



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL



ISABELLA SOARES RIBEIRO

**IMPACTO DO GRAFENO NA EFICIÊNCIA DOS
PAINÉIS SOLARES FOTOVOLTAICOS: UMA
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Uberlândia

2024

ISABELLA SOARES RIBEIRO

**IMPACTO DO GRAFENO NA EFICIÊNCIA DOS
PAINÉIS SOLARES FOTOVOLTAICOS: UMA
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade Federal de Uberlândia, como parte
das exigências para a obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Profº. Dr. Antônio de Paulo Peruzzi

Uberlândia

2024

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus e aos meus pais Kenia e Marlon, pelo amor incondicional, apoio e incentivo ao longo de toda a minha jornada acadêmica, além do meu irmão Raphael e do meu namorado Matheus.

AGRADECIMENTOS

A Deus, principalmente, que me permitiu vivenciar todas essas experiências da graduação; sem Ele, nada seria possível. Aos meus pais, Kenia e Marlon, que me apoiaram e me deram todo o suporte necessário. Agradeço por serem minha fonte de inspiração e por acreditarem em mim, mesmo nos momentos difíceis. Este trabalho também é dedicado aos meus amigos, como Nathan, meu namorado Matheus, meu irmão Raphael, e familiares, pelo suporte emocional e pela compreensão durante os períodos de dedicação intensa aos estudos. Por fim, dedico este trabalho ao meu orientador, Antônio, pelo seu apoio, orientação valiosa, pelas correções, ensinamentos e pela confiança em minhas capacidades, que me permitiram ter um melhor desempenho em meu processo de formação profissional. Vocês foram fundamentais para a realização deste sonho na Universidade Federal de Uberlândia.

RESUMO

Este trabalho visa realizar uma revisão bibliográfica abrangente sobre a influência do grafeno na eficiência de painéis solares fotovoltaicos. Em meio à crescente demanda por energia renovável, a pesquisa de novos materiais para aprimorar a eficiência e reduzir os custos dos sistemas fotovoltaicos tem se destacado. Por meio de uma abordagem bibliográfica em bancos de dados acadêmicos, como SciELO, ResearchGate, Academia.edu, Scopus e Google Scholar, foram identificados estudos relevantes que investigam o potencial do grafeno em diversos tipos de células solares, incluindo células de silício cristalino, células orgânicas sensibilizadas por corantes e perovskitas. A análise desses estudos revelou as múltiplas aplicações do grafeno na otimização da eficiência da conversão de energia solar em eletricidade, assim como na redução de custos e impactos ambientais associados aos materiais tradicionais. Os resultados desta revisão destacam o grafeno como uma peça-chave para impulsionar a inovação no campo da energia solar fotovoltaica. Sua aplicação em células solares promete impulsionar o avanço tecnológico, tornando os sistemas fotovoltaicos mais acessíveis, eficientes e ambientalmente sustentáveis.

Palavras-chaves: Grafeno. Painéis Solares Fotovoltaicos. Energia Fotovoltaica. Eficiência Energética. Células Solares.

ABSTRACT

This work aims to carry out a comprehensive literature review on the influence of graphene on the efficiency of photovoltaic solar panels. Amid the growing demand for renewable energy, research into new materials to improve the efficiency and reduce the costs of photovoltaic systems has gained prominence. Through a bibliographic approach in academic databases, such as SciELO, ResearchGate, Academia.edu, Scopus and Google Scholar, relevant studies were identified that investigate the potential of graphene in various types of solar cells, including crystalline silicon cells, organic compounds sensitized by dyes and perovskites. The analysis of these studies revealed the multiple applications of graphene in optimizing the efficiency of converting solar energy into electricity, as well as reducing costs and environmental impacts associated with traditional materials. The results of this review highlight graphene as a key player in driving innovation in the field of solar photovoltaics. Its application in solar cells promises to boost technological advancement, making photovoltaic systems more accessible, efficient and environmentally sustainable.

Key words: Graphene. Photovoltaic Solar Panels. Photovoltaics. Energy Efficiency. Solar Cells.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma do Método.....	10
Figura 2 - Evolução da capacidade instalada acumulada de potência fotovoltaica (em MW), entre os anos de 2000 a 2021.....	16
Figura 3 - Estrutura de bandas de energia em (a) condutores, (b) semicondutores e (c) isolantes.	18
Figura 4 - Geração de pares elétron-lacuna pela incidência de fótons no material semicondutor, chamado efeito fotocondutivo: E_c – nível inferior de energia da banda de condução; E_v – nível máximo de energia na banda de valência; E_f – Nível de Fermi; E_g – valor.....	19
Figura 5 - Representação simplificada do efeito fotovoltaico em uma célula fotovoltaica.	20
Figura 6 - Principais tecnologias de células fotovoltaicas existentes.	22
Figura 7 - Ilustração esquemática de uma célula DSSC clássica e seu mecanismo de funcionamento, em que a letra D representa o corante (dye) e BC a banda de condução.....	23
Figura 8 - Filmes Fotovoltaicos Orgânicos (OPV).....	24
Figura 9 - Esquema representando as diferentes estruturas em que as células solares de perovskitas são montadas.....	26
Figura 10 - Átomos de carbono ligados em uma estrutura de “favo de mel”.	27
Figura 11 - Estrutura de rede do grafeno (a); Zona de Brillouin (b); Os três primeiros vizinhos dos átomos A e B (c).....	27
Figura 12 - Figura ampliada das bandas de energia para os pontos de Dirac.	28
Figura 13 - Estrutura de rede de uma bicamada de grafeno com parâmetros de hopping (a); Zona de Brillouin (b).	29
Figura 14 – (a) Mapeamento de eficiência das PSCs. (b) Diagrama esquemático da estrutura cristalina de perovskita de halogeneto orgânico – inorgânico. (c) Diagramas esquemáticos das estruturas de dispositivos das PSCs: estrutura planar n-i-p (esquerda), estrutura mesoscópica n-i-p (meio), estrutura planar p-i-n (direita).....	32
Figura 15 – Estrutura esquemática da célula solar e a interação entre NDi-grafeno e filmes de perovskita.	34
Figura 16 - Imagem ilustrativa do processo de transferência utilizando o método de microesfoliação mecânica do HOPG (a); O resultado é depositado sobre um substrato de silício com 300nm de camada oxidada (b).	37
Figura 17 - Grafeno esfoliado micromecanicamente. Imagens de microscopia óptica de (a) grafite, (b) grafeno de poucas camadas (FLG) e grafeno. Cores amareladas indicam amostras mais grossas enquanto contrastes azulados e mais claros indicam amostras mais finas.	37
Figura 18 - Esquema de um sistema CVD.....	39
Figura 19 - Processo de esfoliação química.....	40
Figura 20 - Representação do carbeto de silício (SiC) sublimando e o carbono aderindo-se a superfície do substrato.....	42

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	3
AGRADECIMENTOS	4
RESUMO	5
ABSTRACT	6
1. INTRODUÇÃO	9
1.2 OBJETIVO	10
1.3 METODOLOGIA	10
2 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	12
2.1 Origem da Energia Solar Fotovoltaica	12
2.2 O Histórico da Energia Solar Fotovoltaica	13
2.3 ASPECTOS E CONSIDERAÇÕES DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	16
3 SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO	18
3.1 Componentes Básicos Do Sistema Fotovoltaico	18
3.1.1 Propriedades dos Semicondutores Fotovoltaicos e seu Papel no Funcionamento do Sistema.	18
3.1.2 Células Fotovoltaicas	20
3.1.2.1 Células de Primeira Geração	22
3.1.2.2 Células de Segunda Geração	24
3.1.2.3 Células de Terceira Geração	24
4. O GRAFENO E SEUS DERIVADOS PARA APLICAÇÃO EM CÉLULAS SOLARES	27
4.1 Estrutura do Grafeno	27
4.2 Propriedades do Grafeno	29
4.3 As Potencialidades dos Derivados do Grafeno na Tecnologia Fotovoltaica.	29
4.4 Grafeno em Células Solares de Silício Cristalino	30
4.5 Grafeno em Células Solares de Perovskita.	32
5. SINTETIZAÇÃO DO GRAFENO	36
5.1 Microesfoliação.	37
5.2 Deposição Química em Fase Vapor (Chemical Vapor Deposition – CVD)	39
5.3 Esfoliação Química em Fase Líquida do Grafite	40
5.4 Crescimento de Grafeno Epitaxial em SiC	42
6 CONCLUSÃO	43
REFERÊNCIAS	44
FOLHA DE ASSINATURAS	51

1. INTRODUÇÃO

1.1. JUSTIFICATIVA

A busca por soluções diante da crescente demanda por energia e da exaustão dos recursos energéticos limitados e prejudiciais tem impulsionado uma crise energética em escala global. A utilização de combustíveis fósseis como o petróleo e o carvão mineral para a geração de energia, está se tornando cada vez mais escassa e onerosa, representando também uma ameaça significativa ao meio ambiente.

Nesse contexto, torna-se imperativo o desenvolvimento de novos modelos energéticos sustentáveis, visando a produção de energia limpa e renovável. Essas fontes de energia, predominantemente provenientes de recursos naturais, como o vento, a água e a energia solar, são essenciais para enfrentar os desafios energéticos atuais.

Os esforços e investimentos na pesquisa e inovação dos modelos de fontes energéticas renováveis estão direcionados primordialmente para a melhoria dos processos já existentes. Isso inclui o desenvolvimento de novos materiais, com o objetivo de aumentar a eficiência dos equipamentos utilizados na geração de energia renovável.

Um exemplo notável dessa abordagem é a adaptação dos componentes das placas fotovoltaicas, com o intuito de elevar a produção de energia solar de maneira mais eficaz. Nesse contexto, destaca-se o Grafeno como um material promissor, capaz de absorver e conduzir os raios solares de forma mais eficiente, contribuindo assim para o avanço das tecnologias solares renováveis.

Os painéis solares representam um conjunto de módulos compostos por várias células fotovoltaicas, as quais são as unidades fundamentais responsáveis por converter a energia luminosa em energia elétrica. Atualmente, os painéis solares feitos com base em silício monocristalino e policristalino são os mais difundidos devido à sua ampla disponibilidade no mercado, custo acessível e eficiência de conversão, além de possuírem um tempo de vida útil estimado em 25 anos (GÓES & TANIMOTO, 2020). No entanto, há um crescente investimento em pesquisa e desenvolvimento de novos materiais para os sistemas de geração de energia solar fotovoltaica, visando aprimorar a eficiência, prolongar o tempo de vida útil, reduzir os custos de produção e utilizar materiais ambientalmente seguros e não tóxicos (GÓES & TANIMOTO, 2023).

Este estudo se propõe a realizar uma revisão bibliográfica abrangendo as propriedades do grafeno e sua aplicação nas tecnologias de painéis solares, com o intuito de destacar sua eficiência energética. A pesquisa foi conduzida de forma bibliográfica, exploratória e qualitativa, utilizando os principais repositórios acadêmicos, tais como SciELO,

ResearchGate, Academia.edu, Scopus e Google Scholar.

A análise permitiu que se compreendessem as características fundamentais do grafeno e as tecnologias empregadas em diversos tipos de painéis solares, incluindo aqueles à base de silício cristalino, células orgânicas sensibilizadas por corantes e perovskitas. Foi observado como o grafeno exerce uma influência positiva em diferentes nichos dessas células solares, contribuindo para elevar o desempenho delas. A intenção era que, ao invés de substituir as tradicionais células fotovoltaicas de silício, que atualmente predominam no mercado, o grafeno fosse explorado como um recurso para otimizar o desempenho dos dispositivos já existentes.

1.2 OBJETIVO

O propósito deste estudo é examinar o estágio atual da utilização do grafeno como uma forma para aumentar a eficiência energética em painéis solares fotovoltaicos, em uma comparação direta com os painéis fotovoltaicos convencionais. Busca-se uma abordagem abrangente que inclua uma contextualização histórica e uma análise do panorama contemporâneo da energia solar fotovoltaica. Pretende-se também explorar minuciosamente o potencial de emprego do grafeno nesse contexto, destacando suas características distintivas e realizando uma avaliação crítica de sua eficácia como recurso energético.

1.3 METODOLOGIA

A metodologia empregada neste estudo compreende, primeiramente, uma revisão bibliográfica abrangente, fundamentada em fontes diversas, incluindo periódicos científicos, artigos apresentados em conferências e congressos de reconhecimento internacional, trabalhos de conclusão de curso (TCC) de graduação, dissertações de mestrado e teses de doutorado de instituições de ensino superior, tanto públicas quanto privadas, que disponham de certificação digital. O período considerado para a seleção dessas fontes abrange publicações a partir de 2003, com o intuito de explorar a aplicação do grafeno em placas fotovoltaicas orgânicas como uma estratégia para o aumento da eficiência energética.

A metodologia empregada na elaboração deste estudo foi delineada segundo o fluxograma apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Fluxograma do Método.



Fonte: Autora (2024).

Os parâmetros e os indicadores deste estudo são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Variáveis e Indicadores

Variáveis	Indicadores
Células Fotovoltaicas	Energia solar
	Placas Fotovoltaicas Orgânicas
	Funcionamento
	Revestimento
Grafeno	Estrutura cristalina
	Estrutura eletrônica
	Características
	Propriedades
	Formas de sintetização
	Aplicações

Fonte: Autora (2024).

As expressões-chave utilizadas para a busca das referências bibliográficas empregadas neste estudo foram: "células solares fotovoltaicas", "painéis fotovoltaicos orgânicos", "módulos fotovoltaicos", "painéis solares fotovoltaicos", "energia solar fotovoltaica", "crise energética global", "grafeno", "síntese de grafeno", "propriedades do grafeno", "características do grafeno", e outras similares. Essas pesquisas foram realizadas em plataformas reconhecidas de publicações acadêmicas, incluindo SciELO, ResearchGate, Academia.edu, Scopus e Google Scholar, entre outras, para garantir uma ampla seleção de referências relevantes para o tema abordado.

2 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

2.1 Origem da Energia Solar Fotovoltaica.

O fenômeno fotovoltaico foi identificado em 1839 pelo cientista francês Edmond Becquerel, que observou a geração de uma diferença de potencial em uma célula eletroquímica quando exposta à luz (LIMA et al., 2020).

Em 1877, Adams e seu aluno Richard Day foram os pioneiros ao conceberem e construírem a primeira célula solar, utilizando selênio, alcançando uma eficiência inicial de aproximadamente 0,5%. Logo em seguida, Charles Fritts, em 1878, elevou essa eficiência ao duplicá-la, também empregando selênio, porém adotando uma abordagem diferente: uma pastilha de selênio entre duas camadas finas de metal (ANDREEV, V.M. et al., 2012; BREVE HISTÓRIA DA ENERGIA SOLAR, s.d.; ENGANA CARMO et al., 2021).

Posteriormente, em 1883, Fritts deu um passo adiante no desenvolvimento da tecnologia solar ao criar a primeira bateria solar feita com folhas de selênio. Embora essa bateria tivesse uma eficiência modesta, atingindo apenas 1%, seu desenvolvimento teve um impacto significativo. Naquela época, a ideia de gerar energia sem queimar combustíveis era algo quase inimaginável (MACHADO et al., 2014).

A Era Moderna da energia solar teve início em 1954, marcada pelo desenvolvimento do processo de dopagem de silício por Calvin Fuller e pela criação da célula solar moderna por Russell Shoemaker Ohl, após uma série de eventos importantes, incluindo o Prêmio Nobel concedido a Albert Einstein (SILVA, s.d.).

A teoria fotoelétrica foi desenvolvida por Albert Einstein em 1905, propondo conceitos anteriormente sugeridos por Max Planck. Essa teoria descreve a relação entre as ondas de luz e os fótons, que são os *quanta* de luz, bem como a relação entre a energia dos fótons e sua frequência, uma relação linear cuja constante de proporcionalidade é a constante de Planck. Em reconhecimento a essa contribuição, Einstein recebeu o Prêmio Nobel de Física em 1921 (NOBELPRIZE.ORG, s.d.). A citação da Academia do Prêmio Nobel destaca que Einstein explicou que a luz é composta por quanta, ou "pacotes", com energias fixas correspondentes a certas frequências, e que um fóton, um desses quanta de luz, deve ter uma frequência mínima para liberar um elétron. Este prêmio foi concedido a Einstein por seus serviços à Física Teórica e especialmente por sua descoberta da lei do efeito fotoelétrico (NOBELPRIZE.ORG, s.d.).

Altas eficiências foram relatadas quando o selênio foi substituído pelo silício. Em 1939, Russell Ohl foi responsável pela descoberta das regiões do tipo n e p no silício e do efeito fotoelétrico nas junções pn. Essa inovação abriu portas para o surgimento de outras tecnologias, sem as quais não teríamos a sociedade e o conhecimento atuais, como o transistor e a célula

fotovoltaica (OHL, 1946; NOKIA BELL LABS, s.d.; SILVA, s.d.). A Tabela 1 apresenta diferentes modelos de células fotovoltaicas, suas eficiências e custos.

Tabela 2 - Exemplos de Células Fotovoltaicas.

Tipo de célula	Eficiência (%)			Custo (US\$/Wp)
	Teórica	Laboratório	Comercial	
Silício de cristal simples	30,0	24,7	12 a 14	4 a 7
Silício concentrado	27,0	28,2	13 a 15	5 a 8
Silício policristalino	25,0	19,8	11 a 13	4 a 7
Silício amorfo 17,0	13,0	4 a 7	3 a 5	-

Fonte: Nascimento (2004).

Em 1940, Ohl desenvolveu, no Bell Labs, a primeira célula solar de silício, denominada na época como dispositivo elétrico sensível à luz. Ele anunciou a primeira célula fotovoltaica durante uma reunião da National Academy of Sciences, inaugurando o uso prático dos painéis solares em 1958. Além disso, Ohl patenteou o sistema fotovoltaico moderno. O sucesso dessas inovações foi possível graças ao trabalho de Calvin Fuller, Gerald Pearson e Daryl Chapin, cientistas do laboratório Bell Labs (OHL, 1946; NOKIA BELL LABS, s.d.; SILVA, s.d.)

Apesar disso, foi somente em 1954 que Calvin Fuller, químico do Bell Labs, desenvolveu um processo fundamental para dopar silício. Essa inovação foi crucial para a criação da primeira junção pn (diodo). Gerald Pearson, colega de Fuller, contribuiu significativamente ao imergir uma barra de silício dopada em lítio, resultando na descoberta de propriedades fotovoltaicas e uma eficiência surpreendente de 6% para dopantes de boro e arsênico. Fuller liderou o desenvolvimento do processo de dopagem do silício, enquanto Pearson focou na estabilização das placas de silício. Daryl Chapin, outro membro da equipe, direcionou seus esforços para encontrar uma fonte de energia alternativa para baterias usadas em redes telefônicas remotas. Finalmente, em 1955, células de silício foram pela primeira vez empregadas como fonte de alimentação em uma rede telefônica na Geórgia, Estados Unidos (ANDREEV, V.M. et al., 2012; BREVE HISTÓRIA DA ENERGIA SOLAR, s.d.; NOKIA BELL LABS, s.d.; SILVA, s.d.).

2.2 O Histórico da Energia Solar Fotovoltaica

A corrida espacial desempenhou um papel crucial no avanço da tecnologia fotovoltaica, evidenciando sua crescente importância como fonte de energia renovável (ANDREEV, V.M. et al., 2012; OHL, 1946). Embora as aplicações públicas fossem desejadas, a falta de processos de fabricação otimizados e o alto custo de comercialização representaram desafios

significativos a serem superados para impulsionar esse campo. Ao longo do tempo, a energia solar fotovoltaica passou por evoluções e modernizações, conforme detalhado por Silva (2024). apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 – Resumo histórico da evolução da captação de energia solar fotovoltaica

1839: Descoberta do efeito fotovoltaico - A pesquisa pioneira que resultou na descoberta da tecnologia fotovoltaica foi conduzida pelo físico francês Alexandre Edmond Becquerel em 1839, quando ele identificou o fenômeno conhecido como efeito fotovoltaico.

1883: Primeira célula fotovoltaica - Em 1883, Charles Fritts, um inventor de Nova York, desenvolveu a primeira célula fotovoltaica feita de selênio revestido de ouro, marcando um avanço significativo na tecnologia. Essa célula pioneira permitia a geração de uma corrente contínua constante para a conversão elétrica, alcançando uma eficiência máxima de 1%. Atualmente, graças ao progresso tecnológico, as células fotovoltaicas alcançam eficiências de até 20%, impulsionando a adoção de energia solar em larga escala. Além disso, os cientistas do Bell Laboratories fabricaram células fotovoltaicas de silício, com uma conversão de 6%, contribuindo para expandir o potencial dessa fonte de energia limpa e renovável.

1905: Descoberta do efeito fotoelétrico - Apesar de ter sido aclamado como um pioneiro na descoberta do efeito fotoelétrico, em 1905, Albert Einstein não foi o primeiro a identificá-lo. Seus experimentos, na verdade, serviram para modernizar e aprimorar os conceitos já conhecidos, demonstrando a emissão de elétrons de uma superfície quando esta interage com uma onda eletromagnética, formando o efeito fotoelétrico. A verdadeira descoberta desse fenômeno foi feita pelo físico Heinrich Hertz em 1887.

1922: Prêmio Nobel para Einstein sobre o efeito fotoelétrico - Einstein não apenas via um raio de luz como uma mera onda contínua, mas sim como uma fonte intrínseca de energia. Seus estudos sobre o assunto culminaram em 1922, quando o físico foi agraciado com o Prêmio Nobel de Física por sua contribuição significativa no campo do efeito fotoelétrico.

1930: Teoria do efeito fotovoltaico - A teoria do efeito fotovoltaico foi estabelecida por Schottky, que posteriormente desenvolveu a primeira célula fotovoltaica prática de mono-silício. O reconhecimento de sua teoria abriu caminho para a utilização de painéis solares no espaço em 1958.

1932: Descoberta do efeito fotovoltaico no seleneto de cádmio (CdSe) - Ainda utilizado nos dias de hoje, o material empregado na geração do efeito fotovoltaico, composto por seleneto de cádmio (CdSe), foi descoberto por Audobert e Stora em 1932. Esta descoberta foi um marco importante no avanço da tecnologia fotovoltaica, proporcionando uma base sólida para o desenvolvimento contínuo de células solares eficientes e sustentáveis.

1954: Processo da dopagem de silício - Em 1954, o químico Calvin Fuller, do Bell Laboratories, nos Estados Unidos, desenvolveu o processo de dopagem do silício, um avanço que marcou o início da era moderna da história da energia solar. Além disso, Fuller compartilhou sua descoberta com o físico Gerald Pearson, que contribuiu com melhorias significativas para o experimento.

1954: Criação da célula solar moderna - Embora sua origem remonte a 1839, a energia solar foi objeto de estudo por muitos anos antes da aplicação de técnicas para o desenvolvimento de suas células. Um marco significativo nesse processo foi alcançado pelo cientista Russell Shoemaker Ohl em 1954, com a criação da denominada "célula solar moderna", inaugurando uma nova era na utilização prática da energia solar.

1958: Início das utilizações de painéis solares - O advento das aplicações dos painéis solares foi notável. Em 1958, um painel de 1 W foi acoplado ao satélite Vanguard I, enviado ao espaço para fornecer energia ao seu rádio durante a missão. Esse marco impulsionou o desenvolvimento dos primeiros sistemas fotovoltaicos para residências, estabelecimentos comerciais e até mesmo para meios de transporte, incluindo ônibus, navios e aviões.

1976: Criação da primeira célula de silício amorfo - Em 1976, os engenheiros David Carlson e Christopher Wronski, dos laboratórios RCA, introduziram a primeira célula de silício amorfo, com uma eficiência de 1,1%.

1992: Criação de célula de filme fino - Em 1992, na Universidade da Flórida do Sul, alcançamos um marco significativo no desenvolvimento da tecnologia fotovoltaica com a criação de uma célula de filme fino, atingindo uma eficiência notável de 15,89%.

1994: Primeira célula solar que superou em 30% a eficiência de conversão - O National Renewable Energy Laboratory (NREL), conhecido como Laboratório Nacional de Energia Renovável, desenvolveu a pioneira célula de gálio fosforeto de índio/arsenieto de gálio (GaInP/GaAs), capaz de concentrar 180 sóis, estabelecendo um novo patamar ao superar em 30% a eficiência de conversão.

1999: Capacidade fotovoltaica total instalada no mundo atinge os 1.000 megawatts - Em 1999, a capacidade total de instalação de energia fotovoltaica atingiu um marco global de 1.000 megawatts (MW).

2000: Utilização de sistemas fotovoltaicos conectados à rede - Em 2000, testemunhamos a implementação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede (on-grid) em muitos países desenvolvidos, visando fornecer energia à rede elétrica convencional. Com essa iniciativa, a produção anual mundial de células fotovoltaicas aumentou para 4.200 MWp.

2006: Novo recorde ao obter uma célula solar com 40% de eficiência - Em 2006, testemunhamos um marco significativo na indústria solar, quando a utilização de células solares de polissilício alcançou paridade com as demais tecnologias fotovoltaicas.

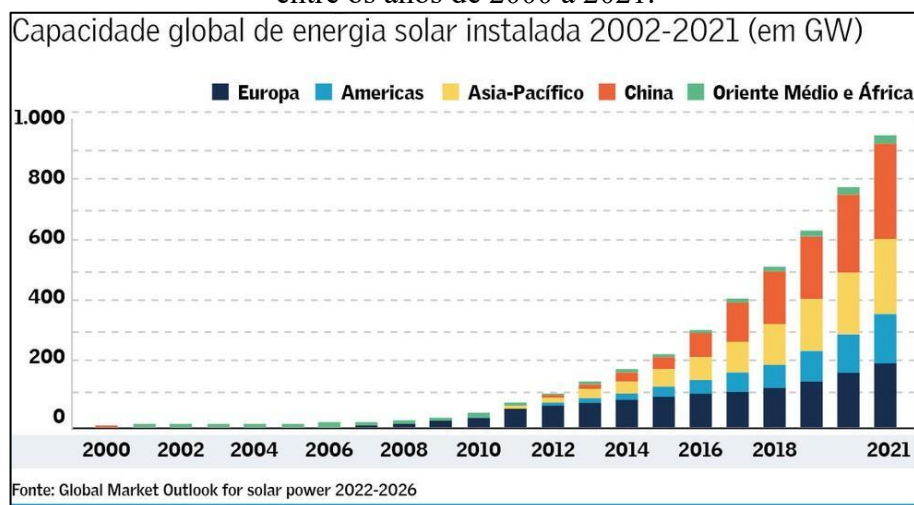
2011: Crescimento das fábricas solares na China, reduzindo custos de fabricação - Em 2011, testemunhamos um rápido crescimento das fábricas solares chinesas, reduzindo os custos de fabricação para menos de US\$1.25 por watt em cada módulo fotovoltaico de silício produzido. Esse avanço contribuiu significativamente para a expansão das instalações solares em todo o mundo.

2012: Regulamentação da RN 482 da Aneel - Em abril de 2012, a Aneel instituiu a Resolução Normativa nº 482, que estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, bem como o sistema de compensação de energia elétrica. Essa resolução permite a qualquer consumidor gerar sua própria energia renovável conectada à rede de distribuição, acumulando créditos energéticos. Além disso, autoriza os critérios necessários para a conexão à rede de sistemas de energia solar.

2015: Resolução Normativa 687/2015 pela Aneel - Com o intuito de aprimorar a Resolução Normativa 482/2012, em 2015, a Aneel estabeleceu que geradores com potência de até 75 kW seriam categorizados como microgeração de energia fotovoltaica, enquanto aqueles com potência superior a 75 kW e até 5 MW seriam considerados minigeração. Adicionalmente, foram criadas modalidades para a geração distribuída de energia, incluindo o autoconsumo remoto, geração compartilhada e empreendimentos com múltiplas unidades consumidoras, como a geração em condomínios.

Já a Figura 2 ilustra evolução da capacidade instalada de acumulada de energia fotovoltaica, por continente ou país entre os anos 2000 e 2021, segundo Chiaretti (2022).

Figura 2 - Evolução da capacidade instalada acumulada de potência fotovoltaica (em MW), entre os anos de 2000 a 2021.



Fonte: Chiaretti (2022).

2.3 ASPECTOS E CONSIDERAÇÕES DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

As Nações Unidas lançaram os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) em 2015, por meio do documento intitulado “Transformando o nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável”. A tecnologia fotovoltaica demonstra sua capacidade transformadora ao ser relacionada a esses objetivos. Em um total de 17 metas, a energia fotovoltaica pode ser facilmente associada a três delas: o 7º (Energia Limpa e Acessível), o 11º (Cidades e Comunidades Sustentáveis) e o 13º (Ação Climática) (NAÇÕES UNIDAS, s.d.).

Segundo Alves (2016), em seu trabalho, destacam-se diversas características e vantagens da energia solar fotovoltaica:

- Possibilidade de viabilização da geração de energia no próprio local de consumo, encurtando a distância entre produção e utilização de eletricidade, especialmente em microgeração e minigeração, reduzindo a dependência de extensas redes de distribuição;
- Eliminação da necessidade de extensas linhas de transmissão, sobretudo em contextos residenciais, o que resulta na redução de perdas e investimentos em infraestrutura;
- Aptidão para suprir sistemas de eletrificação em comunidades remotas e atender às necessidades energéticas de instalações em áreas urbanas, conectadas à rede pública de distribuição;
- Integração harmoniosa dos módulos fotovoltaicos com as estruturas edificadas, especialmente em telhados, dispensando a alocação de espaços dedicados para instalação dos painéis;

- e) Utilização flexível para complementar ou suprir totalmente a demanda energética, com a possibilidade de exportar excedentes de produção;
- f) Apesar do emprego de alta tecnologia na fabricação, sua utilização é relativamente simples;
- g) Alternativa limpa e segura, com baixo impacto ambiental, ideal para prover eletricidade a comunidades isoladas;
- h) Modularidade avançada, que permite a expansão da capacidade instalada por meio da adição de novos módulos, com instalação ágil;
- i) Fonte energética renovável e ecologicamente responsável, alinhada aos princípios da sustentabilidade ambiental e isenta de ruídos;
- j) Necessidade de baixa manutenção e operação autônoma com eficiência satisfatória.

Nos últimos anos, a energia fotovoltaica (FV), também conhecida como Produção Fotovoltaica (PV) solar, passou de um nicho de mercado de pequenas aplicações para uma fonte de eletricidade amplamente difundida. Uma célula solar é um dispositivo que converte luz diretamente em eletricidade usando o efeito fotoelétrico (PINHO et al., 2014). A captação da luz solar ocorre por meio de placas fotovoltaicas instaladas em fachadas, telhados ou coberturas das edificações. Em grandes centros de geração, as placas são interligadas para formar usinas fotovoltaicas. Os sistemas fotovoltaicos utilizam dispositivos controladores e conversores, podendo incluir baterias ou conexão direta à rede elétrica. Eles são destinados à eletrificação rural ou de áreas não atendidas pelas concessionárias locais, além de servirem como complementação energética para consumidores conectados à rede convencional (ALVES, 2016).

3 SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO

3.1 Componentes Básicos Do Sistema Fotovoltaico

3.1.1 Propriedades dos Semicondutores Fotovoltaicos e seu Papel no Funcionamento do Sistema.

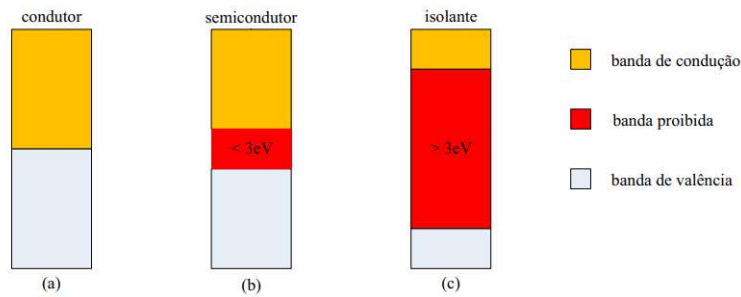
Um sistema fotovoltaico é composto por três blocos principais: um bloco gerador, um bloco de condicionamento de potência e, em algumas configurações, um bloco de armazenamento. O bloco gerador abriga os arranjos fotovoltaicos, que consistem em módulos fotovoltaicos organizados em diferentes configurações, juntamente com o cabeamento elétrico que os conecta e a estrutura de suporte. O bloco de condicionamento de potência pode incluir conversores CC-CC, seguidores do ponto de potência máxima (SPPM), inversores, controladores de carga (no caso de armazenamento) e outros dispositivos de proteção, supervisão e controle. Por fim, o bloco de armazenamento é composto por acumuladores elétricos (baterias) e/ou outras formas de armazenamento.

A geração de energia elétrica a partir da energia solar é viabilizada pela diferença de potencial criada pelo efeito fotovoltaico nos semicondutores. Em outras palavras, quando uma célula fotovoltaica é exposta à luz solar, ocorre um fluxo de elétrons dentro de um circuito elétrico (ALMEIDA, 2015). Segundo Souza (2017), o funcionamento é assegurado pelas propriedades intrínsecas e essenciais dos materiais semicondutores, tais como a existência de uma banda de valência completamente preenchida e uma banda de condução sem elétrons, a uma temperatura de zero absoluto (0K), o que é conhecido como gap de energia.

Os elementos pertencentes a esse grupo estão localizados nas classes 14 a 16 da tabela periódica, incluindo o Carbono (C), Silício (Si), Selênio (Se), Telúrio (Te) e outros.

Para compreender as propriedades necessárias para o efeito fotovoltaico, Pinho et al. (2014) realizaram um estudo detalhado da estrutura atômica desses elementos. Na Figura 3, é apresentada a diferenciação entre as bandas de condução e de valência em diversas categorias de materiais.

Figura 3 - Estrutura de bandas de energia em (a) condutores, (b) semicondutores e (c) isolantes.

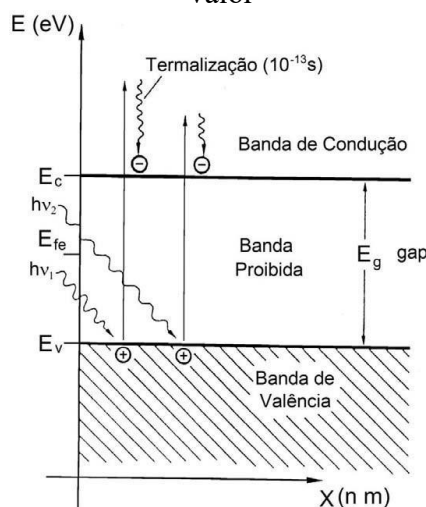


Fonte: Pinho et al. (2014).

De acordo com Pinho et al. (2014), a distância entre essas bandas é significativa, pois os elétrons tendem a ocupar preferencialmente os níveis de energia na parte inferior da banda de condução, enquanto as lacunas são encontradas nos níveis superiores. Por conseguinte, a largura do intervalo de energia dos semicondutores pode chegar a até 3eV. Como resultado, quando os elétrons da banda de valência são excitados para a banda de condução, ocorre um aumento na temperatura e uma mobilidade dos elétrons dentro do material, resultando em um aumento na condutividade elétrica. Esse fenômeno é denominado efeito fotocondutivo (SOUZA, 2017).

Outra característica essencial, conforme descrito por Fadigas (2012), é a excitação dos elétrons para a banda de condução por meio de fótons em uma faixa de luz visível, como ilustrado na Figura 4.

Figura 4 - Geração de pares elétron-lacuna pela incidência de fótons no material semicondutor, chamado efeito fotocondutivo: E_c – nível inferior de energia da banda de condução; E_v – nível máximo de energia na banda de valência; E_{fe} – Nível de Fermi; E_g – valor



Fonte: Adaptado de (OLDENBURG, 1994)

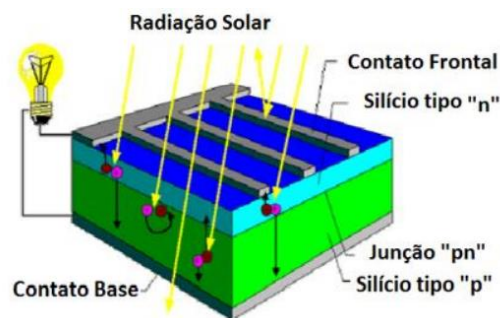
3.1.2 Células Fotovoltaicas

A célula fotovoltaica é essencial na configuração de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica, sendo parte crucial dos Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR). Existem duas principais configurações desses sistemas: os distribuídos e os centralizados. Os sistemas fotovoltaicos distribuídos são comumente associados a edificações, localizando-se próximo ao ponto de consumo (JANNUZZI, 2009). Também conhecidos como Sistemas Integrados à Edificação (SFIE), esses sistemas são integrados à estrutura do prédio. Os sistemas fotovoltaicos centralizados são semelhantes a usinas fotovoltaicas, geralmente situados a certa distância dos pontos de consumo. Nesses sistemas, a energia gerada pode ser consumida diretamente pela carga ou injetada na rede elétrica para utilização por outras unidades consumidoras. É importante notar que os SFCR não demandam armazenamento de energia, como baterias, pois toda a energia produzida pode ser imediatamente utilizada ou distribuída na rede elétrica (JANNUZZI, 2009). Geralmente, esses sistemas complementam a fonte de energia do sistema elétrico ao qual estão conectados.

De acordo com Alves (2016), a célula fotovoltaica representa a essência de um sistema fotovoltaico, sendo o bloco fundamental para a conversão direta da energia solar em eletricidade. Para amplificar a quantidade de energia disponível, é comum agrupar várias células, já que individualmente elas produzem uma quantidade limitada de energia elétrica. Esses agrupamentos são denominados de módulos, placas ou painéis fotovoltaicos, sendo conjuntos interligados de células fotovoltaicas encapsuladas e conectadas eletricamente para atingir os parâmetros desejados de corrente e tensão.

As células fotovoltaicas representam o fundamento dos sistemas fotovoltaicos, caracterizando-se por junções PN, compostas por cristais P e N. Esses cristais são predominantemente fabricados a partir de silício dopado com impurezas de fósforo e boro, conforme a natureza desejada. No contexto das junções PN, a segregação das cargas negativas e positivas ocorre de maneira diferenciada, gerando um campo elétrico permanente que inibe a livre circulação de elétrons entre os polos opostos (SILVA, 2016). A Figura 5 ilustra esquematicamente uma célula fotovoltaica.

Figura 5 - Representação simplificada do efeito fotovoltaico em uma célula fotovoltaica.



Fonte: Seguel (2009).

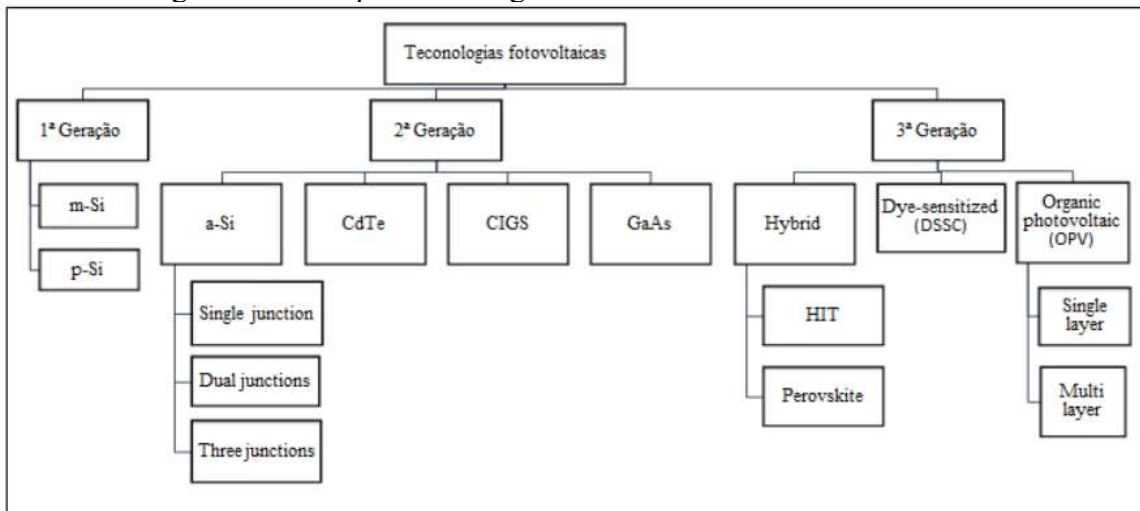
A vida útil estimada de um módulo fotovoltaico é de 24 anos. A eficiência desses módulos está intrinsicamente ligada às características do material semicondutor utilizado e à qualidade das conexões elétricas. No Brasil, a eficiência energética dos módulos é regulada pelo sistema de etiquetagem, conhecido como selo Procel de economia de energia. Comercialmente, a eficiência dos módulos fotovoltaicos é em torno de 15%, considerando que a energia solar atinge a superfície terrestre com uma média de 1000 W/m^2 (ALVES, 2016). Quanto a fabricação dos módulos existe basicamente duas configurações básicas:

- a) Aglomerado de células fotovoltaicas compostas por lâminas extremamente finas de silício cristalino, inseridas entre camadas de vidro e emolduradas com alumínio.
- b) Aplicação de uma camada de material semicondutor em estado de plasma sobre uma superfície rígida (como vidro) ou flexível, destinada a servir como base ou suporte para o material semicondutor. Posteriormente, o conjunto é revestido com outra camada de vidro ou material transparente. Essa configuração é conhecida como módulo de filme fino. Na primeira técnica, há uma predominância do uso de silício cristalino, enquanto na segunda, são utilizados silício amorfo ou compostos químicos como telureto de cádmio (CdTe), disseleneto de cobre, gálio e índio (CIS e CIGS).

No módulo, as células são interconectadas eletricamente e dispostas fisicamente em uma superfície rígida. Teoricamente, quando são necessárias maiores correntes de saída, as células são conectadas em paralelo, e quando a demanda é por maiores valores de tensão, as células são conectadas em série. Comercialmente, os módulos fotovoltaicos são fabricados a partir de células fotovoltaicas interligadas em série, para obter maiores tensões nas saídas dos módulos.

A associação de módulos fotovoltaicos ressalta a natureza modular da energia solar fotovoltaica, permitindo que os projetistas e/ou usuários personalizem as instalações conforme suas necessidades de orçamento ou espaço físico, e também facilitando a montagem e desmontagem dos arranjos de painéis em outras localidades. Os mais diversos tipos de materiais que compõem as células fotovoltaicas são mostrados na Figura 6.

Figura 6 - Principais tecnologias de células fotovoltaicas existentes.



Fonte: Adaptado de (KUMAR; KUMAR, 2017) e (OGBOMO et al., 2017)

As células fotovoltaicas de primeira geração, utilizando silício cristalino como base, são reconhecidas pelo seu elevado custo tanto na produção quanto na instalação. Por outro lado, as células de segunda geração apresentam uma tendência a custos mais baixos. Contudo, sua eficiência ainda não alcançou um patamar satisfatório para torná-las uma alternativa viável às células de silício cristalino. Além disso, muitas dessas células de segunda geração são compostas por materiais que podem ser tóxicos ou raros. No horizonte das células de terceira geração estão as tecnologias emergentes que ainda não estão amplamente disponíveis no mercado. Atualmente, essas células representam a perspectiva de combinar eficiência com custos mais acessíveis. Entre essas tecnologias, destacam-se as células orgânicas, as células solares sensibilizadas por corante (conhecidas como DSSC, sigla em inglês para dye-sensitized solar cell) e as células solares baseadas em pontos quânticos (quantum dots). Estas inovações promissoras abrem novas possibilidades para a geração de energia solar, buscando tornar a energia solar mais acessível e eficiente no futuro (KAMAT, 2008; SOLAR TECHNOLOGIES MARKET REPORT, 2010).

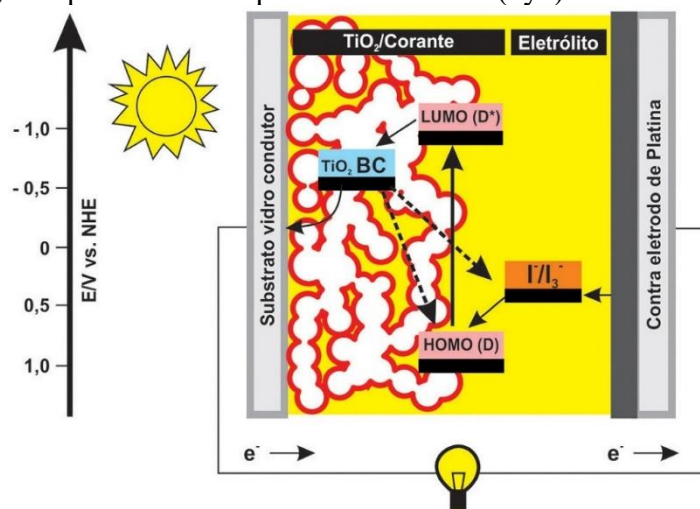
3.1.2.1 Células de Primeira Geração.

As células fotovoltaicas da primeira geração tiveram seus primeiros avanços a partir dos anos 50, e desde então, a tecnologia do silício tem sido dominante no mercado internacional devido à sua eficiência na conversão de energia solar e aos baixos custos de produção. Estas células são baseadas em wafers de silício com espessura entre 100 e 200 μm , provenientes de cortes em massa de silício de grau solar (BÜHLER; SANTOS; GABE, 2018). Existem duas principais categorias de células fotovoltaicas, dependendo do método de fabricação:

- a) Monocristalinas de Silício (m-Si), obtidas através do crescimento de um único cristal de alta pureza;
- b) Policristalinas de Silício (p-Si), produzidas a partir da solidificação de um bloco de silício fundido. Nesse processo, os cristais se orientam em direções variadas, resultando em lingotes quadrados de silício multicristalino. Estes lingotes são posteriormente cortados em blocos e, em seguida, em wafers (KUMAR; KUMAR, 2017).

Na Figura 7, são delineados os componentes fundamentais e o princípio operacional básico de uma célula DSSC convencional.

Figura 7 - Ilustração esquemática de uma célula DSSC clássica e seu mecanismo de funcionamento, em que a letra D representa o corante (dye) e BC a banda de condução.



Fonte: Sonai et al. (2015).

Este dispositivo é essencialmente composto por um fotoanodo, um contraeletrodo e um eletrólito líquido entre os eletrodos, que abriga um mediador redox. O fotoanodo é confeccionado por meio da deposição de uma camada de TiO_2 nanocristalino sobre um substrato de vidro condutor transparente, empregando óxido de estanho dopado com flúor (FTO) ou índio (ITO). A sensibilização deste filme nanocristalino de TiO_2 ocorre por intermédio de um corante baseado em complexos bipyridínicos de Ru(II) , tal como o N719 (cis-[$\text{RuL}_2(\text{NCS})_2$]:2TBA, onde L_2 = 2,2'-bipiridina-4,4'-dicarboxilato e TBA = Tetrabutylamônio). Por sua vez, o contraeletrodo é preparado mediante a deposição de uma camada fina de platina na superfície de um substrato de vidro condutor (SONAI et al., 2015).

3.1.2.2 Células de Segunda Geração.

A segunda geração das células fotovoltaicas apresenta um método de fabricação inovador, no qual finas camadas de material fotovoltaico são aplicadas sobre uma base, resultando no que é conhecido como Thin-film (filme fino). Essa base pode ser feita de vidro, plástico, cerâmica ou metal, proporcionando uma ampla versatilidade de aplicação. As camadas de Thin-film possuem uma espessura que varia de nanômetros (nm) a micrômetros (μm), conferindo-lhes leveza e flexibilidade. No processo de fabricação, é utilizado um volume reduzido de matéria-prima, o que torna o produto final mais acessível em termos de custo. Além disso, é possível aplicar as camadas de forma sequencial em um substrato, permitindo a criação de múltiplas camadas sobrepostas (OGBOMO et al., 2017). Essa abordagem oferece oportunidades significativas para a produção de células fotovoltaicas mais eficientes e economicamente viáveis. Na Figura 8, é apresentado um exemplo de filmes fotovoltaicos orgânicos (OPV):

Figura 8 - Filmes Fotovoltaicos Orgânicos (OPV)



Fonte: Rodrigues (2021).

3.1.2.3 Células de Terceira Geração.

As células fotovoltaicas de última geração, também conhecidas como terceira geração, estão atualmente em fase de pesquisa laboratorial, com uma presença ainda limitada no mercado. Dentro desse campo, diversas substâncias orgânicas estão sendo exploradas, incluindo os materiais orgânico-metálicos. Destacam-se entre elas a Dye-sensitized solar cell (DSSC), a Organic photovoltaic (OPV) e a Perovskite Solar Cell (OGBOMO et al., 2017).

A **célula solar sensibilizada por corante**, Dye-sensitized solar cell (DSSC), consiste em um ânodo foto-sensibilizado baseado em material semiconductor, um eletrólito e um cátodo foto-eletroquímico. Essas células combinam materiais orgânicos e inorgânicos, sendo caracterizadas por sua resistência mecânica, baixo custo de matérias-primas e facilidade de processamento.

Em comparação com as células de silício, as DSSCs são mais leves, podem ser produzidas em substratos flexíveis e podem adquirir colorações variadas conforme o corante utilizado (O'REGAN; GRÄTZEL, 1991). Apesar de seu processo de fabricação simples e custo reduzido, com uma eficiência de conversão de energia entre 8% e 14%, essas células são sensíveis às condições climáticas, têm uma vida útil de aproximadamente 10 anos e podem ser corrosivas e tóxicas se contiverem chumbo (OGBOMO et al., 2017).

As **células fotovoltaicas orgânicas**, conhecidas como Organic photovoltaic (OPV), são compostas por materiais orgânicos, tais como polímeros, pentaceno, ftalocianina de cobre, polifenileno vinileno e fulerenos de carbono. Esses materiais, também chamados de compostos de moléculas pequenas (com cerca de 100 nm), são fabricados por meio de impressão, o que os torna mais sustentáveis em termos ambientais (KUMAR; KUMAR, 2017). Apesar de serem econômicas e flexíveis para aplicações fotovoltaicas, as células OPV são suscetíveis à degradação ambiental na ausência de proteção eficaz (OGBOMO et al., 2017). No entanto, alcançam uma eficiência de conversão de energia superior a 11% quando utilizadas heterojunções, compostas por várias camadas de misturas de polímeros conjugados e derivados de fulereno solúveis. Essas células são sensíveis ao oxigênio e à água, o que pode reduzir sua eficiência de conversão de energia (KUMAR; KUMAR, 2017).

As **células solares híbridas** baseadas em perovskita, conhecidas como Perovskite Solar Cell, representam uma promissora alternativa devido à sua capacidade de produzir sistemas fotovoltaicos econômicos e eficientes. A estrutura da perovskita, descoberta por Lev Aleksevich Von Perovski (1792–1856), consiste em uma classe de materiais que inclui óxidos, nitretos, haletos e ternários, com propriedades físicas como magnetismo, supercondutividade e magnetorresistência (HERMES et al., 2015). A fabricação dessas células pode ser realizada por processos químicos, o que contribui para a redução de custos. A eficiência máxima relatada para essas células é de 19,7% (BÜHLER; SANTOS; GABE, 2018).

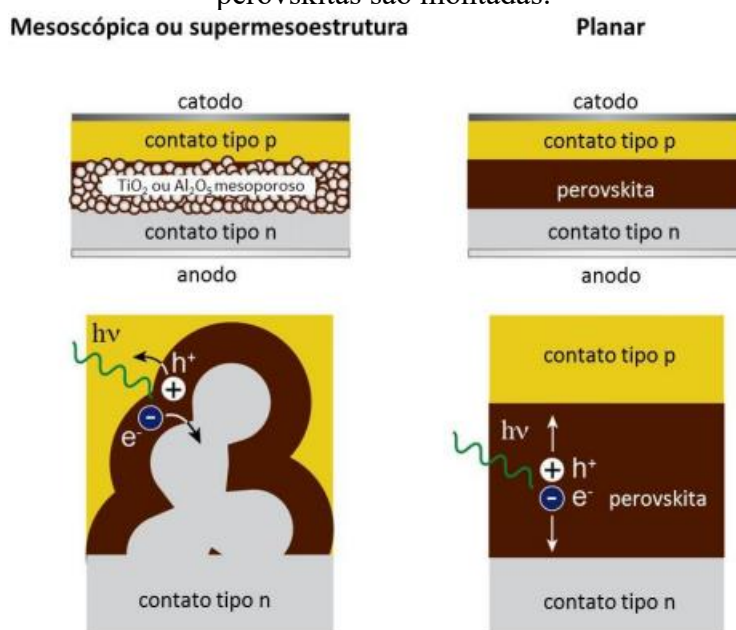
As células solares de perovskitas podem ser classificadas com base em suas arquiteturas, as quais se dividem em três categorias distintas: dispositivos planares, dispositivos mesoscópicos e super-mesoestruturas. Os dispositivos planares consistem em filmes de perovskitas planos, dispensando o uso da camada mesoporosa de suporte. Uma fina camada de óxido de titânio, geralmente depositada sobre o Óxido de estanho dopado com flúor (FTO), funciona como uma barreira de bloqueio de buracos, impedindo a recombinação com elétrons no FTO. Em seguida, a perovskita é depositada sobre a camada de óxido, formando um filme compacto e plano. Por fim, a camada condutora de buracos e os contatos elétricos são adicionados sobre a perovskita.

Os dispositivos mesoscópicos empregam uma camada mesoporosa sobre o filme compacto de óxido, geralmente composta por TiO_2 , para servir como suporte na fixação da perovskita.

Nessas células, os filmes de perovskita apresentam uma superfície rugosa e são compostos por grãos da ordem de micrômetros.

Por fim, as **células solares com super-mesoestruturas** utilizam filmes mesoporosos de Al_2O_3 em vez de óxidos semicondutores na camada mesoporosa. O Al_2O_3 atua apenas como um suporte para ancorar os filmes de $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$, sendo esta última responsável pelo transporte dos elétrons gerados. Um esquema representando os diferentes tipos de estruturas das células solares de perovskitas é ilustrado na Figura 9.

Figura 9 - Esquema representando as diferentes estruturas em que as células solares de perovskitas são montadas.



Fonte: Adaptado de Snaith e colaboradores.(SNAITH et al., 2014).

Atualmente, o mercado de células fotovoltaicas é dominado pelo silício mono e policristalino, apesar dos processos de fabricação complexos, custosos e ambientalmente tóxicos. As células solares de filme fino são dispositivos que podem ser fabricados por deposição física de vapor ou processos de impressão, com apenas alguns micrômetros de espessura. Elas requerem aproximadamente 100 vezes menos material semicondutor do que as células de silício. Se essas células conseguirem atingir eficiências suficientes, poderão representar uma redução significativa nos custos, nos processos e nos materiais, expandindo assim suas aplicações em áreas que demandam maior flexibilidade (HERMES et al., 2015).

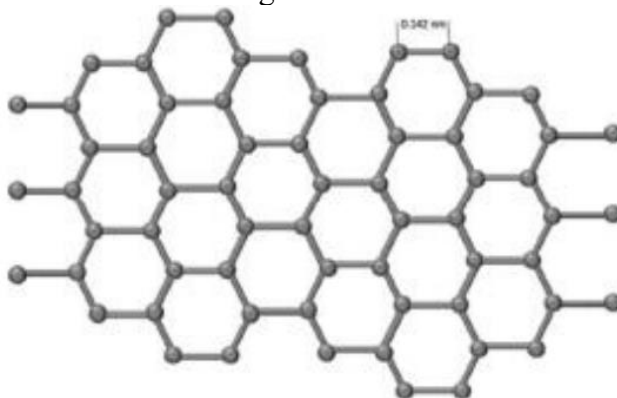
4. O GRAFENO E SEUS DERIVADOS PARA APLICAÇÃO EM CÉLULAS SOLARES

4.1 Estrutura do Grafeno

O grafeno, uma das formas alotrópicas do carbono, apresenta uma organização peculiar dos átomos, como descrito por Castro et al. (2009). Sua estrutura consiste em uma faixa de valência composta por orbitais s , p_x e p_y de hibridização sp^2 , estabelecendo ligações covalentes σ fortes, além de orbitais p_z perpendiculares ao plano, formando ligações π mais fracas que possibilitam o deslocamento ou a excitação dos elétrons na rede cristalina.

Devido à orientação dos átomos de carbono dentro da rede cristalina, o grafeno exibe características singulares, podendo ser considerado um material bidimensional com uma espessura atômica, formado por um arranjo hexagonal de seis átomos de carbono conectados por ligações σ , com uma distância interatômica de 0,142 nm entre outros três átomos de carbono distribuídos em anéis alternados e infinitos, conforme ilustrado na Figura 10 (Nascimento, 2012).

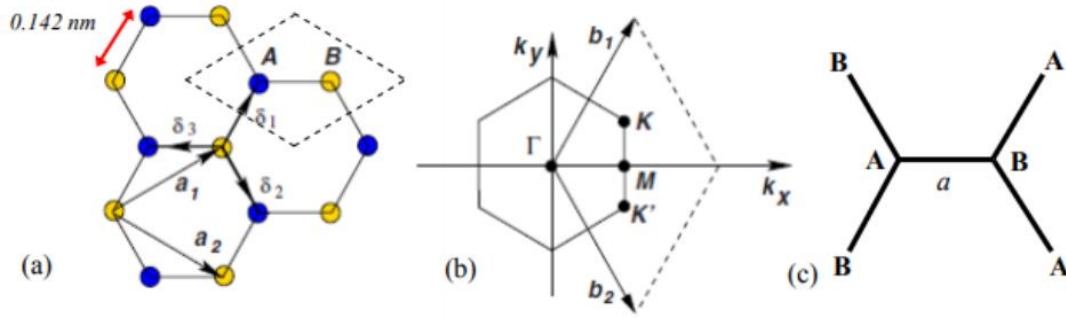
Figura 10 - Átomos de carbono ligados em uma estrutura de “favo de mel”.



Fonte: Phiri et al. (2017)

Uma análise mais detalhada revela que a estrutura do grafeno, comumente denominada de "favo de mel", apresenta semipreenchimento das bandas de elétrons e uma interconexão de duas redes de Bravais triangulares, conforme observado na Figura 11, de acordo com Geim et al. (2007).

Figura 11 - Estrutura de rede do grafeno (a); Zona de Brillouin (b); Os três primeiros vizinhos dos átomos A e B (c).



Fonte: Castro et al. (2009)

Os parâmetros da célula unitária, representados por $\vec{a}_1$, $\vec{a}_2$, $\vec{\delta}_1$, $\vec{\delta}_2$ e $\vec{\delta}_3$, bem como os vetores da rede recíproca $\vec{b}_1$, e $\vec{b}_2$, são essenciais para descrever a estrutura do grafeno no espaço recíproco, conforme expresso por equações cartesianas (1), (2) e (3) (Lima D., 2012).

$$a_1 = \frac{a}{2}(3, \sqrt{3}) \quad a_2 = \frac{a}{2}(3, -\sqrt{3}) \quad (1)$$

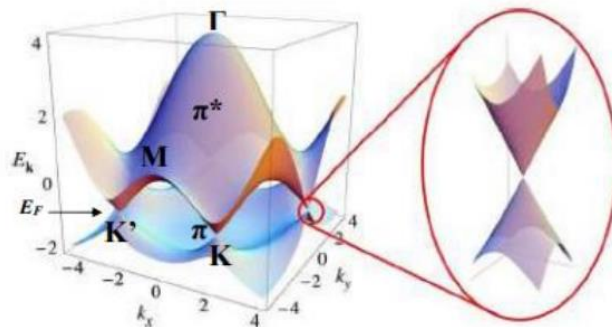
$$b_1 = \frac{2\pi}{3a}(1, \sqrt{3}) \quad b_2 = \frac{2\pi}{3a}(1, -\sqrt{3}) \quad (2)$$

$$\delta_1 = \frac{a}{2}(1, \sqrt{3}) \quad \delta_2 = \frac{a}{2}(1, -\sqrt{3}) \quad \delta_3 = -a(1, 0) \quad (3)$$

Sendo que o parâmetro $a \approx 1,42 \text{ \AA}$ é a distância representada na Figura 11(c) entre os átomos, $|\vec{a}_1| = |\vec{a}_2| = 2,46 \text{ \AA}$ representa o parâmetro de rede da folha do grafeno e $|\vec{b}_1| = |\vec{b}_2| = \frac{4\pi}{3a}$ é o parâmetro de rede da folha no espaço recíproco (GARCIA et al., 2009).

Além disso, é relevante destacar que a primeira zona de Brillouin da rede recíproca, delimitada pelos pontos K e K', representa uma região crucial na análise estrutural do grafeno, como discutido por Lima D. (2012). Esses pontos, conhecidos como pontos de Dirac, emergem como partículas sem massa e estão intimamente ligados à alta simetria do triângulo formado pelos pontos Γ MK de ZB, como evidenciado na Figura 12 (PARTOENS et al., 2006).

Figura 12 - Figura ampliada das bandas de energia para os pontos de Dirac.

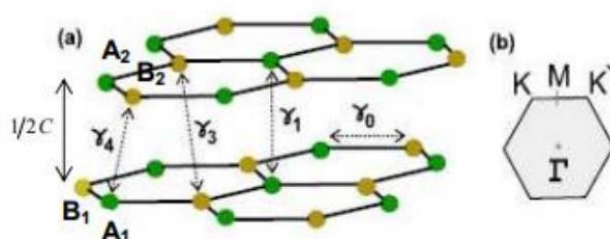


Fonte: Castro et al. (2009)

Essas características estruturais são fundamentais para compreender as propriedades do

grafeno, incluindo sua relação de dispersão, as interações entre elétrons em bicamadas e a energia de hopping (γ), como exemplificado na Figura 13 (Elias, 2009). Essa análise detalhada da estrutura do grafeno é essencial para explorar suas diversas aplicações e potenciais na ciência e na tecnologia moderna.

Figura 13 - Estrutura de rede de uma bicamada de grafeno com parâmetros de hopping (a); Zona de Brillouin (b).



Fonte: Castro et al. (2009)

4.2 Propriedades do Grafeno

A estrutura cristalina e eletrônica do grafeno confere-lhe uma série de propriedades singulares. As características elétricas e ópticas estão intimamente ligadas às ligações do tipo π , que proporcionam maior mobilidade aos elétrons na rede cristalina devido à natureza mais fraca dessas ligações, resultando em uma banda semipreenchida. Isso se traduz em notáveis parâmetros de condutividade elétrica da ordem de 2×10^4 S/cm, mobilidade eletrônica de 2×10^5 cm²/V.s, condutividade térmica de 5000 W/m.K, área superficial de 2600 m²/g e absorção de luz em torno de 2,3%, conferindo ao grafeno uma transparência quase total (SEGUNDO et al., 2015). Além das propriedades das ligações, o gap de energia nulo, previamente mencionado, desempenha um papel significativo na especificação do material. O contato entre os pontos de Dirac resulta em uma massa efetiva nula para os elétrons, permitindo que eles se movam a altas velocidades, aproximadamente 10^6 m/s, com mínima dissipação de energia próximo ao nível de Fermi (GARCIA et al., 2009).

Ao considerar essas características em conjunto com a baixa densidade de defeitos na estrutura do grafeno, conforme observado por Lee C. et al. (2008), evidencia-se um módulo de Young de 1TPa, resistência à tração de 130GPa com deformação de 0,25, resistência à ruptura de 42N/m e condutividade balística de $200.000 \text{ cm}^2 \text{V}^{(-1)} \text{s}^{-1}$.

4.3 As Potencialidades dos Derivados do Grafeno na Tecnologia Fotovoltaica.

Durante décadas, o desenvolvimento contínuo de dispositivos e tecnologias para a geração, armazenamento e aplicação eficaz da energia solar tem sido uma prioridade para impulsionar formas mais limpas de produção de energia. O Sol, como fonte abundante, segura, acessível e ecologicamente sustentável de energia, oferece a capacidade de ser diretamente convertido em eletricidade sem causar poluição ou danos ambientais significativos. Materiais fotovoltaicos e dispositivos desempenham um papel fundamental na conversão da luz solar em eletricidade por meio do efeito fotoelétrico.

De acordo com a Associação Europeia da Indústria Fotovoltaica (EPIA), mais de 50% dos países já adotaram energia solar como parte de suas fontes energéticas, com um impressionante total de 420 GW de sistemas fotovoltaicos instalados apenas em 2017, capazes de gerar 160 TWh de eletricidade por ano (EPIA, 2013).

Com suas propriedades ópticas e elétricas singulares, o grafeno emerge como um material de destaque para aplicações industriais e pesquisas fundamentais. Os materiais à base de grafeno têm sido amplamente estudados na tecnologia fotovoltaica (PV) devido a características como alta transparência óptica, mobilidade de portadores elevada, banda proibida de zero e resistência mecânica significativa. O grafeno oxide (GO), uma forma oxidada de grafeno com uma ou múltiplas camadas, e o óxido de grafeno reduzido (rGO) são os derivados do grafeno mais investigados. O processo de oxidação deixa diversos grupos funcionais, como hidroxila, epóxi/éter, carbonila e ácido carboxílico, em GO, conferindo-lhe características hidrofílicas e estabilidade em solventes protônicos e polares, facilitando a fabricação de compostos à base de grafeno. Além disso, os grupos de oxigênio abrem possibilidades de funcionalização do GO com uma variedade de materiais, como moléculas orgânicas e inorgânicas, para criar novas composições (MAHMOUDI et al., 2018).

Apesar das propriedades excelentes do grafeno, sua aplicação em dispositivos fotovoltaicos é diversificada, dependendo de sua resposta óptica. Por exemplo, folhas de grafeno (GSs) não apresentam fotoluminescência detectável (PL) e são insensíveis às condições aplicadas. Por outro lado, os pontos quânticos de grafeno de dimensão zero (0D) (GQDs) são nanomateriais fluorescentes com propriedades extraordinárias devido ao seu notável confinamento quântico e efeitos de borda, que podem desempenhar um papel importante na PL dos GQDs (MAHMOUDI et al., 2018).

4.4 Grafeno em Células Solares de Silício Cristalino.

No campo das células de silício cristalino, recentemente foi lançado o primeiro módulo de tecnologia de primeira geração com revestimento de grafeno em vidro, patenteado pela empresa ZNShine Solar, alcançando uma eficiência aproximada de 17%, que já é comparável

à eficiência obtida em painéis convencionais. Esses módulos incorporam células fotovoltaicas com diversas tecnologias, incluindo PERC, silício monocristalino e policristalino. O diferencial reside na utilização das propriedades físico-químicas do grafeno como revestimento do vidro frontal, visando a redução dos custos de manutenção.

Entre as vantagens desses módulos, destaca-se a capacidade de autolimpeza do vidro revestido, resultante das propriedades hidrofílicas dessa superfície, o que reduz a frequência necessária de limpeza das placas devido ao acúmulo de sujeira. Além disso, observa-se uma maior taxa de transmissão da luz (97,5%) em comparação com os vidros convencionais utilizados nos painéis solares, onde se estima que o percentual de transmissão da luz seja em torno de 80% para vidros transparentes, conforme documentado por Alves et al. (2008), o que resulta em menor reflexão e maior espectro de absorção da luz incidente sobre os módulos. Devido à alta capacidade de condução térmica do grafeno, nos módulos revestidos com esse material, o calor é dissipado de forma mais eficiente através das placas, minimizando assim a perda de eficiência devido a quedas na potência e na tensão, como documentado por Valvezan (2021).

No que diz respeito às células fotovoltaicas orgânicas (OPV), Genelhu (2019) explorou as aplicações de dispositivos à base de grafeno, como eletrodos transparentes, receptores de elétrons e transportadores de camadas em multijunções. Os nanocompósitos derivados do grafeno apresentam um grande potencial como substitutos dos filmes de solução sólida de óxido de estanho e índio (ITO), geralmente empregados nas placas solares (GENELHU, 2019). Isso se torna relevante devido ao aumento significativo no preço do índio, em torno de 900% em menos de 7 anos, devido à sua utilização intensiva em indústrias de dispositivos eletroeletrônicos, conforme documentado por Lima (2019). Além disso, os filmes de ITO são rígidos e não permitem aplicação em superfícies flexíveis, uma característica das células orgânicas (LOH,TONG &WU,2016).

Quanto ao uso do grafeno como cátodo de células solares sensibilizadas por corante (DSSC), estudos conduzidos por Hao et al. (2012) demonstraram que cátodos feitos de nanotubos de carbono podem substituir os materiais caros e frágeis à base de platina, usados tradicionalmente em células DSSC. Essas pesquisas indicam um caminho promissor para o desenvolvimento de novas tecnologias solares mais eficientes e acessíveis (JEON ET AL.,2015).

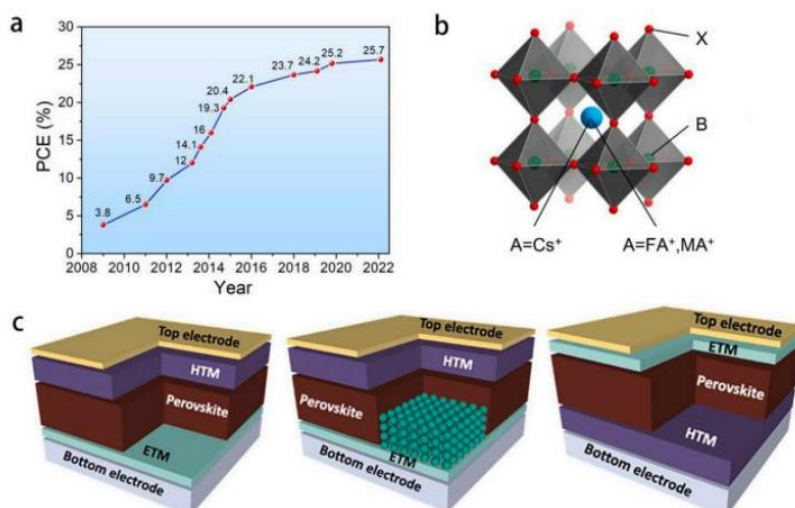
Ao analisar as vantagens econômicas e ambientais da implementação de tecnologias de grafeno nos painéis solares de silício e orgânicos, observa-se o potencial de redução dos custos de produção e dos impactos ambientais, especialmente no que diz respeito à diminuição do uso de componentes à base de metais pesados. A substituição dos eletrodos à base de estanho e índio, que são metais pesados tóxicos, por materiais à base de grafeno, pode ter um impacto significativo na redução dos danos ambientais e na saúde humana. Além disso, ao utilizar o

grafeno como revestimento nas células de silício, os custos de manutenção são reduzidos, e o aproveitamento da luz é otimizado, enquanto os riscos de microfissuras, que podem levar à diminuição da capacidade geradora da placa, são minimizados. Em relação aos impactos ambientais, o uso do grafeno na composição do vidro torna-o mais resistente a choques, e o uso de uma camada de vidro mais fina reduz a demanda por esse material da natureza. Além disso, a maior durabilidade das placas solares, resultante da redução dos riscos de microfissuras, pode prolongar sua vida útil e reduzir o acúmulo de resíduos provenientes de painéis descartados devido a danos irreparáveis, contribuindo assim para uma gestão mais sustentável dos recursos.

4.5 Grafeno em Células Solares de Perovskita.

As células solares de perovskita (PSCs) são fabricadas de maneira conveniente e eficiente, geralmente utilizando processos de baixa temperatura. Tipicamente, uma camada de perovskita é depositada entre um material de transporte de lacunas (HTM) e um material de transporte de elétrons (ETM) nas PSCs. Esses materiais, HTM e ETM, desempenham o papel crucial de separar os elétrons e lacunas gerados pela luz, respectivamente, permitindo que sejam coletados pelos eletrodos. Existem diversas estruturas comuns de células solares de perovskita, incluindo as mesoporosas n-i-p, as planas n-i-p e as planas p-i-n (Figura 14). No entanto, os pesquisadores estão cada vez mais adotando estruturas de dispositivos planos, sem a camada mesoporosa, devido à sua fabricação mais simples e eficiente.

Figura 14 – (a) Mapeamento de eficiência das PSCs. (b) Diagrama esquemático da estrutura cristalina de perovskita de halogeneto orgânico – inorgânico. (c) Diagramas esquemáticos das estruturas de dispositivos das PSCs: estrutura planar n-i-p (esquerda), estrutura mesoscópica n-i-p (meio), estrutura planar p-i-n (direita)



Fonte: CAO et al., 2023.

É importante ressaltar que a qualidade dos filmes de perovskita, das camadas de transporte de carga e dos eletrodos, assim como a engenharia das interfaces nas PSCs, são elementos complexos que impactam significativamente o desempenho dos dispositivos (CAO et al., 2023). Portanto, a otimização desses aspectos é crucial para melhorar a eficiência e estabilidade das células solares de perovskita.

No contexto das células solares de perovskita (PSCs), o grafeno encontrou diversas aplicações significativas. Primeiramente, é usado como um eletrodo transparente devido à sua alta condutividade e baixa absorção de luz. Isso é especialmente útil na fabricação de células tandem, onde duas células diferentes são usadas em série para aproveitar diferentes partes do espectro solar. Em segundo lugar, o grafeno tem sido investigado para melhorar a estabilidade das PSCs. Sua presença demonstrou melhorar a estabilidade desses dispositivos, principalmente devido à hidrofobicidade do material.

Uma terceira aplicação é o uso do grafeno como agente condutor de lacunas. Tradicionalmente, materiais orgânicos como Spiro-OMeTAD ou PDOT:PSS são utilizados como condutores de lacunas, mas apresentam problemas de estabilidade e custo elevado. Estudos mostraram que o grafeno funcionalizado com trifluorometanossulfonato de prata pode ser um condutor de lacunas mais eficiente do que o PEDOT:PSS. A otimização da resposta fotovoltaica pode ser alcançada ajustando a concentração do dopante.

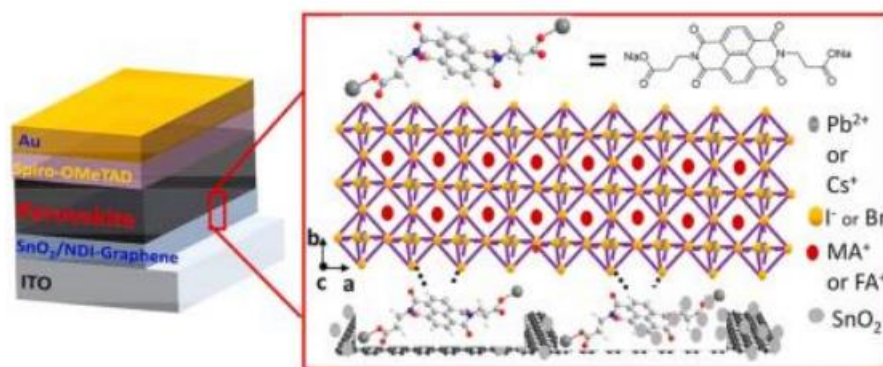
É mostrado na Figura 14.a o mapeamento da eficiência das células solares de perovskita (PSCs), que alcançaram uma eficiência de 25,7%. Esta eficiência está se aproximando das células solares de silício monocristalino (26,1%, sem concentração de cristais únicos). As PSCs apresentam alta eficiência de conversão de energia (PCE) e baixo custo de fabricação, o que as torna uma tecnologia fotovoltaica promissora para aplicações comerciais. Estes resultados estão em consonância com o estudo realizado por Green et al. (2022), fortalecendo ainda mais o potencial das PSCs como uma alternativa viável no campo da energia solar.

Em um extenso trabalho de revisão, Cao et al. (2023) compilaram e discutiram uma variedade de estudos relevantes na área de materiais bidimensionais. Eles abordaram o papel de cada componente, como camadas finas de perovskita, camadas de transporte de carga e eletrodos transparentes, nas aplicações das células solares de perovskita (PSCs). Estes materiais bidimensionais apresentam propriedades únicas, como uma alta relação entre superfície e volume, mobilidade de carga elevada e flexibilidade mecânica excepcional, graças à redução da espessura para uma ou poucas camadas. O grafeno, por exemplo, é um desses materiais e possui uma banda de energia nula e uma condutividade significativa. Quando integrados às PSCs, o grafeno e outros materiais bidimensionais, como dicalcogenetos de metais de transição, fósforo negro, nitreto/carbureto metálico e perovskitas bidimensionais, melhoram a

condutividade elétrica dos dispositivos. Além disso, os halogenetos de perovskita, tanto orgânicos quanto inorgânicos, representam uma das tecnologias mais promissoras, pois otimizam o desempenho das PSCs.

A interação do hidrogênio do NDI com íons de perovskita através de forças de van der Waals possibilita a rápida extração e transporte de carga. Cálculos de DFT confirmam a atração dos elétrons da perovskita pelo grafeno. O dispositivo alcançou uma eficiência de 20,2% com alta extração de elétrons e redução da recombinação. Nanofitas de grafeno funcionalizadas substituíram o PCBM como ETM, apresentando alta mobilidade de elétrons e um alinhamento de energia adequado. A hidrofobicidade das nanofitas garantiu a estabilidade a longo prazo, resultando em uma eficiência de 16,5%. Para melhorar a estabilidade, utilizou-se nanopartículas de grafeno funcionalizadas com flúor como camada intermediária, protegendo contra a entrada de água (CAO et al., 2023). A Figura 15 apresenta a estrutura esquemática do dispositivo de célula solar e a interação proposta entre NDI, grafeno e filmes de perovskita.

Figura 15 – Estrutura esquemática da célula solar e a interação entre NDI-grafeno e filmes de perovskita.



Fonte: CAO et al., 2023.

Por fim, o grafeno também pode atuar como material condutor de elétrons. Por exemplo, uma mistura de nanopartículas de TiO_2 e flocos de grafeno foi utilizada para produzir uma camada condutora de elétrons que aumentou a eficiência das células solares. Essa melhoria é atribuída à redução da resistência em série da célula e à maior resistência à recombinação devido à transferência de elétrons das nanopartículas para os flocos de grafeno. No contexto das PSCs, a introdução de materiais bidimensionais, como o grafeno, otimiza o desempenho desses dispositivos. A flexibilidade mecânica, a alta condutividade e a estabilidade química do grafeno contribuem para a melhoria da eficiência e estabilidade das células solares de perovskita. A integração desses materiais em precursores de perovskita pode melhorar a qualidade do filme

de perovskita e equilibrar sua dinâmica de cristalização, resultando em dispositivos mais eficientes e estáveis. A substituição de materiais caros, como o ouro, por alternativas mais acessíveis, como o grafeno, também pode viabilizar a produção em massa sustentável dessas tecnologias fotovoltaicas.

5. SINTETIZAÇÃO DO GRAFENO

A publicação intitulada "Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films" (Efeito do Campo Elétrico em Filmes de Carbono Atômicos) escrita pelos pesquisadores Novoselov et al. (2004) foi um marco significativo que resultou na concessão do Prêmio Nobel de Física aos autores por sua descoberta do grafeno. Este evento elevou substancialmente o perfil do grafeno no meio científico, despertando um interesse renovado entre os pesquisadores. Desde então, inúmeros cientistas têm se dedicado ao estudo e aprimoramento de métodos tanto antigos quanto novos para a síntese do grafeno. De acordo com Nascimento (2012), entre os métodos mais destacados estão a esfoliação micromecânica, a deposição química da fase vapor (CVD), a esfoliação em fase líquida e o crescimento de grafeno epitaxial em SiC. Este estudo se concentrará nos métodos citados anteriormente, que são amplamente reconhecidos na comunidade científica, conforme detalhado na Tabela 3.

Tabela 3 - Métodos de obtenção do grafeno.

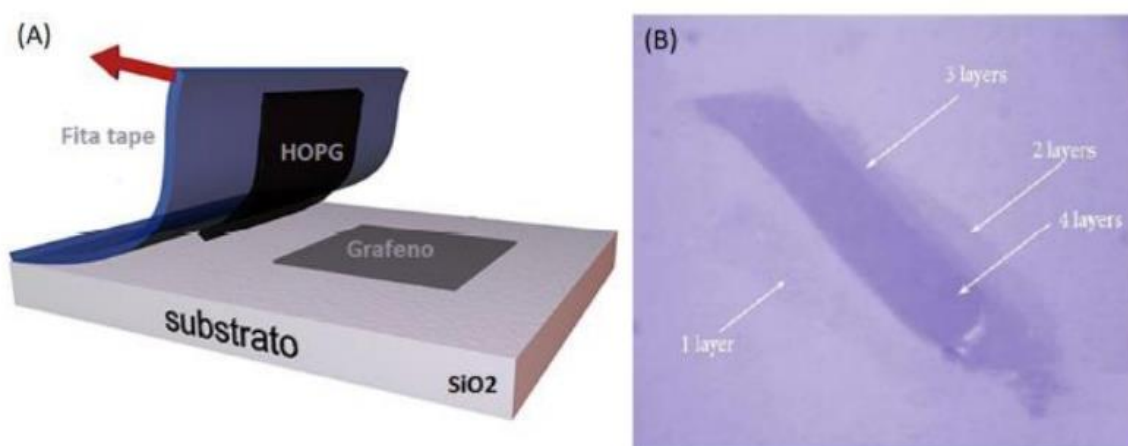
Métodos de Preparação	Métodos de partida	Técnicas de operação
Microesfoliação	Grafite pirolítico altamente orientado (HOPG)	Scotch-tape
Crescimento epitaxial (CVD)	Hidrocarbonetos	Deposição química em fase vapor sob alta temperatura
Crescimento epitaxial sobre SiC	4H-/6H - SiC	Dessorção térmica de Si do substrato de SiC sob alta temperatura
Esfoliação em fase líquida	Grafite	Dispersão e esfoliação de grafite em solventes orgânicos

Fonte: Adaptado de Chen et al. (2010)

5.1 Microesfoliação.

De acordo com Novoselov et al. (2004), a técnica de microesfoliação foi pioneira na obtenção de grafeno e desempenhou um papel fundamental na conquista do Prêmio Nobel de Física. Este processo envolve a aplicação de uma fita adesiva em superfícies de grafite natural ou grafite pirolítico altamente orientado (HOPG), seguida de uma cuidadosa remoção da fita, exercendo uma força da ordem de $300\text{nN}/\mu\text{m}^2$ por aproximadamente 10 vezes, conforme ilustrado na Figura 16 e descrito por Soldano et al. (2010). Esse procedimento resulta na ruptura das ligações de Van der Waals entre as camadas de grafite, levando à clivagem dos planos cristalinos.

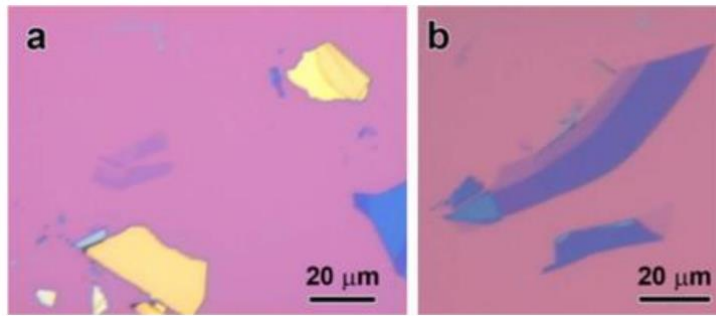
Figura 16 - Imagem ilustrativa do processo de transferência utilizando o método de microesfoliação mecânica do HOPG (a); O resultado é depositado sobre um substrato de silício com 300nm de camada oxidada (b).



Fonte: Romani (2015)

Posteriormente, a fita é transferida para um substrato de óxido de silício e pressionada por pelo menos 10 minutos para eliminar a presença de ar. Isso se deve ao fato de que o grafeno apresenta uma afinidade maior com a maioria dos outros materiais do que com outras formas alotrópicas do carbono. Como resultado, a monocamada de grafeno interage e adere ao SiO_2 , como exemplificado na Figura 17 (SÁ, 2011).

Figura 17 - Grafeno esfoliado micromecanicamente. Imagens de microscopia óptica de (a) grafite, (b) grafeno de poucas camadas (FLG) e grafeno. Cores amareladas indicam amostras mais grossas enquanto contrastes azulados e mais claros indicam amostras mais finas.



Fonte: Soldano et al. (2010)

Por último, a amostra é colocada em uma câmara aquecida à pressão atmosférica ou em vácuo na presença dos gases argônio e hidrogênio para remover o excesso de adesivo. A presença de adesivo pode prejudicar as propriedades finais do material, especialmente a condutividade elétrica (SPRINKLE et al., 2010).

Chen et al. (2010) descrevem este método como extremamente simples, proporcionando uma alta qualidade estrutural e eletrônica. No entanto, ele é delicado, demorado e produz uma quantidade limitada de material em pequena escala, o que o torna inviável comercialmente.

Castro et al. (2009) também avaliam os aspectos positivos e negativos da técnica de microesfoliação mecânica. Embora seja um processo de alta qualidade que produz uma estrutura cristalina perfeita sem etapas intrusivas, sua capacidade de escala é limitada, alcançando apenas áreas da ordem de $100\mu\text{m}^2$.

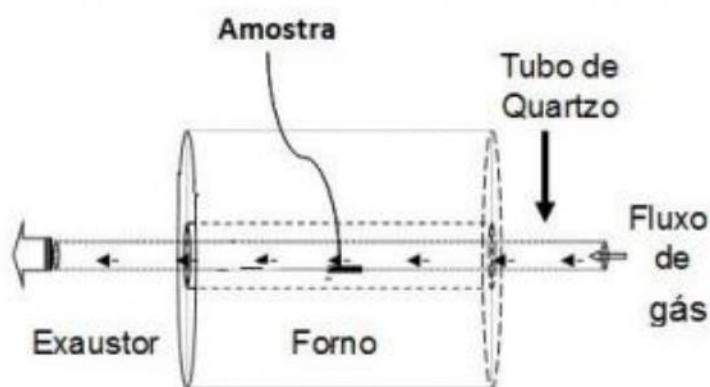
5.2 Deposição Química em Fase Vapor (Chemical Vapor Deposition – CVD).

O método de crescimento de grafeno por deposição química na fase vapor (CVD) é baseado na vaporização do carbono em substratos apropriados. Segundo Li X. et al. (2009), o cobre (Cu) é frequentemente escolhido devido às suas propriedades vantajosas, como baixa afinidade com o carbono e uma configuração eletrônica estável. Além do cobre, outros metais como platina (Pt), rutênio (Ru), irídio (Ir) e níquel (Ni) também são utilizados para esse fim.

Para garantir a uniformidade da estrutura, é necessário realizar um tratamento térmico na superfície do cobre, utilizando uma mistura de argônio e hidrogênio, como descrito por Barcelos (2010).

Após o tratamento, a amostra de cobre ou outro metal é colocada dentro de um forno em condições de alta temperatura e baixa pressão, juntamente com gases contendo carbono, conforme esquematizado na Figura 18, de acordo com Li X. et al. (2009). A escolha de superfícies metálicas é crucial nesse processo, pois elas atuam como catalisadores para a formação do carbono e facilitam a adesão do grafeno à amostra (SÁ, 2011).

Figura 18 - Esquema de um sistema CVD.



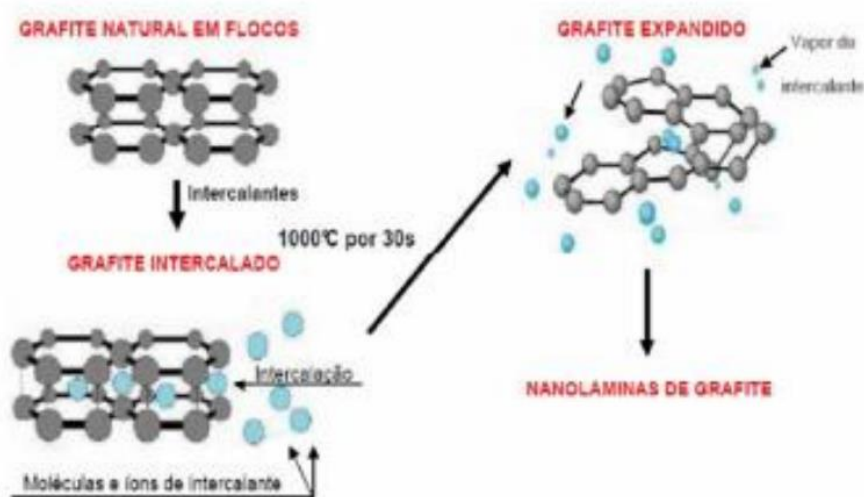
Fonte: Soldano et al. (2010)

Embora essa técnica empregue materiais de baixo custo, a produção de grafeno está limitada ao tamanho do substrato de cobre (GONÇALVES, 2012).

5.3 Esfoliação Química em Fase Líquida do Grafite.

Conforme descrito por Quintana et al. (2014), a técnica de esfoliação química em fase líquida do grafite visa desfazer as interações intermoleculares de Van der Waals, conhecidas como empilhamento π - π , presentes entre as camadas do grafite. Esse processo é ilustrado na Figura 19. Martins (2014) explica que soluções contendo moléculas compatíveis são misturadas ao grafite natural em flocos, como demonstrado na mesma figura, com o objetivo de aumentar o espaçamento entre as camadas e transformar a estrutura sp^2 em sp^2 - sp^3 , formando o grafite intercalado (GI). O GI é composto por grafite no qual átomos adicionais são inseridos entre suas camadas, resultando em uma estrutura com ligações dipolo induzido e fortes ligações interatômicas covalentes (FIM, 2012).

Figura 19 - Processo de esfoliação química.



Fonte: Castro et al. (2009)

Posteriormente, de acordo com Januário et al. (2014), o GI é convertido em grafite expandido (GE) por meio de um choque térmico a 1000°C por 30 segundos. Esse processo leva à formação do GE, caracterizado pela dilatação entre as camadas no sentido perpendicular e pelas interações interplanares enfraquecidas.

Por fim, como descrito por Fim (2012), o GE é submetido a um banho ultrassônico para desfazer as ligações π restantes e originar as nanolâminas de grafeno (NG).

Inicialmente considerado ineficaz devido à baixa qualidade do material produzido, o método foi modificado, como observado por Geim et al. (2007), na etapa inicial descrita anteriormente.

Os novos reagentes escolhidos incluem cloreto de potássio, ácido nítrico, ácido sulfúrico e permanganato de potássio. O grafite é imerso em meio ácido com adição de água a 45°C por 2 horas (STANKOVICH et al., 2007).

Esse tratamento confere maior hidrofilicidade ao material, pois a oxidação química na composição do sistema resulta na formação de radicais -OH e -COOH, enfraquecendo as ligações e permitindo a dispersão das camadas de grafeno em água (GILJE et al., 2007).

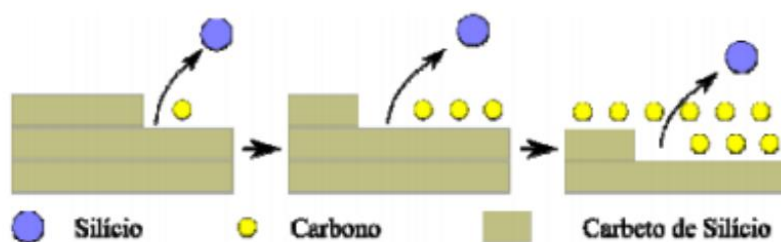
Embora considerado impuro devido à persistência de vestígios de átomos entre as camadas, o método é vantajoso por seu baixo custo e pela capacidade de produzir grandes quantidades de grafeno (ALLEN et al., 2009).

5.4 Crescimento de Grafeno Epitaxial em SiC

O método de crescimento de grafeno epitaxial em carbeto de silício (SiC) é fundamentado no elevado ponto de fusão do carbono (C), que é aproximadamente 3550°C, e na afinidade desse elemento químico com uma variedade de outros elementos (SÁ, 2011).

Nesse processo, conforme descrito por Sá (2011), o carbono, quando ligado a outro elemento em estruturas de cristais binários (carbeto), é aquecido em duas etapas para produzir um excesso de carbono que não sublima, conforme ilustrado na Figura 20. Na primeira fase, como explicado por Berger et al. (2004), o aumento da temperatura ocorre em um forno por meio de bombardeamento de elétrons em vácuo (UHV), ou em uma atmosfera inerte controlada com argônio, conforme indicado por Soldano et al. (2010), até atingir cerca de 1000°C.

Figura 20 - Representação do carbeto de silício (SiC) sublimando e o carbono aderindo-se a superfície do substrato.



Fonte: Gonçalves (2012)

Em seguida, continua-se o processo, onde finas camadas de grafite são obtidas devido à dessorção do carbono presente no carbeto, com o segundo aquecimento da amostra a valores entre 1250 e 1450°C, conforme descrito por Ohta et al. (2006).

Embora já tenham sido testados carbeto de titânio (Ti) e tântalo (Ta) para esse processo, o silício (Si) é o elemento mais adequado devido à sua alta afinidade com o carbono. Isso ocorre porque o SiC apresenta vantagens, como a formação de filmes completos em toda a superfície do material, como mencionado por Soldano et al. (2010), e é compatível com a formação de grafeno, conforme evidenciado por Emtsev et al. (2009).

6 CONCLUSÃO

Ao examinar as vantagens econômicas e ambientais da introdução de tecnologias de grafeno nos painéis fotovoltaicos à base de silício e orgânicos analisados, é possível observar o potencial desse material para reduzir os custos de produção e os impactos ambientais associados. O grafeno emerge como uma solução promissora para mitigar a utilização de componentes contendo metais pesados, cujo descarte inadequado pode gerar sérios problemas ambientais e de saúde pública.

Um exemplo evidente dessa vantagem é a substituição dos eletrodos compostos de estanho e índio, metais pesados conhecidos por seu impacto ambiental negativo e por serem considerados recursos raros, resultando em custos elevados (SILVA, 2016). Adicionalmente, a aplicação de revestimento de grafeno nas células de silício conduz à redução dos custos de manutenção, ao aproveitamento otimizado da luz solar e à minimização dos riscos de microfissuras, os quais poderiam prejudicar a capacidade de geração da placa ao longo do tempo.

No que diz respeito aos impactos ambientais, a presença do grafeno na composição do vidro contribui para torná-lo mais resistente a choques, enquanto a redução da espessura do vidro diminui a necessidade desse material, promovendo a conservação dos recursos naturais. Além disso, a redução dos riscos de microfissuras sugere uma possível extensão da vida útil das placas solares, reduzindo o descarte prematuro de painéis danificados e tornando o sistema fotovoltaico mais sustentável a longo prazo.

Conforme ressaltado por Genelhu (2019), a aplicação do grafeno desponta como uma solução promissora para aprimorar a eficiência na conversão de energia. O uso desse material abre caminho para o desenvolvimento de novos dispositivos com diversas aplicações em fotoeletroquímica. Embora ainda em estágio inicial, observa-se um progresso significativo nessa área de pesquisa. A performance das placas fotovoltaicas orgânicas à base de grafeno é grandemente influenciada pela microestrutura superficial dos materiais. Portanto, é essencial padronizar a estrutura de nanomateriais, controlando suas morfologias, fases estruturais, porosidades e áreas ativas na superfície, além de adaptar as interfaces, interações e comportamento de montagem entre as camadas de grafeno e outros materiais.

É fundamental investigar mais profundamente os mecanismos utilizados para aprimorar a eficiência, visando o desenvolvimento dos materiais à base de grafeno como opções competitivas para aplicações fotoeletroquímicas. Esse avanço busca não apenas abordar preocupações ambientais, mas também aprimorar o desempenho das placas orgânicas. Com isso, abre-se caminho para sua potencial utilização como fonte de energia no futuro, contribuindo para a redução da dependência de combustíveis fósseis e dos custos associados às células solares.

REFERÊNCIAS

1. ALENCAR, Eduardo; SANTANA, Delano. **Processos de obtenção do grafeno, suas aplicações e sua importância para o Brasil**. Revista Acadêmica Oswaldo Cruz, 2016. Disponível em: <http://revista.oswaldocruz.br/Content/pdf/Edicao_16_ALENCAR_Eduardo.pdf>. Acesso em: 07 de abril de 2024.
2. ALLEN M.; TUNG V.; KANER R. **Honeycomb carbon: a review of graphene**, 2009.
3. ALMEIDA, E.; ROSA, A. C.; DIAS, F. C. L. S.; THAIS, K.; BRAZ, M.; LANA, L. T. C.; SACRAMENTO, T. C. B. **Energia solar fotovoltaica: revisão bibliográfica**. Engenharias online, Belo Horizonte, 2015.
4. ALVES, Dennys Lopes. **Geração solar fotovoltaica: Conceitos básicos**. Rio Grande do Norte, 2016. 88 p. Disponível em: <https://docente.ifrn.edu.br/dennysalves/disciplinas/energia-solarfv/apostila_geracao_solar_fv_0.9.1>. Acesso em: 24 mar. 2024.
5. Alves, R. M. V. et al. (2008). **Embalagens plásticas e de vidro para produtos farmacêuticos: avaliação das propriedades de barreira à luz**. Rev.Ciênc.Farm.Apl., v.29,n.2,pp.169-180. Recuperado de <https://bit.ly/3feExRI>.
6. Andreev, V.M.; McEvoy, A.; Markvart, T.; Castañer, L. **GaAs and High-Efficiency Space Cells. In Practical Handbook of Photovoltaics**, 2nd ed.; Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2012; pp. 399–416.
7. BARCELOS, I. **Crescimento de Grafeno por CVD em folhas de Cobre**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Física, Instituto de Ciências Exatas - Icx, Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Belo Horizonte, 2010.
8. BERGER C.; SONG Z.; LI T.; LI X.; OGBAZGHI A. Y.; FENG R.; DAI Z.; MARCHENKOV A. N.; CONRAD E. H.; FIRST P. N.; HEER W. A. **Ultrathin epitaxial graphite: 2D electron gas properties and a route toward graphene-based nanoelectronics**. The Journal of Physical Chemistry B, 2004.
9. BLASZCZAK, V. **Análise de eficiência de painel fotovoltaico com sistema tracker seguidor solar**. 2017. 39 f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal da Fronteira Sul. Erechim, 2017.
10. BREVE **História da Energia Solar**. Disponível em: <http://web.ist.utl.pt/palmira/solar.html>. Acesso em: 16 mar. 2024.
11. BÜHLER, Alexandre José; SANTOS, Fernando Hoefling Dos; GABE, Ivan Jorge. **UMA REVISÃO SOBRE AS TECNOLOGIAS FOTOVOLTAICAS ATUAIS**. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS 2018, [S. l.], 2018. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/267>. Acesso em: 30 março. 2024.
12. CAO, J.; YOU, P.; TANG, G.; YAN, F. **Two-dimensional materials for boosting the performance of perovskite solar cells: fundamentals, materials and devices**. Material Science & Engineering R, v. 153, 2023, p. 1- 43.

13. CASTRO, N. A. H.; GUINEA, F.; PERES, N. M. R.; NOVOSELOV, K. S.; GEIM, A. K. **The electronic properties of graphene**. 2009
14. CHENCHE, Luz Elena Peñaranda. **Evaluation of methods for parameterization and modeling of mono and multi-junction photovoltaic devices**. 2015. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015. DOI <https://doi.org/10.14393/ufu.di.2015.172>
15. CHEN, D.; TANG, L.; LI, J. **Graphene-based materials in electrochemistry**. Chemical Society Reviews, 2010.
16. Chiaretti, D. (2022). **Energia Solar Alcança Marca Historica No Mundo**. Acesso em: abril/2024. URL: <https://valor.globo.com/mundo/noticia/2022/05/22/energia-solar-alcanca-marcahistorica-no-mundo.ghtml/>.
17. E. Becquerel, **Comptes Rendus**. 9, 561 (1839).
18. ELIAS, D. **Estudo das propriedades de transporte elétrico de grafeno e de grafeno hidrogenado**. Belo Horizonte, Brasil: UFMG, 2009.
19. EMTSEV K.; BOSTWICK A.; HORN K.; JOBST J.; KELLOGG G.; LEY L.; MCCHESENEY J.; OHTA T.; RESHANOV S.; ROHRL J. **Towards wafer-size graphene layers by atmospheric pressure graphitization of silicon carbide**, Nature Materials, 2009.
20. Engana Carmo, J.; Neto Torres, J.P.; Cruz, G.; Marques Lameirinhas, R.A. **Effect of the Inclusion of Photovoltaic Solar Panels in the Autonomy of UAV Time of Flight**. *Energies* 2021, 14, 876. [CrossRef]
21. EPIA – **European Photovoltaic Industry Association**, “Market Report 2013”, Bruxelas, Bélgica, 2014.
22. FADIGAS, E. A. F. A. **Energia solar fotovoltaica: fundamentos, conversão e viabilidade técnico-econômica**. Grupo de Energia Escola Politécnica Universidade de São Paulo, p. 32, 2012.
23. FERNANDES, S. L., **Desenvolvimento de Células Solares de Perovskita Baseadas em Filmes de Óxidos Nanoestruturados** 2016. 132 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia dos Materiais), UNESP, Instituto de Química, Araraquara, 2016.
24. FIM, F. **Síntese e propriedades de nanocompósitos de polietileno/nanolâminas de grafeno obtidos através de polimerização in situ**. 2012.
25. FILATOVA, E. O.; KONASHUK, A. S. **Interpretation of the Changing the Band Gap of Al₂O₃ Depending on Its Crystalline Form: Connection with Different Local Symmetries**. *Journal of Physical Chemistry C*, v. 119, n. 35, p. 20755–20761, 2015.
26. FREITAS, A. F. **Perfil metodológico da produção científica no Colóquio Internacional sobre Gestão Universitária nas Américas**. UFMG, 2013
27. GARCIA J. C.; JUSTO J. F.; MACHADO W. V. M.; ASSALI L. V. C. **Phys**, Rev. B, 2009.
28. GEIM, A. K.; NOVOSELOV, K. S. **The rise of graphene**, Nature Materials, 2007.
29. GENELHU, Renata Nicolato. **Uso do grafeno em placas fotovoltaicas orgânicas para melhoria de eficiência energética**. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica). Escola de Minas. Universidade Federal de Ouro Preto. 49 páginas. 2019.

30. GILJE S.; HAN S.; WANG M.; WANG K. L.; KANER R. B. **A chemical route to graphene for device applications**. Nano Letters,
31. GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002
32. Góes, P. F., Tanimoto, A. H. (2021). **Tecnologias e parâmetros ambientais para a escolha de uma placa geradora de energia solar fotovoltaica**. Scientia: Revista Científica Multidisciplinar, v. 6, n. 1, pp. 34-61. Recuperado de <https://bit.ly/3faX5CC>
33. Góes, Patrícia & Tanimoto, Armando. (2023). **Propriedades e uso de tecnologias de grafeno em painéis solares visando ao aprimoramento de seu desempenho**. OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA. 21. 7358-7366. 10.55905/oelv21n7-084.
34. GONÇALVES, A. **Crescimento, Propriedades Estruturais e Eletrônicas de Grafeno Epitaxial**. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências, Departamento de Física, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012
35. Hao, F. et al. (2012). **Highly catalytic cross-stacked superaligned carbon nanotube sheets for iodine-free dye-sensitized solar cells**. Mater. Chem, n. 22, pp. 22756 –22762. Recuperado de <https://rsc.li/3u9hEU6>.
36. HERMES, Wilfried; WALDMANN, Daniel; AGARI, Michaela; SCHIERLE-ARNDT, Kerstin; ERK, Peter. **Emerging Thin-Film Photovoltaic Technologies**. Chemie Ingenieur Technik, [S. l.], v. 87, n. 4, p. 376–389, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1002/cite.201400101>.
37. JANUÁRIO, A. C.; REMÉDIO, B. R.; SOUSA, R. A. **Produção de grafeno pelo método de esfoliação química e suas potenciais aplicações**. 2014.
38. JANNUZZI, M. et al. **RELATÓRIO FINAL Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica no Brasil: Panorama da Atual Legislação**. [s.l: s.n.].
39. Jeon, I. et al. (2015). **Single-Walled Carbon Nanotube Film as Electrode in Indium-Free Planar Heterojunction Perovskite Solar Cells: Investigation of Electron-Blocking Layers and Dopants**. Nano Lett., n. 15, pp. 6665 –6671. Recuperado de <https://bit.ly/342K5bx>.
40. Lima, A. A., Menezes, N. P., Santos, S., Amorim, B., Thomazi, F., Zanella, F., Heilmann, A., Burkarter, E., & Dartora, C. A.. (2020). **Uma revisão dos princípios da conversão fotovoltaica de energia**. Revista Brasileira De Ensino De Física, 42, e20190191. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2019-019>
41. LIMA, A. L. **Simulações de Dinâmica Molecular de Dobras de Grafeno**, PósGraduação em Ciências na Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), 2013.
42. Lima, A. M. (2019). **Produção e caracterização de filmes finos de grafeno para aplicação em células solares fotovoltaicas**. Dissertação (Doutorado em Ciência dos Materiais) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro. Recuperado de <https://bit.ly/3f6xnPH>.
43. LIMA, D. B. **Variações do Grafeno: Uma abordagem ab-initio de Novas Estruturas Bidimensionais**, Tese Doutorado Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), 2012.
44. LI X.; CAI W.; AN J.; KIM S.; NAH J.; YANG D.; PINER R.; VELAMAKANNI A.; JUNG I., TUTUC E. **Large-Area Synthesis of High-Quality and Uniform Graphene Films on Copper Foils**, 2009.

45. Loh, P. K., Tong, S. W., Wu, J. (2016). **Graphene and Graphene-like Molecules: Prospect in Solar Cells**. J. Am. Chem. Soc., v.138, n.4, pp. 1095-1102. Recuperado de <https://bit.ly/2RINrxZ>.
46. MACHADO, C. T.; MIRANDA, F. S. **Energia Solar Fotovoltaica: Uma Breve Revisão**. Revista Virtual de Química, [S.l.], v. 7, n. 1, p. 126-143, 14 out. 2014. Disponível em: <<https://rvq.sbq.org.br/pdf/v7n1a08>>. Acesso em: 16 mar. 2024.
47. MARTINS, E. O. **Estudo de propriedades mecânicas do grafeno por primeiros princípios**. 2014.
48. Marques Lameirinhas, R.A.; Torres, J.P.N.; de Melo Cunha, J.P. **A Photovoltaic Technology Review: History, Fundamentals and Applications**. Energies 2022, 15, 1823. <https://doi.org/10.3390/en15051823>
49. NASCIMENTO, J. **Esfoliação do Grafite Natural em N-metilpirrolidona e Clorofórmio para Obtenção de Grafenos**. Sociedade Brasileira de Química (SBQ). Belo Horizonte - MG, 2012.
50. NASCIMENTO, C. A DO. **Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica**. Monografia. Lavras-MG. 2004. Disponível em: http://www.solenerg.com.br/files/monografia_cassio.pdf. Acesso em: 08 abr 2024.
51. Nações Unidas. (s.d.). **Os 17 objetivos dos ODS das Nações Unidas**. Disponível online: <https://sdgs.un.org/goals> (Acesso em: 24 mar. 2024).
52. NobelPrize.org. **Albert Einstein—Facts**. AB Nobel Prize Outreach. Disponível em: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1921/einstein/facts>. Acesso em: 24 mar. 2024.
53. NOKIA Bell Labs. **Bell Labs’ Greatest Innovations**. Disponível em: <https://www.bell-labs.com/about/history/>. Acesso em: 24 mar. 2024.
54. NOVOSELOV K. S.; GEIM A. K.; MOROZOV S. V.; JIANG D.; DUBONOS S. V.; GRIGORIEVA I. V.; FIRSOV A. A. **A electric field effect in atomically thin carbon films**. Science, 306, 666-669, 2004.
55. OGBOMO, Osarumen O.; AMALU, Emeka H.; EKERE, N. N.; OLAGBEGI, P. O. **A review of photovoltaic module technologies for increased performance in tropical climate**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, [S. l.], v. 75, p. 1225–1238, 2017. DOI: 10.1016/j.rser.2016.11.109.
56. OHL, R. S. **Light-Sensitive Electric Device**. U.S. Patent US2402662A, 25 jun. 1946. Disponível em: <https://patents.google.com/patent/US2402662>. Acesso em: 24 mar. 2024.
57. OLDENBURG. **Photovoltaics Lectures**. Carl von Ossietzky Universität Oldenburg. Eldorado Summer School, 1994.
58. OLIVEIRA JÚNIOR, Edson Sousa de. **Análise da geração de energia em uma usina solar fotovoltaica na categoria de microgeração distribuída em Brasília**. 2020. 102 f. Trabalho de Conclusão Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) — Universidade de Brasília, Brasília, 2020.
59. PARTOENS, B.; PEETERS, F. M. **From graphene to graphite: Electronic structure around the K point**, 2006.

- a. PHIRI, J.; GANE, P.; MALONEY, T. C. **General overview of graphene: Production, properties and application in polymer composites.** *Materials Science and Engineering*, v. 215, p. 9-28, 2017.
60. QUINTANA, M.; TAPIA, J.; PRATO, M. **Liquid-phase exfoliated graphene: functionalization, characterization, and applications.** *Beilstein Journal Of Nanotechnology*, 2014.
61. REN, H.; WANG, C.; ZHANG, J.; ZHOU, X.; XU, D.; ZHENG, J.; ZHANG, J. **DNA cleavage system of nanosized graphene oxide sheets and copper ions.** *ACS nano*, v. 4, n. 12, p. 7169-7174, 2010.
62. ROMANI, E. C. **Incorporação de boro em grafeno em camada simples crescido por CVD utilizando precursor líquido.** Programa de Pós-Graduação em Física do Departamento de Física do Centro Técnico Científico da PUC-Rio, 2015.
63. SÁ, T. **Crescimento de "multicamadas" de grafeno epitaxial em substratos de SiC a pressão atmosférica.** Dissertação (Mestrado) - Curso de Física, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.
64. SEGUEL, J. I. L. **Projeto de um sistema fotovoltaico autônomo de suprimento de energia usando técnica MPPT e controle digital.** 2009.
65. SILVA, M. F. **Panorama da Energia Solar Fotovoltaica Centralizada no Sistema Elétrico Brasileiro: Evolução, Desafios e Tendências.** Trabalho de Conclusão de Curso. Programa de Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Goiás. Goiânia, GO, 2016.
66. SOLDANO, C.; MAHMOOD, A.; DUJARDIN, E. **Production, properties and potential of graphene.** Elsevier, 2010.
67. SPRINKLE M.; HICKS J.; TEJEDA A.; TALEB-IBRAHIMI A.; FEVRE P.; BERTRAN F.; CLARK M.; SOUKIASSIAN P.; MARTINOTTI D. **Multilayer epitaxial graphene grown on the SiC (0001) surface; structure and electronic properties.** *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2010.
68. SNAITH, H. J. et al. **Anomalous hysteresis in perovskite solar cells.** *Journal of Physical Chemistry Letters*, v. 5, n. 9, p. 1511–1515, 2014.
69. Pereira, José & Cataldi, Marcio & Miranda, Nathália. (2017). **SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA NO BRASIL.** 1172-1181. 10.5151/xvencamb-118.
70. Kamat, P. V. **Quantum dot solar cells. Semiconductor nanocrystals as light harvesters.** *The Journal of Physical Chemistry C* 2008, 112, 18737. [CrossRef]
71. KUMAR, Manish; KUMAR, Arun. **Performance assessment and degradation analysis of solar photovoltaic technologies: A review.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [S. l.], v. 78, p. 554–587, 2017. DOI: 10.1016/j.rser.2017.04.083.
72. LEE, C.; WEI, X.; KYSAR, J. W.; HONE, J. **Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene.** *science*, v. 321, n. 5887, p. 385-388, 2008.
73. LI, S. S.; TU, K. H.; LIN, C. C.; CHEN, C. W.; CHHOWALLA, M. **Solutionprocessable graphene oxide as an efficient hole transport layer in polymer solar cells.** *ACS nano*, v. 4, n.

- 6, p. 3169-3174, 2010.
74. Mahmoudi, Tahmineh, Wang, Yousheng, & Hahn, Yoon-Bong (2018). **Graphene and its derivatives for solar cells application**. Nano Energy (Print), 51-65. doi:10.1016/j.nanoen.2018.02.047
 75. OGBOMO, Osarumen O.; AMALU, Emeka H.; EKERE, N. N.; OLAGBEGI, P. O. **A review of photovoltaic module technologies for increased performance in tropical climate**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, [S. l.], v. 75, p. 1225–1238, 2017. DOI: 10.1016/j.rser.2016.11.109.
 76. O'REGAN, Brian; GRÄTZEL, Michael. **A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films**. Nature, [S. l.], v. 353, n. 6346, p. 737–740, 1991. DOI: 10.1038/353737a0.
 77. Pereira, José & Cataldi, Marcio & Miranda, Nathália. (2017). **SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA NO BRASIL**. 1172-1181. 10.5151/xvенеeamb-118.
 78. PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: Cepel - Cresesb, 2014. 530 p. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf?fbclid=IwAR2UHbiQex8dpteYRxx4jKf7fsgJWZ1wlhXmUMKNxa1jS9GploGPcXViPzM>. Acesso em: 24 mar. 2024.
 79. Komp, R. J. **Practical photovoltaics: electricity from solar cells**, 3a. ed., aatec publications: Ann Arbor, 2001.
 80. RODRIGUES, R. **Filmes fotovoltaicos orgânicos (OPV) chegou ao Brasil e promete mudar o ramo de energia renovável e competir com os painéis fotovoltaicos da energia solar - Solar Eólica Renovável**. Solar Eólica Renovável, 25 ago. 2021. Disponível em: <<https://solareolicarenovavel.com/filmes-fotovoltaicos-organicos-opv-chegou-ao-brasil-e-promete-mudar-o-ramo-de-energia-renovavel-e-competir-com-os-paineis-fotovoltaicos-da-energia-solar/>>. Acesso em: 8 abr. 2024
 81. SEGUNDO, J. E. D. V.; VILAR, E. O. **Grafeno: Uma revisão sobre propriedades, mecanismos de produção e potenciais aplicações em sistemas energéticos**. Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Campina Grande, 2015.
 82. SILVA, A. H. **História e Origem da Energia Solar**. Portal Solar. São Paulo, Brasil. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/noticias/materias/historia-e-origem-da-energia-solar>>. Acesso em: 24 mar. 2024.
 83. Silva, L. H. X. (2016). **Estudo de grafeno e aplicação em células fotovoltaicas para aumento da eficiência de condutividade elétrica**. Dissertação (Graduação em Engenharia de Energia) – Universidade de Brasília, Brasília. Recuperado de <https://bit.ly/3fjA2Wh>.
 84. **Sítio do National Renewable Energy Laboratory – 2010 Solar Technologies Market Report**. Disponível em: <<http://www.nrel.gov/docs/fy12osti/51847.pdf>>. Acesso em: 30 março 2024
 85. SOLDANO, C.; MAHMOOD, A.; DUJARDIN, E. **Production, properties and potential of graphene**. Elsevier, 2010.

86. Sonai, G. G., Melo Jr., M. A., Nunes, J. H. B., Megiatto Jr., J. D., & Nogueira, A. F.. (2015). **CÉLULAS SOLARES SENSIBILIZADAS POR CORANTES NATURAIS: UM EXPERIMENTO INTRODUTÓRIO SOBRE ENERGIA RENOVÁVEL PARA ALUNOS DE GRADUAÇÃO**. Química Nova, 38(10), 1357–1365. <https://doi.org/10.5935/0100-4042.20150148>
87. SOUZA, R. **Célula Fotovoltaica – O Guia Técnico Absolutamente Completo**. 2017.
88. STANKOVICH, S.; DIKIN, D. A.; PINER, R. D.; KOHLHASS, K. A., KLEINHAMMES, A.; JIA, Y.; RUOFF, R. S. **Synthesis of graphene-based nanosheets via chemical reduction of exfoliated graphite oxide**. carbon, v. 45, n. 7, p. 1558-1565, 2007.
89. Taisuke Ohta et al. ,Controlando a estrutura eletrônica do grafeno bicamada. Ciência 313 , 951-954 (2006). DOI: 10.1126/ciência.1130681
90. Valvezan, A. V. (2021). **Webinário: Tecnologia de grafeno em painéis fotovoltaicos**. Youtube, 26mar.Recuperado de <https://bit.ly/2RCu35U>.
91. VILLELA, Marcelo. **Brasil ganha o primeiro centro de pesquisas em Grafeno da América Latina**. 2016. Disponível em: [https://www.mackenzie.br/noticias/artigo/n/a/i/brasil-ganha-o-primeiro-centro-de-pesquisas-em-grafeno-da-america-latina#:~:text=Essa%20realidade%20tecnol%C3%B3gica%20passa%20a,Universidade%20Presbiteriana%20Mackenzie%20\(UPM\)](https://www.mackenzie.br/noticias/artigo/n/a/i/brasil-ganha-o-primeiro-centro-de-pesquisas-em-grafeno-da-america-latina#:~:text=Essa%20realidade%20tecnol%C3%B3gica%20passa%20a,Universidade%20Presbiteriana%20Mackenzie%20(UPM)). Acesso em: 07 abr. 2024.

FOLHA DE ASSINATURAS

Uberlândia, 08 de abril de 2024.

Discente: Isabella Soares Ribeiro

Orientador: Prof. Dr. Antônio de Paulo Peruzzi