



CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal
de Campina Grande

ALANA SANTIAGO DOS SANTOS SANTOS



Centro de Engenharia
Elétrica e Informática

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
O ESTADO DA ARTE DAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS



Departamento de
Engenharia Elétrica



Campina Grande
2018

ALANA SANTIAGO DOS SANTOS SANTOS

O ESTADO DA ARTE DAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica
da Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento de Energia

Orientador:

Professor Leimar de Oliveira, M. Sc.

Campina Grande
2018

ALANA SANTIAGO DOS SANTOS SANTOS

O ESTADO DA ARTE DAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica
da Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento de Energia

Aprovado em / /

Professor Avaliador
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Professor Leimar de Oliveira, M. Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho aos meus pais, inspirações
para mim.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter sido meu conforto e força até aqui, ter sido a luz que impulsionou minha alma e por ter me dado a certeza de nunca estar sozinha no universo.

Agradeço aos meus pais, Alan e Mercia, por me darem o sentimento mais puro e me apoiado em todos os sonhos, sempre permitindo que eu me orientasse nos melhores caminhos. Além da minha irmã, Aylla, que me incentiva a ser cada dia melhor, por ser minha companhia e ser a confiança que nunca estaremos só nessa vida.

Ao meu namorado, Herbet, por me ter me ajudado em grandes passos nesse ciclo, por ter sido um porto seguro, um amigo, por ter revigorado as minhas energias nos dias mais difíceis e me transmitido muita tranquilidade.

Aos meus grandes amigos e colegas de curso que me ajudaram a chegar até aqui, com muita troca de conhecimento e abrandando a dura jornada deste curso. À Samara, Grace, Priscila, Junior, Ana Cristina, Eliamare, Pollyana, Roniel, Danilo, Ana Paula, Luiz Paulo, Martins, Jozias, Ivana, Jandilson, Maura, Arthur, Elioenai. E, também, aos que a UFCG me presenteou além do curso, Mariana, Matheus, Jefferson e Silvia.

Ao professor Leimar, pela orientação, pelos sábios conselhos e pela paciência ao longo do curso e, principalmente, na produção deste trabalho.

“A mente que se abre a uma nova ideia, jamais volta ao seu tamanho original.”

Albert Einstein.

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo a respeito das principais células solares, componentes cruciais para fabricação dos módulos dos sistemas de geração solar fotovoltaica de energia elétrica, cujo desenvolvimento tecnológico é de extrema importância para um aproveitamento energético eficaz e complementar, para que a sociedade moderna desfrute de uma energia de qualidade, que atenda a crescente demanda energética mundial. São expostas as possíveis formas de utilização da energia solar, atendo-se apenas ao aproveitamento fotovoltaico, desde sua descoberta até a aplicação do fenômeno em diferentes dispositivos semicondutores modernos. As células fotovoltaicas podem ser fabricadas em alguns tipos de materiais semicondutores e com diferentes técnicas de fabricação, sendo agrupadas em módulos de forma paralela ou série, obtendo-se, com cada uma, eficiências de conversão e aplicações diversas. O módulo fotovoltaico é a estrutura que comporta várias células arranjadas de modo que se obtenha uma determinada potência desejada e ao mesmo tempo proporcione a proteção dessas células.

Palavras-chave: Energia solar, células fotovoltaicas, efeito fotoelétrico, eficiência, geração.

ABSTRACT

This work presents a study about the main solar cells, crucial components for the manufacture of the modules of solar photovoltaic systems, whose technological development is of extreme importance for an efficient and complementary energy use, so that modern society enjoys a quality energy that meets the growing world energy demand. The possible ways of using solar energy are exposed, focusing on photovoltaic use, from its discovery to the application of the phenomenon in different modern semiconductor devices. Photovoltaic cells can be manufactured in some types of semiconductor materials and with different manufacturing techniques, being grouped in modules in parallel or series, obtaining, with each one, different conversion efficiencies and applications. The photovoltaic module is a structure that contains several cells arranged so that a desired power is obtained and at the same time provides the protection of these cells.

Keywords: Solar energy, photovoltaic cells, photoelectric effect, efficiency, generation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Aparato feito por Becquerel para estudar o efeito fotoelétrico.....	19
Figura 2 – Produção mundial de células fotovoltaicas	21
Figura 3 – Evolução da produção industrial de tecnologia fotovoltaica por região	22
Figura 4 - Instalação fotovoltaica cumulativa global até 2017.....	23
Figura 5 - Instalação fotovoltaica cumulativa global por região	23
Figura 6 - Átomo de silício com 14 elétrons distribuídos em 3 camadas.....	24
Figura 7 - Estrutura cristalina de silício.....	25
Figura 8 - Estrutura de uma célula fotovoltaica de silício em destaque.. ..	26
Figura 9 - Circuito elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica.....	27
Figura 10 - Corrente elétrica em função da tensão em célula de silício de 156 mm x 156 mm.....	28
Figura 11 - Célula quadrada monocristalina.....	29
Figura 12 - Célula semi-quadrada monocristalina.....	29
Figura 13 - Célula redonda monocristalina	30
Figura 14 - Célula Fotovoltaica de silício policristalino	31
Figura 15 - Célula de silício amorfo	32
Figura 16 - Célula fotovoltaica de telureto de cádmio	33
Figura 17 – Célula Fotovoltaica de cobre, índio e seleneto gálio	34
Figura 18 – Célula fotovoltaica orgânica	34
Figura 19 – Módulo fotovoltaico.....	37
Figura 20 - Estrutura em camadas de uma célula fotovoltaica de silício amorfo.....	40
Figura 21 - Estrutura da célula fotovoltaica de película fina de CdTe	41
Figura 22 - Processo padrão para produção de módulos fotovoltaicos de CIGS	42
Figura 23 - Estrutura em camadas de uma célula fotovoltaica de CIS	43
Figura 24 - Estrutura de uma célula sensibilizada por corante.....	45
Figura 25 - Célula fotovoltaica sensibilizada por corante	46
Figura 26 - Diagrama esquemático do sistema ótico de reflexão e refração	47
Figura 27 - Eficiência das células fotovoltaicas	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Produção de células Fotovoltaicas.....	36
Tabela 2 – Eficiência das células fotovoltaicas coloridas	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CIS	Cádmio, Índio e Selênio
CIGS	Cádmio, Índio, Gálio e Selênio
ITO	Óxido de Índio e Estanho
ONU	Organização das Nações Unidas
OPV	Organic Solar Cells
OTC	Óxido Transparente Condutivo

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Ampère
C	Coulomb
J	Joule
K	Kelvin
V	Volts
W, MW, GW	Watt, Mega Watt, Giga Watt
Wp	Watt pico
°C	Grau Celsius

SUMÁRIO

1	Introdução.....	15
1.1	Objetivos.....	16
1.1.1	Objetivo Geral.....	16
1.1.2	Objetivos Específicos.....	16
1.2	Estrutura do Trabalho.....	16
2	Aproveitamento Energético Solar.....	18
2.1	Energia Solar Térmica.....	18
2.2	Energia Solar Fotovoltaica.....	19
2.3	Breve Histórico da Energia Solar Fotovoltaica.....	19
2.4	Produção e Consumo de Energia Solar Fotovoltaica no Mundo.....	21
3	Células Fotovoltaicas.....	24
3.1	Estrutura das Células Fotovoltaicas.....	24
3.2	Modelo Matemático.....	27
3.3	Células Fotovoltaica de Silício (Si).....	28
3.3.1	Células Fotovoltaicas de Silício Monocristalino (m-Si).....	29
3.3.2	Células Fotovoltaicas de Silício Policristalino (p-Si).....	30
3.4	Células Fotovoltaicas de Película Fina.....	31
3.4.1	Células Fotovoltaicas de Silício Amorfo (a-Si).....	32
3.4.2	Células Fotovoltaicas de Telureto de Cádmio (CdTe).....	32
3.4.3	Células Fotovoltaicas de Cobre, Índio e Seleneto de Gálio (CIS/CIGS).....	33
3.4.4	Células Fotovoltaicas Orgânicas (OPV).....	34
3.5	Células Fotovoltaicas de Multijunção.....	35
4	Estado da Arte.....	36
4.1	Tecnologia do Silício.....	36
4.2	Tecnologia das Películas Finas.....	39
4.2.1	Tecnologia do Silício Amorfo.....	39
4.2.2	Tecnologia do Telureto de Cádmio.....	40

4.2.3	Tecnologia do Cobre, Índio e Seleneto de Gálio (CIS/CIGS)	41
4.2.4	Tecnologia das Células Fotovoltaicas Orgânicas	43
4.3	Tecnologia de Multijunção	46
4.4	Análise da Eficiência das Células Fotovoltaicas	48
5	Conclusões.....	50
	Bibliografia.....	51

1 INTRODUÇÃO

A demanda por energia elétrica é notavelmente crescente em todo o mundo, refletindo diversos fatores como desenvolvimento tecnológico, crescimento populacional e econômico, sendo assim, a principal fonte de energia para a manutenção das atividades da sociedade.

Com o intuito de reduzir a dependência de poucas fontes energéticas, cada vez mais, em todo o mundo, estudos vem sendo desenvolvidos para inserção e ampliação das diferentes formas de energia renováveis existentes, como a solar, eólica e biomassa, a fim de diminuir os problemas ocasionados pelas fontes de energia não-renováveis como os combustíveis fósseis e nucleares. Dentre as fontes de energia renováveis, a solar pode-se atribuir destaque por seu fluxo energético sobre a Terra ser milhares de vezes a energia atualmente consumida pelos seres humanos, o que torna o potencial desse recurso altamente considerável. Apesar de apresentar vantagens em relação as fontes de energia não-renováveis, a geração através da incidência do fluxo solar ainda não é largamente utilizada por fatores como o alto custo de produção e instalação, intermitência e uma eficiência de conversão intermediária, sendo assim, uma fonte de energia elétrica complementar às demais.

A energia solar fotovoltaica é aquela obtida por meio da conversão dos raios solares incidentes sobre a terra em energia elétrica, por meio do efeito fotoelétrico, descoberto em 1839, pelo físico francês Edmond Becquerel. Este efeito é caracterizado pela existência de uma diferença de potencial nas extremidades de um objeto composto de material semicondutor, causada pela absorção de luz.

Na geração de energia solar fotovoltaica, o dispositivo que realiza a conversão direta de energia solar em energia elétrica é a célula fotovoltaica ou célula solar. As primeiras delas foram fabricadas em selênio e desenvolvidas pelo pesquisador americano Charles Fritts, em 1883. Já em 1954, foram fabricadas pelos Laboratórios Bell as primeiras células fotovoltaicas compostas de silício, o que representou um grande avanço tecnológico no que diz respeito aos dispositivos semicondutores. Diversas outras tecnologias de fabricação de células fotovoltaicas foram desenvolvidas, porém, hoje, as

células fabricadas em cristais de silício são as mais utilizadas. Há também as células de película fina, células de multijunção de alta concentração e as células solares orgânicas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GERAL

De modo a analisar os avanços tecnológicos no processo de instalação de sistemas fotovoltaicos, esse trabalho se propõe a apresentar o estado da arte das tecnologias fotovoltaicas, dada a sua relevância como meio de geração de energia elétrica renovável e complementar.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para o conseguimento do que foi proposto como objetivo geral deste trabalho, foram elencados os seguintes objetivos específicos:

Pesquisa estruturada da geração de energia fotovoltaica, com ênfase em suas diferentes topologias encontradas na literatura vigente;

Levantamento das tecnologias correntes no que concerne o estado da arte das células fotovoltaicas.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

A apresentação dos conteúdos do presente trabalho de conclusão de curso foi estruturada conforme tem-se a seguir.

No Capítulo 2 tem-se a apresentação dos conceitos acerca do aproveitamento solar e seus tipos de aplicação. A explanação do histórico da energia solar fotovoltaica e seu contexto na esfera mundial e no Brasil.

Em sequência, no Capítulo 3, tem-se a estrutura microscópica das células e como os átomos se combinam de modo a formar um campo elétrico, bem como o circuito

elétrico equivalente das mesmas. Por fim, as topologias de células fotovoltaicas encontradas na literatura vigente são apresentadas.

No Capítulo 4, as tecnologias de células fotovoltaicas atuais são apresentadas como um levantamento do estado da arte. Começando pelas tecnologias de silício, pelas células de película fina e chegando nas células de multijunção com concentração fotovoltaica. É nesse capítulo que pode ser observado cada processo de fabricação das diferentes células e suas respectivas aplicabilidades.

Finalmente, no Capítulo 5 tem-se a apresentação das conclusões do presente estudo. Com base nas conclusões evidenciadas, é possível verificar que os objetivos da pesquisa foram alcançados. Adicionalmente, em seguida, são expostas as referências utilizadas no âmbito deste trabalho.

2 APROVEITAMENTO ENERGÉTICO SOLAR

O Sol, no que diz respeito a energia, é o fator, direto ou indireto, de todas as outras fontes de energia conhecidas na Terra. É a partir da energia solar que a matéria orgânica pode realizar a fotossíntese e desenvolver-se para ser utilizada na obtenção da energia de biomassa. Assim como propiciou o desenvolvimento de animais e plantas existentes a milhões de anos, os quais, através de seus resíduos, formaram os combustíveis fósseis como petróleo, gás natural e carvão. Além disso, é também o Sol que propicia a continuidade do ciclo das águas, tornando viável a utilização da energia hidroelétrica. Bem como, o aquecimento das camadas atmosféricas, que combinado com as diferenças de pressão sobre o planeta, ocasionam os ventos, que são aproveitados como fonte de energia nas usinas eólicas, através dos aerogeradores. Entretanto, este trabalho abordará apenas a forma de energia solar direta.

De modo geral, pode-se dividir a energia solar em dois panoramas, a energia solar térmica e a energia solar fotovoltaica.

2.1 ENERGIA SOLAR TÉRMICA

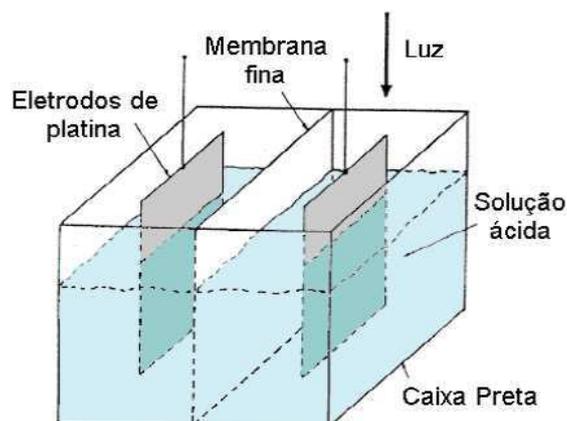
A energia solar térmica constitui-se da absorção de energia na forma de calor, a partir da radiação solar incidente, podendo ser aproveitada em residências, hospitais, piscinas e processos industriais. Para sua utilização, é preciso captá-la através dos chamados coletores solares, que por meio da condução transmitem parte da energia calorífica ao fluido que se deseja aquecer.

Se tornou uma alternativa para complementar o consumo de energia, já que fornece uma opção barata e eficaz para climatizações de ambiente e aquecimento de água para uso sanitário. Além da possibilidade de gerar energia elétrica, produzindo vapor, onde este ativa uma turbina, assim, convertendo a energia mecânica em elétrica.

2.2 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Energia solar fotovoltaica está relacionada ao efeito fotoelétrico descoberto por Edmond Becquerel, o qual através de seu experimento (Figura 1) constatou que a incidência de luz em um material semiconductor causava o aparecimento de uma diferença de potencial em suas extremidades. Utilizando uma caixa preta contendo solução ácida, eletrodos de platina foram inseridos e separados por uma membrana fina na metade do recipiente e medida a corrente elétrica, submetendo o aparato a diferentes comprimentos de onda, obtendo os melhores resultados com a luz ultravioleta e a luz azul e, também, quando os eletrodos eram cobertos por materiais sensíveis a radiação eletromagnética como cloreto de prata (AgCl) e brometo de prata (AgBr) (Honsberg & Bowden, 2018).

Figura 1 - Aparato feito por Becquerel para estudar o efeito fotoelétrico



Fonte: (Honsberg & Bowden, 2018)

2.3 BREVE HISTÓRICO DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Os primeiros dispositivos considerados células fotovoltaicas, os quais foram fabricados em selênio, foram desenvolvidos por Charles Fritts, em 1883, mais de 40 anos após a descoberta do efeito fotovoltaico por Becquerel. Porém, essas células ainda possuíam uma eficiência de conversão muito baixa.

Já em 1954, o químico Calvin Fuller, dos Laboratórios Bell nos Estados Unidos, desenvolveu junto com os outros pesquisadores, Gerald Pearson (físico) e Daryl Chapin (engenheiro), um processo de dopagem do silício com arsênio e boro, conseguindo atingir uma eficiência considerada alta e inédita para a época de 6%, com potência de 5 mW e área de 2 cm². Com o desenvolvimento das tecnologias dos dispositivos semicondutores,

seguindo o crescimento da área de eletrônica, iniciou-se a produção industrial em 1956 (Pinho & Galdino, 2014).

A primeira indústria a adotar a energia solar fotovoltaica em suas atividades foi a indústria espacial, na década de 1950, onde os norte-americanos viram uma oportunidade viável para impulsionar o lançamento de satélites ao redor da Terra. Nas missões espaciais, o ideal era uma fonte de energia confiável, funcionando por um longo tempo para manter a alimentação energética dos equipamentos eletroeletrônicos, além do fato das células solares apresentarem segurança, menor custo e menor peso em relação as baterias anteriormente utilizadas.

Em 1973, a crise do petróleo fomentou o interesse em aplicações terrestres para a energia solar fotovoltaica, entretanto a sua utilização ainda apresentou barreiras devido ao custo ainda elevado na produção das células solares.

Em 1978, a produção de células fotovoltaicas já ultrapassava a marca de 1 MWp/ano. Onde Wp é a unidade de potência de saída, sob condições padrão de ensaio (1000 W/m^2 e temperatura da célula de 25°C), de um gerador fotovoltaico (Pinho & Galdino, 2014).

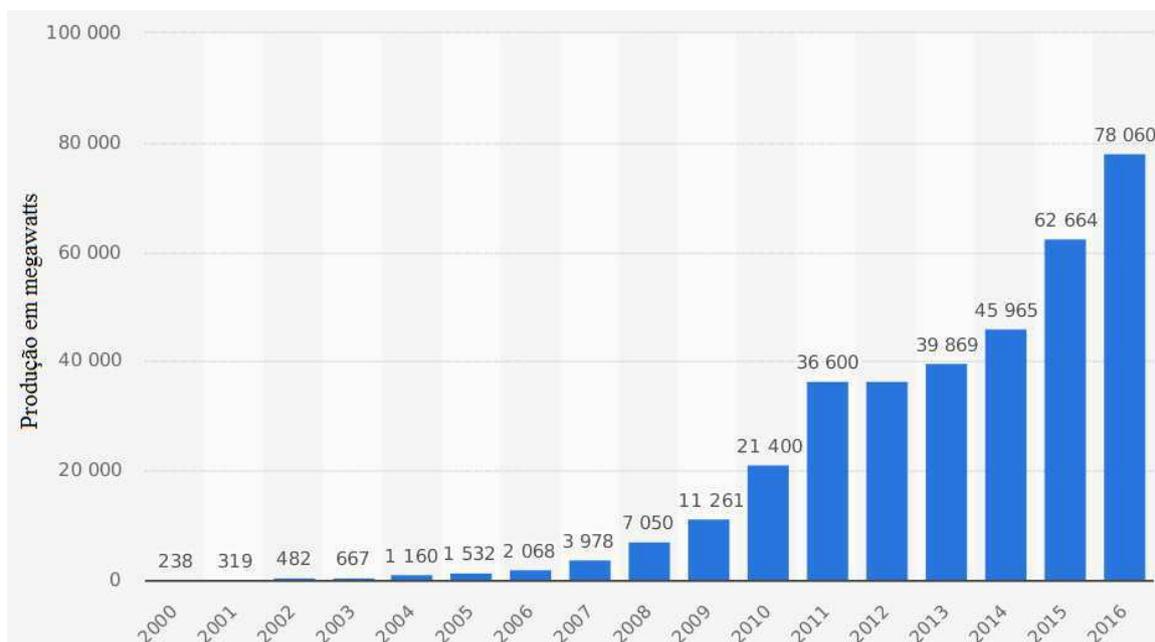
Na década de 1990, os países participantes da Organização das Nações Unidas (ONU) se comprometeram a reduzir suas respectivas emissões de gases poluentes na atmosfera terrestre, o que em parte, impulsionou políticas de governo de alguns deles para o desenvolvimento da geração fotovoltaica.

Em 1998, a produção da indústria fotovoltaica alcançou 150 MWp/ano (Pinho & Galdino, 2014).

No início dos anos 2000, a China, que antes apresentava uma parcela pouco significativa nesse mercado, alavancou a sua produção e, em 2009, já liderava o mercado o mundial.

Em muitos países, incentivos foram concedidos, ao longo do tempo, para ampliar a inserção de novos sistemas fotovoltaicos. Na Figura 2, pode ser observado a evolução da produção mundial de células fotovoltaicas, até o ano de 2016.

Figura 2 – Produção mundial de células fotovoltaicas



Fonte: (Statista, 2018)

Atualmente, apesar do crescimento significativo da implantação de sistemas fotovoltaicos, a sua utilização ainda apresenta alguns empecilhos, como custos de fabricação e instalação elevados, a intermitência e baixa eficiência de conversão. Sendo um tipo de geração que não pode ocorrer a noite e, mesmo durante o dia, tem-se o fluxo solar reduzido por períodos de chuvas, nublados e de neve, sendo diretamente afetada pelas condições ambientais e climáticas. Por este mesmo motivo, observa-se que sistemas solares não são viáveis para aplicações em grandes centros urbanos, por requererem complementos para o fornecimento energético nesses momentos de ausência ou diminuição da sua efetividade.

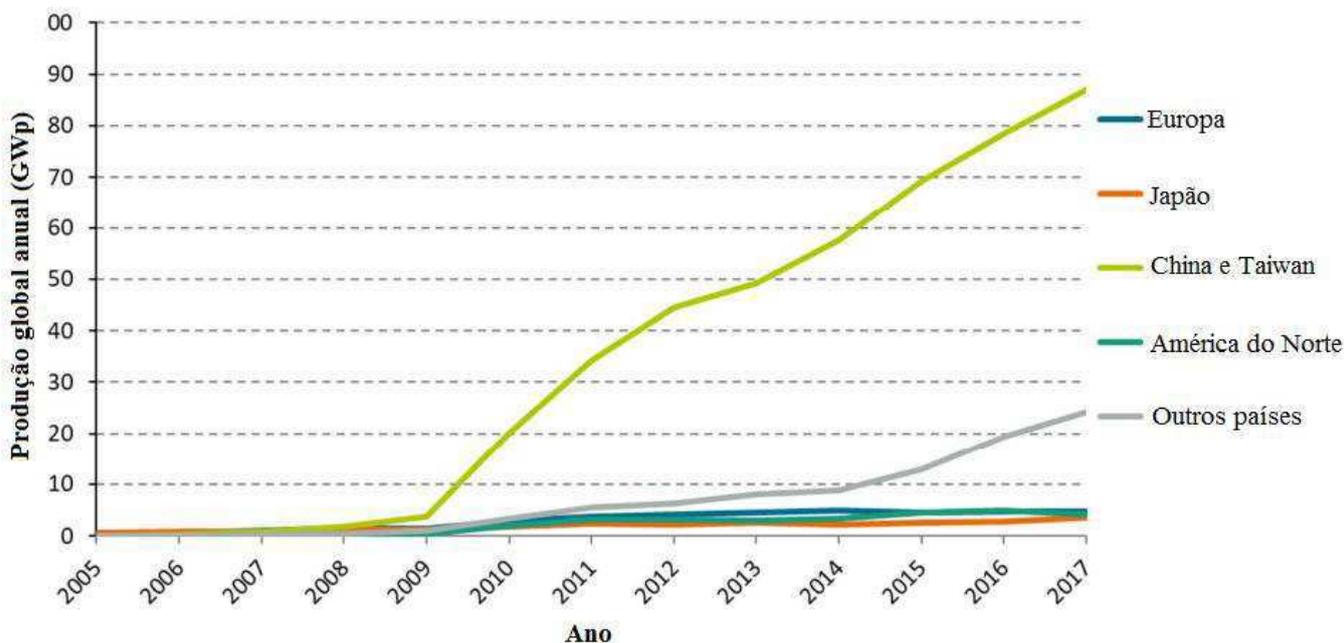
2.4 PRODUÇÃO E CONSUMO DE ENERGIA SOLAR

FOTOVOLTAICA NO MUNDO

O mercado correspondente a energia solar fotovoltaica está em rápido crescimento em vários países. Na Figura 3 pode ser vista a expansão da produção entre os anos de 2005 e 2017, na Europa, Japão, China e Taiwan, América do Norte e no resto do mundo.

China e Taiwan lideram o crescimento e detêm 70% da cota mundial, as demais localidades da Ásia totalizam 14,8%, a Europa apenas 3,1% e América do Norte 3,7% (Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE, 2018).

Figura 3 – Evolução da produção industrial de tecnologia fotovoltaica por região



Fonte: Adaptado de (Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE, 2018)

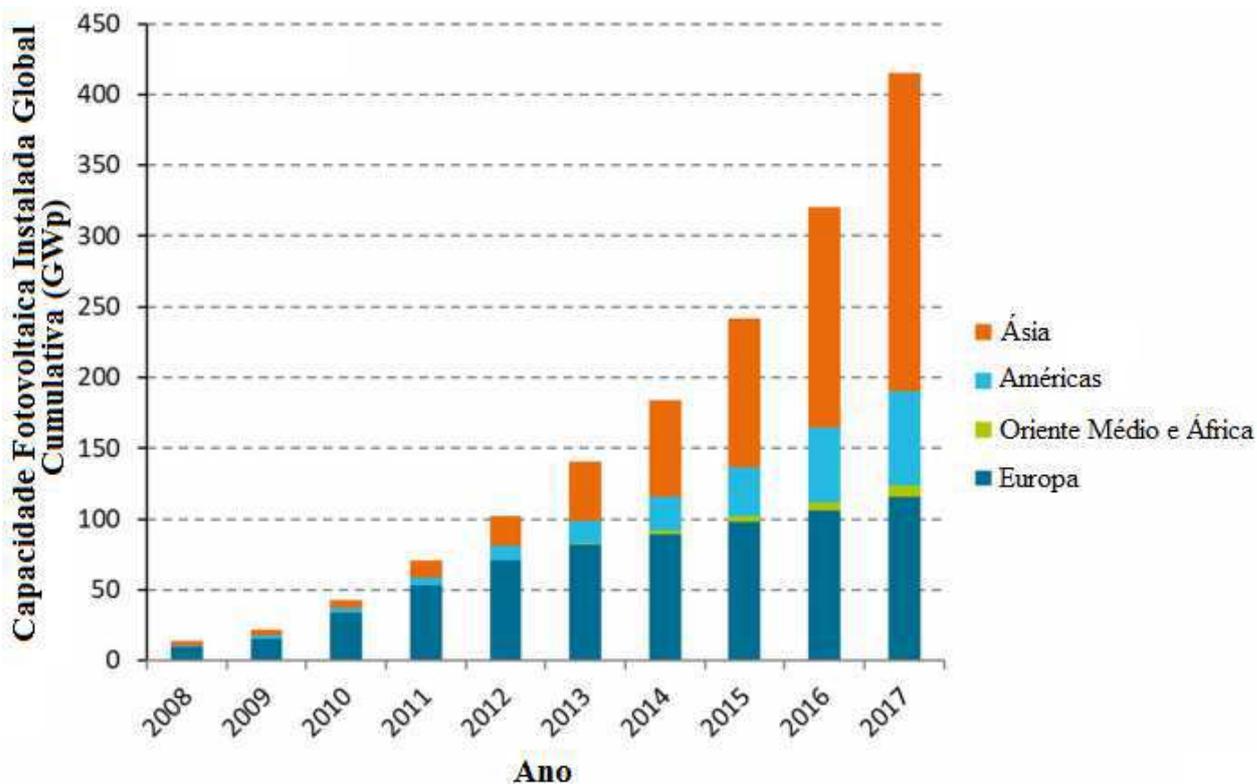
No final de 2017, havia cerca de 415 GWp instalados em todo globo, os quais 32% representaram as instalações apenas na China, que tinha 26% no ano anterior. Já a Europa possuía 28% das instalações, apresentando uma queda em relação a 2016, onde representava 33% deste total (Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE, 2018).

O declínio, correspondente as instalações europeias, sofreu influência de políticas no Reino Unido, onde o governo cortou os incentivos à projetos de micro geração solar residencial e subsídios para grandes “fazendas solares”.

A Alemanha há anos mantém posição de destaque em relação as instalações fotovoltaicas, correspondendo a 10% (42,4 GWp) da capacidade mundial em 2017, com 1,7 GWp representando as instalações novas, conseguindo cobrir 7% da demanda de energia elétrica do país no mesmo ano.

Na Figura 4 é apresentado a capacidade fotovoltaica instalada cumulativa no planeta, em GWp, entre os anos de 2008 e 2017, evidenciando um crescimento significativo da geração fotovoltaica nos países asiáticos.

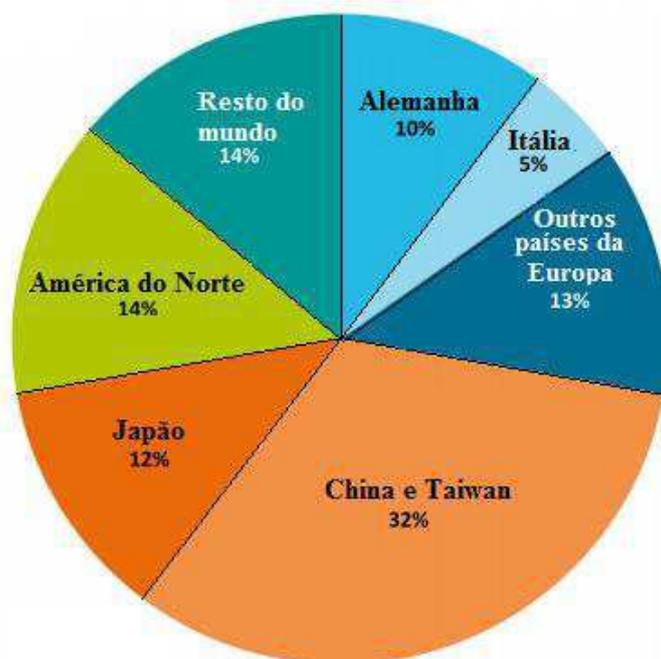
Figura 4 - Instalação fotovoltaica cumulativa global até 2017



Fonte: Adaptado de (Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE, 2018)

Na Figura 5 observa-se a porcentagem da instalação fotovoltaica cumulativa global por região.

Figura 5 - Instalação fotovoltaica cumulativa global por região



Fonte: Adaptado de (Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE, 2018)

3 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

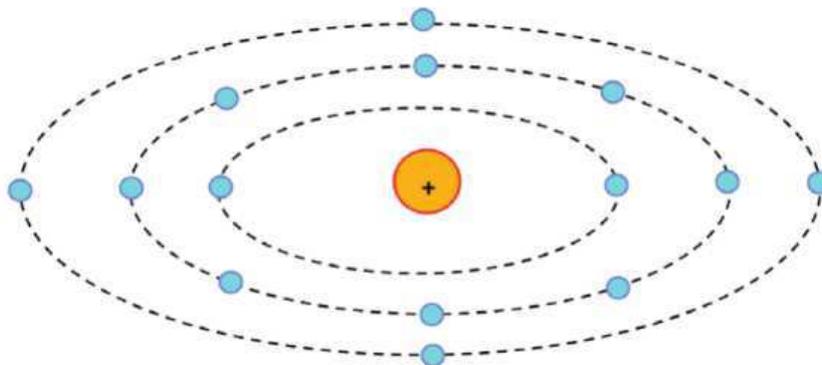
Neste capítulo é apresentado a estrutura física das células fotovoltaicas, como ocorre a formação do campo elétrico nas mesmas e seu modelo matemático. Além disso, são apresentadas as diferentes topologias de células produzidas atualmente. Estas podem ser de:

- ❖ Estrutura cristalina do silício: mono ou policristalino;
- ❖ Películas finas, utilizando: silício amorfo; telureto de cádmio; cobre, índio e gálio seleneto ou materiais orgânicos;
- ❖ Multijunção com concentração fotovoltaica.

3.1 ESTRUTURA DAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

Um átomo de silício, de número atômico 14, possui 4 elétrons em sua camada mais externa, conhecida com banda de valência, como mostrado na Figura 6. São esses átomos que interagem com átomos próximos e formam as estruturas sólidas.

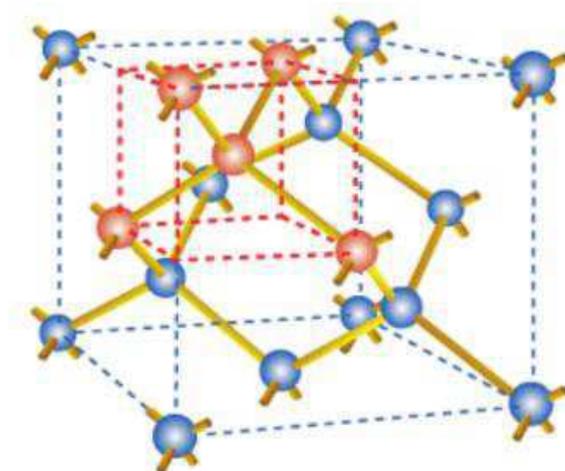
Figura 6 - Átomo de silício com 14 elétrons distribuídos em 3 camadas



Fonte: (Shayani, 2006)

Neste caso, cada átomo faz uma ligação covalente com outros 4 átomos vizinhos, formando um cristal de silício e organizando-se conforme a Figura 7. Com isso, a banda de valência fica cheia, podendo ter até 8 elétrons.

Figura 7 - Estrutura cristalina de silício



Fonte: Adaptado de (Frontin, Brasil Jr, Carneiro, & Godoy, 2017)

A ligação covalente de elétrons de átomos diferentes pode ser quebrada, desde que o elétron adquira energia para se afastar ainda mais do núcleo, podendo, então, se deslocar, passando da banda de valência para a banda de condução. Ocorrendo isto, o elétron deixa uma lacuna em seu lugar, criando um par elétron-lacuna, devido ao aumento de energia do elétron.

Se este elétron livre for canalizado para um circuito, uma corrente elétrica poderá aparecer. Todavia, uma célula fotovoltaica constituída apenas de cristais de silício não produziria essa corrente, porque o elétron iria deixar a banda de condução e retornar a banda de valência, sem transferir-se para uma carga externa, transformando essa energia em calor.

Para que haja corrente elétrica, é necessário acelerar o elétron livre para fora do material, o que é possível com a existência de um campo elétrico. Já para gerar um campo elétrico permanente no material das células, é realizado o processo de dopagem do material semiconductor. Esse processo cria duas camadas, as camadas tipo *p*, que possuem um excesso de elétrons, e tipo *n*, que possuem um excesso de prótons, em comparação ao silício puro.

Para criar a camada tipo *n*, pode-se adicionar como dopante o fósforo, que possui 5 elétrons na sua camada de valência. A estrutura cristalina faz com que 4 desses elétrons liguem-se com 4 átomos de silício, deixando um elétron livre, que recebendo energia térmica é enviado para banda de condução.

Já na camada tipo *p*, pode-se adicionar o boro como dopante, que possui 3 elétrons na sua banda de valência, realizando 4 ligações covalentes com 4 átomos de silício,

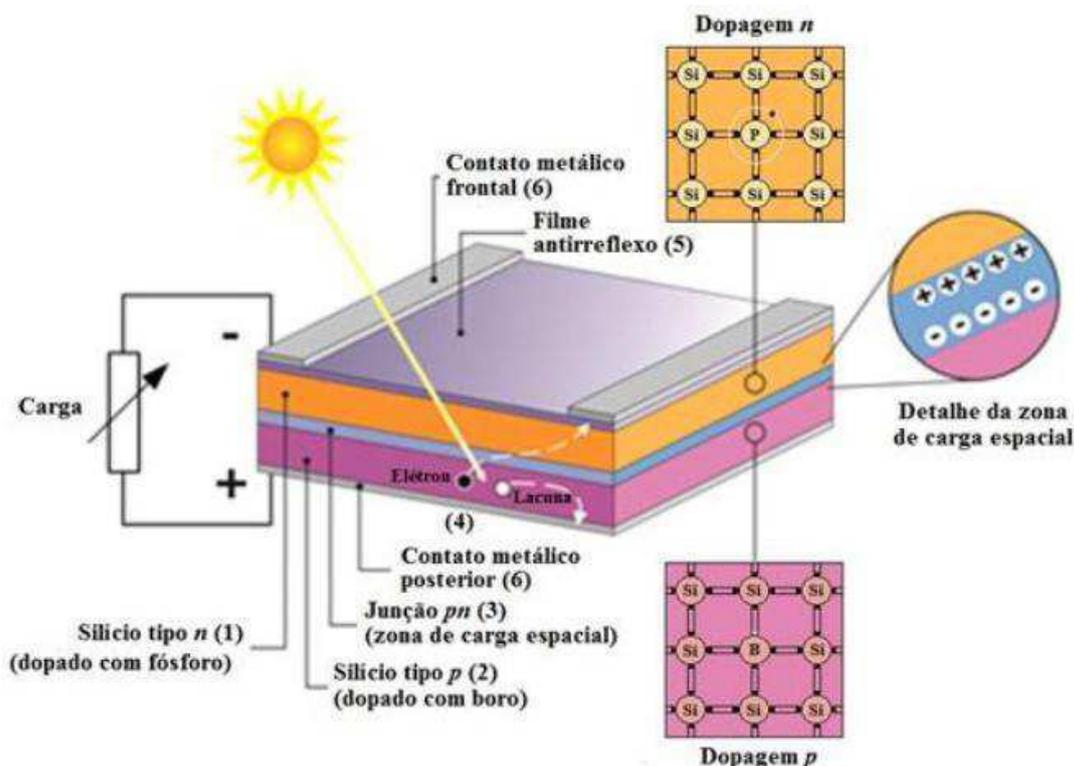
entretanto uma das ligações possui apenas 1 elétron, enquanto as outras possuem 2 elétrons. A ausência desse elétron pode ser chamada de lacuna e com pouca energia térmica, esta pode se deslocar, criando outra lacuna, já que cada vez que um elétron ocupa seu lugar, outra lacuna se forma.

Quando o silício com dopantes tipo p e o silício com dopantes tipo n se encontram, formando a junção $p-n$, os elétrons livres que pertencem a parte n preenchem as lacunas da parte p , portanto a camada n fica positivamente carregada, enquanto camada p fica negativamente carregada. Essas condições geram um campo elétrico permanente, dificultando a passagem de mais elétrons do lado n para o lado p .

Quando o fóton da luz solar fornece energia suficiente para que um elétron da camada p mova-se para a banda de valência, formando um par elétron-lacuna, o campo elétrico envia-o para a camada n , ao mesmo tempo que repele a lacuna para o lado p . Então, ligando contatos de um circuito aos terminais do material dopado para que o elétron seja coletado na camada n , atravessando a carga do circuito e retornando para a lacuna da camada p , faz-se circular uma corrente elétrica.

A Figura 8 mostra a constituição física de uma célula fotovoltaica.

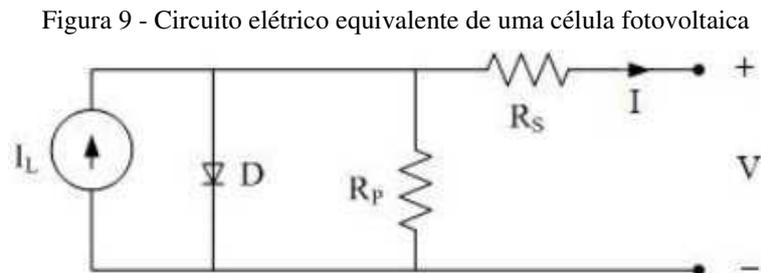
Figura 8 - Estrutura de uma célula fotovoltaica de silício em destaque: (1) região tipo n ; (2) região tipo p ; (3) zona de carga espacial, onde se forma junção $p-n$ e o campo elétrico; (4) geração de par elétron-lacuna; (5) filme antirreflexo; (6) contatos metálicos.



Fonte: Adaptado de (Pinho & Galdino, 2014)

3.2 MODELO MATEMÁTICO

Na Figura 9 pode-se ver o circuito equivalente de uma célula fotovoltaica, onde D representa a participação da junção $p-n$ no escuro, a resistência série R_s , representando uma queda de tensão, e resistência paralelo R_p , representando possíveis corrente de fuga.



Fonte: (Pinho & Galdino, 2014)

A corrente elétrica da célula em função da tensão no dispositivo, chamada de curva característica, pode ser descrita pela seguinte equação:

$$I = I_L - I_o \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right]$$

Onde:

I_L : Corrente fotogerada (A) (corrente gerada pelos fótons absorvidos da radiação solar);

I_o : Corrente de saturação reversa do diodo (A);

n : Fator de idealidade do diodo, número adimensional obtido por ajuste de dados experimentais;

q : Carga do elétron ($1,6 \times 10^{-19}$ C);

k : Constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K);

T : Temperatura absoluta (K).

Assim, pode-se observar que no escuro, com $I_L = 0$, a célula fotovoltaica tem comportamento idêntico ao do diodo.

Considerando as resistências em série e em paralelo do circuito elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica, tem-se que a equação que descreve a sua curva característica é dada por:

$$I = I_L - I_o \left[\exp \left(\frac{q(V + IR_S)}{nkT} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_S}{R_P}$$

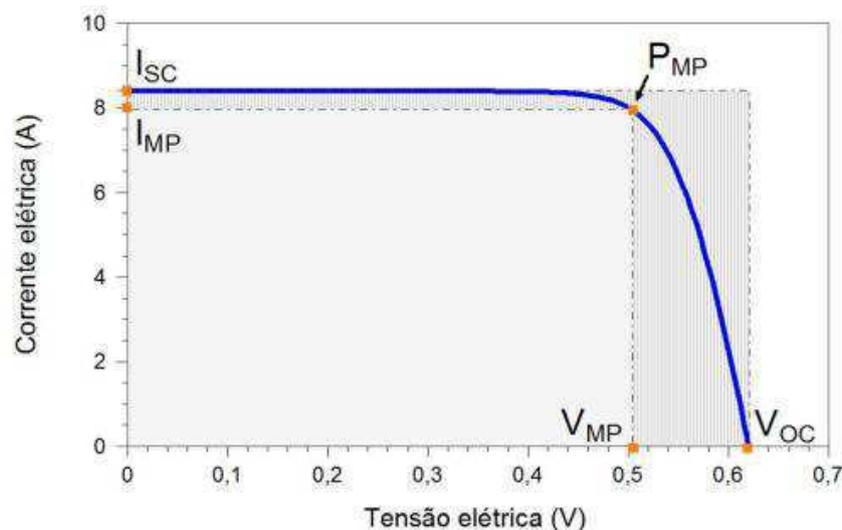
Onde:

R_s : Resistência em série;

R_p : Resistência em paralelo.

Na Figura 10 pode ser vista a curva I-V de uma célula fotovoltaica de silício. Apesar da curva ser representada no primeiro quadrante, deve-se lembrar que na verdade ela situa-se no quarto quadrante, por se tratar de um gerador. Os parâmetros destacados são: ISC é a corrente elétrica de curto circuito; VOC é a tensão de circuito aberto; PMP é a potência máxima; IMP é corrente no ponto de potência máxima; VMP é a tensão no ponto de potência máxima.

Figura 10 - Corrente elétrica em função da tensão em célula de silício de 156 mm x156 mm.



Fonte: (Pinho & Galdino, 2014)

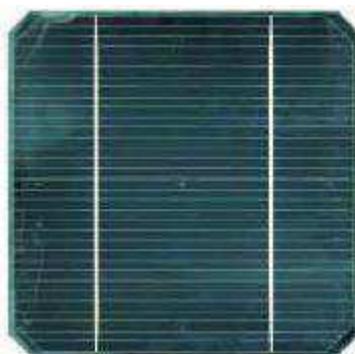
3.3 CÉLULAS FOTOVOLTAICA DE SILÍCIO (SI)

Em 2018, cerca de 91% da utilização mundial de placas solares corresponderam a alguma tecnologia baseada no silício, o qual precisa ter um grau alto de pureza para alcançar níveis de eficiência desejáveis. O silício das células pode ser do tipo monocristalino e policristalino. Estes serão apresentados a seguir.

3.3.1 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS DE SILÍCIO MONOCRISTALINO (M-SI)

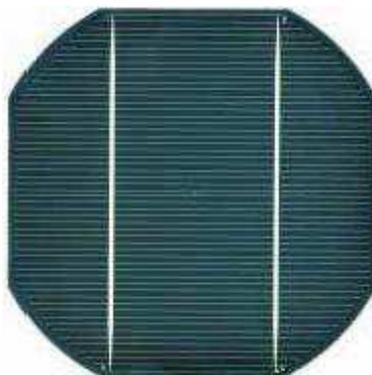
O silício monocristalino é o mais utilizado na fabricação de células fotovoltaicas. Possui apenas um cristal de silício ultrapuro, ideal para potencializar o efeito fotoelétrico. Essas células podem ser fabricadas em formato semi-quadrado, quadrado e arredondado, como pode-se ver nas Figuras 8, 9 e 10. Esta última possui gastos de produção menores em relação as outras, porém raramente são utilizadas, devido a sua ineficiente exploração de espaço.

Figura 11 - Célula quadrada monocristalina



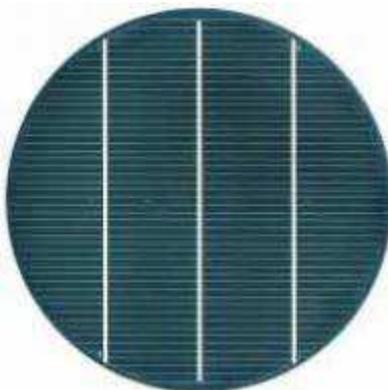
Fonte: (Energia Fotovoltaica: Manual sobre tecnologias, projeto e instalação, 2004)

Figura 12 - Célula semi-quadrada monocristalina



Fonte: (Energia Fotovoltaica: Manual sobre tecnologias, projeto e instalação, 2004)

Figura 13 - Célula redonda monocristalina



Fonte: (Energia Fotovoltaica: Manual sobre tecnologias, projeto e instalação, 2004)

Na produção desta célula de silício, o material é purificado e solidificado, atingido alto grau de pureza, porém para funcionar como célula fotovoltaica é preciso outros processos que o façam atingir um grau de pureza de 99,9999%. O processo utilizado é chamado de “método Czochralski”, onde o silício é fundido com um dopante tipo *p* e, sob o controle de temperatura, extrai-se um cilindro de silício monocristalino levemente dopado. Em seguida, o cilindro é cortado em fatias finas (*wafers*). Depois disso, são introduzidos dopantes do tipo *n*, de forma a obter a junção *p-n*, por meio de difusão controlada onde as fatias de silício são expostas ao vapor do material dopante.

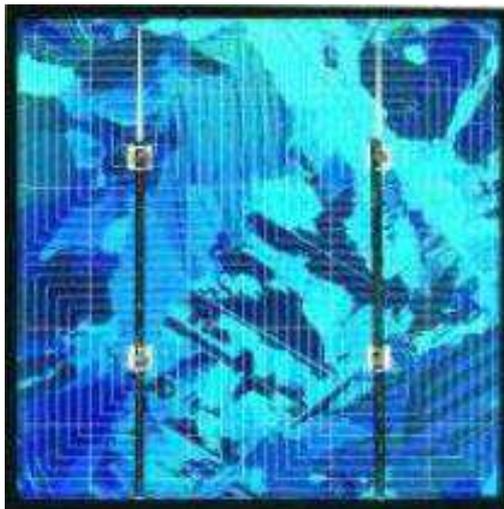
As células de silício monocristalino possuem umas das maiores eficiências dentre as placas comercializadas atualmente, chegando de 15% a 22% (Portal Solar, 2018). Entretanto, devido a necessidade de utilizar materiais ultrapuros e com estrutura cristalina perfeita, sua fabricação demanda muita energia, o que torna seu custo elevado.

3.3.2 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS DE SILÍCIO POLICRISTALINO (P-SI)

Nas células de silício policristalino, como na Figura 14, os cristais são fundidos em um único bloco preservando a formação de múltiplos cristais, com dimensões da ordem de centímetros. A partir do corte desse bloco são obtidas as lâminas, das quais são fabricadas as células fotovoltaicas.

As imperfeições de sua estrutura microscópica dificultam o movimento de elétrons e recombinação das lacunas, conseqüentemente, reduzido sua eficiência, que é ligeiramente menor que a do silício monocristalino, de 14% a 20% (Portal Solar, 2018). Entretanto, a sua fabricação possui menor custo que a fabricação do monocristalino.

Figura 14 - Célula Fotovoltaica de silício policristalino



Fonte: (Energia Fotovoltaica: Manual sobre tecnologias, projeto e instalação, 2004)

3.4 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS DE PELÍCULA FINA

As células de película fina, também conhecidas como células fotovoltaicas de filme fino, são fabricadas depositando-se camadas finas de material semicondutor em um substrato (normalmente, vidro), através de processos como deposição por vaporização, deposição catódica ou banho eletrolítico.

Além da sua produção ser mais simples do que as células de base cristalina, tornando-se potencialmente mais barata, elas não têm o tamanho e formato restrito como o silício. Entretanto, possuem menos eficiência por metro quadrado, elevando os custos com estrutura da instalação, tendendo a aumentar mão-de-obra e cabeamento. Além disso, este tipo de célula possui um tempo de degradação mais curto em comparação às de silício mono e policristalino.

Diferentemente das células cristalinas, as células de película fina são interligadas internamente, por fases estruturais, criando finas ranhuras transparentes em cada uma delas.

Para criar o contato elétrico é aplicado um revestimento metálico opaco, transparente e condutivo, chamado de Óxido Transparente Condutivo (OTC), que incluem o óxido de zinco (ZnO), óxido de estanho (SnO) e óxido de índio e estanho (ITO).

Pode-se categorizar os as células solares de película finas pelo tipo de material semicondutor que é aplicado ao substrato. Estes podem ser:

- Silício amorfo (a-Si);

- Telureto de cádmio (CdTe);
- Cobre, índio e gálio seleneto (CIS / CIGS);
- Células solares fotovoltaicas orgânicas (OPV).

3.4.1 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS DE SILÍCIO AMORFO (A-SI)

O silício amorfo não apresenta estrutura cristalina e por isso possui defeitos estruturais que podem atrapalhar as recombinações dos pares elétrons-lacuna. Para minimizar esses defeitos são adicionados átomos de hidrogênio, em um processo chamado de hidrogenização, ocorrendo ligações livres até a saturação.

A célula de silício amorfo mostra-se uma forte tecnologia no que diz respeito ao baixo custo. Entretanto, problemas de estabilidade levam essas células a um processo de deterioração muito rápido (6 a 12 meses), quando expostas à radiação solar. Seu rendimento decresce nesse período, até se estabilizar.

Com o intuito de reduzir esse desgaste das células, é aplicada uma técnica de fabricação chamada de empilhamento, produzindo células com várias camadas, podendo alcançar rendimentos de até 12% (Pinho & Galdino, 2014).

Figura 15 - Célula de silício amorfo



Fonte: (Energia Fotovoltaica: Manual sobre tecnologias, projeto e instalação, 2004)

3.4.2 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS DE TELURETO DE CÁDMIO (CdTe)

A estrutura de uma célula fotovoltaica de Telureto de Cádmio (CdTe) consiste na utilização de camadas de Sulfeto de Cádmio (CdS) e Telureto de Cádmio. Na sua

fabricação, aplica-se uma película fina de CdS como semicondutor do tipo *n* e uma película fina de CdTe como semicondutor do tipo *p*.

Apesar do baixo custo, em relação as demais, esta célula ainda pode apresentar certos tipos de restrições e dificuldades de aceitação no mercado pela potencial toxicidade do Cádmiu, mesmo com os fabricantes afirmando que há o controle rigoroso da contaminação durante a sua produção, e que a quebra ou rompimento das placas não apresentaria risco ao meio ambiente. Além disso, existem poucas reservas com Telúrio no planeta, o que restringe a produção em larga escala de células de CdTe.

A sua eficiência pode variar de 9 a 16% (Portal Solar, 2018) e os fabricantes asseguram que mesmo após 25 anos, as células terão uma potência de 80% de sua potência inicial.

Este tipo de célula é sensível a umidade, devendo ser encapsuladas, com vidros e películas poliméricas, e seladas para evitar a sua degradação precoce.

Na Figura 16 pode ser vista uma típica célula de CdTe.

Figura 16 - Célula fotovoltaica de telureto de cádmio



Fonte: (Energia Fotovoltaica: Manual sobre tecnologias, projeto e instalação, 2004)

3.4.3 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS DE COBRE, ÍNDIO E SELENETO DE GÁLIO (CIS/CIGS)

Quando se fabricam as células de cobre, índio e seleneto de gálio, esses elementos são colocados um a um, em camadas sobre o substrato das placas. Como Óxido Transparente Condutivo se utiliza o óxido de zinco (ZnO) contaminado com alumínio. E, por fim pode-se usar uma camada de sulfato de cádmio do tipo *n* para reduzir as perdas por possíveis combinações inadequadas dos retículos cristalinos das camadas de CIGS e ZnO.

Essas células fotovoltaicas podem atingir uma eficiência de 15,7% utilizando camadas de CdS e as que não usam atingem 13,5%. O uso do Cádmiu, apesar de em menor quantidade do que nas células de CdTe, e a disponibilidade de Gálio e Índio, por não haver quantidade suficiente deste último para produção anual de muitos GWp, são algumas das dificuldades de sua produção em grande escala (Pinho & Galdino, 2014).

Novos métodos de fabricação vêm sendo desenvolvidos para aumentar a eficiência e minimizar os custos de produção, onde camadas de diferentes materiais são depositadas uma a uma em toda a superfície da placa.

Figura 17 – Célula Fotovoltaica de cobre, índio e seleneto gálio



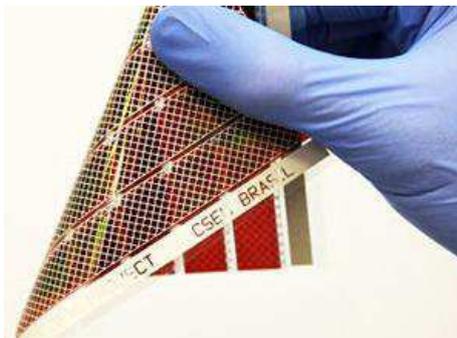
Fonte: (Portal Solar, 2018)

3.4.4 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS ORGÂNICAS (OPV)

Este tipo de célula é composta por polímeros orgânicos semicondutores que absorvem a luz solar, propiciando o aparecimento do efeito fotovoltaico.

Para sua fabricação, é utilizado um processo de impressão do material orgânico em um substrato leve, flexível e transparente, como na Figura 15.

Figura 18 – Célula fotovoltaica orgânica



Fonte: (Portal Solar, 2018)

Apesar de já ter-se obtido em laboratório valores superiores a 10%, elas ainda apresentam baixa eficiência, podendo variar bastante.

3.5 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS DE MULTIJUNÇÃO

As células de multijunção apresentam uma posição de destaque no que diz respeito a eficiência. Estas células caracterizam-se por terem múltiplas junções *p-n*, com diferentes materiais semicondutores, organizando as células em uma pilha, constituindo um bloco maciço separando-as através de junções *p-n* compostas altamente dopadas.

Células fotovoltaicas multijunção de GaInP/GaAs/GaInNAs e GaInP/GaInAs/Ge, tecnologias onde as camadas de materiais semicondutores são crescidas de forma extremamente controlada, atingiram eficiência de 44% e 41,6%, respectivamente. Ultimamente, elas vêm sendo utilizadas em satélites (Pinho & Galdino, 2014).

4 ESTADO DA ARTE

Neste capítulo são abordados os atuais estados da arte das células fotovoltaicas, apresentando as tecnologias do silício, as películas finas, que incluem tecnologias do silício amorfo, do telureto de cádmio, do CIS/CIGS e das células orgânicas, além da tecnologia de mutijunção com concentração fotovoltaica.

4.1 TECNOLOGIA DO SILÍCIO

Atualmente, as células fotovoltaicas de silício compreendem a parte mais significativa das tecnologias fotovoltaicas existentes, participando de 91% do mercado. Na Tabela 1, é possível observar essa informação.

Tabela 1 – Produção de células Fotovoltaicas

Tecnologia celular	Produção em 2013
Silício policristalino	54,9%
Silício monocristalino	36,0%
Silício amorfo (Película fina)	2,0%
CdTe (Película fina)	5,1%
CIGS (Película fina)	2,0%

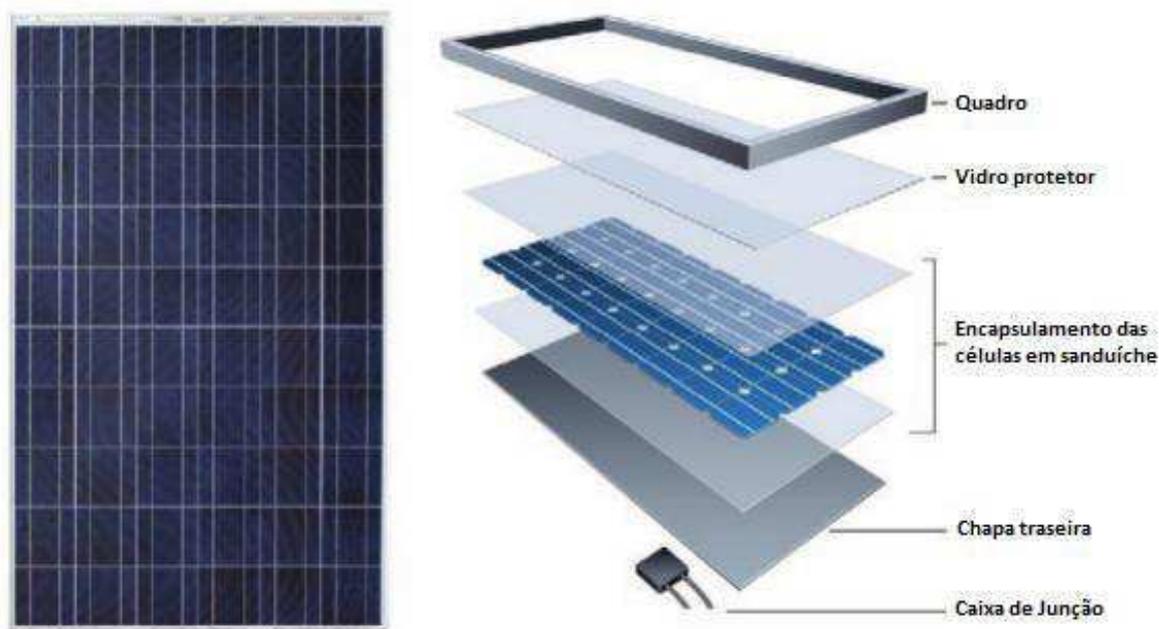
Fonte: Adaptado de (Frontin, Brasil Jr, Carneiro, & Godoy, 2017)

A produção dos módulos baseados na tecnologia do silício segue as seguintes etapas (Frontin, Brasil Jr, Carneiro, & Godoy, 2017):

1. Produção de polissilício em escala solar de purificação do silício metalúrgico.
2. Em seguida, são possíveis duas maneiras: o processo de Czochralski, para silício em grande escala, ou fundição policristalina. Sendo que nesta última, trata-se da produção dos blocos (ou lingotes) da fusão do silício e corte desses em finas fatias de micro espessura chamadas *wafers*.
3. Realização das junções p-n e contatos metálicos, produzindo as células.
4. Conexão das células uma as outras e encapsulamento com materiais protetores, como vidro, por exemplo. Normalmente, um módulo de silício

cristalino padrão possui 60 ou 72 células, e uma potência nominal de 120 a 300 Wp e uma superfície com área de 1,4 a 1,7 m². É possível observar na Figura 19 o esquema de um módulo fotovoltaico.

Figura 19 – Módulo fotovoltaico



Fonte: Adaptado de (Frontin, Brasil Jr, Carneiro, & Godoy, 2017)

Para realização da etapa 3, transformando os *wafers* em células, são seguidas outras etapas. Sendo estas (Frontin, Brasil Jr, Carneiro, & Godoy, 2017):

- ❖ Inspeção de *wafer*: Utilizando-se câmera infravermelha, verifica-se se há a presença indesejada de microfissuras.
- ❖ Remoção de danos por serragem, texturização e limpeza do *wafer* de silício tipo p: Com intuito de reduzir a reflexão total, são adicionados a superfície dos *wafers* texturas, por meio de processos alcalinos para monocristalinos e processo ácidos para policristalinos.
- ❖ Difusão do fósforo profunda no silício: Com o gás POCl_3 , com temperatura entre 800 °C e 950 °C. O fósforo penetra em todas as faces do *wafer*, e as bordas são corroídas para eliminar a camada de fósforo.
- ❖ Deposição de revestimento antirreflexo: Normalmente, utiliza-se uma camada fina de nitreto de silício amorfo hidrogenado, depositada por deposição química na fase vapor assistida por plasma.

- ❖ Serigrafia dos contatos anteriores e posteriores: Os contatos anterior e posterior são feitos, respectivamente, de prata (Ag) e alumínio (Al), utilizando cola metálica apropriada. Em seguida, passam por dois processos térmicos. Primeiro, a secagem, que é feita em torno de 400 °C, de modo a remover o composto orgânico da cola. E, por último, um processo chamado de queima conjunta, onde os *wafers* são expostos a temperatura acima de 800 °C, para formar os contatos anteriores e posteriores.
- ❖ Isolamento da extremidade: Após o processo anterior, o *wafer* já se tornou uma célula, porém a sua potência fica limitada por caminhos de derivação e junções parasitas, as quais são removidas pelo isolamento de extremidade a laser.
- ❖ Classificação e medição de corrente-tensão (I-V): As células são eletricamente caracterizadas por um simulador solar sob condições de ensaio padrão e classificadas em classes, de acordo com sua potência.

Já na etapa 4, são seguidos os seguintes processos:

- ❖ Inspeção de recebimento: Do mesmo modo que na inspeção de *wafer*, utiliza-se uma câmera infravermelha para verificar se há a presença indesejada de microfissuras.
- ❖ Realização em cadeia (string): Nessa fase, 10 ou 12 células são soldadas em cadeias (strings), usando metais conectores para ligá-las. Em seguida, para formar matrizes de 60 ou 72 células, são conectadas 6 cadeias (strings).
- ❖ Laminação: As matrizes são laminadas em vidro. Um encapsulamento é feito para favorecer a adesão entre as células. O material utilizado nesse encapsulamento deve ser transparente, ter baixa resistência térmica e ser estável à altas temperaturas e à exposição aos raios ultravioleta. O material mais utilizado para este fim é o EVA (etil vinil acetato). O encapsulamento é aquecido a aproximadamente 150 °C, polimerizando o EVA.
- ❖ Estruturação: Por fim, fixa-se um quadro à essa estrutura, com o intuito de proteger o componente de variações climáticas e impactos externos.
- ❖ Medição de corrente – tensão (I-V): De modo semelhante ao último passo da etapa 3, o módulo é inspecionado e caracterizado por um simulador solar sob condições de ensaio padrão.

Alguns fabricantes estão comercializando células coloridas para que os módulos possam se integrar harmonicamente as estruturas arquitetônicas. As diferentes cores podem ser obtidas por diversas composições e espessuras na camada antirreflexo. Em contraponto, esses tipos de células sofrem uma redução da sua eficiência. Na Tabela 2 podem ser observadas as eficiências das células de coloração azul, marrom, dourado, cinza, magenta, verde e prateada.

Tabela 2 – Eficiência das células fotovoltaicas coloridas

Cor	Eficiência
Azul	13,6%
Marrom	12,2%
Dourado	11,7%
Cinza	12,4%
Magenta	11,3%
Verde	11,5%
Prateada	10,4%

Fonte: (Pinho & Galdino, 2014)

4.2 TECNOLOGIA DAS PELÍCULAS FINAS

No caso da tecnologia de películas finas, a célula é uma fita de material semicondutor depositado sobre um substrato. Portanto, para a formação do respectivo módulo fotovoltaico, tem-se o substrato (normalmente, vidro), revestido por películas de células ligadas em série, encapsuladas, comumente, com EVA (etil vinil acetato) e por fim, protegidos por mais uma camada de vidro.

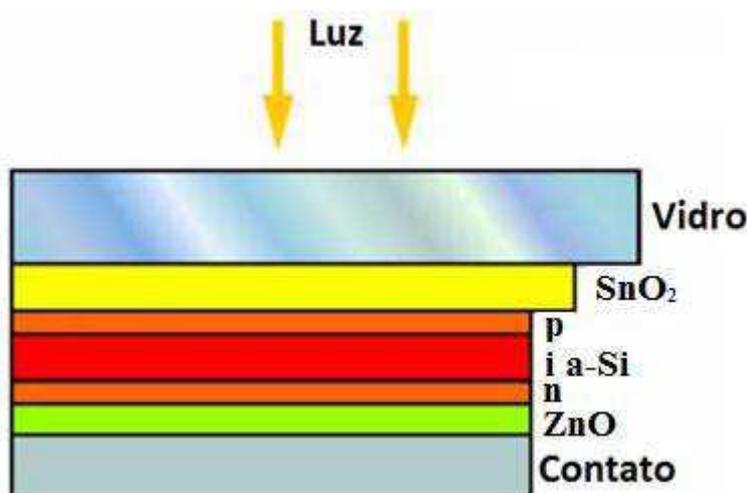
4.2.1 TECNOLOGIA DO SILÍCIO AMORFO

A estrutura básica de uma célula fotovoltaica de silício amorfo (a-Si) caracteriza-se por uma junção $p-i-n$, onde tem-se uma camada intrínseca entre as camadas tipo p e tipo n , como pode ser visto na Figura 20.

Devido ao excesso de cargas positivas, na camada n , e negativas, na camada p , é gerado um campo elétrico em toda a camada intrínseca, onde os fótons são absorvidos e os pares elétron-lacuna separados pelo campo elétrico, causando o efeito fotoelétrico.

Em média, essas células fotovoltaicas atingiam eficiências estabilizadas de aproximadamente 8%. Como as células a base de silício amorfo demonstraram uma queda significativa de sua eficiência no seu primeiro ano de uso, foi desenvolvido o método de deposição de duas ou três camadas *p-i-n*, onde cada uma delas responde para um diferente banda de cor do espectro solar, conseguindo assim, aumentar sua eficiência de 10 a 11%, com duas camadas e até 12% com três camadas (Frontin, Brasil Jr, Carneiro, & Godoy, 2017).

Figura 20 - Estrutura em camadas de uma célula fotovoltaica de silício amorfo



Fonte: Adaptado de (Energia Fotovoltaica: Manual sobre tecnologias, projeto e instalação, 2004)

Vale destacar que as células de silício amorfo de camada única podem ter um declínio de mais de 30% da sua eficiência inicial, contra uma queda de 15% da eficiência inicial nas células de silício amorfo que possuem o método de empilhamento de camadas *p-i-n*.

4.2.2 TECNOLOGIA DO TELURETO DE CÁDMIO

O Telureto de Cádmio é um material não tóxico e de alta estabilidade, ideal para uso em células fotovoltaicas. Sua estrutura em corte é apresentada na Figura 21, onde o contato frontal, normalmente, é composto de uma camada de óxido de estanho índio. E, antes, uma camada absorvente de CdTe, seguida de uma camada transparente de CdS do tipo *n*, transparente e tão fina quanto possível (abaixo de 0,2 μm) para aumentar a resposta da célula a comprimentos de onda curtos (Falcão, 2005).

Figura 21 - Estrutura da célula fotovoltaica de película fina de CdTe



Fonte: Adaptado de (Frontin, Brasil Jr, Carneiro, & Godoy, 2017)

O processo de fabricação da respectiva célula consiste em 8 etapas (Falcão, 2005):

- ❖ Preparação do substrato que deve ter a superfície sem nenhum contaminante.
- ❖ Obtenção do contato posterior: É aplicada uma camada de Óxido Transparente Condutivo, optando-se normalmente pelo SnO_2 , por sua boa estabilidade.
- ❖ Deposição da camada de CdS: Formando a camada de absorção da célula.
- ❖ Deposição da camada de CdTe.
- ❖ Tratamento térmico químico: Trata-se do recozimento da camada de CdTe antes da deposição do contato anterior. Como resultado dessa etapa, é percebido o aumento da eficiência da célula devido a cristalização e crescimento do grão do CdTe e do CdS.
- ❖ Ataque químico pré-contato: Algumas impurezas sobre a superfície da película de CdTe podem ocasionar o aumento da resistência, atrapalhando a passagem de corrente e, conseqüentemente, a eficiência da célula. Por isso é necessário preparar a película antes de receber o contato anterior.
- ❖ Formação do contato anterior: Esse contato pode ser feito aplicando-se uma camada de cobre ($0,1 \mu\text{m}$) e ouro ($0,4 \mu\text{m}$).
- ❖ Finalização do contato anterior: O contato é finalizado com cola prata e a célula é recozida em temperaturas de 100 a 250 °C.

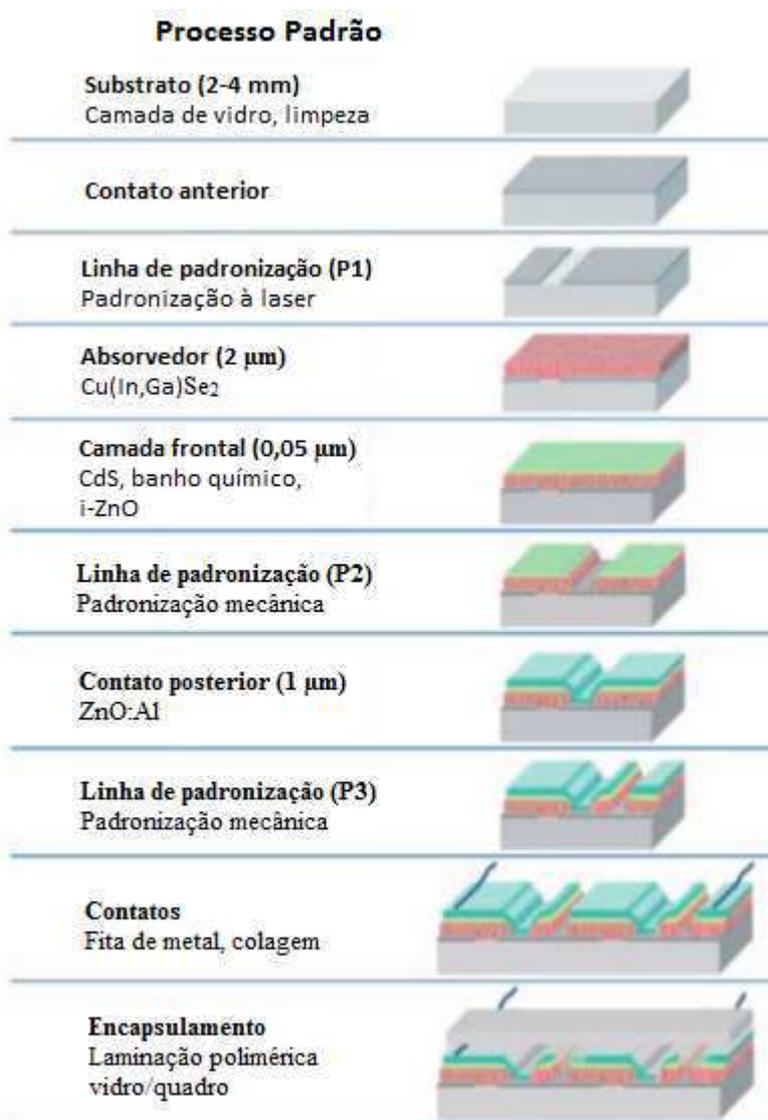
4.2.3 TECNOLOGIA DO COBRE, ÍNDIO E SELENETO DE GÁLIO (CIS/CIGS)

O processo de produção de um módulo fotovoltaico de CIGS pode ser visto, sequencialmente, na Figura 22.

As camadas dos diferentes elementos são distribuídas uma a uma na superfície da placa e as interconexões das células são feitas por processos de corte de uma camada com feixe de radiação laser de alta potência.

Com a produção do módulo concluída, as camadas ativas que se encontram nas extremidades dos módulos são decapadas, de modo a evitar curto-circuito das células individuais pelas extremidades revestidas com vidro antes do fim do processo. Esse passo é feito utilizando réguas de contato metálicas e por encapsulamento (Frontin, Brasil Jr, Carneiro, & Godoy, 2017)

Figura 22 - Processo padrão para produção de módulos fotovoltaicos de CIGS

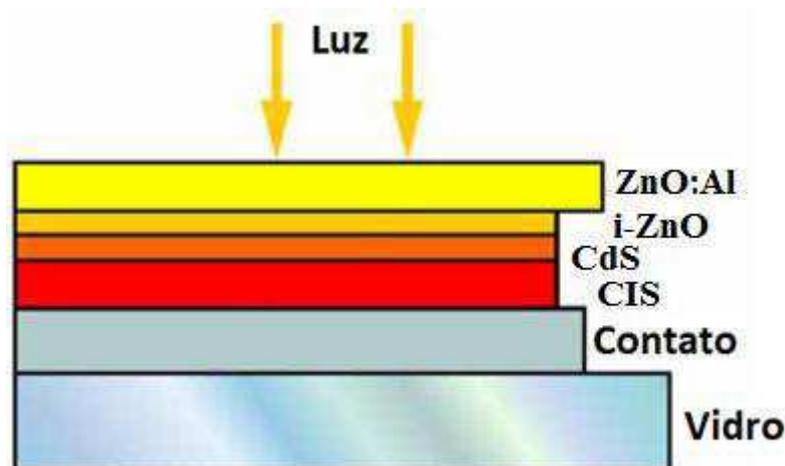


Fonte: Adaptado de (Frontin, Brasil Jr, Carneiro, & Godoy, 2017).

Na Figura 23 pode-se observar a vista em corte de uma célula fotovoltaica CIS. O ZnO:Al é utilizado como contato frontal e o ZnO é utilizado para formar a camada

intrínseca da célula. Além disso, para minimizar os efeitos negativos de combinações do ZnO com a camada CIS, é utilizada uma camada de CdS.

Figura 23 - Estrutura em camadas de uma célula fotovoltaica de CIS



Fonte: Adaptado de (Energia Fotovoltaica: Manual sobre tecnologias, projeto e instalação, 2004)

4.2.4 TECNOLOGIA DAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS ORGÂNICAS

As células fotovoltaicas orgânicas possuem um tipo de tecnologia de baixo custo e não utilizam materiais tóxicos. Na década de 1960, linhas de pesquisa já buscavam utilizar antraceno e poliacetileno (polímero orgânico) como matéria-prima para produção de células fotovoltaicas., entretanto, os resultados mostraram valores baixos de eficiência e instabilidade. Já na década de 1990, as células orgânicas voltaram a ser motivo de interesse das pesquisas na área, depois que polímeros orgânicos passaram a ser usados em transistores e diodos de emissão de luz orgânicos.

As células orgânicas podem ser divididas em 4 classes: células de polímero/de metal, células orgânicas/inorgânicas, células orgânicas doadoras/aceitantes e células sensibilizadas por corante.

❖ Células de polímero/de metal

Para a produção dessa célula, o material polimérico é colocado em um vidro coberto por óxido de índio e estanho, sem seguida, coberto por um metal que realiza um contato ôhmico. O recorde de eficiência desse dispositivo é de 3,3%. (Frontin, Brasil Jr, Carneiro, & Godoy, 2017).

❖ Células orgânicas/inorgânicas

Essas células possuem um substrato inorgânico com uma camada de película orgânica. A maior eficiência alcançada por esta célula foi 17,5%, porém o alto custo de produção diminui o interesse da indústria (Frontin, Brasil Jr, Carneiro, & Godoy, 2017).

❖ Células orgânicas completas doadoras/aceitantes

Essas células, ao invés de possuírem junções *p-n* semicondutoras, possuem materiais aceitantes e doadores de elétrons. As moléculas que formam a região doadora, normalmente, são polímeros conjugados que tem elétrons não localizados. Estes são excitados pela radiação incidente da parte visível do espectro orbital molecular de mais energia até o orbital molecular desocupado de mais baixa energia. O tempo de transferência das moléculas doadoras para as moléculas aceitantes é mais rápido que o processo inverso, havendo uma transmissão de carga.

Normalmente, esse tipo de célula é constituído de um eletrodo transparente, um semicondutor orgânico, tipo fulereno, e de um polímero condutor, que age como doador, além de um substrato de vidro ou camada plástica flexível (Frontin, Brasil Jr, Carneiro, & Godoy, 2017).

Por conta de sua capacidade de aceitar elétrons estáveis e a alta mobilidade de elétrons, os fulerenos são os materiais aceitantes predominantes em células orgânicas. Entretanto, a sua tensão de circuito aberto é limitada.

Visando sanar essa limitação, uma empresa belga (Imec) desenvolveu materiais sem o fulereno como aceitante, apresentando em 2014 um produto que alcançava uma eficiência de 8,4% (Frontin, Brasil Jr, Carneiro, & Godoy, 2017).

Apesar os problemas, o fulereno é um composto estável e, com o encapsulamento e isolamento correto, não se degradam facilmente com a exposição da luz e do oxigênio, diferentemente dos polímeros conjugados.

Vale ressaltar que as células solares orgânicas podem ser flexíveis e transparentes, se adequando na substituição de partes de telhados e fachadas.

❖ Células sensibilizadas por corante

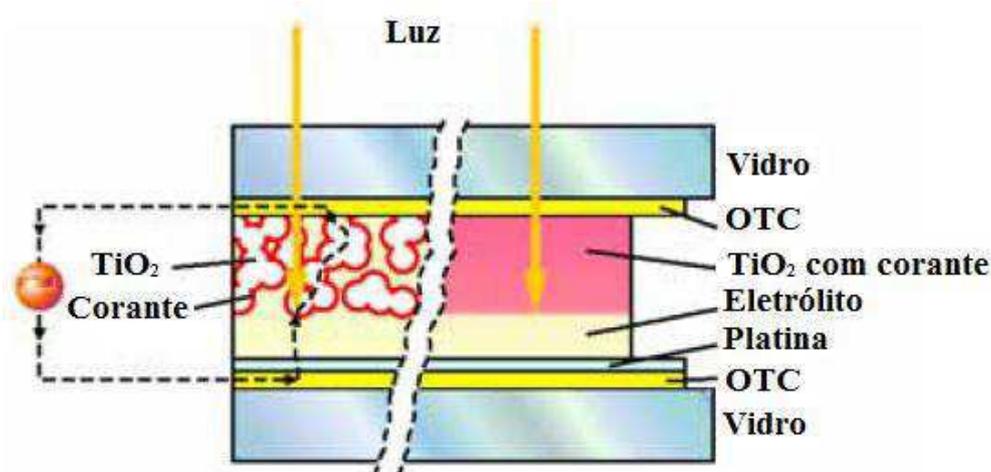
Essas células utilizam junções de rede de interpenetração nanocristalina para coletar a luz e transportar o portador de carga. Elas utilizam um processo semelhante à conversão de energia realizado pelas plantas através da fotossíntese, processo no qual a absorção da radiação solar também se dá por um corante (clorofila).

Neste caso, as células são transportadas de modo que o corante absorve a luz e no estado excitado transfere elétrons para a banda de condução do Dióxido de Titânio (material semiconductor).

A sua estrutura básica é constituída por um anodo, uma película fina de Dióxido de Titânio (TiO_2) e um catodo. O TiO_2 é revestido por um corante baseado em Rutênio (Ru). O mesmo, junto com uma solução condutora (eletrólito), é colocado entre dois eletrodos revestidos de OTC, que contém óxido de estanho dopado com flúor ou índio.

Na Figura 24 pode ser vista a estrutura em corte de uma célula sensibilizada por corante.

Figura 24 - Estrutura de uma célula sensibilizada por corante

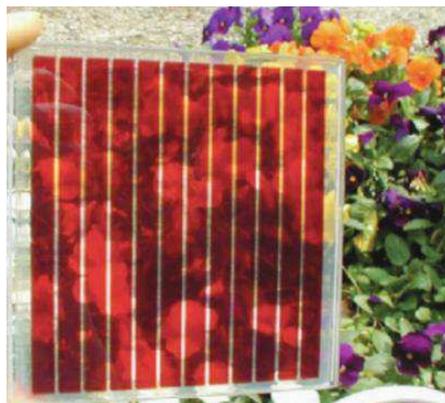


Fonte: (Energia Fotovoltaica: Manual sobre tecnologias, projeto e instalação, 2004)

Em laboratório são alcançadas eficiências de 12,9% para módulos fotovoltaicos que utilizam tecnologia de células sensibilizadas por corantes. Além disso, possui excelente desempenho na difusão da luz (26% de eficiência sob condições de lâmpada interior), o que lhe qualifica para competir comercialmente com as tecnologias do silício (Frontin, Brasil Jr, Carneiro, & Godoy, 2017).

As opções de módulos coloridos e com certa transparência proporcionam aplicações em janelas de produção de eletricidade ou fachadas de vidro, como pode ser visto na Figura 22.

Figura 25 - Célula fotovoltaica sensibilizada por corante



Fonte: (Frontin, Brasil Jr, Carneiro, & Godoy, 2017)

4.3 TECNOLOGIA DE MULTIJUNÇÃO

O conceito de multijunção trata-se de empilhar uma célula sobre a outra, onde cada uma delas converte uma parte do espectro de luz solar. Essas células, especificamente, são as que despertam maior interesse da indústria espacial, porque apesar do seu custo de produção ser relativamente alto quando comparado a outros tipos de tecnologias fotovoltaicas, apresentam a vantagem de ter painéis mais leves e uma potência por unidade de massa muito maior que a obtida com a utilização de células de silício.

O uso de células de multijunção está atrelado a técnica de concentração fotovoltaica. Essa tecnologia, chamada de HCPV (High Concentration Photovoltaic) se fundamenta no uso de células semicondutoras de multijunção do composto III-V (compostos binários, ternários e quaternários de arsênio, índio, gálio e fósforo) que são combinadas umas às outras.

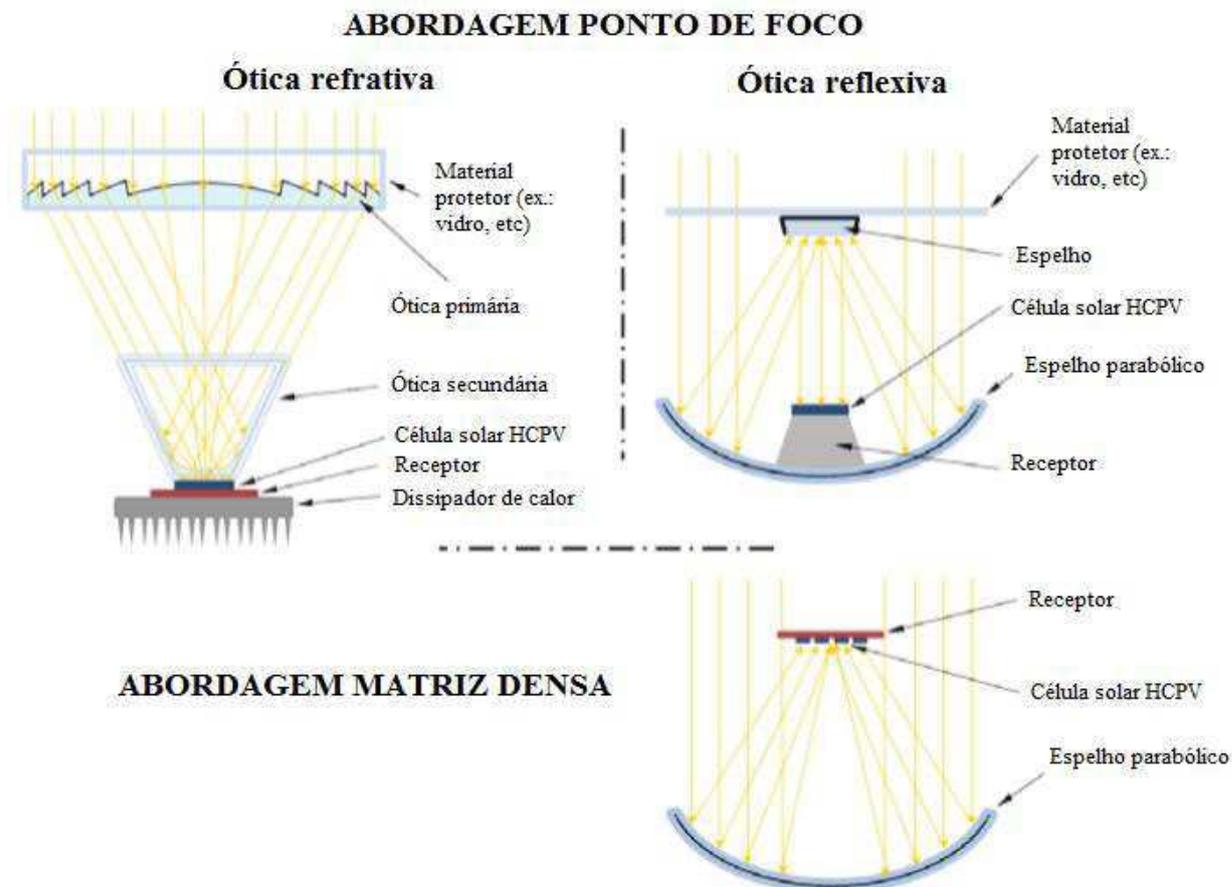
Existem dois modos principais de concentração fotovoltaica, a Matriz Densa e o Ponto de Foco (Frontin, Brasil Jr, Carneiro, & Godoy, 2017). Ambos podem ser vistos na Figura 26.

No esquema de Matrizes Densas, apenas um sistema ótico foca a luz na direção de uma matriz de células solares, que está sobre um receptor dissipador de excesso de calor, podendo alcançar condições melhores de operação.

Já no esquema de Ponto de Foco, há três modos de focar a luz sobre a células: apenas óticas de reflexão, apenas óticas de refração e a combinação das óticas de refração e reflexão. Nesse esquema, cada célula possui seu próprio sistema de focagem ótica e,

assim como nas Matrizes Densas, está sobre um receptor que dissipa o excesso de energia térmica (Frontin, Brasil Jr, Carneiro, & Godoy, 2017).

Figura 26 - Diagrama esquemático do sistema ótico de reflexão e refração



Fonte: Adaptado de (Frontin, Brasil Jr, Carneiro, & Godoy, 2017)

As células de multijunção que utilizam compostos III-V atingiram o recorde de eficiência no que diz respeito a geração fotovoltaica. Com o uso do concentrador fotovoltaico, essa tecnologia alcançou 44,7% de eficiência em aplicações terrestres e 35,1% em aplicações espaciais. A próxima meta da indústria fotovoltaica é alcançar eficiências de 40% e 50% em aplicações espaciais e terrestres, respectivamente (Frontin, Brasil Jr, Carneiro, & Godoy, 2017).

4.4 ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

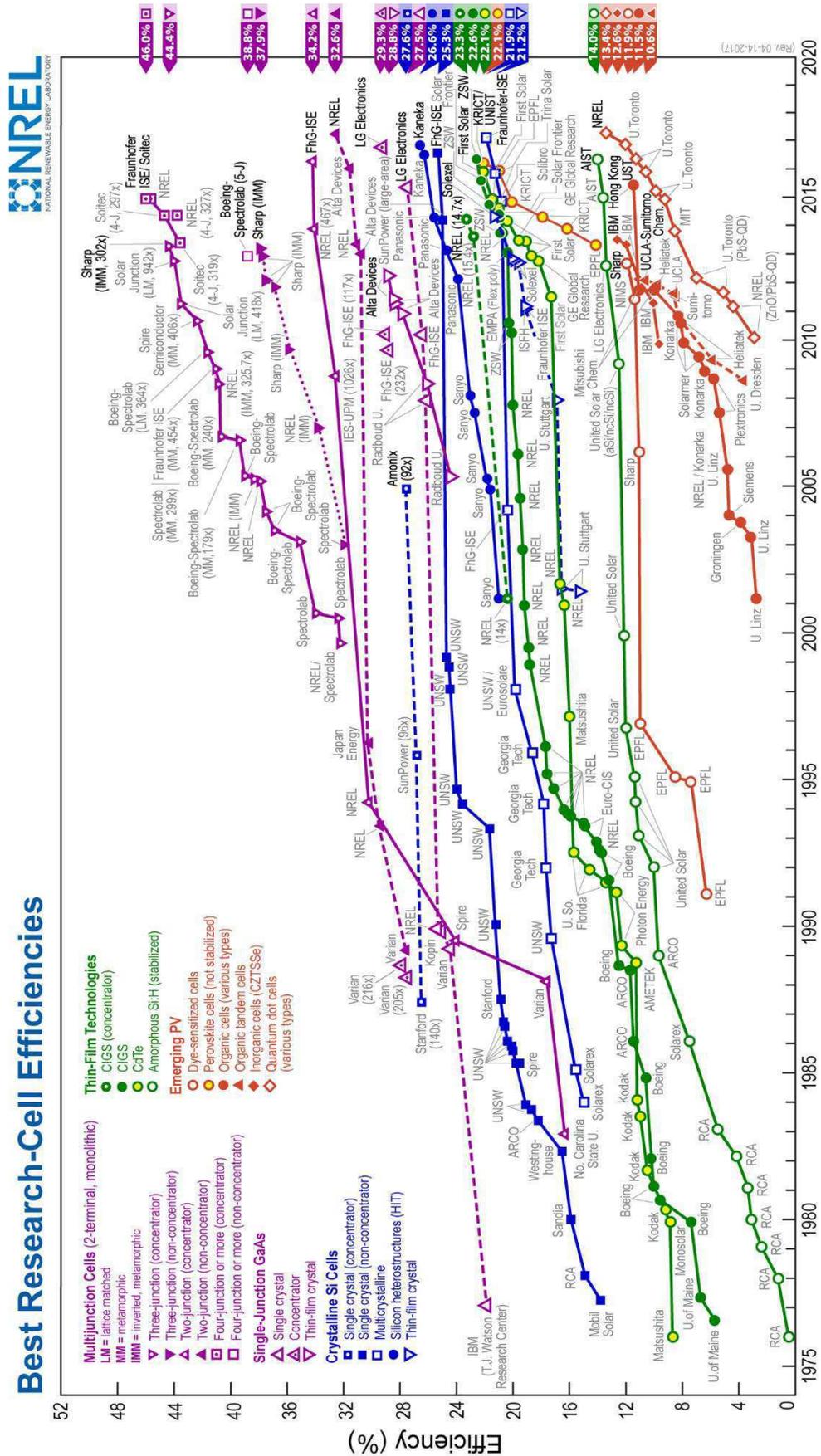
Partindo da análise da Figura 27, pode-se constatar que as células fotovoltaicas de silício cristalino tiveram uma evolução crescente somente até 1994, evoluindo muito pouco desde então. As células de silício monocristalino sempre apresentaram uma eficiência maior em relação aquelas de silício policristalino, obtendo eficiência de 25,3% contra 21,9% da policristalinas. Mesmo não tendo sucesso em sua evolução, a célula de silício monocristalino submetida à concentração alcançou eficiência de 27,6% em 2005.

Já entre as células de películas finas, consta-se que aquelas com maior eficiência são as de CIGS, com 23,3% de rendimento em 2014. As células de CdTe obtiveram uma evolução acentuada desde 2011, alcançando 22,1% de eficiência em 2015. Já as células de silício amorfo apresentaram o menor rendimento dentre as películas finas, com o valor de 14% em 2016.

As células orgânicas não apresentaram evolução em um período de 3 anos, alcançando uma eficiência de 11,5% em 2015 e as células sensibilizadas por corante evoluíram pouco significativamente de 1997 a 2013, alcançando uma eficiência de 11,9%.

Pode-se notar que as células emergentes apresentaram as menores eficiências dentre as células, entretanto mostraram um avanço linear a cada ano.

Figura 27 - Eficiência das células fotovoltaicas



Fonte: (National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2017)

5 CONCLUSÕES

No presente documento foram transmitidas as informações sobre o aproveitamento da irradiação solar através do efeito fotoelétrico para a geração de energia elétrica, abordando os principais tipos de células fotovoltaicas fabricadas atualmente, descrevendo o estado da arte.

Cada uma dessas células apresenta um custo de fabricação, associado à sua respectiva eficiência, o que deve ser ponderado no momento da escolha da tecnologia mais apropriada para determinada aplicação. Células de custo relativamente baixo, como por exemplo, as células de película fina, nem sempre são as mais indicadas, pois apesar da vantagem financeira, apresentam eficiência por metro quadrado menor que as células de alto custo de produção, como o silício, e tendem a se deteriorar muito rapidamente.

Constatou-se, portanto, que as células precisam apresentar alta eficiência de conversão, baixo custo de produção e estabilidade a longo prazo.

Além disso, com a análise dos avanços da tecnologia das células fotovoltaicas ao longo dos anos, pode-se concluir que as pesquisas em desenvolvimento para aprimoramento destas tecnologias são de extrema relevância, para que geração solar fotovoltaica seja viável como forma de energia complementar e alternativa às demais fontes.

BIBLIOGRAFIA

- Castro, R. M. (2002). *Energias Renováveis e Produção Descentralizada - Introdução à energia fotovoltaica*. Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa - Instituto Superior Técnico.
- Cortez, R. J. (2013). *Sistema de Seguimento Solar em Produção de Energia Fotovoltaica*. Porto: Dissertação de mestrado - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Duddu, P. (28 de Julho de 2018). *Power Technology*. Fonte: Site de Power Technology: <https://www.power-technology.com/features/featurethe-worlds-biggest-solar-photovoltaic-cell-manufacturers-4863800/>
- Energia Fotovoltaica: Manual sobre tecnologias, projeto e instalação*. (2004).
- Falcão, V. D. (2005). *Fabricação de células solares de CdS/CdTe*. Rio de Janeiro, Brasil: (Dissertação de mestrado) - Instituto Militar de Engenharia.
- ForUS. (16 de Julho de 2018). Fonte: Fator Solar: Energias Renováveis: <http://fatorsolar.eco.br/conheca-o-silicio-materia-prima-das-placas-fotovoltaicas-e-abundante-no-brasil/>
- Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE. (2018). *Photovoltaics Report*. Freiburg: PSE Conferences & Consulting GmbH.
- Frontin, S. d., Brasil Jr, A. C., Carneiro, M. D., & Godoy, N. D. (2017). *Usina Fotovoltaica Jáiba Solar: Planejamento e Engenharia*. Brasília.
- Glunz, S. W., Preu, R., & Biro, D. (2012). Chapter 1.16: Crystalline Silicon Solar Cells - State-of-the-Art and Future Developments. *Elsevier*.
- Honsberg, C., & Bowden, S. (26 de junho de 2018). *First photovoltaic devices*. Fonte: PV education: <http://pvcadm.pveducation.org/MANUFACT/FIRST.HTM>
- Melo, A. (2 de Julho de 2018). Fonte: Paraíba Solar: Energia Sustentável: <http://www.paraibasolar.com.br/2017/02/23/a-energia-solar-e-a-exploracao-espacial/>
- Melo, T. F. (2014). *Obtenção de uma células solar fotovoltaica baseada em CdS e TiO₂ fotosensibilizada com corante em substrato de vidro com camada condutora*. Fortaleza: Dissertação de mestrado - Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica e de Produção. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
- Morales, O. M. (2011). *Construção e caracterização de células solares de filmes finos de CdS e CdTe*. Ilha Solteira: Dissertação de mestrado – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira.
- National Renewable Energy Laboratory (NREL). (14 de Abril de 2017). *Photovoltaic Research*. Fonte: NREL: <https://www.nrel.gov/pv/assets/images/efficiency-chart.png>
- Passos, F. (5 de Julho de 2018). *Microgeração Fotovoltaica*. Fonte: Microgeração Fotovoltaica: <https://microgeracaoofv.wordpress.com/2016/09/10/as-tecnologias-e-eficiencias-das-celulas-fotovoltaicas/>

Pinho, J. T., & Galdino, M. A. (2014). *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*. Rio de Janeiro: CEPEL - CRESESB.

Portal Solar. (2 de Julho de 2018). Fonte: Portal Solar: <https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/energia-solar/historia-da-energia-solar-como-tudo-comecou.html>

Redação do Site Inovação Tecnológica. (20 de Julho de 2018). *Inovação tecnológica*. Fonte: Inovação tecnológica: <http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=celulas-solares-multijuncao-batem-recordes-eficiencia&id=010115170831#.W1KJpdVKjIU>

Shayani, R. (2006). *Medição do Rendimento Global de um Sistema Fotovoltaico Isolado Utilizando Módulos de 32 Células*. Brasília, DF, Brasil: (Dissertação de mestrado) - Publicação PPGENE.DM-265/06, Departamento de Engenharia Elétrica, Univesidade de Brasília.

Sonai, G. G., Melo Jr, M. A., Nunes, J. H., Megiatto Jr, J. D., & Nogueira, A. F. (2015). Células solares sensibilizadas por corantes naturais: um experimento introdutório sobre energia renovável para alunos de graduação. *Química Nova*.

Sousa, J. M. (2011). *Funcionamento e Aplicação de Células Fotovoltaicas de Terceira Geração*. Coimbra: Dissertação de mestrado - Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Departamento de Engenharia Eletrotécnica.

Statista. (31 de Julho de 2018). *Annual solar module production worldwide 2016*. Fonte: Statista: <https://www.statista.com/statistics/668764/annual-solar-module-manufacturing-globally/>

Vaughan, A. (27 de Julho de 2018). *The Guardian*. Fonte: Site de The Guardian: <https://amp.theguardian.com/environment/2017/mar/07/solar-power-growth-worldwide-us-china-uk-europe>

