

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS – UFAL
CENTRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS AGRÁRIAS
ENGENHARIA DE ENERGIA

REBECA LUCIO CHAVES

NOVOS MATERIAIS EMPREGADOS PARA PRODUÇÃO DE CÉLULAS
FOTOVOLTAICAS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

RIO LARGO

2023

Rebeca Lucio Chaves

NOVOS MATERIAIS EMPREGADOS PARA PRODUÇÃO DE CÉLULAS
FOTOVOLTAICAS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

Trabalho de Conclusão de Curso - TCC
apresentado à Universidade Federal de
Alagoas – UFAL, como pré-requisito para
a obtenção do grau de bacharel em
engenharia de energia.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Faustino
Lacerda de Souza.

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca do Campus de Engenharias e Ciências Agrárias
Bibliotecária Responsável: Myrtes Vieira do Nascimento

C512n Chaves, Rebeca Lucio

Novos materiais empregados para produção de células fotovoltaicas: uma revisão sistemática. / Rebeca Lucio Chaves - 2023.
54f.; il.

Monografia de Graduação em Engenharia de Energia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal de Alagoas, Campus de Engenharias e Ciências Agrárias. Rio Largo, 2023.

Orientação: Dr. Leonardo Faustino Lacerda de Souza

Inclui bibliografia

1. Células solares. 2. Geração fotovoltaica. 3. Eficiência energética.
I. Título


CDU: 621.472:69

Folha de Aprovação

REBECA LUCIO CHAVES


NOVOS MATERIAIS EMPREGADOS PARA PRODUÇÃO DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial
para a obtenção do título de
Engenheiro de Energia pela
Universidade Federal de Alagoas.
Aprovado em 19 de setembro de
2023.


Documento assinado digitalmente
 LEONARDO FAUSTINO LACERDA DE SOUZA
Data: 25/09/2023 09:04:14-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Leonardo Faustino Lacerda de Souza, CECA/UFAL (Orientador)

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 AMANDA SANTANA PEITER
Data: 25/09/2023 14:21:43-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Amanda Santana Peiter, CECA/UFAL (1ª Avaliadora)

Documento assinado digitalmente
 ALANA KELLY XAVIER DE BARROS BRANCO
Data: 28/09/2023 17:26:52-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Alana Kelly Xavier Santos, CECA/UFAL (2ª Avaliadora)

Rio Largo

2023

RESUMO

Cada vez mais, o crescimento de nossa sociedade tem se dado em cima do termo sustentabilidade. Diversos aspectos têm se desenvolvido em cima desse tema, como aspectos econômicos, sociais, ambientais e sobretudo no setor energético. Neste sentido, o campo de pesquisa em cima das células solares tem se destacado por permitir a conversão de energia solar em energia elétrica. Diversos materiais têm sido desenvolvidos com o objetivo de potencializar este processo. Neste trabalho, será realizado um levantamento bibliográfico sobre tais materiais de forma a abranger maior diversidade material possível, a partir da busca por artigos publicados entre 2018 e 2023, sempre contextualizando o leitor em cada material a ser discutido. A diversidade de material foi abordada e os mesmos puderam ter suas características e algumas de suas propriedades comparadas adequadamente. Foi possível observar que desde o ano de 2018, grande progresso científico e tecnológico tem sido alcançado nesta direção. Com a análise dos dados coletados, percebeu-se que o material CdTe confere maior eficiência energética que as demais opções apresentadas. Além disso, tem-se que a segunda célula com maior eficiência é formada a partir de CIGS, e emprega a tecnologia de filmes ultrafinos para sua construção. A célula voltaica de Sb_2B_3 é a que apresenta menor eficiência.

Palavras-chave: Células solares; geração fotovoltaica.

ABSTRACT

Increasingly, the growth of our society has been based on the concept of sustainability. Various aspects have been developed around this theme, such as economic, social, environmental, and especially in the energy sector. In this sense, the field of research on solar cells has stood out for allowing the conversion of solar energy into electrical energy, thus being considered a renewable energy source. Several materials have been developed with the aim of enhancing this process. In this work, a literature review will be conducted on such materials in order to cover the greatest possible material diversity, based on articles published from 2018 to 2023 onwards, always contextualizing the reader in each material to be discussed. Here, significant material diversity has been addressed and their characteristics and some of their properties properly compared. It was possible to observe that since 2018, great scientific and technological progress has been achieved in this direction. With the analysis of the collected data, it was observed that the CdTe material provides higher energy efficiency than the other options presented. Furthermore, it is found that the second most efficient cell is composed of CIGS and employs ultra-thin film technology for its construction. The Sb_2B_3 photovoltaic cell is the one with the lowest efficiency.

Keywords: Solar cells; photovoltaic generation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2: Alguns materiais abordados nesta revisão bibliográfica.....	10
Figura 3: Fluxograma de ilustração da metodologia proposta.....	13
Figura 4: Microscopia de nanofitas de óxido de estanho.	14
Figura 5: Procedimento de síntese hidrotermal.....	20
Figura 6: Exemplo de heterojunção.	23
Figura 7: Imagem em microscópio eletrônico de varredura da superfície de crescimento do diamante de 4,2 μ m de espessura, depositada sobre o substrato de silício.	24
Figura 8: Deposição de camadas por CCS.....	26
Figura 9: (a) Deposição hidrotermal de Sb ₂ Se ₃ . (b) Deposição CCS de Sb ₂ Se ₃ . (c) Imagens dos filmes preparados. (d) Morfologia e distribuição elemental.....	28
Figura 10: Verticalização do crescimento das fitas de Sb ₂ Se ₃ , com e sem (sobre CdS) sementes de Sb ₂ S ₃ , através de análise por XRD e absorbância.	29
Figura 11: Imagens FE-SEM de filme FTO/CdS/Sb ₂ Se ₃ a,b) sem a camada de semente Sb ₂ Se ₃ , com camada de semente Sb ₂ Se ₃ e (e) Diagrama de bandas do dispositivo finalizado.....	29
Figura 12: Estruturas de dispositivos de células solares do tipo CIGSSe. A estrutura A é Zn _{1-x} MgxO tamponada com células solares CIGSSe livres de CdS. A estrutura B são células solares CIGSSe convencionais tamponadas com CdS. .	32
Figura 13: Alinhamento de banda de energia nas interfaces CIGSSe/Zn _{1-x} MgxO e CIGSSe/CdS.	33
Figura 14: (a) Estrutura química das moléculas. (b) espectros de absorção. (c) Diagrama de energia.....	35
Figura 15: Mecanismo de transferência de cargas.	36
Figura 16: Representação esquemática da célula solar do tipo InP-TNP/Ge.....	38
Figura 17: Procedimento experimental.	39
Figura 18: Estruturas moleculares de dendrímeros estudadas.	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Quadro comparativo dos materiais apresentados anteriormente.....	44
Tabela 2. Quadro comparativo dos materiais apresentados anteriormente.....	46

SUMÁRIO

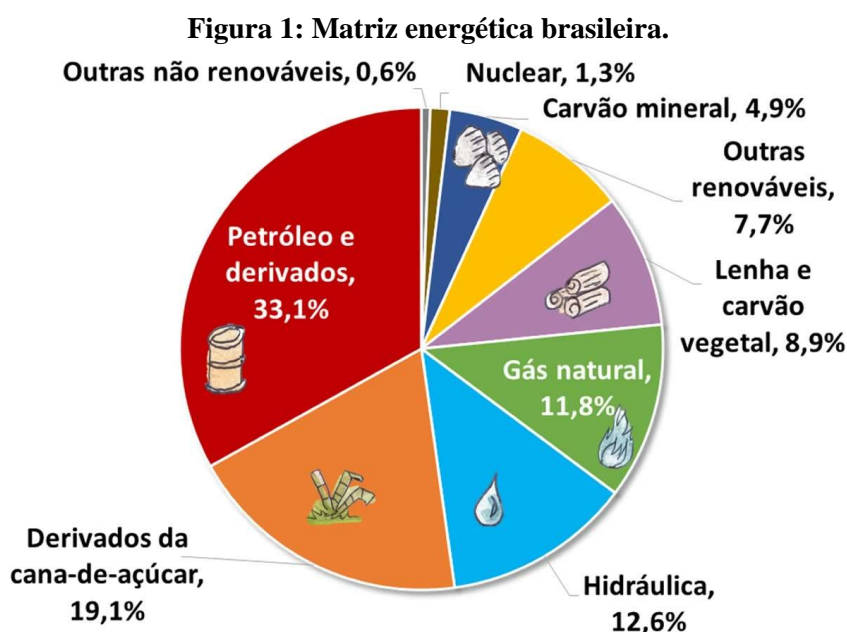
1. INTRODUÇÃO.....	10
2. OBJETIVOS.....	13
2.1 Objetivo Geral.....	13
2.2 Objetivos Específicos.....	13
3. METODOLOGIA	14
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
5.1 Células solares de Seleneto de Antimônio -Sb ₂ Se ₃	29
5.2 Células solares de Telureto de Cádmio - CdTe	32
5.3 Células solares de Cobre-Índio-Gálio-Diseleneto - CIGSe	33
5.4 Células solares CIGS	35
5.5 Células solares compostas por Pontos Quânticos	38
5.6 Células solares nanométricas	39
5.7 Células solares de silício	40
5.8 Células solares Orgânicas	42
5.9 Células solares poliméricas	43
5.10 Células solares de perovskita	43
6. RESULTADOS	46
Tabela 1. Quadro comparativo dos materiais apresentados anteriormente.	46
Tabela 2. Quadro comparativo dos materiais apresentados anteriormente	48
7. CONCLUSÃO.....	50
BIBLIOGRAFIA	51

1. INTRODUÇÃO

A intensa busca por novas fontes de energia sustentável tem sido impulsionada por diversas partes do mundo nas últimas décadas. Cada vez mais os princípios da sustentabilidade são agregados nos mais variados aspectos da nossa sociedade, sejam eles econômicos, ambientais ou mesmo sociais. Quando o assunto é geração de energia, também não é diferente. Todos estes aspectos se entrelaçam quando se fala em geração de energia de forma sustentável, sendo assim de fundamental importância no desenvolvimento de novos métodos de geração de energia em um contexto envolvendo sustentabilidade. Atualmente, diversas formas de gerar energia renovável tem sido estudadas por pesquisadores de diversos países. Dentre estas, uma das que mais tem se destacado é o campo da geração de energia por células fotovoltaicas (DAMBHARE; BUTEY; MOHARIL, 2021).

A matriz energética brasileira é composta por uma diversidade de fontes de energia que desempenham um papel fundamental no suprimento e desenvolvimento do país. Ela é caracterizada pela sua alta participação de fontes renováveis, como a hidrelétrica e a biomassa, combinadas com fontes fósseis, como o petróleo e o gás natural. Essa combinação permite ao Brasil ter uma matriz energética relativamente limpa em comparação com muitos outros países.

A matriz energética brasileira é formada principalmente por fontes de energia não-renováveis, petróleo e seus derivados, sendo seguidas pelos derivados da cana-de-açúcar, gás natural e energia hidráulica, como é indicado pela Figura 1.



Fonte: (EPE, 2023).

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a energia solar fotovoltaica é a fonte que mais cresceu no Brasil nos últimos anos, representando cerca de 11,2% da matriz energética nacional em 2023. As estimativas da Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR) eram de que o país poderia chegar a ter 29 GW de capacidade instalada em energia solar fotovoltaica até 2024, o que corresponde a cerca de 10% da capacidade total de geração de energia elétrica do Brasil (ANEEL, 2021).

De acordo com a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), o Brasil possui um dos melhores recursos solares do mundo, com uma irradiação solar média de 4,5 kWh/m² por dia, o que representa cerca de 50% a mais do que a média da Alemanha, líder mundial em geração de energia solar. Ainda assim, a participação da energia solar na matriz energética brasileira é relativamente baixa, o que indica um enorme potencial de crescimento (ABSOLAR, 2021).

Por definição, uma célula fotovoltaica constitui um dispositivo capaz de converter energia luminosa em elétrica. Estas quando integradas formam o que é conhecido por placas solares ou painéis fotovoltaicos. O estudo das células solares e da conversão de energia fotovoltaica intensificou-se consideravelmente durante as últimas décadas. Do ponto de vista de estrutura molecular, as células solares baseadas na tecnologia fotovoltaica podem ser fabricadas a partir de materiais inorgânicos, como silício cristalino (c-Si), telureto de cádmio (CdTe), disseleneto de cobre-índio gálio (CIGS) e silício amorfo (a-Si), além de materiais orgânicos (DAMBHARE; BUTEY; MOHARIL, 2021).

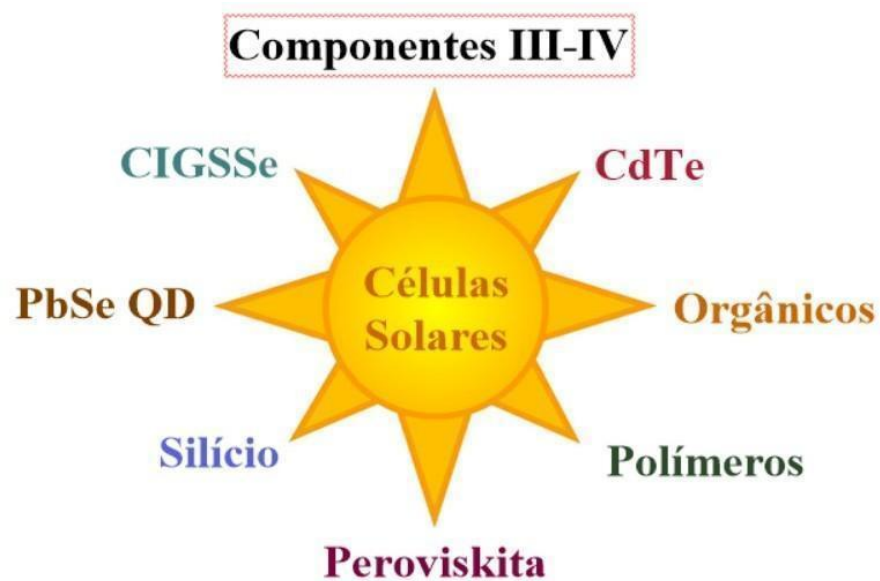
De forma geral, células fotovoltaicas possuem seu funcionamento baseado na absorção de fótons, partículas que compõem a luz solar. Estes fótons excitam os elétrons presentes em uma determinada estrutura molecular, gerando assim corrente elétrica. Células fotovoltaicas podem se apresentar como um agrupamento composto por materiais específicos. Após o processo de dopagem, estes materiais passam a apresentar defeitos em suas estruturas moleculares capazes de proporcionar importantes propriedades elétricas relacionadas à condução de cargas, através da formação de semicondutores. Estes podem ser classificados como semicondutores de tipo n e semicondutores do tipo p, a depender da configuração de suas bandas condutoras (DAMBHARE; BUTEY; MOHARIL, 2021).

Devido à importância deste campo de pesquisa, um grande número de trabalhos acadêmicos têm sido anualmente publicados sobre a apresentação de novos materiais, combinações, ou meios de produção de novas estruturas com funções fotovoltaicas direcionadas ao desenvolvimento de células solares. Revistas científicas internacionais como, por exemplo, a Solar Energy, e Energies têm sido algumas das principais plataformas de divulgação

científica, relacionadas ao tema das células solares. Dessa forma, fica evidente a necessidade de disponibilização de materiais acadêmicos que apresentem estes avanços de forma organizada, filtrando de maneira racional o grande número de materiais acadêmicos lançados anualmente sobre este tema.

É neste contexto, que se demonstrou interesse no desenvolvimento de uma revisão bibliográfica de caráter crítico, que traga as novidades relacionadas aos novos materiais bem como novas composições estruturais lançadas no campo das células solares a partir do ano de 2022, divulgados entre as revistas científicas destacadas anteriormente (Figura 2). Além de elencar estes materiais, o presente trabalho propõe a comparação, quando possível, de importantes parâmetros a serem abordados entre estes materiais como, por exemplo, sua eficiência.

Figura 2. Alguns materiais abordados nesta revisão bibliográfica.



Fonte: O autor.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

A revisão bibliográfica de forma sistemática, sobre os novos materiais e composições como potenciais aplicações na preparação de células solares.

2.2 Objetivos Específicos

- relatar criticamente os materiais a serem apresentados, e
- realizar comparações entre os materiais explicitados.

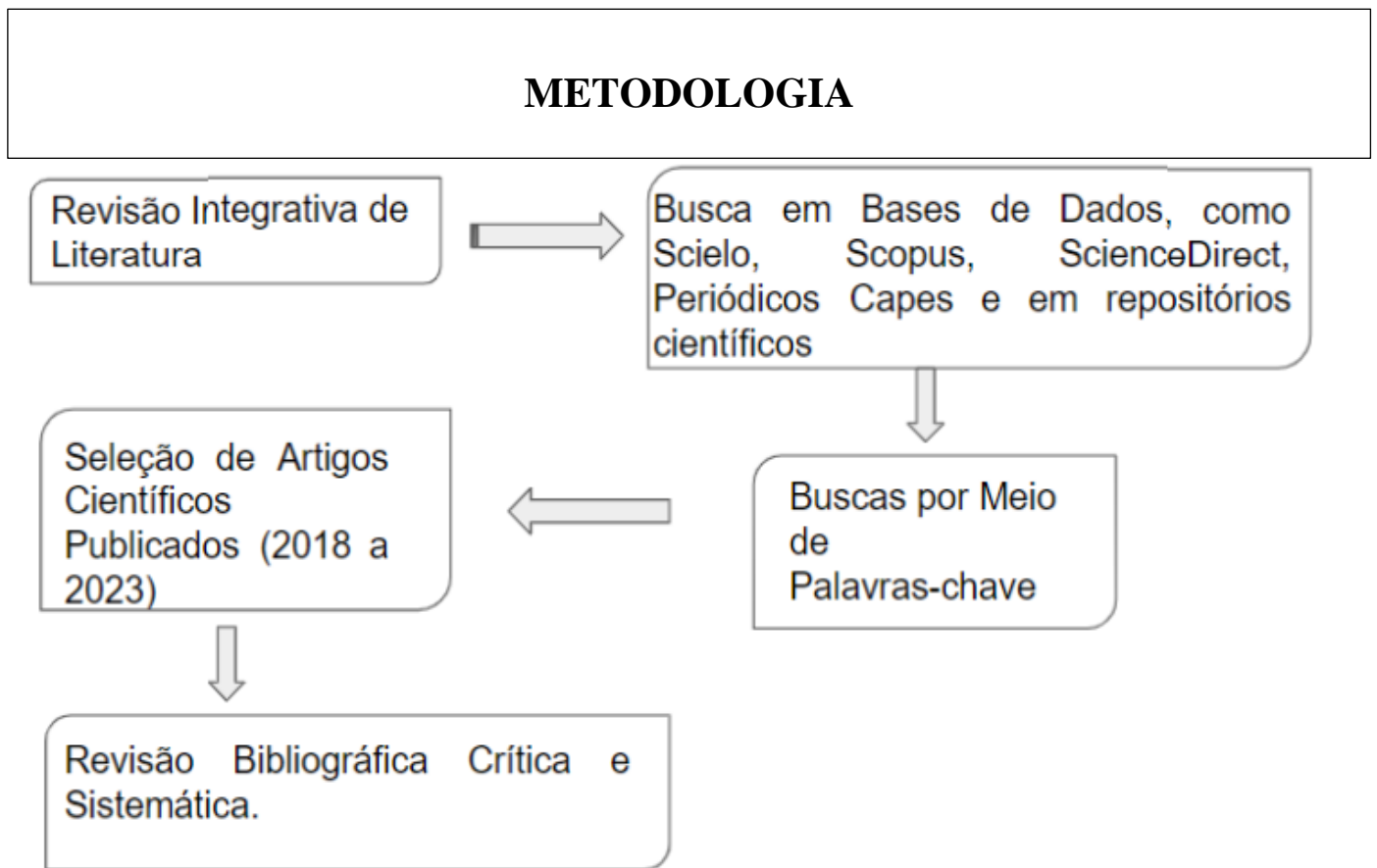
3. METODOLOGIA

Uma revisão integrativa de literatura foi realizada, por meio de buscas em documentos técnicos científicos disponíveis em bases de dados como Scielo, Scopus, ScienceDirect, Periódicos Capes e em repositórios científicos. A busca dos documentos nas bases de dados foi realizada por meio dos seguintes descritores: tecnologias fotovoltaicas, energia fotovoltaica, módulos fotovoltaicos, *dye-sensitized solar cell*, *heterojunction solar cell* e *multijunction solar cell*. A revisão foi realizada por meio de artigos científicos publicados de 2018 a 2023. A escolha das bases de dados mencionadas se deu em função da reputação e relevância destes no campo de energia solar e ciência dos materiais; são renomadas internacionalmente e apresentam alto fator de impacto, o que indica que os artigos publicados nessas revistas são amplamente reconhecidos e citados na comunidade científica.

Além disso, tais bases de dados possuem um rigoroso processo de revisão por pares, garantindo a qualidade e validade dos artigos publicados. Dessa forma, a escolha dessas fontes de pesquisa contribui para assegurar a confiabilidade dos resultados apresentados na monografia. Ademais, a seleção de fontes especializadas em energia solar e ciência dos materiais permitiu que a busca por artigos científicos fosse direcionada e focada, aumentando a probabilidade de encontrar trabalhos relevantes e atualizados na área de interesse. Portanto, a escolha contribui para uma metodologia de pesquisa mais eficiente e confiável na produção da monografia.

O objetivo principal desta busca foi não apenas encontrar novos materiais utilizados na preparação de dispositivos que atuem como células solares, mas também identificar aspectos científicos relevantes que contextualizem o leitor em relação ao tema específico a ser discutido. Através dessa metodologia, foi desenvolvida uma revisão bibliográfica crítica e sistemática, que permitiu atualizar o leitor sobre os novos materiais utilizados no planejamento e preparação de dispositivos que atuam de forma eficiente como células solares. Dessa forma, a monografia apresentará informações relevantes e atualizadas sobre o tema, contribuindo para o avanço do conhecimento na área de energia solar. A Figura 3 ilustra a metodologia através de um fluxograma.

Figura 3. Fluxograma de ilustração da metodologia proposta.

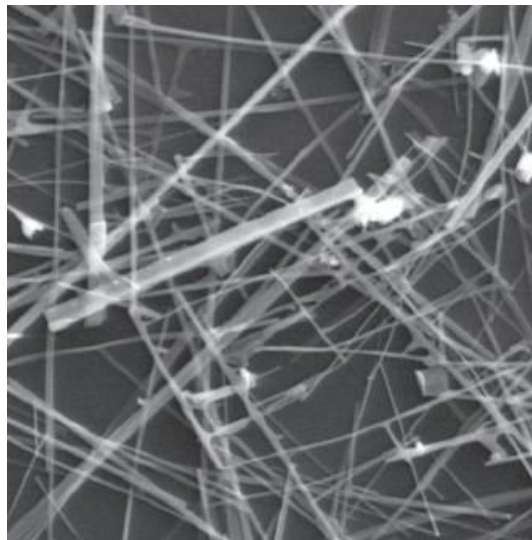


4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção, serão abordados alguns conceitos preliminares com o objetivo de contribuir para um melhor entendimento do trabalho aqui desenvolvido. São eles:

Nanofitas: São estruturas moleculares estreitas e compridas cujas dimensões espaciais encontram-se em escala nanométrica. Para efeitos de ilustração, a Figura 4 apresenta uma micrografia de nanofitas de óxido de estanho (ORLANDI *et al.*, 2004) obtida por microscopia eletrônica de varredura.

Figura 4: Microscopia de nanofitas de óxido de estanho.



Fonte: ORLANDI *et al.*, 2004.

Um exemplo notável dessas nanofitas são as de grafeno, que consistem em várias camadas de grafeno dispostas em formato de fitas longas e estreitas. Esses materiais têm sido extensivamente estudados para explorar e controlar suas propriedades por meio de diversas abordagens, como a dopagem, na qual átomos de elementos "estrangeiros" são introduzidos na rede de carbono que forma o grafeno (ORLANDI *et al.*, 2004).

Uma característica crucial dessas nanofitas é a sua largura reduzida, que resulta em efeitos de confinamento quântico ao longo dessa dimensão. Esses efeitos têm potencial para induzir a abertura de uma lacuna, também conhecida como "*gap*", na estrutura eletrônica do material. Essa abertura de *gap* tem implicações significativas para as propriedades eletrônicas das nanofitas de grafeno e é objeto de estudo e investigação intensivos (ORTIZ-MEDINA, 2013).

Performance fotovoltaica: É uma medida de cunho físico que permite a comparação entre o desempenho de diferentes dispositivos fotovoltaicos. Um artigo de revisão sobre

performance fotovoltaica de células solares orgânicas e inorgânicas foi realizado de forma extremamente detalhada por Ajayan e colaboradores (AJAYAN *et al.*, 2020).

A eficiência de uma célula solar é determinada por diversos parâmetros técnicos. Comumente, esses parâmetros elétricos são apresentados sob condições padrão (STC - Standard Test Conditions), que consistem em uma temperatura de célula de 25°C, uma irradiância de 1000 W/m² e um espectro de massa de ar de 1,5. Existem vários indicadores fundamentais para avaliar a performance fotovoltaica de uma célula solar, entre eles: disponibilidade, entrega de energia, desempenho de energia, rendimento final e taxa de desempenho. A disponibilidade se refere à capacidade da célula solar de estar operacional e produzir energia durante determinado período de tempo. A entrega de energia é a quantidade total de energia fornecida pela célula solar em condições reais de funcionamento. O desempenho de energia mede a capacidade da célula solar de converter a energia solar recebida em energia elétrica utilizável (SOLAR BRASIL, 2018).

Outros parâmetros que podem interferir na eficiência de uma célula fotovoltaica são:

- **Eficiência de conversão:** A eficiência de conversão é a medida de quanto da energia da luz solar incidente é convertida em eletricidade. É geralmente expressa como uma porcentagem e pode variar de acordo com o tipo de célula solar utilizada.
- **Irradiação solar:** A quantidade de radiação solar incidente no painel fotovoltaico afeta diretamente sua produção de energia. Quanto maior a irradiação solar, maior será a produção de energia do sistema fotovoltaico.
- **Ângulo e orientação do painel:** O ângulo de inclinação e a orientação do painel solar em relação ao sol afetam a quantidade de radiação solar captada pelo sistema. Um ângulo e uma orientação adequados podem maximizar a quantidade de luz solar captada e, conseqüentemente, a produção de energia.
- **Sombreamento:** O sombreamento de uma ou mais células solares em um painel pode reduzir significativamente o desempenho do sistema fotovoltaico. É importante minimizar qualquer sombreamento, seja causado por objetos adjacentes, como árvores ou edifícios, ou pela própria estrutura do sistema.
- **Temperatura:** A temperatura ambiente afeta a eficiência das células solares. Normalmente, a eficiência diminui à medida que a temperatura aumenta. Portanto, é importante considerar a dissipação de calor adequada e garantir uma boa ventilação para o sistema fotovoltaico.
- **Perdas elétricas:** Existem várias perdas elétricas associadas a um sistema fotovoltaico, como perdas por resistência dos cabos, perdas por efeito Joule, perdas nos conversores

de energia, entre outras. Minimizar essas perdas é importante para garantir um desempenho eficiente do sistema.

- Sujeira e poeira: O acúmulo de sujeira, poeira ou outros detritos nos painéis solares pode reduzir sua eficiência. É necessário limpar regularmente os painéis para garantir a máxima captação de luz solar (SOLAR BRASIL, 2018; AJAYAN *et al.*, 2020).

Um dos principais parâmetros que compõem a performance fotovoltaica é a eficiência de conversão. Essa medida indica a porcentagem da energia solar incidente que é convertida em eletricidade. A eficiência dos painéis solares pode variar dependendo do tipo de tecnologia utilizada, como células de silício cristalino, células de filme fino ou células orgânicas. Avanços tecnológicos têm sido feitos para melhorar a eficiência das células solares e aumentar a quantidade de energia elétrica gerada a partir da mesma quantidade de luz solar (SOLAR BRASIL, 2018; AJAYAN *et al.*, 2020).

Outro fator determinante é a irradiação solar. Regiões com maior exposição solar, como áreas tropicais, tendem a apresentar maior potencial de geração fotovoltaica. Além disso, o ângulo de inclinação e a orientação dos painéis solares em relação ao sol são cruciais para maximizar a quantidade de luz solar captada. O dimensionamento adequado do ângulo de inclinação e a orientação correta dos painéis podem garantir um aproveitamento máximo da radiação solar incidente (SOLAR BRASIL, 2018; AJAYAN *et al.*, 2020).

O sombreamento também desempenha um papel significativo na performance fotovoltaica. Mesmo uma pequena área sombreada em um painel solar pode reduzir drasticamente sua eficiência. Sombreamento pode ser causado por edifícios, árvores ou outros obstáculos próximos ao sistema fotovoltaico. É essencial realizar uma análise cuidadosa e evitar qualquer obstrução que possa prejudicar a captação de luz solar (SOLAR BRASIL, 2018; AJAYAN *et al.*, 2020).

A temperatura ambiente também influencia a eficiência das células solares. Geralmente, à medida que a temperatura aumenta, a eficiência diminui. Isso ocorre porque as células solares podem aquecer durante a operação, resultando em perdas de desempenho. Estratégias de resfriamento, como ventilação adequada e dissipação de calor eficiente, são necessárias para minimizar essas perdas e otimizar a performance fotovoltaica (SOLAR BRASIL, 2018; AJAYAN *et al.*, 2020).

O rendimento final é uma métrica importante, pois indica a eficiência geral da célula solar ao longo de um período específico, levando em conta fatores como condições climáticas, orientação e inclinação do painel solar. Já a taxa de desempenho é calculada comparando o desempenho real da célula solar com o desempenho esperado sob as condições padrão,

oferecendo uma medida de sua eficiência em condições reais de operação. Esses indicadores são essenciais para avaliar a performance e o potencial de geração de energia de uma célula solar, permitindo uma análise abrangente e precisa de seu desempenho ao longo do tempo (PORTAL ENERGIA, 2023).

VOC: Uma grandeza essencial para conhecer sobre a performance fotovoltaica de uma célula solar é a "VOC" ou Tensão de Circuito Aberto, abreviação de *Open-Circuit Voltage* em inglês, referindo-se à voltagem presente em um componente ou fonte de energia quando nenhum circuito está conectado a ele. Em outras palavras, é a voltagem medida em uma carga ou dispositivo quando não há corrente elétrica fluindo através dele, ou quando o circuito está aberto, ou seja, não está fechado ou não está conectado a uma carga elétrica. Pode indicar também a voltagem presente em um circuito elétrico quando nenhuma carga ou dispositivo está conectado a ele. É a voltagem medida entre dois pontos do circuito quando não há corrente fluindo entre esses pontos, o que acontece quando o circuito está aberto, ou seja, não está conectado a uma carga elétrica (ROSA, TOLEDO, 2021).

No contexto de células solares, a VOC é um parâmetro fundamental que descreve o comportamento elétrico de uma célula fotovoltaica. Ela representa a voltagem máxima que uma célula solar pode fornecer quando não há carga conectada a ela. Em outras palavras, é a voltagem que a célula solar produz quando está operando em condições de circuito aberto, ou seja, sem qualquer carga externa conectada aos seus terminais. Nesse estado, a corrente elétrica é igual a zero, e a célula atinge sua voltagem máxima (ROSA, TOLEDO, 2021).

A Tensão de Circuito Aberto é um parâmetro importante para caracterizar a eficiência e o desempenho de uma célula solar, uma vez que indica o potencial de tensão disponível a ser aplicado a uma carga elétrica quando a célula está operando sob a iluminação solar. Conhecer a VOC é essencial para projetar e dimensionar sistemas fotovoltaicos, como painéis solares, para garantir que a voltagem gerada seja adequada para atender às necessidades de energia dos dispositivos e aplicações (ROSA, TOLEDO, 2021).

PCE: PCE é a abreviação de "Eficiência de Conversão de Energia" (em inglês, *Power Conversion Efficiency*). É uma medida fundamental utilizada para avaliar o desempenho de dispositivos fotovoltaicos, como células solares, e sua capacidade de converter a energia da luz solar em energia elétrica utilizável. A Eficiência de Conversão de Energia (PCE) é expressa como uma porcentagem e representa a fração da energia luminosa incidente na célula solar que é convertida em energia elétrica. Quanto maior a PCE, mais eficiente é a célula solar na conversão de luz solar em eletricidade (ROSA, TOLEDO, 2021).

A PCE é calculada usando a seguinte equação:

$$PCE = \frac{P_{out}}{P_{in}} * 100, \quad (1)$$

onde:

- PCE é a Eficiência de Conversão de Energia (em porcentagem).
- Pout é a potência elétrica de saída do dispositivo (ou seja, a energia elétrica gerada pela célula solar).
- Pin é a potência de entrada do dispositivo (ou seja, a energia luminosa incidente na célula solar).

A PCE é uma das principais métricas usadas para avaliar a viabilidade e o desempenho de células solares em aplicações práticas. Os avanços na tecnologia das células solares visam constantemente melhorar a eficiência de conversão para tornar a energia solar mais econômica e competitiva em relação às fontes de energia tradicionais (ROSA, TOLEDO, 2021).

JSC: JSC é a abreviação de "Densidade de Corrente de Curto Circuito" (em inglês, *Short-Circuit Current Density*). É um parâmetro importante utilizado em células solares e dispositivos fotovoltaicos para caracterizar o desempenho e a capacidade de geração de corrente elétrica sob condições de curto-circuito. A Densidade de Corrente de Curto Circuito (JSC) representa a corrente elétrica máxima que uma célula solar pode gerar quando os seus terminais são curto-circuitados, ou seja, quando não há uma carga externa conectada à célula e a tensão é zero. Nesse estado, a corrente elétrica atinge seu valor máximo possível, uma vez que não há resistência externa limitando o fluxo de elétrons (ROSA, TOLEDO, 2021).

A Densidade de Corrente de Curto Circuito é um parâmetro crítico para a caracterização da eficiência de uma célula solar, pois indica a quantidade máxima de corrente que pode ser fornecida para uma carga quando a célula está exposta à luz solar. Juntamente com a Tensão de Circuito Aberto (VOC) e a Eficiência de Conversão, a JSC é usada para avaliar e comparar diferentes tecnologias de células solares e para o projeto de sistemas fotovoltaicos (ROSA, TOLEDO, 2021).

IMP e VMP: IMP (Corrente no Ponto de Máxima Potência) e VMP (Tensão no Ponto de Máxima Potência) são parâmetros fundamentais em dispositivos fotovoltaicos, como células solares e módulos fotovoltaicos. Eles representam os valores de corrente elétrica e tensão em que o dispositivo atinge a maior potência de saída sob determinadas condições de iluminação. O ponto de máxima potência é um ponto crítico da curva característica de potência do dispositivo, que mostra a relação entre a tensão e a corrente elétrica geradas em diferentes níveis de iluminação. No ponto de máxima potência, a combinação ideal de tensão e corrente é alcançada para maximizar a potência de saída do dispositivo sob a luz solar específica. É crucial

otimizar o projeto e a operação de sistemas fotovoltaicos para operar próximo ao ponto de máxima potência, pois isso permite aproveitar ao máximo a energia solar disponível e melhorar a eficiência geral do sistema (ROSA, TOLEDO, 2021).

FF: O fator de forma, também conhecido como fator de preenchimento (FF), é um parâmetro utilizado para caracterizar a eficiência de um dispositivo fotovoltaico, como uma célula solar, ou um módulo fotovoltaico. O fator de forma é calculado dividindo a área da curva característica de potência elétrica pelo retângulo equivalente formado pela multiplicação da corrente de curto-circuito (JSC) pela tensão de circuito aberto (VOC). Em outras palavras, é a relação entre a área abaixo da curva de potência elétrica gerada pelo dispositivo e a área de um retângulo com lados iguais a JSC e VOC (ROSA, TOLEDO, 2021).

A equação para calcular o fator de forma é a seguinte:

$$FF = \frac{JSC * VOC}{I_{mp} * V_{mp}}, \quad (2)$$

onde:

- FF é o fator de forma.
- JSC é a corrente de curto-circuito.
- VOC é a tensão de circuito aberto.
- I_{mp} é a corrente no ponto de máxima potência.
- V_{mp} é a tensão no ponto de máxima potência.

O fator de forma é uma medida importante da qualidade de um dispositivo fotovoltaico, pois indica o quão próximo a sua curva característica se assemelha à forma de um retângulo, representando uma melhor eficiência de conversão de energia solar em eletricidade. Em geral, valores mais próximos de 1 indicam um melhor desempenho do dispositivo, enquanto valores mais baixos podem sugerir perdas de eficiência ou resistências internas significativas (ROSA, TOLEDO, 2021).

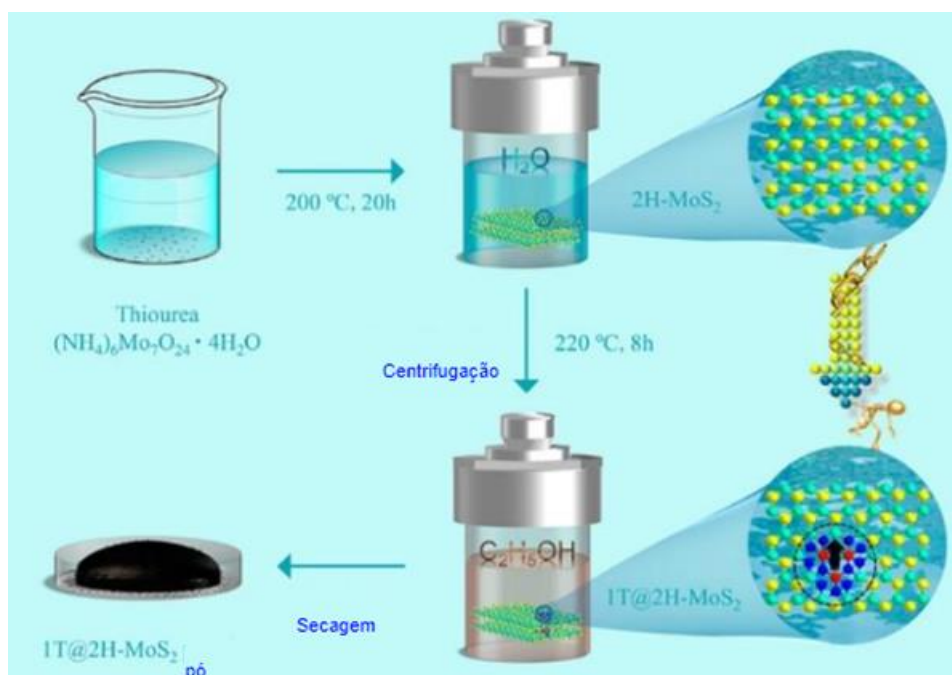
Fotoexcitado: É um estado energético que dada estrutura química admite ao ter elétrons situados em orbitais de maior energia devido à absorção fotônica pela mesma estrutura. Equivalente pode-se dizer que tal estrutura se encontra em um estado excitado devido à incidência de fótons. Isso ocorre pois, ao absorver a energia correspondente a um fóton, um elétron situado distante do núcleo passa para um orbital de maior energia.

A fotoexcitação é um processo pelo qual um átomo absorve energia, levando a um salto de seu elétron para um nível de energia mais elevado, seguido pelo retorno desse elétron ao seu nível original, resultando na emissão de energia. Quando uma molécula é exposta à luz com o comprimento de onda apropriado, há uma alta probabilidade de que pelo menos um fóton

seja absorvido, resultando na promoção de um elétron para o primeiro estado eletronicamente excitado. Isso cria um estado eletrônico fotoexcitado na molécula (PUGNAL, 2021).

Método Hidrotermal: É uma metodologia sintética bastante empregada na preparação de compostos de coordenação ou sistemas nanométricos. Esta reação química envolve água e ocorre sob pressão, em tudo selado. É importante destacar que metodologias de síntese hidrotermais tem ganho popularidade devido às diversas vantagens que estas proporcionam ao operador, como, por exemplo, redução de aglomeração de nanopartículas, redução do tamanho de partículas, controle de morfologia, procedimentos experimentais simples e possível uso de baixas temperaturas (WANG, Y. *et al.*, 2020). A Figura 5 ilustra, de forma esquemática, um procedimento experimental relacionado à síntese do tipo hidrotermal.

Figura 5: Procedimento de síntese hidrotermal.



Fonte: YAO, Y. *et al.*, 2019.

O método hidrotermal é um processo que envolve a utilização de uma solução sujeita a variações de pressão e temperatura, o que resulta em alterações nas reações químicas. Esse método é amplamente empregado em diversas indústrias e geralmente requer um tempo de aproximadamente 24 horas. Uma das aplicações desse método é a síntese de materiais cerâmicos, como os molibdatos de terras raras (INOVAÇÃO UFSCAR, 2019).

Uma abordagem adicional para o método hidrotermal é o aquecimento por micro-ondas, que proporciona uma distribuição uniforme de temperatura dentro do sistema. Isso contribui para a formação de um material mais cristalino, com propriedades aprimoradas. Essa técnica de aquecimento é capaz de otimizar o processo hidrotermal, resultando em um produto

final com características superiores (INOVAÇÃO UFSCAR, 2019).

Dye-sensitized solar cell: Células solares sensibilizadas por corante, conhecidas como dye-sensitized solar cells (DSSCs), são dispositivos fotovoltaicos que convertem a luz solar em eletricidade. Essas células são uma alternativa às células solares tradicionais de silício, apresentando vantagens em termos de custo, eficiência e facilidade de fabricação. A estrutura básica de uma DSSC é composta por várias camadas. A camada ativa é composta por um eletrólito contendo corante sensibilizador, que é responsável por absorver a luz solar e converter a energia luminosa em energia elétrica. O corante sensibilizador é geralmente um composto orgânico que pode absorver uma ampla gama de comprimentos de onda da luz visível. Quando a luz solar atinge o corante sensibilizador, os elétrons são excitados, liberando energia. Esses elétrons excitados são coletados pelos eletrodos da célula, gerando uma corrente elétrica. O eletrólito na célula desempenha um papel crucial, permitindo que os elétrons se movam através do dispositivo e fechem o circuito, produzindo eletricidade.

Aplicações das células solares sensibilizadas por corante:

- Energia renovável: DSSCs são usadas para gerar eletricidade a partir da luz solar, tornando-se uma fonte de energia renovável que contribui para reduzir a dependência de combustíveis fósseis.
- Eletrônica portátil: As células solares sensibilizadas por corante são leves, flexíveis e transparentes, tornando-as adequadas para serem integradas em dispositivos eletrônicos portáteis, como smartphones, tablets e relógios.
- Aplicações em ambientes remotos: Devido à sua facilidade de implantação e custo relativamente baixo, DSSCs têm sido usadas em áreas remotas ou rurais para fornecer energia a dispositivos como bombas de água, luzes e sistemas de monitoramento.
- Arquitetura sustentável: DSSCs podem ser incorporadas em materiais de construção, como vidros e painéis translúcidos, para capturar a luz solar e gerar eletricidade em edifícios, contribuindo para a eficiência energética e sustentabilidade.
- Carregadores solares: DSSCs podem ser utilizadas para fabricar carregadores solares portáteis que permitem recarregar dispositivos eletrônicos usando a luz solar.
- Eletrônica vestível: Devido à sua flexibilidade, DSSCs são adequadas para serem integradas em tecidos, permitindo a criação de roupas e acessórios que podem gerar eletricidade a partir da luz solar.

É importante notar que, embora as DSSCs tenham diversas aplicações promissoras, ainda enfrentam desafios em relação à sua eficiência em comparação com as células solares de silício (KOKKONEN, 2021).

Multijunção: Células solares de múltiplas junções, também conhecidas como células solares multijunção ou células solares empilhadas, são dispositivos fotovoltaicos avançados que consistem em várias camadas de materiais semicondutores empilhados em cima uns dos outros. Cada camada é projetada para absorver diferentes comprimentos de onda da luz solar, permitindo que a célula solar converta eficientemente uma ampla gama de espectro solar em eletricidade. As células solares de múltiplas junções foram desenvolvidas para superar algumas das limitações das células solares tradicionais de silício, que têm uma faixa de absorção limitada e, portanto, são menos eficientes na conversão de luz solar em eletricidade. Ao empilhar várias camadas de materiais semicondutores com diferentes bandas de absorção, as células solares de múltiplas junções podem aproveitar melhor a energia disponível no espectro solar (BAIJU, YAREMA, 2022).

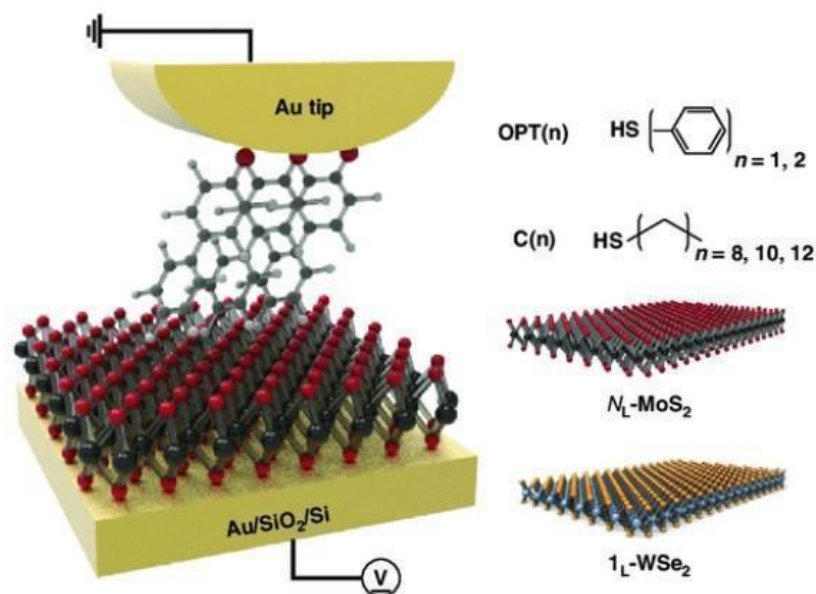
Aqui estão algumas características e aplicações importantes das células solares de múltiplas junções:

- **Eficiência:** As células solares de múltiplas junções geralmente têm uma eficiência significativamente maior em comparação com as células solares tradicionais de silício. Isso ocorre porque diferentes camadas absorvem diferentes comprimentos de onda da luz solar, permitindo que a célula converta mais eficientemente a luz em eletricidade.
- **Aplicações espaciais:** Devido à sua alta eficiência, as células solares de múltiplas junções são amplamente utilizadas em aplicações espaciais, como satélites e sondas espaciais. Nessas missões, a eficiência é crucial, pois permite que os dispositivos gerem mais energia com menos área de coleta.
- **Concentradores solares:** As células solares de múltiplas junções também são empregadas em sistemas de concentração solar, nos quais a luz solar é direcionada por meio de espelhos ou lentes para incidir diretamente nas células, aumentando a intensidade da luz que atinge a superfície da célula e, consequentemente, a geração de eletricidade.
- **Alta intensidade de luz:** Essas células têm um bom desempenho em condições de alta intensidade de luz, como em regiões com altos níveis de radiação solar ou em condições de concentração solar.
- **Custo:** Embora as células solares de múltiplas junções sejam altamente

eficientes, sua fabricação pode ser complexa e mais cara do que as células solares de silício. Como resultado, elas tendem a ser mais comuns em aplicações especializadas, onde a alta eficiência compensa o custo adicional (BAIJU, YAREMA, 2022).

Heterojunção: É usualmente uma junção Semicondutor - Semicondutor, em que ambos são diferentes, também em suas características e não apenas na dopagem. Uma junção Metal - Semicondutor também é chamada de heterojunção. Uma heterojunção é uma interface entre dois materiais semicondutores com diferentes propriedades eletrônicas. Esses materiais podem ser diferentes tipos de semicondutores (por exemplo, um semicondutor tipo n e um semicondutor tipo p) ou semicondutores com diferentes larguras de banda proibida. A heterojunção pode ser criada colocando duas camadas diferentes de semicondutores cristalinos em conjunto ou colocando-as em camadas com bandgaps alternativos ou diferentes. A heterojunção é importante em dispositivos eletrônicos e optoeletrônicos, como diodos emissores de luz (LEDs), células solares e transistores de efeito de campo de alta mobilidade eletrônica (HEMTs) (SHIN *et al*, 2020).

Figura 6: Exemplo de heterojunção.

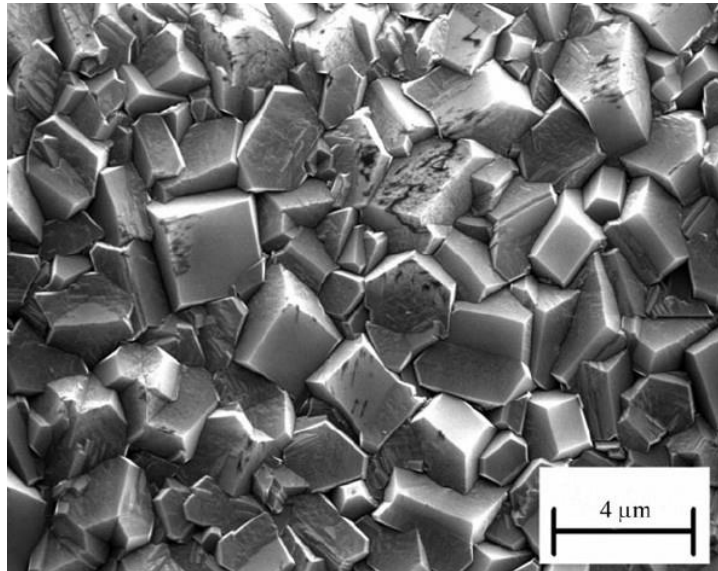


Fonte: SHIN *et al.*, 2020.

Estudo Morfológico: Do ponto de vista químico, é o levantamento de dados referentes a uma determinada estrutura química em nível de superfície através de diversas análises físicas e espectroscópicas como, por exemplo, cristalografia de raio-X e microscopia eletrônica de

varredura (BEHMSEM *et al.*, 2023).

Figura 7: Imagem em microscópio eletrônico de varredura da superfície de crescimento do diamante de 4,2 μm de espessura, depositada sobre o substrato de silício.



Fonte: (SEDOV *et al.*, 2011).

Selenização: É uma reação de funcionalização cujo átomo introduzido na estrutura química corresponde ao átomo de selênio (BREE *et al.*, 2018). A selenização é um processo que envolve a incorporação de selênio em um filme através de absorção seguida de difusão. Um exemplo desse processo é encontrado na fabricação de células solares de filme fino de CIGS (Cobre-Índio-Gálio-Selênio). Nesse caso, a selenização ocorre em uma mistura diluída de seleneto de dietil em nitrogênio, em um forno convencional a uma temperatura de 500°C. Isso resulta na formação de uma camada semicondutora tipo p de $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ sobre o substrato de molibdênio (Mo) (LIMA *et al.*, 2018).

Células solares de filmes finos: São células construídas através do depósito de uma ou mais camadas fina ou filme fino (TF) de material fotovoltaico sobre um substrato, como vidro, plástico ou metal. A espessura do filme varia de alguns nanômetros (nm) a dezenas de micrômetros (μm). As células solares de filme fino representam uma segunda geração de células solares. Essas células são fabricadas depositando uma ou mais camadas finas, conhecidas como filme fino (TF), de materiais fotovoltaicos sobre um substrato, que pode ser vidro, plástico ou metal. A espessura do filme varia de alguns nanômetros (nm) a várias dezenas de micrômetros (μm). Comparadas às células solares convencionais de silício cristalino (c-Si) de primeira geração, que utilizam wafers com espessuras de até 200 μm , as células de filme fino são notavelmente mais finas (ENERGIA SOLAR).

Essa característica de espessura reduzida permite que as células solares de filme fino

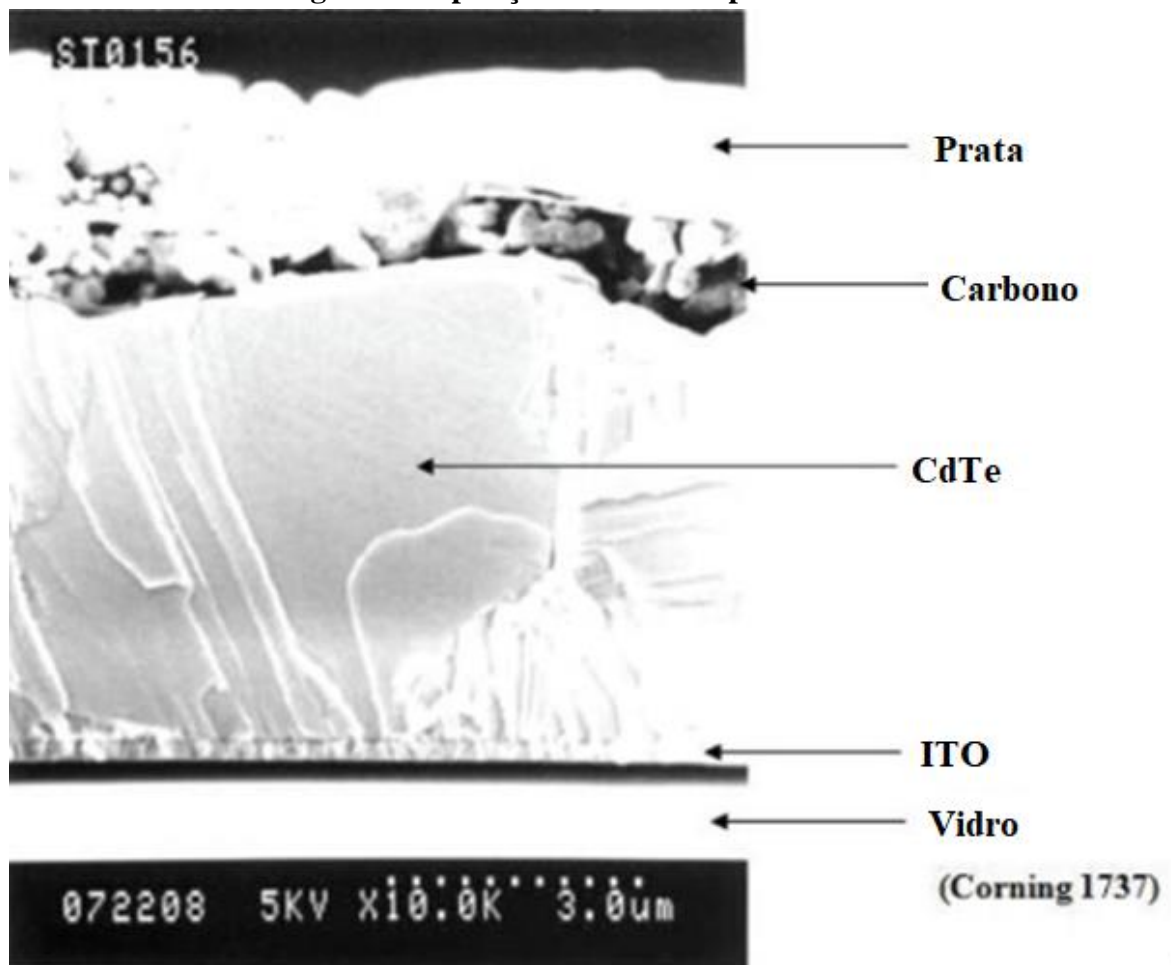
sejam flexíveis e mais leves em comparação com as células c-Si convencionais. Sua flexibilidade abre possibilidades de aplicação em diversos contextos, como integração em dispositivos portáteis, aplicações em materiais flexíveis e até mesmo em superfícies curvas. Além disso, a leveza das células de filme fino contribui para uma instalação mais simples e eficiente, além de facilitar o transporte e o manuseio dos painéis solares (ENERGIA SOLAR).

Os filmes ultrafinos são camadas extremamente delgadas de materiais, cuja espessura varia de alguns nanômetros (nm) a algumas dezenas de micrômetros (μm). Essas camadas podem ser compostas por diferentes materiais, como polímeros, metais e semicondutores. Os filmes ultrafinos desempenham um papel fundamental em diversas aplicações tecnológicas. Um exemplo importante é a sua utilização na fabricação de dispositivos eletrônicos e optoeletrônicos. Esses filmes são empregados para criar componentes essenciais, como transistores de película fina, diodos emissores de luz (LEDs) e células solares de filme fino. Sua espessura reduzida permite um controle mais preciso das propriedades eletrônicas e ópticas dos dispositivos, além de favorecer a miniaturização e a flexibilidade dos componentes (LIMA, 2018).

Além disso, os filmes ultrafinos são empregados na produção de revestimentos protetores, que oferecem uma camada adicional de proteção contra desgaste, corrosão e arranhões em superfícies. Também são utilizados como barreiras contra umidade e oxigênio, impedindo a deterioração de materiais sensíveis. Essas aplicações são particularmente relevantes em setores como embalagens de alimentos, eletrônicos de alta precisão e tecnologias de display. Dessa forma, os filmes ultrafinos desempenham um papel essencial em várias áreas da tecnologia, proporcionando benefícios significativos em termos de desempenho, eficiência e durabilidade dos materiais e dispositivos (LIMA, 2018).

CCS: É uma técnica de deposição de camadas finas cuja abreviação deriva do inglês “*close-spaced-sublimation*” (AMIN, N.; RAHMAN, 2017). Esta técnica pode apresentar várias vantagens ao operador, como baixo custo, alta precisão e grau de organização estrutural a nível molecular e altos rendimentos de deposição. Para efeitos ilustrativos, a Figura 8 apresenta um sistema de filme fino aplicado à construção de células solares de CdTe obtidos por CCS.

Figura 8. Deposição de camadas por CCS.



Fonte: AMIN, N.; RAHMAN, 2017.

5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A introdução de materiais constituídos por metalóides, cátions metálicos ou calcogenetos como sulfetos, selenetos e derivados, foram responsáveis por causar grande impacto no desenvolvimento de novos materiais fotovoltaicos de filme fino, apresentando frequentemente melhor desempenho quando comparados a outros tipos de células solares.

5.1 Células solares de Seleneto de Antimônio - Sb_2Se_3

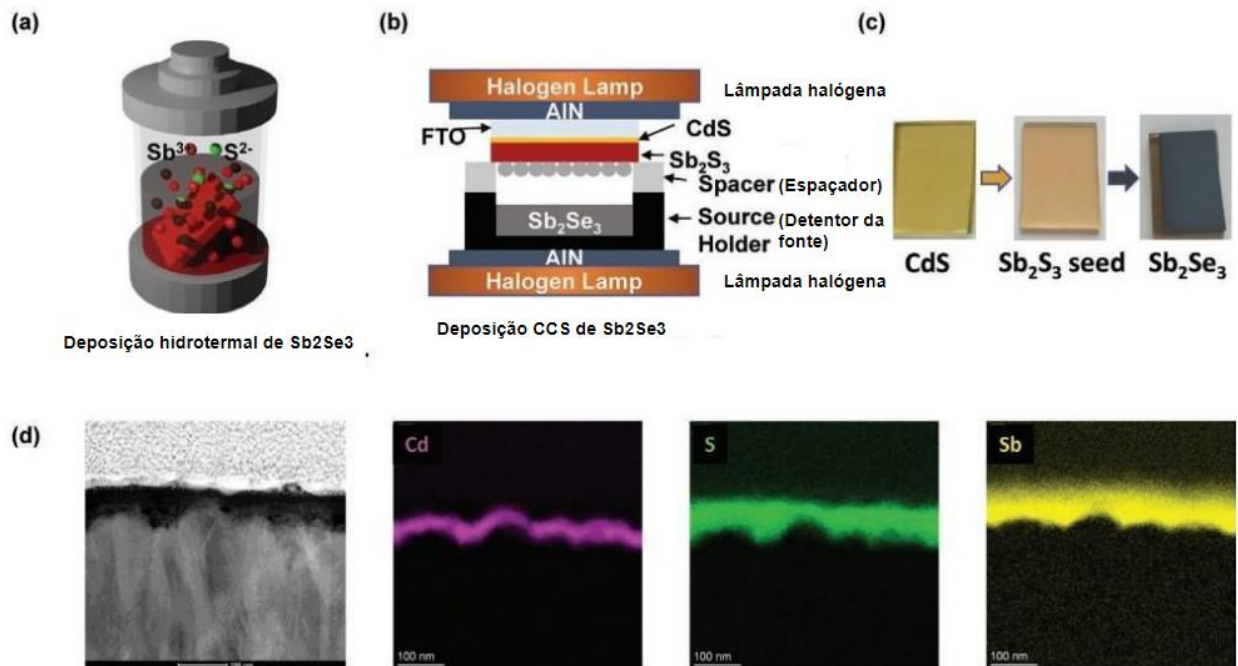
Em particular, as células solares baseadas em Sb_2Se_3 têm se destacado pelo seu desempenho e estabilidade, sendo assim importante o desenvolvimento de materiais contendo esta composição específica. Neste contexto, Singh e colaboradores, em 2023, publicaram um estudo relacionado à investigação de parâmetros importantes no aumento da eficiência através de células solares de estrutura heterogênea baseado em Sb_2Se_3 (SINGH, 2023). Em seu levantamento, os autores verificaram a eficiência de materiais descritos na literatura, constituídos por Sb_2Se_3 com diferentes variações e seus efeitos relacionados como, por exemplo, efeito de selenização, transporte de cargas, defeitos estruturais, alinhamento de banda, efeitos de camadas de semente e outros, através de um compilado de informações levantadas por diversos trabalhos publicados, com o objetivo de evidenciar estratégias que levam ao aumento de eficiência da célula solar constituída por este material.

De todos os materiais apresentados por Singh e colaboradores, o artigo publicado pelo grupo de pesquisa do Al Amin se destacou por apresentar interessante estratégia de aumento de eficiência em células solares compostas pelo sistema de seleneto de antimônio, uma substância química que atua como importante material absolvedor constituinte de células solares de filmes finos (MAVLONOV *et al.*, 2020), em seu trabalho intitulado como “Enhanced Efficiency and Stability in Sb_2S_3 Seed Layer Buffered Sb_2Se_3 Solar Cells” (AMIN, A. *et al.*, 2022). Neste trabalho, os autores apresentaram como ponto de partida a problemática da relação orientação de nanofitas versus performance fotovoltaica, uma vez que é desejável desenvolver as fitas de seleneto de antimônio de maneira normal ao substrato com objetivo de potencializar o transporte do carreamento fotoexcitado, demandando assim por novas metodologias que permitam o crescimento vertical de nanofitas de seleneto de antimônio.

É neste contexto que Amin e seus colaboradores propuseram uma estratégia alternativa no crescimento vertical de Sb_2Se_3 , empregando o método hidrotermal como plataforma sintética de produção de materiais utilizando sulfeto de antimônio de forma auxiliar nestes crescimentos,

propiciando aumento de eficiência na célula solar, com valores iniciais de 5,65% indo até 7,44% (AMIN, A. *et al.*, 2022). Alguns detalhes experimentais deste trabalho podem ser observados de acordo como apresentado na Figura 8.

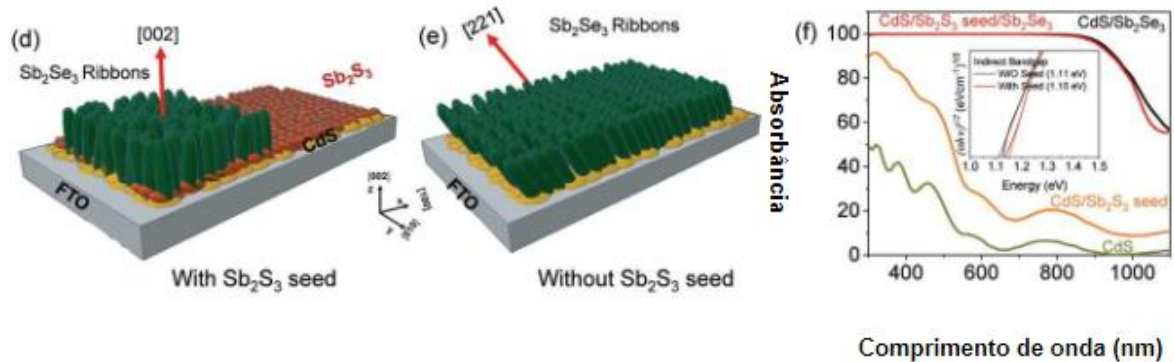
Figura 9: (a) Deposição hidrotermal de Sb_2Se_3 . (b) Deposição CCS de Sb_2Se_3 . (c) Imagens dos filmes preparados. (d) Morfologia e distribuição elemental.



Fonte: AMIN, A. *et al.*, 2022.

De acordo com as Figuras 9a e 9b, esta apresenta de forma esquemática as técnicas de deposição de seleneto de antimônio ultrafino por meios hidrotermais e por CCS, respectivamente. De forma a ilustrar os filmes preparados dos materiais constituídos por CdS, sementes de Sb_2Se_3 e Sb_2Se_3 , a Figura 9c os evidencia com as colorações amarelo, bege e cinza escuro, respectivamente. A distribuição dos elementos na camada Sb_2S_3 foi estudada por microscopia eletrônica de transmissão de varredura por espectroscopia dispersiva de energia de raios-X (S/TEM XEDS) e ao mapeamento de Cd, S e Sb é mostrado na Figura 9d. Os resultados sugeriram que a estrutura da heterojunção CdS/ Sb_2S_3 no substrato de óxido de estanho dopado com flúor (FTO) se apresentou de forma uniforme. Em seguida, Sb_2Se_3 com espessura ≈ 330 nm foi depositado na camada de sementes de Sb_2Se_3 . O referido grupo de pesquisa então estudou a verticalização do crescimento das fitas de Sb_2Se_3 , com e sem (sobre CdS) sementes de Sb_2S_3 , através de análise por XRD e absorvância (Figura 10).

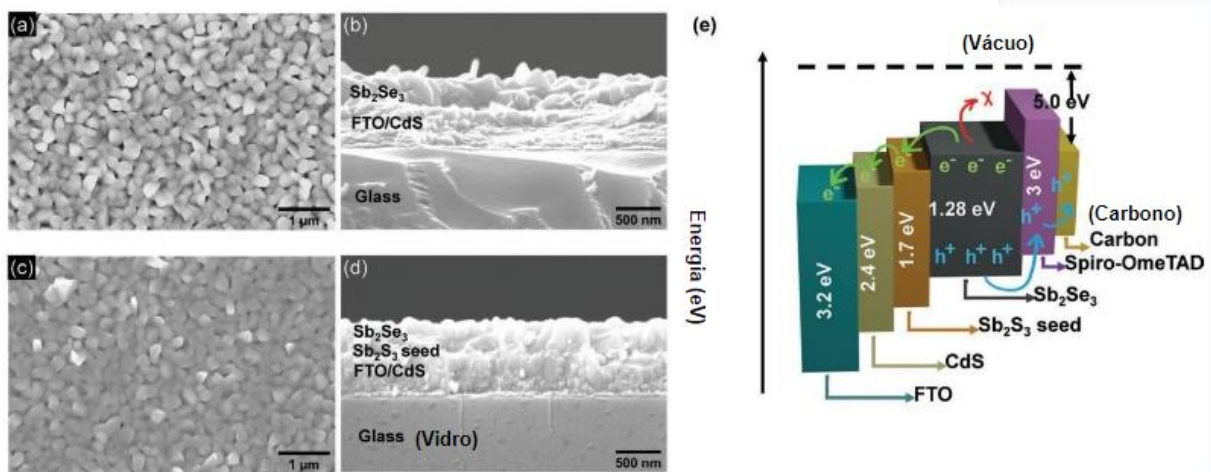
Figura 10: Verticalização do crescimento das fitas de Sb_2Se_3 , com e sem (sobre CdS) sementes de Sb_2S_3 , através de análise por XRD e absorbância.



Fonte: AMIN, A. *et al.*, 2022.

Os autores também realizaram o estudo morfológico das estruturas acima e um esquema referente aos diagramas de bandas do material finalizado, de acordo como ilustra a Figura 11.

Figura 11: Imagens FE-SEM de filme FTO/CdS/ Sb_2Se_3 a,b) sem a camada de semente Sb_2Se_3 , com camada de semente Sb_2Se_3 e (e) Diagrama de bandas do dispositivo finalizado.



Fonte: AMIN, A. *et al.*, 2022.

De forma geral, no campo das células solares baseadas em Sb_2Se_3 , a literatura mostra que apesar de as células solares constituídas por Sb_2Se_3 ainda se encontrarem defasadas em relação a outras células solares de filme fino. As estratégias que visam o aumento de eficiência descritas nos últimos anos, baseadas na utilização de selenetos de antimônio como materiais absolvedores, podem ser empregadas como referência no desenvolvimento de células solares Sb_2Se_3 de alto desempenho. Segundo Singh e colaboradores, a combinação do efeito de

selenização com a otimização de camada, de fato, leva ao aumento da eficiência do material. O uso de Si piramidal tem sido uma chave no aumento da eficiência de Si, sendo a mesma estratégia empregada com a célula solar de filme fino Sb_2Se_3 neste mesmo contexto. A fabricação de dispositivos e a heterojunção adequada, a incompatibilidade de treliça e o alinhamento de banda entre as camadas, são ainda áreas críticas nas quais os pesquisadores devem se concentrar, segundo os autores (SINGH, Y. *et al.*, 2023).

5.2 Células solares de Telureto de Cádmio - CdTe

CdTe é um dos materiais semicondutores mais atraentes disponíveis atualmente como uma camada absorvente na fabricação de células solares com eficiência superior a 21%. Os filmes finos de CdTe têm um alto coeficiente de absorção, baixo custo e largura de banda mais ideal (~ 1.5 eV) quando em comparação com os de silício. Apesar disso, as células solares CdTe mal representam 5% do mercado fotovoltaico global, contribuindo assim para grande desenvolvimento do campo de pesquisa da aplicação de CdTe na preparação de materiais fotovoltaicos nos últimos 20 anos (BARBATO, M. *et al.*, 2021).

Neste ano, Hasami e Sharifat investigaram os efeitos de filmes de óxidos metálicos na performance de células solares baseadas em CdTe no trabalho publicado como “Effect of metal-oxide films on CdTe-based solar cell performance: A numerical simulation of 52.62%-efficient solar cell” (HASANI; SHARIFAT, 2023). Durante estes estudos, os autores realizaram simulações numéricas de células solares baseadas em CdTe empregando um simulador COMSOL. Uma simples junção do tipo p-n composta por CdTe/CdS foi desenhada como referência com eficiência de 17,08%. Diversos óxidos metálicos do tipo n e p foram adicionados a células de referência como transportadores de elétrons (TE) e transportadoras de buracos (TB), visando aumento de performance da célula solar. Como resultado, os autores verificaram indícios de que ao se aplicar camadas de TE cerca de 1.6% no aumento da eficiência pode ser obtido. Adicionalmente, o efeito da espessura de camadas de NiO e V_2O_5 na performance celular também foi investigado. Assim, a eficiência máxima de 52.62% e FF de 89.5% foram alcançados pela célula solar com camada ultrafina de NiO de 10 nm. Além disso, adicionando uma camada V_2O_5 ultrafina com uma espessura de 50 nm para a célula de referência pode aumentar a eficiência da célula e FF de 17,08 para 49,52% e de 50,7 para 87,1%, respectivamente. É importante destacar que o efeito de fatores significativos como a concentração de dopagem de CdTe e HTL, a temperatura do dispositivo, a função de trabalho do contato traseiro do metal, recombinação, concentração de defeito, defeito de interface

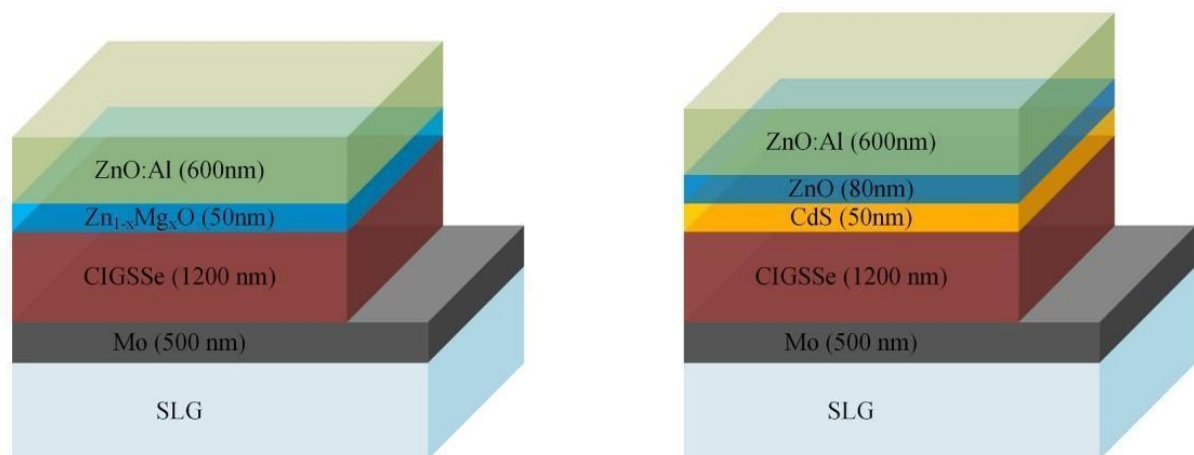
densidade e transferência de calor nas células propostas também foram investigadas pelos autores. Os resultados demonstraram o efeito da adição de óxido metálico à estrutura celular solar à base de CdTe. Além disso, duas camadas ultrafinas de NiO e V₂O₅ HT foram introduzidas para melhorar a capacidade fotovoltaica das células solares. De acordo com as simulações térmicas realizadas pelos autores, houve confirmação da influência do NiO HTL para melhorar o desempenho da célula solar através da redução de perdas de energia. Os resultados introduzem camadas NiO e V₂O₅ econômicas e ultrafinas como uma camada de transporte de buracos para melhoramento do desempenho fotovoltaico das células solares CdTe/CdS (HASANI; SHARIFAT, 2023).

5.3 Células solares de Cobre-Índio-Gálio-Diseleneto - CIGSe

Células solares baseadas em CIGSe (Cobre-Índio-Gálio-Diseleneto) têm sido consideradas como uma das células solares de película fina mais promissoras devido às suas características diversas, como maior eficiência, simplicidade e baixo custo dos processos de produção, excelente durabilidade e estabilidade. Além disso, as células solares do tipo CIGS podem apresentar atraentes propriedades como flexibilidade e leveza (BOUABDELLI *et al.*, 2020). Por outro lado, materiais inorgânicos como ZnMgO têm sido empregados no aumento de performance de células solares (KUMAR; KUMAR, 2022). Atualmente, considera-se que a célula solar do tipo CIGSSe sem CdS e tamponada com Zn_{1-x}MgXO seja uma nova célula solar de estrutura simplificada com grande potencial no campo das células solares, sendo hoje em dia considerado, no campo dos materiais, um gargalo em relação a obtenção de filmes finos de Zn_{1-x}MgXO de alta qualidade. É neste contexto que Tong e colaboradores investigaram a influência da concentração de magnésio no alinhamento de bandas em filmes contendo ZnMgO em uma interface do tipo CIGSSe/Zn_{1-x}MgXO e na performance de células solares CIGSSe (TONG *et al.*, 2022). Neste trabalho, filmes contendo Zn_{1-x}MgXO em diferentes concentrações de magnésio foram preparados por co-sputtering de magnetron, e seus desempenhos físicos de filmes desses mesmos filmes foram investigados. Além disso, as células solares CIGSSe livres de CdS foram preparadas com base em camadas tampão Zn_{1-x}MgXO. Os efeitos da concentração de magnésio em camadas tampão Zn_{1-x}MgXO no desempenho do dispositivo, alinhamento de banda de energia e recombinação de interface de células solares CIGSSe também foram investigados. Segundo os autores, os resultados mostraram que, embora o leve incremento de magnésio reduza a cristalinidade dos filmes de Zn_{1-x}MgXO, atua também no aumento do intervalo de banda, aumentando assim a banda de condução mínima. Em células

solares do tipo CIGSSe livres de CdS tamponadas com $\text{Zn}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}$ pelo processo de pulverização total, a eficiência de conversão fotoelétrica aumenta primeiro e depois diminui com o aumento da concentração de magnésio na faixa entre 0 a 0,3, o que foi atribuído principalmente às mudanças de FF e COV. Paralelamente, a mudança da concentração de magnésio mostrou afetar o alinhamento da banda de energia nas interfaces CIGSSe/ $\text{Zn}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}$. A mais alta eficiência de 15,2% da célula solar do tipo CIGSSe livre de CdS tamponada com $\text{Zn}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}$ com a diferença de banda de energia de 0,270 eV foi obtido neste trabalho (TONG *et al.*, 2022). A Figura 12 apresenta as diferenças estruturais entre o dispositivo desenvolvido neste trabalho e a estrutura convencional de seu análogo tamponado em CdS.

Figura 12: Estruturas de dispositivos de células solares do tipo CIGSSe. A estrutura A é $\text{Zn}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}$ tamponada com células solares CIGSSe livres de CdS. A estrutura B são células solares CIGSSe convencionais tamponadas com CdS.

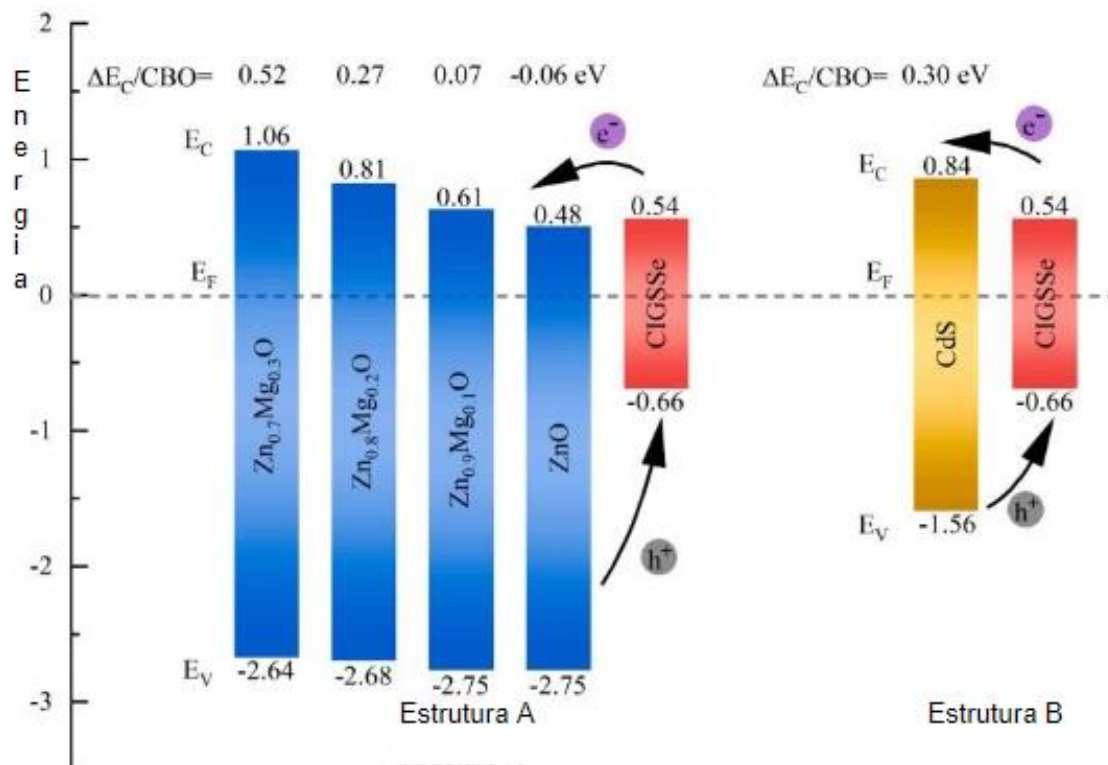


Fonte: (TONG *et al.*, 2022).

Como conclusão, os autores mostraram que, embora o incremento de magnésio reduza a cristalinidade dos filmes de $\text{Zn}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}$, este causa aumento do E_g de 3,23 eV para 3,70 eV com o aumento de x de 0 para 0,3. Este aumento afetou a estrutura da banda com as mudanças de EC e EV onde o EV dos filmes de $\text{Zn}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}$ aumentou ligeiramente em 0,11 eV à medida que x aumenta de 0 para 0,3, enquanto o EC aumentou em 0,58 eV. Por sua vez, em células solares livres de CdS tamponada com $\text{Zn}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}$, o PCE aumenta primeiro e, em seguida, diminui com o aumento x de 0 para 0,3, que foi atribuído pelos autores às mudanças de FF e COV. O incremento de magnésio levou também a um aumento da resistividade dos filmes de $\text{Zn}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}$, afetando o FF resultante. Enquanto isso, a mudança da concentração de magnésio afetou o alinhamento da banda de energia nas interfaces CIGSSe/ $\text{Zn}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}$, o que levou à

mudança da recombinação da interface e, em seguida, afetou o VOC e o JSC (TONG *et al.*, 2022). Por último, os autores investigaram os efeitos do mecanismo da concentração de magnésio em filmes de $\text{Zn}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}$ na recombinação de carreamento nas interfaces $\text{CIGSSe}/\text{Zn}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}$ e através da Figura 13, apresentam o alinhamento da energia de banda nas interfaces $\text{CIGSSe}/\text{Zn}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}$ e CIGSSe/CdS .

Figura 13: Alinhamento de banda de energia nas interfaces $\text{CIGSSe}/\text{Zn}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}$ e CIGSSe/CdS .



Fonte: (TONG *et al.*, 2022).

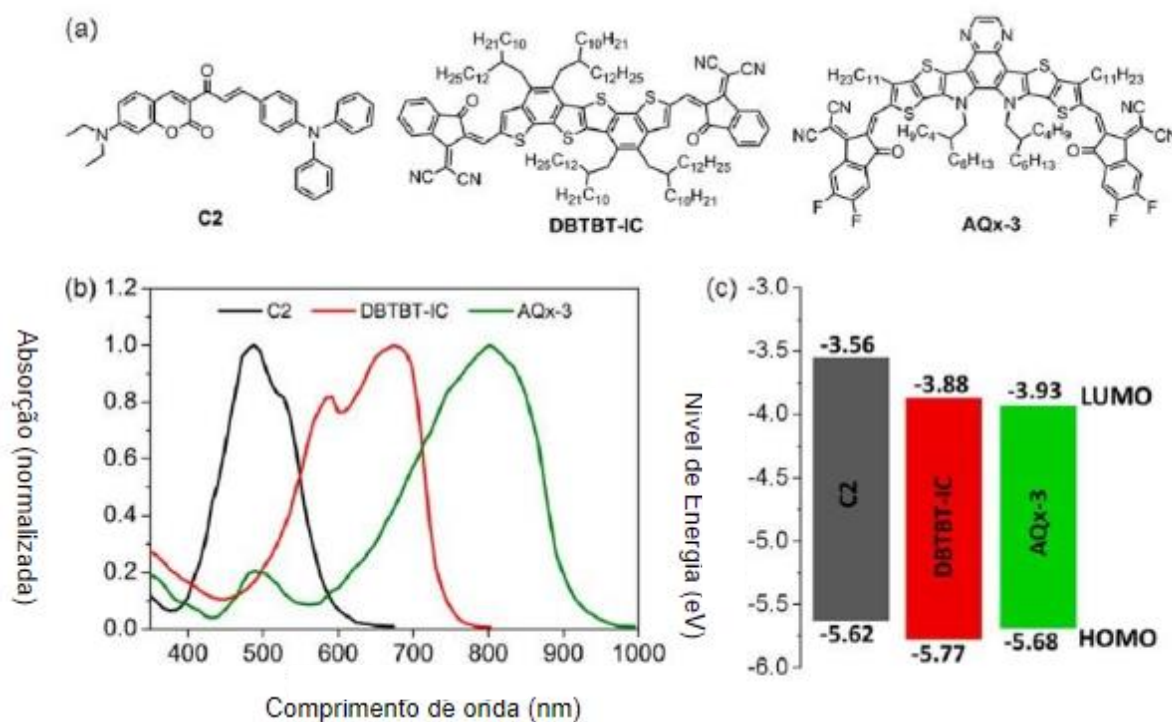
5.4 Células solares CIGS

Makita e colaboradores investigaram o fabrico de uma célula solar de três junções constituídas por fosfeto de índio gálio (InGaP), arseneto de gálio (GaAs) e cobre, índio, gálio e selênio (CIGS) com um design mecânico do tipo empilhado em seu trabalho intitulado como “Mechanical stacked $\text{GaAs}/\text{CuIn}_{1-y}\text{Ga}_y\text{Se}_2$ three- junction solar cells with 30% efficiency via an improved bonding interface and area current-matching technique” (MAKITA, 2022). Neste trabalho os autores desenvolveram um método de empilhamento mecânico empregando nanopartículas de paládio e adesivos de silicone para a interface de colagem, que foi modificado para a tecnologia anterior como sendo uma “pilha inteligente”. Usando esta “pilha inteligente

modificada", Makita e colaboradores demonstraram então uma célula solar de três junções InGaP/Al_{0.06}Ga_{0.94}As//CIGSe com uma eficiência total de 28,06%. Nestes estudos, os pesquisadores fabricaram uma célula solar de três junções dadas por InGaP/GaAs//CIGSe. A eficiência total encontrada foi de 29,3% para a área de abertura (31,0% para a área ativa) sob iluminação do espectro solar AM1.5G, que demonstrou-se como o valor ideal relatado para células solares tandem baseadas em GaAs//CIGSe de dois terminais até agora. Dessa forma, este desempenho considerado como superior foi realizado usando uma célula do tipo CIGSe especializada, com uma superfície achatada através de um processo de gravação úmida e uma fina camada de óxido condutor transparente contendo In₂O₃:Ce,H e. Usando uma técnica de correspondência de corrente de área, a eficiência aumentou consideravelmente para 30%. Além disso, a resistividade de ligação da célula solar fabricada foi estimada em menos de 1 Ω cm² a partir de medições solares concentradas. Esses resultados sugeriram o potencial de células solares baseadas em componentes do tipo III-V//CIGSe, com tecnologia de pilha inteligente modificada como células fotovoltaicas de próxima geração para aplicações como a fotovoltaica integrada a veículos (MAKITA, 2022).

Recentemente, Sharma e colaboradores investigaram uma composição orgânica no aumento da eficiência de células solares através de seu trabalho intitulado como "Fullerene-Free All-Small-Molecule Ternary Organic Solar Cells with Two Compatible Fullerene-Free Acceptors and a Coumarin Donor Enabling a Power Conversion Efficiency of 14.5%" (SHARMA, 2023). Neste trabalho, os autores descreveram a fabricação de OSC binário e ternário usando uma combinação de moléculas orgânicas com aceptores livres de fulereno (Figura 14).

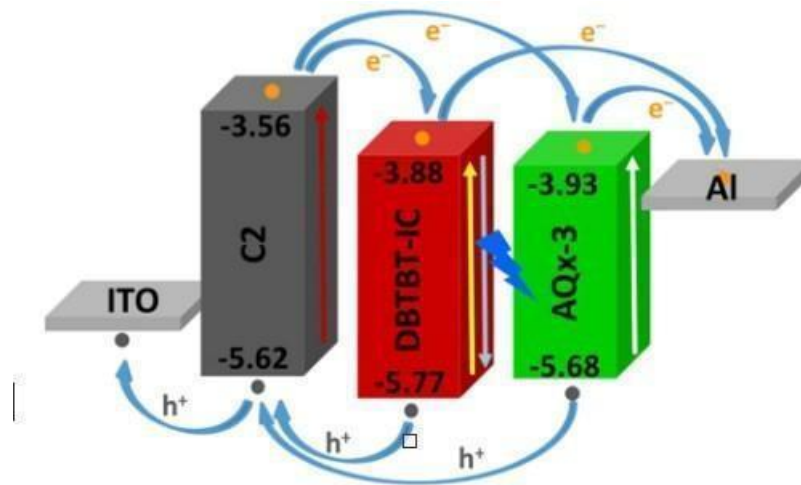
Figura 14: (a) Estrutura química das moléculas. (b) espectros de absorção. (c) Diagrama de energia.



Fonte: SHARMA, 2023.

A maior PCE da OSC ternária pode estar relacionada com o aumento simultâneo da fotocorrente (JSC) e do fator de preenchimento (FF). O aumento no JSC pode estar associado ao aumento da eficiência de captação de luz da mistura ternária, utilização eficiente do éxciton através da transferência de energia de DBTBT-IC para AQx-3, e mais canais para a transferência de carga no OSC ternário. Neste trabalho, eficiência de 14.49% foi alcançada através de um sistema binário, cujo mecanismo de transferência de cargas pode ser entendido detalhadamente como apresentado na Figura 15 (SHARMA, 2023).

Figura 15: Mecanismo de transferência de cargas.



Fonte: SHARMA, 2023.

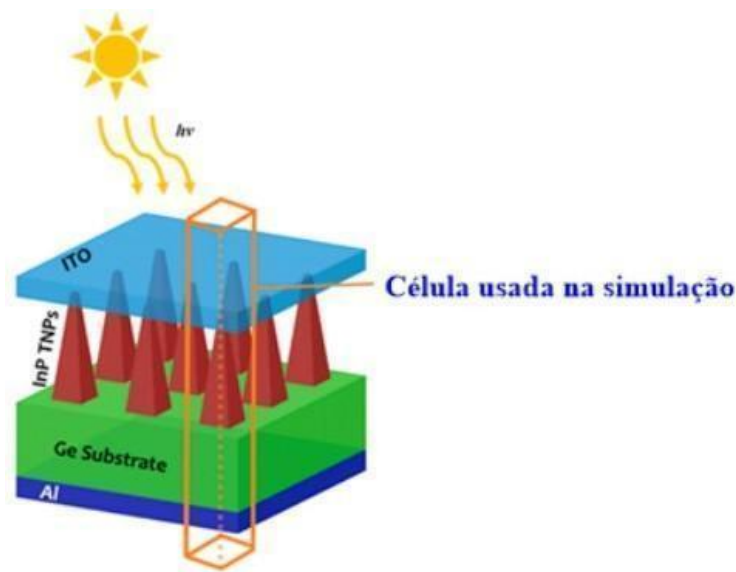
5.5 Células solares compostas por Pontos Quânticos

Pontos quânticos são definidos como materiais com propriedades semicondutoras capazes de exibir atraentes propriedades ópticas, com ampla aplicação tecnológica no campo dos diodos, laser, aplicações biomédicas, e outros (KARGOZAR *et al.*, 2020). Estes materiais têm sido eficazmente empregados na preparação de células solares baseados na utilização de pontos quânticos, como por exemplo, células solares baseadas em pontos quânticos de seleneto de chumbo (PbSe QD's). Neste sentido, Wang e colaboradores investigaram o limite da eficiência na fabricação de células solares de alta performances constituídas de pontos quânticos de seleneto de chumbo em seu trabalho intitulado como “Unveiling of efficiency limit to fabricate high-performance PbSe quantum dot solar cells” (WANG, D. *et al.*, 2022). Com o objetivo de investigar a limitação de pontos quânticos de PbSe, os autores estabeleceram um modelo teórico baseado no desempenho de tais materiais através da teoria de difusão, possibilitando a discussão sistemática de estratégias opcionais na otimização da eficiência dos referidos pontos quânticos. Assim, as otimizações foram inicialmente realizadas pelos autores em termos de espessura da camada absorvedora, densidades de defeitos na camada absorvente e camada de defeito de interface (IDL), obtendo-se assim uma eficiência de conversão de energia (PCE) de 15,25% com tensão de circuito aberto (V_{oc}) de 0,64 V e fator de enchimento (FF) de 74,49% em pontos quânticos de PbSe. Após as modificações das concentrações de dopagem das camadas de transporte de carga e do alinhamento da banda no dispositivo solar, os respectivos pontos quânticos puderam alcançar mais de 30% de eficiência com uma melhoria de ~80% e 32% em V_{oc} e FF, respectivamente.

5.6 Células solares nanométricas

O estudo e a aplicação tecnológica a partir de propriedades nanométricas obtidas por modificações estruturais da matéria a nível nanométrico é o que hoje em dia se conhece como nanotecnologia. De forma geral, este campo da ciência lida com estruturas dimensionadas na ordem entre 1-100 nanômetros, e envolve a modificação ou o desenvolvimento de materiais dentro dessa escala, tomando vantagem das atraentes propriedades que surgem das modificações da matéria nesta escala (DU *et al.*, 2022). Com isso, a nanotecnologia tem sido extensivamente empregada nos mais variados campos científicos e tecnológicos como, por exemplo, no campo medicinal (SINDHWANI; CHAN, 2021), ciências dos materiais (BAIG *et al.*, 2021), no campo farmacêutico (KHIDIR; ALSAYID; SAEED, 2020) e industrial (ALSABA; DUSHAISHI, AL; ABBAS, 2020). No campo da energia solar, não é diferente. A nanotecnologia tem sido aplicada neste sentido há vários anos, com o objetivo de empregar esta abordagem na preparação de células solares cada vez mais eficientes, lançando assim na literatura, diversos trabalhos acadêmicos dentro deste contexto (WANG, 2022). Neste sentido, Agnihotri e colaboradores publicaram alguns achados teóricos relacionados a análise optoeletrônica acoplada de células solares nanoestruturadas (AGNIHOTRI; PRASHANT; SAMAJDAR, 2023). A altura da nanoestrutura do TNP-InP e a espessura do substrato germânio foram otimizadas com o objetivo de alcançar a densidade de corrente igual (J_{sc}) para cumprir a condição de correspondência de corrente para um SC. J_{sc} de 23,1 mA/cm² e 22,9 mA/cm² foram obtidos para TNP-InP com altura $h_1 = 1 \mu\text{m}$ e substrato Ge com altura $h_2 = 700 \text{ nm}$, respectivamente (AGNIHOTRI; PRASHANT; SAMAJDAR, 2023). Segundo os autores, a eficiência da célula solar proposta é de 26,7%, sendo então próximo a soma do PCE das subcélulas InP, TNP e Ge sozinhas. Esses resultados podem ser úteis para enquadrar o design de estratégias que visam a preparação de células solares eficientes, demonstrando assim a importância de estudos teóricos na previsão de novos materiais no campo das células solares de constituição nanométrica.

Figura 16: Representação esquemática da célula solar do tipo InP-TNP/Ge.



Fonte: (AGNIHOTRI; PRASHANT; SAMAJDAR, 2023).

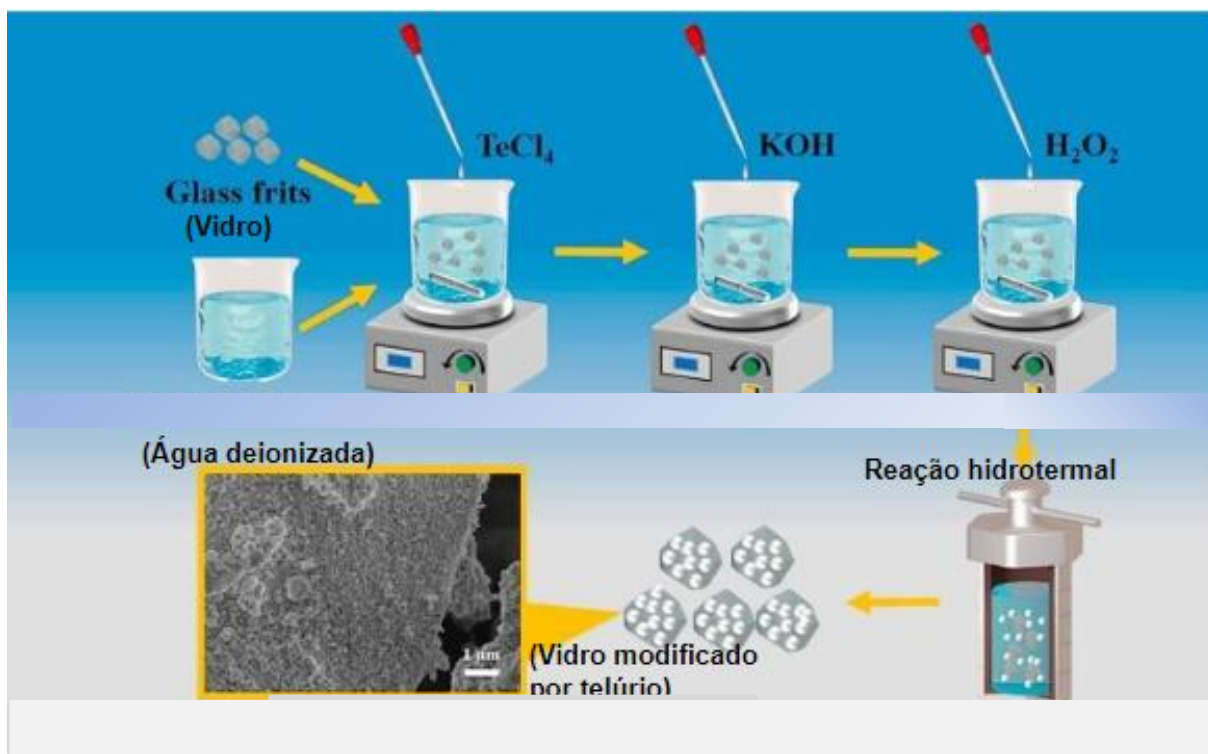
5.7 Células solares de silício

Células solares baseadas em silício têm sido apresentadas como uma tecnologia amplamente reconhecida nos dias de hoje, sendo projetadas para se destacar no mercado das células solares, à medida que mais de 90% do mercado fotovoltaico do mundo depende da energia solar baseada em células do tipo c-Si. Em comparação com outros materiais fotovoltaicos atualmente disponíveis no mercado, os de silício encontram-se entre os mais desejados na construção de células solares devido à sua abundância natural, boa estabilidade, não toxicidade, e competitividade com relação a seus custos e seu fácil manuseio (OKIL *et al.*, 2022). Sua largura de banda indireta é de aproximadamente 1,12 eV, faixa considerada como bem ajustada em termos de espectro solar, correspondendo ao comprimento de onda de corte da absorção de luz, que é de aproximadamente 1160 nm. Além disso, está mais próximo do valor ideal para converter energia solar em energia elétrica utilizando um único absorvedor de luz. Por outro lado, é importante destacar que células solares contendo silício apresentam um pequeno coeficiente de absorção próximo à região infravermelha. Apesar disso, com design de controle de luz apropriado, como textura de superfície, revestimentos antirreflexos e espelhos retrovisores de superfície, luz eficaz a absorção é alcançada com wafers relativamente finos (OKIL *et al.*, 2022).

Neste contexto, Sun e colaboradores investigaram recentemente a molhabilidade de

vidro sem chumbo modificada por telúrio e seu efeito para a pasta de prata em células solares de silício cristalino (SUN, Y. *et al.*, 2022). Inicialmente, os autores empregaram o processo hidrotermal na obtenção de vidro sem chumbo modificado por telúrio, através de um procedimento experimental simples, que pode ser entendido como apresentado pela Figura 17.

Figura 17: Procedimento experimental.



Fonte: SUN, Y. *et al.*, 2022.

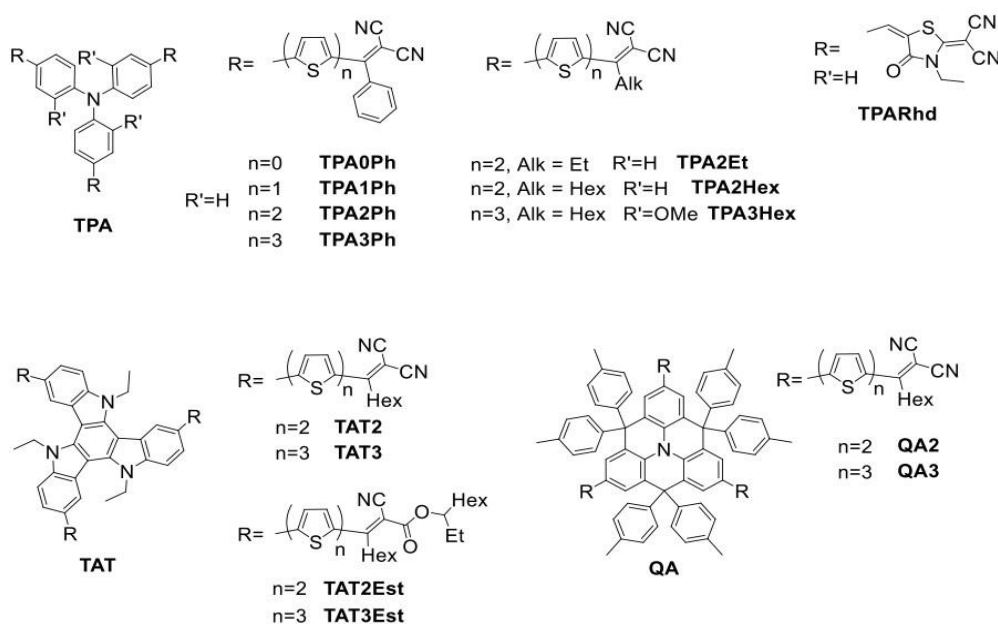
Após adequada caracterização, o efeito da modificação de Te sobre o comportamento relacionado a umectação de vidro sem chumbo do tipo $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{--B}_2\text{O}_3\text{--SiO}_2$ em wafer de silício e sua aplicação em células solares de silício foram estudadas pelos autores. Os resultados indicaram que o elemento telúrio se apresentou na forma de TeO_2 e reagiu com o Bi precipitado na superfície vítrea para formar Bi_4TeO_8 , melhorando a capacidade vítrea de fundição de prata. O Bi_4TeO_8 formado na superfície do vidro necessário para absorver mais calor para fazer o gradiente de temperatura entre o vidro diminuiu. Além disso, o comportamento umectante do vidro alterou suas propriedades indo de anisotrópico para isotrópico, além de que a estabilidade térmica sofreu aumento. O vidro modificado por telúrio formou um plano denso após o derretimento e o ângulo de contato com o wafer de silício diminuiu, melhorando a molhabilidade do vidro. Assim, a contribuição para o aumento da condutividade do material a partir do derretimento da prata pode então contribuir para o aumento da eficiência deste, fazendo com que esta técnica seja empregada para esta finalidade em células solares futuras.

5.8 Células solares Orgânicas

Triazatruxeno são núcleos moleculares estruturados a partir de três unidades de indol combinadas por um anel de benzeno, sendo então considerado como um sistema do tipo π dimensional, capaz de proporcionar uma grande superfície aromática que se sobrepõe umas as outras para uma eficiente transferência de carga intermolecular. Em particular, derivados de triazatruxeno cuja estrutura molecular se apresenta com formato estrela são considerados como novos potenciais materiais do tipo HTMs para PSCs, uma vez que eles têm sido conhecidos como camadas seletivas de buracos para células solares orgânicas. De forma geral, este tipo de estrutura oferece grande versatilidade química ao sintonizar propriedades eletrônicas e morfológicas e desde então tem sido intensivamente estudadas no campo das células solares (RAKSTYS *et al.*, 2015).

Neste contexto, Agafonova e colaboradores investigaram o papel de triazatruxenos no transporte de buracos e seus efeitos no alcance de alta eficiência de células solares constituídas por perovskite (AGAFONOVA *et al.*, 2023). Neste trabalho, os autores apresentaram uma triagem sistemática inicial contendo 14 materiais dendrímeros totais divididos inicialmente em quatro grupos distintos, de acordo com o núcleo central. As classes dos dendrímeros empregadas neste estudo foram trifenilaminas, triazatruxenos, acridinas quinolizínicas e tiofenos. A Figura 18 apresenta diversas estruturas moleculares empregadas durante o estudo.

Figura 18: Estruturas moleculares de dendrímeros estudadas.



Fonte: (AGAFONOVA *et al.*, 2023).

Estas estruturas moleculares foram incrementadas em um total de 14 semicondutores do tipo p com formato de estrela, sendo empregadas como HTM. Dentre as estruturas destacadas anteriormente, os triazatruxenos apresentaram maior reprodutibilidade e eficiência. Os estudos preliminares realizados por este grupo, levaram a definição desta classe de moléculas como ponto de partida na racionalização da engenharia de moléculas pequenas. Sua alta planaridade facilitando a vida útil prolongada do buraco e embalagem apertada, pode ser fortalecida pelas geometrias de cadeia situadas lateralmente, de forma adequada. Os autores conectaram os resultados para PSCs livres de dopantes à base de TAT2 e TAT2Est (19,7% e 20,0%, respectivamente) com sua ordenação suprema em filmes, conforme previsto por evidência de imagem MFA. Neste trabalho, eficiência de 20% foi alcançada com a utilização de perovskita (AGAFONOVA *et al.*, 2023).

5.9 Células solares poliméricas

Em 2022, Li e colaboradores investigaram a obtenção de células solares totalmente poliméricas de alta eficiência, empregando como método de preparação a deposição sequencial com camadas de doadores e aceptores revestidas para otimizar a microestrutura de filmes (LI, *et al.*, 2022). Em comparação com as todas as PSCs de heterojunção a volume único, uma morfologia otimizada com distribuição vertical de componentes foi alcançada para as todas as PSCs processadas por deposição sequencial devido ao efeito sinérgico do inchaço dos filmes poliméricos e do uso de aditivo. Tal estratégia envolveu o uso de clorobenzeno como solvente de processamento de primeira camada para doador de polímero e clorofórmio como o segundo solvente de processamento para aceitador de polímero com traço 1-cloro-onaftaleno, promovendo eficientemente a dissociação de éxciton e a extração de carga e reduzindo a recombinação assistida por armadilha. Consequentemente, mais de 16% de todos os PSCs fabricados via método de deposição sequencial foram realizados pela primeira vez, o que é muito maior do que o (15,2%) de sua contraparte BHJ e também entre os PCEs mais altos em todos os PSCs (LI, *et al.* 2022).

5.10 Células solares de perovskita

As células solares de perovskita são baseadas em materiais perovskitas, compostos cristalinos com uma estrutura cúbica específica, semelhante à estrutura mineral perovskita encontrada na natureza (WU *et al.*, 2021). Aqui estão alguns pontos-chave a serem considerados em uma análise das células solares de perovskita:

- **Eficiência notável:** As células solares de perovskita têm mostrado uma rápida melhoria em sua eficiência de conversão de luz solar em eletricidade. Em um curto período de tempo de desenvolvimento, a eficiência aumentou de alguns pontos percentuais para mais de 25% em laboratórios. Essa rápida progressão a tornou uma candidata promissora para superar as células solares de silício, que atualmente lideram o mercado em eficiência.
- **Baixo custo de fabricação:** A principal vantagem das células solares de perovskita é o seu potencial para reduzir significativamente os custos de fabricação. Os materiais utilizados nessas células podem ser processados com técnicas relativamente simples, como impressão e revestimento, permitindo a produção em larga escala a baixo custo.
- **Flexibilidade:** As células solares de perovskita podem ser fabricadas em filmes finos, tornando-as adequadas para aplicações em dispositivos flexíveis e integrados em tecidos ou superfícies curvas, expandindo suas possibilidades de uso em eletrônicos vestíveis e em materiais de construção.
- **Tolerância à luz:** As células solares de perovskita demonstraram uma alta absorção de luz em uma ampla faixa do espectro solar, o que lhes confere uma melhor eficiência em condições de luz difusa ou indireta, tornando-as atraentes para locais com menos horas de sol direto.
- **Estabilidade e durabilidade:** Apesar dos avanços significativos, as células solares de perovskita ainda enfrentam desafios relacionados à estabilidade a longo prazo e durabilidade em condições ambientais adversas. A degradação do material devido à exposição à umidade e luz é um dos principais obstáculos que precisam ser superados antes que essas células possam ser comercialmente viáveis.
- **Potencial de aplicação:** Além de aplicações em painéis solares tradicionais, as células solares de perovskita têm o potencial de serem utilizadas em janelas inteligentes, revestimentos de edifícios, carregadores solares portáteis, eletrônicos vestíveis e uma variedade de dispositivos eletrônicos de baixo consumo energético (AGAFAANOVA, 2023).

5.11 Células solares de TNP - InP/Ge

As células solares de TNP-InP/Ge são dispositivos fotovoltaicos avançados que combinam tecnologias de materiais para melhorar a eficiência na conversão de luz solar em eletricidade. Neste caso, TNP refere-se a "*Triple-Junction Nanowire Photovoltaics*" (Fotovoltaicos de Nanofios de Três Junções), InP é o índio-fósforo (*Indium Phosphide*) e Ge é

o germânio (*Germanium*) (ADIBZADEH, OLYAEE, 2022).

Essas células solares são conhecidas como células solares multi-junção e são projetadas para operar em múltiplas faixas de comprimento de onda da luz solar. O uso de nanofios semicondutores, como o InP, permite aproveitar mais eficientemente diferentes partes do espectro solar, pois esses materiais podem ser sintonizados para capturar diferentes comprimentos de onda da luz solar (ADIBZADEH, OLYAEE, 2022).

As células solares de TNP-InP/Ge geralmente têm três camadas semicondutoras empilhadas verticalmente, com cada camada sintonizada para absorver uma parte específica da luz solar. O germânio (Ge) é frequentemente usado na camada mais inferior, capturando comprimentos de onda de infravermelho próximo. O InP é usado em uma camada intermediária para absorver comprimentos de onda mais curtos, como a luz visível, e os nanofios atuam como antenas eficientes para coletar e direcionar a luz para as camadas absorventes (ADIBZADEH, OLYAEE, 2022).

Essa arquitetura de múltiplas junções permite uma maior eficiência na conversão de luz solar em eletricidade, uma vez que diferentes partes do espectro solar são aproveitadas de forma mais eficiente. Ao utilizar nanofios semicondutores, a área de superfície da célula é aumentada, permitindo a captura de mais luz solar e, consequentemente, maior produção de energia elétrica (ADIBZADEH, OLYAEE, 2022).

As células solares de TNP-InP/Ge estão em fase de pesquisa e desenvolvimento, mas prometem melhorar significativamente a eficiência de conversão de energia solar, tornando a tecnologia fotovoltaica ainda mais competitiva em relação às fontes de energia tradicionais. Com o avanço contínuo da nanotecnologia e dos materiais semicondutores, é possível que essas células solares multi-junção se tornem uma parte importante do cenário energético no futuro (ADIBZADEH, OLYAEE, 2022).

6. RESULTADOS

De forma geral, uma tabela comparativa incluindo os materiais até aqui discutidos pode ser montada, trazendo suas eficiências, valores de referência da literatura e até mesmo algumas de suas propriedades relevantes (Tabela 1).

Tabela 1. Quadro comparativo dos materiais apresentados anteriormente.

Material	E (%)	Aspectos	ref.	Custos
Sb ₂ B ₃	7.44%	Cama ultrafina de seleneto de antimônio (20 nm). Controle de verticalização de crescimento.	AMIN, 2022	
CdTe	52.62%	Introdução de NiO e V ₂ O ₅ como potencializadores de atividade fotovoltaica.	HASANI, 2023	US\$ 72 por 1 metro quadrado ou cerca de US\$ 90 por cada módulo.
CIGS	32.45%	Emprega tecnologia de filmes finos	BOUABDELLI, 2022	
PbSe	30%	Material a base de pontos quânticos.	WANG, 2022	
TNP-InP/Ge	26.7%	*Previsão teórica	AGNIHOTRI, 2023	Seu custo não está definido, já que o material está em fase de testes.
Perovskita	20%	Eficiência acima das obtidas na literatura	AGAFANOVA, 2023	
InGaP	29.3%	Material baseado em nanotecnologia (nanopartículas de Pd)	MAKITA, 2022	
Polímeros	16%	Material robusto com de estabilidade performance	LI, 2022	

Org.	14.5%	Material a base de uma heteroconjugação ternária de volume único.	SHARMA, 2023	
m-Si	15 a 20%	Alta eficiência, alta pureza, menor espaço, melhor desempenho em condições de baixa luminosidade, longa vida útil, aparência uniforme, tolerância a altas temperaturas.	OKIL <i>et al.</i> , 2022	\$0,20 a \$0,40 por watt-pico (Wp).
p-Si	13 a 18%	Menor custo de produção, processo de fabricação mais simples, eficiência moderada, maior tolerância à sombra, maior pegada ambiental inicial, menor eficiência em condições de baixa luminosidade, aparência mais azulada e vida útil semelhante às de silício monocristalino.	OKIL <i>et al.</i> , 2022	\$0,18 a \$0,35 por watt-pico.

A Tabela 2 traz dados comparativos entre os valores associados à eficiência e performance fotovoltaica dos materiais apresentados.

Tabela 2. Quadro comparativo dos materiais apresentados anteriormente

Material	E (%)	VOC (mV)	JSC (mA/cm ²)	FF (%)	PCE (%)
Sb ₂ B ₃	7.44%	396	23,84	64,60	6,12
CdTe	52.62%	872	28	78	19
CIGS	32.45%	646 a 782	0,463 a 17,7	63,7 a 77,2	-
PbSe	30%	290	21	41	2,52
TNP- InP/Ge	26.7%	-	-	-	-
Perovskit a	20%	860	20,88	70	14,3
InGaP	29.3%	2200	-	82,77	23,23
Polímeros	16%	880	14,4	51	6,4
Org.	14.5%	-	-	-	-
m-Si	15 a 20%	600-720 mV	35-42 mA/cm ²	75-82%	18-22%
p-Si	13 a 18%	580-680 mV	32-38 mA/cm ²	70-78%	15-18%

Por meio dos dados apresentados na Tabela 1, percebe-se que o material CdTe confere maior eficiência energética que as demais opções apresentadas. Além disso, tem-se que a segunda célula com maior eficiência é formada a partir de CIGS, e emprega a tecnologia de filmes ultrafinos para sua construção. A célula voltaica de Sb_2B_3 é a que apresenta menor eficiência.

Com relação ao seu custo, em 2013, os módulos fotovoltaicos de CdTe atingiram um custo direto de fabricação de US\$ 0,57 por watt. Além disso, o custo de capital por cada novo watt de capacidade era de aproximadamente em US\$ 0,9. No ano de 2014, os custos do módulo CdTe foram aproximadamente de US\$ 72 por 1 metro quadrado (equivalente a 11 pés quadrados) ou cerca de US\$ 90 por cada módulo (HISOUR, 2019). Para as células de Sb_2B_3 e CIGS, os valores variam de acordo com o fabricante.

De modo geral, a eficiência energética refere-se à utilização eficiente da energia para realizar determinadas tarefas ou fornecer serviços. É uma medida da quantidade de energia necessária para executar uma atividade específica, como aquecer uma casa, iluminar um edifício ou movimentar um veículo. Quanto mais eficiente é o processo ou dispositivo em converter energia em trabalho útil, menor será o desperdício de energia.

Assim, a eficiência energética de uma célula solar refere-se à capacidade da célula em converter a energia solar em eletricidade de forma eficiente. É uma medida da quantidade de energia solar que uma célula pode capturar e transformar em eletricidade utilizável.

As células solares mais comuns e amplamente utilizadas, como as de silício cristalino, geralmente têm eficiências entre 15% e 20%. No entanto, a pesquisa e o desenvolvimento contínuos têm levado ao desenvolvimento de células solares mais eficientes, como células solares de filme fino e células solares de perovskita, que têm potencial para alcançar eficiências mais altas.

A melhoria da eficiência energética das células solares é importante, pois permite uma maior geração de eletricidade a partir da mesma quantidade de luz solar incidente. Isso significa que é possível produzir mais eletricidade com menos células solares, reduzindo assim os custos e o espaço necessário para a instalação de sistemas solares, além de tornar a energia solar mais competitiva em relação a outras fontes de energia.

7. CONCLUSÃO

Foi possível observar grande diversidade de materiais empregada na pesquisa de base deste campo como, por exemplo, com a utilização de materiais poliméricos, silício, materiais do tipo componentes III-IV, materiais orgânicos, perovskita, pontos quânticos, nanopartículas e outros. É importante destacar que a hibridização de tais materiais tem sido além disso empregada com bastante eficiência na preparação de dispositivos fotovoltaicos eficientes. Grande avanço tem sido observado em relação ao estudo de aumento de eficiência destes tipos de materiais. Aqui, foi possível observar que desde o ano de 2022, grande progresso científico e tecnológico tem sido alcançado nesta direção, embora ainda sim novos materiais possam surgir na literatura sem que ainda se mostrem superiores a algumas composições padrões específicas de células solares disponíveis comercialmente.

BIBLIOGRAFIA

ABSOLAR. Boletim Solar. São Paulo, 2021. Disponível em: <https://absolar.org.br/wp-content/uploads/2021/02/ABSOLAR-Boletim-Solar-N%C2%BA-01-2021.pdf>. Acesso em: 25 mai. 2023.

ADIBZADEH, F., OLYAEE, S. Nanostructure back reflector for enhancing the performance of InP nanowire array solar cells, 2022. Opt Quant Electron v. 54, p. 303. <https://doi.org/10.1007/s11082-022-03673-0>.

AJAYAN, J., NIRMAL, D., MOAHNKUMAR, P., SARAVANAN, M., JAGADESH, M., ARIVAZHAGAN, L. A review of photovoltaic performance of organic/inorganic solar cells for future renewable and sustainable energy technologies. Superlattices and Microstructures, 2020. v. 143, n. April, p. 106549.

AGAFONOVA, E., TEPLIAKOVA, M., LUCHKIN, S., IONOV, A., PROTASOVA, S., NOVIKOV, A., STEVENSON, K. J. Stars are aligned: Triazatruxene hole transporting material hits the sweet spot to reach 20% efficiency of perovskite solar cell. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2023. v. 252, p. 112168.

AGNIHOTRI, S. K.; PRASHANT, D. V.; SAMAJDAR, D. P. Theoretical Insights into the Coupled Optoelectronic Analysis of InP truncated nanopyramid/Germanium Tandem Solar Cells. Solar Energy, 2023. v. 249, n. May 2022, p. 327–335.

ALSABA, M. T.; DUSHAISHI, M. F. AL; ABBAS, A. K. A comprehensive review of nanoparticles applications in the oil and gas industry. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 2020. v. 10, n. 4, p. 1389–1399.

AMIN, A., LI, D., DUAN, X., VIJAYARAGHAVAN, S. N., MENOM, H. G., WALL, J., YAN, F. Enhanced Efficiency and Stability in Sb₂S₃ Seed Layer Buffered Sb₂Se₃ Solar Cells. Advanced Materials Interfaces, 2022. v. 9, n. 21, p. 1–8.

AMIN, N.; RAHMAN, K. S. Close - Spaced Sublimation (CSS): A Low - Cost , High - Yield Close - Spaced Sublimation (CSS): A Low - Cost , High - Deposition System for Cadmium

Telluride (CdTe) Thin Yield Deposition System for Cadmium Telluride (CdTe) Film Solar Cells Thin Fi. INTECH open.science open minds, 2017. v. 18.

ANEEL. Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro. Brasília, 2021. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/documents/656877/14404673/Boletim+Mensal+de+Monitoramento+-+Dezembro+de+2020/3b92637f-8a1f-48df-9405-fb1846799b8a>. Acesso em: 25 mai. 2023.

BAIG, N., KAMMAKAKAM, I., FALATH, W. Nanomaterials: A review of synthesis methods, properties, recent progress, and challenges. *Materials Advances*, 2021. v. 2, n. 6, p. 1821–1871.

BAIJU, Adil; YAREMA, Maksym. Status and challenges of multi-junction solar cell technology. *Frontiers in Energy Research*, v. 10, p. 971918, 2022.

BARBATO, M., ARTEGIANI, E., BERTONCELLO, M., MENEGHINI, M., TRIVELLIN, N., MANTOAN, E., MENEGHESSO, G. CdTe solar cells: technology, operation and reliability. *J. Phys. D: Appl. Phys*, 2023, v. 54.

BEHNSEN, J. G., BLACK, K., HOUGHTON, J. E., WORDEN, R. H. A Review of Particle Size Analysis with X-ray CT. *Materials*, 2023. v. 16, n. 3, p. 1–17.

BOUABDELLI, M. W., ROGTI, F., MAACHE, M., RABEHI, A. Performance enhancement of CIGS thin-film solar cell. *Optik*, 2022. v. 216, p. 164948.

BREE, G., COUGHLAN, C., GEANEY, H., RYAN, K. M. Investigation into the Selenization Mechanisms of Wurtzite CZTS Nanorods. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 2018. v. 10, n. 8, p. 7117–7125.

DAMBHARE, M. V.; BUTEY, B.; MOHARIL, S. V. Solar photovoltaic technology: A review of different types of solar cells and its future trends. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021. v. 1913, n. 1.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Matriz energética e elétrica. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 07 jun. 2023.

HASANI, E.; SHARIFAT, M. Effect of metal-oxide films on CdTe-based solar cell performance: A numerical simulation of 52.62%-efficient solar cell. *Solar Energy*, 2023. v. 249, p. 369–386.

HiSoUR Arte Cultura Exposição. Fotovoltaica de telureto de cádmio. Disponível em: <https://www.hisour.com/pt/cadmium-telluride-photovoltaics-39663/>. Acesso em 25 mai. 2023.

INOVACAO UFSCAR, 2019. Síntese Hidrotérmica. Disponível em: <https://www.inovacao.ufscar.br/pt-br/news/patentes/148-sintese-hidrotermica>. Acesso em: 07 jun. 2023.

KARGOZAR, S., HOSEINI, S. J., MILAN, P. B., HOOSHMAND, S., KIM, H. W., MOZAFARI, M. Quantum Dots: A Review from Concept to Clinic. *Biotechnology Journal*, 2020. v. 15, p. 1–18.

KHIDIR, A. M.; ALSAYID, M.; SAEED, A. A. Pharmaceutical Nanotechnology and Application. *World Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, 2020. v. 9, n. 2, p. 202–211.

KOKKONEN, M., TALEBI, P., ZHOU, J., ASGARI, S., SOOMRO, S. A., ELSEHRAWY, F., HASHMI, S. G., 2021. Advanced research trends in dye-sensitized solar cells. *Journal of Materials Chemistry A*, 9(17), 10527-10545.

KUMAR, Raushan; KUMAR, Akhilesh. Performance Enhancement of ZnMgO:Al/ZnMgO/CIGSSe Solar Cell With the Combination of CZTGSe HT-ERL Layer. *J. Electron. Mater.*, 2022, v. 51, p. 84–103.

LI, B., ZHANG, X., WU, Z., YANG, J., LIU, B., LIAO, Q., SUN, H. Over 16% efficiency all-polymer solar cells by sequential deposition. *Sci. China Chem.* 2022. v. 65, p. 1157–1163.

LIMA, R. D. M. C., MEDEIRO, R. A. D., FONSECA, M. G., DHERE, N. G., SHINDE, O.,

SCHNELLER, E., CRUZ, L. R. Caracterização de células solares de filmes finos de CIGS. *Matéria* (Rio de Janeiro), v. 22, 2018.

MAKITA, K., KAMIKAWA, Y., MIZUNO, H., OSHIMA, R., SHOJI, Y., ISHIZUKA, S., SUGAYA, T. Mechanical stacked GaAs//CuIn 1– y Ga y Se 2 three-junction solar cells with 30% efficiency via an improved bonding interface and area current- matching technique. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2022.

MAVLONOV, A., RAZYKOV, T., RAZIQ, F., GAN, J., CHANTANA, J., KAWANO, Y., QIAO, L. A review of Sb₂Se₃ photovoltaic absorber materials and thin- film solar cells. *Solar Energy*, 2020. v. 201, n. March, p. 227–246.

OKIL, M., SALEM, M. S., ABDOLKADER, T. M., SHAKER, A. From Crystalline to Low-cost Silicon-based Solar Cells: a Review. *Silicon*, 2022. v. 14, n. 5, p. 1895–1911.

ORLANDI, M. O., AGUIAR, R., BOMIO, M. R. D., LEITE, E. R., LONGO, E., Nanofitas de óxido de estanho: controle do estado de oxidação pela atmosfera de síntese. *Cerâmica*, 2004. v. 50, n. 313, p. 58–61.

ORTIZ-MEDINA, J., GARCÍA-BETANCOURT, M. L., JIA, X., MARTÍNEZ-GORDILLO, R., PELAGIO-FLORES, M. A., SWANSON, D., TERRONES, M. Nitrogen-doped graphitic nanoribbons: synthesis, characterization, and transport. *Advanced Functional Materials*, v. 23, n. 30, p. 3755-3762, 2013.

PORTAL ENERGIA, 2023. Os 5 indicadores de desempenho dos sistemas solares fotovoltaicos. Disponível em: <https://www.portal-energia.com/indicadores-desempenho-sistemas-solares-fotovoltaicos/>. Acesso em: 07 jun. 2023.

ROSA, E. H. S.; TOLEDO, L. F. R. B. Uma revisão dos princípios de funcionamento de células solares orgânicas. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 43, p. e20200519, 2021.

SEDOV, V. S., VIASOV, I. I., RALCHENKO, G. G., KHOMICH, A. A., KONOV, V. I., FABBRI, A. G., CONTE, G. Gas-phase growth of silicon-doped luminescent diamond films and isolated nanocrystals. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, 2011. v. 38, n. 10, p. 291–

296.

SHARMA, G., AGRAWAL, A., PRADHAN, M. L., SINGHAL, R. LIU, W., MISHRA, A. Fullerene-Free All-Small-Molecule Ternary Organic Solar Cells with Two Compatible Fullerene-Free Acceptors and a Coumarin Donor Enabling a Power Conversion Efficiency of 14.5%. *ACS Appl. Energy Mater*, 2021. v. 4, p. 11537-11544.

SHARMA, I., PAWAR, P. S., YADAV, R. K., NANDI, R., HEO, J. Review on bandgap engineering in metal-chalcogenide absorber layer via grading: a trend in thin-film solar cells. *Solar Energy*, v. 246, p. 152-180, 2022.

SHIN, J. YANG, S.. JANG, Y., EO, J. S., KIM, T. W., LEE, T., WANG, G. Tunable rectification in a molecular heterojunction with two- dimensional semiconductors. *Nature Communications*, 2020. v. 11, n. 1, p. 1–7.

SINGH, Y., RANI, S., PARMAR, R., KUMARI, R., KUMAR, M., SAIRAM, A. B., SINGH, V. N. Sb₂Se₃ heterostructure solar cells: Techniques to improve efficiency. *Solar Energy*, 2023, v. 249, p. 174-182.

SOLAR BRASIL. Módulos Fotovoltaicos - Parâmetros técnicos, 2018. Disponível em: <https://www.solarbrasil.com.br/blog/modulos-fotovoltaicos-parametros-tecnicos/>. Acesso em: 07 jun. 2023.

SOLAR ENERGIA. Célula solar de filme fino. Disponível em: <https://pt.solar-energia.net/energia-solar-fotovoltaica/elementos/painel-fotovoltaico/celula-fotovoltaica/celula-solar-de-pelicula-fina>. Acesso em: 07 jun. 2023.

SUN, Y., XUE, H., YANG, C., TIAN, Y. NING, S., MA, S., WANG, H. Improvement of Wettability of Te-Modified Lead-Free Glass Frit and its Effect to Front Side Silver Paste in Crystalline Silicon Solar Cells. *SSRN Electronic Journal*, 2022. v. 253, p. 112214.

TONG, H., KOU, Z., ZHAO, M., ZHUANG, D., WANG, C., Li, Y. Influences of Mg concentration in ZnMgO film on energy band alignment at CIGSSe/Zn_{1-x}Mg_xO interface and performances of CIGSSe solar cells. *Solar Energy*, v. 246, p. 216-223, 2022.

WANG, D., LI, Y., YANG, Y., DING, C., SHEN, Q. Unveiling of efficiency limit to fabricate high-performance PbSe quantum dot solar cells. *Solar Energy*, 2022. v. 247, p. 432-440.

WU, T., QIN, Z., WANG, Y., WU, Y., CHEN, W., ZHANG, S., HAN, L., 2021. The main progress of perovskite solar cells in 2020–2021. *Nano-Micro Letters*, 13, 1-18.

YAO, Y., AO, K., LV, P., WEI, Q. MoS₂ coexisting in 1T and 2H phases synthesized by common hydrothermal method for hydrogen evolution reaction. *Nanomaterials*, v. 9, n. 6, p. 844, 2019.