



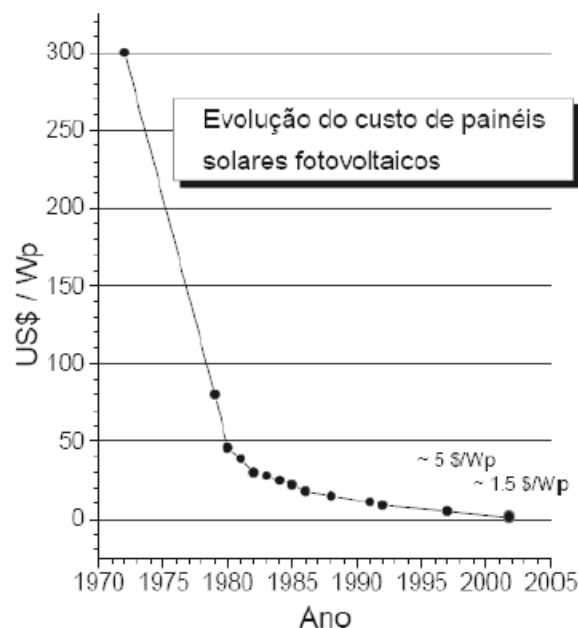
MATERIAIS PARA CÉLULAS SOLARES

Beatriz G. Landgraf, Isa Benatti, Fernanda Negreiros, Letícia Cursini, Paula Guirao
beatriz.landgraf@usp.br, isa.benatti@usp.br, fernanda.negreiros@usp.br, leticia.cursini@usp.br,
paula.guirao.oliveira@usp.br

1. Contextualização

A energia solar é utilizada desde as antigas civilizações, em 212 a.C. com a utilização de raios solares guiados através de espelhos. Porém, os primeiros relatos do efeito fotovoltaico surgiram em 1839, por Edmond Becquerel. A produção industrial, contudo, teve início em 1956, junto com o desenvolvimento da microestrutura. O uso da energia solar como fonte de energia elétrica a priori possuía o objetivo de gerar energia para satélites, e se iniciou em 1959 nos Estados Unidos. Até o presente momento o valor dessas células reduziu mais de 1000%, porém continuam relativamente caras, como pode ser visto na figura 1 abaixo, além de precisarem de uma eficiência maior para se tornarem competitivas no mercado, já que as atuais chegam a apenas 30%. (Marques, Krauter e De Lima (2009)).

Figura 1: O custo das células voltaicas ao longo do tempo.



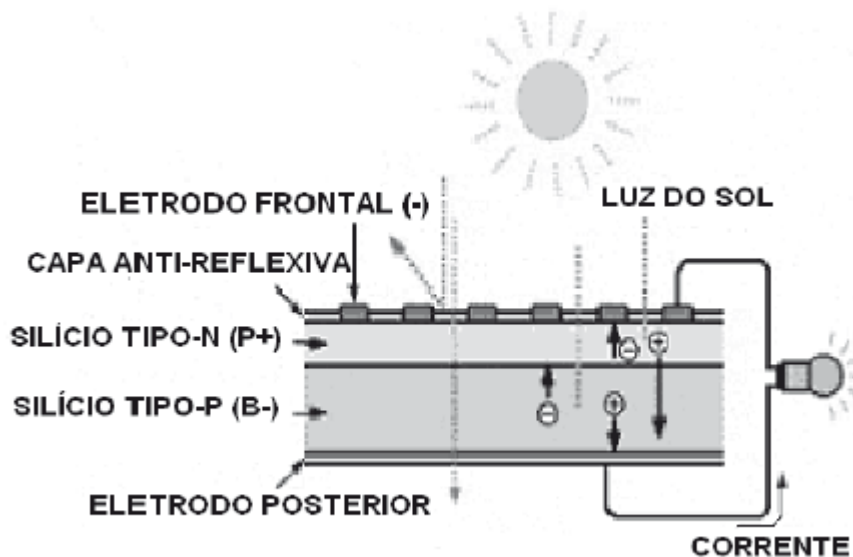
Fonte: Marques, Krauter e De Lima (2009). Acesso em 03 de outubro de 2019.

2. Definição

As células solares, em sua grande maioria, possuem cobertura de vidro, camada anti refletora, contato frontal e condutor posterior com o intuito de possibilitar o fluxo dos elétrons no circuito, além das camadas de semicondutores. (MORALES, 2011)

A célula fotovoltaica, responsável pelo efeito fotovoltaico, é a unidade responsável por haver conversão de energia térmica em elétrica através de semicondutores. Essa junção de semicondutores possui uma camada do tipo p com excesso de cargas positivas e outra do tipo n com excesso de cargas negativas, como é possível identificar na figura 2. (PEREIRA, 2016) Para direcionar a energia gerada, inclui-se um material condutor em ambos os lados do material para se formar um circuito. (Marques, Krauter e De Lima (2009)). Dessa forma, há o efeito fotoelétrico, ou seja, absorção de fótons por parte dos elétrons da radiação eletromagnética. Quando um fóton é absorvido na região de depleção, ocorre o salto de um elétron da banda de valência para a de condução, formando um par elétron-buraco. Na região da união p-n há um campo elétrico encarregado em causar uma diferença de potencial entre os eletrodos pela geração de cargas elétricas. (MORALES, 2011)

Figura 2: Funcionamento de uma célula fotovoltaica.



Fonte: Marques, Krauter e De Lima (2009). Acesso em 03 de outubro de 2019.

3. Células de películas finas

A tecnologia de geração de eletricidade por conversão fotovoltaica de energia solar está em alta no mercado (EDOFF,2012). As mudanças climáticas, a necessidade de preservação do meio ambiente somado aos recursos limitados de energia, levaram a investigações e pesquisas sobre a energia solar,



dado que esta tem vantagens dificilmente encontrada em outras alternativas: é silenciosa, renovável e ilimitada. (PEREIRA,2016).

A produção anual de energia fotovoltaica (PV) deverá atingir 500 GW até 2020 (75 GW em 2016), tornando este um dos mercados em maior expansão. Como consequência, o mercado fotovoltaico é um setor bilionário, no qual a China é líder tanto na produção de células solares quanto na capacidade instalada anual. Em relação aos países que mais utilizam a tecnologia, hoje, temos como líderes, em ordem: Alemanha, EUA, Índia, Japão e Itália. Simultaneamente, a pesquisa neste setor está evoluindo e desenvolvendo processos de fabricação mais fáceis, eficientes e com menor custo, buscando atingir camadas mais carentes da população. (BOSIO,2018)

País	Geração (TWh)	% da Geração Total	Potência Instalada (MW)	Fator de Capacidade (%)	Expansão no Ano (GW)
1 China	66,2	1,1	78.070	13,2	34,5
2 Estados Unidos	56,8	1,3	40.300	18,6	14,7
3 Japão	49,5	4,9	42.750	14,9	8,6
4 Alemanha	38,2	5,9	41.275	10,8	1,5
5 Itália	22,9	8,1	19.279	13,7	0,4
6 Espanha	13,6	5,0	5.490	28,3	0,1
7 Índia	11,9	0,8	9.010	18,8	4,0
8 Reino Unido	10,3	3,1	11.727	11,0	2,0
9 França	8,3	1,5	7.130	13,8	0,6
10 Austrália	7,2	2,8	5.488	15,8	0,8
11 Coreia do Sul	5,2	0,9	4.350	15,2	0,9
12 Grécia	4,0	8,2	2.611	17,5	0,0
13 África do Sul	3,3	1,3	1.544	27,6	0,5
14 Canadá	3,1	0,5	2.715	13,4	0,2
15 Bélgica	3,0	3,6	3.422	10,1	0,2
Outros	29,7	0,4	26.313	14,6	6,3
Mundo	333,1	1,4	301.473	14,4	75,1
% do mundo	1,4		4,7		34,9

Figura 1. Geração e potência instalada solar no mundo em 2016. Fonte: Ministério de Minas e Energia - MME, 2016.

Hoje, os painéis FV feitos de células de silício cristalino puro (c-Si) são a tecnologia mais empregada, com uma participação de mais de 95% do mercado e eficiência de conversão de energia solar de 13 a 17%. No entanto, outra variante da FV que está em expansão no mercado são as células de película fina. (MME, 2016)

A figura 2 evidencia o desempenho de diversos tipos de células solares de película fina disponíveis no mercado em relação a sua eficiência na conversão de energia solar em eletricidade, observa-se que sua capacidade varia de 4% a 10% comparado com células de silício cristalino puro (c-Si). (GREEN,2007)

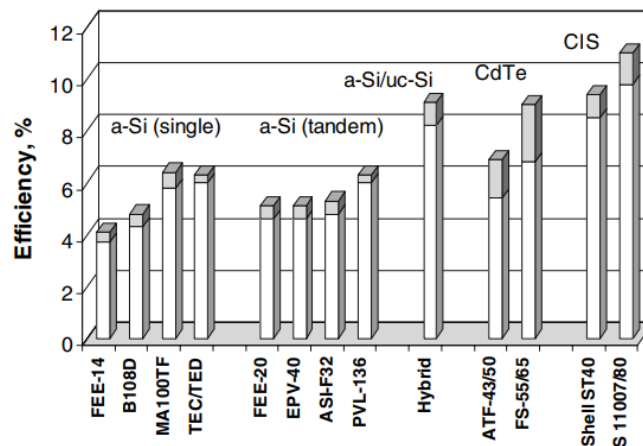


Figura 2. Faixa de eficiência de conversão de energia nominal de várias células solares de película fina. Fonte: (GREEN,2007)

As células de película fina são formadas pela deposição de camadas extremamente finas de materiais semicondutores fotovoltaicos (silício amorfo – a-Si, telureto de cádmio - CdTe e disselenito de cobre-índio-gálio – CIGS) sobre um material de apoio, tal como o vidro, aço inoxidável ou plástico.

No entanto, o custo de implementação da tecnologia de células solares de camada fina por unidade é superior em relação aos demais métodos disponíveis concorrentes, o que dificulta sua implementação e crescimento no mercado. Porém, essa técnica possui fácil instalação comparado ao método com células de silício cristalino puro (c-Si), o que pode ser uma grande vantagem, dado a grande demanda por energia aliado à necessidade de rapidez e eficiência.

Desse modo, as células solares de camada fina ainda têm barreiras a superar para conseguir atingir a excelente confiabilidade e durabilidade demonstradas pelas células de silício cristalino puro (c-Si).

3.1. Células solares a base de silício

A tecnologia de silício de película fina apresenta inúmeras vantagens, incluindo: matérias primas são abundantes e não tóxicas, pode ser rígida ou flexível, além de ser leve devido aos substratos usados, sua aparência uniforme é adequada para a estrutura de integração, altos graus de transparência. Entretanto a principal desvantagem da tecnologia do silício de película fina é sua menor eficiência de conversão, que está na faixa de 7 a 10% para módulos comerciais versus 15 a 21% para aqueles baseados no c-Si. (MEILLAUD, 2015)

As células solares e os módulos de silício de película fina são configurados com a junção "p-i-n" de acordo com a sequência de camadas. Nela a luz entra através do substrato, tipicamente vidro, a luz sempre entra pela camada do tipo p, devido à pior mobilidade de buracos. Também deve ser mencionado que camadas dopadas p e n possuem propriedades eletrônicas ruins. Portanto, apenas o material intrínseco pode ser usado como absorvedor, consequentemente, o uso de pinos junções com



um campo elétrico que se estende por todo o dispositivo. A célula solar de silício amorfo pode ser de única junção, contendo apenas uma camada "p-i-n", ou mais de uma camada sendo de múltipla junção. (MEILLAUD, 2015)

Para compor as camadas, o silício amorfo é depositado em baixa temperatura de uma maneira que permita cerca de 10% (atômica) hidrogênio a ser incorporado que melhora muito a qualidade do material. Células individuais depositadas em uma folha de vidro são conectados lateralmente em série por uma abordagem. Como o silício amorfo não é muito condutor, uma característica fundamental da tecnologia é o uso de uma camada condutora de óxido de estanho transparente entre o silício e o vidro. (GREEN, 2007) Um fator que explica a disseminação relativamente lenta da tecnologia a-Si, dada pelo potencial de degradação do material induzida pela luz, conhecido como efeito Staebler. (MEILLAUD, 2015)

Este fenômeno de degradação é muito menos grave no mc-Si: H, que é um material de fase mista composto por nanocristais interconectados grãos de linha (geralmente com tamanho inferior a 30 nm) incorporado matriz amorfa. Além disso, o silício cristalino é mais condutor, eliminando a necessidade de um óxido condutor transparente, diminuindo os custos e o problema relacionado com a estabilidade do a-Si. (GREEN, 2007)

3.2. Células solares a base de calcogeneto

Semicondutores de sulfeto de cádmio (CdS) e telureto de cádmio (CdTe) são uma tecnologia muito utilizada em dispositivos de células solares. O funcionamento desse tipo de célula solar está no campo elétrico formado na zona de contato entre as camadas de filmes finos de CdS, que funciona como um semiconductor do tipo *n*, e filme fino de CdTe, que funciona como semiconductor tipo *p*. O procedimento para fabricação dessa célula solar é a partir da deposição sequencial de camadas sobre o vidro, primeiro uma camada de condutor transparente, sendo o contato frontal, usualmente utiliza-se o óxido de estanho e índio, o contato frontal é coberto por uma camada muito fina de CdS, logo depois uma camada de CdTe e por último uma camada de contato metálico como substrato. (MORALES, 2011)

O CdS funciona como a camada de janela para esse modelo e o CdTe como camada de absorção. A boa qualidade das células solares é muito dependente da interação das suas camadas, essa interação se relaciona ao modo de fabricação dos filmes (ROMEO,1999). Existem algumas técnicas possíveis de deposição para preparação dos filmes finos como eletrodeposição, sublimação em espaço fechado, evaporação a vácuo, sputtering, spray químico e deposição por banho químico. Além disso, as



propriedades dos filmes podem ser afetadas por fatores como concentração e tipo dos reagentes, agitação, temperatura e pH da solução (LIMA,1997).

A variação dos parâmetros como voltagem, corrente, radiação e também técnicas de deposição dos filmes, podem fazer com que a eficiência desse dispositivo de célula solar varie. Porém, a camada de CdTe possui elevado índice de absorção a radiação solar o que o torna um bom conversor em energia elétrica. Experimentos realizados no Laboratório Nacional de Energias Renováveis de Estados Unidos da América (NREL) obtiveram uma eficiência recorde máxima de 16,5%. (MORALES, 2011) A maior preocupação com esse tipo de dispositivo é em relação a toxicidade do cádmio e também a baixa abundância dos elementos que o compõe. (SANTOS, 2013)

Um outro exemplo no campo de células fotovoltaicas a base de calcogeneto são células de diseleneto de cobre-índio (CIS), variando as proporções desses elementos, o composto pode adquirir propriedades semicondutoras que absorvem intensamente a radiação solar. A estrutura dessa célula solar difere da anterior por usar o vidro como um substrato, sendo que na de CdTe o vidro tinha a função de um superstrato, a sua fabricação consiste em deposição do filme fino CIS em um substrato de vidro que foi recoberto por uma camada fina de molibdênio e por fim, as últimas camadas são a deposição do filme fino de CdS e óxido de zinco, este forma o contato elétrico superior. (SANTOS, 2013)

Essas células solares apresentam alta eficiência laboratorial chegando a valores de 19,5%, mas comercialmente ainda possuem valores inferiores ao de CdTe. Outro ponto a ser destacado, assim como as células de CdTe também faz a utilização de uma camada de CdS, portanto, enfrenta o mesmo problema relacionado a toxicidade do cádmio para sua fabricação. (GREEN, 2007)

4. Inovação

Dentro desse contexto, há um grande número de pesquisas para o desenvolvimento de células solares. Um exemplo é a produção de celulares solares de plástico em temperatura ambiente, mergulhando filmes finos de semicondutores orgânicos e suas misturas em soluções de polioxometalato com nitrometano por um curto período de tempo. Outro exemplo, é uma célula fabricada pulverizando uma camada fina de perovskita sobre uma célula solar comercialmente disponível, a CIGS; ela converte a energia recebida do sol em eletricidade. Um terceiro exemplo é o uso de células solares orgânicas que usam moléculas de corantes para absorver a luz do Sol e transformá-la em eletricidade; esses painéis poderão ser aplicados como revestimento em superfícies curvas.



Palavras-chave: Células Solares, Película fina, Silício, Energia, Energia Solar;

Referências consultadas:

MARQUES, Rubéria Caminha; KRAUTER, Stefan C. W.; DE LIMA, Lutero C. Energia solar fotovoltaica e perspectivas de autonomia energética para o nordeste brasileiro. Revista tecnológica de Fortaleza, [S. l.], v. 30, n. 2, p. 153-162, 15 dez. 2009.

MORALES, Oswaldo Morales. Construção e caracterização de células solares de filmes finos de CdS e CdTe. Orientador: Prof. Dr. Hermes A. Aquino. 2011. 81 p. Dissertação (Mestrado em ciência dos materiais) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Engenharia - Campus de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2011.

PEREIRA, Nilson Leite. Energia solar - uma perspectiva de sustentabilidade e viabilidade econômica. Orientador: Ericson Djuliano Nunes Souza Thaines. 2016. 46 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior de Tecnologia em Gestão Ambiental) - Instituto Federal de Educação, ciência e Tecnologia do Estado de Mato Grosso Campos Cuiabá, Bela Vista, 2016.

MEILLAUD, F.. Recent advances and remaining challenges in thin-films silicon photovoltaic technology. Review of Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Photovoltaics and Thin-Film Electronics Laboratory, Rue de la Maladiere 71b, CH-2000 Neuchatel, Switzerland. Setembro, 2015.

ROMEO, N. et al. A highly efficient and stable CdTe/CdS thin film solar cell. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 58, n. 2, p. 209-218, 1999.

LIMA, Carmo Roberto Pelliciani de et al. Recozimento de filmes finos de sulfeto de cádmio. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1997.

SANTOS, Amanda Moraes. Tecnologia Fotovoltaica. Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2013.

GREEN, Martin. Thin-film solar cells: Review of materials, technologies and commercial status. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2007.

KONAGAI, Makoto. "Current status of thin-film solar cells and future prospects," *2013 Twentieth International Workshop on Active-Matrix Flatpanel Displays and Devices (AM-FPD)*, Kyoto, 2013, pp. 21-24.

EDOFF, Marika. Thin film solar cells: research in an industrial perspective. *Ambio*. 2012;41 Suppl 2(Suppl 2):112–118. doi:10.1007/s13280-012-0265-6



BOSIO, A. Past, present and future of the thin film CdTe/CdS solar cells. Solar Energy,2018.

MME, Ministério de Minas e Energia, Relatório Anual ; Edição: 16/10/2017.

Inovação permite que células solares de plástico sejam produzidas em temperatura ambiente. Disponível em: <<https://www.ecycle.com.br/component/content/article/8-tecnologia-a-favor/5289-celulas-solares-de-plastico-sao-produzidas-em-temperatura-ambiente.html>>. Acesso em: 03 out. 2019.

Célula solar feita com spray chega a 22,4% de eficiência. Disponível em: <<https://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=celula-solar-serie-feita-spray-chega-22-4-eficiencia&id=010115181009#.XZzFMkZKjIW>> Acesso em: 03 out. 2019

Painéis solares flexíveis mais próximos da realidade. Disponível em: <<https://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=paineis-solares-flexiveis-mais-proximos-realidade&id=010115190919#.XZzF9UZKjIW>> Acesso em: 03 out. 2019

SOLAR CELL MATERIALS

Key-words: Solar-Cells, Thin-film, Silicon, Energy, Solar Energy;