**UMA REVISÃO SOBRE OS TIPOS E COMPOSIÇÕES DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS: TECNOLOGIAS E PERSPECTIVAS FUTURAS**

**Thiago Yared Abdala1**; Allan Rodrigues Silva2; Filipe Milani de Souza3; Davidson Martins Moreira4

1 Bolsista ; Iniciação Científica; thiago.yared@fbter.org.br

2 Centro Universitário SENAI CIMATEC; Salvador-BA; davidson.moreira@fieb.org.br

**RESUMO**

Neste estudo, será apresentada uma revisão abrangente sobre os tipos e composições de células fotovoltaicas, enfocando as principais tecnologias e perspectivas futuras. Serão discutidas células de silício cristalino, filmes finos e materiais emergentes como perovskitas. A análise também abordará eficiência energética, custo de produção e impacto ambiental dessas tecnologias. Além disso, serão destacadas as inovações recentes e tendências que moldarão a indústria fotovoltaica nos próximos anos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Geração de Energia; Energia Solar; Energias Renováveis; Eficiência Energética;

**1. INTRODUÇÃO**

 A energia solar fotovoltaica é considerada uma das principais fontes de energia renovável, impulsionando um crescimento acelerado em razão de sua sustentabilidade e potencial para reduzir significativamente as emissões de gases de efeito estufa.1 Nesse sentido, é de suma importância compreender os diferentes tipos e composições de células fotovoltaicas a fim de otimizar seu desempenho e adaptabilidade em diversas aplicações.

De acordo com Green, as células de silício cristalino são as mais utilizadas no mercado atual, enquanto os filmes finos e materiais emergentes apresentam perspectivas promissoras.2 Além disso, destaca-se que a inovação contínua e as tendências futuras, como o desenvolvimento de células de perovskita e pontos quânticos, têm o potencial de revolucionar a indústria fotovoltaica.3

Nesse contexto, é fundamental discutir as principais tecnologias e perspectivas futuras relacionadas às células fotovoltaicas, proporcionando uma visão abrangente sobre o tema. Dessa forma, este evento objetiva apresentar uma revisão ampla e atualizada sobre as diferentes tecnologias e composições de células fotovoltaicas e suas perspectivas futuras, considerando o seu papel crucial para o desenvolvimento sustentável e a transição energética global.

**2. METODOLOGIA**

 Para realizar esta revisão sobre os tipos e composições de células fotovoltaicas, bem como suas tecnologias e perspectivas futuras, foram utilizados diversos artigos científicos como fontes primárias de informação. A seleção dos artigos foi baseada em sua relevância e qualidade para a área de pesquisa de células fotovoltaicas. Foi realizada uma busca sistemática em bancos de dados científicos, como Scopus e Web of Science, utilizando palavras-chave relacionadas ao tema. Os artigos selecionados foram lidos na íntegra e avaliados quanto à sua qualidade metodológica e relevância para o tema da revisão.

**3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

 Para abordar os principais tipos de células fotovoltaicas, foram consultados artigos como o de Ashraf, apresentou uma revisão abrangente sobre as células fotovoltaicas de silício, que são atualmente a tecnologia mais utilizada na produção de energia solar em grande escala. 4 As células de silício são classificadas em duas categorias principais: as células de silício cristalino (c-Si) e as células de silício amorfo (a-Si). As células de silício cristalino são produzidas a partir de lingotes de silício monocristalino ou policristalino, enquanto as células de silício amorfo são produzidas a partir de silício amorfo depositado em substratos de vidro ou plástico. Essas células possuem eficiências de conversão de energia relativamente baixas, geralmente variando de 10% a 20%. [Silício]

As células fotovoltaicas de filme fino são outra categoria importante de células solares. Essas células são produzidas a partir de materiais semicondutores depositados em substratos como vidro, plástico ou metal. Os materiais mais comuns utilizados em células de filme fino são o disseleneto de cobre e índio (CIS), o disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS) e o telureto de cádmio (CdTe). As células de filme fino geralmente apresentam eficiências de conversão de energia um pouco mais baixas do que as células de silício cristalino, variando de 7% a 13%. No entanto, a tecnologia de filme fino é considerada promissora devido à sua flexibilidade e facilidade de fabricação em grandes áreas. 4

As células fotovoltaicas de perovskita são uma classe relativamente nova de células solares, mas com um grande potencial de eficiência. As células de perovskita são produzidas a partir de materiais híbridos orgânico-inorgânicos com a estrutura cristalina de perovskita. Elas têm a vantagem de serem altamente eficientes na conversão de energia solar em eletricidade, com eficiências de conversão de energia superiores a 25%. No entanto, a instabilidade a longo prazo e a durabilidade dessas células ainda são áreas de pesquisa ativas.4

As células orgânicas são outra categoria promissora de células solares. Essas células são produzidas a partir de materiais orgânicos e inorgânicos em camadas finas. As células orgânicas são altamente flexíveis e leves, e podem ser produzidas em grandes áreas usando técnicas de impressão em massa. No entanto, a eficiência de conversão de energia dessas células é atualmente relativamente baixa, variando de 5% a 10%. 4

De forma geral, as células de filme fino de cobre, índio, gálio e selênio (CIGS) têm potencial para um custo de produção mais baixo do que as células de silício, de acordo com SHI. 5 Já as células de silício podem apresentar um custo mais elevado, mas novos métodos de produção e materiais estão sendo desenvolvidos para reduzir esse custo, conforme demonstrado por WOODHOUSE. 6

As células fotovoltaicas orgânicas têm potencial para um baixo custo de produção, de acordo com YU³, mas ainda são um campo de pesquisa em desenvolvimento. Por fim, LEYDEN 7 demonstraram que a utilização de um processo de deposição de vapor de baixa temperatura pode levar a uma redução significativa no custo de produção das células de perovskita.

É importante ressaltar que o custo de produção não é o único fator a ser considerado na avaliação da viabilidade econômica das células fotovoltaicas. É necessário também levar em conta a eficiência da célula, a durabilidade e a capacidade de produzir energia ao longo do tempo.

O impacto ambiental das células fotovoltaicas depende de vários fatores, incluindo o tipo de material utilizado, o processo de produção, a eficiência energética e o método de disposição final.

As células fotovoltaicas de silício, que são as mais comuns atualmente, têm um impacto ambiental significativo durante a sua produção. A produção do silício é um processo intensivo em energia e emite gases de efeito estufa, como dióxido de carbono e hexafluoreto de enxofre, que contribuem para a mudança climática. Além disso, a mineração do silício pode causar impactos ambientais negativos, como a degradação do solo e da água. 8

As células de perovskita são relativamente novas e ainda estão em fase de desenvolvimento, mas também podem ter impactos ambientais negativos durante a sua produção. O processo de produção de perovskita pode utilizar produtos químicos tóxicos e apresentar um alto consumo de energia. De acordo com Chen9, "a produção de perovskita apresenta alguns desafios em termos de impacto ambiental, incluindo a utilização de solventes tóxicos e a geração de resíduos".

As células de filme fino podem ser produzidas com menos energia e matéria-prima em comparação com as células de silício, mas ainda assim apresentam impactos ambientais, como a emissão de gases de efeito estufa e a produção de resíduos tóxicos durante o processo de fabricação. Segundo KOOMALAPATI 10, "as células solares de filme fino têm um ciclo de vida ambiental semelhante ao das células solares de silício em termos de emissões de gases de efeito estufa".

Já as células fotovoltaicas orgânicas são produzidas a partir de materiais orgânicos, como polímeros, e apresentam um potencial menor de impacto ambiental negativo durante o processo de produção. No entanto, a eficiência energética das células orgânicas ainda é relativamente baixa em comparação com outras tecnologias, o que pode levar à necessidade de produzir um grande número de células para gerar a mesma quantidade de energia. Conforme mencionado por YEH 11, "as células solares orgânicas podem ser produzidas utilizando materiais orgânicos abundantes e baratos, mas sua eficiência energética ainda é relativamente baixa em comparação com as células solares convencionais".

[Inovação e tendências]

 Além disso, Lee apresentou uma revisão sobre as principais tecnologias de fabricação utilizadas na produção de células fotovoltaicas, como deposição de filmes finos e impressão em massa. A deposição de filmes finos é uma técnica que envolve a deposição de uma camada fina de material em um substrato, geralmente por meio de processos químicos ou físicos. Essa técnica é amplamente utilizada na produção de células de filme fino, como as de telureto de cádmio e de silício amorfo. Já a impressão em massa é uma técnica que permite a produção de células fotovoltaicas de forma rápida e econômica, por meio da impressão de camadas finas de materiais em um substrato. Essa técnica é utilizada principalmente na produção de células de perovskita e de células orgânicas. Ambas as técnicas são importantes para a produção em larga escala de células fotovoltaicas com alta eficiência e baixo custo. 12

O estudo de D'Angela destacou a importância do desenvolvimento de novos materiais para a fabricação de células fotovoltaicas com maior eficiência e menor custo. Esses novos materiais incluem perovskitas, silício cristalino de alta eficiência, compostos orgânicos e nanotubos de carbono. Outra perspectiva futura abordada no estudo é a utilização de células fotovoltaicas em dispositivos eletrônicos vestíveis, como relógios inteligentes e pulseiras de monitoramento de atividades físicas. Nesse sentido, são necessários avanços no desenvolvimento de células fotovoltaicas flexíveis e leves, que possam ser incorporadas em roupas e acessórios. Além disso, a pesquisa apontou para a necessidade de melhorar a sustentabilidade do processo de fabricação de células fotovoltaicas, utilizando fontes de energia renovável e materiais menos tóxicos. Essa abordagem pode contribuir para a redução do impacto ambiental da produção de células fotovoltaicas e aumentar sua aceitação por parte da sociedade. 13

Em resumo, as perspectivas futuras das células fotovoltaicas incluem a integração com tecnologias de armazenamento de energia, o desenvolvimento de novos materiais, a utilização em dispositivos eletrônicos vestíveis e a melhoria da sustentabilidade do processo de fabricação. Tais avanços podem contribuir para aumentar a eficiência e reduzir os custos das células fotovoltaicas, tornando-as mais acessíveis e ampliando seu potencial como fonte de energia limpa e renovável.

Além dos artigos mencionados, outros estudos relevantes foram consultados para a realização desta revisão. Todos os artigos utilizados nesta revisão estão referenciados na lista de referências ao final do texto.

A partir da análise dos artigos selecionados, foram identificadas as principais informações e resultados relevantes para a elaboração deste trabalho. As informações foram organizadas de forma clara e objetiva para a elaboração do texto final.

 A partir da revisão realizada sobre os tipos e composições de células fotovoltaicas, foi possível identificar que a tecnologia de células solares de silício domina atualmente o mercado. No entanto, as células solares de filme fino e perovskita têm atraído atenção crescente, devido à sua maior eficiência e menor custo de produção em relação às células de silício.

Outro aspecto importante abordado na revisão foi a fabricação das células fotovoltaicas. O estudo de Lee destacou as tecnologias de deposição de filmes finos e impressão em massa como alternativas promissoras para a produção em larga escala de células solares. A deposição de filmes finos consiste em depositar finas camadas de material semicondutor sobre um substrato, enquanto a impressão em massa utiliza técnicas de impressão para depositar o material semicondutor diretamente sobre o substrato. 12

Por fim, a integração de tecnologias avançadas de armazenamento de energia com células fotovoltaicas foi abordada como uma das perspectivas futuras da área. O estudo de D'Angela destacou a combinação de células solares com baterias de íon-lítio como uma forma de aumentar a eficiência global do sistema de energia solar. A utilização de baterias permite o armazenamento de energia produzida pelas células solares durante o dia para uso durante a noite ou em dias nublados. 13

Em conclusão, a revisão realizada sobre os tipos e composições de células fotovoltaicas permitiu identificar as principais tecnologias disponíveis no mercado, bem como as perspectivas futuras da área. A integração de tecnologias avançadas de armazenamento de energia com células fotovoltaicas pode ser uma solução promissora para aumentar a eficiência e a viabilidade econômica do uso de energia solar.

**4. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

 Com base na revisão dos artigos científicos selecionados, pode-se concluir que existem diversas tecnologias de células fotovoltaicas em desenvolvimento, com potencial para aumentar a eficiência de conversão de energia solar em eletricidade e tornar a energia solar mais acessível e viável para aplicações em larga escala.

 Entre os principais tipos de células fotovoltaicas analisados, as células de silício continuam sendo as mais utilizadas e estudadas, devido à sua eficiência e disponibilidade comercial. No entanto, as células de filme fino e de perovskita têm ganhado destaque nas pesquisas recentes, apresentando eficiências de conversão cada vez mais próximas às células de silício e possuindo vantagens em termos de flexibilidade e custo.

 Além disso, a integração de tecnologias avançadas de armazenamento de energia, como baterias de íon-lítio, com células fotovoltaicas tem sido apontada como uma das principais perspectivas futuras para aumentar a eficiência global dos sistemas de energia solar e permitir o uso de energia solar em larga escala.

 No entanto, é importante ressaltar que ainda há desafios a serem superados para a comercialização em larga escala das células fotovoltaicas, como a redução de custos de fabricação e a melhoria da durabilidade e estabilidade dos materiais utilizados. Além disso, é necessário garantir que as práticas de produção sejam sustentáveis e ambientalmente responsáveis.

 Em síntese, a investigação acerca das células fotovoltaicas prossegue em constante progresso, à medida que novas tecnologias são desenvolvidas e as existentes aprimoradas. O uso de energia solar tem o potencial de se tornar uma fonte crucial de energia renovável e sustentável, e o aperfeiçoamento das células fotovoltaicas representa um dos fatores mais significativos que impulsionam esse avanço.

**Agradecimentos**

Agradeço primeiramente a Deus, **“Soli Deo Gloria”.** É Ele quem tem me dado força e sabedoria para continuar sempre em busca do conhecimento.

Agradeço aos meus pais, Deocar Fernando Abdala e Leila Christina Bavelloni Abdala, pois são pessoas a quem eu devo a vida e nunca desistiram em me incentivar nos estudos.

Agradeço a minha esposa que é minha companheira para todos os momentos e que tem me motivado e me encorajado de uma forma imensa em continuar nessa jornada.

Agradeço ao meu orientador Davidson Martins Moreira, que tem aberto esta porta para que eu possa expandir meu cabedal de conhecimento.

Ao meu coorientador Allan Rodrigues Silva, por todo suporte e orientações que tem me proporcionado.

Agradeço também ao meu irmão de coração Filipe Milani de Souza pela amizade, orientações, pela mão sempre estendida a qualquer hora.

Aos demais amigos e colegas envolvidos agradeço imensamente pela parceria e amizade. Sou grato pela vida de todos.

Finalizo meus agradecimentos com uma frase celebre de Martin Luther King Jr. – **“*Suba o primeiro degrau com fé. Não é necessário que você veja toda a escada. Apenas dê o primeiro passo*.”**

**5. REFERÊNCIAS**

1 COZZI, Laura et al. **World energy outlook 2020.** International Energy Agency: Paris, France, p. 1-461, 2020.

2 Green, M. A., Dunlop, E. D., Hohl-Ebinger, J., Yoshita, M., Kopidakis N., Hao X. (2021). **Solar cell efficiency tables** (version 58). **Progress in Photovoltaics: Research and Applications,** 29(2), 3-15.

3 Kazmerski, L. L. (2019). **Photovoltaics: A review of cell and module technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 117, 109486.

4 Uddin, A.; Upama, M.B.; Yi, H.; Duan, L. **Encapsulation of Organic and Perovskite Solar Cells: A Review. Coating**s 2019, 9, 65.

 5 SHI, S. et al. **Recent progress in the high-temperature-resistant PI substrate with low CTE for CIGS thin-film solar cells.** Materials Today Energy, v. 20, p. 100640, 2021.

6 WOODHOUSE, Michael A. et al. C**rystalline silicon photovoltaic module manufacturing costs and sustainable pricing: 1H 2018 Benchmark and Cost Reduction Road Map.** National Renewable Energy Lab**.**(NREL), Golden, CO (United States), 2019.

7 YU, Junsheng; ZHENG, Yifan; HUANG, Jiang. **Towards high performance organic photovoltaic cells: A review of recent development in organic photovoltaics.** Polymers, v. 6, n. 9, p. 2473-2509, 2014.

8 LEYDEN, Matthew R. et al. **High performance perovskite solar cells by hybrid chemical vapor deposition.** Journal of Materials Chemistry A, v. 2, n. 44, p. 18742-18745, 2014.

9 KOMMALAPATI, Raghava et al. **Review of the life cycle greenhouse gas emissions from different photovoltaic and concentrating solar power electricity generation systems.** Energies, v. 10, n. 3, p. 350, 2017.

10 CHEN, Yichuan et al. **Large-area perovskite solar cells–a review of recent progress and issues.** RSC advances, v. 8, n. 19, p. 10489-10508, 2018.

11 YEH, Naichia; YEH, Pulin. **Organic solar cells: Their developments and potentials.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 21, p. 421-431, 2013.

12 Taesoo D. Lee, Abasifreke U. Ebong**. A review of thin film solar cell technologies and challenges,Renewable and Sustainable Energy Reviews**, volume 70,2017.

13 Mariano Juliana D’Angela, Urbanetz Jr Jair. **The Energy Storage System Integration Into Photovoltaic Systems: A Case Study of Energy Management at UTFPR.** 2022