

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ
GABRIEL CHAGAS PEREIRA

**ESTUDO SOBRE A SUBSTITUIÇÃO DO SILÍCIO
PELO GRAFENO EM PLACAS SOLARES
FOTOVOLTAICAS**

Taubaté - SP
2019

GABRIEL CHAGAS PEREIRA

**ESTUDO SOBRE A SUBSTITUIÇÃO DO SILÍCIO
PELO GRAFENO EM PLACAS SOLARES
FOTOVOLTAICAS**

Trabalho de Graduação apresentado para obtenção do Certificado de Graduação do curso de Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

Orientador(a): Prof. Rubens Castilho
Junior

**Taubaté – SP
2019**

SIBi - Sistema Integrado de Bibliotecas / UNITAU

P436e Pereira, Gabriel Chagas
 Estudo sobre a substituição do silício pelo grafeno em placas solares
 fotovoltaicas / Gabriel Chagas Pereira. – 2019.
 36f. : il.

 Monografia (graduação) – Universidade de Taubaté, Departamento
 de Engenharia Mecânica e Elétrica, 2019.

 Orientação: Prof. Rubens Castilho Junior, Departamento de
 Engenharia Elétrica.

 1. Eficiência. 2. Energia. 3. Fotovoltaico. 4. Grafeno. 5. Tecnologia. I.
 Título. II. Graduação em Engenharia Mecânica

CDD 621.3

GABRIEL CHAGAS PEREIRA

ESTUDO SOBRE A SUBSTITUIÇÃO DO SILÍCIO PELO GRAFENO EM PLACAS SOLARES FOTOVOLTAICAS

Trabalho de Graduação apresentado para obtenção do Certificado de Graduação do curso de Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

DATA: 04/12/2019

RESULTADO: APROVADO

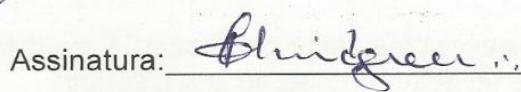
BANCA EXAMINADORA:

Prof. Rubens Castilho Junior

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ


Assinatura:  _____

Prof. Msc Maria Regina Hidalgo de Oliveira Lindgren UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

Assinatura:  _____

Prof. Msc Paulo Cesar Correa Lindgren

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

Assinatura:  _____

04/12/2019

Dedico este trabalho a minha família por sempre ter dado apoio
e suporte durante a jornada.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e da graça. Agradeço pela minha vida, minha saúde, minha família e meus amigos.

À Universidade de Taubaté – UNITAU, que ofereceu um excelente ambiente educacional com profissionais qualificados

Ao meu orientador, *Prof. Rubens Castilho Junior* por ter aceitado ser o orientador desse trabalho.

Aos meus pais *Waldomiro e Maiza*, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos.

A minha namorada *Christiane Stadler Travassos*, por sempre me incentivar em todos os passos.

Aos Professores *Msc Maria Regina Hidalgo de Oliveira Lindgren, Msc Paulo Cesar Correa Lindgren e Dr Evandro Luís Nohara* pelo auxílio e incentivo na realização desse trabalho.

Às funcionárias da Secretaria pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar.

“É impossível progredir sem mudança, e aqueles
que não mudam suas mentes não podem mudar
nada”
(GEORGE BERNARD SHAW)

RESUMO

Na intenção de se buscar novas tecnologias, em cima de estudos e pesquisas para a geração de energia mais limpa, renovável e eficiente do que encontramos hoje, esse trabalho foi realizado. Com a revolução da nanociência diversos países vem investindo fortemente no desenvolvimento dessa tecnologia na intenção de ficar na vanguarda dessa área. Com a aparição do grafeno através do trabalho de Novoselov e Geim, estão se abrindo novos horizontes com grandes possibilidades de novos dispositivos para melhorar o nosso dia a dia. Esse estudo foi realizado com o objetivo de se utilizar dessas tecnologias, que o grafeno vem possibilitando, na área de geração de energia elétrica fotovoltaica, com a substituição do silício pelo grafeno que já é comprovadamente um material muito mais eficiente a medida que o silício vem atingindo o seu auge de resultados. Esse trabalho foi realizado com pesquisas e revisões bibliográficas a fim de se obter conhecimento através de diversas pesquisas já realizadas no Brasil e no mundo. Ele serve de incentivo, não só para essa área de estudo em cima do grafeno especificamente mas também para a busca de novos recursos mais eficientes, limpos e renováveis.

Palavras-chave: Eficiência. Energia. Fotovoltaico. Grafeno. Tecnologia.

ABSTRACT

To search for new technologies, studies and research for cleaner, renewable and efficient energy generation than it found today, this work was done. With a nanoscience revolution in many countries, it has been investing heavily in the development of this technology to remain at the forefront of this area. With the appearance of the graph through the work of Novoselov and Geim, they are opening new horizons with great possibilities for new devices to improve our daily lives. This study was carried out to use these technologies, which the graphic has been enabling, in the area of photovoltaic power generation, with the replacement of silicon by graphene, which is already proven to be a much more efficient material than silicon has been reaching. results indicator. This work was carried out with research and bibliographical analysis to gain knowledge through several researches already conducted in Brazil and worldwide. It serves as an incentive, not only for this area of study at the top of the chart, but also for researching new, more efficient conservation and renewable resources.

KEYWORDS: Efficiency. Energy. Graphene. Photovoltaic. Technology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Formas alotrópicas do carbono.....	<u>15</u>
Figura 2 – Grafeno	<u>16</u>
Figura 3 – Total da produção da energia mundial por fontes	<u>22</u>
Figura 4 – Radiação solar global diária – Media anual típica	<u>24</u>
Figura 5 – Sistema de geração fotovoltaica	<u>26</u>
Figura 6 – Dopagem do silício.....	<u>27</u>
Figura 7 – Célula solar	<u>28</u>
Figura 8 – Gap comparado entre o grafeno e semicondutores comuns.....	<u>31</u>

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Investimentos Governamentais	<u>20</u>
Tabela 2 – Eficiência de Conversão.....	<u>31</u>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	<u>13</u>
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	<u>15</u>
2.1 Grafeno	<u>15</u>
2.1.1 Nanotecnologia.....	<u>18</u>
2.2 Silício.....	<u>20</u>
2.3 Energia Solar.....	<u>22</u>
2.3.1 Placa Solar Fotovoltaica.....	<u>24</u>
2.3.2 Efeito Fotovoltaico.....	<u>26</u>
3 METODOLOGIA	<u>29</u>
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	<u>30</u>
5 CONCLUSÃO	<u>33</u>
REFERÊNCIAS.....	<u>34</u>

1 INTRODUÇÃO

A população e o consumo de energia no mundo ainda se encontram em uma crescente e vai continuar assim por algumas décadas, e não só a quantidade mas também a qualidade de produção é um fator que precisa ser trabalhado devido à grande parte ser feita por geração de combustíveis não renováveis ou poluentes como o caso do carvão. Com isso se faz necessário a busca por melhores tecnologias para a produção de energia limpa, eficaz e renovável, que diversifique e, futuramente, substitua as matrizes energéticas espalhadas pelo mundo.

Temos no sol a principal fonte de energia, direta e indireta do nosso planeta, que ainda é pouco utilizado e mal aproveitado. Temos no Brasil um grande potencial de produção energética solar por ser um país geograficamente bem localizado, perto da linha do equador tendo grande incidência solar boa parte do tempo em seu território. Esse aproveitamento do sol para a produção de energia, pode ser realizado através do calor emitido pelo sol, sendo utilizado em aquecedores de água ou para a geração de energia termoelétrica através da heliotermia.

Mas para a conversão de energia solar em elétrica temos também a mais comum e utilizada hoje em dia que são os painéis fotovoltaicos, que geram energia através da incidência de raios solares. Hoje em dia os painéis mais comuns e acessíveis são os com células solares à base de silício, que com o decorrer dos anos foi evoluindo em eficiência mas que, atualmente, vem atingindo a sua capacidade máxima.

Nesses últimos anos vem crescendo a busca por novos materiais e novas técnicas, entre elas uma que vem ganhando destaque é a nanotecnologia, que apresentou ao mundo um novo mundo de grandes possibilidades e nesse mundo o material de maior destaque hoje em dia é definitivamente o grafeno.

O grafeno é um material já anteriormente estudado mas que tornou-se uma realidade em 2004, graças aos físicos Andre Geim e Konstantin Novoselov, da Universidade de Manchester, ganhadores do prêmio Nobel sendo um derivado do carbono com excelentes propriedades físico-química, com a sua estrutura em duas dimensões, muito versátil, ele é maleável com uma resistência mecânica maior que a do aço, sendo o material mais fino já conhecido, transparente, com grandes propriedades ópticas, é um excelente condutor térmico, sendo melhor condutor que o cobre e de grande mobilidade eletrônica. Essas propriedades o tornam um material

bem promissor na área de polímeros e compósitos, podendo trabalhar com diversos materiais em variadas áreas.

Com isso ele vem sendo pesquisado para substituir o silício na parte de semicondutores, devido suas propriedades e dimensões, sendo possível também substituí-lo nas placas fotovoltaicas, fazendo com que elas atinjam menores dimensões com uma maior eficiência, tornando futuramente a acessibilidade a energias renováveis mais limpas ao alcance de todos.

Esse trabalho tem como seu objetivo fazer um levantamento em cima de diversas pesquisas sobre as propriedades físico-químicas do grafeno para analisar a viabilidade de realizar a substituição do silício por grafeno em placas fotovoltaicas para a geração de energia solar, com uma maior eficiência, reduzindo a área das células fotovoltaicas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Grafeno

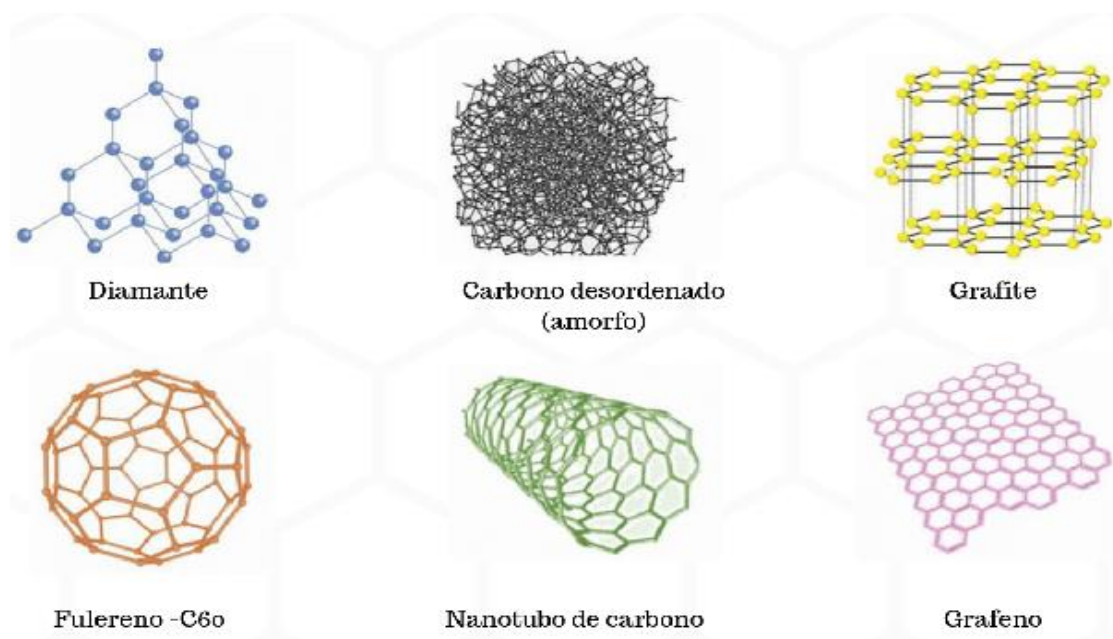
Para começarmos a falar sobre o grafeno devemos começar a falar sobre a sua estrutura básica que é o carbono. O carbono (C) é um elemento do grupo 14 na tabela periódica e se encontra amplamente distribuído na natureza.

Pode ser encontrada em abundancia no sol, estrelas, cometas e atmosferas da maioria dos planetas. O carbono está presente como dióxido de carbono na atmosfera e dissolvido em todas as águas naturais. É um componente das rochas como carbonato de cálcio (calcário), magnésio e ferro. Ele é encontrado na natureza em três formas alotrópicas: amorfa, grafite e diamante. A grafite é um dos materiais mais macios conhecidos e o diamante é um dos mais duros (WEBELEMENTS, 2019).

É o principal elemento da química orgânica capaz de gerar diferentes tipos de moléculas através de sua hibridização. Cada hibridização do carbono constrói uma diferente geometria em relação ao átomo de carbono, podendo ser linear sp de ângulo 180° , trigonal sp^2 de ângulo 120° ou tetraédrica sp^3 de ângulo $109^\circ 28'$. Teremos como exemplo em relação sobre a hibridização no caso da sp forma o gás acetileno, a sp^2 forma o grafeno e a sp^3 forma o diamante (NETO, 2011, p. 01).

Cada um com suas peculiaridades e especificidades, criando diversas opções de utilidades para serem aplicadas.

Figura 1 – Formas alotrópicas do carbono



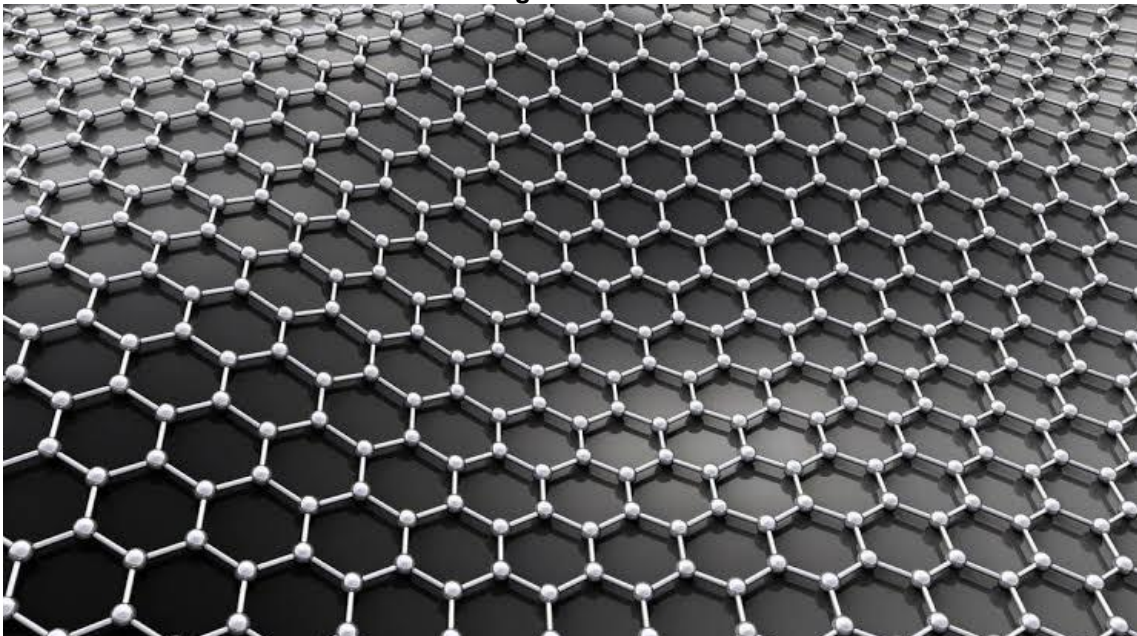
Fonte: ibict

Como escrito por Bassalo (2017) teoricamente o grafeno já foi estudado e descoberto anteriormente pelo físico teórico canadense Phillip Russel Wallace da Mcguill University em 1947, mas apenas em 1962 que o material se tornou real por meio do trabalho dos químicos alemães Ulrich Hofmann e Hanns-Peter Boehm, inclusive foi Bohem quem deu o nome ao material estudado de grafeno, juntando o grafite com o sufixo “eno”.

Segundo Neri (2011) em 2004 que o grafeno se mostrou uma realidade tecnológica através dos estudos de dois cientistas russos André Geim e Konstantin Novoselov e sua equipe, que conseguiram isolar camadas bidimensionais a partir do grafite e realizaram uma descrição sobre as propriedades elétricas da folhas de grafeno, conferindo lhes um prêmio Nobel em física de 2010.

O grafeno é uma das formas do carbono assim como o diamante e o grafite. Segundo Geim e Novoselov (2007) o grafeno representa conceitualmente uma nova classe de materiais com a espessura de um átomo e que, e baseado nisso, nos oferece novos caminhos dentro da física quântica que fornece um vasto campo para aplicações e não para de surpreender.

Figura 2 – Grafeno



Fonte: Olhar Digital

Para Vieira e Vilar (2017) graças ao grafeno possuir excepcionais características físico-químicas, mecânicas, térmicas, elétricas e ópticas, lhe confere a versatilidade de ser utilizado em sistemas que vão desde dispositivos eletrônicos a células de energia solar. Com isso se tornou um material que tem despertado interesse em pesquisas das mais diversas áreas do conhecimento.

Como estudado por Ranjbartoreh *et al.* (2011) o papel de grafeno quando comparado ao aço possui uma dureza que é o dobro, possui uma rigidez de flexão que é treze vezes maior, possui uma resistência a tração que é dez vezes maior e isso tudo tendo um quinto da densidade do aço e seis vezes mais leve que ele.

Para Limmer, Feldmann e Da Como (2013) a aplicação de grafeno na telecomunicação pode acelerar em até 100 vezes a velocidade de resposta em relação ao que temos hoje.

Como observado por Limmer, Feldmann e Da Como (2013) a utilização do grafeno de poucas camadas obteve uma resposta optica de alta velocidade, sendo útil para a criação de dispositivos optoeletrônicos de alta velocidade. Essa resposta se encontra na faixa infravermelha do espectro eletromagnético podendo ser aplicado em várias áreas como segurança, telecomunicações e medicina.

Lockheed (2013) está desenvolvendo um sistema de dessalinização da água do mar. Esse sistema contém uma membrana, com buracos da espessura de um nanômetro ou até menos, feita de folha de grafeno. Esses furos são tão pequenos que permitem a passagem das moléculas de água mas não permitem a passagem das moléculas de sódio, cloro e outros, aumentando o fluxo de água em 100 vezes em relação a técnica de osmose reversa reduzindo a pressão em cima da membrana devido ao entupimento que ocorre na osmose reversa. Com isso melhora drasticamente a eficiência na dessalinização de água, com a melhora na qualidade da água e redução no custo.

A utilização do grafeno também vem sendo utilizado na área da medicina, por exemplo, como vem sendo estudado por Chauhan, Maekawa e Kumar (2017) um grande número de biossensores a base de grafeno tiveram um excelente desempenho em relação ao diagnóstico e seus tratamentos, sendo possível sua aplicação comercial.

A estrutura eletrônica básica do grafeno e, como consequência, suas propriedades elétricas são muito peculiares, para Li et al. (2010) devido a estrutura plana e bidimensional das folhas de grafeno, faz dele o candidato ideal para a produção de filmes finos e para combina-lo com outros semicondutores.

Como descrito pelo site Inovação Tecnológica (2006) como nos nanotubos os elétrons no grafeno se movem em velocidades elevadas tendo perdas de energia bem reduzidas.

Para Neto *et al* (2009) as propriedades do grafeno são diferentes do que é encontrado comumente nos metais e semicondutores, ele é interessante pois é uma mistura de metal, semicondutores e a chamada matéria mole. É possível modifica o grafeno química e estruturalmente no intuito de alterar sua funcionalidade e consequentemente suas potenciais aplicações.

Segundo Brant (2011) os testes com o uso de grafeno mostra que os estudos sobre o transporte elétrico no grafeno tem resultado em um grande avanço e ainda possui diferentes probabilidades e caminhos de pesquisa a seguir.

2.1.1 Nanotecnologia

A nanotecnologia, que tem origem no grego nano “pequeno”, trata de algo tão pequeno que uma estrutura nano dimensionada tem de ser ampliada mais de 10 milhões de vezes para ser apreciada em pormenor a olho nu (SILVA, 2006). É o estudo e manipulação, de átomos e moléculas em escala nanométrica para a produção de tudo aquilo que o ser humano acredita em diversas áreas tendo como princípio a criação de determinado produto feito do começo a partir do menor elemento, de molécula em molécula, átomo por átomo sendo possível criar produtos mais eficientes, baratos e sem desperdício.

Para Martins (2008) a nanotecnologia se mostra em duas condições. Em uma ela apresenta duas explicações: a) a nanotecnologia como indicador de medida; e b) se referindo como um conjunto de técnicas para a manipulação da matéria à nível de átomos e moléculas. Na segunda condição, é considerada a diferença entre nanociência e nanotecnologia, a nanociência é o aprendizado dos fundamentos em relação a molécula e estruturas, e a nanotecnologia é aplicação para o desenvolvimento de dispositivos nanométricos.

Segundo Marques (2013) a primeira vez que se falou em nanotecnologia, embora tenha sido apenas o conceito, foi em uma palestra na Caltech chamada *“There’s a Plenty Room in The Bottom”* em 1959 do físico teórico norte americano Richard Feynman.

Apenas em 1974 o termo foi criado por Norio Taniguchi, professor da Tokyo Science University referindo-se a precisão de construir materiais em escalas nanométricas (SILVA, 2006).

Nos anos 80 é onde ocorre a redescoberta da nanotecnologia devido aos avanços ocorridos com a microscopia e a invenção do microscópio eletrônico de varredura por tunelamento (MARQUES, 2013). Com isso, nos anos que se seguiram, diversas descobertas foram ocorrendo no campo da nanotecnologia mas apenas no início do século XXI é que os centros de pesquisas começaram e conseguiram trabalhar em uma maior escala.

Em 2000 o Presidente Americano Bill Clinton lança o programa National Nanotechnology Initiative (NNI), que consiste em atividades individuais e cooperativas relacionadas a nanotecnologia de agências federais com uma variedade de funções e responsabilidades de pesquisa e regulamentação (NNI, 2019). Com isso foi dado um passo inicial para um grande aumento nos investimentos na área da nanotecnologia tanto nos Estados Unidos e conseqüentemente no resto do mundo.

Segundo Ramos e Pasa (2008) foi assegurado o compromisso, em longo prazo, dos EUA, através da lei de desenvolvimento das nanotecnologias no século XXI (21st Century Nanotechnology Development Act), com vigência do ano de 2005 a 2008, que irá investir perto de 3,7 bilhões de dólares em cinco agências, duplicando o atual nível de financiamento até o ano de 2008.

O aumento nos investimentos realizados em nanotecnologia no período de 97 até 2005 são demonstrados na tabela abaixo.

Tabela 1 – Investimentos Governamentais (em milhões de dólares)

País	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
EUA	126	151	179	200	~225	~400	~650	~950	~1050
Japão	120	135	157	245	~465	~720	~800	~900	~950
UE	116	190	255	270	465	697	862	989	~1081
Outros	70	83	96	110	~380	~550	~800	~900	~1000
Total	432	559	687	825	~1535	~2350	~3100	~3700	~4100
(% de 1997)	100%	129%	159%	191%	355%	547%	720%	866%	945%

Fonte: M. Roco, National Science Foundation.

2.2 Silício

O silício (Si) é o segundo elemento químico mais abundante na Terra, perdendo somente para o oxigênio, é o elemento de número atômico 14 que em seu estado natural se encontra no estado sólido.

Segundo a WEBELEMENTS (2019) ele se encontra presente no sol e estrelas e é o principal componente de uma classe de meteoritos conhecidos como aerólitos. O silício é responsável por mais de 25% do peso da crosta terrestre, ele é vastamente encontrado como areia (sílica), quartzo, cristal, ametista, ágata e opala. É encontrado também em minerais como o asbesto, feldspato, argila e mica. Ele é um importante componente no aço. O silício também tem grande importância na vida animal e vegetal. Diatomáceas tanto de água salgada como água doce utilizam a sílica como componente de suas paredes celulares.

O silício devido às suas propriedades físico-químicas é um material semicondutor com resistividade e condutividade elétrica entre os condutores e isolantes portanto sendo o material mais utilizado hoje em dia para essa função.

Como citado por Fadigas os átomos de silício tem como características conterem quatro elétrons de ligação que se juntam aos vizinhos construindo uma malha cristalina.

Para Mori, Santos e Sobral (2007) como o silício possui uma estrutura eletrônica bem peculiar, ele é um semicondutor de relevante importância no setor de eletrônica. Nos dias atuais o silício tem como sua principal aplicação a fabricação de placas solares fotovoltaicas. Essas placas são fabricadas com a adição de outros metais que perduram por muito tempo no meio ambiente a exemplo do telúrio e cádmio.

Segundo CRESESB (2006) em 1993 a fabricação de células solares a base de silício alcançou o número de 60MWp, foi quando colocou o silício como uma unanimidade no ranking dos materiais utilizados.

Para Nascimento (2004) o silício é utilizado de várias maneiras: monocristalino, policristalino e amorfo. Existem também os filmes finos que tem sido pesquisado para o mesmo fim, sendo mais barato sua produção, mas ainda apresenta uma eficiência inferior do que a do silício padrão.

Como descrito por Mori, Santos e Sobral (2007) o silício já é um material conceituado para a fabricação de painéis fotovoltaicos, sendo produzidos na forma de monocristais, policristais e também como filmes finos de silício amorfo. Entre eles a forma monocristalina possui a maior eficácia na conversão de energia solar em elétrica atingindo 22,7%, tendo os valores comuns entre 12-15% e um recorde de 24,7% atingido em laboratório. Os números alcançados pelos policristalinos ficam entre 11-14% e o amorfo 6-7%.

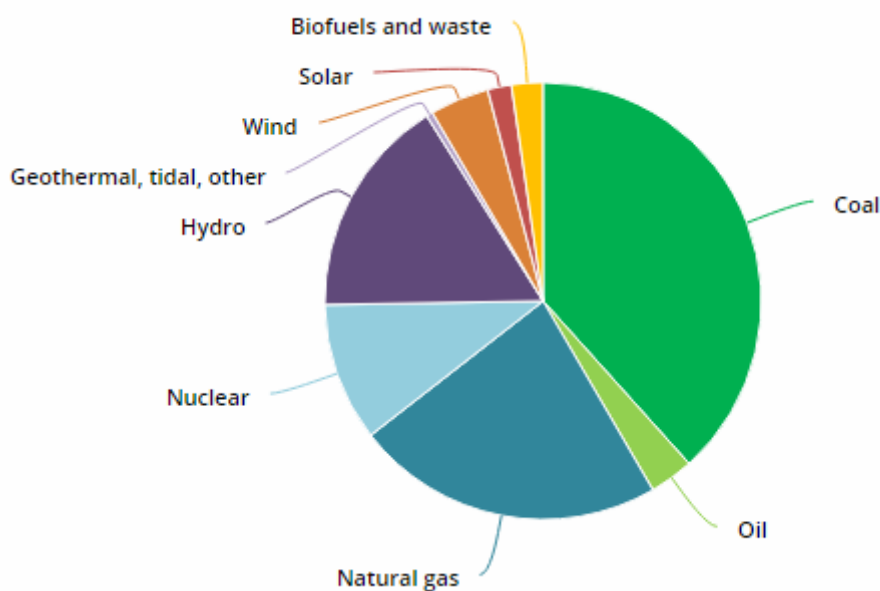
Entretanto ainda existe uma previsão de uma crescente na utilização de silício graças ao aumento na demanda na geração de energia elétrica através da produção pelo sistema fotovoltaico.

2.3 Energia Solar

Com a crescente poluição e o aumento no consumo de energia no mundo se torna necessário tanto uma mudança na matriz energética global como um aprimoramento das energias renováveis existentes.

Segundo a IEA (2017) os principais meios de geração de energia são carvão mineral (38,3%), petróleo (3,3%), gás natural (22,9%), nuclear (10,2%), hidroelétrica (16,3%), eólica (4,4%), solar (1,8%), biocombustíveis e resíduos (2,3%) geotérmicas e outras (0,5%).

Figura 3 – Total da produção de energia mundial, por fontes



Fonte: IEA (2017)

Para Pacheco (2006) as energias renováveis são quase que infinitas e não influenciam na temperatura da Terra pois tem em sua origem, quase todas, na energia emitida pelo raios solares.

Temos a nossa disposição diversas formas de energias renováveis em nosso planeta advindas dos ventos, rios, biomassa e sol mas apenas uma pequena parte da energia solar é aproveitada (ANEEL, 2002).

O sol é capaz de produzir continuamente $3,86 \times 10^{26}$ W de potência emanada para todo o sistema Solar, desse total a Terra recebe em média uma irradiação de

1.366W/m² em sua superfície (NREL, 2017). Segundo a Cresesb (2008) a incidência solar na Terra é de 10.000 vezes do que é consumido.

Como afirma Tolmasquim (2016) a energia solar vem sendo aproveitada pelo homem através do tempo e através dela foram saciadas suas necessidades como aquecimento, alimentação pela fotossíntese de produtores e iluminação.

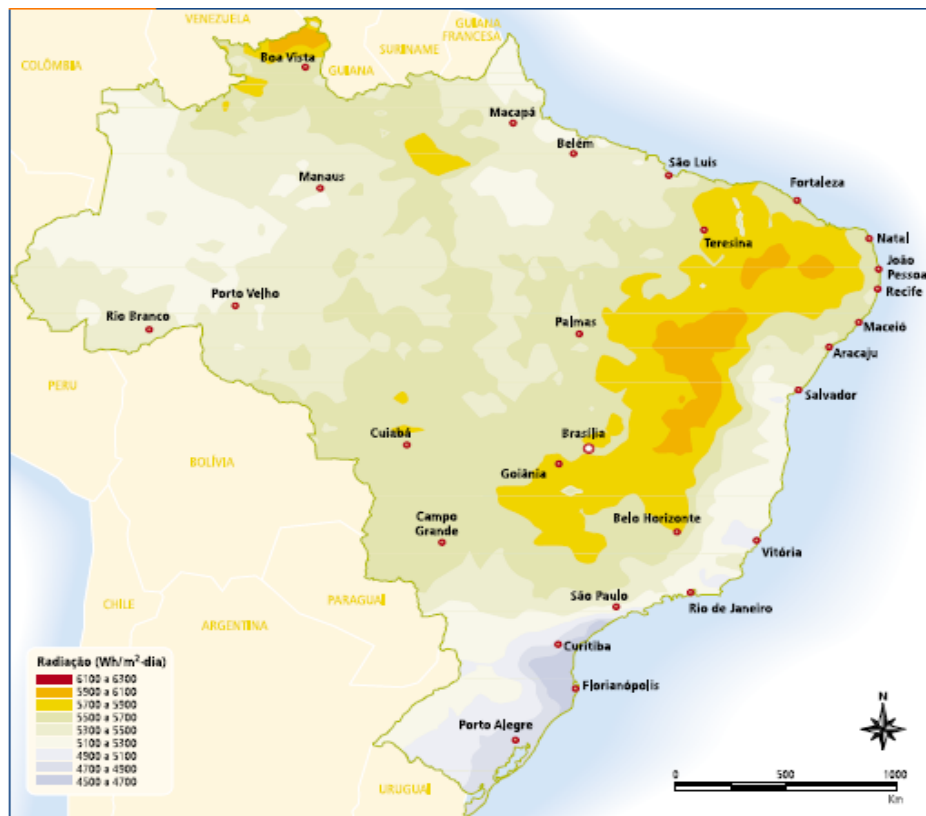
Mas a utilização de energia solar para conversão em energia elétrica ocorreu no último século tendo destaque duas formas que são a heliotérmica que consiste em utilizar o calor produzido para produção termoelétrica, aquecendo um fluido para geração de vapor que irá girar as turbinas, e temos a energia fotovoltaica que é a conversão direta de energia solar em energia elétrica.

Segundo Ren21 (2015) dessas duas, a fotovoltaica é a que mais vem crescendo atualmente, atingindo 98% das instalações em relação as duas gerações de energia em 2014.

Nosso país se localiza em uma situação favorável geograficamente devido ao posicionamento da incidência dos raios solares, favorecendo elevados índices de radiação, pouca variação mantendo bons índices mesmo no inverno (TOMASQUIM, 2016, p.311)

O Brasil tem uma vantagem imensa em relação a diversos países, tanto que, na região menos ensolarada do país tem um potencial de geração de energia solar maior do que a região mais ensolarada da Alemanha (INPE, 2017, p.57)

Figura 4 – Radiação solar global diária – Média Anual Típica (Wh/m².dia)



Fonte: ATLAS de Irradiação Solar no Brasil. 1998 (adaptado)

2.3.1 Placa Solar Fotovoltaica

Painéis Solares fotovoltaicos são formados por placas instaladas em áreas com alguma incidência solar que irão captar a energia luminosa dissipada pelo sol e converte-la em energia elétrica. Segundo Brito e Silva (2006) a energia solar fotovoltaica converte energia solar em eletricidade, sendo uma fonte renovável, limpa sem emissões indesejáveis por ter sua fonte o Sol, de natureza inesgotável.

Como citado pelo CRESESB(2019) os painéis fotovoltaicos vem sendo útil em locais de difícil acesso, ajudando em comunidades agrárias com irrigações e comunicações e também em projetos sociais. Os painéis por terem uma vida útil longa e baixo custo de manutenção, acaba sendo de grande ajuda em locais com baixa ou nenhuma oferta de energia elétrica.

Os painéis fotovoltaicos possuem três sistemas de funcionamento: o sistema autônomo ou isolado (off grid), o ligado à rede (on grid) e o híbrido.

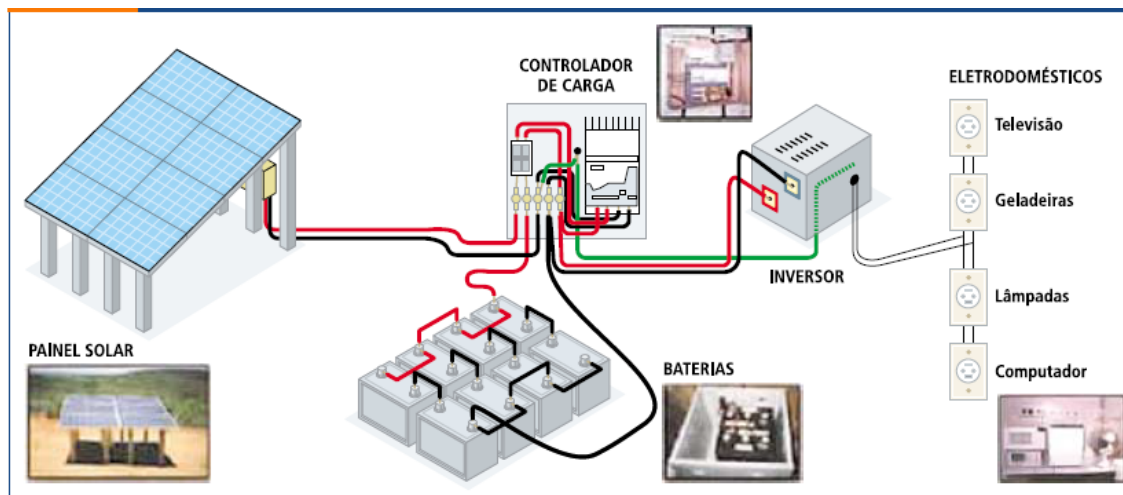
Como descrito pela BLUESOL (2017) o sistema fotovoltaico autônomo não depende da rede de transmissão de energia para seu funcionamento, sendo bastante versátil para sua utilização, podendo chegar em áreas sem acesso a rede elétrica como regiões isoladas. Esse sistema autônomo possui dois tipos: com armazenamento e sem armazenamento. O com armazenamento pode ser utilizado em iluminações públicas, boias de sinalização, carregamento de baterias, automóveis e até mesmo dispositivos portáteis. Essa energia acumulada pode ser utilizada à noite ou em longos períodos de mau tempo. O mais utilizado é o sem armazenamento pois é financeiramente mais viável por não possuir sistema de armazenamento.

Assim como diz Fadigas o sistema on grid trabalha conectado à rede de energia fazendo com que o excedente produzido pelos painéis solares possam ser jogado no sistema. O sistema fotovoltaico produz energia em corrente contínua, após ser transformada em corrente alternada por um inversor de frequência, é injetada na rede elétrica da distribuidora.

E o sistema híbrido é a junção do sistema fotovoltaico com as demais formas de produção de energia como a eólica, biogás e geradores. Ele é mais complexo devido essa interação das diferentes formas de energias interligadas, mas sua vantagem é que não depende apenas de uma forma de obtenção de energia apenas, se os dias ficarem fechados e não houver incidência solar pode se utilizar de outras opções para a obtenção de energia. Entre a bateria, o painel e as cargas, é instalado o regulador de carga. Este componente é importante para duas funções básicas: para a proteção da bateria e para a distribuição desnecessária de energia entre as cargas.

Os painéis fotovoltaicos dependem para o seu funcionamento de todo um conjunto de equipamentos que irá variar de acordo com o sistema que está sendo utilizado, mas basicamente é composto por: Painel solar, inversor, controlador de carga e bateria.

Figura 5 - Sistema de geração fotovoltaica



Fonte: ANEEL – Atlas de Energia Solar

2.3.2 Efeito Fotovoltaico

A captação de energia solar e a utilização para a transformação em energia elétrica é feita através do efeito fotovoltaico. Segundo Camargo, Grandinetti e Nohara (2016) essa conversão é feita através de materiais semicondutores de natureza cristalina que são intermediários entre os condutores e os isolantes. Assim eles tem como característica uma banda de valência preenchida por elétrons e outra banda vazia.

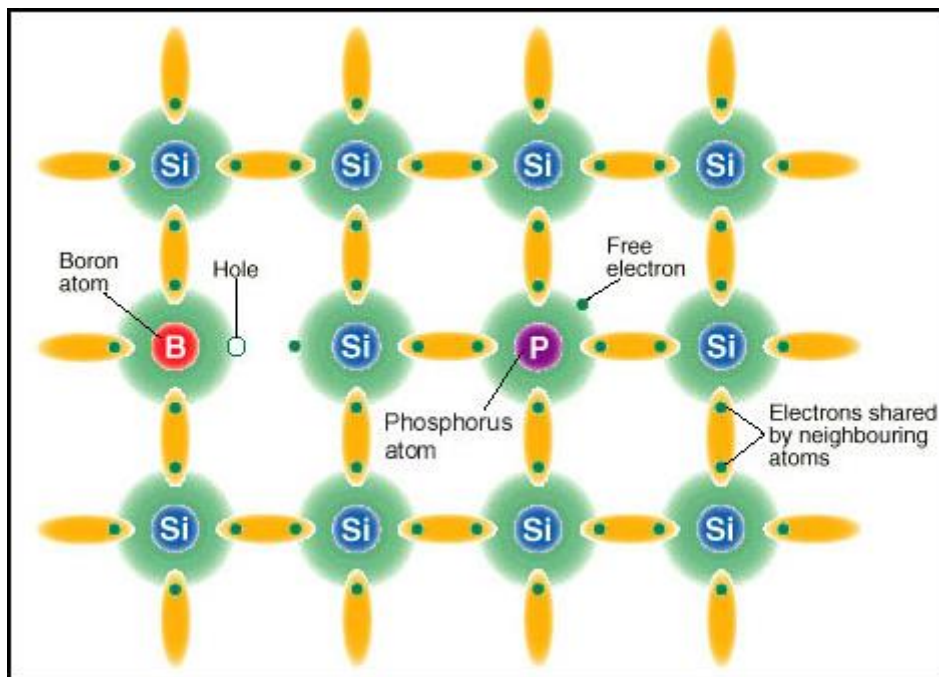
Para Nascimento (2004) para a realização desse efeito fotovoltaico é utilizado o silício que em seu estado puro não apresenta elétrons livres, ele encontra-se estável, portanto para isso é necessário a utilização de uma técnica conhecida como Dopagem eletrônica.

A dopagem eletrônica é a introdução de impurezas, que nada mais são do que a adição de outros elementos, para que o silício possa realizar a condutividade elétrica.

Para isso umas das dopagens realizadas recebe a adição de fósforo chamado de dopante N ou impureza N (silício + fósforo), transformando-se em um material com elétrons livres, portador de carga negativa sendo denominado, silício do tipo N.

Com a mesma técnica mas na intenção de se obter carga contrária é adicionado ao silício o boro chamado de dopante P ou impureza P (silício + boro), obtendo um material com falta de elétrons tornando-se assim um material de carga positiva sendo denominado silício do tipo P (BRAGA, 2008, p.6).

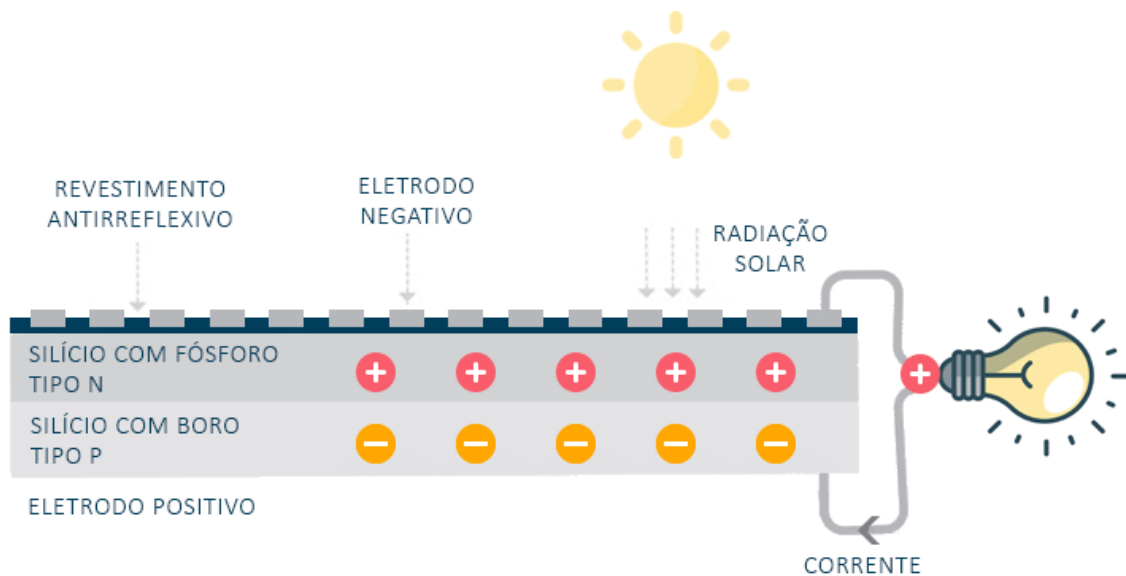
Figura 6 – Dopagem do Silício



Fonte: Lilian Souza Pinheiro

Esses dois tipos de silício serão unidos formando a junção P-N, tendo a camada mais fina o silício tipo N e a mais espessa a camada tipo P. Nessa junção quando ocorre a incidência de fótons vindo de raios solares ou outras fontes ocorrerá passagem dos elétrons livres da camada N para a camada P onde ficaram buracos que são preenchidos por esses elétrons livres da camada N, ocorrendo um acúmulo de elétrons do lado P tornando-o negativamente carregado e consequentemente o lado N que cedeu elétrons, positivamente carregado. Esse transito de carga na junção P-N resulta em uma diferença de potencial (ddp) que é conhecido como o efeito fotoelétrico. A conexão de um fio condutor que conecte as duas camadas, na parte externa, criará uma circulação de elétrons gerando a corrente elétrica (NASCIMENTO, 2004, P.15).

Figura 7 – Célula Solar



Fonte: Research Gate

3 METODOLOGIA

Neste trabalho, obedecendo aos objetivos da pesquisa, foram utilizados como referências teóricas os seguintes autores: Geim e Novoselov (2007), Vieira e Vilar (2017), Neto (2011), Katsnelson (2016), Li et al. (2010), Neto *et al* (2009), Li *et al* (2010), Limmer, Feldmann e Da Como (2013), Chen *et al* (2008) e os demais citados ao decorrer do trabalho, na intenção de realizar um embasamento teórico que justifique o proposto no objetivo. Na questão do método científico, utilizou-se a abordagem quantitativa, realizando comparações entre os diferentes materiais baseadas em números.

Em relação ao objetivo de pesquisa foi realizada a exploratória para conduzir os caminhos da pesquisa, pois como explica Gerhardt e Silveira (2009) esse tipo de pesquisa tem como ideia buscar um maior domínio do problema, com a intenção de simplificá-lo ou elaborar uma hipótese. O procedimento utilizado para a construção dessa pesquisa foi o bibliográfico, pois ele foi baseado e fundamentado em material publicado em livros, dissertações, artigos e redes eletrônicas.

Pois segundo Fonseca (2002) a publicação em artigos científicos, livros ou qualquer outro meio escrito e também a publicação por meios eletrônicos como web sites, após o levantamento de referências teóricas já previamente estudadas, é a definição de pesquisa bibliográfica. Todo trabalho científico começa pela pesquisa bibliográfica, que possibilita ao pesquisador saber o que já foi estudado a respeito do assunto. Algumas pesquisas científicas são únicas e exclusivamente baseadas em pesquisas bibliográficas, tendo como principal objetivo recolher dados, conteúdos e informações prévias de publicações com referências teóricas sobre o tema do trabalho com o fim de encontrar respostas

Foi realizado um levantamento bibliográfico através livros, artigos e principalmente buscas nas internet de onde demanda a maior parte da literatura sobre esse assunto por ser um assunto novo. Reunida a literatura ela foi estudada e utilizada no presente trabalho sobre as propriedades do grafeno e sua utilização no objetivo proposto.

Numa última etapa, será realizada a análise e a discussão sobre os dados obtidos. Contudo, ao utilizar esta abordagem metodológica buscamos discutir e contribuir para as análises acerca da introdução do grafeno como um novo material.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Uma maior eficiência da utilização do grafeno no lugar do silício foi observada em diversos resultados em diferentes trabalhos analisados neste estudo.

Uma das formas de se medir a eficiência elétrica de um material é analisando sua mobilidade eletrônica, que é a competência que um elétron tem de se deslocar em um material, a partir do momento que ele é submetido a um campo elétrico.

Como explicado por Chen *et al* (2008) a mobilidade eletrônica no grafeno tem a previsão de atingir 200.000 cm²/V.s, que quando comparado com a mobilidade no silício de 1.400 cm²/V.s chega a ser mais do que 100 vezes maior e ultrapassa mais que o dobro da mobilidade do antimônio de índio que tem taxa de 77.000 cm²/V.s e é o semiconductor com a maior mobilidade conhecida até hoje.

Um dos fatores que afetam na mobilidade eletrônica são as imperfeições que ocorrem no material utilizado com semiconductor ou como substrato. Um dos grandes causadores dessas imperfeições são as movimentações térmicas dos íons que formam obstáculos, barreiras e limitam o deslocamento dos elétrons pelo material. E como citado novamente por Chen *et al* (2008) o grafeno produz uma resistência de apenas 1 μΩ/cm² que é 35% menor do que o do material com a menor resistência a temperatura que é o cobre.

Também podemos observar como uma grande vantagem do grafeno em relação ao silício é a sua Condutividade Elétrica, que é usada para indicar com qual facilidade um material consegue transportar uma corrente elétrica. O silício possui uma condutividade elétrica no valor de até 4 S/cm, enquanto o grafeno segundo Vieira e Vilar (2017) possui uma condutividade de até 2 x 10⁴ S/cm, sendo extremamente superior ao grafeno.

No que se fala em eficiência de conversão, que é avaliado em relação a proporção da radiação que incide na superfície da célula e o quanto será convertido em energia elétrica, que acaba sendo o que mais importa no desenvolvimento de uma célula fotovoltaica, para o silício o valor alcançado chega a 24,7% em testes de laboratório como mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Eficiência de conversão

Tipo de Célula	EFICIÊNCIA (%)		
	Teoria	Laboratório	Comercial
Silício Monocristalino	30	24,7	13 a 16
Silício Policristalino	25	19,8	11 a 14
Silício Amorfo	13	6 a 7	3 a 5

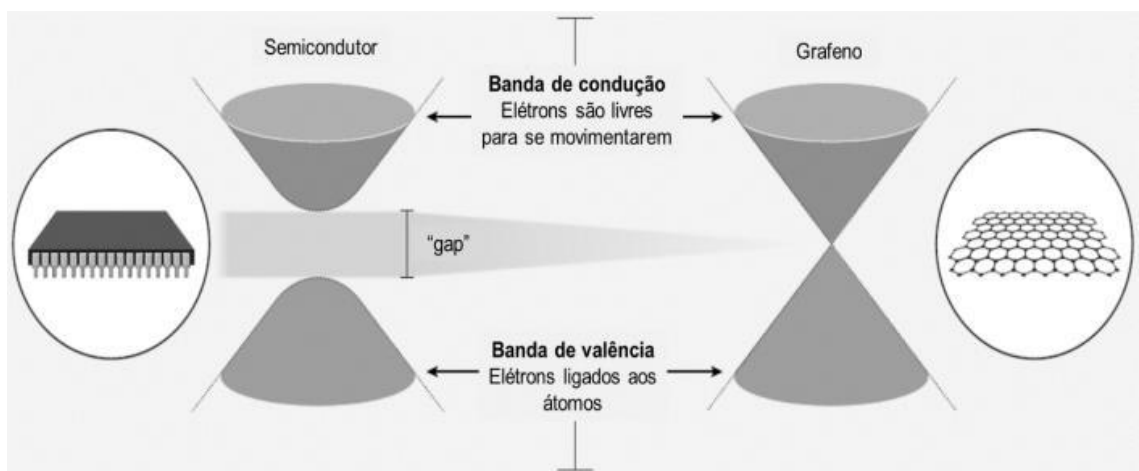
Fonte: Autor Próprio

Já o valor de eficiência encontrado na utilização do grafeno segundo Britnell *et al* (2013) já chega aos 30% de eficiência, encontrado em testes de laboratório. Haja vista no pouco tempo que o grafeno vem sendo trabalhado, ele já começa com uma grande vantagem em relação ao silício mesmo a diferença parecendo pequena.

Uma outra grande vantagem observada é em relação a forma como se comportam os elétrons no que se refere ao efeito fotovoltaico que ocorre nos materiais semicondutores.

Para Vilar e Vieira (2017) normalmente em um isolante ou até mesmo em um semicondutor um elétron só irá se desligar de um átomo se tiver energia o bastante para passar pelo “gap”, o que não ocorre no grafeno pois esse gap é mínimo, fazendo com que os elétrons movam-se facilmente.

Figura 8 – Gap comparado entre o grafeno e semicondutores comuns



Fonte: Vilar e Vieira (2017)

Aplicando a técnica de dopagem química pela adição de átomos, segundo Katsnelson (2016), pode-se adicionar elétrons ou criar buracos, criando uma condutividade no grafeno similar a condutividade que ocorre nos semicondutores. Em outros semicondutores o que pode ocorrer é que em algumas situações o material semicondutor se torne isolante o que torna o grafeno diferente de outros semicondutores pois ele não possui um estado isolante e a condutividade, ela ocorre em qualquer doping e até mesmo quando não possui dopagem. A situação de elétrons e buracos no caso do grafeno no que tange a parte de transporte de carga, são semelhantes as partículas quânticas, ou seja partículas se movendo a velocidade da luz.

A conversão da luz em pares livres de elétron-buraco é a chave no processo fotovoltaico. A eficiência desse processo pode ser aumentada quando se evita a perda de energia na forma de calor e no lugar disso consegue transformar esse excesso de energia em mais pares de elétron-buraco. Em grande parte dos materiais semicondutores para cada fóton absorvido se produz um elétron.

Como explica Tielrooji *et al* (2013) no caso do grafeno ocorre diferente, a cada fóton absorvido produz vários elétrons excitados, isso é chamado de Multiplicação de Cargas. Foi observado em fótons de alta energia (violeta) uma maior conversão de números de elétrons quando comparado com elétrons de baixa energia (infravermelho). Quando analisada a relação fóton absorvido e geração de elétrons excitados no grafeno, deixa claro que a conversão de luz em energia elétrica é muito mais eficiente.

5 CONCLUSÃO

Vemos cada vez mais a necessidade de nos preocuparmos com o meio ambiente, tentar amenizar o impacto causado por nós na natureza, com isso se precisamos desenvolver tecnologias que nos auxiliem a diminuir nossa interferência. Nosso impacto também deve ser amenizado no que se refere as desigualdades geradas ao redor do mundo e uma delas é o acesso a energia elétrica mais barata, eficiente e limpa que melhoraria a vida de milhares de pessoas.

O desenvolvimento da tecnologia fotovoltaica é uma necessidade e uma realidade já nos dias de hoje, ocorre um crescimento vertiginoso na corrida pela produção de energia limpa e eficiente e o sol é um dos grandes alvos na ciência hoje. Vemos após tanto tempo o silício alcançar o seu máximo de desempenho sendo necessário a obtenção de novos materiais e técnicas que auxiliem ou substituam o que já existe.

Vemos nesse novo tempo entre os materiais o surgimento do grafeno que em tão pouco tempo já vem revolucionando diversas áreas da ciência com sua grande versatilidade não sendo diferente na geração de energia que não é mais uma probabilidade já se mostra uma realidade em pesquisas realizadas, pontuando as diversas vantagens do grafeno em relação ao o silício, e não pensando só na substituição mas ter a ideia que combinados entre eles e com outros materiais também podem render bons frutos. E nada ocorrerá como mágica se estudos e investimentos não forem feitos para a criação e melhoria dessas tecnologias, por isso há ainda muito trabalho pela frente e o que tudo indica a recompensa é certa e de grande valor.

REFERÊNCIAS

ANEEL – AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. “**Atlas de Energia Elétrica no Brasil**”, Ed 2, 2002.

BASSALO J. M. F. **Prêmio Nobel de 2016: Química e Física**. Natal, UFRN, 2017.

BRAGA R.P. **Energia Solar Fotovoltaica: conceitos e aplicações**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2008.

BRANT, J. C. **Transporte elétrico em nanoestruturas de grafeno: influência da funcionalização, da geometria e da dopagem do substrato**. Belo Horizonte: UFMG, 2011.

BRITO, M. C.; SILVA, J. A. **Energia fotovoltaica: conversão de energia solar em eletricidade**. Lisboa, O Instalador, 2006.

BRITNELL, L.; RIBEIRO, R. M.; ECKMANN, A.; JALIL, R.; BELLE, B. D.; MISHCHENKO, A.; KIM, Y. J.; GORBACHEV, R. V.; GEORGIU, T.; MOROSOV S. V.; GRIGORENKO, A. N.; GEIM, A. K.; CASIRAGHI, C.; NETO, A. H. C.; NOVOSELOV, K. S. **Strong Light-Matter Interactions in Heterostructures of Atomically Thin Films**. Science, 2013.

CAMARGO J.R.; GRANDINETTI F.J; NOHARA E.L. **Sistemas Fotovoltaicos: conceitos, inovação e aplicações**. Taubaté: Editora e Livraria Cabral, 2016.

CHAUHAN, N.; MAEKAWA, T.; KUMAR, D.N.S. **Graphene based biosensors—accelerating medical diagnostics to new-dimensions**. Saitama: Journal of Materials Research, 2017.

CHEN, J. H.; JANG, C.; XIAO, S.; ISHIGAMI, M.; FUHRER, M. S. **Intrinsic and Extrinsic Performance Limits of Graphene Devices on SiO₂**. Nature Nanotechnology, 2008.

CRESESB- Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sergio de Salvo Brito Energia Solar Princípios e Aplicações
http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_solar_2006.pdf
Acessado em: 06/10/2019

FADIGAS, E. A. F. A. **Energia Solar Fotovoltaica: Fundamentos, Conversão e Viabilidade técnico-econômica**. São Paulo: USP.

FONSECA, J. J. S. **Metodologia da pesquisa científica**. Fortaleza: UEC, 2002. Apostila.

GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D.T. **Método de Pesquisa**. Porto Alegre, UFRGS, 2009, 1ª Ed.

GEIM, A. K. e NOVOSELOV, K.S. **The Rise of Graphene**. Nature; 2007, vol 6.

GREEN, M. A.; K. EMERY; D. L. KING; S. IGARI; W. WARTA. **Solar Cell Efficiency Tables (Version 16). Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, vol. 8, p. 377-384, 2000.

Vieira, J.E.D.; Vilar, E. O. **Grafeno: Uma revisão sobre propriedades, mecanismos de produção e potenciais aplicações em sistemas energéticos**. Campina Grande, 2017.

Encyclopedia Britannica

KATSNELSON, M. I. **Graphene**.(2016) <https://www.britannica.com/science/graphene>
Acessado em: 12/04/2019

INPE. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2ª Ed. São Jose dos Campos, 2017, 57p.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Electricity Statistics**, 2017. Disponível em: <https://www.iea.org/statistics/electricity/> Acessado em: 05/11/19

LIMMER, T.; FELDMANN, J.; DA COMO, E. **Carrier Lifetime in Exfoliated Few-Layer Graphene Determined from Intersubband Optical Transitions**. Physical Review Letters, 2013.

LI, X. et al. **Silicon Schottky Junction Solar Cells**. Beijing: Tsinghua University, 2010.

MARQUES, F. J. **Nanotecnologia e Sistemas de Inovação: Implicações para Política de Inovação no Brasil**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2013.

MARTINS, P. **“Nanotecnologia e meio ambiente para uma sociedade sustentável”**. Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C, 2008.

MORI, V.; SANTOS, R. L. C.; SOBRAL, L. G. S. **Metalurgia do Silício: processo de obtenção e impactos ambientais**. Rio de Janeiro: CETEM, 2007.

NASCIMENTO, C.A. **Princípio de Funcionamento da Célula Fotovoltaica**. Lavras, 2004, p.12.

NETO, J. C. C. **Grafeno e Nanotubo de Carbono**. Natal: UFRN, 2011.

NETO, A. C.; GUINEA, F.; PERES, N.; NOVOSELOV, K.; GEIM, A. **The electronic properties of graphene**. Reviews of Modern Physics, 2009.

NERI, D. M. **História da Nanociência em uma Perspectiva Kuhniana. Da invenção do fulerenos a descoberta do grafeno**. Belo Horizonte, UFMG, 2011.

NREL. Glossary of solar radiation resource terms: National Renewable Energy Laboratory. 2017. Disponível em <https://www.nrel.gov>. Acesso em maio 2017.

PACHECO, F. **Energias Renováveis: breves conceitos**. Salvador: Conjuntura e Planejamento, 2006. 5 p.

RAMOS B.G.Z; PASA T.B.C. **O Desenvolvimento da Nanotecnologia: cenário mundial e nacional de investimentos**. Florianópolis: UFSC, 2008.

RANJBARTOREH, A. R.; WANG, B.; SHEN, X.; WANG, G. **Advanced Mechanical Properties of Graphene Paper**. Journal of Applied Physics, 2011.

REN21. **Renewables 2015** - Global Status Report, 2015.

SILVA, P.D. **Nanotecnologia**. Lisboa: Instituto de Ciências Sociais da Universidade de Lisboa, 2006.

TIELROOJI, K. J.; SONG, J. C. W.; JENSEN, S. A.; CENTENO, A.; PESQUERA, A.; ELORZA, A. Z.; BONN, M.; LEVITOV, L. S.; KOPPENS, H. L. **Photo-excitation Cascade and Multiple Carrier Generation in Graphene**. Nature Physics, 2013.

Tolmasquim, M. T. **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica**. EPE: Rio de Janeiro, 2016.

<https://www.nano.gov/> Acessado em: 13/10/2019

<https://www.webelements.com/> Carbon
Acessado em: 09/11/2019

BlueSol energia solar

<https://blog.bluesol.com.br/diferenca-sistema-fotovoltaico-conectado-a-rede-e-isolados/> - 2017

Acessado em: 18/11/2019

LOCKHEED Martin. **Wanted: Clean Drinking Water**. 2013.

Disponível em: <https://patents.google.com/patent/US9475709B2/en>

Acesso em: 10/10/2019

SITE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA. **Grafenos dão passo à frente dos nanotubos**. 05/04/2006.

Disponível em:

www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=010110060405.

Acessado em 26/11/2019.

