
Universidade Federal de Pernambuco
Centro de Tecnologia e Geociências
Departamento de Energia Nuclear



Curso de Graduação:
Engenharia de Energia

Disciplina:
EN248 Projeto de Graduação (TCC)

Responsável pela Disciplina:
Prof. Alexandre Costa

Período:
2022.1

Local e Data:
Recife, 26 de setembro de 2022

Monografia

Título: Comparação entre diferentes tecnologias de módulos fotovoltaicos

Aluno: RAQUEL COSTA PEREZ; Matrícula: 104.459.044-02

Orientador: ANDRÉ FELIPPE VIEIRA DA CUNHA, UFPE/CTG/DEN

Coorientador: RENATA FRANCISCA DA SILVA SANTOS, UFPE/CTG/DEN

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Perez, Raquel Costa.

Comparação entre diferentes tecnologias de módulos fotovoltaicos / Raquel
Costa Perez. - Recife, 2022.
50 : il., tab.

Orientador(a): André Felipe Vieira da Cunha

Coorientador(a): Renata Francisca da Silva Santos

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de
Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia de Energia -
Bacharelado, 2022.

1. Módulos fotovoltaicos. 2. Células de silício. 3. Filmes finos. 4. OPVs. 5.
Energia solar. I. Cunha, André Felipe Vieira da. (Orientação). II. Santos,
Renata Francisca da Silva. (Coorientação). III. Título.

620 CDD (22.ed.)

Dedico este trabalho ao meu falecido avô, Antônio Perez Diaz, por ter me mostrado que mesmo com todas as dificuldades que a vida nos coloca ainda é possível sermos bons. Também à minha família por todo o apoio dado durante a graduação e principalmente na fase final. Em especial a Deus por ter me dado a vida e me guiado por todo o árduo caminho traçado até este momento.

Índice

Resumo	5
Abstract	6
Lista de figuras	8
1. Introdução.....	9
1.1. Objetivos gerais.....	10
1.2. Objetivos específicos	10
2. Revisão Bibliográfica	10
3. Metodologia	11
4. Conceitos Preliminares	12
4.1. Dopagem.....	12
4.2. Junção PN.....	13
5. Fundamentação teórica.....	14
5.1. Primeira Geração – Silício Cristalino	14
5.1.1. Fabricação.....	14
5.1.1.1. Solidificação direcional.....	14
5.1.1.2. Método Czochralski (CZ).....	15
5.1.1.3. Método de Fusão Zonal (FZ)	17
5.1.2. Funcionamento.....	18
5.1.3. Eficiência	19
5.1.4. Mercado atual.....	20
5.2. Segunda Geração – Filmes Finos.....	20
5.2.1. Tipos e suas eficiências	20
5.2.1.1. Telureto de cádmio.....	20
5.2.1.2. Disseleneto de cobre, índio e gálio	21
5.2.1.3. Silício amorfo.....	22
5.2.2. Fabricação.....	22
5.2.2.1. Técnica de sublimação em espaço reduzido (CSS)	23
5.2.2.2. Pulverização catódica	24
5.2.2.3. Eletrodeposição.....	24
5.2.2.4. Deposição por banho químico (CBD)	25
5.2.3. Funcionamento.....	26
5.2.4. Mercado atual.....	27
5.3. Terceira Geração – Células Fotovoltaicas Orgânicas (OPVS).....	27

5.3.1. Funcionamento.....	28
5.3.2. Materiais.....	30
5.3.3. Fabricação.....	30
5.3.3.1. Spin Coating.....	31
5.3.3.2. Revestimento por pulverização.....	32
5.3.3.3. Pintura com pincel.....	32
5.3.3.4. Serigrafia.....	33
5.3.3.5. Jato de tinta.....	35
5.3.3.6. Rotogravura.....	37
5.3.3.7. Flexografia.....	38
5.3.3.8. Revestimento por ponta de faca.....	39
5.3.4. Eficiência e mercado atual.....	39
6. Comparação das tecnologias e resultados.....	40
6.1. Silício Cristalino X OPV.....	40
6.2. Filmes Finos X OPVS.....	41
6.3. Resultados.....	42
7. Conclusões e Perspectivas.....	45
Agradecimentos.....	46
Referências Bibliográficas.....	46

Resumo

Este trabalho tem como objetivo um estudo comparativo das células fotovoltaicas orgânicas com as tecnologias das gerações anteriores de modo a definir a sua utilização e viabilidade no mercado. O trabalho apresenta uma revisão das tecnologias fotovoltaicas, dos materiais utilizados, dos métodos existentes para a construção de cada tipo de célula fotovoltaica, do funcionamento específico para aquela tecnologia além da eficiência e mercado atual. Posteriormente foi realizada uma comparação das tecnologias de módulos orgânicos com os de silício cristalino e então os de filme fino. Chegando à conclusão de que a tecnologia de silício dominará o mercado de grandes usinas pelo tempo vigente por ter uma maior eficiência e tempo de vida, além de possuir um modelo de fabricação mais maduro e bem inserido na indústria mundial, de modo que o seu custo conseguiu ser reduzido. Os módulos orgânicos possuem uma grande prospecção caso tenham a sua eficiência aumentada, pois, se inseridos na produção em grande escala, o seu preço pode ser condensado de maneira a ser competitivo com os de silício.

Palavras-chave: Energia renovável; Energia solar; Filmes finos; OPV; Silício.

Abstract

This work aims at a comparative study of organic photovoltaic cells with the technologies of previous generations to define their use and viability in the market. From a review of the theoretical concepts, the materials used in the manufacture, the existing methods for the construction of each type of photovoltaic cell, the specific operation for that technology were analyzed, in addition to the efficiency, price and current market. Subsequently, a comparison of organic cells with crystalline silicon cells and then thin film cells was performed. Concluding that silicon cells will dominate the market for the time being due to their greater efficiency and lifetime, in addition to having a more mature and well-integrated manufacturing model in the world industry, so that their cost has been reduced. Organic cells have a great prospect if their efficiency is increased, because, if inserted in large-scale production, their price can be condensed to be competitive with silicon ones.

Keywords: OPV; Renewable energy; Solar energy; Silicon; Thin films.

Lista de abreviações e siglas

As₂Te₃ - Tritelureto diarsênico

a-Si – Silício amorfo

B₂H₆ – diborano

BHJ – Heterojunção em massa

CBD – Deposição por banho químico

CdS – sulfeto de cádmio

CdTe – Telureto de Cádmio

CIGS – disseleneto de cobre, índio e gálio

CSS - Técnica de sublimação em espaço reduzido

CZ – Método Czochralski

ETL – Camada transportadora de elétrons

EVA - acetado de vinil etileno

FZ - Método de Fusão Zonal

HTL – Camada transportadora de buracos

ITO – óxido de estanho e índio

Mo - molibdênio

m-Si – Silício monocristalino

OPV – Célula fotovoltaica orgânica

P₃HT - poli (3-hexiltiofeno)

PC₆₀BM - ([6,6]-phenyl-C61-butyrac acid methyl ester)

PC₇₀BM - ([6,6]-phenyl-C71-butyrac acid methyl ester)

PCBM - (Phenyl-C61-butyrac acid methyl ester)

PCBM - éster metílico do ácido [6,6]-fenil-C61-butírico

PCDTBT - poli [N-9'-heptadecanil-2,7-carbazol-alt-5,5-(4',7'-di-2-tienil-2',1',3'-benzotiadiazol)]

PEDOT:PSS - poliestireno sulfonato de poliestireno

PH₃ – fosfina

p-Si – Silício policristalino

PTB₇ - poli[[4,8-bis [(2-etilhexil) oxi] benzo [1,2-b: 4,5-b'] ditiofeno-2,6-diil] [3-fluoro-2-[(2-etilhexil) carbonil] tieno [3,4-b] tiofenodiil]]

PVF - fluoreto de polivinila

SiH₄ – silano

TiOx – óxido de titânio

Wp – Watt-pico

ZnO – óxido de zinco

Lista de figuras

Figura 1. Excesso de lacunas e de elétrons	13
Figura 2. Junção pn, apresentando a direção do campo e as cargas na interfase	13
Figura 3. Sistema de solidificação direcional	15
Figura 4. Esquema da fabricação de lingotes de m-Si pelo método CZ.....	16
Figura 5. Fabricação de lingotes de m-Si pelo método CZ.....	16
Figura 6. Fabricação de lingotes de m-Si pelo método FZ	17
Figura 7. Junção pn do silício.....	18
Figura 8. Esquema de módulo fotovoltaico	19
Figura 9. Célula de CdTe	21
Figura 10. Imagem de uma célula CIGS.....	22
Figura 11. Esquema da câmara de CSS	24
Figura 12. Esquema de uma célula de eletrodeposição.....	25
Figura 13. Esquema da célula CdTe.....	26
Figura 14. Esquema da célula a-Si	27
Figura 15. Esquema de uma OPV de heterojunção planar	28
Figura 16. Esquema de uma OPV de heterojunção em massa.....	28
Figura 17. Esquema de uma OPV de BHJ invertida.....	29
Figura 18. Esquema HOMO e LUMO	29
Figura 19. Esquema da célula tandem – OPV.....	30
Figura 20. Esquema do processo de spin coating	32
Figura 21. Esquema do processo de revestimento por pulverização	32
Figura 22. Esquema do revestimento com pincel	33
Figura 23. Esquema da serigrafia (a) rotativa plana e (b) rotativa cilíndrica	35
Figura 24. Esquema de jato de tinta contínuo.	36
Figura 25. Esquema de jato de tinta gota-a-gota por (a) resistência e(b) material piezoelétrico	37
Figura 26. Esquema da rotogravura	38
Figura 27. Esquema da flexografia	39
Figura 28. Esquema do processo de revestimento por ponta de faca	39
Figura 30. Eficiências dos diferentes módulos.....	42
Figura 31. Tempo de vida em anos das tecnologias existentes	43
Figura 32. Quantidade de métodos de fabricação	44

1. Introdução

As células fotovoltaicas orgânicas são a tecnologia emergente dentro do ramo da geração de energia solar e a sua utilização possui diversas vantagens já que são feitas de um material barato, reciclável e menos exigente em termos energéticos, porém apresentam uma baixa eficiência a qual será explicada durante o desenvolvimento deste trabalho.

Atualmente, a busca por um tipo de geração que cause menos danos ao meio ambiente é o guia para várias nações, porém este também deve ser economicamente viável. As fontes mais utilizadas mundialmente necessitam de um alto custo de implantação e manutenção, além de alguns tipos aumentarem a pegada de carbono do país (ROSA; GASPARIN, 2016).

Além de ser uma fonte renovável e sem emissão de poluentes a geração de energia através de sistemas fotovoltaicos necessita de baixa manutenção e pode produzir localmente, o que facilita a obtenção de energia elétrica em locais mais remotos e de difícil acesso (JOHNINSON; IMHOFF, 2007).

A maior desvantagem da utilização da fotovoltaica é referente ao material utilizado por elas. Cerca de 90% do mercado mundial utiliza as células de silício cristalino (ARAÚJO et al., 2018), porém estas são fabricadas utilizando uma matéria prima não renovável, o qual o descarte ainda não foi bem estudado, acarretando mais de 250 mil toneladas de resíduos de silício (“O que acontece com um painel solar quando termina sua vida útil?”, 2020).

Portanto, no presente estudo, serão abordadas as diferentes tecnologias existentes para a geração de energia solar fotovoltaica com diferentes materiais, tendo ênfase na tecnologia de módulos fotovoltaicos orgânicos (OPV), já que estes possuem matéria prima reciclável, além de necessitar menos energia durante a sua fabricação.

Nesta monografia, na seção dos conceitos preliminares são explicados alguns detalhes fundamentais para a compreensão do funcionamento das células fotovoltaicas. Já na seção de fundamentação teórica serão abordados, para cada geração de tecnologia, os materiais, modos de fabricação, funcionamento, eficiência e atuação no mercado atual. Na revisão bibliográfica são discutidas as conclusões de alguns autores e estudiosos dessa área de geração fotovoltaica. Na metodologia é explicado com detalhes qual a abordagem utilizada nesta monografia. No desenvolvimento foi realizado a comparação entre a tecnologia OPV e as outras gerações de modo que na seção de conclusão é apresentada apenas uma síntese das descobertas anteriores.

1.1. Objetivos gerais

O objetivo principal deste trabalho é entender de maneira comparativa a diferença entre as células orgânicas e as de silício e filmes finos bem como a razão pela qual esta nova tecnologia ainda é tão pouco utilizada.

1.2. Objetivos específicos

Realizar duas comparações entre as tecnologias antigas e a terceira geração através dos seguintes tópicos:

- Materiais;
- Fabricação;
- Funcionamento;
- Eficiência;
- Mercado atual.

2. Revisão Bibliográfica

É a partir da energia solar que se dá a origem do ciclo das águas, o que possibilita o represamento e conseqüente geração de hidroeletricidade (PINHO; GALDINO, 2017). Como escrito por Davies, Frisso e Brandão (2018), a fonte principal de energia na matriz energética brasileira é a hídrica, mas esta é influenciada pelo Sol, parte responsável pelos períodos de seca nos quais a geração fotovoltaica aumenta. Outra vantagem da utilização da geração solar é que ela pode ser instalada em locais eletricamente isolados e, portanto, possui um papel fundamental no cenário energético brasileiro. Porém, a sua aplicação ainda não é grandiosa devido ao nosso nível de desenvolvimento tecnológico. O Brasil possui uma das maiores reservas de silício mundial, mas não investe nas ferramentas necessárias para o seu processamento.

Devido ao crescente interesse na geração de energia através do sol, segundo Monteiro (2016), novas pesquisas vêm se desenvolvendo de modo a otimizar e diversificar os dispositivos fotovoltaicos. Entretanto, mesmo com a evolução das novas tecnologias, as células de silício cristalino continuam sendo as mais utilizadas mundialmente, devido a sua abundância na natureza e alta eficiência, além do seu baixo valor comercial e acessibilidade, como dito por Machado (2018). Porém, de acordo com Cremasco et al. (2021), mesmo com as tecnologias já existentes no mercado, as novas continuam a se desenvolver e possuem grandes chances de serem utilizadas no mercado.

Ainda segundo Monteiro (2016), as células de maior eficiência são as de m-Si fabricadas pelo método de Fusão Zonal pois possuem um menor índice de contaminação, mas os outros tipos de silício cristalino ainda são importantes no mercado em função do seu menor custo.

Outro fato importante citado por Araújo et al. (2018) é que quanto maior é a potência da célula por unidade de área, maior é a sua eficiência. A maior potência estudada foi de 432W que possui uma eficiência de 20% sendo fabricada de silício monocristalino. Em dados obtidos pelo INMETRO, Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, 74% das células solares produzidas nacionalmente são de p-Si (ARAÚJO et al., 2018).

Agora sobre as células de filmes finos, um dos métodos de fabricação mais viável é de fabricação pulverização catódica, de acordo com Machuno et al. (2016) que determinaram que os custos da construção dos equipamentos necessários não são elevados e não precisam mais do que usualmente existe em laboratórios de pesquisa em materiais.

Já as OPVs, de acordo com Donato Lourenço Júnior et al. (2020), se destacam por oferecer uma fonte de energia limpa e renovável que pode ser facilmente integrada à arquitetura urbana. Outro fato que ajuda na propagação desta tecnologia é que elas podem ser produzidas através do processo rolo a rolo, como escrito por Søndergaard et al. (2012) e Wei, Che e Hwa (2012), porém, para os autores o tempo de vida das células, os processos que as permitem de serem impressas semitransparentes e a sua eficiência devem melhorar de modo que elas sejam colocadas no mercado de maneira notável. Assim como dito por Machado (2018), os custos que envolvem a construção das OPVs tender a se reduzir e a sua eficiência é destinada a subir.

Conclui-se então que mesmo com o atual domínio das células de silício no mercado de geração fotovoltaica, há um crescente interesse nas células orgânicas devido as suas aplicações diversas, como as de filmes finos, porém com uma prospecção de menor custo de matéria prima por se tratar de polímeros fabricáveis e não substâncias que devem ser mineradas.

3. Metodologia

No presente trabalho foi realizada uma comparação das tecnologias de módulos fotovoltaicos presentes no mercado de maneira a compreender as suas utilizações no panorama comercial atual, tendo como ênfase a análise da tecnologia orgânica por ser uma das mais recentes no mercado.

Toda a dissertação foi produzida teoricamente, através de uma revisão bibliográfica e a análise foi realizada de maneira qualitativa, utilizando as informações obtidas por meio da revisão de estudos atuais, tendo em vista que a cada ano, novos avanços no setor fotovoltaico acontecem, principalmente quando se trata da eficiência das células.

As comparações foram feitas em etapas, levando em consideração as vantagens e desvantagens de cada tecnologia em cada tópico abordado. Começando pelos materiais responsáveis pela constituição das placas, depois os métodos de fabricação existentes e o funcionamento de cada tipo de célula. Com isso também foram analisadas a eficiência e o mercado atual para cada equipamento.

Por fim, gráficos foram construídos com os valores obtidos durante a pesquisa, de modo a gerar uma maior compreensão do que foi abordado, assim como uma tabela de visão geral, trazendo em três colunas, as principais diferenças entre as tecnologias.

4. Conceitos Preliminares

4.1. Dopagem

De maneira a facilitar a ocorrência do efeito fotovoltaico (transferência de energia da luz para os elétrons da camada de valência ocasionando na mudança deles para a camada de condução) nos materiais é realizado um processo conhecido como dopagem, que se trata da inserção proposital de impurezas na estrutura do sólido. As unidades estruturais do retículo cristalino são substituídas por unidades de impurezas. Este procedimento resulta em uma diminuição da energia da banda gap, ou seja, uma redução da função trabalho. Este procedimento é utilizado em materiais isolantes ou semicondutores para aumentar a condutividade do material (BENVENUTTI, 2011).

A dopagem produz dois tipos de semicondutores conhecidos como semicondutor tipo n e semicondutor tipo p. No primeiro caso, o dopante apresenta mais elétrons na camada de valência que o material original, gerando assim, um acúmulo de cargas negativas transformando este em um doador de elétrons. Já no tipo p, o dopante possui menos elétrons na valência que o material de origem ocasionando um excesso de lacunas, ou “buracos”, como exemplificado na Figura 1. Em ambos os casos, ocorre uma diminuição do gap de energia. (BENVENUTTI, 211).

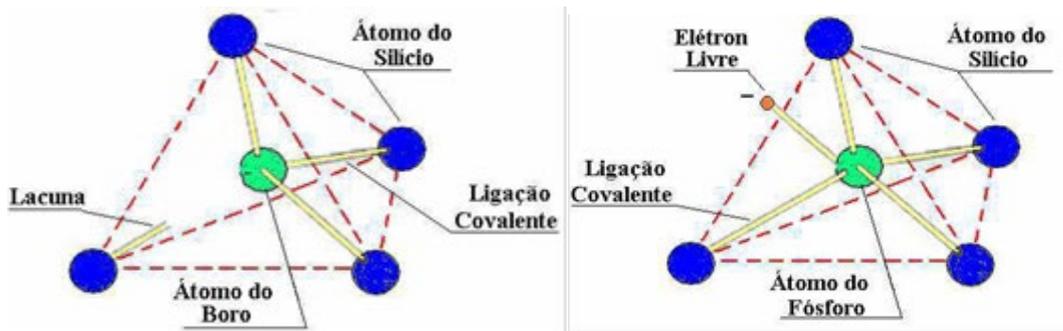


Figura 1. Excesso de lacunas e de elétrons (fonte: Ghensev, 2006).

4.2. Junção PN

Na célula fotovoltaica é utilizada a junção pn, que nada mais é do que um semiconductor tipo p em contato com um semiconductor do tipo n. Quando estes materiais entram em contato, os elétrons começam a deslocar-se do n para o p, e assim, geram um acúmulo de cargas negativas na interface tipo p e de cargas positivas no tipo n (TOMA, 2004). Portanto, devido ao movimento de elétrons do lado n para o p e dos buracos da interface p para n é gerada uma carga especial nos dois lados da junção. Estas duas situações criam uma zona de depleção que não contém cargas móveis, pois a formação desta carga origina uma diferença de potencial entre as extremidades da zona que impede o tráfego de lacunas e elétrons (HALLIDAY, 2012). Este acontecimento é ilustrado na Figura 2.

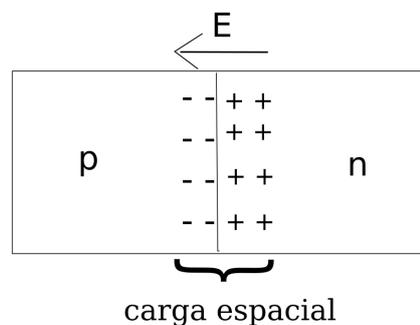


Figura 2. Junção pn, apresentando a direção do campo e as cargas na interfase (fonte: BERNARDO, 2021).

Quando a junção é iluminada a energia gerada pelos fótons pode excitar os elétrons de um nível de energia inferior para um superior gerando assim uma lacuna no nível mais baixo de energia. Este processo gera um par elétron-buraco e é através da ocorrência destes que é possível gerar energia quando se há um condutor que liga externamente os semicondutores do tipo p e n.

5. Fundamentação teórica

De modo a ser realizada a comparação entre as tecnologias de módulos fotovoltaicos existentes, deve-se entender as principais características de cada uma. Os módulos são divididos por gerações que possuem como critério a matéria prima utilizada (ELDIN; REFAEY; FARGHLY, 2015).

5.1. Primeira Geração – Silício Cristalino

A primeira geração de células fotovoltaicas trata-se das que possuem o silício cristalino como sua matéria prima. Existem dois tipos de células provenientes deste material que são as de Silício Policristalino (p-Si) e Silício Monocristalino (m-Si).

Com base nas discussões entre a autora e os orientadores, foi observado que a essência da diferença entre esses dois modelos é referente à sua estrutura cristalina. O m-Si possui um retículo cristalino de ordem contínua, portanto, não possui contornos de grão, sendo assim, possui uma maior eficiência, mas sua fabricação é mais delicada e gasta mais energia. Já o p-Si possui vários contornos de grãos, que são considerados defeitos na estrutura cristalográfica, o que dificulta a passagem da luz já que há diferentes ângulos internos, como se fossem diversos cristais interligados, gerando uma menor eficiência, mas tem um processo de fabricação mais barato.

5.1.1. Fabricação

5.1.1.1. Solidificação direcional

Para que o p-Si seja fabricado é realizado um processo de solidificação direcional para que assim seja garantido o crescimento do lingote de Silício policristalino uniforme. A estrutura deste processo necessita cadinhos de fundição envoltos por bobinas de indução eletromagnéticas que tem como objetivo derreter o silício (GHENSEV, 2006).

Na Figura 3 é mostrado um sistema de solidificação direcional. No cadinho de fundição, o silício sólido é colocado e vai sendo derretido pelo calor gerado pelas bobinas eletromagnéticas de modo que aos poucos é derramado no cadinho de crescimento. No cadinho de crescimento a temperatura é mais amena e vai variando em seu comprimento de acordo com a solidificação do lingote multicristalino. O calor para este cadinho também é fornecido pelas bobinas. A isolação térmica permite que o calor entre, mas não saia de modo a manter o sistema em altas temperaturas (GHENSEV, 2006).

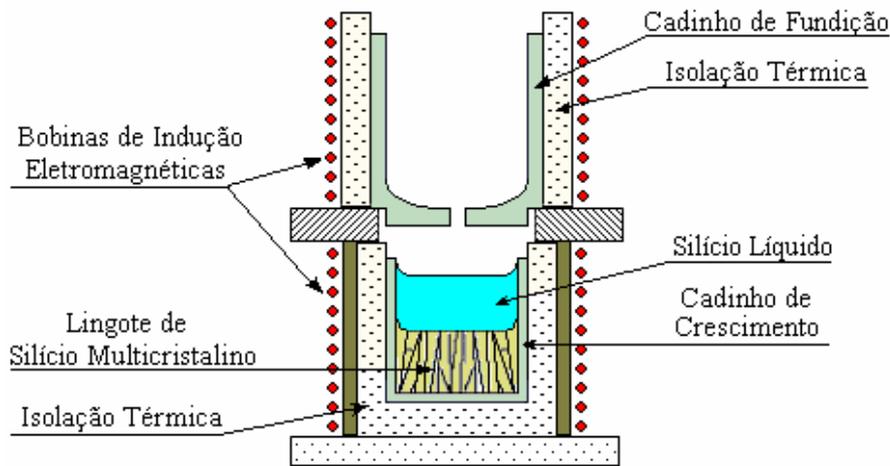


Figura 3. Sistema de solidificação direcional (Ghensev, 2006).

5.1.1.2. Método Czochralski (CZ)

Este método é o mais utilizado na fabricação do Silício Monocristalino sendo aplicado em 90% dos casos e funciona da seguinte maneira: o polisilício (matéria prima) é colocado em um cadinho onde será fundido em temperaturas elevadas de 1500°C em uma câmara de gás inerte. Durante o processo de derretimento, um cristal Monocristalino é adicionado através de um eixo rotacional dentro do cadinho e levantada em uma velocidade na ordem dos cm/hora, de acordo com Ghensev (2006). Então, à medida que o cristal vai se movendo, o polisilício existente vai se cristalizando entorno dele e assim criando um lingote com orientação cristalina semelhante à semente. Durante este processo podem ser acrescentada as impurezas dopantes, normalmente tipo p, controlando a quantidade conforme o necessário (GHENSEV, 2006).

O esquema deste processo pode ser visto na Figura 4, onde é possível identificar o cadinho, onde se encontra a matéria prima, que é cercado por um aquecedor responsável por derreter o p-Si. É termicamente isolado pela armadura aquecida. Abaixo do cadinho há um suporte e uma bandeja rotativa que fornece o movimento necessário para a criação do lingote monocristalino que segue a orientação da semente inserida pela parte superior do sistema como ilustrado (PINHO; GALDINO, 2014).

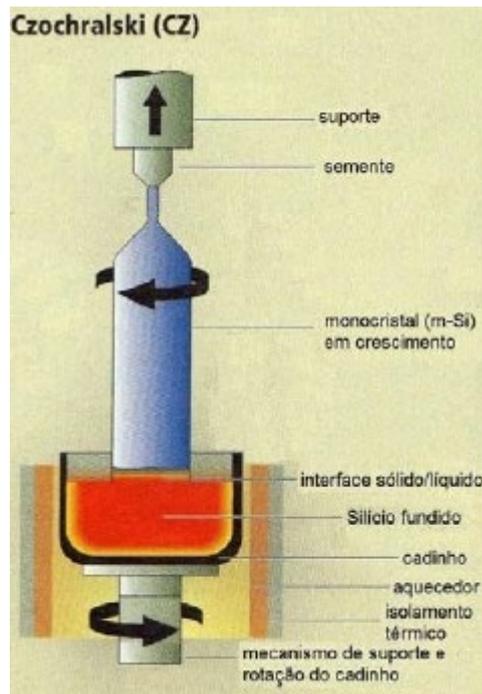


Figura 4. Esquema da fabricação de lingotes de m-Si pelo método CZ (fonte: Pinho e Galdino, 2014)

Já na Figura 5 é detalhado em imagens o passo a passo da criação do lingote monocristalino. Inicialmente o silício é derretido e então a semente é introduzida. Com isso inicia-se o crescimento do cristal até que este chegue no tamanho adequado do lingote (MACHADO. MIRANDA, 2014).

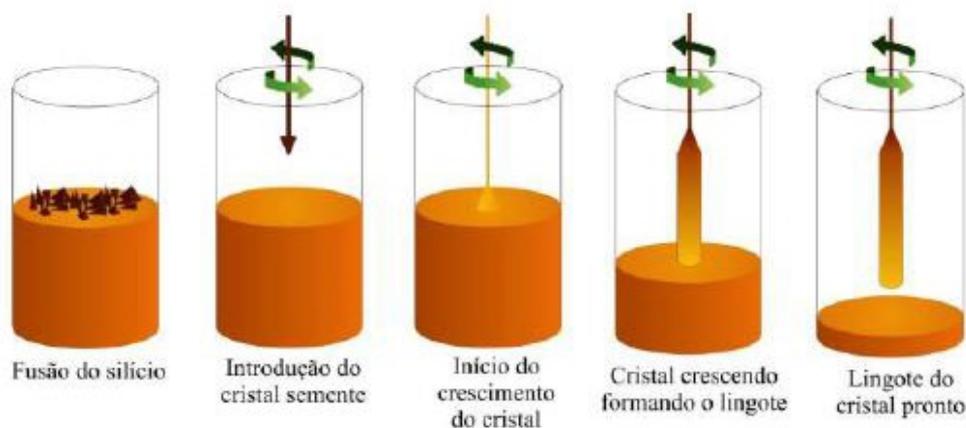


Figura 5. Fabricação de lingotes de m-Si pelo método CZ (Machado; Miranda, 2014)

de contaminação do Silício. Como resultado obtém-se um m-Si mais puro do que o produzido através do CZ e, portanto, com uma maior eficiência, além disso, este método fornece a capacidade de produzir uma maior quantidade de material por unidade de tempo (GHENSEV, 2006).

5.1.2. Funcionamento

Para que haja a junção pn o silício deve ser dopado como explicado anteriormente. Com a finalidade de gerar o semiconductor tipo p, o boro é inserido na rede cristalina do Si pois possui apenas três elétrons na camada de valência, enquanto o silício possui quatro, gerando assim um excesso de buracos. Já para o tipo n é necessário a dopagem com o fósforo já que este possui cinco elétrons na valência acarretando uma sobra deles (MACHADO; MIRANDA, 2014).

Quando o silício tipo p é unido com o silício normal, essa parte é submetida a uma difusão de fósforo em altas temperaturas (800°C a 950°C) e com isso é formada a junção pn (PINHO; GALDINO, 2014), que possui um campo elétrico permanente, como mostrado na Figura 7. No momento em que for exposto à luz, os elétrons em excesso, que estão fracamente ligados ao seu átomo de origem, ficam mais energéticos sendo capazes de gerar uma corrente através da junção que pode ser aproveitada com a colocação de filamentos condutores conectados em cada lado da célula, assim fechando o circuito. Com isso, a energia elétrica gerada pode ser aproveitada (MACHADO; MIRANDA, 2014).

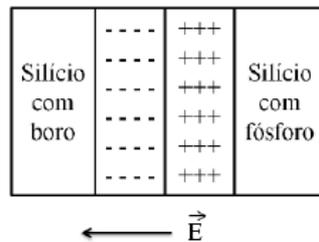


Figura 7. Junção pn do silício (adaptado de GUIMARÃES et al., 1999).

De modo a fazer o uso comercial dessas células, elas devem ser conectadas em série através dos filamentos condutores e então encapsuladas em folhas de EVA (acetado de vinil etileno) para, por fim, receberem uma cobertura frontal de vidro temperado e um filme de PVF (fluoreto de polivinila) na parte posterior, ilustrado na Figura 8 (MACHADO; MIRANDA, 2014).

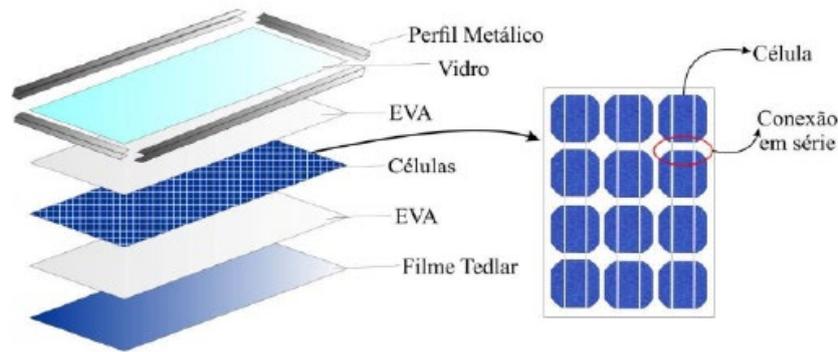


Figura 8. Esquema de módulo fotovoltaico (fonte: MACHADO; MIRANDA, 2014)

5.1.3. Eficiência

A maior diferença da eficiência entre os silícios mono e policristalinos recai justamente nas suas distintas organizações cristalográficas. No m-Si não existe nenhum contorno de grão, sendo assim, não há dificuldades para os elétrons se deslocarem dentro do material. Com isso, a resistência é menor fazendo com que a corrente gerada seja maior. Já no p-Si vários cristais são formados em seu interior, o que acarreta um maior número de contornos de grãos que agem como uma barreira para os elétrons sendo necessária uma maior quantidade de energia para que estes consigam se mover pelo material. Portanto, o m-Si possui uma maior eficiência quando comparado com o p-Si (TORRES et al., 2019).

Outro detalhe que influencia diretamente na eficiência das células é a espessura da lâmina, ou seja, quanto mais grossa for maior será a perda por recombinação. Porém, se tiverem uma espessura muito pequena a eficiência também é comprometida em função do coeficiente de absorção óptica do material (PINHO; GALDINO, 2014).

Devido a degradação média dos módulos dessa geração, que são de 0,5% a 1% por ano, tipicamente é garantido pelos fabricantes uma potência de pico mínima de 90% da potência nominal durante os primeiros 12 anos e de 80% por um período de 25 anos. Estas porcentagens sofrem leves variações dependendo o fabricante (PINHO; GALDINO, 2014).

A eficiência média obtida das células fotovoltaicas de silício monocristalino produzido pelo método CZ é de 16,5%, já pelo método FZ é de 24,2% (PINHO; GALDINO, 2014). Enquanto para o silício policristalino a média da eficiência é de 17% em produção industrial (ELDIN; REFAEY; FARGHLY, 2015).

5.1.4. Mercado atual

O Brasil é um país rico em recursos naturais e, portanto, não fica deslocado em relação à produção de silício no cenário mundial. O país possui uma das maiores reservas de silício de alta qualidade do mundo, o que o fez ser responsável por 8% da produção mundial deste material em condições metalúrgicas (CARVALHO, MESQUITA, ROCIO, 2014). Porém o custo dos seus módulos continua elevados em função da falta de investimento e interesse na produção local das placas fotovoltaicas (DAVIES, 2018).

Atualmente as células de silício cristalino representam cerca de 87% do mercado por possuírem uma tecnologia mais consolidada e com uma alta eficiência (PINHO; GALDINO, 2014).

Entretanto, apesar de saberem como fazer, não há interesse em realizar o descarte correto destas células, já que são painéis de grande porte e mesmo que haja alguns materiais em sua composição que possam ser reciclados, estes estão incorporados no módulo fazendo com que a sua extração seja difícil e exigindo um trabalho especializado. Para que este processo seja realizado da maneira correta, a célula deve ser submetida a uma temperatura de 500°C para separar o silício dos materiais pesados, e com isso, reutilizado com uma taxa de reaproveitamento de 85% (OLSEN, 2020). Contudo, é um procedimento caro que faz com que não seja atrativo comercialmente.

5.2. Segunda Geração – Filmes Finos

As células fotovoltaicas de filme finos são a segunda geração de módulos fotovoltaicos no mercado e são denominadas desta maneira por serem fabricadas utilizando apenas uma fina camada de material, cerca de 100 vezes menor que as lâminas de silício cristalino (BÜHLER; SANTOS; GABE, 2018) em um substrato que pode ser de diversos materiais, inclusive de polímeros flexíveis.

5.2.1. Tipos e suas eficiências

Os três principais tipos de filmes finos são o Telureto de Cadmio (CdTe), disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS) e silício amorfo (a-Si).

5.2.1.1. Telureto de cádmio

Segundo Bühler, Santos e Gabe (2018) as células formadas pelo CdTe possuem um alto nível de absorvidade ótica que podem ser fabricadas com uma eficiência próximas às de p-Si, porém utilizando apenas 1% a 2% do material.

Este tipo de módulo quando expostos a luz apresenta um efeito conhecido como light soaking, que é um aumento na eficiência de conversão. Esta ação ocorre após um tempo determinado de exposição à radiação solar a qual depende da maneira que a célula foi fabricada (BÜHLER; SANTOS; GABE, 2018).

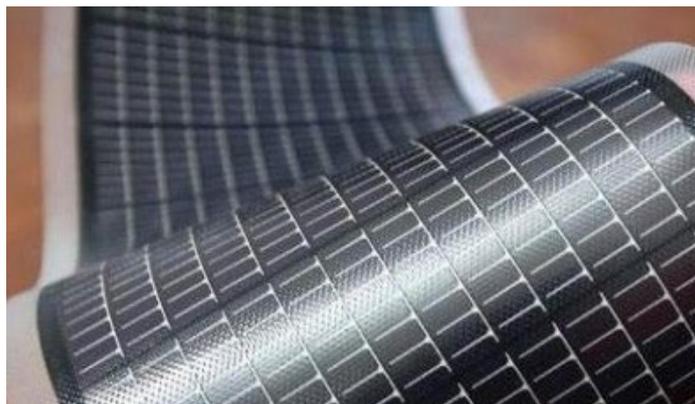


Figura 9. Célula de CdTe (fonte: <https://petronoticias.com.br/tag/telureto-de-cadmio/>)

Uma das desvantagens deste tipo de célula é que o seu material é bem menos abundante que o silício (CREMASCO, 2021). Porém, possui uma boa eficiência, como citado por Green et al., 2017, que chegou a 21% comercialmente.

5.2.1.2. Disseleneto de cobre, índio e gálio

Esta célula tem uma forma multicristalina com poder de absorver cerca de 90% dos fótons incidentes que tenham energia superior a 1 eV para uma espessura de 1 μm a 3 μm , ou seja, possui alto coeficiente de absorção (BÜHLER; SANTOS; GABE, 2018).

O CIGS possui uma grande resistência ao calor, indispensável para a aplicação no espaço, além de ser visivelmente atrativa por ser de uma cor sólida, como pode ser observado na Figura 10, assim como a CdTe. Ela pode ser produzida semitransparente, o que possibilita a sua incorporação a construções civis (BÜHLER; SANTOS; GABE, 2018).



Figura 10. Imagem de uma célula CIGS (fonte: MACHADO, 2018).

Outros fatos em comum que este tipo de célula tem com a CdTe é que os seus componentes são mais escassos que o silício e que também há a ocorrência do light soaking (BÜHLER; SANTOS; GABE, 2018). Ainda assim, possui uma alta eficiência que chegou ao nível de 21,7% comercialmente (GREEN et al., 2017).

5.2.1.3. Silício amorfo

Neste caso o silício não possui nenhuma organização cristalográfica e devido a isto muitas ligações ficam pendentes gerando lacunas que podem se recombinar com elétrons livres prejudicando o rendimento da célula. Então, de modo a diminuir este problema o a-Si passa por um processo denominado de hidrogenação que permite com que essas ligações pendentes sejam ocupadas e assim os elétrons livres consigam circular pelo material sem interações indesejadas (MACHADO; MIRANDA, 2014).

Um aspecto negativo desse tipo de material é que durante os primeiros meses de funcionamento ocorre o efeito Staebler-Wronski que diminui a sua eficiência em até 35% (MACHADO; MIRANDA, 2014). Porém, nestas células também pode ocorrer o recozimento térmico, que é quando parte da degradação causada por este efeito é revertida após exposição a temperaturas um pouco elevadas, que podem ser atingidas através da irradiação solar. Devido a este último acontecimento, a eficiência pode aumentar em até 20% durante os meses mais quentes do ano (BÜHLER; SANTOS; GABE, 2018).

Como analisado por Green et al. (2017) a eficiência desses módulos no mercado varia de 5% a 8% em que o recorde mundial foi de 10,2% na fabricação comercial.

5.2.2. Fabricação

Os filmes finos podem ser depositados no substrato de diversas maneiras, mas todas elas exigem menos material e conseqüentemente um alto potencial para redução de custos

(BÜHLER; SANTOS; GABE, 2018). Nesta sessão serão tratadas as práticas mais comuns quando se referem à fabricação de células fotovoltaicas.

5.2.2.1. Técnica de sublimação em espaço reduzido (CSS)

Neste método é possível realizar todo o processo sem retirar o substrato da linha de produção, o que leva a uma diminuição dos riscos de contaminação e assim um aumento da eficiência, além de facilitar a implementação deste processo em uma linha de produção industrial (FALCÃO, 2005).

No caso desta técnica, espaçadores de quartzo são utilizados para manter uma pequena distância entre a fonte e o substrato e dois blocos de grafite servem de suporte e regularizadores de temperatura. O aquecimento é realizado através de lâmpadas de luz infravermelha ou visível e o monitoramento é realizado por um conjunto de termopares nos blocos. A diferença de temperatura é essencial no mecanismo de transporte por difusão (ANTHONY et al., 1984).

O material da fonte deve ser aquecido até se tornar vapor para que assim consiga se difundir e condensar sobre o substrato que deve ser mantido em uma temperatura menor do que a da fonte. Este processo permite que os dopantes sejam inseridos ainda na fase gasosa o que facilita a produção das células fotovoltaicas (FALCÃO, 2005).

Um esquema da câmara de CSS, visto lateralmente, pode ser observado na Figura 11. Os aquecedores do substrato sofrem um aumento de temperatura através de lâmpadas halógenas, que ficam na parte superior do sistema e por isso não são mostradas no esquema, onde passam o calor para as placas de aço que transmitem para os blocos de grafite que irão uniformizar a transferência de calor. O suporte de quartzo tem como função manter a distância entre a fonte e o substrato. Os termopares estão conectados às placas de grafite de modo a verificarem a temperatura e enviam os sinais para as lâmpadas de modo que elas sempre mantenham o sistema na temperatura ideal. A bomba mecânica, que permite a entrada de água, e a entrada de gás são métodos refrigeração do sistema (GONÇALVES et al., 2009)

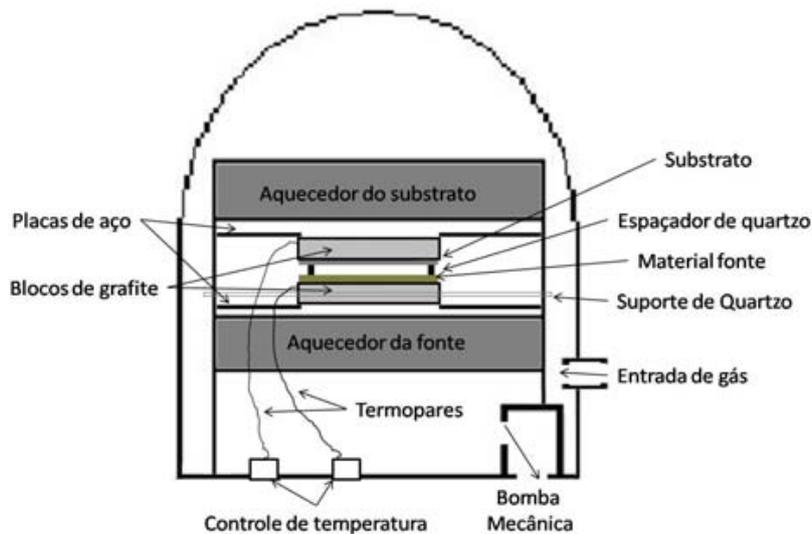


Figura 11. Esquema da câmara de CSS (fonte: Gonçalves et al., 2009).

5.2.2.2. Pulverização catódica

Este processo se utiliza de colisões mecânicas entre o íon incidente, que possui grande energia cinética, e o átomo do material alvo. De maneira a garantir que os íons irão entrar em contato com o alvo, ele é submetido a um potencial elétrico negativo. A interação dos dois deve gerar o fenômeno conhecido como sputtering que nada mais é do que a ejeção dos átomos do alvo (MACHUNO et al., 2016).

A pulverização deve acontecer no vácuo onde os átomos que saíram do alvo chegam ao substrato e se espalham pela superfície formando pequenas ilhas que crescem e coalescem tocando umas nas outras. Com isso, o filme fino vai se formando de maneira homogênea à medida que o material vai chegando ao substrato. Este processo não gera efeitos térmicos significativos e, portanto, ocorre em temperaturas próximas à ambiente (MACHUNO et al., 2016).

Para que um sistema de pulverização catódica seja construído alguns dispositivos são essenciais, sendo eles: o sistema de vácuo e a fonte de alta tensão responsável por gerar os íons que colidirão com o material alvo (MACHUNO et al., 2016).

5.2.2.3. Eletrodeposição

A eletrodeposição é definida como um processo de deposição de um filme em um substrato utilizando a corrente elétrica e se embasa no processo de eletrólise (DAVID, 2011).

O ânodo, ligado ao polo positivo, deve ser do material que será depositado no substrato, o qual deve ser ligado ao polo negativo. O resultado é um filme fino no cátodo, que pode ser cristalino ou amorfo, metálico ou não (DAVID, 2011).

Um dos fatores determinantes deste processo é o tipo de corrente, já que uma maior aderência foi observada através de correntes alternadas quando comparada com corrente contínua. Além disso, o substrato deve ser resistente tendo em vista que o hidrogênio presente na pilha pode levar a uma fragilização dele (DAVID, 2011).

Na Figura 12 é ilustrado uma célula de eletrodeposição onde o ânodo sofre decomposição devido à saída de elétrons que são guiados para o cátodo de modo que sejam depositados em sua superfície formando um filme fino ao seu redor (DAVID, 2011).

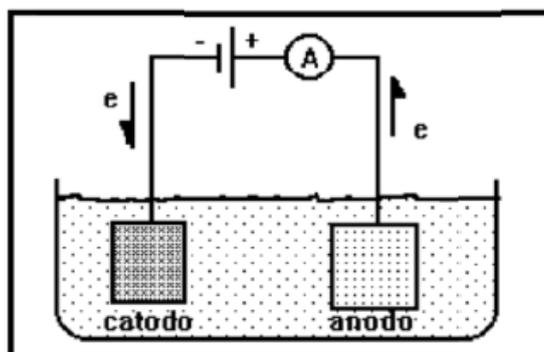


Figura 12. Esquema de uma célula de eletrodeposição (fonte: DAVID, 2011).

5.2.2.4. Deposição por banho químico (CBD)

Esta técnica foi inicialmente utilizada para a produção de fotodetectores de infravermelho, mas com o passar do tempo tem sido utilizada para depositar diversos outros tipos de materiais e atualmente tem chamado a atenção por ser um método promissor no setor fotovoltaico (NEVES, 2013).

O processo CBD consiste na manipulação da concentração e precipitação dos íons disponíveis na solução que irão reagir entre si. Por se tratar de uma precipitação de reagentes o processo é bem delicado pois precisa ser bem controlado de modo que a fabricação de uma célula eficiente seja realizada (NEVES, 2013).

O crescimento dos filmes se dá através da reação dos íons a serem depositados com o substrato e se houver um excesso de íons pode haver a formação de alguns precipitados coloidais na solução o que não contribui para a formação dos filmes finos e, portanto, devem ser evitadas (NEVES, 2013).

5.2.3. Funcionamento

As CdTe são compostas por filmes sobrepostos que formam uma heterojunção composta pelas camadas denominadas de janela (tipo n) e absorvedor (tipo p). A primeira camada permite que a luz passe pois possui um grande gap de energia e assim a luz é transmitida para dentro da camada absorvente onde ocorre o efeito fotovoltaico. Sendo assim, não há recombinações excessivas de elétron-buraco. A camada janela normalmente é composta por sulfeto de cádmio (CdS) enquanto a absorvente é a CdTe (MACHADO; MIRANDA, 2014). Uma ilustração desse tipo de célula pode ser observada na Figura 13.

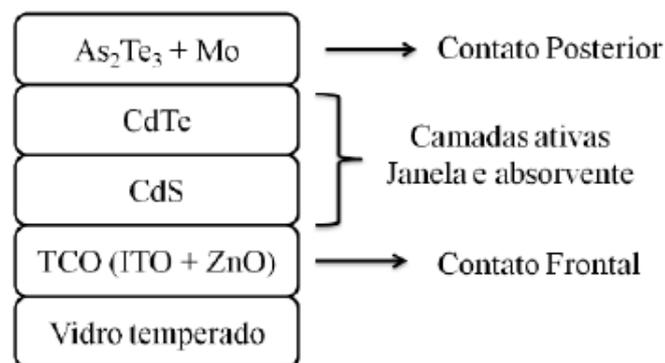


Figura 13. Esquema da célula CdTe (fonte: MACHADO; MIRANDA, 2014).

As células CIGS funcionam de maneira igual às de CdTe, possuem uma camada janela e uma absorvedora, a única diferença são os materiais em sua composição (MACHADO; MIRANDA, 2014).

Diferente dos casos anteriores o a-Si precisa ser dopado para que a junção pn ocorra, dessa maneira, para a obtenção do semiconductor tipo p a dopagem é realizada através da solução SiH_4 com 1% de P_3HT enquanto para o tipo n se tem o silano com 1% de PH_3 (MACHADO; MIRANDA, 2014). A estrutura do a-Si pode ser observada na Figura 14.

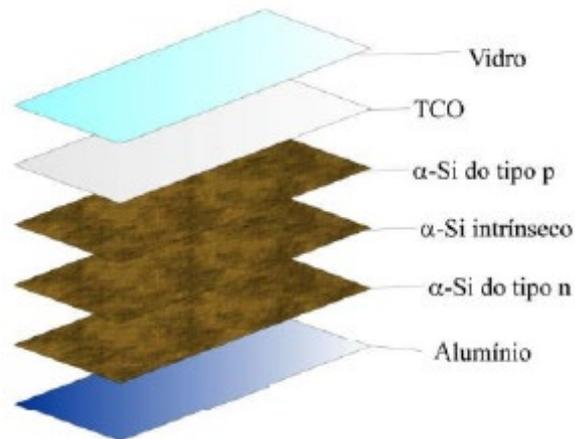


Figura 14. Esquema da célula a-Si (fonte: MACHADO; MIRANDA, 2014).

5.2.4. Mercado atual

A tecnologia de filmes finos possui uma capacidade potencial de reduzir os custos da fabricação das células fotovoltaicas por consumir bem menos material na sua fabricação. Contudo, até agora, mesmo com uma diminuição dos custos não houve um crescimento significativo na utilização destes módulos, pois também houve uma atenuação no preço das células de primeira geração, além destas já terem uma maior maturidade e eficiência (BÜHLER; SANTOS; GABE, 2018).

A maior utilização dos filmes finos atualmente é em projetos arquitetônicos devido à sua beleza e semitransparência (BÜHLER; SANTOS; GABE, 2018) e versatilidade já que pode ser colocado em diferentes tipos de substratos como abordado anteriormente.

Além do que, este tipo de célula pode ser quase totalmente reciclado através do processo de trituração e separação das partes líquidas e sólidas. Após esse procedimento cerca de 90% do vidro pode ser reciclado e 95% do material semicondutor pode ser reutilizado (OLSEN, 2020).

5.3. Terceira Geração – Células Fotovoltaicas Orgânicas (OPVS)

As OPVs podem ser consideradas como a principal alternativa para a geração de eletricidade devido às vantagens ambientais que possuem (ADHIKARI et al., 2018). Justamente por esses pontos e ainda conseguir proporcionar uma conduta mais viável economicamente que este tipo de células tem gerado uma maior quantidade de pesquisas (SAMPAIO, 2022).

5.3.1. Funcionamento

Para a devida compreensão do funcionamento OPVs se faz necessário uma análise da sua organização estrutural. Suas principais características são que os seus semicondutores são orgânicos e possuem múltiplos bandgap (KULARATNE, 2013).

A estrutura desta célula pode ser descrita como um sanduíche pois é formada por camadas (LOURENÇO JÚNIOR et al., 2020) que podem ser observadas na Figura 15.



Figura 15. Esquema de uma OPV de heterojunção planar (fonte: SAMPAIO, 2022).

O ânodo e o cátodo têm como função coletar os portadores de carga e transmitir a corrente gerada para um circuito externo. Enquanto a camada de transporte de elétrons (ETL) e a de transporte de buracos (HTL) são responsáveis pela condução dos seus tipos de portadores até o eletrodo correspondente. Já as camadas aceitadoras e doadoras, também chamada de camada ativa, são incumbidas de aceitarem e doarem elétrons. A camada ativa também pode ser apresentada como uma mistura do material aceitador e absorvedor, formando assim uma heterojunção em massa (BHJ) como mostrado na Figura 16 (SAMPALIO, 2022).

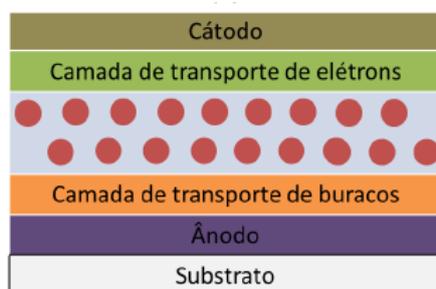


Figura 16. Esquema de uma OPV de heterojunção em massa (fonte: SAMPAIO, 2022).

Outra maneira a qual este tipo de célula pode ser montado é fazendo uma inversão dela com relação ao substrato e obtendo uma BHJ invertida como mostrado na Figura 17 (SAMPALIO, 2022).

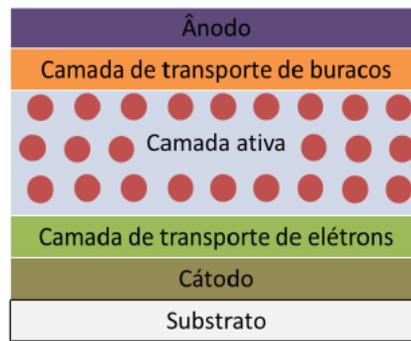


Figura 17. Esquema de uma OPV de BHJ invertida (fonte: SAMPAIO, 2022).

A vantagem de se fazer uma OPV com uma heterojunção em massa é que neste caso há uma região maior de dissociação de éxciton (par elétron/buraco mantido juntos por forças atrativas Coulombianas) o que promove um aumento da eficiência da célula, já que para haver a produção da fotocorrente os elétrons devem estar separados dos buracos (LOURENÇO JÚNIOR et al., 2020).

Com estas informações é possível entender o funcionamento das OPVs de uma maneira mais clara. Ao entrarem em contato com a luz, os fótons são absorvidos e os elétrons são excitados de um nível orbital molecular mais alto (HOMO) para um nível mais baixo (LUMO), como ilustrado na Figura 18, gerando um éxciton (LOURENÇO JÚNIOR et al., 2020). Então o éxciton é difundido para a camada ativa onde é desassociado em portadores livres, assim cada carga é coletada pelos eletrodos, que geram um campo elétrico interno com a função de atrair os buracos para os ânodos e os elétrons para o cátodo por fim gerando uma fotocorrente (SAMPALIO, 2022).

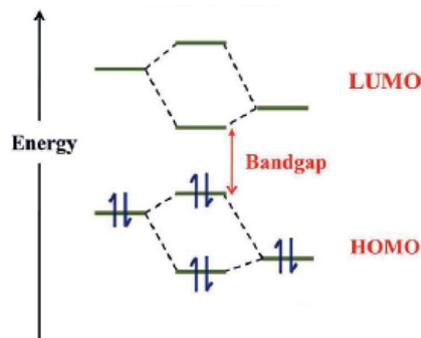


Figura 18. Esquema HOMO e LUMO (fonte: Wei; Che; Hwa, 2012).

De maneira a melhorar a eficiência das OPVs, uma solução encontrada para diminuir as perdas pela reflexão e transferência de calor foi de fazer uma célula com mais de uma camada

ativa, então as células de multi-junção, também conhecidas como células tandem, foram criadas (SAMPAIO, 2022). Uma ilustração delas é mostrada na Figura 19.

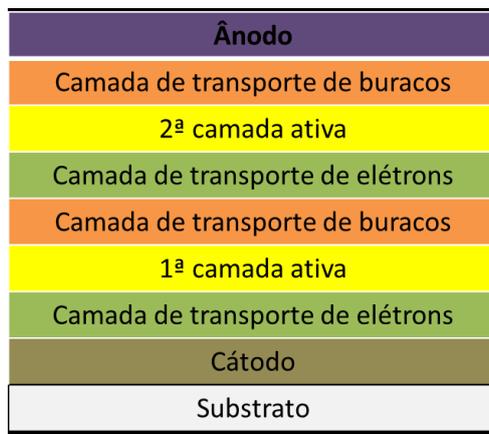


Figura 19. Esquema da célula tandem – OPV (fonte: SAMPAIO, 2022).

A única alteração no funcionamento deste novo modelo para os anteriores é que a primeira camada ativa deve possuir um bandgap maior de maneira a absorver os fótons de alta energia, enquanto a segunda camada ativa tem a função de consumir os fótons de menor energia e, portanto, tem um bandgap menor (SAMPAIO, 2022).

5.3.2. Materiais

Como explicado no tópico anterior, o funcionamento das células depende da relação elétron-buraco. No caso dos materiais orgânicos, os mais comumente utilizados como doadores de elétrons são P₃HT, PCDTBT e PTB₇. Já os materiais aceitadores de elétrons, ou doadores de buracos, são os fulerenos C₆₀ e C₇₀ e seus derivados, sendo o C₆₀ o de menor eficiência pois possui uma menor absorção de energia (SAMPAIO, 2022). Outros materiais que vêm sendo utilizados como aceitadores são PCBM, PC₇₀BM e PC₆₀BM que são formas solúveis do fulerenos (LOURENÇO JÚNIOR et al., 2020).

Já os materiais utilizados como ETL são o cálcio, TiO_x e o PCBM enquanto o HTL é composto pelo PEDOT:PSS.

5.3.3. Fabricação

Como visto na seção 3.3.1 as OPVs são compostas por camadas e com isso cada uma delas podem se utilizar de uma técnica individual para a formação do filme (KREBS, 2009).

Existem diversas técnicas a serem avaliadas quando se trata da fabricação de filmes orgânicos considerando o rendimento, a velocidade de processamento e o uso de materiais (SAMPAIO, 2022). Alguns processos de fabricação serão descritos nos tópicos a seguir.

5.3.3.1. Spin Coating

Esta técnica é utilizada para a aplicação uniforme do filme fino orgânico no substrato plano e funciona da seguinte maneira: uma grande quantidade da solução é despejada no centro do substrato o qual é rodado em alta velocidade, cerca de 1000 a 5000 rotações por minuto (SAMPAIO, 2022), para que o líquido seja espalhado de maneira uniforme via força centrífuga. O nome deste equipamento é spinner e o substrato é acoplado a ele através de sucção antes que o procedimento seja iniciado. O solvente deve ser volátil de modo que durante o processo vá evaporando de modo a ficar apenas o material desejado sob o substrato (BRAUNGER, 2015).

Contudo, este método não pode ser utilizado para fabricações de grandes áreas e nem em grande escala já que muito material é perdido durante a centrifugação, além do que a sua espessura não consegue ser bem controlada (SAMPAIO, 2022).

Na Figura 20 é possível observar uma ilustração desta técnica. Um disco no qual o substrato está acoplado é submetido a uma alta velocidade no sentido da velocidade angular, após a colocação do filme líquido na sua superfície. Esse movimento gera um fluxo radial de líquido e a evaporação do solvente de modo que no final permaneça apenas um filme fino sólido sobre o substrato (SAMPAIO, 2022).

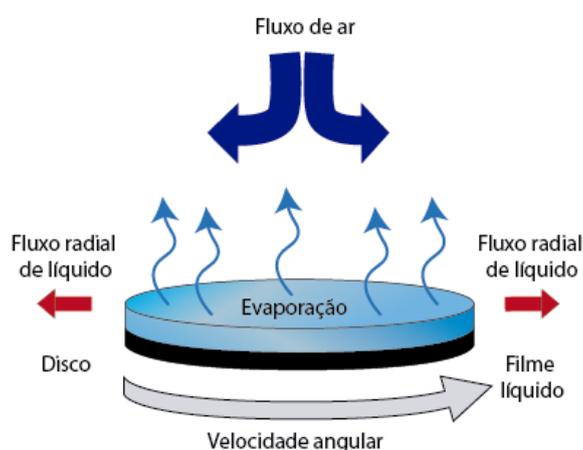


Figura 20. Esquema do processo de spin coating (fonte: SAMPAIO, 2022).

5.3.3.2. Revestimento por pulverização

Esta técnica é realizada sem contato, onde a pulverização ocorre através de um bico de spray de tinta atomizado, o qual utiliza um acionamento pneumático que decompõe a tinta em gotículas e direciona o aerossol ao substrato (SAMPAIO, 2022).

A qualidade do produto é influenciada por vários fatores, sendo os principais deles a distância entre o bico e o substrato e o tipo de solvente, já que se a distância for pequena demais o filme ficará com buracos e úmido, enquanto se for grande demais o solvente pode evaporar causando um filme seco. Então o solvente deve ser de secagem rápida, mas também de maneira a permitir que um filme homogêneo seja construído (SAMPAIO, 2022).

Como mostrado na Figura 21, a tinta é colocada dentro de um recipiente com algum gás, por exemplo o Nitrogênio e o Argônio, que é responsável por atomizá-la de modo que a tinta seja decomposta em gotículas e assim sendo possível a sua pulverização sobre o substrato. O substrato está em movimento de modo que a tinta seja despejada na quantidade correta ao longo dele sem gerar falhas ou acúmulos no filme fino (SAMPAIO, 2022).

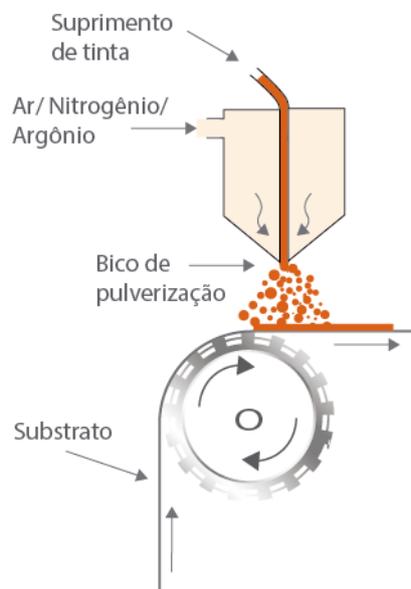


Figura 21. Esquema do processo de revestimento por pulverização (fonte: SAMPAIO, 2022).

5.3.3.3. Pintura com pincel

Neste método existe contato entre o substrato e o aplicador do material, mas possui a vantagem de poder ser utilizado em superfícies irregulares além de poder ser inserido no processamento rolo a rolo, que nada mais é do que a junção de diversas técnicas de fabricação a modo de otimizar e produzir as OPVs em grande escala (SAMPAIO, 2022).

Este processo consiste em mergulhar um pincel de nylon, pois não se dissolve com o solvente da tinta, na solução sintetizada que é aplicada no substrato de ITO aquecido, responsável pela evaporação do solvente da tinta, deixando apenas a camada ativa solidificada que, no caso, é o filme da OPV, como ilustrado na Figura 22. A temperatura do substrato é definida de acordo com a taxa de evaporação do solvente (SAMPAIO, 2022).

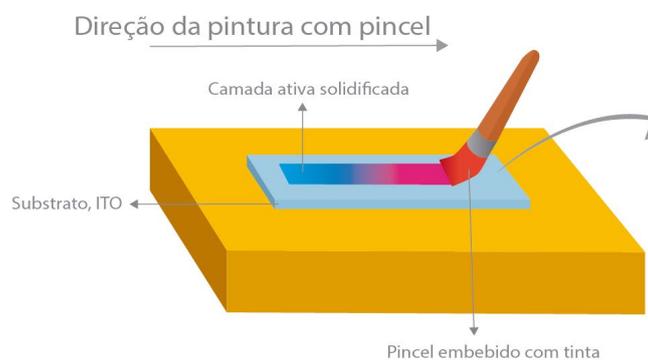


Figura 22. Esquema do revestimento com pincel (fonte: SAMPAIO, 2022)

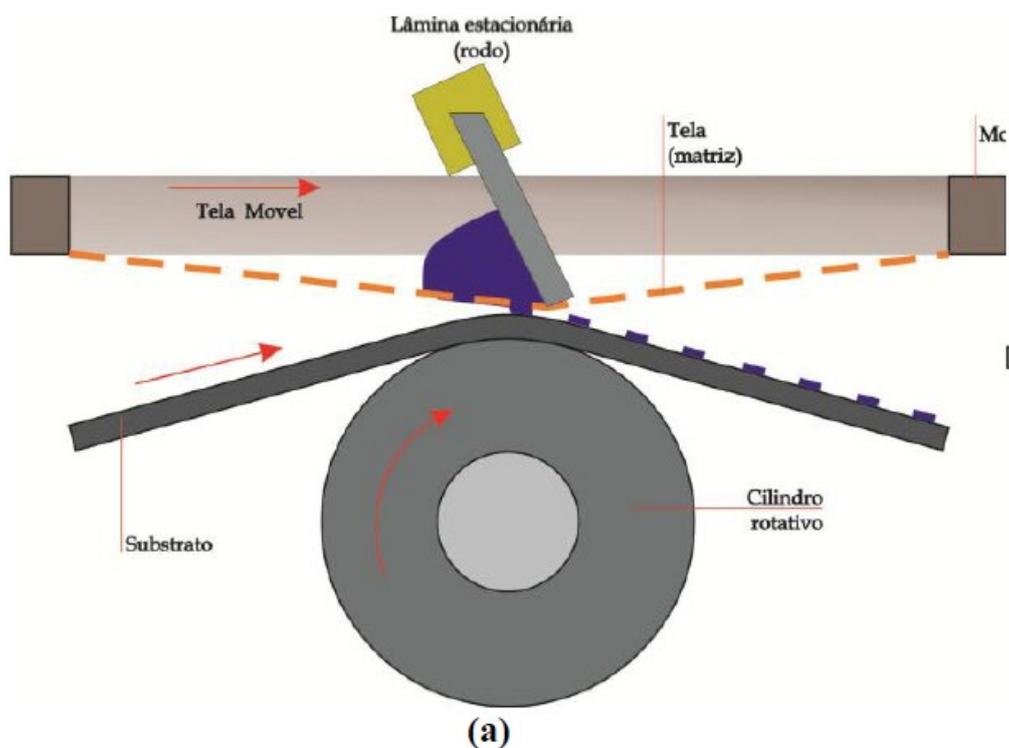
Esta técnica permite uma fabricação em alta velocidade com baixa perda de materiais, um melhor controle com relação à espessura do filme graças às taxas de solidificação mais rápidas (WANG et al., 2018).

5.3.3.4. Serigrafia

Diferente dos outros processos, esta técnica necessita que a tinta a ser utilizada possua uma alta viscosidade, já que para que seja impressa no substrato deve ser colocada no canto de uma tela matriz, que irá gerar o padrão para o filme, de modo que uma lâmina de borracha a espalhe sob a imagem e apenas as partes que passem pela tela sejam impressas no substrato. Em caso de uma tinta muito rala, ela passaria pela imagem e se espalharia sob o substrato fazendo com que o produto não tivesse uma boa qualidade (REBELLO, 2014).

Existem dois tipos de serigrafia de OPVs no mercado que são mostrados na Figura 23. Na Figura 23(a) uma tela de substrato plana é colocada sobre um cilindro rotativo que está em contato com uma tela matriz. Na tela móvel é onde se encontra a tinta responsável por fazer a

camada ativa da OPV. Essa tela se move no sentido do substrato, mas a lâmina estacionária permite apenas a passagem da tinta de acordo com o padrão existente na tela matriz. Deste modo, é impresso no substrato o desenho desejado sem desperdício de tinta. Já na Figura 23(b), assim como no caso anterior, um substrato plano é colocado sob um cilindro rotativo onde está em contato com a tela matriz, porém nesta situação, a tela matriz é cilíndrica e está em movimento contrário ao do substrato. A tinta é despejada dentro da tela rotativa que possui uma lâmina de modo que só deixa passar o material ativo referente ao padrão necessário. Sendo assim, também se obtém um produto como o esperado sem perdas. As vantagens desse método são que também pode ser incorporado no processo rolo a rolo, a espessura consegue ser controlada e não há muito desperdício de tinta já que existe um sistema que levanta o rodo quando a impressão acaba (REBELLO, 2014).



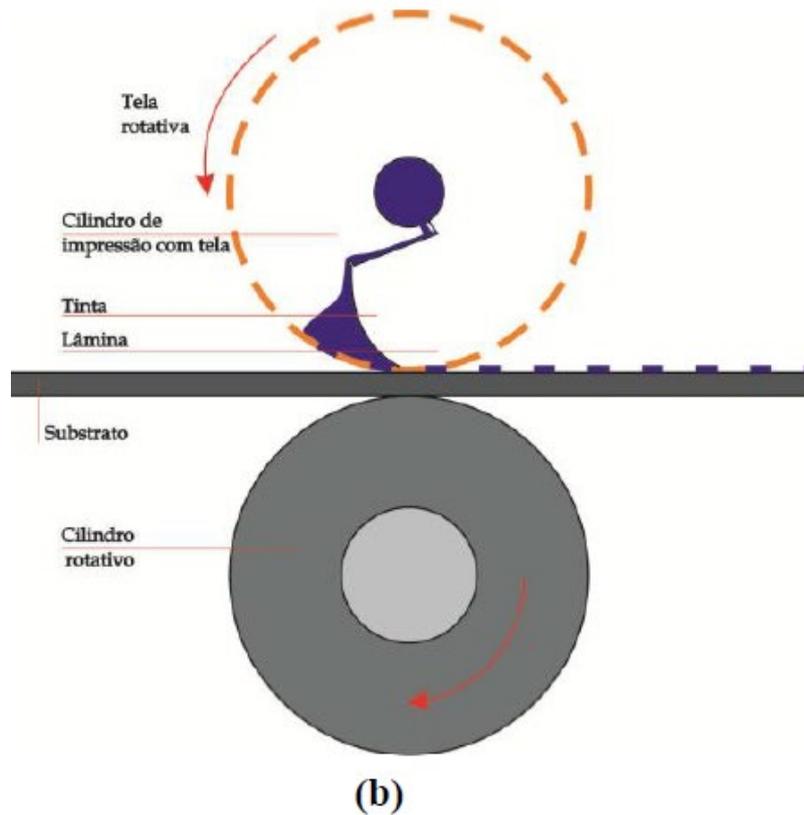


Figura 23. Esquema da serigrafia (a) rotativa plana e (b) rotativa cilíndrica (fonte: REBELLO 2014).

5.3.3.5. Jato de tinta

Este é um outro método que consegue ser inserido no processo rolo a rolo onde a impressão é realizada através de um jato de tinta, contínuo ou gota-a-gota, direto no substrato por meio de um bico. No modo contínuo o tamanho das gotas e o espaçamento existente entre elas é definido por uma perturbação periódica causada por um transdutor e elas são direcionadas ao substrato por intermédio de um campo elétrico e assim formando o padrão desejado. Já na técnica gota-a-gota, a tinta é ejetada através de um bico quando submetida a ondas de pressão, que definem o padrão a ser impresso, dessa maneira possui uma economia quanto à entrega da tinta. As ondas de pressão podem ser geradas por uma resistência que aquece o solvente gerando bolhas de ar ou por um material piezoelétrico que será deformado de maneira a pressionar a tinta (REBELLO, 2014).

Na Figura 24 vê-se um esquema do jato de tinta contínuo, onde a tinta encontra-se em um reservatório e é transferida para o driver pelo acionamento de uma bomba. Nesse

compartmento a tinta sai por um bico e antes que entre em contato com o substrato, que está em uma esteira rolante, passa por dois eletrodos. O primeiro é responsável por separar a tinta em gotas de acordo com o sinal recebido e o segundo eletrodo serve como defletor de gotas de modo que apenas a quantidade necessária caia sob o substrato e o restante seja direcionado para o dreno (REBELLO, 2014).

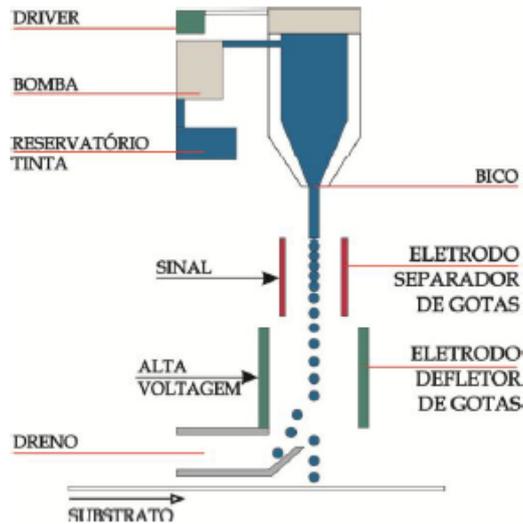
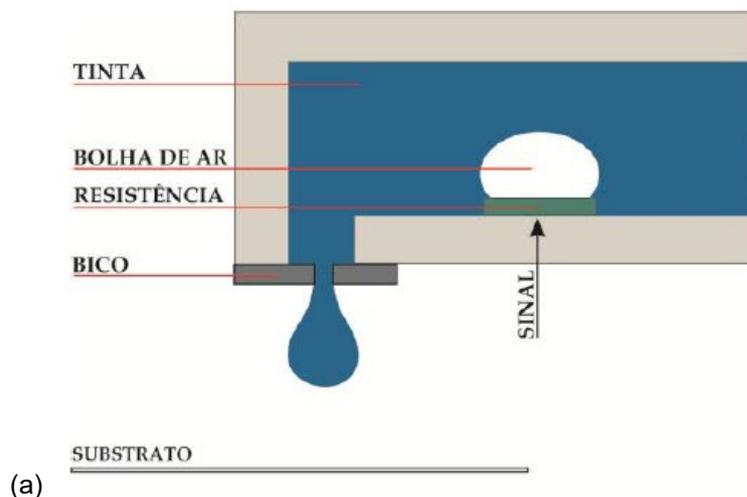


Figura 24. Esquema de jato de tinta contínuo (fonte: REBELLO 2014).

Na Figura 25 são ilustradas as duas maneiras de pode-se usar o jato de tinta gota-a-gota. Na (a) há uma resistência que aquece de acordo com o sinal recebido e assim gera uma expansão do ar dentro da tinta aumento a pressão no sistema. Desse modo, para aliviar a pressão interna uma gota de tinta é expelida para o substrato que se encontra parado abaixo do bico. Já na Figura 25(b) a pressão necessária para a saída da gota é obtida através de um material piezoelétrico que se deforma através do sinal recebido. Como no caso anterior, o substrato encontra-se imóvel abaixo do bico.



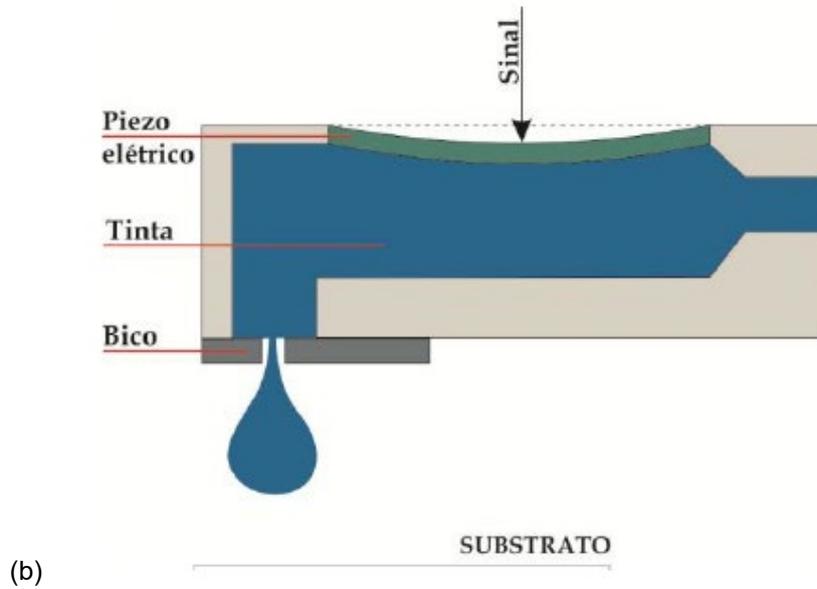


Figura 25. Esquema de jato de tinta gota-a-gota por (a) resistência e (b) material piezoelétrico (fonte: REBELLO 2014).

5.3.3.6. Rotogravura

Esta técnica se utiliza de dois cilindros rotativos, que giram no mesmo sentido, sendo um responsável pela impressão, chamado de rolo fonte, e outro de contrapressão sobre o qual o substrato será colocado. Um balde de tinta é inserido abaixo do rolo fonte e uma lâmina, encarregada de tirar o excesso do produto, é acoplada na lateral do balde, como demonstrado na Figura 26 (REBELLO, 2014).

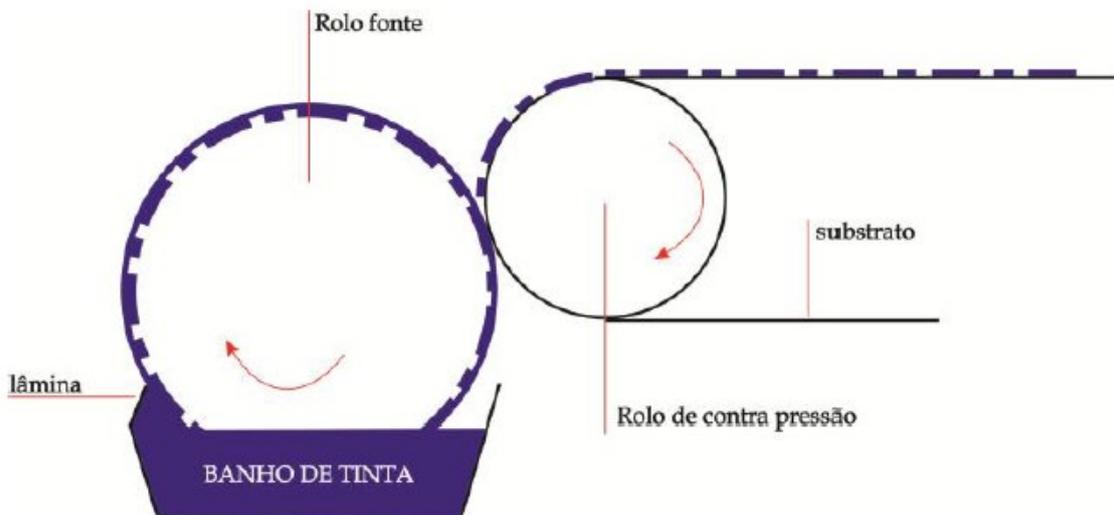


Figura 26. Esquema da rotogravura (fonte: REBELLO 2014).

O padrão desejado é constituído de baixos relevos que serão gravados no cilindro de impressão que ao entrar em contato com o substrato deposita a tinta da maneira desejada (REBELLO, 2014).

Este método é outro que também pode ser adicionado no processo de rolo a rolo, porém caso seja necessário um outro padrão, outro rolo deve ser fabricado e este processo é caro (REBELLO, 2014).

5.3.3.7. Flexografia

A flexografia se assemelha a rotogravura, porém utiliza quatro cilindros dispostos da maneira mostrada na Figura 27. Sendo o primeiro rolo, denominado de rolo fonte, onde encontra-se parcialmente imerso no banho de tinta e é responsável pelo abastecimento do segundo, o rolo Anilox, no qual existe um padrão gravado e serve como um dosador de tinta para o terceiro rolo, o rolo de impressão, que possui um padrão em relevo, ou seja, não é gravado diretamente nele o que facilita caso a imagem tenha que ser trocada. No rolo de impressão apenas a parte proeminente dele recebe a tinta que ao entrar em contato com o quarto rolo, o de contra pressão, imprime o padrão no substrato (REBELLO, 2014).

Assim como os métodos anteriores, a flexografia pode ser anexada no processo rolo a rolo, além de ser mais rápido e mais barato que a rotogravura já que o padrão pode ser mudado apenas mudando a borracha no rolo de impressão (REBELLO, 2014).

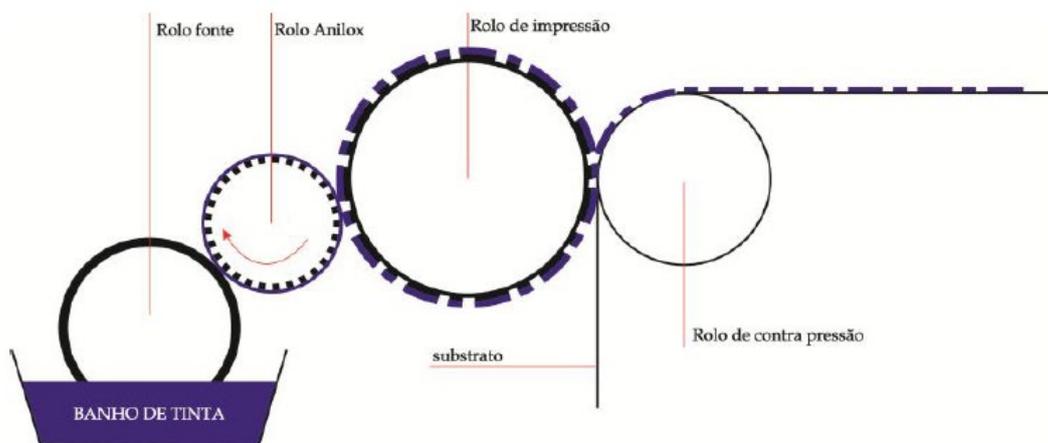


Figura 27. Esquema da flexografia (fonte: REBELLO 2014).

5.3.3.8. Revestimento por ponta de faca

Semelhante aos procedimentos anteriores este também pode ser inserido no processo rolo a rolo, além de possuir uma estrutura simples é uma técnica veloz, porém não se é possível gerar um padrão no substrato (SØNDERGAARD et al., 2012).

No sistema mostrado na Figura 28 é possível ver a estrutura deste sistema que consiste apenas em um suprimento de tinta que a deposita antes do menisco, onde o excesso dela é retirado gerando zero desperdício de material, sob um substrato móvel (SØNDERGAARD et al., 2012).

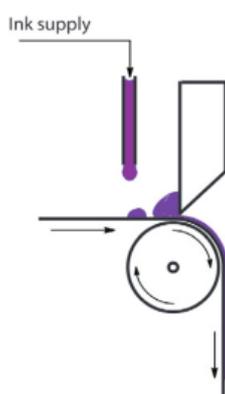


Figura 28. Esquema do processo de revestimento por ponta de faca (fonte: SØNDERGAARD et al., 2012).

5.3.4. Eficiência e mercado atual

As maiores vantagens das OPVs é que são flexíveis, possuem um baixo custo de produção e de material, são leves e semitransparentes, porém por serem feitas de materiais orgânicos não têm uma boa estabilidade quando submetidas a ambiente externo já que reagem com o oxigênio e água havendo uma diminuição da sua eficiência além de também reagirem com a temperatura o que é um grande problema tendo em vista que são fabricadas para gerarem energia através da luz solar. Portanto, as OPVs possuem um baixo tempo de vida (BÜHLER, 2018).

Atualmente são utilizadas em janelas, fachadas, ponto de ônibus, dentre outras construções civis e possuem uma eficiência por volta dos 10% (MACHADO; MIRANDA 2014; BÜHLER, 2018; LOURENÇO JÚNIOR et al., 2020).

6. Comparação das tecnologias e resultados

6.1. Silício Cristalino X OPV

Analisando inicialmente a diferença entre os materiais tem-se que as da primeira geração são feitas de matéria inorgânica, que mesmo sendo muito abundante na natureza tem um alto custo de extração e preparação, já que além de todo o processo da matéria prima até ela ficar com a qualidade necessária para ser utilizada, o silício deve ser dopado de duas maneiras distintas a fim de ser ter um produto com capacidade de geração de energia. Enquanto as OPVs possuem como matéria prima polímeros orgânicos, uma fabricação com prospecção de baixo custo e são facilmente recicláveis.

O processo de fabricação das células de silício é bem maduro no mercado, porém não existe uma gama de opções como no caso das células orgânicas. Para a produção do p-Si existe um único tipo de fabricação e para o m-Si dois, que dependem da produção do policristalino, já as OPVs possuem mais de oito maneiras distintas de serem produzidas. Outro fator a ser considerado é o custo destas etapas. As células de silício passam por um processo extremamente caro de fabricação, principalmente a monocristalina que por se tratar de um único cristal é mais sensível a influências externas durante a sua construção. Estas células também não podem ser muito finas, pois perdem eficiência devido ao coeficiente de absorção óptica do material. Já as OPVs podem ser fabricadas de diferentes maneiras, em alguns casos há uma perda significativa do material, mas em sua maioria os processos são simples e econômicos além de não gerarem perda da matéria do filme orgânico e já saem prontas para o uso.

Em se tratando do funcionamento, as OPVs são mais complexas já que durante o processo de geração de energia são criados éxcitons que devem ser desassociados para que os elétrons e os buracos se tornem disponíveis para a geração enquanto nas células de silício, devido a dopagem do material, já existe uma quantidade significativa de portadores de carga livres. Com isso, a eficiência das células de primeira geração é bem maior do que a de terceira geração já tendo alcançado valores superiores a 20% contrário das OPVs que chegam no máximo a 10% em laboratórios e possuem uma eficiência comercial na casa dos 7%.

Mesmo possuindo uma prospecção de um custo geral mais baixo do que as de silício, a quantidade necessária para a geração de uma mesma potência se torna elevada por precisar

de uma maior área de módulos, além do que as OPVs possuem uma maior interação com o ambiente e assim ocorre uma diminuição da sua eficiência após a instalação e ademais de um baixo tempo de vida útil. Ainda que tenha estas dificuldades, as células orgânicas possuem um número maior de utilizações por serem flexíveis, semitransparentes e leves diferentes das de silício que são blocos de produtos com peso de até alguns quilogramas.

6.2. Filmes Finos X OPVS

Em todos os tipos de filmes finos de segunda geração os seus materiais não são renováveis, são de alto custo e inorgânicos, além de serem mais escassos que os de silício e no caso da célula de CdTe possui substâncias tóxicas em sua composição. Então, além das vantagens já abordadas no tópico anterior, há que as OPVs não possuem nenhum material com qualquer nível de toxicidade.

As duas gerações possuem uma grande diversidade de maneiras de serem produzidas, já que ambas podem ter uma variação de substrato para um flexível. Porém, os métodos utilizados pelas células orgânicas possuem um menor custo quando comparado com as de filmes finos, principalmente devido ao alto custo da matéria prima.

Assim como as de silício, os filmes finos possuem um funcionamento mais simples por terem os elétrons e buracos livres independentemente da quantidade de energia injetada pelos fótons. Com isso, as OPVs também possuem menor eficiência do que as de filme fino que nos casos das células CIGS e CdTe já têm uma eficiência similar à do silício, o que no fim gera um alto custo quando comparando para a mesma geração de energia.

Por conseguirem ser fabricadas sobre um substrato flexível, os módulos de segunda e terceira geração possuem uma grande quantidade de utilizações similares, como por exemplo, serem colocadas sobre tetos de carros e estádios que possuem um formato não plano, janelas e fachadas como mostrado na Figura 29, já que em ambos os casos podem ser fabricados módulos semitransparentes.



Figura 29 - Algumas das aplicações das células solares orgânicas. (A) Fachada do prédio de Ciências Exatas da UFPR no Centro Politécnico em Curitiba. (B) Estação Tubo em Curitiba (Fonte: LOURENÇO JÚNIOR et al., 2020).

6.3. Resultados

As diferenças mais evidentes entre estas tecnologias estão na eficiência, tempo de vida e métodos de fabricação. Na Figura 30, gráfico das maiores eficiências do mercado por tecnologia, é possível analisar que as células de m-Si são as de maior eficiência com as de p-Si, CIGS e CDTE logo atrás. As OPVs são as que possuem a menor eficiência do mercado com apenas 9,7% no setor comercial.

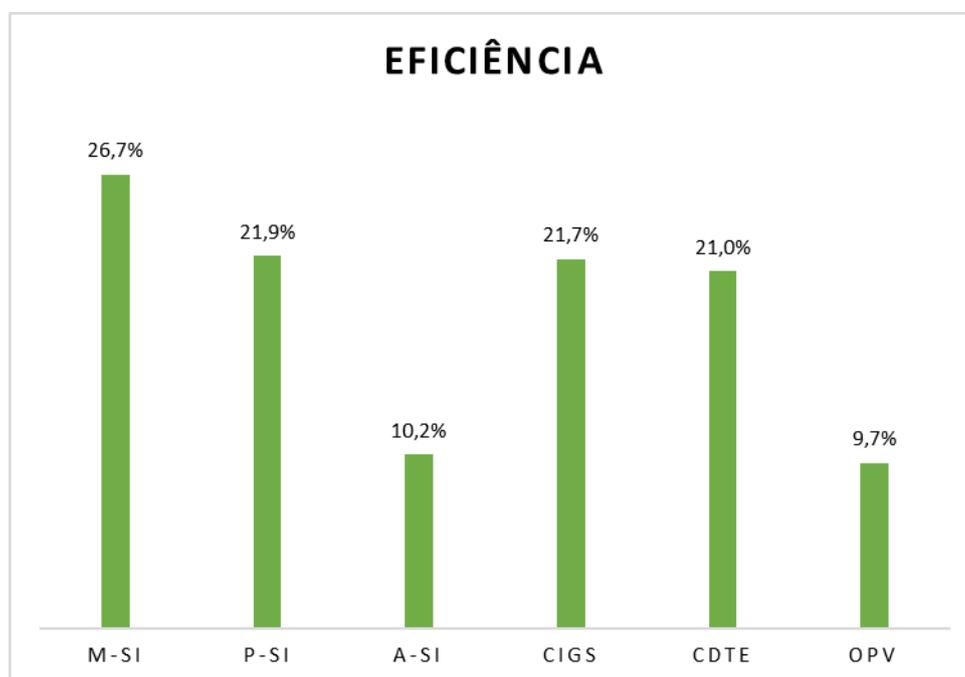


Figura 30. Eficiências dos diferentes módulos (fonte: autora)

Já na Figura 31 observa-se como o tempo de vida das OPVs é pequeno, tendo em vista que este tipo de módulo ainda possui o problema de reagir com o meio ambiente, quando em comparação com as tecnologias das gerações anteriores, sendo apenas de dez anos enquanto as outras superam o marco de duas décadas.

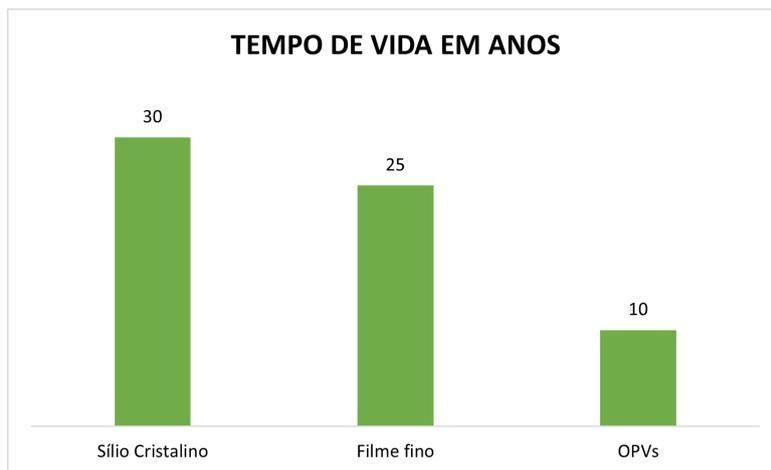


Figura 31. Tempo de vida em anos das tecnologias existentes (fonte: autora)

Através da Tabela 1 é possível comparar os métodos existentes para a fabricação de cada geração de célula fotovoltaica, salientando que as de silício já estão bem inseridas na indústria mundial e a das OPVs mesmo sendo mais simples, são caras devido à falta de produção em larga escala.

Tabela 1. Comparação dos métodos de fabricação (fonte: autora)

p-Si	m-Si	Filmes finos	OPVs
Solidificação direcional	Método CZ	CSS	Spin Coating
	Método FZ	Pulverização catódica	Revestimento por pulverização
		Eletrodeposição	Pintura com pincel
		CBD	Serigrafia
			Jato de tinta
			Rotogravura
			Flexografia

Para uma análise mais visual, e tendo em vista que alguns métodos de construção das OPVs possuem mais de uma maneira de serem realizados, foi montado o gráfico, ilustrado na Figura 32, onde é mostrado a quantidade de modelos existentes de fabricação para cada tecnologia.

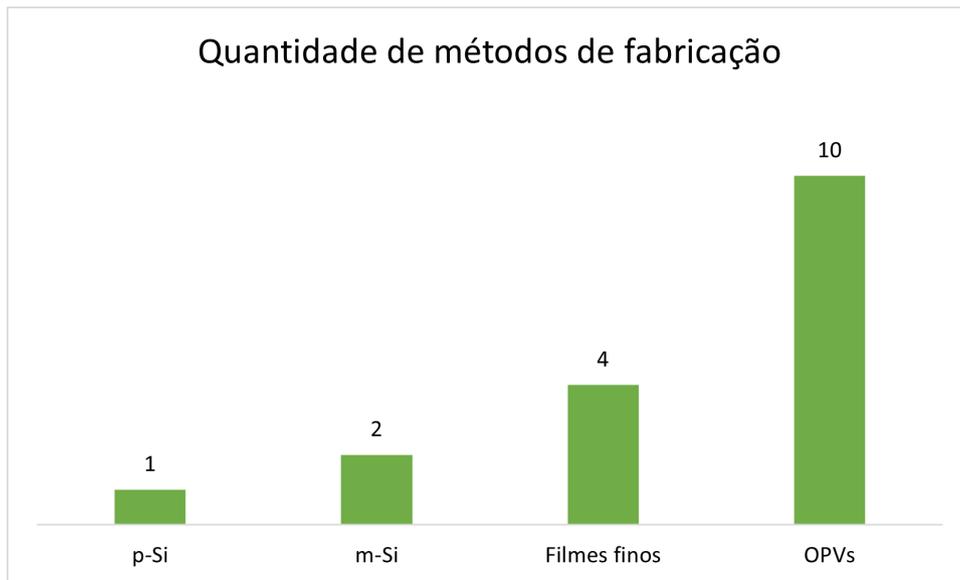


Figura 32. Quantidade de métodos de fabricação (fonte: autora)

Na tabela 2 pode-se averiguar as características de cada geração de modo a obter uma comparação mais visual das tecnologias supracitadas.

Tabela 2. Comparação das gerações fotovoltaicas (fonte: autora)

1ª geração	2ª geração	3ª geração
Pesado	Leve	Leve
Substrato rígido	Substrato flexível	Substrato flexível
Matéria prima abundante	Matéria prima escassa	Matéria prima abundante
Algumas substâncias tóxicas	Muitas substâncias tóxicas	Majoria de substâncias não tóxicas
Opaco	Semitransparente	Semitransparente
Fabricação complexa	Fabricação simples	Fabricação simples
Alto custo de fabricação	Prospecção de baixo custo de fabricação	Prospecção de baixo custo de fabricação
Alto custo da matéria prima	Alto custo da matéria prima	Prospecção de baixo custo da matéria prima
Alta eficiência	Alta eficiência	Baixa eficiência
Tempo de vida longo	Tempo de vida longo	Baixo tempo de vida
Diminuição significativa da eficiência com o calor	Diminuição não significativa da eficiência com o calor	Diminuição não significativa da eficiência com o calor

Portanto, podemos concluir que a maior perspectiva para os módulos fotovoltaicos orgânicos são as aplicações similares as de filmes finos, porém, com o avanço da tecnologia, aumento da eficiência e diminuição no custo de produção (tanto da fabricação quanto da matéria prima), estas podem superar a segunda geração quanto a utilização.

7. Conclusões e Perspectivas

As células fotovoltaicas estão cada vez mais presentes no nosso cotidiano tendo em vista a crescente busca por uma fonte de energia limpa e renovável. No Brasil, a utilização deste modo de geração de energia é algo com grande potencial por se tratar de um país de proporções continentais com diversos climas e com uma alta incidência solar diária.

Este estudo pode ser considerado importante para a sociedade já que ajuda a compreender as características específicas de cada tecnologia fotovoltaica. Servindo como um facilitador durante a escolha de qual geração é a melhor para determinado projeto, para que assim consiga atender as expectativas do cliente e cumprir com o desejado pelo gerente de projetos da melhor maneira possível.

Mesmo com o grande avanço que tem ocorrido entre as tecnologias de células solares fotovoltaicas, pode-se concluir que as OPVs não conseguirão substituir nenhum dos recursos já existentes, durante um futuro próximo, tendo em vista a sua baixa eficiência e tempo de vida.

As células de silício continuarão a dominar o mercado, pelo fato que são mais baratas, possuem uma eficiência um pouco maior, além de utilizarem um material mais abundante na natureza quando comparadas com as de filmes finos. Quando analisamos as características principais de cada geração fotovoltaica, podemos perceber que cada uma das gerações tem suas vantagens e desvantagens, porém, entre as tecnologias de filmes finos, as OPVs são as de maior potencial de desenvolvimento, já que, com o avanço das pesquisas, as suas desvantagens tendem a melhorar e assim as tornarem mais viáveis para atuação no mercado.

Por ainda estarem em fase de desenvolvimento, muitas das utilizações atuais das OPVs são limitadas a uma condição similar à fase de testes, pois as construções a utilizá-las ainda estão sendo analisadas de modo a verificar o custo-benefício da situação.

O potencial crescente para as células fotovoltaicas orgânicas no mercado mundial são as aplicações exclusivas delas, que mesmo não sendo capazes de gerar uma grande quantidade de energia, conseguem obter energia de locais que não eram utilizados para este fim. Portanto, estruturas externas de prédio e outras construções podem ser feitas com as OPVs de maneira que a energia pode ser aproveitada pelo local e a única diferença no projeto é a substituição dos vidros pelas células solares orgânicas a serem instaladas. Elas também podem ser

utilizadas em eletrônicos portáteis e devido à sua flexibilidade são mais fáceis de serem implementadas nestes instrumentos.

Agradecimentos

Aos meus orientadores Prof. Dr. André Felipe Vieira da Cunha e Profa. Dra. Renata Francisca da Silva Santos por terem sido pacientes e conselheiros durante toda a construção desta monografia.

Aos meus pais, Ronaldo e Gabriela, pelo carinho e compreensão nos meus momentos de ausência, ao meu irmão Leonardo, o qual amo incondicionalmente, por todo o afeto. À minha avó, Verleide, que mesmo distante se faz presente com seu amor e torcida para o meu sucesso. Ao meu namorado, Lucas, e meus amigos por todo o apoio e entendimento durante o processo de escrita deste trabalho.

À Universidade Federal de Pernambuco por ter sido o meu lar de aprendizagem nesses últimos seis anos.

Ao meu chefe, Daniel, por todo o apoio durante esta fase de alta demanda da graduação e compreensão nos meus momentos de afastamento.

Por fim, a todos aqueles que de uma maneira ou de outra fizeram parte desta jornada junto comigo.

Referências Bibliográficas

ADHIKARI, T. et al. Efficiency enhancement of ternary blend organic photovoltaic cells with molecular glasses as guest acceptors. **Organic Electronics**, v. 53, p. 74-82, 2018.

ANTHONY, T. C., FAHRENBRUCH, A. L., BUBE, R. H. Growth of CdTe films by close spaced vapor transport. **Journal of Vacuum Science and Technology**. A 2 (2), 1984. 1296-1302.

BENVENUTTI, Edilson Valmir. **Química inorgânica: átomos, moléculas, líquidos e sólidos**. 3 ed. rev. 224p. Porto Alegre: editora da UFRGS, 2011.

BRAUNGER, M. L. UNESP. Fabricação e caracterização elétrica de células solares a partir de filmes finos orgânicos. **Aleph**, p. 120 f. : il., tab., 19 jun. 2015.

BÜHLER, A. J.; SANTOS, F. H. DOS; GABE, I. J. **UMA REVISÃO SOBRE AS TECNOLOGIAS FOTOVOLTAICAS ATUAIS**. Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS, 2018.

Carvalho, P.S.L, Mesquita, P.P.D.M, Rocio, M.A.M., 2014. **A rota metalúrgica de produção de silício grau solar: uma oportunidade para a indústria brasileira**. Rio de Janeiro, n.40, p. 205-233.

CREMASCO, N. P. et al. Estudo de diferentes tecnologias de células fotovoltaicas. **Revista Eletrônica Científica Inovação e Tecnologia**, v. 12, n. 31, p. 44–55, 19 jan. 2022.

DARLING, S. B.; YOU, F. The case for organic photovoltaics. **RSC Advances**, v. 3, n. 39, p. 17633–17648, 17 set. 2013.

DAVID, J.; MOUTINHO, F. **Produção de Filmes Finos Multicamada Al/Ni por Eletrodeposição**, 2011. Disponível em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/63443/1/000149665.pdf>>. Acesso em: 17 out. 2022.

DAVIES, F. S.; FRISSE, G. L.; BRANDAO, M. V. **A UTILIZAÇÃO DO SILÍCIO NACIONAL PARA A FABRICAÇÃO DE PLACAS SOLARES: UMA REFLEXÃO DAS DIFICULDADES TECNOLÓGICA E FINANCEIRA**. Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS, 2018.

DONATO LOURENÇO JUNIOR, O. et al. Clean and Renewable Energy, Healthy Organic Electronics. **Revista Virtual de Química**, v. 12, n. 3, p. 583–597, 2020.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar engineering of thermal processes**. Hoboken (N.J.): Wiley, 2013.

ELDIN, A. H.; REFAEY, M.; FARGHLY, A. **A Review on Photovoltaic Solar Energy Technology and its Efficiency** Ahmed. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/287792329>>. Acesso em: 17 out. 2022.

FALCÃO, V. D. **FABRICAÇÃO DE CÉLULAS SOLARES DE CdS/CdTe**. Orientador: Prof.^a Leila Rosa de Oliveira Cruz. **2005**. Tese de Conclusão de Curso (Engenharia Bacharelado) - INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA, Rio de Janeiro/RJ, 2005.

GALDINO, J. J. B. **Estudo da geração de energia em células orgânicas a partir da iluminação simultânea de ambas as faces**. Disponível em: <<https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/32430>>. Acesso em: 17 out. 2022.

GONÇALVES, A. R. et al. PRODUÇÃO DE FILMES DE ZnTe POR SUBLIMAÇÃO EM ESPAÇO REDUZIDO. **Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo**, v. 28, n. 3-4, p. 51–54, 29 mar. 2011.

Green, M. A., Hishikawa, Y., Warta, W., et al. Solar cell efficiency tables (version 50)GR. **Photovolt Res Appl.** 2017;25:668–676. <https://doi.org/10.1002/pip.2909>

GUEDES, D. et al. **CÉLULAS FOTOVOLTAICAS: DESENVOLVIMENTO E AS TRÊS GERAÇÕES PHOTOVOLTAIC CELLS: DEVELOPMENT AND THE THREE GENERATIONS.** [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://revistatecie.crea-pr.org.br/index.php/revista/article/download/540/326>>. Acesso em: 17 out. 2022.

GHENSEV, A. **MATERIAIS E PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS.** Disponível em: <https://www.solenerg.com.br/files/monografia_almir.pdf>. Acesso em: 17 out. 2022.

GUIMARÃES, A. P. et al. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**, edição especial, CRESESB: Rio de Janeiro, 1999.

HALLIDAY, David. **Fundamentos de física: óptica e física moderna.** Volume 4. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

JOHNINSON I. **Desenvolvimento de Conversores Estáticos para Sistemas Fotovoltaicos Autônomos, 2007.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria.

KREBS, F. C.; TROMHOLT, T.; JORGENSEN, M. Upscaling of polymer solar cell fabrication using full roll-to-roll processing. **Nanoscale**, v. 2, p. 873-886, 2010.

KULARATNE, R. S. et al. Donor–Acceptor Semiconducting Polymers for Organic Solar Cells. **Journal of Polymer Science, Part a: Polymer Chemistry**, v. 51, p. 743-768, 2013.

LANA, L. T. C. et al. ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA. **Engenharias On-line**, v. 1, n. 2, p. 21–33, 2015.

LIMA, A. A. et al. Uma revisão dos princípios da conversão fotovoltaica de energia. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 42, 7 out. 2019.

MACHADO, A. V. C. Estudo comparativo na aplicação das três gerações de células fotovoltaicas em uma residência localizada no município Santa Inês - MA. **repositorio.uema.br**, 2018.

MACHADO, C. T.; MIRANDA, F. S. Energia Solar Fotovoltaica: Uma Breve Revisão. **Revista Virtual de Química**, [s. l.], ano 2015, v. 7, n. 1, 2015.

MACHUNO, L. G. B. et al. Desenvolvimento e avaliação de uma fonte DC de alta tensão para utilização em sistema de deposição de filmes finos por pulverização catódica. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 21, n. 2, p. 492–500, jun. 2016.

MAZZIO, K. A.; LUSCOMBE, C. K. The future of organic photovoltaics. **Chemical Society Reviews**, v. 44, n. 1, p. 78–90, 2015.

MONTEIRO, M. DA C. **CÉLULAS FOTOVOLTAICAS DE SILÍCIO CRISTALINO: TECNOLOGIAS E PROCESSOS DE FABRICAÇÃO. 2016.** Disponível em: <<http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/bitstream/riufcg/18685/1/M%C3%94NICA%20DA%20OSTA%20MONTEIRO%20-%20TCC%20ENG.%20EL%C3%89TRICA%202016.pdf>>. Acesso em: 17 set. 2022.

MORAES JÚNIOR, R.; BAGNARA, M. **Modalidade do trabalho: Ensaio teórico Evento: XXIV Seminário de Iniciação Científica OS PRINCÍPIOS QUÍMICOS E FÍSICOS ENVOLVIDOS NO FUNCIONAMENTO DAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS 1.** [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://publicacoeseventos.unijui.edu.br/index.php/salaconhecimento/article/view/7208/5974>>. Acesso em: 17 out. 2022.

MORALES, O. **UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO” FACULDADE DE INGENIERIA -CAMPUS ILHA SOLTEIRA Construção e caracterização de células solares de filmes finos de CdS e CdTe.** [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/91965/moralesmorales_o_me_ilha.pdf>. Acesso em: 17 out. 2022.

NEVES, W. DE Q. **CARACTERIZAÇÃO ÓTICA E ESTRUTURAL DE FILMES DE CdS DEPOSITADOS POR BANHO QUÍMICO.** Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/13735/1/2013_dis_wqneves.pdf>. Acesso em: 17 set. 2022.

NOCE, T. **AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS EM VEÍCULOS A COMBUSTÃO: Proposta de crédito extra ciclo baseada no regulamento europeu. 2018.** PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS . Belo Horizonte. Brasil. Publicado em 09/03/2018.

NUNES, H. M. et al. **ESTUDO COMPARATIVO TÉCNICO-FINANCEIRO DE USINAS FOTOVOLTAICAS UTILIZANDO MÓDULOS DE SILÍCIO MONOCRISTALINOS E POLICRISTALINOS.** Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS, 2020.

OLIVEIRA, O. G; OLIVEIRA R. H; GOMES R.O. Energia solar: um passo para o crescimento. **REGRAD - Revista Eletrônica de Graduação do UNIVEM** - ISSN 1984-7866, v. 10, n. 01, p.

377–389, 2017. Disponível em: <https://revista.univem.edu.br/REGRAD/article/view/2081>.

Acesso em: 23 set. 2022.

OLSEN, N. **O que acontece com um painel solar quando termina sua vida útil?** Disponível em: <<https://www.archdaily.com.br/br/948299/o-que-acontece-com-um-painel-solar-quando-termina-sua-vida-util#:~:text=Os%20modelos%20atuais%20de%20pain%C3%A9is,de%2030%20a%2040%20anos.>>. Acesso em: 21 out. 2022.

PEREIRA, G. **COMPARAÇÃO E ANÁLISE DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS COM CÉLULAS DE SILÍCIO CRISTALINO**, 2018. Disponível em: <https://repositorio.pucrs.br/dspace/bitstream/10923/12374/2/Comparacao_e_analise_de_modulos_fotovoltaicos_com_celulas_de_silicio_cristalino.pdf>.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**, 2014.

REBELLO, P. H. P. **Aplicações de técnicas de impressão a dispositivos orgânicos**. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/13735/1/2013_dis_wqneves.pdf>. Acesso em: 17 set. 2022.

ROSA, A. R. O. DA; GASPARIN, F. P. Panorama da energia solar fotovoltaica no Brasil. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v. 7, n. 2, p. 140–147, 2016.

SAMPAIO, P. G. V. Processo de desenvolvimento de tecnologia: modelo para a indústria de célula fotovoltaica orgânica. **repositorio.ufrn.br**, 13 jun. 2022.

SEVERINO, A. J. **Metodologia do trabalho científico**. 1ª edição. Editora Cortez. São Paulo. 2013. ISBN 978-85-249-2081-3.

SØNDERGAARD, R. et al. Roll-to-roll fabrication of polymer solar cells. **Materials Today**, v. 15, n. 1-2, p. 36–49, jan. 2012.

SU, Y.-W.; LAN, S.-C.; WEI, K.-H. Organic photovoltaics. **Materials Today**, v. 15, n. 12, p. 554–562, 1 dez. 2012.

TOMA, H. E. **O mundo manométrico: a dimensão do novo século**. São Paulo: Oficina de textos, 2004.

WANG, G. et al. Large-area organic solar cells: material requirements, modular designs, and printing methods. **Advanced Materials**, v. 31, n. 45, p. e1805089, 2018.