

**Pró-Reitoria Acadêmica
Escola de Exatas, Arquitetura e Meio Ambiente
Curso de Física
Trabalho de Conclusão de Curso**

**TENDÊNCIAS TECNOLÓGICAS LIGADAS À UTILIZAÇÃO
DAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS**

**Autor: Gleicielma de Sousa Batista
Orientador: Prof. Dr. Paulo Henrique Alves Guimarães**

**Brasília - DF
2019**

GLEICIELMA DE SOUSA BATISTA

**TENDÊNCIAS TECNOLÓGICAS LIGADAS A UTILIZAÇÃO DE CÉLULAS
FOTOVOLTAICAS**

Artigo apresentado ao curso de graduação em Física da
Universidade Católica de Brasília, como requisito
parcial para obtenção do Título de Licenciado em
Física.

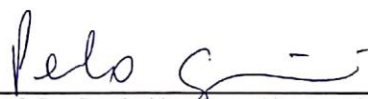
Orientador: Prof. Dr. Paulo Henrique Alves Guimarães

**Brasília – DF
2019**



FOLHA DE APROVAÇÃO TCC

Artigo de autoria de **GLEICIELMA DE SOUSA BATISTA** intitulado **TENDÊNCIAS TECNOLÓGICAS LIGADAS À UTILIZAÇÃO DAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS**, apresentado como requisito parcial para obtenção do grau de Licenciado em Física da Universidade Católica de Brasília, em 14 de Junho de 2019, defendido e Aprova 09, pela banca examinadora abaixo assinada:

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Paulo Henrique", written over a horizontal line.

Prof. Dr. Paulo Henrique Alves Guimarães
LICENCIATURA EM FÍSICA - UCB

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Alexandre", written over a horizontal line.

Prof. Dr. Alexandre da Silva Fernandes
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

BRASÍLIA
2019

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar os meus sinceros agradecimentos às seguintes pessoas:

Em primeiro lugar ao meu namorado Lucas Medeiros pelas longas horas de revisão de texto, por todos os ensaios de apresentação, por estar comigo em todos os momentos, não apenas no processo do TCC, mas em toda a graduação desde a escolha do meu curso.

Quero agradecer também aos meus irmãos: Samuel e Fran por todo apoio durante este período. Aos meus amigos, colegas de curso e professores que influenciaram de alguma forma na minha pesquisa.

TENDÊNCIAS TECNOLÓGICAS LIGADAS À UTILIZAÇÃO DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

GLEICIELMA DE SOUSA BATISTA

Resumo:

O panorama de consumo energético mundial tem impulsionado pesquisas relacionadas às fontes alternativas de energia que diminuam os recorrentes problemas ambientais. Dentro deste cenário têm se destacado estudos voltados às células fotovoltaicas, que dispõem de tecnologia limpa, sustentável e cada vez mais promissora. As células fotovoltaicas são divididas em três gerações: a primeira produzida através do silício, a segunda, são constituídas de filmes finos inorgânicos e a terceira que está em processo de desenvolvimento, tem como preocupação a abundância dos materiais utilizados em sua fabricação, sendo não poluentes, leves, flexíveis e eficientes na captação de energia. Para identificar as tendências tecnológicas da energia solar se faz necessário o estudo do funcionamento das células fotovoltaicas feitas de silício e as de terceira geração, comparando as duas categorias.

Palavras-chave: Células Solares. Células Fotovoltaicas. Energia Solar.

1. INTRODUÇÃO

A energia movimenta o mundo, sendo a responsável pela comunicação a distância, à luz das residências, indústrias e o comércio. São vários os campos da sociedade que dependem integralmente da disponibilidade de energia. Muitos recursos renováveis e não renováveis são utilizados para sua produção, como é o caso das usinas hidrelétricas, nucleares e termelétricas.

Todas as etapas na produção ou distribuição energética provocam em algum grau impactos negativos ao meio ambiente. Também já é sabido que a matéria prima do petróleo, obtida através de reações químicas em fósseis depositados principalmente no fundo do mar, está ficando escassa e que problemas ambientais tem se intensificado com o passar dos anos. O desafio enfrentado para atender à crescente demanda de energia nas últimas décadas, tem impulsionado no mundo incentivo em pesquisas relacionadas de fontes alternativas, dentre elas a solar.

Todas as formas de energia que conhecemos derivam da energia solar. É a energia do sol que altera o estado físico da água, fazendo com que essa migre e possa ser represada e aproveitada nas usinas hidrelétricas. O aquecimento das massas de ar provoca os ventos, que são aproveitados nos aerogeradores dos parques eólicos. É a energia solar, absorvida na fotossíntese, que dá vida às plantas utilizadas como fonte de energia de biomassa. Até mesmo o petróleo, que vem de restos de vegetação e animais pré-históricos, também é derivado do sol, pois este deu a energia necessária ao aparecimento da vida na terra em eras passadas. Podemos, através desse ponto de vista, considerar que todas as formas de energia são renováveis, infelizmente não em escala humana. As formas de energia renovável citadas acima são as que se renovam a cada dia, permitindo um desenvolvimento sustentável da vida e sociedade humana. (SOUZA, 2017, p. 11).

O aproveitamento da energia vinda do Sol pode ser realizado de diversas formas, e a conversão direta em energia elétrica através das células fotovoltaicas e suas três gerações serão os principais pontos deste trabalho, sendo as de silício cristalino correspondentes à primeira geração, a segunda considerada baseada em filmes finos, e as últimas fazem parte de uma classe que busca superar as duas anteriores, obtidas através de materiais orgânicos e inorgânicos.

A emissão de elétrons provocada por ação da luz (ou radiação eletromagnética em geral) é chamada de efeito fotoelétrico. Os indícios para explicação desse fenômeno foram observados pela

primeira vez em 1837, quando o físico alemão Heinrich Hertz investigava a natureza eletromagnética da luz na tentativa de comprovar experimentalmente as equações de Maxwell. Mais tarde, Edmond Becquerel relatou um fenômeno parecido, observando que quando nos extremos de uma estrutura de matéria semicondutora há uma incidência de luz, surge uma diferença de potencial elétrico. Foi Albert Einstein quem descreveu a natureza dual (onda-partícula) da luz e postulou a explicação para o efeito fotoelétrico baseado na teoria quântica, o que lhe rendeu um Nobel em 1922.

As células fotovoltaicas funcionam através do efeito fotovoltaico, que consiste na criação de tensão elétrica ou de corrente elétrica num material após sua exposição à luz. As células fotovoltaicas são responsáveis por converter a energia luminosa em elétrica, e para gerar uma potência elevada, um conjunto de células precisam ser interligadas entre si e montadas em uma estrutura, o que se constitui os Módulos Fotovoltaicos.

“Em 1876 foi concebido o primeiro aparato fotovoltaico advindo dos estudos da física do estado sólido e, apenas em 1956, iniciou-se a produção industrial, seguindo o crescimento da área de eletrônica” (MOEHLECKE et al., 2014, p.52). Os primeiros módulos desenvolvidos de forma massiva, se deu com a evolução da microeletrônica e suas aplicações mais intensivas na indústria ocorreram principalmente no contexto histórico da Corrida Espacial. A disputa acirrada entre socialismo e capitalismo pela hegemonia econômica e política no mundo propiciaram um investimento expressivo nas áreas ligadas a ciência e a tecnologia. O elevado custo até então das células fotovoltaicas foram supridos pela viabilidade do fornecimento de energia elétrica a satélites.

Desde a descoberta da possibilidade da energia solar ser convertida em energia elétrica, muitos estudos e pesquisas têm sido desenvolvidos ao longo da história para diminuir o custo de produção dos diversos tipos de painéis fotovoltaicos. As aplicações de tais tecnologias na indústria, no uso doméstico e urbano tem sido cada vez mais ostensivo. A competitividade comercial também tem somado resultados para o desenvolvimento de novas técnicas para um aproveitamento mais eficiente da energia solar.

2. METODOLOGIA

A metodologia adotada se constituiu a partir de materiais já elaborados sobre o tema, incluindo: livros-texto sobre sistemas de energia sustentáveis e energia solar, relatórios de pesquisa no setor de energia e artigos científicos. “A revisão de literatura resultará do processo de levantamento e análise do que já foi publicado sobre o tema e o problema de pesquisa escolhidos. Permitirá um mapeamento de quem já escreveu e o que já foi escrito sobre o tema e/ou problema da pesquisa” (SILVA; MENEZES, 2001, p. 37).

O estudo tem caráter exploratório e busca fazer uma análise de publicações a respeito das células fotovoltaicas com um levantamento bibliográfico geral das tendências energéticas e suas aplicações práticas. Partindo da exploração da problemática ambiental e histórica, seguido pela viabilidade da energia solar, serão expostas informações básicas relacionadas ao seu funcionamento e suas implicações dentro do contexto das matrizes energéticas mais utilizadas no mundo.

A pesquisa será delimitada a uma coleta de dados teóricos e qualitativos enfatizando tecnologias mais promissoras ligadas ao efeito fotovoltaico. Um levantamento preliminar foi feito sobre o tema em uma busca no Google Acadêmico, onde foram selecionados alguns trabalhos relevantes ao assunto utilizando as palavras chave: Efeito Fotovoltaico, Células Solares e Painéis Solares. Os materiais foram analisados de acordo com as seguintes categorias: ano de publicação; revista científica; palavras chaves e instituições às quais os autores estavam vinculados.

Neste sentido, este trabalho se trata de uma pesquisa bibliográfica e tem como objetivo identificar tendências tecnológicas da energia solar, estudando o funcionamento das células feitas de silício e as de terceira geração, comparando as duas categorias.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1 - ENERGIA SOLAR

A energia é a capacidade de um corpo ou sistema realizar trabalho, todos os seres vivos dependem dela para sobreviver, seja pela realização da fotossíntese das plantas que serve de alimento para muitas espécies ou pela transformação direta do organismo em atividades metabólicas.

O desenvolvimento humano e econômico no mundo alavancou e a maneira de produzir e consumir energia acompanhou essa mudança. A primeira máquina criada para substituir a mão de obra humana iniciou uma revolução nos meios de consumo. O moinho de água e de vento foram as primeiras máquinas construídas usadas para bombear água e moer grãos, nos dois casos usando energia solar, seja no aquecimento que circula as pás ou na água que evaporou e choveu em locais mais altos. Mais tarde, com a descoberta de como manipular energia química como: fósseis, carvão e petróleo, usa-se cada vez mais máquinas e mais energia, não só na produção agrícola, mas em todos os setores.

A nossa maneira de viver está intimamente ligada ao uso de energia e essa relação têm aumentado também a capacidade de mudar o planeta, e extrair cada vez mais dele. As técnicas de produção para atender a demanda cada vez maior de recursos provocam sérios problemas ambientais. Hoje gastamos mais do que o planeta pode produzir. Segundo a Global Footprint Network¹ precisaríamos de outro planeta e meio igual a Terra para conseguir repor tudo o que foi usado em recursos naturais no período de um ano.

“Durante o desenvolvimento da nossa sociedade ficou evidente a carência de energia em todos possíveis locais da convivência humana, e nas últimas décadas temos visto o apelo de várias vozes que mostram o iminente fim dos combustíveis fósseis, o imenso impacto ambiental causado por essas fontes de energia e a insustentabilidade do modo como obtemos a energia que nos move” (SOUZA, 2017, p. 11). O aquecimento global a poluição do ar e do solo, e o desmatamento para construção de usinas, são alguns dos muitos problemas ambientais causados para atender o atual consumo de energia.

Buscando sanar os constantes problemas ambientais causados pela utilização de energias não renováveis e aliados ao esgotamento dessas fontes, têm surgido um interesse social muito grande pela utilização de fontes alternativas de energia, dentre elas a energia solar.

O aproveitamento da energia gerada pelo Sol, inesgotável na escala terrestre de tempo, tanto como fonte de calor quanto de luz, é hoje uma das alternativas energéticas mais promissoras para prover a energia necessária ao desenvolvimento humano. Quando se fala em energia, deve-se lembrar de que o Sol é responsável pela origem de praticamente todas as outras fontes de energia na Terra. Em outras palavras, as fontes de energia são, em última instância, derivadas em sua maioria, da energia do Sol. (MOEHLECKE et al., 2014, p. 47).

A energia solar é abundante, a extração e aproveitamento direto, pode ser realizada principalmente através de dois métodos: o térmico e o fotovoltaico, no primeiro a energia é captada através de painéis solares térmicos que convertem a irradiação que incide no painel em calor, sua utilização é feita geralmente em sistemas de aquecimento de água residencial; num sistema térmico também é possível fazer com que um sistema consiga produzir calor armazenado em vapor, capaz de mover uma turbina e assim gerar energia elétrica. E por fim, o sistema solar fotovoltaico, que consiste na conversão direta da luz em eletricidade através do Efeito Fotovoltaico, com a emissão de elétrons por um material exposto a uma radiação eletromagnética de frequência determinada, elétrons livres ligados aos átomos neste material são capazes de conduzir corrente elétrica. Há também quem economize energia elétrica vinda dos postes utilizando a luminosidade do Sol de forma menos

¹ Global Footprint Network, uma organização internacional sem fins lucrativos fundada em 2003, voltada para pesquisa ecológica e sustentabilidade.

rebuscada, quando em construções procura-se criar ambientes mais claros que podem durante o dia poupar a luz elétrica utilizando a claridade vinda do Sol.

É perceptível a versatilidade que a energia solar pode trazer. Dentro dessa perspectiva empresas e o governos de todo o mundo têm juntado esforços para desenvolver meios de captação de energia solar para transformá-la em elétrica, as células fotovoltaicas têm se apresentado promissoras.

3.2 - CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

3.2.1 - Histórico

O efeito fotovoltaico foi observado pela primeira vez em 1839 por Alexandre Edmond Becquerel, um físico francês que fazia experiências eletroquímicas, observou o aparecimento de uma diferença de potencial entre dois eletrodos de prata imersos em um eletrólito, verificando que certos materiais produziam pequenas quantidades de corrente elétrica quando expostos à luz. Outros efeitos semelhantes também foram observados por alguns cientistas em um sólido, várias décadas mais tarde. Em 1877 W. G. Adams e R. E. Day utilizaram as propriedades fotocondutoras do selênio para desenvolver o primeiro dispositivo sólido de produção de eletricidade por exposição à luz.

Tratava-se de um filme de selênio depositado num substrato de ferro e com um segundo filme de ouro, semitransparente, que servia de contato frontal. Apesar da baixa eficiência de conversão, da ordem de 0,5%, nos finais do século XIX o engenheiro alemão Werner Siemens (fundador do império industrial com o seu nome) comercializou células de selênio como fotômetros para máquinas fotográficas. (VALLÈRA; CENTENO, 2008, p. 1).

Em seguida, impulsionadas pelo desenvolvimento da microeletrônica, foram construídos os primeiros módulos fotovoltaicos. “Só em 1954, D.M. Chapin e colaboradores, do Bell Laboratory, nos Estados Unidos da América, publicaram o primeiro artigo sobre células solares em silício – ao mesmo tempo que registaram a patente de uma célula com uma eficiência de 4.5%” (BRITO; SILVA, 2006, p. 1). Foi só no final da década de cinquenta que foram desenvolvidos os primeiros dispositivos de estado sólido que abriram caminho na indústria para a primeira célula solar de silício com uma eficiência considerada relevante.

A explicação do efeito fotoelétrico proposta por Albert Einstein também teve um forte impacto na evolução dos sistemas fotovoltaicos, junto com o desenvolvimento da mecânica quântica, em especial, da teoria de bandas e a física dos semicondutores. As técnicas de purificação e dopagem associadas ao desenvolvimento do transistor de silício foram capazes de aperfeiçoar as células fotovoltaicas.

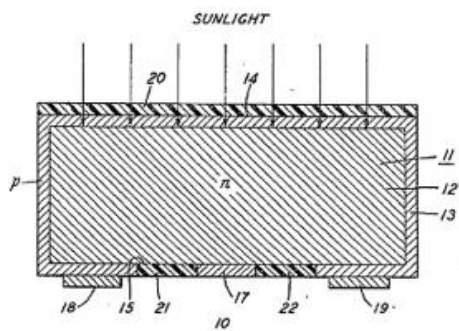
A história da primeira célula solar começou em março de 1953 quando Calvin Fuller, um químico dos Bell Laboratories (Bell Labs), em Murray Hill, New Jersey, nos Estados Unidos da América, desenvolveu um processo de difusão para introduzir impurezas em cristais de silício, de modo a controlar as suas propriedades elétricas (um processo chamado “dopagem”) (VALLÈRA; BRITO, 2006, p. 2).

Esta foi a primeira célula feita de silício, e as pesquisas desenvolvidas pela Bell Labs foram aprimorando o desenvolvimento mais eficiente de conversão de energia. A National Academy of Sciences em Washington, anunciou em uma conferência os resultados destes estudos. A figura 3.1 mostra a patente da primeira célula solar, registrada em março de 1954.

Figura 3.1: Patente da primeira célula solar

Feb. 5, 1957
 D. M. CHAPIN ET AL
 2,780,765
 SOLAR ENERGY CONVERTING APPARATUS
 Filed March 5, 1954

FIG. 1



Fonte: SILVA; LISBOA (2016)

Apesar da descoberta fascinante, foi notado a inviabilidade econômica na produção de células fotovoltaicas na época. As primeiras utilizações dos painéis solares de forma industrial foram feitas no espaço. A corrida espacial durante a Guerra Fria dividiu o mundo em dois grandes blocos, os aliados as superpotências da época União Soviética (URSS) e os Estados Unidos, ambas visando a supremacia tecnológica. Nesta disputa, satélites foram lançados e para mantê-los em funcionamento foi essencial a utilização dos painéis fotovoltaicos. A inviabilidade ainda persistia pelo alto custo destas células, mas pesquisas e incentivo financeiro do governo contribuíram para uma versão mais barata de painéis, que foram se aperfeiçoando com o tempo.

Desde o surgimento das primeiras células solares fotovoltaicas, de elevado custo e utilizadas na geração de energia elétrica para os satélites que orbitam nosso planeta, as tecnologias de produção evoluíram a tal ponto que se tornou economicamente viável em muitos casos a sua utilização em aplicações terrestres. (RUTHER; Ricardo, 2004, p. 8).

Ainda na década de 70 se popularizou na indústria o uso dos painéis fotovoltaicos, impulsionado também por uma crise mundial do petróleo no fim da década. “O pânico criado pela crise petrolífera de 1973 levou a um súbito investimento em programas de investigação para reduzir o custo de produção das células solares” (VALLÊRA; BRITO, 2006, p. 2). Em consequência da subida do preço do petróleo imposta pela Organização dos Países Exportadores de Petróleo, somado a conflitos políticos nos países árabes, por fim, o preço do petróleo subiu cerca de 400% e isso prejudicou o mundo todo que era abastecido principalmente por esta fonte de energia.

“As décadas de oitenta e noventa foram também marcadas por um maior investimento em programas de financiamento e de demonstração motivados sobretudo pela consciência crescente da ameaça das alterações climáticas devido à queima de combustíveis fósseis” (VALLÊRA; BRITO, 2006, p. 3). Depois de toda evolução, na década atual o mundo se encontra ainda mais preocupado com questões climáticas, pesquisas em torno desta fonte de energia continuam, e cada vez mais é popularizado o uso doméstico e industrial das células fotovoltaicas.

3.2.2 - Efeito Fotovoltaico

A energia emitida pelo Sol é transmitida sob a forma de radiação eletromagnética, produzida através das reações nucleares que acontecem em seu núcleo, parte desta radiação chega no solo terrestre. A energia radiante eletromagnética (ou simplesmente a luz) está quantizada em pacotes

discretos de energia, o que mais tarde foi denominado fótons, um quantum de frequência. Te tem energia dada por:

$$E = h \cdot f \quad (3.1)$$

Experiências mostram que quando a luz incide sobre certas superfícies metálicas, faz com que elétrons sejam emitidos dessas superfícies, esse fenômeno inicialmente visto por Hertz enquanto tentava demonstrar as equações de Maxwell, mais tarde foi chamado de efeito fotoelétrico, quando Einstein generalizou o conceito de quantização de Planck.

O efeito fotoelétrico está diretamente relacionado com a o efeito fotovoltaico, mas os processos são diferentes: no primeiro a tensão elétrica se dá pela absorção de um fóton de luz por um elétron do material, já no efeito fotovoltaico a exposição à radiação eletromagnética faz com que elétrons sejam transferidos em um material semicondutor entre bandas diferentes. “Ao se incidir radiação luminosa no material, os elétrons na banda de valência absorvem os fótons dessa radiação; caso a energia dos fótons for igual ou maior que a energia da banda proibida (ou *bandgap*), as ligações covalentes serão quebradas e esse elétron irá para a banda de condução”. (CARVALHO; ANDRÉ, 2014, p. 17) gerando assim um fluxo de elétrons (corrente elétrica).

3.2.3 - Princípio de Funcionamento da Célula Fotovoltaica

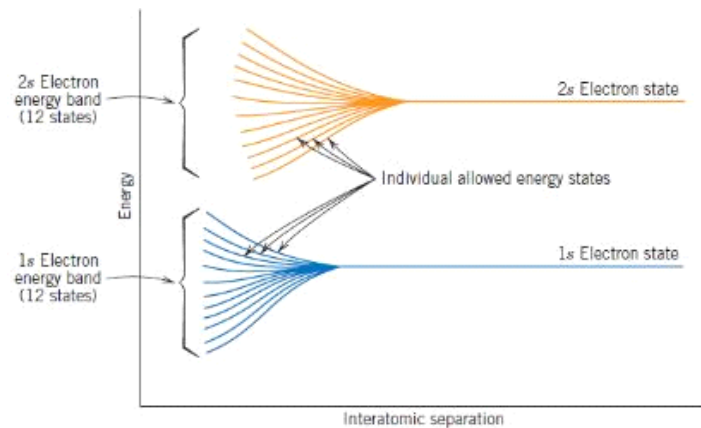
A célula solar fotovoltaica é o componente que converte a radiação incidente em energia elétrica, feita a partir de materiais com uma estrutura sólida semicondutora, como: silício, arseneto de gálio, telureto de cádmio ou disseleneto de cobre e índio (gálio), dentre outros.

A condutividade elétrica depende dos elétrons livres (na camada de valência) que um átomo possui. Para cada átomo existem níveis de energias discretos que podem ser ocupados por elétrons.

“As células solares possuem diversas características que são oriundas do material semicondutor utilizado na confecção, a técnica de fabricação empregada, propriedades geométricas e estruturais, dentre outras, que interferem consideravelmente no seu funcionamento” (CARVALHO; ANDRÉ, 2014, p. 18). Os semicondutores são o intermediário entre um condutor e um isolante, os elementos químicos que têm essa propriedade possuem algumas peculiaridades em relação a sua estrutura atômica.

Para entender os semicondutores é necessário entender sua estrutura eletrônica que funciona através de bandas de energia. Para isso, é fundamental pensar primeiramente em um átomo individual, nesta condição os níveis de energia em que os elétrons podem transitar, permitem pelo Princípio de exclusão², somente dois elétrons. Assim quando adicionamos um outro átomo nas proximidades fazendo-os interagir um com um outro, é observado que o nível de energia se divide em dois com diferenças de energias pequenas, considerando apenas dois átomos a figura 3.2 mostra a divisão de dois níveis de energia para doze átomos.

² Para elétrons de um mesmo átomo, existe uma restrição onde dois elétrons não podem ter os mesmos quatro números quânticos. A esta restrição dá-se o nome de Princípio de Exclusão de Pauli.

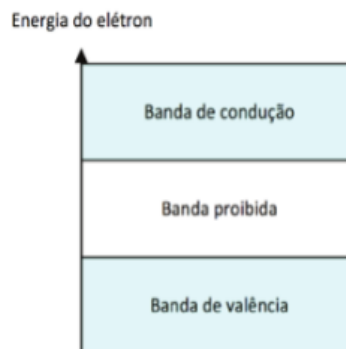
Figura 3.2: Níveis de Energia

Fonte: Slide Propriedades Elétricas³

Uma estrutura cristalina envolve um grande número de átomos juntos. Esta proximidade provoca uma perturbação dos níveis de energia pelos elétrons e os núcleos dos átomos. Esta influência se dá de tal maneira que cada estado atômico distinto pode se dividir em uma série de estados próximos, para formar o que é denominado banda de energia.

As bandas de energia mais baixas, correspondentes aos níveis de energia mais baixos dos átomos da rede, são ocupadas com elétrons que estão ligados aos átomos individuais. Os elétrons que podem fazer parte da condução ocupam as bandas de energia mais altas. A banda de energia mais alta que contém elétrons é chamada de **banda de valência**. A Banda de Valência pode estar completamente cheia com elétrons ou somente parcialmente cheia, dependendo do tipo de átomo e do tipo de ligação do sólido. (TIPLER, 2008, p. 125).

Nos semicondutores a banda de valência é totalmente preenchida e a banda de condução parcialmente preenchida com elétrons. A figura 3.3 representa a estrutura de um material semicondutor.

Figura 3.3: Distribuição de energia no semicondutor

Fonte: FRONTIN (2017)

O espaçamento entre as bandas, também chamada de gap (uma região que é proibida a passagem de elétrons) faz com que os semicondutores tenham características especiais, como o aumento da temperatura proporcional ao aumento de condução devido à excitação térmica de portadores da banda de valência para a banda de condução e pelo fato dos fótons quando estão acima

³ Disponível em: <<https://www.ebah.com.br/content/ABAAAgbTcAl/aula-04-cm>>. Acesso em set. 2018.

da energia do gap do material, excitarem seus elétrons à banda de condução, efeito chamado de intrínseco.

Existem dois tipos de semicondutores: o intrínseco, cujo o comportamento elétrico é baseado na estrutura eletrônica relacionada com o material puro (sem impurezas); e os extrínsecos, nesse caso as características elétricas são determinadas pelos átomos de impurezas.

A energia que é gerada pela célula solar é aquela que o elétron recebe do fóton, que o possibilita migrar da banda de valência para a banda de condução. No processo em que os elétrons se movimentam entre as bandas que surge uma corrente elétrica, dando origem à uma diferença de potencial entre as duas faces da mesma.

3.2.4 - Configuração da célula fotovoltaica de Si

O Silício (Si) é um sólido que pode formar uma estrutura cristalina quando unido a outros átomos. Possui diversas aplicações, por ser um dos elementos químicos mais abundantes na Terra, pela capacidade de seus elétrons de fazerem quatro ligações e formar uma rede cristalina, torna-se ideal na produção de células fotovoltaicas.

Para utilização do Silício como matéria prima para a produção das células fotovoltaicas é necessário que ele passe por um processo chamado de purificação, pois em sua forma natural estão agregados a ele outros materiais que atrapalham a formação de novas ligações. Para fazê-lo mais condutivo é necessário que passe por um processo conhecido como dopagem, que consiste num procedimento de adição de impurezas de forma controladas.

O silício com impurezas, seja com excesso de elétrons ou lacunas, continua com carga neutra, pois a quantidade de elétrons e de prótons é a mesma. Porém, quando o silício tipo n entra em contato com o silício tipo p, os elétrons livres do lado n preenchem as lacunas do lado p. Logo, a camada n, que perdeu os elétrons livres fica negativamente carregada. Essas cargas aprisionadas dão origem a um campo elétrico permanente, que dificulta a passagem de mais elétrons do lado n para o lado p. Esse processo alcança um equilíbrio quando o campo elétrico forma uma barreira de potencial capaz de barrar os elétrons livres remanescentes no lado n. (FRONTIN et al., 2017, p. 64).

No campo elétrico formado, as células solares de silício ligados a outro elemento como por exemplo o fósforo, farão uma junção do tipo p-n, no lado p da junção as lacunas são chamadas portadores de carga, no lado n da junção há uma quantidade maior de elétrons na banda de condução do que lacunas, e dentro desses dois materiais encontra-se a área de depleção.⁴

Na célula solar o efeito fotovoltaico acontece quando um elétron do lado p recebe energia suficiente de um fóton para fazer com que o elétron saia de uma banda para outra deixando uma lacuna, que será ocupada por outro elétron.

[...] criando o par elétron-lacuna, o campo elétrico permanente o envia para o lado n, não permitindo sua volta, ao mesmo tempo que repele a lacuna para o extremo do lado p. Basta que contatos sejam colocados nas duas extremidades do material semicondutor dopado para que o elétron seja coletado na camada n, passe pela carga elétrica externa e retorne para a lacuna, que o aguarda na camada p [...] (FRONTIN et al., 2017, p. 64).

As células de silício monocristalino são feitas a partir de um único cristal de silício, conhecido como cristal semente, passando por um processo chamado de Czochralski.

As células de silício policristalino são financeiramente mais viáveis, por não passar pelo processo de Czochralski “[...] também definidas como filmes finos, podem ser divididas em três cadeias produtivas: silício amorfo (a-Si), disseleneto de cobre e índio (CIS), índio e gálio (CIGS) e

⁴ Região em torno de uma junção P-N de um semicondutor na qual existem poucos portadores de carga.

telureto de cádmio (CdTe) ” (MACHADO; MIRANDA, 2015, p. 130). Passando por um processo diferente do monocristalino, o silício líquido de alta pureza do tipo P é resfriado, formando vários cristais, passa pelo processo de dopagem com o fósforo, também gerando uma junção P-N.

[...] a eficiência do módulo fotovoltaico p-Si é menor que a do silício monocristalino, mesmo sendo fabricados pelo mesmo material. Isto, pois, ao invés de ser formado por um único cristal, é fundido e solidificado, resultando em um bloco com grandes quantidades de grãos ou cristais, concentrando maior número de defeitos. (ALMEIDA et al., 2016, p. 4).

Os pontos positivos de se utilizar as células de silício monocristalino é que elas tendem a funcionar mesmo com pouca incidência de luz, sua vida útil tem em média trinta anos e possui uma eficiência viável comercialmente. Já as células policristalinas são mais baratas em relação as monocristalinas por exigir um processo de fabricação menos rigoroso.

As células solares de filmes finos, também feita de silício, são dispositivos fotovoltaicos feitos de materiais amorfos, disseleneto de cobre e índio, telureto de cádmio e gálio. Este tipo de célula não possui uma estrutura cristalina, o rendimento chega a ser um pouco inferior se comparada com as células monocristalinas e policristalinas.

3.2.5 - Células encontradas no mercado

Pela quantidade de pesquisas direcionadas a energia solar, são vários os tipos de células existentes no mundo, sendo as mais comuns feitas de Silício. As tecnologias aplicadas a esta infinidade de células estão divididas em três gerações.

As principais tecnologias aplicadas na produção de células e módulos fotovoltaicos são classificadas em três gerações. A primeira é dividida em duas cadeias produtivas: o silício monocristalino (m-Si) e silício policristalino (p-Si), que representam, mais de 85% do mercado, por ser considerada uma tecnologia consolidada e confiável, e por possuir a melhor eficiência comercialmente disponível.” (MOEHLECKE et al., 2014, p. 50).

O silício cristalino que corresponde à primeira geração, possui um alto custo de produção e instalação. A segunda geração é considerada aquela baseada em filmes finos inorgânicos com custo de produção menor, porém com eficiência não satisfatória se comparada com a primeira. E por fim, as de terceira geração que fazem parte de uma classe que busca superar as duas anteriores conciliando a eficiência, o baixo custo de produção e comercialização.

As tecnologias de terceira geração estão em desenvolvimento, tendo como preocupação a abundância dos materiais que serão utilizados em sua fabricação, sendo materiais não poluentes, que sejam leves e flexíveis, nesta categoria estão presentes tecnologias orgânicas, pontos quânticos (PQs) e células solares sensibilizadas por corantes (DSSC), algumas outras que validem as características impostas a terceira geração, sendo as citadas com desenvolvimento progressivo e já presentes na indústria.

As células solares orgânicas são compostas de material orgânico, muito leves e semitransparentes. “Aplicações destes dispositivos incluem equipamentos de baixa potência (eletrônica de consumo) e integração em edificações, conhecida como BIPV (do inglês, Building Integrated Photovoltaics)” (ELY; STURWART, 2014, p.1). Sua aplicabilidade está presente principalmente nas edificações com janelas feitas de vidro.

Um dispositivo fotovoltaico orgânico consiste basicamente em um material semiconductor orgânico separado por duas camadas baseadas em uma junção com um polímero e/ou uma molécula orgânica, onde ocorre o efeito fotovoltaico.

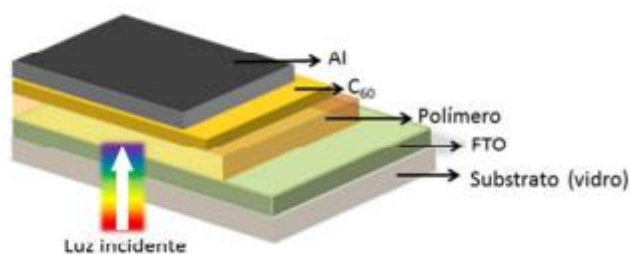
Uma tem a função de doar elétrons e normalmente se utiliza polímeros conjugados, como o poli (3- hexiltiofeno), também conhecido como P3HT. Já a outra camada é aceptora de

elétrons, e normalmente utiliza-se fulerenos, como o éster metílico do ácido [6,6]-fenil-C61-butírico, o PCBM. (MACHADO; MIRANDA, 2015, p. 135).

Nestas duas camadas, quando a luz atinge a célula, um fóton excita a fase do elétron doadora e essa excitação é transmitida para a área entre a camada doadora e aceitadora de elétrons onde ocorre a formação do par elétron-buraco, a figura 3.4 ilustra a estrutura sanduíche de um dispositivo bicamada do tipo polímero/C60.

O elétron pula para a fase aceitadora de elétrons e o buraco migra em sentido contrário na fase doadora. Ao fazer a migração, o elétron encontra o eletrodo de alumínio responsável pelo contato elétrico. O buraco ao migrar encontra a fase com a função de transportá-los até o óxido condutor. Em seguida, o buraco migra para o óxido condutor fechando o circuito, na transferência fotoinduzida que é gerada a corrente elétrica. As células formadas pela junção entre as duas camadas de material orgânico são responsáveis pelo efeito fotovoltaico.

Figura 3.4: Estrutura sanduíche de um dispositivo bicamada



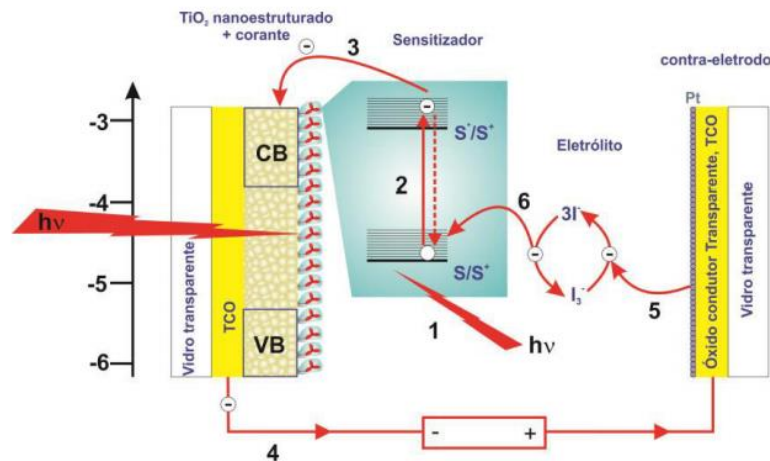
Fonte: YAMAMOTO (2014)

Um outro campo de investigação engloba as Células Solares Sensibilizadas por Corantes, também conhecidas como (CSSC). São formadas por materiais orgânicos e inorgânicos, tendo como principal componente o TiO₂. Foi em um artigo de Grätzel de 1991 que se iniciou o estudo das DSSCs e deste então vêm atraindo a atenção de pesquisadores.

O TiO₂ é transparente à luz visível e possui uma energia de banda proibida de 3 eV, este, precisa de luz ultravioleta para gerar pares de buracos e elétrons. Então, o filme de corante que absorve a luz na sua cor específica (podendo variar da forma incolor até a preta) é depositado sobre a superfície nanoporosa para facilitar o processo de absorção na região visível. Assim, o TiO₂ e o corante podem possuir o mesmo nível de energia de Fermi. Os elétrons que estão no nível de valência do corante podem ser excitados e injetados na BC do TiO₂. Neste processo ocorre o surgimento de buracos nas moléculas do corante, que são preenchidas muito rapidamente, por íons de iodo que estão no eletrólito. Os íons de iodo, I⁻pa se juntam ao preencherem os buracos dos pigmentos e são convertidos em 3 I⁻ na superfície nanoporosa. (FREITAS; FÁBIO, 2006, p.31).

A figura 3.5 ilustra o processo de conversão de energia que é bem similar ao que acontece na fotossíntese das plantas, o corante orgânico absorve a luz e um fóton atinge o corante na camada superficial da célula (passo 1), e então passa do estado fundamental para o excitado (passo 2) e transferindo elétrons no semiconductor de TiO₂ (passo 3), que por sua vez transfere esse elétron para o óxido condutor transparente (TCO), gerando a corrente (passo 4) para fechar o circuito, o contra eletrodo transfere um elétron para o eletrólito (passo 5).

Figura 3.5: Esquema do funcionamento de uma célula sensibilizada por corante



Fonte: MACHADO; MIRANDA (2015)

“A célula opera usando um corante orgânico para absorver a luz na região visível do espectro eletromagnético. Este corante então “injeta” elétrons no semiconductor de TiO_2 que realça a fotovoltagem e fotocorrente características da célula solar” (FREITAS; FÁBIO, 2006, p.31). As novas pesquisas relacionadas a este tipo de célula busca encontrar o corante que resultará em maior eficiência da célula ampliando o espectro eletromagnético de absorção e testando outros tipos de compostos.

As células solares sensibilizadas a pontos quânticos foram construídas pela primeira vez em 1990 a partir do conhecimento já existente sobre as células sensibilizadas por corantes, fazendo a substituição dos corantes usados por Grätzel por Pontos Quânticos comumente abreviado por QD ou *quantum dot*.

As células solares a ponto quântico (QDSSCs) são reconhecidas pelas suas características de múltipla geração de excítons; estabilidade; e possibilidade de controle da energia de banda proibida, através do ajuste do tamanho dos pontos quânticos, tornando possível a absorção do espectro solar do visível ao infravermelho. (SOBRINHO; LOUÍSE, 2016, p. 48).

Os PQs apresentam diversas propriedades especiais que os diferenciam de outros semicondutores como: a ampla absorção de luz, alta intensidade de luminescência e estabilidade química.

A maior diferença entre as células de Pontos quânticos e as demais de 3ª geração é a utilização dos *quanta dots*, que são nanocristais semicondutores que podem apresentar propriedades quânticas. Seu comportamento físico pode ser relacionado ao de um Poço de Potencial, através do confinamento quântico a partícula apresenta propriedades ópticas fortemente dependentes do tamanho do nanocristal. Os elétrons têm sua energia quantizada em valores discretos de energia e um *band gap* maior, o que é justificado pelo número reduzido de átomos e moléculas contidas no material.

O comportamento atômico faz com que os níveis de energia possam ser controlados mudando o tamanho e a forma do ponto quântico, quando ocorre um aumento no tamanho da partícula a luminescência do material se desloca para comprimentos de onda maiores do espectro eletromagnético, e essa variação faz a energia absorvida do espectro solar possa ser controlada.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em um sistema fotovoltaico o elemento básico é a célula, feita a partir de materiais com uma estrutura sólida. A conversão da energia radiante em eletricidade acontece através do efeito fotovoltaico que ocorre em materiais semicondutores “[...] efeito fotovoltaico pode ser entendido como

sendo o fenômeno resultante da incidência de luz sobre a superfície do material semiconductor criando portadores de carga (pares elétrons-buracos), produzindo corrente elétrica” (AGNALDO et al., 2006, p. 77).

A corrida ao espaço, o choque petrolífero e a percepção dos possíveis colapsos climáticos devido à emissão de gases estufas, estimularam pesquisas voltadas à energia solar fotovoltaica que hoje, apresentam um cenário otimista para um futuro sustentável. O alto rendimento energético e a eficiência termodinâmica são alguns dos pontos que validam esta afirmação. Os dispositivos fotovoltaicos são silenciosos, utilizam combustível gratuito e abundante, além de possuir um baixo custo de manutenção. No entanto, existem grandes desafios relacionados a este tipo de energia: o custo de geração e armazenamento por exemplo, ainda são uma barreira para a utilização em massa. Outra desvantagem é que o sistema fotovoltaico não gera energia durante a noite, montar um banco de baterias não é econômico e não possui uma vida útil muito longa.

Estudos de como captar energia solar ao longo do tempo fizeram surgir três gerações de Células Fotovoltaicas: a primeira produzida e mais consolidada no mercado são feitas de Silício Cristalino, podendo ser dividida em duas subcategorias: silício monocristalino e silício policristalino “São os tipos de tecnologias mais utilizados, representando cerca de 85% do mercado devido as maiores eficiências que podem ser atingidas (atingem uma performance típica de 15- 20%) [...]” (SOBRINHO; Louise, 2016, p. 15)”.

É reconhecido que o silício (Si) é um material consagrado para a produção de células solares e possui diversas aplicações, podendo ser utilizado tanto na forma de monocristais, como também policristais e como filmes finos de silício amorfo. “Valores típicos de eficiência de conversão para células de silício policristalino e amorfo são 11-14% e 6-7%, respectivamente” (MORI et al., 2007, p. 11).

Células de junção p-n de silício monocristalino ou policristalino necessitam de várias etapas de processamento, a elevada pureza dos cristais também aumenta o custo de produção. As células policristalinas são mais baratas em relação as monocristalinas por exigir técnicas de fabricação menos rigorosas, ainda que sejam produzidas pelo mesmo material. O silício líquido de alta pureza do tipo p é resfriado, formando vários cristais, passando também pelo processo de dopagem com o fósforo gerando uma junção p-n. por não ser formado por um único cristal, depois do material ser fundido e solidificado resulta em um maior número de defeitos, por conta disso, a conversão de energia também é menor.

A segunda geração é considerada aquela baseada em filmes finos inorgânicos, por exemplo: CdTe, disseleneto de cobre e índio (CIS), disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS) e silício amorfo (a-Si). Essas células necessitam de baixa energia de produção e tem custos menores se comparadas a primeira, porém, a pouca disponibilidade da matéria prima, o baixo rendimento e à curta vida útil, fazem com que esse tipo de célula não seja atrativo comercialmente.

As células fotovoltaicas de terceira geração possuem diversas definições, mas em suma, todas elas concordam que a classe busca superar as duas gerações anteriores, conciliando a eficiência, baixo custo de produção e comercialização. As tecnologias ligadas a produção das células estão em desenvolvimento, preocupando-se com a abundância dos materiais que serão utilizados em sua fabricação, para que não sejam poluentes, que também sejam leves e flexíveis. Nesta categoria estão presentes tecnologias emergentes, sendo as de maior destaque: as orgânicas, células solares sensibilizadas por corantes (DSSC) e pontos quânticos (PQs). Algumas outras células podem validar as características impostas a terceira geração, mas as citadas aqui possuem um desenvolvimento progressivo e estão presentes na indústria.

O desenvolvimento de células solares baseados em materiais orgânicos proporciona uma nova estratégia de exploração da energia vinda do Sol. Pode competir com as células anteriores feitas de Silício, levando uma tecnologia mais sofisticada, apresentando muitas vantagens relacionadas ao custo de produção, semi transparência e flexibilidade mecânica. “Aplicações destes dispositivos incluem equipamentos de baixa potência (eletrônica de consumo) e integração em edificações, conhecida como

BIPV (do inglês, Building Integrated Photovoltaics)” (ELY; STURWART, 2014, p.1), em português: Sistemas Fotovoltaicos Integrados, que consiste em células solares interligadas, acopladas a materiais como parte da estrutura de um edifício substituindo um elemento de construção convencional, como o vidro das janelas por exemplo.

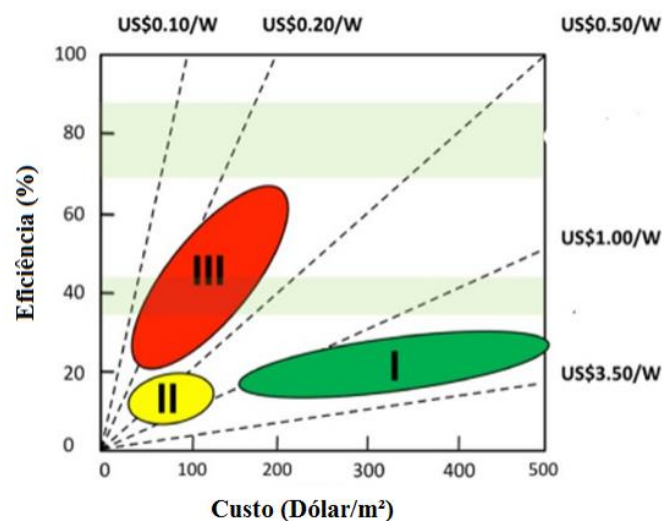
Outro campo de investigação engloba as Células Solares Sensibilizadas por Corantes, também conhecidas como (CSSC), são pertencentes ao grupo de células solares híbridas, pois são formadas por materiais orgânicos e inorgânicos. Esse tipo de célula foi primeiramente proposto por Michael Grätzel, e por isso também é conhecida como célula de Grätzel.

Quando comparada às de silício monocristalino, as células de Grätzel podem apresentar melhor aproveitamento sobre uma faixa mais ampla de luminosidade, devido a habilidade dos corantes de conseguir absorver a radiação na região do visível e do infravermelho próximo. As células são preparadas a partir de materiais de baixa pureza e os processos de produção utilizam equipamentos que operam em condições ambientais, e isso melhora a relação custo/benefício em comparação com as de silício. Novas pesquisas relacionadas a este tipo de célula buscam encontrar o corante que resultará em maior eficiência da célula, ampliando o espectro eletromagnético de absorção e testando outros tipos de compostos.

As células solares sensibilizadas a pontos quânticos foram construídas baseada no conhecimento já estabelecido pelas CSSC. Os PQs apresentam diversas propriedades que os diferenciam de outros semicondutores: fotoluminescência dependente do tamanho, ampla absorção de luz, alta intensidade de luminescência e a estabilidade química.

A figura 4.1 ilustra a relação entre o custo de produção por metro quadrado e a eficiência das três gerações de células fotovoltaicas.

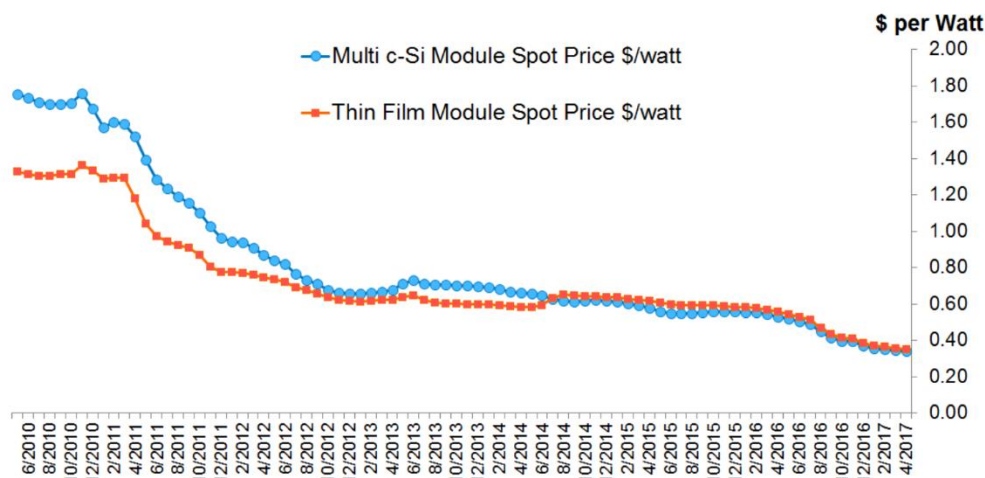
Figura 4.1 : Eficiência das três gerações das Células fotovoltaicas



Fonte: IEE (2014)

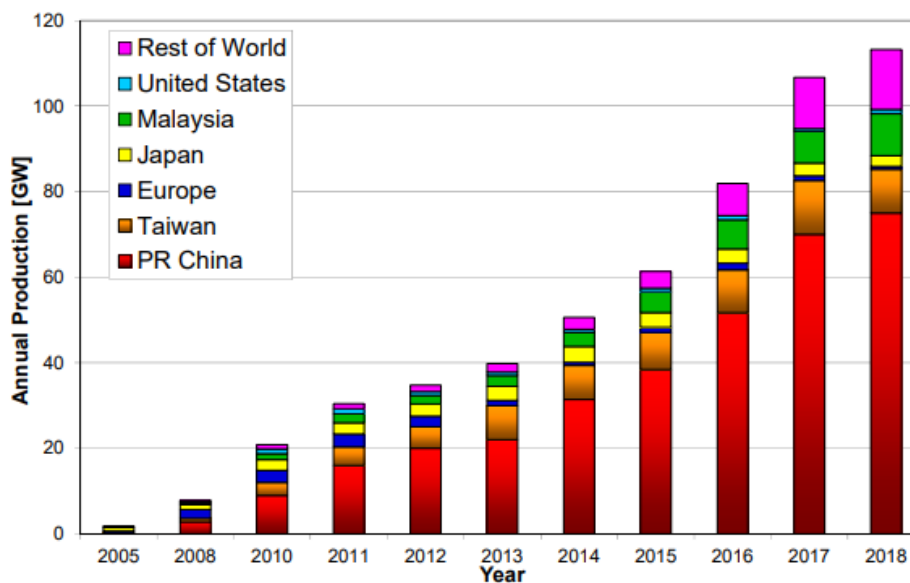
Pode-se observar que os dispositivos de primeira e segunda geração se caracterizam por apresentar um elevado custo por metro quadrado e eficiência de conversão relativamente baixo se comparado com as de terceira geração. “Estima-se que as células solares de terceira geração possam alcançar custos entre US\$0,20/W e US\$0,50/W, o que configura uma redução de custo razoável se comparável aos painéis de silício cujo custo está entre US\$1,00/W e US\$3,50/W.” (SOBRINHO; Louise, 2016, p. 15) ”.

A figura 4.2 mostra o preço por watt produzido no intervalo de 2010 a 2017.

Figura 4.2: Redução do preço dos sistemas fotovoltaicos

Fonte: NREL

É possível observar no gráfico que a medida em que o tempo passa o preço do Watt gerado decresce. E pode-se levar em conta também, que as quantidades de painéis solares instalados têm aumentado no mundo, como mostra a figura 4.3, isso se deve muito a presença mais efetiva da terceira geração no mercado, ainda que não possua uma parcela representativa na produção de energia, por estar em fase inicial de implementação já se mostram muito significativas.

Figura 4.3: Produção de Células Fotovoltaicas

Fonte: Photon Magazine (2018)

“A produção de energia solar ou fotovoltaica cresce no globo a um ritmo acelerado, em torno de 50% por ano [...]” (VASCONCELOS; Yuri, 2013)”. Os avanços da implementação das novas tecnologias, trouxeram melhores níveis de eficiência, redução do custo, melhora da resistência mecânica, além de características estéticas mais atraentes para implementação em diversos materiais, como em mochilas e roupas, permitindo que o usuário colete energia enquanto se desloca para recarregar baterias de equipamentos eletrônicos de baixa potência, como telefones celulares e

notebooks. Por serem portáteis e leves, também podem levar energia a regiões em locais remotos que ainda não tenham acesso à energia elétrica.

4. CONCLUSÃO

Ao decorrer da história utilizava-se a energia solar de forma passiva. Hoje com a evolução da humanidade existe a possibilidade de converter a energia do Sol em elétrica através das células fotovoltaicas. A tecnologia fotovoltaica atingiu finalmente uma fase de maturidade que pode viabilizar uma visão otimista em relação ao futuro da energia sustentável. São inúmeros benefícios econômicos, sociais, ambientais e estratégicos que as células fotovoltaicas podem trazer.

Hoje, os desafios precisam ser superados com novos mecanismos e tecnologias para disseminação deste tipo de energia, para que propiciem o desenvolvimento de um mercado sustentável propagando a sua utilização em todo o planeta. As pesquisas buscam construir células mais eficientes e com baixo custo de fabricação. No estudo executado neste trabalho, foi investigado o funcionamento das células fotovoltaicas feitas a base de silício e as de terceira geração, comparando as duas categorias e identificando as tendências tecnológicas da energia solar.

Através das três células representativas da terceira geração analisadas, foi possível notar a utilização de materiais relativamente novos e a capacidade da substituição do silício como material base por novos elementos que se mostram mais viáveis. Apesar dos avanços, o silício permanece sendo o material empregado em maior escala no processo de fabricação, esse dado tende a mudar com os diversos tipos de células fotovoltaicas em desenvolvimento e com as células que ainda estão em estágio experimental.

ABSTRACT

The global energy consumption panorama has been driving research related to alternative energy sources that reduce the recurring environmental problems. Within this scenario, studies on photovoltaic cells, which have clean, sustainable and increasingly promising technology have stood out. The photovoltaic cells are divided into three generations: the first produced through silicon, the second, are those made of inorganic thin films and the third that is in the process of development, is concerned with the abundance of materials used in their manufacture, being non-polluting, light, flexible and efficient in capturing energy. To identify the technological trends of solar energy it is necessary to study the functioning of photovoltaic cells made of silicon and those of third generation, comparing the two categories.

Keywords: Solar Cells. Photovoltaic cells. Solar Energy.

REFERÊNCIAS

MACHADO, C. T.; MIRANDA, F. S. Energia Solar Fotovoltaica: Uma Breve Revisão. **Revista Virtual de Química**, Rio de Janeiro, v. 7, n. 1, p.126-143, out. 2014.

YAMAMOTO, Natasha Ariane Diniz. **Células Solares Orgânicas Baseadas nas Estruturas Heterojunção em Bicamada e Heterojunção de Volume**. 2014. 133 p. Dissertação de Doutorado (Física) - UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ, Curitiba, 2014. Disponível em: <<https://www.capes.gov.br/images/stories/download/pct/mencoeshonrosas/226847.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2018.

ELY, Fernando; SWART Jacobus W. O Setor Elétrico: Energia Solar Fotovoltaica de Terceira Geração. **Espaço IEEE**, São Paulo, p. 138-139, out. 2014.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. Fundamentos de física. vol 4. 8. ed. Rio de Janeiro LTC, 2009.

ARAÚJO, Cássio. *Princípio de Funcionamento da Célula Fotovoltaica*. 2004. 21f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, 2004.

Solar Energy Conversion by Dye-Sensitized Photovoltaic Cells. Inorganic Chemistry, Laboratory for Photonics and Interfaces, Swiss Federal Institute of Technology, p. 44, Maio, 2005.

SILVA, Edna Lúcia da; MENEZES, Estera Muszkat. *Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação*. 3. ed. Florianópolis: Laboratório de Ensino a Distância da UFSC, 2001.

FRONTIN, O. et al. Usina Fotovoltaica: Jaíba Solar Planejamento e Engenharia. 1 ed. Brasília: Editora LTDA, 2017.

CARVALHO, André Luis Costa. Metodologia Para Análise, *Caracterização e Simulação de Células Fotovoltaicas*. 2014. 97 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004. Disponível em: <<https://www.ppgee.ufmg.br/defesas/1083M.PDF>>. Acesso em: 12 out. 2018.

FADIGAS, Eliane Aparecida Faria Amaral. **Energia Solar Fotovoltaica: Fundamentos, Conversão e Viabilidade técnico-econômica**. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/56337/mod_resource/content/2/Apostila_solar.pdf>. Acesso em: 10 out. 2018.

SOUZA, Ronilson. **Os sistemas de energia solar fotovoltaica**. São Paulo: [s.n.], 2014. 109 p. Disponível em: <<http://programaintegradoronline.com.br/wp-content/uploads/2016/03/Livro-Digital-de-Introdu%C3%A7%C3%A3o-aos-Sistemas-Solares-novo.pdf>>. Acesso em: 21 out. 2018.

SANTOS, Agnaldo José et al. Células solares de TiO₂ sensibilizado por corante. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, Maceió, v. 28, n. 1, p. 77-84, jan. 2016. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/0D/rbef/v28n1/a10v28n1.pdf>>. Acesso em: 01 nov. 2018.

TAVARES, Carlos António. **Estudo Comparativo de Controladores Fuzzy aplicados a um sistema solar fotovoltaico**. 2009. Dissertação de Mestrado (Engenharia Eletrônica) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

YAMAMOTO, Natasha Ariane Diniz. **Células Solares Orgânicas Baseadas nas Estruturas Heterojunção em Bicamada e Heterojunção de Volume**. 2014. Dissertação de Mestrado (Física) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

FREITAS, Fábio Elias. **Célula solar de SNO₂/TiO₂ preparada por “spray” – pirólise ativada com corante orgânico**. 2006. Dissertação de Mestrado (Física) - Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2006.

SOBRINHO, Louise Cristine de Oliveira. **Desenvolvimentos e Pesquisas na Terceira Geração de Células Fotovoltaica**. 2016. Monografia (Engenharia Elétrica.) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

EMIN, Saim *et al.* Colloidal quantum dot solar cells. Science Direct, Japão, 12 abr. 2011.

MCDONALD, Charlotte. **How many Earths do we need?** BBC News. Disponível em: <<https://www.bbc.com/news/magazine-33133712>>. Acesso em: 23 jun. 2019.



Campus I - QS 07 – Lote 01 – EPCT – Águas Claras – Brasília – DF CEP: 71966-700 - (61) 3356-9000
Campus Avançado Asa Norte - SGAN 916 Módulo B Avenida W5 - CEP: 70790-160 - Brasília/DF - Telefone: (61) 3448-7134
Campus Avançado Asa Sul - SHIGS 702 Conjunto 2 Bloco A - CEP: 70330-710 - Brasília/DF - Telefone: (61) 3226-8210