



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMIÁRIDO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE CARAÚBAS
CURSO DE INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

MARIA VITÓRIA DIAS GUEDES

**A UTILIZAÇÃO DO GRAFENO NO PROCESSO DE REVESTIMENTO DAS
CÉLULAS FOTOVOLTAICAS ORGÂNICAS DE TERCEIRA GERAÇÃO: UMA
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

CARAÚBAS
2022

MARIA VITÓRIA DIAS GUEDES

**A UTILIZAÇÃO DO GRAFENO NO PROCESSO DE REVESTIMENTO DAS
CÉLULAS FOTOVOLTAICAS ORGÂNICAS DE TERCEIRA GERAÇÃO: UMA
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.**

Monografia apresentada a Universidade Federal
Rural do Semi-Árido – UFERSA, Campus
Caraúbas para obtenção do título de Bacharel em
Ciência e Tecnologia.

Orientador:
Prof. Dr. Rafael Luz Espindola

CARAÚBAS
2022

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

G924u Guedes, Maria Vitória Dias.

A utilização do Grafeno no processo de revestimento das células fotovoltaicas orgânicas de terceira geração: uma revisão bibliográfica / Maria Vitória Dias Guedes. - 2022.
48 f. : il.

Orientador: Rafael Luz Espindola.
Monografia (graduação) - Universidade Federal Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e Tecnologia, 2022.

1. Grafeno. 2. Sistema fotovoltaico. 3. Células solares orgânicas. 4. OPV. I. Espindola, Rafael Luz, orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Caraúbas
Bibliotecária: Dalvanira Brito Rodrigues
CRB: 15/700

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

MARIA VITÓRIA DIAS GUEDES

**A UTILIZAÇÃO DO GRAFENO NO PROCESSO DE REVESTIMENTO DAS
CÉLULAS FOTOVOLTAICAS ORGÂNICAS DE TERCEIRA GERAÇÃO: UMA
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.**

Monografia apresentada a Universidade Federal
Rural do Semi-Árido – UFERSA, Campus
Caraúbas para obtenção do título de Bacharel em
Ciência e Tecnologia.

Orientador:
Prof. Dr. Rafael Luz Espindola

APROVADO EM ____/____/____

Maria Vitória Dias Guedes

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Rafael Luz Espindola
Orientador

Prof. Dr. José Júnior Alves da Silva
Examinador

Prof. Msc. Daniel Carlos de Carvalho Crisóstomo
Examinador

*“Quanto mais me aprofundo na Ciência mais
me aproximo de Deus.”*

Albert Einstein.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pois em todos os momentos bons e difíceis o Seu amor e a Sua graça foram derramados sobre a minha vida, me fazendo prosseguir. Obrigada, Senhor.

Em seguida, agradeço aos meus pais que, mesmo distantes, se fizeram presentes em cada instante da minha caminhada até aqui, com o seu apoio e o seu amor incondicional. Obrigada por me ensinar a nunca desistir e por sempre me estender a mão quando precisei. Eu dedico a vocês todo meu esforço e todas as minhas conquistas. Eu amo vocês.

Agradeço também ao meu orientador Rafael Luz Espindola. Obrigada pelos ensinamentos, incentivos, conselhos e pelo exemplo de profissionalismo durante todo o desenvolvimento dessa pesquisa, pois sem o seu direcionamento a conclusão desse trabalho não seria possível.

Obrigada também, ao meu amigo, parceiro e esposo, Ezequias Amorim que esteve comigo desde o início dessa caminhada. Agradeço pelos momentos de compreensão, paciência, conselhos, por sempre me apoiar em minhas decisões e nos momentos de maior tensão sempre me acalmar com o seu amor. Eu te amo.

Ainda agradeço a todos os meus amigos que tive a honra de conhecer, pelos momentos de alegria, de apoio e de puxões de orelha. Agradeço ao meu amigo e também professor José Ailton L. Barboza Júnior, pelos ensinamentos e por todas as vezes que se propôs a me ajudar quando precisei. Obrigada pela presença de vocês em minha vida. Nunca os esquecerei.

A todos os professores que tive a honra de conhecer durante esse curso, obrigada. Pelos ensinamentos repassados, palavras de apoio e por cada conselho que se tornaram cruciais em minha vida. Obrigada.

RESUMO

O elevado consumo dos recursos não renováveis para a produção de energia tem contribuído com cerca de 90% das emissões de gás carbônico na atmosfera e, em diversos países, a crise energética é um assunto que tem gradativamente se tornado uma realidade. Com o objetivo de amenizar essa situação, as pesquisas sobre a captação de energia solar têm ganhado cada vez mais espaço e a implantação de sistemas fotovoltaicos tem crescido de forma progressiva. Dentre os vários tipos de células, as orgânicas (OPV) tem ganhado destaque pelas suas características como leveza, baixo custo de fabricação e compatibilidade com vários substratos, apesar de possuir uma eficiência de apenas 10%. Estudos recentes indicam formas de melhoria na eficiência energética das células orgânicas a partir da utilização de novos componentes em seu processo de fabricação, como é o caso do Grafeno, devido as suas propriedades eletrônicas, ópticas, térmicas e mecânicas, além das suas diversas aplicações. Portanto, o trabalho apresenta uma revisão bibliográfica acerca do estudo da implementação do grafeno como componente no processo de fabricação das células solares orgânicas utilizando-o como eletrodos transparentes, receptores de elétrons e transportadores de camadas. Os resultados relacionados ao aumento da eficiência energética utilizando o grafeno como transportador de elétrons, atingiram 7,5% quando comparado com as outras estruturas. Diante disso, os resultados compilados a partir de trabalhos já realizados visam avaliar o uso das células solares orgânicas como uma possível fonte de energia no futuro e abordar os efeitos na eficiência das células provocados pelos materiais a base de grafeno.

Palavras-chave: sistemas fotovoltaicos; células solares orgânicas; grafeno.

ABSTRACT

The high consumption of non-renewable resources for the production of energy has contributed to about 90% of carbon dioxide emissions into the atmosphere and, in several countries, the energy crisis is an issue that has gradually become a reality. Looking for of alleviating this situation, research is into the capture of solar energy has been highlighted, and the deployment of photovoltaic systems has grown progressively. Among the various types of cells, the organic ones (OPV) have gained prominence for their characteristics such as lightness, low manufacturing cost and compatibility with various substrates, but have an efficiency of only 10%. Recent studies indicate ways to improve the energy efficiency of organic cells from the use of new components in their manufacturing process, such as graphene, due to its electronic, optical, thermal and mechanical properties, besides its various applications. Thus, the work presents a bibliographic review about the study of the implementation of graphene as a component in the manufacturing process of organic solar cells using it as transparent electrodes, electron receptors and layer transporters. The results related to the increase in energy efficiency using graphene as an electron carrier reached 7.5% when compared to the other structures. Knowing this, the results compiled from work already carried out aim to evaluate the use of organic solar cells as a possible source of energy in the future and address the effects on cell efficiency caused by graphene-based materials.

Keywords: photovoltaic systems; organic solar cells; graphene.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Estrutura das bandas de energia.	15
Figura 2 – Rede cristalina do Silício.	16
Figura 3 – Dopagem do tipo N com Fósforo.	17
Figura 4 – Dopagem do tipo P com Boro.	17
Figura 5 – Representação dos arranjos fotovoltaicos.	18
Figura 6 – Estrutura básica de uma célula fotovoltaica.	19
Figura 7 – Célula solar de silício monocristalino (m-Si).	21
Figura 8 – Célula solar de silício policristalino (p-Si).	21
Figura 9 – Célula fotovoltaica de silício amorfo (a-Si).	22
Figura 10 – Célula fotovoltaica orgânica (OPV).	23
Figura 11 – Esquema de montagem de uma célula fotovoltaica orgânica.	24
Figura 12 – Processo de fotoluminescência.	24
Figura 13 – Alótropos do carbono.	25
Figura 14 – Moléculas de carbono em estrutura de favo de mel.	27
Figura 15 – Características estruturais do grafeno	27
Figura 16 – Bandas de energia do grafeno com <i>gap</i> nulo.	28
Figura 17 – Método da esfoliação mecânica.	29
Figura 18 – Processos do método de esfoliação em fase líquida do grafeno.	30
Figura 19 – Processo de disposição química em fase vapor do grafeno.	31
Figura 20 – Método do crescimento epitaxial.	32
Figura 21 – Estrutura física da célula OPV com estrutura de eletrodo a base do grafeno.	36
Figura 22 – Célula solar orgânica flexível como eletrodo a base de grafeno.	36
Figura 23 – Tipos de estrutura heterojunção em uma célula solar.	37

SIMBOLOGIA, ACRÔNIMOS E ABREVIATURAS

Si	Silício
P	Fósforo
As	Arsênio
B	Boro
Ga	Gálio
G	Fluxo radiante
m-Si	Silício monocristalino
p-Si	Silício policristalino
c-Si	Silício cristalino
CIGS	Disseleneto de cobre, índio e gálio
Cdte	Telureto de cádmio
CPV	Concentrator photovoltaics (Células fotovoltaicas de multijunção de concentração)
DSSC	Dye-sensitized solar cell (Células fotovoltaicas sensibilizadas por corante)
OPV	Organic photovoltaic (Células fotovoltaicas orgânicas)
Si-Cz	Método Czochralski
TCO	Transparent conducting oxides (Condutor transparente na forma de filme fino)
ITO	Óxido de estanho dopado com índio
C	Carbono
3D	Tridimensional
2D	Bidimensional
SiO ₂	Óxido de silício
ZB	Zona de Brillouin
CVD	Deposição química da fase vapor
SiC	Em carbetto de silício
GI	Grafite intercalado
GE	Grafite expandido
NG	Nanolâminas de grafeno
DNA	Ácido desoxirribonucleico
CNT	Os nanotubos de carbono

PCE	Eficiência de conversão de energi
rGO	Grafeno reduzido
GO	Grafeno orientado
EA	Afinidade eletrônica
PI	Potencial de ionização
BHJ	Heterojunção de massa misturada
HTL	Camada de transporte
PEDOT:PSS	Poli poliestireno sulfonato
PTB7	Eletroquímico do copolímero
PET	Politerefalato de etileno

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	12
1.1.	<i>Objetivo Geral.....</i>	<i>13</i>
1.2.	<i>Objetivos Específicos.....</i>	<i>13</i>
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1.	<i>Sistema Fotovoltaico</i>	<i>15</i>
2.1.1.	Propriedades e Composição das Células Fotovoltaicas	15
2.1.2.	Características de Montagem das Células Fotovoltaicas	18
2.1.3.	Gerações dos Painéis Fotovoltaicos	20
2.1.3.1.	Primeira Geração.....	20
2.1.3.2.	Segunda Geração.....	21
2.1.3.3.	Terceira Geração	22
2.1.3.4.	Célula Fotovoltaica Orgânica ou Polimérica (OPV).....	23
2.2.	<i>Grafeno.....</i>	<i>25</i>
2.2.1.	Estrutura do Grafeno	26
2.2.2.	Sintetização do Grafeno	28
2.3.2.1.	Esfoliação Mecânica	29
2.3.2.2.	Esfoliação em Fase Líquida	30
2.3.2.3.	Deposição Química da Fase Vapor	31
2.3.2.4.	Crescimento Epitaxial	32
2.2.3.	Propriedades do Grafeno.....	33
2.2.4.	Aplicações do Grafeno.....	33
3.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
3.1.	<i>Eletrodos Transparentes a Base de Grafeno.....</i>	<i>35</i>
3.2.	<i>Receptores de Elétrons a Base de Grafeno</i>	<i>37</i>
3.3.	<i>Transporte de Camadas a Base de Grafeno.....</i>	<i>39</i>
3.4.	<i>Análise e comparação das estruturas.....</i>	<i>40</i>
4.	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	43
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	44

1. INTRODUÇÃO

Com o passar dos anos, o crescimento populacional e a evolução tecnológica têm tomado proporções elevadas e, com isso, o uso de matérias-primas fósseis para a produção de energia capaz de atender as necessidades dos usuários, se viu em um estado de intensa exploração. Segundo Silva (2009), o aumento do consumo de energia se deve principalmente ao crescente desenvolvimento dos continentes como América do Sul, África e Ásia.

Atualmente, as principais matrizes energéticas são as fontes não renováveis, representadas pelo petróleo e seus derivados e pelo carvão mineral, em que são responsáveis por cerca de 81% da produção global e cerca de 54% da produção brasileira de energia. Em contraste com esses percentuais, o uso das fontes renováveis para a produção de energia, incluindo os biocombustíveis, são representados por cerca de 13% e 45%, respectivamente (BIZERRA *et al.*, 2018).

A Terra possui várias fontes de energia que são consideradas renováveis, como hídrica, eólica, geotérmica, ondas, maré, biomassa e a solar que, além de não apresentarem nenhum dano significativo ao meio ambiente e ao planeta, são tidas como fontes inesgotáveis. Nesse aspecto, uma das maiores e mais rentáveis fontes renováveis é o Sol (SILVA, 2009).

Com a crise do petróleo no ano de 1973, e com o esgotamento das reservas petrolíferas, uma das principais fontes para a produção de energia, a possibilidade de geração de energia a partir da irradiação solar foi um assunto que despertou o interesse dos governos, que começaram a investir e impulsionar as pesquisas e, conseqüentemente, o desenvolvimento fotovoltaico (PINHO *et al.*, 2014).

A energia solar é convertida diretamente em eletricidade através da tecnologia de células fotovoltaicas a partir das suas variações (primeira, segunda e terceira geração). De acordo com Nascimento (2004), quando somada, a conversão e distribuição energética na terra dos tipos de células fotovoltaicas é aproximadamente 10^{18} kWh.

A busca por modelos que tragam uma eficiência energética capaz de suprir as demandas do consumo de energia, faz com que haja uma alteração nos elementos que compõem as células fotovoltaicas que, em sua maioria, são a otimização dos componentes já existentes. Um desses casos é a implementação do grafeno no revestimento dos painéis solares de terceira geração visando o aumento da eficiência energética.

Desde o século XX, iniciaram os estudos acerca do grafeno e suas propriedades físicas. Entretanto, foi apenas em 2004 que Andre Geim e Kostya Novoselov, professores e pesquisadores da Universidade de Manchester, obtiveram a primeira extração do grafeno a

partir de uma amostra de grafite, fazendo uso da técnica de esfoliação mecânica e, no ano de 2010, ganharam o Prêmio Nobel de Física pelo trabalho realizado. (THE UNIVERSITY OF MANCHESTER, 2022)

Segundo Villela (2016), o Brasil apresenta cerca de 45% da quantidade de grafite natural do mundo e, com o objetivo de impulsionar o estudo desse elemento, o país disponibilizou aproximadamente R\$100 milhões ao centro de pesquisa de grafeno denominado Mackgraphe da Universidade Mackenzie, em São Paulo.

De acordo com Ahmed *et al.* (2017), a organização estrutural do grafeno faz com que esse material possua várias propriedades físicas e químicas, como alta condutividade elétrica, boa transparência, boa resistência mecânica e enorme área superficial específica, o que o leva a ser utilizado em dispositivos ópticos, eletrônicos e de captação de energia em células fotovoltaicas.

Desse modo, este presente trabalho tem como objetivo estudar e avaliar as possíveis melhorias e aumento da eficiência energética em células fotovoltaicas de terceira geração a partir da análise comparativa dos resultados obtidos em painéis fotovoltaicos de terceira geração e em painéis fotovoltaicos de terceira geração com o revestimento de grafeno, afim de garantir a demanda de energia e a preservação ambiental.

1.1. Objetivo Geral

Analisar, a partir de uma revisão bibliográfica, a viabilidade da utilização do grafeno em células fotovoltaicas com o objetivo de aumento na eficiência energética.

1.2. Objetivos Específicos

- Realizar uma pesquisa de caráter exploratória sobre as características das células fotovoltaicas orgânicas (OPV) convencionais;
- Analisar a viabilidade econômica da utilização de estruturas compostas a base do grafeno como componentes de revestimento das células OPV
- Analisar o aumento na eficiência energética a partir da utilização do grafeno.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A energia gerada pelo Sol vem sendo aproveitada desde os primórdios tanto como fonte de luz quanto como fonte de calor. O Sol é a principal fonte de energia para a terra e, com o aumento da exploração das reservas esgotáveis dos combustíveis fósseis para a geração de energia, a energia solar vem sendo utilizada como uma fonte renovável para suprir a demanda energética em escala mundial.

Dentro do âmbito da energia solar, podem ser distinguidas dois tipos de tecnologias utilizadas para sua geração, sendo elas: a heliotérmica, que consiste em uma forma de geração de energia indireta, caracterizada pelo aquecimento do fluido para produzir vapor e a fotovoltaica, que utiliza o efeito fotovoltaico para geração de eletricidade. (REN21, 2021)

O fenômeno conhecido como efeito fotovoltaico foi observado em 1839 pelo físico francês Edmond Becquerel. Ele confeccionou a primeira célula fotovoltaica, em que observou, em duas placas de latão imersas em um eletrólito líquido, que a conversão da energia solar em energia elétrica era devido à luz que incidia nas placas, provocada por uma diferença de potencial nas extremidades da estrutura (NASCIMENTO, 2004).

Segundo Fadigas (2012), em 1883, um inventor americano conhecido como Charles Fritts, construiu a primeira célula solar feita com folhas de selênio, obtendo uma eficiência energética de 1%. Todavia, as células solares compostas a base de silício foram desenvolvidas apenas em 1954 por cientistas da Bell Labs, atingindo uma eficiência energética de aproximadamente 6%.

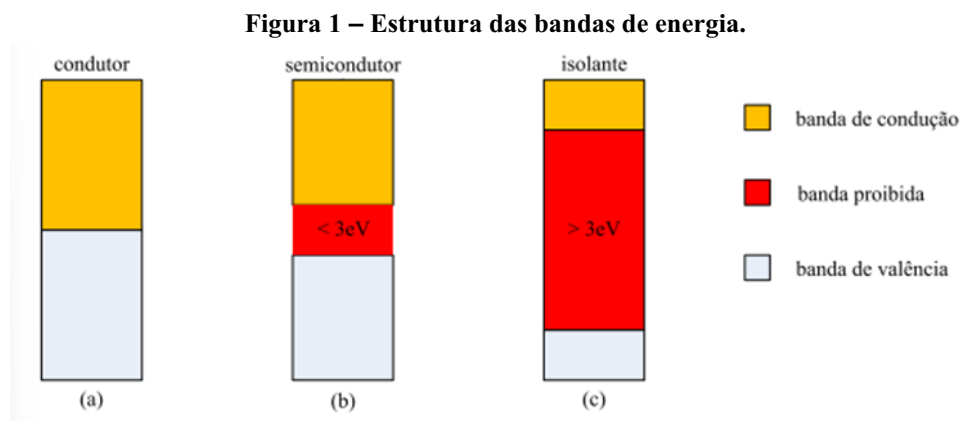
Apesar de ser um grande salto para a preservação do meio ambiente, se tratando dos gases poluentes emitidos pelas principais fontes não renováveis de geração de energia, no setor econômico não foi possível obter o mesmo êxito. O elevado custo em sua fabricação foi um fator que, a princípio, tornou a realidade da utilização de painéis solares possível apenas em aplicações especiais, como em sistemas de fornecimento de energia elétrica para satélites, tornando-se uma possibilidade conveniente para geração de energia no espaço em estações remotas de telecomunicações (NASCIMENTO, 2004).

Todavia, ao contrário do que se esperava com relação ao desenvolvimento dessa tecnologia, esses fatores, juntamente com a crise petrolífera na década de 70, foram impulsionadores para o desenvolvimento de pesquisas que aperfeiçoassem não apenas o uso e o aumento da eficiência energética das células fotovoltaicas, mas também os elementos de sua composição, tornando-a economicamente viável (PINHO *et al.*, 2014).

2.1. Sistema Fotovoltaico

2.1.1. Propriedades e Composição das Células Fotovoltaicas

Segundo Pinho *et al.* (2014), as células solares são fabricadas a partir de duas camadas de um material semicondutor, que se caracteriza pela sua formação a partir de uma banda de valência preenchida por elétrons e uma banda de condução sem elétrons, comportando-se como isolante, em temperatura de zero absoluto (0K). A divisão que existe entre as bandas de energia dos materiais semicondutores é conhecida como *bandgap* ou *gap*, fazendo a distinção entre os materiais condutores, semicondutores e isolantes, a partir da oscilação do seu valor em até 3eV (elétrons-volts). A separação de bandas de energia para cada um dos materiais, condutores, semicondutores e isolantes, é apresentada na Figura 1.



Fonte: PINHO *et al.*, 2014.

Ainda de acordo com a análise realizada por Pinho *et al.* (2014), as bandas são níveis de energias compostas por um conjunto de valores discretos com uma proximidade em sua variação. Em materiais do tipo semicondutores, a partir da existência das bandas de energia, o aumento da sua condutividade é proporcional ao aumento da temperatura nesses materiais, na qual, essa variação na condutividade também é possível a partir da excitação térmica dos elétrons da banda de valência para a banda de condução, permitindo a presença de lacunas na banda de valência, em que é proporcional ao número de elétrons que ocupam a banda de condução para temperaturas superiores a 0K.

A garantia de que um material possui a possibilidade de, a partir da incidência de fótons com energia superior a E_g do *gap* em sua estrutura, gerarem pares elétron-lacuna, faz com que essa característica se torne a propriedade fundamental para a fabricação das células

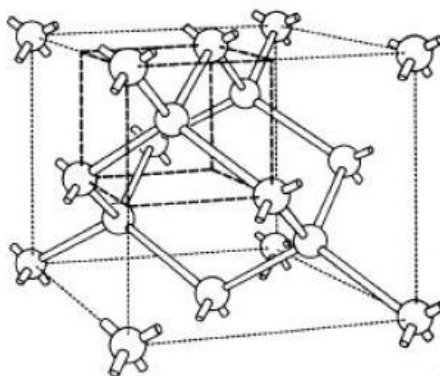
fotovoltaicas, visto que, a absorção desses fótons resulta em uma distribuição de energia em excesso no material em forma de calor (PINHO *et al.*, 2014).

Segundo Pinho *et al.* 2014, o aumento da condutividade elétrica a partir do movimento dos elétrons e lacunas fotogerados dentro do material é conhecido como efeito fotocondutivo. Os componentes eletrônicos no qual a resistência elétrica é variada a partir da quantidade de luminosidade que é incidida em sua superfície são denominados de fotocélulas.

Um dos principais elementos que faz parte do grupo dos semicondutores que compõe as células solares é o Silício (Si). O silício é o segundo componente químico mais abundante no mundo e se apresenta normalmente em forma granulada ou arenosa que, para obter o cristal de silício, é utilizado um processo conhecido como dopagem. O processo de dopagem é realizado com o acréscimo de outros elementos na estrutura cristalina do material intrínseco (material sem dopagem), fazendo com que ocorra uma mudança em suas propriedades elétricas.

Nascimento (2004) descreve o silício como um elemento tetravalente, que possui 4 elétrons orbitando em sua camada mais externa que formam ligações covalentes com 4 dos átomos vizinhos, formando uma estrutura conhecida como reticulado, possibilitando sua organização em forma de cristal e com aspecto metálico prateado, representado na Figura 2. Os cristais de silício possuem elétrons externos organizados em ligações covalentes perfeitas, de tal forma que os impossibilitam de se moverem entre os átomos, atribuindo ao cristal de silício puro as características de um material isolante e, desse modo, limitando a quantidade de eletricidade que irá ser conduzida pelo elemento.

Figura 2 – Rede cristalina do Silício.



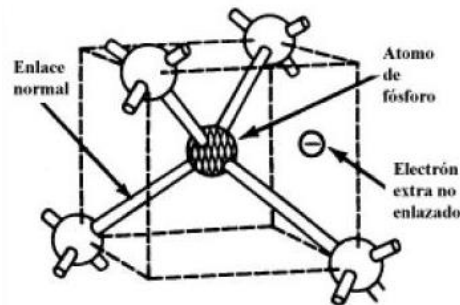
Fonte: SOUZA, 2017.

Os metais são classificados como bons condutores de eletricidade por possuírem elétrons livres se movendo entre os átomos, gerando um fluxo de elétrons. Entretanto, apesar de os cristais de silício possuírem uma aparência metálica, eles não são, de fato, um metal. De

acordo com Santana (2017), ao se introduzir na estrutura do cristal do silício outros elementos pentavalentes ou trivalentes que permitam que os elétrons se movimentem de forma livre, isso acarretará um efeito potencializador de aumento da sua capacidade de condução, a partir dos processos conhecidos com dopagem do tipo N e dopagem do tipo P.

- Dopagem do tipo N do átomo de silício: Os elementos mais comuns são o fósforo (P) e o arsênio (As), que se encaixam na estrutura do cristal de silício, compartilhando 4 dos seus 5 elétrons e, o elétron que sobrou, se transformam em cargas livres negativas que se movem pela estrutura e, com isso, fornecem a estrutura a possibilidade de condução. Essa estrutura é representada na Figura 3.

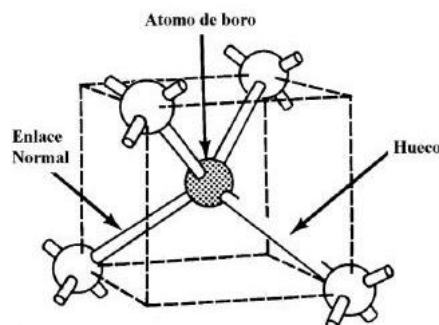
Figura 3 – Dopagem do tipo N com Fósforo.



Fonte: SOUZA, 2017.

- Dopagem do tipo P do átomo de silício: os elementos utilizados são o boro (B) e o gálio (Ga), que se encaixam na estrutura do cristal do silício formando 3 ligações covalentes, visualizada na Figura 4. A ligação que sobrou forma uma lacuna e, quando há a passagem de corrente pela estrutura, os elétrons migram para as lacunas vizinhas para ocupar o espaço, no sentido da corrente, fazendo com que assim haja a movimentação dos elétrons.

Figura 4 – Dopagem do tipo P com Boro.



Fonte: SOUZA, 2017.

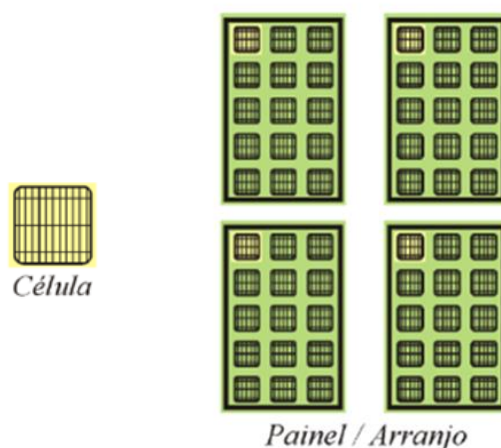
De acordo com Fadigas (2012), se em uma metade de uma lâmina de Si inicialmente puro, forem adicionados átomos de boro e em sua outra metade átomos de fósforo, será formado o que se denomina de junção PN. Na interface entre os tipos de dopagem, os elétrons livres do lado n migram para o lado p e ocupam as lacunas, fazendo com que haja um excesso de elétrons no lado p e, conseqüentemente, tornando-o carregado negativamente. Já no lado n, pela falta dos elétrons livres que migraram para o lado p, ele ficará eletricamente positivo. O estado de equilíbrio desse processo é alcançado quando, as cargas presas no lado p, geram um campo elétrico capaz de barrar a passagem de mais elétrons do lado n para o lado p.

Quando esse tipo de junção PN é exposta à uma quantidade de radiação solar em que, os fótons com energia superior ao gap incidam em uma região com o campo elétrico diferente de zero, isso irá gerar uma aceleração das cargas e acarretará uma corrente através da junção, gerando assim, o efeito conhecido como Efeito Fotovoltaico (PINHO *et al.*, 2014).

2.1.2. Características de Montagem das Células Fotovoltaicas

A célula fotovoltaica pode ser definida como o dispositivo básico destinado a realizar a conversão direta da radiação solar em energia elétrica. Apesar de ser um termo que tem se tornado cada vez mais comum, a maioria das pessoas não sabem a diferença entre célula fotovoltaica e painel fotovoltaico. O painel fotovoltaico é formado a partir de um conjunto de células fotovoltaicas empacotadas, conectadas de tal forma a atingir os valores de tensão e corrente desejados e esse agrupamento de células pode receber o nome de módulo, placa ou painel fotovoltaico. A representação de cada arranjo é vista na Figura 5.

Figura 5 – Representação dos arranjos fotovoltaicos.

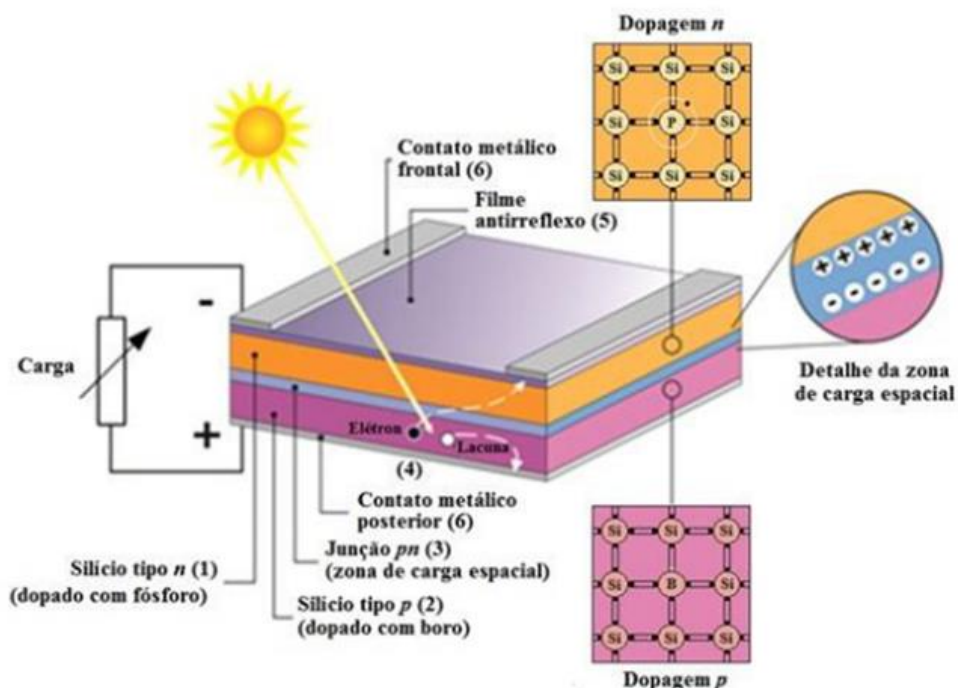


Fonte: ALVES, 2016.

Segundo Alves (2016), no Brasil, o controle da eficiência energética dos módulos fotovoltaicos é feito através de um sistema de etiquetagem conhecido como selo Procel (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica).

A composição básica de uma célula fotovoltaica de silício, de acordo com Moehlecke *et al.* (2005), é feita, inicialmente, por um contato metálico frontal seguido de um revestimento de filme antirreflexo, uma camada de material composto por Si tipo n (dopado com fósforo), uma camada conhecida como zona de carga espacial (junção tipo PN) e uma camada de Si do tipo p (dopado com boro). Por fim, uma placa de contato metálico posterior é utilizada na base da célula. A ilustração da estrutura de uma célula fotovoltaica pode ser visualizada na Figura 6.

Figura 6 – Estrutura básica de uma célula fotovoltaica.



Fonte: MOEHLECKE E ZANESCO, 2005.

A luz solar incide na terra na forma de uma onda eletromagnética emitindo um fluxo radiante de aproximadamente $G = 1366 \text{ W/m}^2$ na qual, apenas 50% da sua energia entra na atmosfera terrestre. Esse fator ocorre devido a quantidade de gás carbônico presente na atmosfera, oriundo da utilização de fontes de energia não renováveis, em que são as principais emissoras desse gás. O gás carbônico é um gás considerado opaco e, por isso, a radiação solar que é na forma infravermelha, é ré-irradiada agora na forma de calor e acumulada na superfície atmosférica devido ao dióxido de carbono e, desse modo, apenas metade da emissão da luz solar é aproveitada na superfície terrestre (FILHO *et al.*, 2014).

Além desse fator, existem outras condições que influenciam no aproveitamento da radiação solar, como por exemplo: translação da terra; condições atmosféricas; temperatura; e sujidade.

Apesar da incidência da luz solar na terra possuir vários fatores que a impeçam de atingir um percentual melhor, a eficiência de uma célula fotovoltaica na conversão da radiação solar em eletricidade possui uma variação baixa com relação a variação da incidência dos raios solares (FILHO *et al.*, 2014).

Na produção das células fotovoltaicas são utilizadas tecnologias, em que a partir delas são definidas as gerações das células, classificadas a partir do tipo de material utilizado em sua fabricação.

A primeira geração representa 85% do mercado por possuir melhor consolidação e eficiência. Sua composição se subdivide em silício monocristalino (m-Si) e silício policristalino (p-Si), tendo como material fundamental o silício cristalino (c-Si). A segunda geração é conhecida como filmes finos, sendo dividida em três ramos: silício amorfo (a-Si), disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS); e telureto de cádmio (CdTe) (CEPEL; CRESESB, 2014).

Segundo Pinho *et al.* (2014), a terceira geração deve possuir alta eficiência, utilizar elementos mais abundantes e menos prejudiciais ao meio ambiente, além de possuir baixo custo/watt. Essa geração é dividida em células fotovoltaicas de multijunção de concentração (CPV), as sensibilizadas por corante (DSSC) e as orgânicas (OPV).

2.1.3. Gerações dos Painéis Fotovoltaicos

2.1.3.1. Primeira Geração

A maior parte das células solares presentes no mercado são compostas por uma única junção de silício, como é o caso das células de primeira geração. A conversão de luz solar recebida nesse tipo de célula varia entre 31% e 40%, devido a termodinâmica de sua montagem, sendo esse fenômeno conhecido como Limite de Eficiência de Shockley-Queisser (BROWN, 2009). Dito isso, as divisões dos tipos de painéis solares de primeira geração são definidas por:

Silício Monocristalino (m-Si): células produzidas a partir do silício monocristalino que são caracterizadas por possuírem em sua estrutura um único cristal de silício, podendo ser obtidas a partir do método Czochralski (Si-Cz). A partir dessa configuração, os elétrons movimentam-se de forma livre pelo material, tornando as células mais eficientes (NASCIMENTO, 2004). Todavia, apesar do seu elevado nível de eficiência e produção em

níveis elevados, o seu processo fabril é feito a partir de um lingote cilíndrico e, desse modo, há perdas de matéria-prima na etapa de corte da lâmina, fazendo com que o alto custo e a quantidade de energia necessária para a fabricação desse tipo de célula se tornem fatores que influenciem em sua comercialização.

Silício Policristalino (p-Si): o processo de fabricação das células solares a partir do silício policristalino é considerado mais econômico e menos rigoroso. As células são produzidas a partir de um material solidificado por meio de blocos formados por pequenos cristais. Diferente do silício monocristalino, o policristalino não possui elétrons organizados em um único cristal, mas separados por barreiras da junção de múltiplos cristais, fazendo com que haja uma menor eficiência no painel policristalino. (CEPEL & CRESESB, 2014)

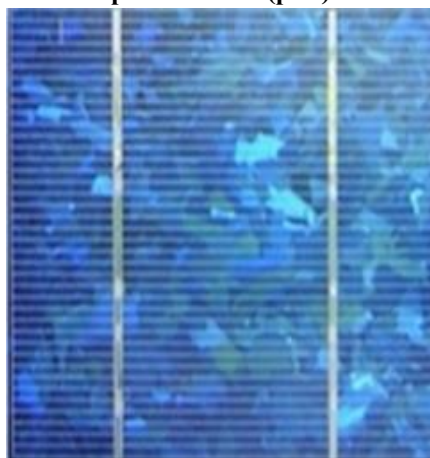
De acordo com Galdino (2014), as células fotovoltaicas produzidas a partir de m-Si possuem uma eficiência média de 16,5% e, para as lâminas produzidas a partir de p-Si, a sua eficiência varia entre 14,5% e 16%. As células fotovoltaicas de m-Si e p-Si são mostradas nas Figuras 7 e 8, respectivamente.

Figura 7 – Célula solar de silício monocristalino (m-Si).



Fonte: FADIGAS, 2012.

Figura 8 – Célula solar de silício policristalino (p-Si).



Fonte: FADIGAS, 2012.

2.1.3.2. Segunda Geração

Silício Amorfo (a-Si): Diferentemente da forma do cristal de silício utilizado na fabricação das células de primeira geração, o silício amorfo é considerado um material de grande maleabilidade devido a sua característica principal que é a ausência de um formato definido, podendo assim ser aplicado em diversas superfícies, além de baratear o processo

produtivo ao evitar o desperdício que ocorre com a serragem nas células de primeira geração. Um fator importante que interfere na produção dos painéis solares é a espessura de cada célula e, desse modo, as células constituídas de a-Si (Figura 9) possuem a capacidade de absorver maior quantidade de luz solar por possuir uma espessura menor (SANTANA, 2017).

Figura 9 – Célula fotovoltaica de silício amorfo (a-Si).



Fonte: HOGAR TECH, 2021.

Apesar do rápido crescimento do mercado, as células solares de segunda geração apresentam algumas desvantagens na utilização de filmes finos de a-Si, como por exemplo a perda significativa de eficiência ao longo da vida-útil do painel, levando os fabricantes a utilizarem várias camadas de silício amorfo em uma única célula, o que acarreta o alto custo do processo de fabricação (BROWN *et al.*, 2009).

2.1.3.3. Terceira Geração

As células solares de terceira geração trazem uma variedade de tecnologias que as definem como orgânicas, células multijunção, células sensibilizadas por corantes e pontos quânticos. Baseado em cada definição, as células de terceira geração se caracterizam pelo baixo custo de produção, a partir da junção das propriedades da primeira e segunda geração, além de um alcance elevado com relação a sua eficiência energética (SILVA *et al.*, 2001).

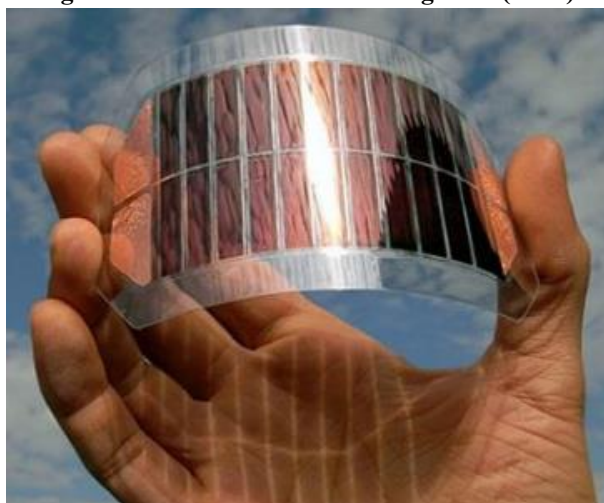
De acordo com Rühle (2016), as células solares de primeira e segunda geração, supramencionadas, possuem uma eficiência energética abaixo do valor de referência do limite de Shockley-Queisser, pela sua característica de produção que é uma única junção p-n. Afim de ultrapassar o valor do limite de Shockley-Queisser, as células que fazem parte da terceira geração são confeccionadas a partir de filmes finos sobrepostos, fazendo com que atinjam um nível de eficiência considerável, de aproximadamente 8%.

2.1.3.4. Célula Fotovoltaica Orgânica ou Polimérica (OPV)

Diferentemente das duas primeiras gerações de células fotovoltaicas que possuem o Si como matéria-prima principal para a sua produção, as células orgânicas de terceira geração são fabricadas a partir de compostos derivados da indústria petroquímica, sendo impressos em camadas de vidro ou PET (Politerefalato de etileno).

Apesar do baixo custo de fabricação, da leveza de cada célula, da compatibilidade com vários substratos e da grande área de absorção dos raios solares, a eficiência das OPVs é de apenas 10% (CHEN *et al.*, 2013). A Figura 10 ilustra uma célula desse tipo.

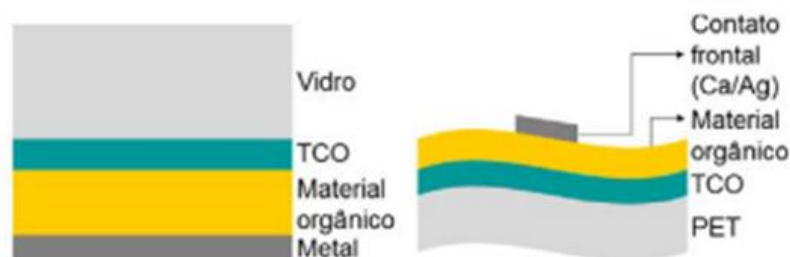
Figura 10 – Célula fotovoltaica orgânica (OPV).



Fonte: SANTANA, 2017.

As células fotovoltaicas orgânicas possuem uma arquitetura elaborada a partir da utilização de duas camadas de materiais poliméricos, que são caracterizados a partir da troca de elétrons entre um doador (camada 1) e um receptor de elétrons (camada 2). A disposição dos elementos para a montagem de uma OPV, se dá por meio da superposição de um substrato, que pode ser uma superfície flexível ou um vidro, um condutor transparente na forma de filme fino (TCO), o material orgânico, que pode ser depositado a partir de técnicas como o *roll-to-roll*, *spray* ou *spin-on*, e um contato metálico traseiro (PINHO *et al.*, 2014). A Figura 11 representa o esquema de montagem dessa célula.

Figura 11 – Esquema de montagem de uma célula fotovoltaica orgânica.

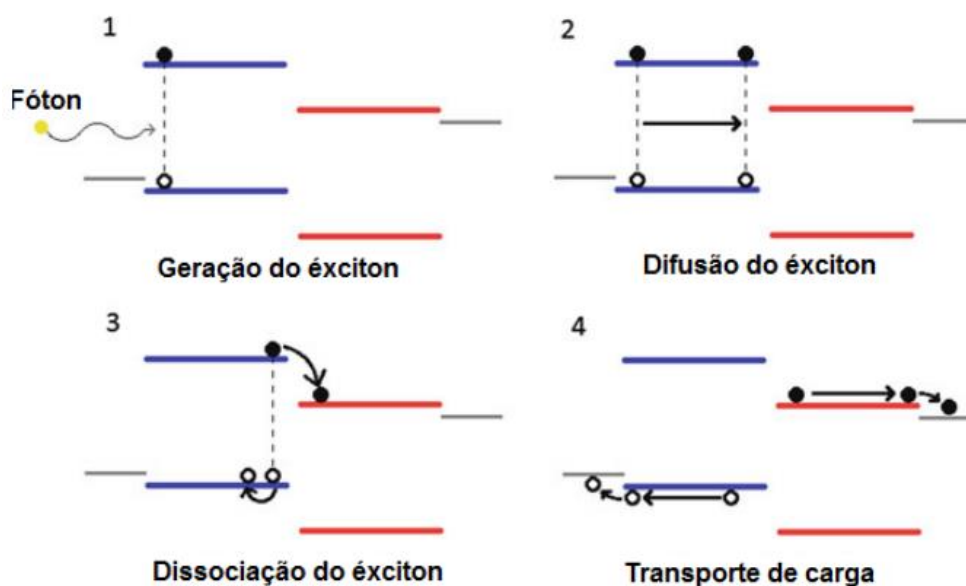


Fonte: Adaptada de PINHO *et al.*, 2014.

As camadas de eletrodos com maior rendimento que compõem um dispositivo fotovoltaico são constituídas geralmente por um metal (alumínio, bário, prata, etc.), que caracteriza o cátodo, e por um material de óxido de estanho dopado com índio (ITO), que realiza a função do ânodo (ASSUNÇÃO, 2016)

Em uma OPV, o processo de conversão dos raios solares em eletricidade é conhecido como fotoluminescência, esquematizado na Figura 12.

Figura 12 – Processo de fotoluminescência.



(1) Absorção do fóton de luz. Geração de éxciton. (2) Difusão de éxciton. (3) Separação de carga. Dissociação de éxciton. (4) Transporte de carga. Fonte: CHOY, 2012.

Esse processo tem início a partir da recolha de um fóton de luz pela camada ativa, que estimula a formação de um estado excitado, ou seja, a formação de um par elétron-lacuna. Com isso, é realizada uma extensão para a interface do doador-receptor, em que ocorre a separação e transferência de uma carga dentro do material semiconductor orgânico para os eletrodos, sendo

destinados elétrons para o cátodo e lacunas para o ânodo. A estrutura formada a partir desses materiais asseguram a recepção dos portadores de cargas fotogerados e a geração de uma diferença de potencial que será responsável pela transferência dos portadores, devido a função de operação de cada eletrodo (GUNES *et al.*, 2007).

Os eletrodos de ITO, apesar de serem condutores e possuírem boa transparência, estão passando por um processo de substituição devido ao seu custo elevado e, ao longo dos anos, novas alternativas de substituição dos materiais inorgânicos foram surgindo. Segundo Genelhu (2019), esse fato se deu principalmente pela crescente exploração por parte da comunidade científica, a partir da investigação de materiais que suprissem os requisitos das células fotovoltaicas, como baixo custo de produção e um baixo índice de energia de processamento, flexibilidade, boa transparência e leveza. Além disso, a estabilidade de eficiência de conversão de energia é um aspecto importante para que as OPV's obtenham uma melhoria na sua eficiência energética e na sua comercialização. Com o crescente avanço de pesquisa por meio das instituições científicas, uma alternativa viável para esse processo de substituição são os eletrodos compostos a partir do Grafeno.

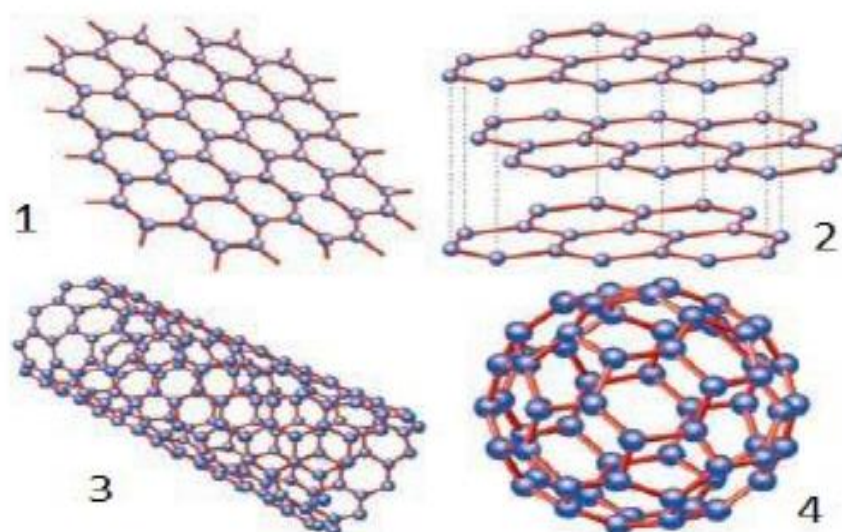
2.2. Grafeno

Entre os elementos essenciais para a vida e de grande importância para o âmbito da química, podemos destacar o carbono (C). Uma das principais características do carbono é o número ilimitado de alótropos, fazendo com que as suas propriedades físicas sejam equivalentes a dimensão dessas estruturas.

Segundo Lima (2013), a partir da organização estrutural de sistemas contendo apenas átomos de carbono, em sp , sp^2 e sp^3 , é possível a obtenção de estruturas estáveis com duas, três ou quatro ligações.

Os alótropos mais conhecidos compostos a partir da disposição dos átomos de carbono são o Grafite, um alótropo tridimensional (3D) composto a partir de camadas de grafeno fisicamente unidos a partir da ação de forças conhecidas como Forças de Van der Waals, o Fulereo, que são moléculas de átomos de C organizados de forma esféricas com dimensão zero (0D), e os Nanotubos de carbono, que são obtidos rolando grafeno e reconectando as ligações de carbono (ADREONI, 2000). Cada forma do carbono é representada na Figura 13.

Figura 13 – Alótropos do carbono.



(1) Grafeno. (2) Grafite. (3) Nanotubos. (4) Fulerenos. Fonte: Adaptado de LUZ, 2022.

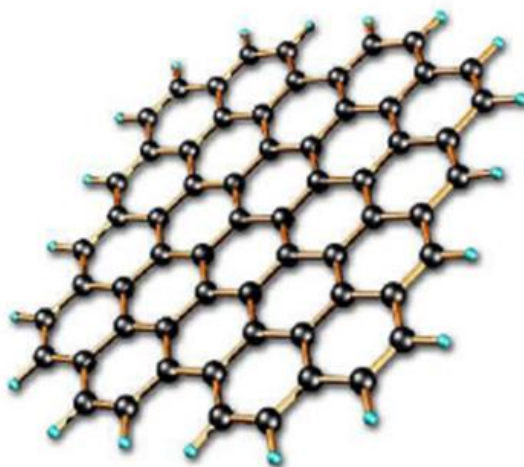
O grafeno é um material que tem chamado a atenção dos pesquisadores das mais diversas áreas. As suas propriedades físico-químicas, mecânicas, térmicas, elétricas e ópticas, tornam esse elemento um divisor de águas devido a sua estruturação bidimensional (2D), podendo ser utilizado desde sistemas de energia solar, para revestimento de células e outras aplicações, a dispositivos eletrônicos (VILAR, 2015).

2.2.1. Estrutura do Grafeno

Na década de 70, a partir do estudo de um novo método de Raio-x baseado na disposição dos átomos de carbono em sólidos, conhecida como Cristalografia, a estrutura do grafeno já dava indícios da sua forma teórica. Entretanto, apenas em 2004, pesquisadores da Universidade de Manchester descobriram um novo alótropo de carbono isolando planos da molécula sobre uma superfície de óxido de silício (SiO_2), que recebeu o nome de grafeno, termo adotado a partir da junção do grafite com o sufixo - eno, devido à presença de uma dupla ligação (PAULING, 1971).

O grafeno é uma folha de C de espessura de apenas um único átomo, em que as moléculas estão dispostas em uma estrutura em forma de favo de mel, feita de hexágonos e formando uma camada monoatômica e, portanto, possui uma transmitância de aproximadamente 97,7% em todo o espectro de luz visível, visualizada na Figura 14. Essa característica faz com que o grafeno seja capaz de permitir a passagem de energia luminosa sem que essa fração de energia seja absorvida ou dispersa pelo material (LIU *et al.*, 2012).

Figura 14 – Moléculas de carbono em estrutura de favo de mel.

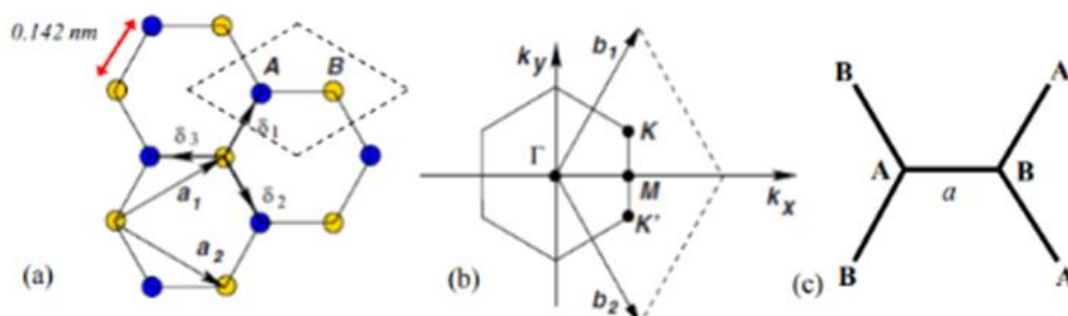


Fonte: LIMA, 2012.

No grafeno, as ligações dos átomos de C são organizadas a partir de orbitais s, p_x e p_y de hibridização sp^2 , feita a cada outro por três ligações do tipo covalente σ e com ligações mais fracas π , em que a ligação π é responsável pela condutividade do grafeno. A estrutura de uma molécula de grafeno é organizada de modo que os elétrons possuam interconexão de dois átomos, formando uma rede de Bravais triangular bidimensional (GEIM *et al.*, 2007).

A disposição de cada átomo que compõe a molécula de grafeno pode ser caracterizada como vetor descrito em coordenadas cartesianas, em que são mostrados na Figura 15.

Figura 15 – Características estruturais do grafeno

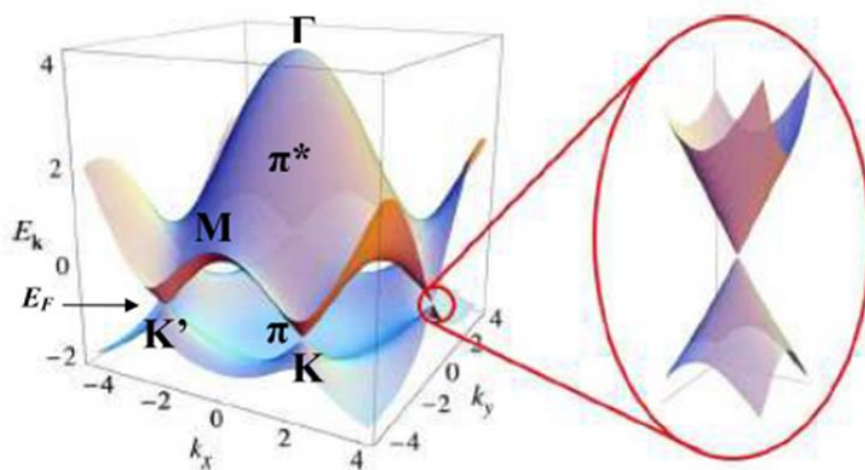


(a) Estrutura do grafeno. (b) Zona de Brillouin. (c) Três pontos vizinhos dos átomos A e B. Fonte: LIMA, 2012.

De acordo com análise feita por Lima (2012), os pontos da zona de Brillouin do grafeno são conhecidos como “pontos de Dirac”, em que esses pontos se relacionam de forma intrínseca com o sistema.

Um dos pontos importantes que diferencia o grafeno dos outros materiais é a sua capacidade de se comportar como semiconductor ou como condutor, apresentando um *gap* nulo, fenômeno que ocorre quando a banda de valência toca a banda de condução. Essa propriedade eletrônica pode ser observada na Figura 16.

Figura 16 – Bandas de energia do grafeno com *gap* nulo.



Fonte: LIMA, 2012.

A velocidade de um portador de carga elétrica sob a ação de um campo elétrico em uma folha de grafeno, ultrapassa a ordem de $10^5 \text{ cm}^2/(\text{V.s})$ à temperatura ambiente que, em comparação com a velocidade de um portador do Si, é duas ordens maior. Com isso, o grafeno se mostra como uma opção de substituto do Si na área da nanotecnologia (TKACHEV *et al.*, 2011).

2.2.2. Sintetização do Grafeno

A partir da descoberta do grafeno, novas formas de aplicação desse material foram sendo analisadas e, com isso, o desenvolvimento de novos métodos e o estudo de antigas formas de sintetização foram tomando espaço no meio científico. De acordo com Nascimento (2012), dentre as inúmeras formas de sintetização do grafeno, existem quatro métodos principais, sendo eles a esfoliação mecânica, a esfoliação em fase líquida, a deposição química da fase vapor (CVD) e o crescimento de grafeno epitaxial em carbeto de silício (SiC). Neste trabalho serão abordados os métodos citados anteriormente.

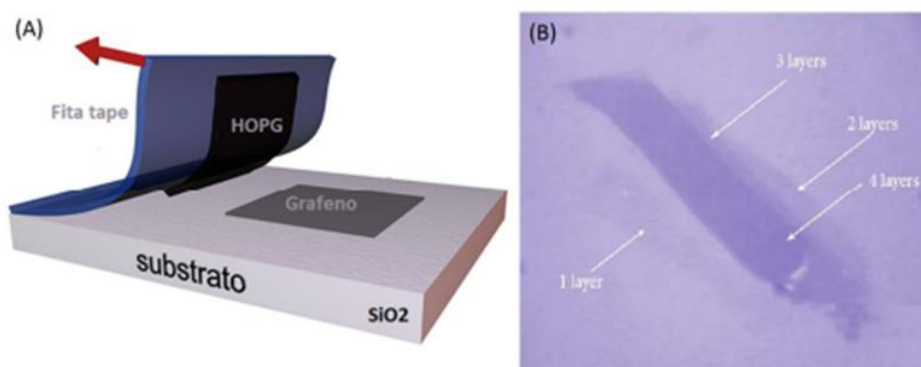
2.3.2.1. Esfoliação Mecânica

A primeira técnica de obtenção do grafeno, após a sua descoberta, foi a técnica conhecida como esfoliação mecânica. Em 2004, foi realizada a separação de folhas de grafeno em camadas individuais a partir de placas de 1mm de espessura, sendo considerada como a técnica pioneira para a obtenção do grafeno (NOVOSELOV *et al.*, 2004).

De acordo com Soldano *et al.* (2010), essa técnica consiste em, inicialmente, pressionar e destacar uma fita adesiva comum sobre um bloco de grafite natural ou grafite pirolítico repetidas vezes, de modo a obter um floco de grafite como uma amostra fina de monocamada. Para que ocorra o fenômeno de clivagem dos planos cristalinos do grafite, a força necessária capaz de romper as ligações de Van der Waals é de $300 \text{ nN}/\mu\text{m}^2$.

Soldano *et al.* (2010) afirma que, após a retirada da fita adesiva e da verificação da presença de fragmentos lisos e finos, a fita contendo os pedaços de grafeno é transferida para um substrato limpo e colocada em contato com uma amostra de óxido de silício (SiO_2), pressionando-a a fim de que seja eliminada qualquer bolha de ar e, desse modo, a monocamada obtida adere-se ao SiO_2 . Esse processo é demonstrado na Figura 17.

Figura 17 – Método da esfoliação mecânica.



(a) Método esfoliação mecânica do HOPG. (b) Material extraído depositado em um substrato de silício.
Fonte: ROMANI, 2015.

Segundo Sá (2011), após a deposição, é necessário que seja feita a retirada de qualquer resíduo de cola do grafeno, pois a presença de cola prejudica as propriedades finais do material, principalmente a condutividade elétrica e, para isso, a mostra é inserida em uma câmara e submetida à um aquecimento em vácuo ou em atmosfera de argônio e hidrogênio.

Ainda de acordo com a análise feita por Sá (2011), grande parte das descobertas realizadas em relação ao grafeno foram feitas a partir desse método, pois ele permite a obtenção

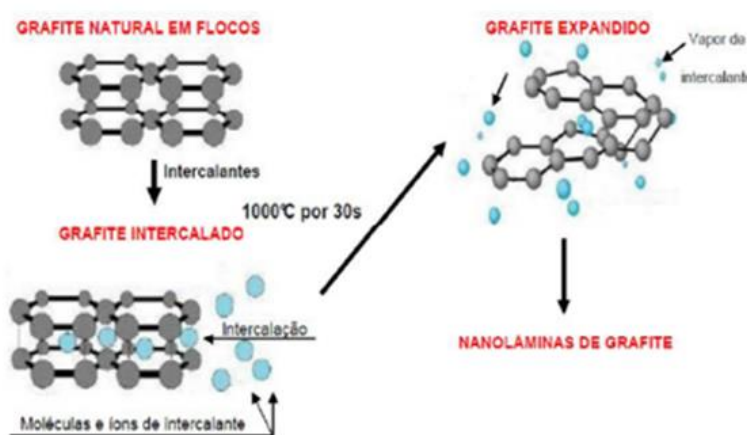
características estruturais e elétricas do grafeno de qualidade elevada, tornando-o mais cristalino e, além disso, há a possibilidade de adquirir pedaços de grafeno da ordem de até 100 μm , entretanto, é um método com processo demorado e com uma extração de material sintetizado em baixa escala, o que o torna comercialmente inviável.

2.3.2.2. Esfoliação em Fase Líquida

O método da esfoliação química em fase líquida do grafite consiste na quebra das ligações intermoleculares de Van der Waals entre as camadas do grafite a partir da utilização de ingredientes químicos (PRATO *et al.*, 2014).

O processo de esfoliação química inicia-se a partir da adição de moléculas ao grafite, com o objetivo de aumentar o espaçamento entre as camadas e transformá-lo em um composto conhecido como grafite intercalado (GI). Em seguida, é realizada a adição de átomos de carbono entre cada espaçamento, em que são apresentadas ligações interatômicas covalentes. O próximo passo é tornar o GI em um grafite expandido (GE) e, por fim, o material GE é exposto à um processo de lavagem ultrassônica com o objetivo de desfazer as ligações restantes e obter as nanolâminas de grafeno (NG) (FIM, 2012). O processo de esfoliação em fase líquida é caracterizado a partir da Figura 18.

Figura 18 – Processos do método de esfoliação em fase líquida do grafeno.



Fonte: CASTRO, 2011.

De acordo com Morozov *et al.* (2007), apesar de ser um método com alta taxa de produção de grafeno sintetizado e baixo custo, a técnica é ainda considerada impura por não

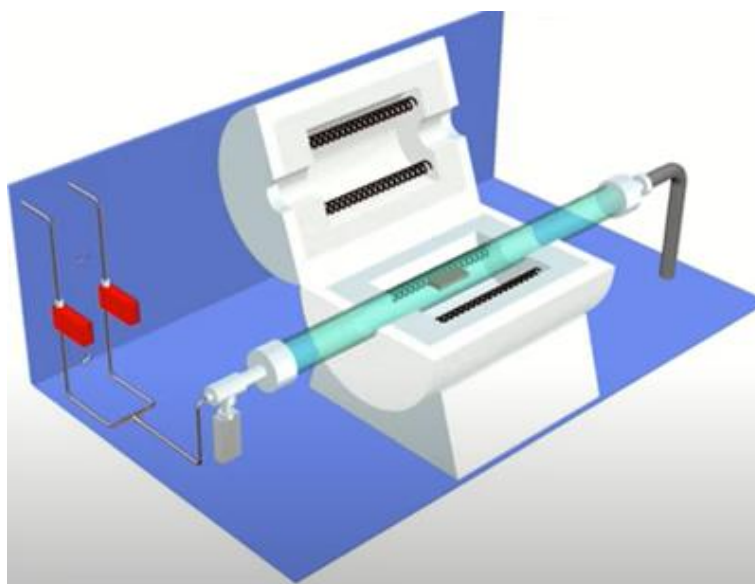
conseguir eliminar todos os vestígios de átomos de carbono adicionados entre as camadas do GIe, com isso, foi considerado um método ineficaz devido à baixa qualidade de material obtido.

2.3.2.3. *Deposição Química da Fase Vapor*

Em 2009, foi apresentada uma nova forma de produção de grafeno a partir de deposição de filmes finos por meio de uma fase gasosa, resultante de várias reações químicas, ficando conhecida como deposição química da fase vapor (GONÇALVES, 2012).

De acordo com Segundo *et al.* (2015), a técnica de deposição química em fase vapor, representada na Figura 19, é utilizada para o crescimento de materiais cerâmicos, metálicos e semicondutores. Para o grafeno, esse novo método apareceu a partir da quebra do hidrocarboneto na superfície do níquel quando exposto a altas temperaturas, fazendo com que o carbono seja absorvido para o interior do metal. No processo de resfriamento, o carbono é transportado para a superfície do metal, criando uma película fina de grafeno.

Figura 19 – Processo de deposição química em fase vapor do grafeno.



Fonte: CINE, 2019.

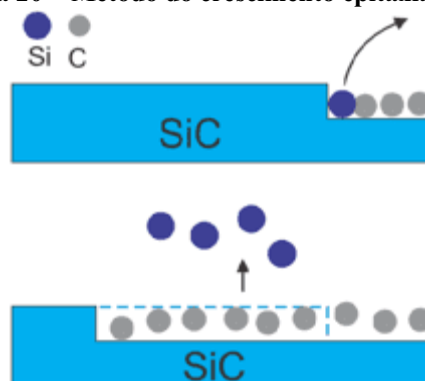
Assim como o método de esfoliação mecânica, o processo de obtenção do grafeno a partir de deposição química em fase vapor também possui suas desvantagens. De acordo com Vilar *et al.* (2015), o material sintetizado apresentou baixa interação com o substrato e, desse modo, cada ponto de nucleação do grafeno cresce em uma direção independente, fazendo com

que o fluxo de elétrons seja de forma desregulada, impedindo um transporte elétrico de qualidade.

2.3.2.4. Crescimento Epitaxial

Uma quarta abordagem sobre a sintetização do grafeno é conhecida pelo processo de obtenção envolvendo métodos de crescimento epitaxial, apresentada na Figura 20. De acordo com Gonçalves (2012), o método conhecido como crescimento epitaxial do grafeno permite o crescimento do grafeno em grandes regiões de amostra, crescido sobre um substrato de carbeto de silício (SiC).

Figura 20 – Método do crescimento epitaxial.



Fonte: ANTONIAZZI, 2019.

No ramo da microeletrônica, a técnica de crescimento epitaxial do silício é algo empregado frequentemente e, devido ao sucesso obtido mediante essa técnica, a análise dessa nova técnica no processamento e fabricação de materiais à base de grafeno tomaram novas proporções (VILAR, 2015).

O processo do crescimento de grafeno epitaxial em SiC caracteriza-se pelo alcance do ponto de fusão do carbono (C), quando este atinge uma temperatura de aproximadamente 3550°C. Apesar desse processo, o carbono é aquecido em duas etapas, devido a sua ligação com estruturas conhecidas como carbetos (cristais binários) (SÁ, 2011).

Segundo Chan *et al.* (2007), os resultados obtidos a partir da sintetização do grafeno pela técnica de crescimento evidenciam a possibilidade de novos dispositivos integrados baseados em grafeno, compostos a partir do agrupamento grafite/SiC, aplicáveis na nanoeletrônica. Além disso, a possibilidade de fabricação de componentes agrupados em um

único chip é uma das possibilidades oferecidas por esse método de sintetização, devido a obtenção do grafeno em um substrato inteiro.

2.2.3. Propriedades do Grafeno

Considerado o material mais forte já medido no universo e mais fino já conhecido, o grafeno possui propriedades eletrônicas, mecânicas e ópticas derivadas da sua cristalinidade. Além do âmbito da ciência, o grafeno tem se destacado em várias áreas de pesquisa pelas suas características como alta mobilidade e transparência eletrônica, flexibilidade, resistência a tensão mecânica maior que a do aço, condutividade térmica mais alta que a do cobre e leveza maior que outros materiais (SEGUNDO, 2015).

Uma propriedade intrínseca do grafeno que o faz ser descrito como um supercondutor é o deslocamento rápido e fácil que os elétrons que compõem a sua estrutura possuem. Isso se dá pelo fato de que a energia que um elétron do grafeno gasta para ultrapassar um gap é infinitesimal, enquanto em um isolante ou semicondutor, essa energia é limitada ao tamanho do gap (XU *et al.*, 2013).

De acordo com Vilar (2015), a condutividade elétrica e a mobilidade eletrônica do grafeno, quando comparada com a do silício, pode chegar a uma ordem de 100 vezes superior com um valor de até 2.10^4 S/cm e 2.10^5 cm²/Vs, respectivamente. Em relação às propriedades ópticas do grafeno o seu nível de transparência é quase total, tendo uma absorção da luz de aproximadamente 2,3%.

As propriedades desse material tornam-o promissor para aplicações como sistemas eletromecânicos, sensores e sondas, materiais polímero-compósito, fotoeletrônicos e sistemas de energia eletroquímica.

2.2.4. Aplicações do Grafeno

Com os avanços tecnológicos, cada vez mais novas formas de melhorias nas comunicações sem fios estão sendo analisadas. A amplificação dos sinais e o fornecimento do ganho em altas frequências só são possíveis a partir do uso de transistores de radiofrequência, entretanto, ainda há a degradação desses componentes. Uma alternativa para melhorar o desempenho das aplicações na radiofrequência são transistores fabricados a base de grafeno, com uma elevada mobilidade eletrônica (SCHWIERZ, 2011).

Uma das implementações do grafeno na indústria eletroquímica é como substrato de sensor para detectar compostos orgânicos e inorgânicos, gases e até moléculas biológicas, como glicose, maltose, frutose, ácido úrico e até ácido desoxirribonucleico (DNA). Além de possuir simplicidade e baixo custo, esse método oferece seletividade iônica e atividade eletroquímica aprimorada (FANG, 2013).

Para a eletroquímica, eletrodos a base de grafeno presentes em aplicações como supercapacitores designados a baterias e em células de combustíveis, possibilitam um aumento da capacitância de 20 a 30%, sendo possível devido a maior área superficial que o material possui e, conseqüentemente, fornece uma maior capacidade de armazenamento (ZANG *et al.*, 2014).

A alta condutividade elétrica do grafeno, a força mecânica e a absorção óptica, quando somadas, possibilitam uma aplicabilidade desse material em células solares com o propósito de melhorar a transparência, condutividade, controlabilidade, adesão e desempenho das células. Ademais, em razão da sua condutividade térmica, o grafeno aplica-se também em sensores térmicos, dissipadores de calor e compósitos com excelente condutividade térmica (CASTRO, 2011).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Eletrodos Transparentes a Base de Grafeno

Um dos requisitos de implantação de um material no processo de montagem de uma célula solar orgânica é possuir uma alta condutividade e transparência. Dito isto, o material mais comum utilizado para a confecção de eletrodos é óxido de estanho dopado com índio (ITO). O ITO possui mais de 80% de transmitância, entretanto, para que o processo de dopagem dos eletrodos ocorra, se faz necessário a exposição a altas temperaturas, tornando um processo com alto custo. Além disso, há outros pontos negativos com relação a utilização do ITO, como fragilidade, dificuldade de padronização, sensibilidade a meios básicos e ácidos e escassez (DEVOISE *et al.*, 2022).

Segundo Díez-Pascual *et al.* (2022), após a análise dos pontos negativos do ITO, surge a necessidade de substituição e o estudo de novos materiais. Uma das alternativas que têm sido estudada como possível forma de substituição do ITO são os nanotubos de carbono (CNT's). Após a implantação desse material como eletrodo transparente nas células OPV's, a eficiência de conversão de energia (PCE) obtida foi de aproximadamente 2,5%, entretanto, há limitações que impedem uma boa aplicação desse material, como o alto consumo de energia para a preparação dos CNT's e a alta rugosidade superficial do filme CNT. Em comparação com os CNT's, uma alternativa promissora para aplicação como eletrodo transparente é o grafeno, devido as suas propriedades elétricas e ópticas, além do maior coeficiente de transmissão quando comparado com o ITO.

Apesar das propriedades intrínsecas do grafeno, a sua utilização como material de eletrodo transparente nas células OPV's ainda apresenta um desempenho limitado. Esse fato se dá pela alta resistência da folha dos filmes do grafeno utilizadas nas células e, uma das formas de contornar essa situação é incorporar um material condutor ao grafeno (CHU, 2011).

Yin *et al.* (2010), relatou uma forma de ajuste dos filmes de grafeno a partir de filmes compostos por óxido de grafeno reduzido (rGO). Os estudos demonstram que, ao aumentar a espessura do filme de rGO há a redução da resistência da folha de rGO e, em contraste, há o aumento de transmissão do filme.

Liu *et al.* (2012) realizou um estudo relacionado ao grafeno orientado (GO) após reduzi-lo quimicamente e termicamente, com a finalidade de utilizá-lo como eletrodo transparente em uma OPV. De acordo com a sua análise, a transmitância dos eletrodos a base de GO é inversamente proporcional à sua condutividade e espessura.

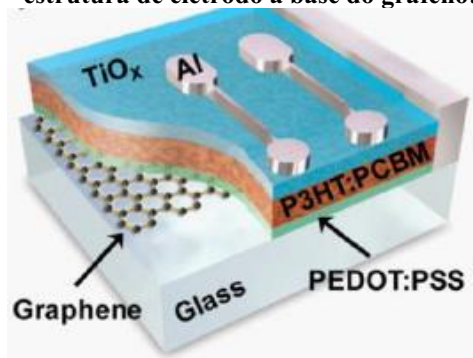
O estudo da síntese do grafeno por CVD, realizada por Ren *et al.* (2010), demonstrou maior eficiência e desempenho, quando comparada com o GO, pois além de maior qualidade e condutividade, a capacidade de resistência a condições de alteração da sua forma chega a 130°C, com uma rugosidade de aproximadamente 0,9nm.

Considerando os pré-requisitos citados para que um eletrodo seja considerado ideal, os resultados obtidos por meio das análises realizadas demonstram que, apesar do grande potencial dos filmes de grafeno como eletrodos transparentes para células OPV, ainda há a necessidade de melhoras significativas. Disto isto, Wan *et al.* (2011) cita alguns fatores que precisam ser considerados para estudos futuros:

- Melhoria da condutividade e transparência. Para que seja realizada a melhoria da condutividade sem comprometer a transparência do filme, a reorganização da estrutura intrínseca do grafeno após a dopagem deve ser considerada em primeiro lugar. Outra forma de melhoria da condutividade pode ser feita a partir da dopagem química;
- Para comercialização de um produto são necessários fatores como baixo custo e produção em larga escala, para esse tipo de material não é diferente. Dito isto, o processo *roll-to-roll* é um dos métodos que podem ser considerados para fundamentar esses critérios.

Nas Figuras 21 e 22, são representados os esquemas de uma célula OPV com eletrodos a base de grafeno e uma célula OPV fabricada em laboratório utilizando eletrodos a base de grafeno.

Figura 21 – Estrutura física da célula OPV com estrutura de eletrodo a base do grafeno.



Fonte: CHOE *et al.*, 2012.

Figura 22 – Célula solar orgânica flexível como eletrodo a base de grafeno.



Fonte: CHANG *et al.*, 2014.

3.2. Receptores de Elétrons a Base de Grafeno

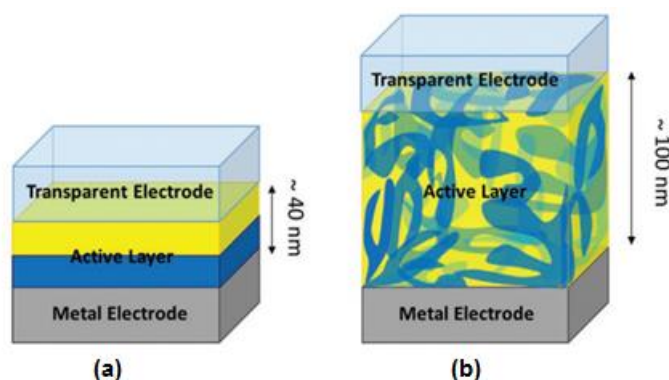
Os primeiros dispositivos fotovoltaicos orgânicos fabricados na década de 80, utilizaram em sua composição uma monocamada como camada ativa constituída de material orgânico, sendo estruturado em formato de sanduíche simples, porém, essa estrutura apresentou uma eficiência energética abaixo de 1% (CASTRO, 2018).

Como forma de melhoria da eficiência das células OPV, foi feito a montagem de células orgânicas a partir de estruturas compostas por camadas ativas utilizando dois semicondutores orgânicos de materiais diferentes e possuindo níveis de energia apropriados. A estruturas responsáveis pela criação da interface de dissociação dos éxcitons, formadas a partir da combinação desses materiais orgânicos (doadores e receptores), são chamados de heterojunções (COAKLEY, 2004).

Há dois fatores essenciais que o material receptor deve possuir, que é uma maior afinidade eletrônica (EA) e um potencial de ionização (PI) menor que a dos polímeros doadores (LONG *et al.*, 2011).

Existem dois tipos de heterojunções que têm sido amplamente utilizados: Estrutura de heterojunção planar e uma estrutura de heterojunção de massa misturada (BHJ). As representações dessas estruturas são demonstradas na Figura 23.

Figura 23 – Tipos de estrutura heterojunção em uma célula solar.



(a) Estrutura heterojunção planar de uma célula solar. (b) Estrutura de heterojunção de massa misturada de uma célula solar. Fonte: WADSWORTH, 2020.

Segundo Wang *et al.* (2011), as células OPV mais bem sucedidas foram fabricadas utilizando uma estrutura BHJ com polímeros de baixo intervalo entre as bandas do doados e do receptor. Esse fato se dá pela restrição de eficiência dos dispositivos de heterojunção atribuída

a distância pela qual os pares elétron-lacuna precisam percorrer para atingir os transportes de carga.

Os materiais formados a partir de fulerenos para aplicação como receptores de elétrons são os mais comuns utilizados em OPV's. Todavia, novos materiais com níveis de energia diferentes têm sido analisados e, dentre eles, o grafeno tem ganhado maior destaque (TONG *et al.*, 2011).

Diferentemente do fulereno, o grafeno possui alta mobilidade eletrônica e um nível de energia ajustável a partir do controle do seu tamanho. Além disso, com a utilização do grafeno, devido a sua facilidade de dispersão, o processo de solução pode ser empregado a partir de um solvente orgânico (XU *et al.*, 2011).

De acordo com Xue *et al.* (2005), uma das características que torna o grafeno uma ótima opção como substituto do fulereno é devido a formação de camadas doador/receptor para geração de carga e um caminho livre para o transporte de elétrons. Isso atribui-se a propriedade de bidimensionalidade e superfície plana que um átomo de grafeno possui.

Li *et al.* (2011), relatou uma possível separação dos pontos quânticos do grafeno com o objetivo de aumentar a luminescência e estabilidade, com um tamanho uniforme de 3-5 nm. Com uma alta área de superfície específica, alta mobilidade e *bandgap* ajustável, o grafeno porta-se como um material receptor de elétrons em dispositivos fotovoltaicos de grande relevância. A partir da separação dos pontos quânticos, foram relatadas melhoras em relação a eficiência energética das células OPV's, com uma PCE de 1,14%.

Nesse sentido, de acordo com Chen *et al.* (2011), existem alguns aspectos a serem considerados para aplicação do grafeno como material receptor de elétrons:

- Em dispositivos de estrutura BHJ, a interface do doador/receptor deve ser ajustada para uma associação eficiente ao par elétron-lacuna, formando uma rede em nano escala para o transporte de carga para os eletrodos. Desse modo, o tamanho do grafeno deve ser analisado quando comparado com o tamanho do doador para que gere uma rede de interpenetração em nano escala.
- O desempenho das células OPV varia de acordo com as mudanças de cada material em cada etapa de fabricação. Com isso, há a necessidade de ajustar o nível de correspondência de energia entre os doadores e o receptor (grafeno), para que haja um aumento de eficiência.

3.3. Transporte de Camadas a Base de Grafeno

Dentre os tipos de estruturas baseadas no grafeno para o revestimento ou como componente entre as camadas de fabricação de células orgânicas estão os materiais em forma de camadas responsáveis pelo transporte entre as divisões do dispositivo orgânico. A camada de transporte (HTL) é responsável pela redução da fuga de corrente, sendo depositada sobre o eletrodo transparente. Além disso, esse tipo de material desempenha a função de determinar o desempenho geral do dispositivo orgânico (WANG *et al.*, 2011).

De acordo com Chen *et al.* (2013), para que um HTL seja ideal sua composição deve ser feita a partir de um semicondutor do tipo p, além de desempenhar uma série de operações, sendo elas:

- Determinar a polaridade do dispositivo;
- Alterar a estrutura da camada ativa a partir das propriedades da superfície;
- Evitar reações químicas entre a camada ativa e os eletrodos;
- Ajustar a altura da barreira energética;
- Formar uma estrutura capaz de selecionar os elementos que serão transportados e barrar a passagem de elétrons;
- Atuar com características óticas

O tipo de HTL utilizado frequentemente em OPV é o poli poliestireno sulfonato (PEDOT:PSS), entretanto, esse tipo de material possui desvantagens ao permitir o desgaste do dispositivo por meio da absorção de água na célula orgânica devido a sua higroscopicidade. (LONG, 2011)

Segundo Li *et al.* (2011), uma forma de substituir esse tipo de material seria a partir de filmes finos de GO. Yin *et al.* (2014) realizou um estudo em que, a partir da deposição do composto de GO em suspensão aquosa, foi comprovado a proteção contra oxidação da camada de transporte, além de uma PCE de 3,5% e uma alta transparência.

Utilizando GO como camada de transporte, fulereno como receptor de elétron e o eletroquímico do copolímero (PTB7) como camada ativa de doação de elétron, Lou *et al.* (2011) conseguiu atingir uma PCE de 7,5% em uma OPV. Além disso, os resultados obtidos a partir dos experimentos realizados por Lou *et al.* (2011) comprovaram um aumento de pelo menos 5

vezes na vida útil do dispositivo e 20 vezes na vida útil em ambientes com umidades elevadas, quando comparados com os dispositivos OPV utilizando PEDOT:PSS.

3.4. Análise e comparação das estruturas

Cada estrutura possui sua especificidade e a sua contribuição para uma OPV, quando comparada com o material correspondente a qual ele foi estudado como possível substituto no processo de fabricação e revestimento da célula. Com isso, a Tabela 1 traz uma comparação entre essas estruturas, assim também como a eficiência, vantagens e desvantagens e as possíveis melhorias.

Tabela 1 – Comparação entre as estruturas utilizando grafeno.

	ELETRODOS	RECEPTORES	TRANSPORTADORES
MATERIAL	Grafeno sintetizado por CVD	Grafeno	Grafeno orientado (GO)
EFICIÊNCIA DE CONVERSÃO DE ENERGIA (PCE)	1,18%	1,14%	7,5%
VANTAGENS	• Maior resistência em condições de flexibilidade;	• Alta mobilidade eletrônica; • Nível ajustável de energia; • Formação de camadas doador/receptor.	• Aumento da vida útil da célula em até 5 vezes; • Proteção contra oxidação;
DESVANTAGENS	• Difusão de íons dentro das camadas do polímero. • Menor condutividade e transparência.	• Alta resistividade; • Menor transparência.	• Custo de fabricação ainda elevado; • Nível de eficiência do GO (4,6eV) abaixo do nível do ITO.
MELHORIAS	• Melhoria da condutividade e da transparência; • Baixo custo de produção.	• Ajuste da interface doador/receptor; • Ajuste no nível de correspondência de energia entre doadores e receptores.	• Controle do nível de energia do grafeno; • Maior contato do grafeno e seus derivados com sua camada posterior.
TRABALHOS ANALISADOS	• LIU J.; XUE Y.; ZHANG M.; DAI L. Graphene-based materials for energy applications,	• WANG, Y.; TONG, S. W.; XU, X. F.; ÖZYILMAZ, B.; LOH, K. P. Graphene: Interface Engineering of	• WAN, X.; LONG, G.; HUANG, L.; CHEN, Y. Graphene – A Promising Material for Organic

MRS BULLETIN, Vol. 37, pp. 2-3. 2012. • WAN, X.; LONG, G.; HUANG, L.; CHEN, Y. Graphene – A Promising Material for Organic Photovoltaic Cells. Advanced Materials, 23(45). 2011. • 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.	Layer-by-Layer Stacked Graphene Anodes for High-Performance Organic Solar Cell. Advanced Materials, v. 23, n. 13, p. 1475-1475, 2011. • XUE, J.; RAND, B. P.; UCHIDA, S.; FORREST, S. R. A hybrid planar–mixed molecular heterojunction photovoltaic cell. Advanced Materials, v. 17, n. 1, p. 66-71, 2005.	Photovoltaic Cells. Advanced Materials, 23(45). 2011. • CHEN, D.; ZHANG, H.; LIU, Y.; LI, J. Graphene Its Derivates for the Development of Solar Cells, Photoelectrochemical, and Photocatalytic Applications. Energy & Environmental Science, v. 6, n. 5, p. 1362-1387, 2013. • YIN, Z.; ZHU, J.; HE, Q.; CAO, X.; TAN, C.; CHEN, H.; ZHANG, H. Graphene-based materials for solar cell applications. Advanced energy materials, v. 4, n. 1, p. 1300574, 2014.
---	--	--

Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2022).

Os eletrodos a base de grafeno demonstraram 1,18% de eficiência nas células OPV's, porém, há fatores como custo elevado de fabricação, baixa transparência e produção em baixa escala, que afetam a utilização desses componentes nos dispositivos orgânicos para o uso comercial. Em comparação com ITO, material comumente utilizado como eletrodo nas OPV's, o grafeno ainda necessita de um aprimoramento em seu processo fabril, afim de tornar a sua resistividade menor, já que esse é um fator que interfere diretamente no aumento da eficiência da célula.

Para os receptores baseados em grafeno, apesar de ser considerado como um dos métodos pioneiros para melhorar a eficiência energética das células OPV's, com uma PCE de

1,14%, também possuem pontos a serem melhorados para que seja possível uma utilização adequada no processo de revestimento das células.

Os estudos sobre os materiais como modelo de transporte de camadas a base de grafeno em células OPV's demonstram uma PCE de 7,5%, além do aumento de vida útil do material em até 5 vezes. Vale ressaltar que, para a obtenção desse resultado, o material utilizado como receptor de elétrons foi o fulereno, alótropo do carbono já utilizado como principal componente dessas estruturas, e como transportador foi utilizado o grafeno orientado (GO).

4. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Mesmo com uma fabricação em larga escala, o desempenho dos dispositivos orgânicos necessita de uma melhoria para a implantação e uso comercial. Na teoria, os modelos fabricados podem atingir uma eficiência energética de até 15%, porém, na prática, o índice PCE atingido é de apenas 8%. Com isso, surge a necessidade de estruturas mais estáveis a fim de otimização nos desempenhos das células OPV.

As células solares orgânicas possuem características que as permitem ser utilizadas como possíveis substitutas das células solares convencionais, como leveza, baixo custo de fabricação, flexibilidade, maior área de absorção da incidência solar e possíveis melhorias futuras.

Dentre os materiais e métodos de fabricação das células OPV, a aplicação do grafeno proporciona uma melhoria na taxa de eficiência energética a partir do aumento de absorção e conversão de energia.

Apesar das pesquisas acerca dos métodos de revestimento dos dispositivos orgânicos com o grafeno serem recentes, é notório o progresso neste ramo. A aplicação do grafeno em células OPV possibilita não apenas a projeção e fabricação de novos modelos, mas também a correção de níveis de eficiência energética antes não obtidos utilizando componentes a base de materiais convencionais, como o Si ou o ITO, por exemplo.

O desempenho dos dispositivos orgânicos baseia-se na microestrutura dos materiais utilizados, com isso, as formas de montagem entre as camadas do grafeno e os outros materiais, tais como controle de morfologia, adaptação estrutural e adaptação das interfaces utilizadas precisam ser consideradas no processo de elaboração das células OPV.

Embora os procedimentos utilizados para o ajuste do ganho de eficiência das células tenham demonstrado bons resultados, ainda há a necessidade de uma maior exploração. Desse modo, é esperado que, com a correção dos fatores supracitados, as células orgânicas sejam tidas como prováveis fontes de energias renováveis no futuro, com o custo reduzido e eficiência energética maior, quando comparados com as células solares convencionais.

Para possíveis estudos futuros, vale ressaltar o surgimento de uma nova fonte de energia renovável baseada na captação solar, conhecidas como células solares com perovskita e eletrodos de grafeno, objetivando uma superação nos valores de eficiência energética já obtida pelas células solares.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHMED, F. *et al.* **A REVIEW ON GRAPHENE BASED SOLAR CELLS.** International Journal of Recent Scientific Research, United State of America-USA, Vol. 8, 5 p, pp. 16893-16896, 2017
- ALVES, D. L. **Geração Solar Fotovoltaica - Conceitos Básicos.** (Apostila). Rio Grande do Norte: IFRN, 2016.
- ANDREONI, W. **The Physics of Fullerene-Based and Fullerene Related Materials** Springer, Berlin. 2000.
- ANTONIAZZI, I. S. L. **Grafeno epitaxial sobre sic(0001): crescimento, intercalação e efeitos de interface.** Universidade Federal de Minas Gerais. Minas Gerais. 2019.
- BIZERRA, A. M. C. *et al.* **O impacto ambiental dos combustíveis fósseis e dos biocombustíveis: as concepções de estudantes do ensino médio sobre o tema.** Revista Brasileira de Educação Ambiental, São Paulo, V. 13, No 3: 299-315, 2018.
- BROWN, G.F.; WU, J. **Energia fotovoltaica de terceira geração.** Revisão de Laser & Fotônica, 3(4), 394–405. 2009.
- CASTRO, M. O. **Síntese de grafeno pelo método CVD.** 84 f. Dissertação (Mestrado em Física). Departamento de Física, Universidade Federal do Ceará, Ceará, 2011.
- CASTRO, R. K. **Desenvolvimento de eletrodos e substratos poliméricos flexíveis aplicados à Dispositivos Fotovoltaicos Orgânicos.** Tese (Doutorado). Departamento de Física, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2018.
- CEPEL – CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA; CRESESB – CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO BRITO. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos.** Rio de Janeiro, RJ: Especial 2014.
- CHAN, W. K. *et al.*, **Field effect in epitaxial graphene on a silicon carbide substrate,** Applied Physics Letters. 2007.
- CHEN, D.; ZHANG, H.; LIU, Y.; LI, J. **Graphene Its Derivates for the Development of Solar Cells, Photoelectrochemical, and Photocatalytic Applications.** Energy & Environmental Science, v. 6, n. 5, p. 1362-1387, 2013.
- CHOY, W. C. H., **Organic Solar Cells: Materials and Device Physics.** Springer London. 2012.
- CINE, Center for Innovation on New Energies. **Síntese de grafeno por CVD (Deposição Química na Fase Vapor) e utilização em Supercapacitores.** Youtube, 22 de nov. 2019.
- COAKLEY, K.M.M. M. D. **Conjugated Polymer Photovoltaic Cells.** Chemistry of materials, 2004.

DAVOISE, V. L.; DÍEZ-PASCUAL, A. M.; CAPILLA, P. R. **Application of graphene-related materials in organic Solar cells**. Materiais. 2022.

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.

FANG, Y.; WANG, E. Electrochemical biosensors on platforms of graphene. Chemical Communications, 49, 9526-9539, 2013.

FILHO, Kepler; SARAIVA, Maria. **Espectroscopia**. In: ASTRONOMIA e Astrofísica. [S. l.: s. n.]. cap. 21, p. 159-167, 2014.

FIM, F. **Síntese e propriedades de nanocompósitos de polietileno/nanolâminas de grafeno obtidos através de polimerização in situ**. 2012.

GARCIA, J. C.; JUST, O J. F.; MACHADO, W. V. M.; ASSALI, L. V. C. **Phys**, Rev. B, 2009.

GEIM, A. K.; NOVOSELOV, K. S. **The rise of graphene**, Nature Materials, 2007.

GENELHU, R. N. **Uso do Grafeno em Placas Fotovoltaicas para melhoria de eficiência energética**. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Ouro Preto. Minas Gerais. 2019.

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.

GÜNES, S.; NEUGEBAUER, H.; SARICIFTCI, N. S. **Conjugated polymer-based organic solar cells**. Chem. Rev. 1324–1338. 2007.

JO, G.; CHOE, M.; LEE, S.; PARK, W.; KAHNG, YH; LEE, T. **A aplicação do grafeno como eletrodos em dispositivos elétricos e ópticos**. Nanotecnologia, 23(11), 112001. 2012.

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.

LIU J.; XUE Y.; ZHANG M.; DAI L. **Graphene-based materials for energy applications**, MRS BULLETIN, Vol. 37, pp. 2-3. 2012.

LIU, Z.; LI, J.; SUN, Z.-H.; TAI, G.; LAU, S.-P.; YAN, F. **A Aplicação de Grafeno de Camada Única Altamente Dopada como Eletrodos Superiores de Células Solares Orgânicas Semitransparentes**. ACS Nano, 6(1), 810-818. 2011.

LUZ A. M. **Grafeno**. Infoescola Navegando e aprendendo, 2006-2018; Disponível em: <https://www.infoescola.com/compostos-quimicos/grafeno/> Acesso em: 25/09/2022.

MOEHLECKE, A.; ZANESCO, I. **Mercado, física e processamento de células solares**. 2005.

MURRAY, I. P.; LOU, S. J.; COTE, L. J.; LOSER, S.; KADLECK, C. J.; XU, T.; SZARKO, J. M.; ROLCZYNSKI, B. S.; JOHNS, J. E.; HUANG, J.; YU, L. **Graphene oxide interlayers for robust, high-efficiency organic photovoltaics**. The Journal of Physical Chemistry Letters, v. 2, n. 24, p. 3006-3012, 2011.

NASCIMENTO, C. A. **Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica**. Diss. Universidade Federal de Lavras, 2004.

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.

PARK, H.; CHANG, S.; ZHOU, X.; KONG, J.; PALACIOS, T.; GRADEČAK, S. **Flexible Graphene Electrode-Based Organic Photovoltaics with Record-High Efficiency**. Nano Letters, 14(9), 5148–5154. 2014.

PAULING, L. et al. **The Nature of the Chemical Bond** Cornell University Press, Ithaca, NY. 1971.

PINHO, J.; GALDINO, M. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: Cepel-Cresesb, 2014.

QUINTANA, M.; TAPIA, J.; PRATO, M. **Liquid-phase exfoliated graphene: functionalization, characterization, and applications**. Beilstein Journal Of Nanotechnology, 2014.

RAGOUSSI, M.; TORRES, T. **Materiais orgânicos fotovoltaicos**. Revista Virtual de Química, v. 7, n. 1, p. 112-125, 2015.

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.

REN21. **Renewables 2021: Global Status Report**. Paris: GSR, 2021.

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.

RÜHLE, S. **Tabulated values of the Shockley–Queisser limit for single junction solar cells**. Solar Energy, 130, 139–147. 2016

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.

SANTANA, L. S. **Introdução aos Sistemas Fotovoltaicos**. BlueSol - Energia Solar. São Paulo. 2017.

SCHWIERZ, F. **Industry-compatible graphene transistors**. Nature, 472, 41-42, 2011.

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.

SILVA, R. H.; ROSOLEM, C. A. **Crescimento radicular de espécies utilizadas como cobertura decorrente da compactação do solo**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.25, p.253-260, 2001.

SILVA, R. M. P.; **Células Solares Orgânicas baseadas em MEH-PPV**. 57 p. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Física, Universidade de Aveiro, Portugal, 2009.

SOLDANO, C.; MAHMOOD, A.; DUJARDIN, E. **Production, properties and potential of graphene**. Elsevier, 2010.

SOUZA, R. **Célula Fotovoltaica – O Guia Técnico Absolutamente Completo**. 2017.

THE UNIVERSITY OF MANCHESTER (United Kingdom) (Org.). **The story of graphene**. Disponível em: <<http://www.graphene.manchester.ac.uk/explore/the-story-ofgraphene/>>. Acesso em: 04 mar. 2022.

TIPOS de células fotovoltaicas. Hogar Tech, 2021. Disponível em: <<https://hogartech.site/tipos-de-celulas-fotovoltaicas/>>. Acesso em: 14 de out. de 2022.

TKACHEV, S. V.; BUSLAEVA, E. Y.; GUBIN, S. P. **Graphene: A Novel Carbon Nanomaterial, Neorganicheskie Materialy**, Vol. 47, No. 1, pp. 5–14, 2011.

VILLELA, M. **Brasil ganha o primeiro centro de pesquisas em Grafeno da América Latina**. 2016. Disponível em: <http://noticiasmineracao.mining.com/2016/02/25/brasil-ganha-o-primeiro-centro-de-pesquisas-em-grafeno-da-america-latina/>. Acesso em: 15 mar. 2022.

WADSWORTH, A., HAMID, Z., KOSCO, J., GASPARINI N., MCCULLOCH, I. **A heterojunção em massa em aplicações fotovoltaicas orgânicas, fotodetectores e fotocatalíticas**. Materiais Avançados, 2020.

WAN, X.; LONG, G.; HUANG, L.; CHEN, Y. **Graphene – A Promising Material for Organic Photovoltaic Cells**. Advanced Materials, 23(45). 2011.

WANG, Y.; TONG, S. W.; XU, X. F.; ÖZYILMAZ, B.; LOH, K. P. **Graphene: Interface Engineering of Layer-by-Layer Stacked Graphene Anodes for High-Performance Organic Solar Cell**. Advanced Materials, v. 23, n. 13, p. 1475-1475, 2011.

XU, C.; XU, B.; GU, Y.; XIONG, Z.; SUN, J.; ZHAO, X. S. **Graphene-based electrodes for electrochemical energy storage**. Energy & Environmental Science, 6, 1388-1414, 2013.

XUE, J.; RAND, B. P.; UCHIDA, S.; FORREST, S. R. **A hybrid planar–mixed molecular heterojunction photovoltaic cell**. Advanced Materials, v. 17, n. 1, p. 66-71, 2005.

YIN, Z.; ZHU, J.; HE, Q.; CAO, X.; TAN, C.; CHEN, H.; ZHANG, H. **Graphene-based materials for solar cell applications**. Advanced energy materials, v. 4, n. 1, p. 1300574, 2014.

ZANG, X.; LI, P.; CHEN, Q.; WANG, K.; WEI, J.; WU, D.; ZHU, H. **Evaluation of layerby-layer graphene structures as supercapacitor electrode materials**. Journal of Applied Physics, 2014.