon solar cell technology for industrial mass production. **Npg Asia Materials**, 2(3):96-102. DOI: 10.1038/ASIAMAT.2010.8

T.M., Mazur., M., P., Mazur., I., Vakaliuk. (2023). Solar cells based on CdTe thin films (Part II). **24(1):134-145. Section: Physics**. DOI: 10.15330/pcss.24.1.134-145

USMAN, UZUAGBE,*et al.*, (2024). 4. Circular economy in the manufacturing sector: Digital transformation and sustainable practices. **International Journal of Science and Research Archive**. DOI: 10.30574/ijrsra.2024.12.2.1217

VARUN,KIMAR,SINGHAL.,*et al.*,(2024). 2. Optimizing High-Efficiency Multiple Exciton Generation-Enabled Quantum Dot Solar Cells. **IEEE Transactions on Electron Devices**. DOI: 10.1109/ted.2023.3344689

WILFRIDA, N., *et al.*, (2023).Titanium Oxide for Photodegradation of Organic Pollutants. **Advances in chemical and materials engineering book series**, DOI: 10.4018/978-1-6684-8743-3.ch004

YANCHUN, Pan., ALI, HASHEMIZADEH. (2023). 4. Circular economy-based assessment framework for enhancing sustainability in renewable energy development with life cycle considerations. **Environmental Impact Assessment Review**, DOI: 10.1016/j.eiar.2023.107289

YANPENG, Gao.*et al.*,(2021). 5. An inescapable fact: Toxicity increase during photo-driven degradation of emerging contaminants in water environments. **Green and Sustainable Chemistry**, DOI: 10.1016/J.COAGSC.2021.100472

YUQING, Liang., *et al.*, (2023). Research on recycling and disassembly of waste crystalline silicon solar cells. **Highlights in Science, Engineering and Technology**, DOI: 10.54097/hset.v29i.4214