

Artigo

Energia Solar Fotovoltaica: Uma Breve Revisão**Machado, C. T.; Miranda, F. S.****Rev. Virtual Quim.*, 2015, 7 (1), 126-143. Data de publicação na Web: 14 de outubro de 2014<http://www.uff.br/rvq>**Photovoltaic Solar Energy: A Briefly Review**

Abstract: Although the sun sends more energy in one hour than the planet Earth consumes in a year, it is not the most important source of energy powering the planet. Acquiring a photovoltaic system is still expensive and the effectiveness of the most commercial modules is of only 15%. In general, these modules are made of mono or polycrystalline silicon, which are called first generation cells. There are also amorphous silicon cells that have 7% efficiency, and to a lesser extent, there are the CdTe, CIGS (CuInGaSe₂) and CIS (CuInSe₂) cells that have efficiency around 11%. These are thin film cells, called second-generation cells. There are also third generation cells that are still in the research stage and no commercial cells are available in the market. The third generation cells are the organic cells, dye-sensitized solar cells (DSSC) and solar cells based on quantum dots. Germany is the most developed country in the photovoltaic field and it has established programs to encourage the use of such technology. Despite having high levels of solar radiation and one of the largest quartz reserves, Brazil just took its first steps in this field. Since 2012, after the Resolution Nº 482 of ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), a user can inject electricity into the Brazilian grid if the energy is produced by renewable sources and the industry began to develop technology in this area.

Keywords: Photovoltaic systems; solar radiation; solar cells; feed-in-tariff.

Resumo

Apesar do sol enviar em uma hora mais energia do que o planeta Terra consome em um ano, essa não é a fonte de energia mais importante do planeta. Instalar um sistema fotovoltaico ainda é caro, e a eficiência da maior parte dos módulos comerciais é de apenas 15%. Em geral, esses módulos são de silício mono ou policristalino, chamadas de células de primeira geração. Existem também as células de silício amorfo, que possuem eficiência de 7%, e em menor escala estão as células CdTe, CIGS (CuInGaSe₂) e CIS (CuInSe₂), que têm eficiência em torno de 11%. Essas são células de filme fino, ditas de segunda geração. Existem também as células de terceira geração que ainda estão em fase de pesquisa e não são encontradas no mercado. Essas são as células orgânicas, as células solares sensibilizadas por corante, também conhecidas por seu nome em inglês, *dye-sensitized solar cell* (DSSC) e as células solares baseadas em pontos quânticos (*quantum dots*). O país mais desenvolvido na área de células solares é a Alemanha, que instituiu programas de incentivo à utilização dessa tecnologia. Apesar de possuir altos níveis de radiação solar e ter uma das maiores reservas de quartzo do mundo, o Brasil apenas deu seus primeiros passos. Desde 2012, após a resolução Nº 482 da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), uma pessoa física pode injetar eletricidade na rede brasileira, se a energia é produzida por fontes renováveis, o que motivou a indústria a desenvolver tecnologia nessa área.

Palavras-chave: Sistemas fotovoltaicos; radiação solar; células solares; tarifa-prêmio.

* Universidade Federal Fluminense, Instituto de Química, Departamento de Química Inorgânica, Campus do Valonguinho, CEP 24020-141, Niterói-RJ, Brasil.

✉ miranda@vm.uff.br

DOI: [10.5935/1984-6835.20150008](https://doi.org/10.5935/1984-6835.20150008)

Energia Solar Fotovoltaica: Uma Breve Revisão

Carolina T. Machado, Fabio S. Miranda*

Universidade Federal Fluminense, Instituto de Química, Departamento de Química Inorgânica,
Campus do Valonguinho, CEP 24020-141, Niterói-RJ, Brasil.

* miranda@vm.uff.br

Recebido em 26 de fevereiro de 2014. Aceito para publicação em 14 de outubro de 2014

1. Introdução
2. Células encontradas no mercado
3. Células em fase de pesquisas
4. O Brasil e o mundo no mercado de energia solar
5. Conclusão

1. Introdução

Produzir eletricidade através da energia solar não é exatamente uma novidade. Em 1839, Edmond Becquerel, um físico francês, observou que duas placas de latão imersas em um eletrólito líquido produziam eletricidade quando expostas à luz solar. A esse fenômeno deu-se o nome de efeito fotovoltaico.¹⁻³

Em 1883, Charles Fritts, um inventor americano, construiu a primeira bateria solar feita com folhas de selênio. Apesar de ter uma eficiência de conversão elétrica de apenas 1%, seu dispositivo teve muita repercussão, pois as pessoas não acreditavam que se poderia gerar energia sem a queima de combustíveis.¹

A primeira célula solar preparada a base de silício foi desenvolvida por cientistas da Bell Labs em 1954, a célula possuía eficiência de 6%.^{1,2} Desde então, as pesquisas no ramo não pararam mais. Em 26 de abril de 1954 o

jornal americano *"The New York Times"* anunciou que as células fotovoltaicas de silício poderiam ser a possibilidade do futuro de aproveitamento de uma fonte de energia ilimitada, a radiação solar.¹

De fato, o anúncio do jornal *"The New York Times"* estava correto. A quantidade de energia que o sol fornece todos os dias à Terra é suficiente para alimentar toda demanda energética diária do planeta diversas vezes.²⁻⁶ A superfície da Terra recebe cerca de 3×10^{24} joules por ano, ou seja, $9,5 \times 10^4$ TW (Terawatts) de energia solar, cerca de 10.000 vezes a mais do que toda população terrestre consome.³ Considerando que no ano 2000 o consumo global de energia foi de 13 TW e a estimativa para 2050 é de 30 TW, a energia enviada pelo sol está sobrando excessivamente.⁵

Então porque essa fonte de energia não é utilizada em larga escala? A tecnologia atual em sistemas fotovoltaicos ainda não alcançou um patamar satisfatório. Segundo Robert F. Service:⁵ "Se todas as 70 milhões de casas

dos Estados Unidos fossem cobertas com painéis solares seriam produzidos 0,25 TW de energia elétrica, apenas 10% da energia elétrica consumida no ano 2000".

Outro problema da energia solar é que ainda é caro ter um sistema desse tipo em casa. Segundo dados do CRESESB,⁷ no mercado internacional, o custo dos sistemas fotovoltaicos para o consumidor final varia de US\$ 8 / Wp a US\$ 10 / Wp, em que Wp (Watt pico) é a potência máxima que o painel fotovoltaico pode atingir. Já no Brasil, esse valor é estimado em R\$ 10 / Wp,⁸ logo um sistema instalado de 1 KWp custaria R\$ 10.000,00. Em média, no Brasil, o retorno financeiro se dá entre 6 a 10 anos, o que não

é exatamente uma má notícia, visto que os módulos fotovoltaicos (parte mais cara do sistema) atualmente têm garantia de 25 anos.

A Tabela 1 mostra os valores de potência-pico aproximados para as principais capitais brasileiras e os países com maior representatividade no mercado fotovoltaico. Nela se observa que a Alemanha, o maior mercado fotovoltaico do mundo, precisa de uma potência instalada aproximadamente duas vezes maior que no Brasil. Vale ressaltar que os valores de irradiação utilizados para calcular a potência pico são referentes à parte central do território de cada cidade/país.

Tabela 1. Potência-pico de algumas capitais brasileiras e de alguns países

Cidade / País	Potência pico do sistema (KWp) ^{1,2}
Maceió – AL	0,98
Manaus – AM	1,03
Salvador – BA	0,98
Fortaleza – CE	0,99
Brasília – DF	0,91
Belo Horizonte – MG	0,94
Curitiba – PR	1,05
Rio de Janeiro – RJ	0,95
Porto Alegre – RS	1,02
Florianópolis – SC	1,04
São Paulo – SP	1,05
Alemanha	1,83
Espanha	1,09
Estados Unidos	1,03
Japão	1,45

¹ Potência pico calculada com base em um consumo de 158,9 KWp/mês, que é a média de consumo mensal do Brasil divulgado pela EPE em 2013.⁹

² Para uma situação real os valores podem variar devido à irradiações específicas de cada localização, efeitos de sombreamento, variação no consumo e rendimento do sistema.

Outra desvantagem do sistema fotovoltaico é que ele não gera energia durante a noite. É importante lembrar que num dia chuvoso ou nublado ocorre geração de eletricidade, no entanto, a eficiência é menor do que num dia ensolarado. Uma possível solução é o uso de baterias para armazenar energia, porém montar um banco de baterias é caro e tem vida útil pequena,

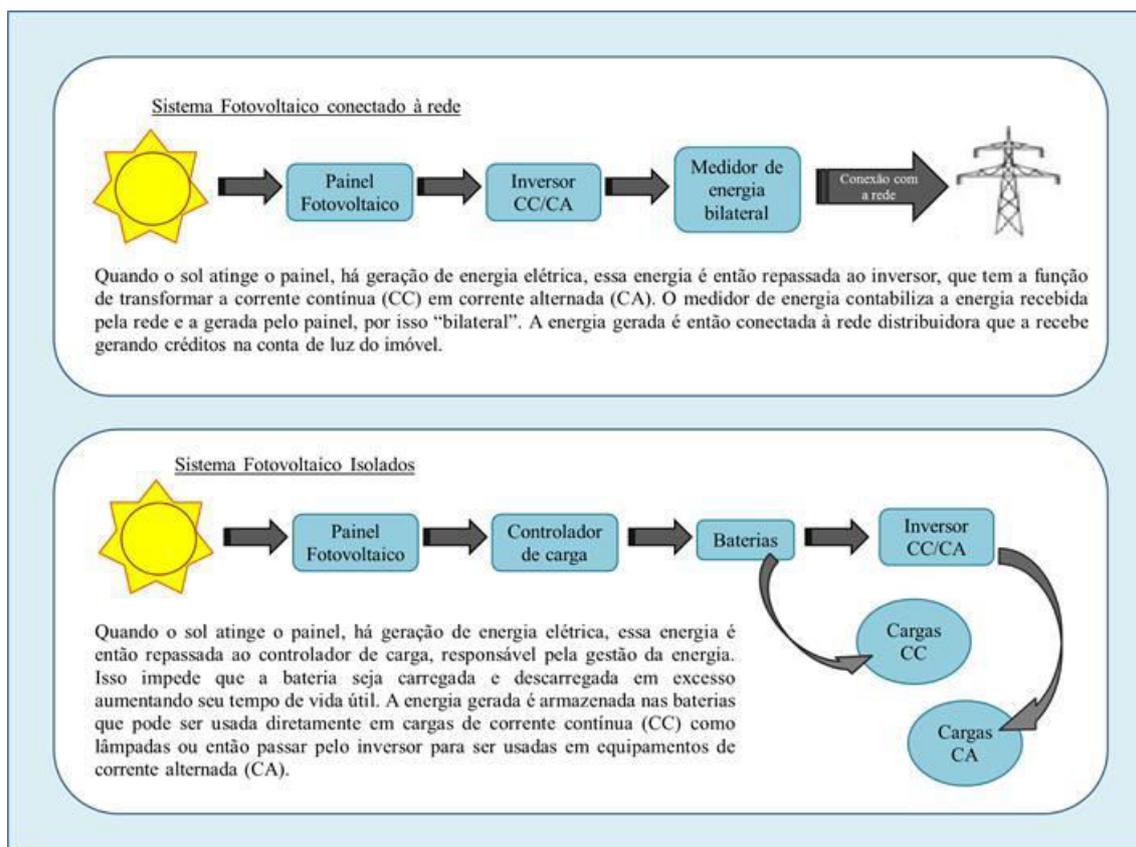
cerca de 4 a 5 anos.⁷ Deve-se considerar que o uso de baterias vai contra a ideia de sustentabilidade, pois são constituídas de elementos extremamente tóxicos, como cádmio e chumbo. As baterias apropriadas para sistemas fotovoltaicos são as de chumbo-ácido.

Desde a aprovação da Resolução nº 482 da ANEEL em dezembro de 2012, os sistemas

fotovoltaicos podem ser conectados à rede elétrica, dando maior viabilidade de utilização para o usuário final.¹⁰ Além disso, o preço dos módulos fotovoltaicos caíram substancialmente nos últimos anos.²

O Quadro 1 mostra um esquema de como funciona cada tipo de sistema fotovoltaico. A

primeira parte do esquema apresenta sistemas conectados à rede da concessionária de energia elétrica. A segunda parte refere-se a sistemas isolados que funcionam de forma independente e são utilizados principalmente em regiões remotas, embarcações, entre outras.



Quadro 1. Esquema dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede e isolado

2. Células encontradas no mercado

As células fotovoltaicas encontradas no mercado atualmente são, na grande maioria, células de silício, das quais existem três tipos. Podem ser de silício cristalino (c-Si), que se subdividem em monocristalino e policristalino, ou podem ser de silício amorfo (a-Si). Segundo dados de 2007 divulgados pelo CETEM,¹¹ as células de silício monocristalino apresentam maior eficiência de conversão fotovoltaica, em torno de 12-15%, sendo que o valor máximo encontrado

em laboratório foi de 25%, e é possível encontrar células no mercado com eficiência de até 22,7%. As células de silício policristalino têm entre 11 e 14% de eficiência, enquanto as de silício amorfo têm entre 6 e 7%.^{11,12}

As células de silício monocristalino são feitas a partir de um único cristal de silício (chamado de cristal semente) mergulhado em silício fundido, processo de Czochralski.^{11, 12} Durante o crescimento, o cristal recebe pequenas quantidades de boro formando um semicondutor dopado do tipo p (Figura 1). Nesse processo, o cristal semente é puxado

pela haste, levando à formação de um lingote de silício monocristalino do tipo p. O lingote preparado é cortado em finas fatias e levado

para o forno de difusão, onde recebe a altas temperaturas, a dopagem com fósforo, formando assim a junção p-n.¹

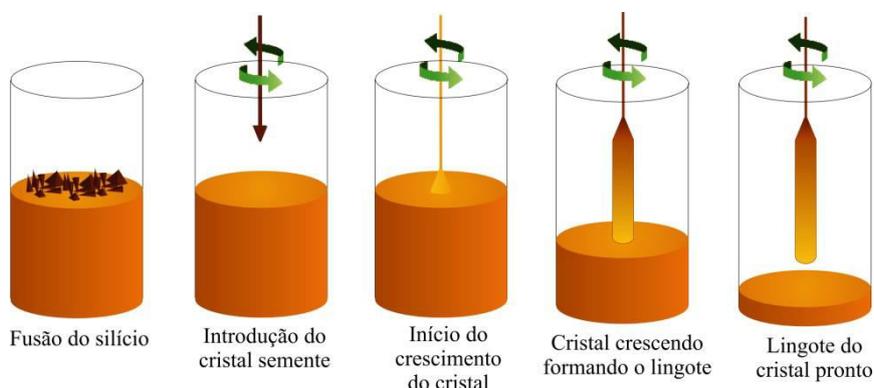


Figura 1. Crescimento do monocristal. Adaptada da referência 13

As células de silício policristalino não passam pelo processo de Czochralski. Nesse caso, o silício líquido de alta pureza do tipo p é resfriado, formando vários cristais, como é

possível ver na Figura 2. Em seguida, passa pelo mesmo processo de dopagem com o fósforo, gerando uma junção p-n como o silício monocristalino.

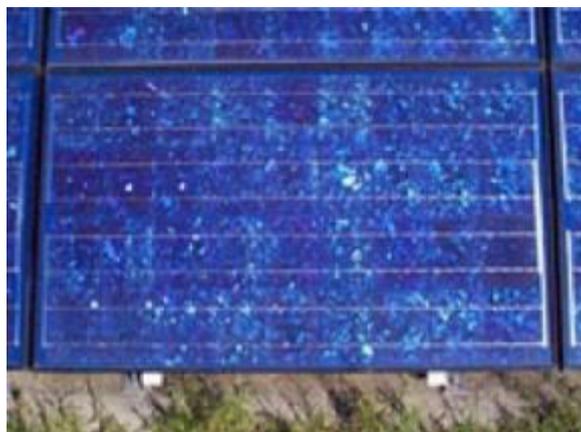


Figura 2. Painel de silício policristalino. Retirada do Sítio do Portal Energia – Energias Renováveis, reprodução com autorização

O silício puro é um semicondutor intrínseco, logo ele possui um gap de energia, que é a separação entre a banda de valência, totalmente preenchida, e a banda de condução, totalmente vazia. Ao se aquecer um semicondutor a sua condutividade aumenta. O silício possui quatro elétrons de valência que se ligam aos seus átomos vizinhos, formando a rede cristalina. A dopagem do silício com o boro gera a vacância de um elétron na rede cristalina, já

que o boro tem três elétrons de valência. Essa falta de elétrons gera o que chamamos de buracos, que podem ser completados por elétrons vizinhos, fazendo com que o buraco se desloque. Dessa forma, o boro é um aceitador de elétrons, ou seja, um dopante do tipo p. Ao fazer a dopagem com o fósforo, ao contrário do boro, haverá um elétron sobrando nas ligações, já que o fósforo tem cinco elétrons de valência. Essa “sobra” faz com que esses elétrons estejam fracamente

ligados a seu átomo de origem, permitindo que ele passe para a banda de condução facilmente, dessa forma, o fósforo é um doador de elétrons ou um dopante do tipo n.¹⁴

Quando se forma a junção p-n no material, ou seja, a justaposição do material do tipo p com o material do tipo n, surge um campo elétrico permanente na região da junção. Esse campo elétrico se forma devido ao fluxo de elétrons livres no lado n (carregado negativamente) para o lado p (carregado positivamente), tornando o lado n carregado positivamente e o lado p

carregado negativamente (Figura 3). Ao ser exposto à luz, alguns elétrons do material da célula ficam mais energéticos devido à absorção de fótons. Com essa energia extra, os elétrons são acelerados, gerando uma corrente através da junção. Esse fluxo de corrente dá origem à diferença de potencial entre as duas faces da junção p-n. Esse é o efeito fotovoltaico.^{11,14} Para coletar a eletricidade gerada utilizam-se filamentos condutores conectados em cada lado das células, que fecham o circuito, tornando a eletricidade gerada aproveitável.

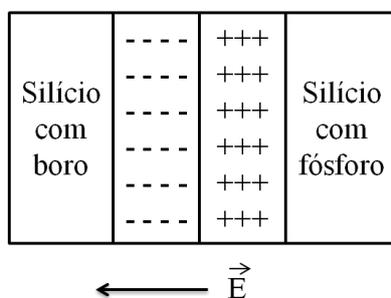


Figura 3. Acúmulo de cargas na junção p-n. Adaptada da referência 14

Para formação dos módulos comercializáveis, como mostrado na Figura 4, as células são conectadas em série através desses filamentos condutores e encapsuladas em folhas de acetato de vinil etileno (EVA), e então recebem uma cobertura frontal de vidro temperado e uma proteção, na parte

posterior, de um filme de fluoreto de polivinila (PVF), conhecido como Tedlar®. Esse conjunto laminado é montado em um perfil metálico, geralmente alumínio.¹⁵ O esquema desse módulo pode ser visto na Figura 5.



Figura 4. Módulo fotovoltaico. Retirada do sítio da Kyocera Solar do Brasil, reprodução com autorização

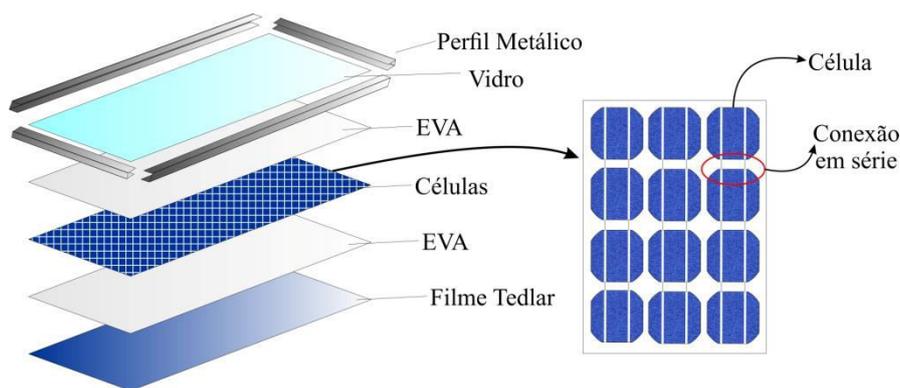


Figura 5. Esquema de módulo fotovoltaico. Adaptado da referência 15

Já as células de silício amorfo hidrogenado (α -Si ou α -Si:H) são produzidas pela deposição de filmes finos de silício. O silício amorfo não forma uma rede cristalina uniforme, como mostra a Figura 6, e devido a esse arranjo desordenado a estrutura possui muitas ligações pendentes, que formam buracos. Esses buracos podem se recombinar

com elétrons livres e prejudicar o fluxo de corrente através da célula. Por isso, faz-se a hidrogenação do silício amorfo. Assim, os hidrogênios ocupam os buracos, diminuindo a densidade de ligações pendentes e permitindo que os elétrons fluam através da célula.^{16,17}

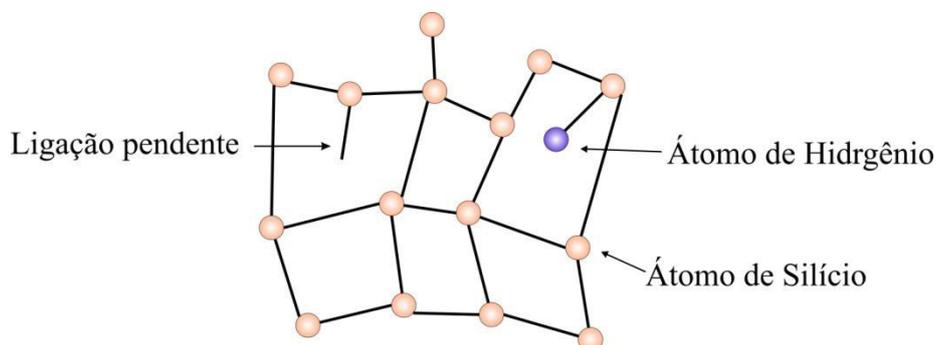


Figura 6. Representação do silício amorfo. Adaptada da referência 16

Para produção de filmes finos de silício amorfo hidrogenado, faz-se a deposição de silano (SiH_4) via descarga induzida por radiofrequência ou por deposição de vapor químico induzida por plasma. Para fazer um filme dopado do tipo n, basta utilizar atmosfera de SiH_4 contendo 1% de PH_3 , e para obter um filme do tipo p utiliza-se atmosfera de SiH_4 com 1% de B_2H_6 . As células de silício amorfo tem sua estrutura do tipo p-i-n, como mostra a Figura 7. Elas são formadas por três camadas sobrepostas de silício amorfo, a primeira é um filme dopado do tipo p, em seguida, tem um filme de silício

intrínseco, ou seja, puro, e por fim, tem um filme dopado do tipo n. A condução da corrente produzida é feita por uma folha de alumínio na parte posterior da célula e por um óxido condutor transparente (TCO) na parte frontal da célula, normalmente SnO_2 . A proteção desse conjunto na parte frontal é feita com vidro transparente, já na parte posterior o próprio alumínio exerce essa função. A eficiência dessas células chega a 12,5% em laboratório, porém em larga escala, elas possuem eficiência entre 6 a 9%.¹⁶⁻²⁰

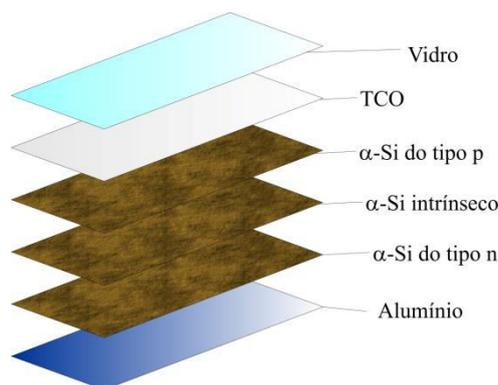


Figura 7. Estrutura da célula de silício amorfo. Adaptada da referência 16

A dopagem prejudica a qualidade de absorção da camada de silício, já que forma imperfeições na estrutura do sólido, levando a recombinações, ao mesmo tempo, o silício amorfo sozinho não fornece uma boa difusão de elétrons. Para aumentar o fluxo de elétrons, Carlson e Wronski em 1976²⁰ introduziram o conceito de junção p-i-n. A função da junção p-i-n é gerar um campo elétrico ao longo da camada de α -Si

intrínseco, assim o fluxo de elétrons ocorre através de um mecanismo de tração devido ao campo elétrico gerado.¹⁸ Como se observa nas Figuras 7 e 8, essas células são feitas de maneira inteiriça, onde um módulo é produzido diretamente a partir de uma célula, diferente das células cristalinas, em que um módulo é formado a partir da conexão em série de várias células.



Figura 8. Painel de silício amorfo. Retirada do Sítio do Portal Energia – Energias Renováveis, reprodução com autorização

Essas células têm inúmeras vantagens, e uma delas é a utilização de pouco material, pois são feitas de filme fino que pode ser depositado em diversos tipos de materiais, como vidro, metais e plásticos.

O filme fino também pode ser depositado em temperaturas menores que 300 °C, sendo possível produzir células flexíveis quando o

suporte utilizado for um material plástico que permite deformação. Outro atrativo desse tipo de célula é a sua elevada absorção ótica na região do visível, o silício amorfo absorve a luz solar com uma eficiência 40 vezes maior que o silício monocristalino. Além disso, apresenta ótimas propriedades eletrônicas quando depositado sobre o substrato

(material de suporte do filme) aquecido entre 200-400 °C. Essas características barateiam o custo de produção dessas células.^{16,18,21}

A desvantagem desse material é a sua instabilidade frente à iluminação. O silício amorfo apresenta um fenômeno de degradação induzida pela luz, chamado de efeito Staebler–Wronski (SW).²¹ A degradação normalmente se estabiliza em três meses a partir da exposição à luz, por isso, normalmente os módulos fotovoltaicos de α -Si possuem uma potência inicial maior do que a potência nominal. Nos primeiros meses, a produção de energia é maior do que a dimensionada, e depois essa produção vai diminuindo até chegar num patamar esperado, mantendo-se aproximadamente constante. O estudo do mecanismo de degradação vem avançando e tecnologias preventivas já foram desenvolvidas, porém ainda não se alcançou a completa prevenção da degradação do silício amorfo.¹⁹

A estrutura das células de α -Si, com a junção p-i-n, é do tipo junção única. Existem ainda as células com estrutura de junções múltiplas. As células de junção dupla podem ser α -Si/ α -SiGe ou silício amorfo (α -Si)/silício microcristalino (μ c-Si). Além dessas, existem as células em que não se usa silício, como a célula de junção dupla CdTe/CdS, entre outras. Já as células de junção tripla podem ser α -Si:H/ α -SiGe:H/ μ c-Si:H ou α -Si/ μ c-Si/ μ c-SiGe, entre outras. A função dessas junções múltiplas é de aumentar a eficiência da célula, já que elas têm a capacidade de absorver uma porção maior do espectro solar. Isso é ainda mais recorrente nas células de junção tripla, onde os materiais com gaps apropriados podem ser depositados de forma que na parte superior da célula haja absorção da luz azul, na parte intermediária haja absorção da luz verde e na parte inferior haja

absorção da luz vermelha, abrangendo uma larga faixa do espectro em comparação com as células de junção única.^{19,22-24}

Os módulos de silício cristalino (c-Si) são compostos por células fotovoltaicas de primeira geração e corresponderam a 86% da produção em 2010, já as células α -Si são chamadas de segunda geração, que compreendem as células de filmes finos e as células de junções múltiplas. Além das células α -Si, existem outros tipos de células de filmes finos encontradas no mercado, como a célula de CdTe (telureto de cádmio), CIGS (CuInGaSe₂) e CIS (CuInSe₂). Essas células têm eficiência em torno de 11% e, em 2010, juntamente com α -Si, foram responsáveis por 13% das vendas mundiais, sendo 3% correspondente a α -Si, 8% a CdTe e 2% referente a CIGS.^{22,25}

A célula de CdTe é composta de filmes sobrepostos, que formam uma heterojunção chamada de “janela/absorvedor”. Nessa composição, a camada janela tem um gap de energia muito alto, que permite a transmissão da luz solar para dentro da camada absorvente. Dessa maneira, o efeito fotovoltaico ocorre no interior da camada absorvente, evitando a recombinação excessiva elétron-buraco tanto na interface como na camada janela.

Um esquema da célula de CdTe é mostrado na Figura 9. O contato frontal é feito a partir de uma camada de óxido condutor transparente (TCO) depositado sobre um vidro comum. A camada seguinte é o CdS (Sulfeto de cádmio), um semiconductor do tipo n opticamente transparente, que faz o papel da camada janela. Em contato com o CdS está a camada absorvente, o CdTe, um semiconductor do tipo p, formando a junção p-n. Finalmente, no contato posterior normalmente é utilizado um metal.^{23,26}

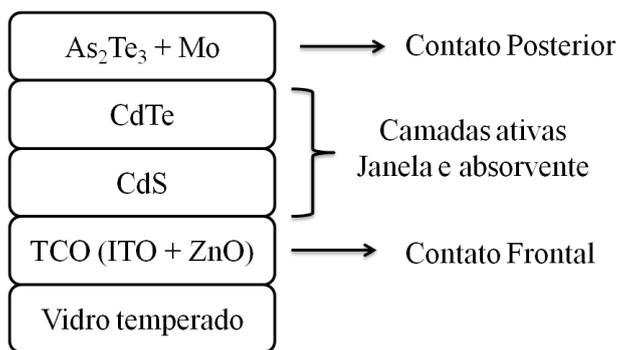


Figura 9. Esquema da célula de CdTe. Adaptada da referência 23

A estrutura das células CIS e CIGS são bem parecidas com a estrutura da célula de CdTe, elas também possuem uma camada janela e uma camada absorvente.

3. Células em fase de pesquisas

As células de 1ª geração, baseadas em silício cristalino, têm alto custo de produção e instalação, já as de 2ª geração, têm um baixo custo, porém a eficiência dessas células ainda não alcançou um patamar satisfatório que possa torná-las viáveis na substituição das células de silício cristalino. Além disso, muitas células de 2ª geração são compostas de materiais tóxicos ou raros. As células de 3ª geração compreendem as tecnologias emergentes e ainda não encontradas no mercado. Atualmente, essas células são a

possibilidade de associar eficiência e baixo custo. Nesse cenário, encontram-se, entre outras, as células orgânicas, as células solares sensibilizadas por corante, também conhecidas por seu nome em inglês, *dye-sensitized solar cell* (DSSC) e as células solares baseadas em pontos quânticos (*quantum dots*).^{22,27}

As células orgânicas são formadas pela junção de duas camadas principais, onde ocorre o efeito fotovoltaico. Uma tem a função de doar elétrons e normalmente se utiliza polímeros conjugados, como o poli(3-hexiltiofeno), também conhecido como P3HT. Já a outra camada é aceitadora de elétrons, e normalmente utiliza-se fulerenos, como o éster metílico do ácido [6,6]-fenil-C61-butírico, o PCBM. A Figura 10 mostra as estruturas do doador e do aceitador de elétrons, além de ilustrar o princípio de funcionamento dessa célula.^{28,29}

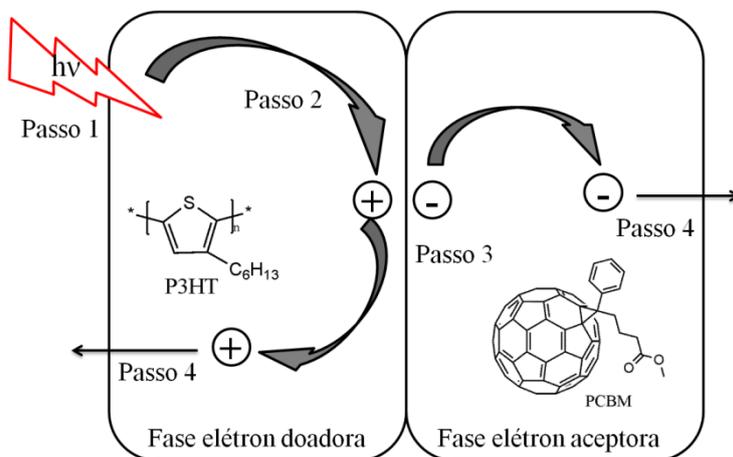


Figura 10. Princípio de funcionamento das células orgânicas. Adaptada da referência 28

Quando a luz atinge a célula, um fóton excita a fase elétron doadora (passo 1). Essa excitação é difundida para a interface entre as fases doadora e aceptora de elétrons (passo 2), onde ocorre a formação do par elétron-buraco (passo 3). Posteriormente, o

elétron migra para a fase aceptora de elétrons e o buraco migra em sentido contrário na fase doadora de elétrons (passo 4). A Figura 11 mostra o esquema de funcionamento dessa célula.²⁷

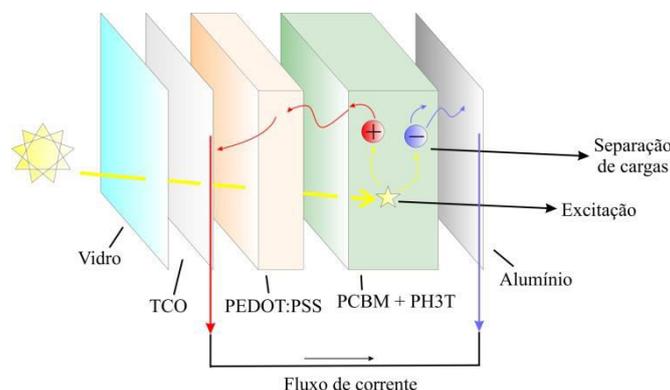


Figura 11. Esquema de funcionamento de uma célula orgânica. Adaptada da referência 29

Ao migrar para a fase aceptora, o elétron encontra o eletrodo de alumínio responsável pelo contato elétrico. Já o buraco ao migrar encontra a fase PEDOT:PSS (poli(3,4-etilenodioxitiofeno)-poli(estireno sulfonato)) com a função de transportá-los até o óxido condutor transparente (ver Figura 12). Em seguida, o buraco migra para o óxido

condutor fechando o circuito e, assim, gerando corrente elétrica. Essas células apresentam eficiência em torno de 3 a 7%. Contudo, alguns pesquisadores conseguiram aumentar a eficiência. A *Mitsubishi Chemical*, por exemplo, desenvolveu uma configuração cuja eficiência é de 10%, He, *et al.* e Small, *et al.* conseguiram em torno de 9%.^{28,30-35}

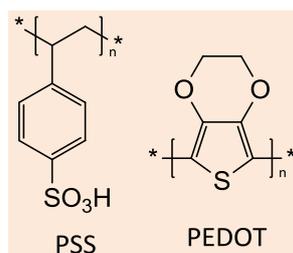


Figura 12. Estruturas químicas de PEDOT:PSS

As células solares do tipo DSSC se baseiam na utilização de um corante capaz de transferir um elétron no estado excitado para um óxido semiconductor, iniciando o processo que leva à geração de corrente. O trabalho pioneiro sobre as DSSCs foi o artigo de Grätzel de 1991,³⁶ onde ele relata o desenvolvimento desse tipo de dispositivo e afirma ter alcançado uma eficiência de 7,9%.

Desde então, as DSSCs vêm atraindo a atenção de pesquisadores e indústrias em todo mundo na tentativa de alcançar uma célula solar de baixo custo, fabricação relativamente simples e alta eficiência.^{36,37}

Como pode ser observado na Figura 13, quando um fóton atinge o corante (passo 1), este passa do estado fundamental para o excitado (passo 2) e transfere um elétron

para o semiconductor (passo 3), que por sua vez transfere esse elétron para o óxido condutor transparente (TCO), gerando a corrente (passo 4), já que o TCO está conectado ao contra-eletrodo por um contato metálico. Para fechar o circuito, o

contra-eletrodo transfere um elétron para o eletrólito (passo 5), normalmente uma solução de KI. Através de uma reação redox, o eletrólito transfere o elétron novamente para o corante (passo 6), regenerando-o e mantendo a estabilidade da célula.^{4,37}

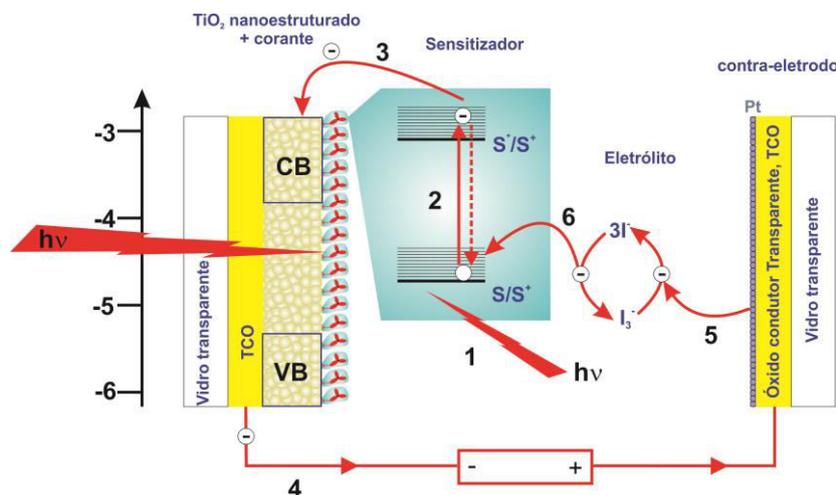


Figura 13. Esquema do funcionamento de uma célula sensibilizada por corante

Complexos de rutênio estão entre os corantes mais utilizados, a maior parte das pesquisas em DSSCs estão focadas em encontrar o corante que resultará em maior eficiência da célula. A Figura 14 mostra diversos corantes que geralmente são utilizados nos estudos desse tipo de célula. Muitos pesquisadores alcançaram eficiências significativas em seus dispositivos. Ito *et al.* e Lin *et al.* conseguiram em torno de 9% de eficiência.^{38,39}

Novos compostos de coordenação vêm sendo desenvolvidos a fim de aumentar a eficiência das DSSCs.^{40,41} Outros fatores que podem melhorar a performance das DSSCs são periodicamente discutidos na literatura, por exemplo, a substância usada como

eletrólito, a morfologia do TiO_2 e as superfícies dos eletrodos.^{42,43,44}

As células solares baseadas em pontos quânticos, também conhecidas como *quantum dots solar cells*, se subdividem em três tipos: a) metal-semicondutor (ou junção Schottky); b) células orgânicas e c) *quantum dots sensitized solar cells*. O que diferencia essas células das outras de 3ª geração é justamente a utilização dos *quantum dots*, que são nanocristais semicondutores com tamanho reduzido o suficiente para apresentar propriedades quânticas. Os nanocristais têm propriedades óptico-eletrônicas especiais, pois possuem densidades de estado semelhantes à de átomos. A Figura 15 mostra um esquema de cada uma dessas células.^{27,45}

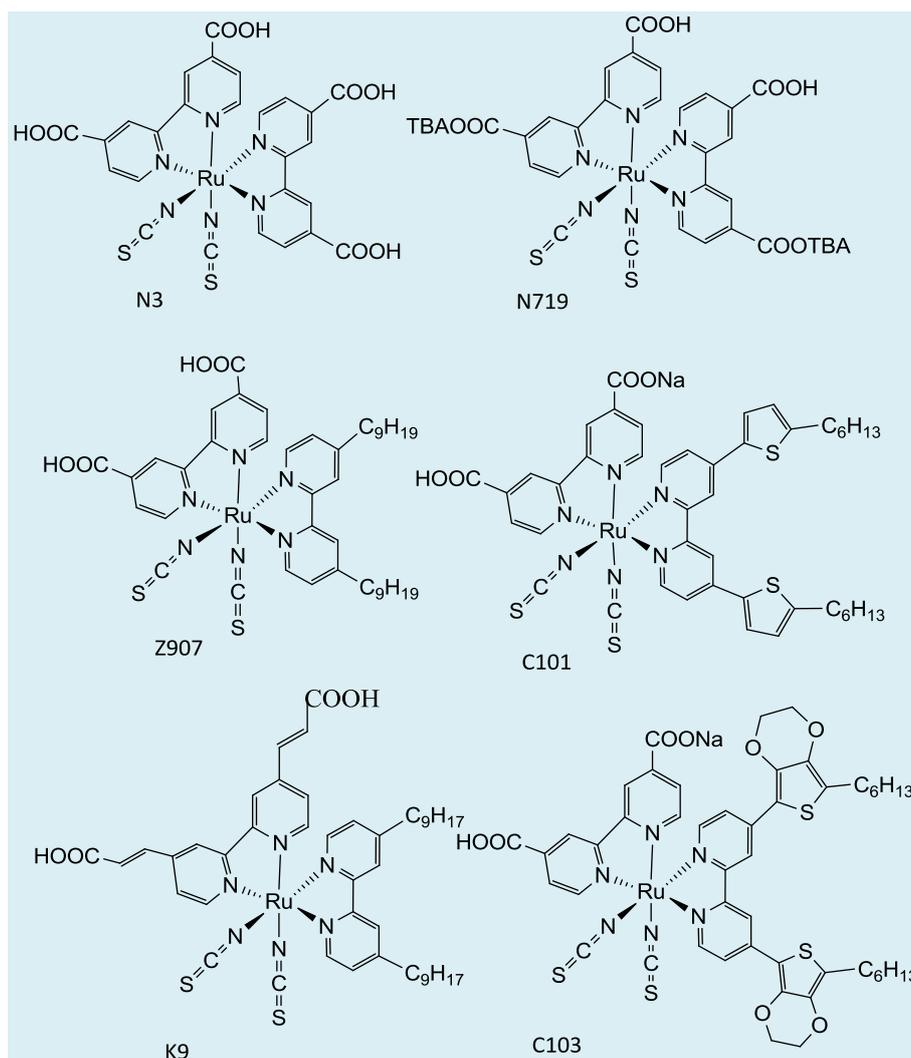


Figura 14. Substâncias frequentemente utilizados em células solares sensibilizadas por corantes

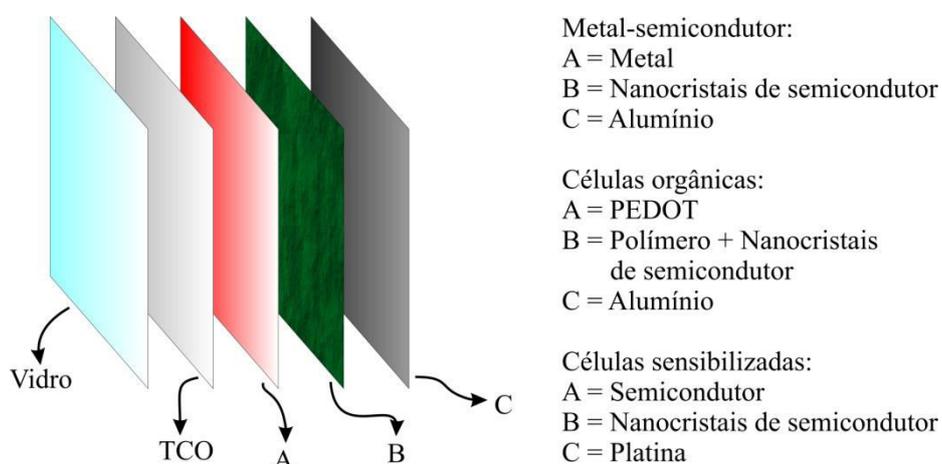


Figura 15. Esquema das células baseadas em pontos quânticos. Adaptada da referência 27

A célula do tipo metal-semicondutor se caracteriza pelo fato de o efeito fotovoltaico acontecer na interface entre o metal e os nanocristais (*quantum dots*). Essa célula pode ser do tipo TiO_2/Au , CdS/Au , CdSe/Au , PbS/ITO , entre outras. Já nas células orgânicas, o efeito fotovoltaico ocorre na interface entre um polímero e os nanocristais, como por exemplo, a junção poli(3-hexiltiofeno)/ CdS . Finalmente, nas células sensibilizadas o efeito fotovoltaico ocorre na interface entre os nanocristais e um semicondutor, por exemplo, nanocristais de CdS ou CdSe injetando elétrons em semicondutores, como TiO_2 , SnO_2 ou ZnO . Essas células ainda apresentam baixa eficiência, em torno de 1%, podendo se encontrar casos de 3 a 5%.^{27,45-47}

4. O Brasil e o mundo no mercado de energia solar

Os países mais desenvolvidos no aproveitamento da energia solar são a Alemanha, a Itália, o Japão, a Espanha e os Estados Unidos. Esses países promoveram programas para incentivar a utilização dos sistemas fotovoltaicos, e em 2011 corresponderam juntos a 88% da potência total instalada no mundo, que no mesmo ano foi aproximadamente 35 mil MW, somente a Alemanha detinha 50%. Esses programas se basearam principalmente na descentralização da produção de energia, ou seja, os sistemas fotovoltaicos instalados por pessoas físicas eram interligados à rede. Assim, toda energia produzida era automaticamente comprada pela companhia de energia.^{48, 49}

Na Alemanha, além dessa medida, o programa de incentivo visava beneficiar o pequeno produtor através do sistema de preços chamado de tarifa-prêmio (*feed-in tariff*). Esse sistema de preços considera que a energia produzida de forma renovável é mais cara que a disponível na rede pública, e, portanto, o pequeno produtor recebe a

diferença por produzir essa energia.^{48, 49}

No Brasil, desde 2012, com a Resolução Normativa nº 482 da ANEEL, o pequeno produtor pode injetar a energia produzida de forma renovável na rede, porém não recebe pela produção excedente. Além da tarifa da energia produzida pelo pequeno produtor e da rede pública serem a mesma, a pessoa física com esse sistema instalado em sua casa não recebe pelo excedente gerado. Segundo essa Resolução Normativa, o excedente gerado se tornam créditos que expiram em 36 meses.^{10, 48, 49}

O Brasil é um país privilegiado no contexto da energia fotovoltaica já que apresenta altos níveis de radiação solar. A irradiação média anual varia entre 1200 e 2400 $\text{kWh}/\text{m}^2/\text{ano}$, enquanto na Alemanha fica entre 900 e 1250 $\text{kWh}/\text{m}^2/\text{ano}$. Além disso, temos uma das maiores reservas de quartzo de qualidade e somos o quarto maior produtor de silício grau metalúrgico do mundo, que é a primeira etapa para produção de silício grau solar. Apesar dessas características, no Brasil, a capacidade atual em geração de energia por sistemas fotovoltaicos é estimada em 20 MW, sendo que 99% desses sistemas instalados correspondem ao atendimento de áreas isoladas onde a rede de distribuição não consegue alcançar.^{48, 50}

Um dos motivos mais relevantes para essa baixa procura pelos sistemas fotovoltaicos é o preço, ainda é muito caro instalar esse sistema em casa, já que os módulos tem que ser importados, pois não há indústrias desse segmento no Brasil. A única empresa brasileira que fabrica módulos fotovoltaicos é a Tecnometal, porém as células são importadas. Mas existem projetos de implantação desse tipo de indústria no país. A própria Tecnometal tem um projeto em conjunto com a Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) de implantação de uma planta piloto para produção de módulos a partir de matéria-prima e tecnologia nacional, e a Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUC-RS) possui uma planta piloto, onde se produz módulos fotovoltaicos competitivos. Os maiores

produtores de módulos no mundo são a China, com aproximadamente 50% da produção, em seguida vem Taiwan (15%), Europa (10%), Japão (10%) e Estados Unidos (5%).^{48, 51}

Em 20 de agosto de 2014 foi inaugurada em Tubarão, no sul de Santa Catarina, a maior usina solar do Brasil, nomeada de “Usina Solar Cidade Azul”, que tem atualmente 19.424 painéis solares e capacidade de geração de 3 Megawatts, ou seja, 25% de toda a energia solar produzida no Brasil. A usina foi desenvolvida pela empresa Tractebel Energia em parceria com a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), e os investimentos na construção ficaram em torno de R\$ 30 milhões.⁵²

5. Conclusão

Desde a descoberta da possibilidade de geração de energia elétrica através da energia solar muita tecnologia sobre o tema se desenvolveu, mas ainda não se alcançou um nível satisfatório, visto que os módulos mais frequentemente encontrados no mercado possuem eficiência em torno de 15%, logo a utilização desse sistema, por pessoas físicas, era praticamente inviável. Por esse motivo, muitos países promoveram políticas públicas para favorecer o uso dessa tecnologia, tornando-a viável para o consumidor. Já no Brasil, pouco se tem feito para que haja uma intensificação no mercado de energia solar. A indústria ainda é incipiente, sem representatividade no setor mundial e há pouca política de incentivo ao seu desenvolvimento. Também não há incentivo direcionado à população, como uma linha de crédito para financiar a instalação desses sistemas ou uma tarifa-prêmio como ocorre na Alemanha. O Brasil tem irradiação solar bastante significativa e o desenvolvimento de tecnologia nacional aliada à utilização de sistemas fotovoltaicos em larga escala poderia reduzir o investimento em usinas hidrelétricas e termelétricas que exigem um grande aporte

de recursos além de ter um forte impacto socioambiental.

Apêndice 1 – Lista de abreviaturas

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

CA – corrente alternada

CC – corrente contínua

CETEM – Centro de Tecnologia Mineral

CIGS – CuInGaSe_2

CIS – CuInSe_2

CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito

DSSC – *Dye-sensitized solar cells* (Célula solar sensibilizada por corante)

EVA – *ethylene-vinyl acetate* (Copolímero acetato de vinil etileno)

FTO – *Fluorine doped Tin Oxide* (óxido de estanho dopado com flúor)

ITO - *Indium tin oxide* ou *tin-doped indium oxide* (óxido de índio dopado com estanho)

MW – Megawatts

PCBM – *Phenyl-C61-butyric acid methyl ester* ([6,6]-fenil-C61-butanoato de metila)

PEDOT:PSS – *Poly(3,4-ethylenedioxythiophene)* *Polystyrene sulfonate* [poli(3,4-etilenodioxítiofeno)-poli(estireno sulfonato)]

PVF – *Polyvinyl fluoride* (Fluoreto de polivinila)

P3HT – *Poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl)* [poli(3-hexiltiofeno)]

SW – Efeito Staebler–Wronski

TCO – Óxido condutor transparente

Tedlar® – Filme de PVF registrado pela DuPont™

TW – Terawatts

Wp – Watt pico

Referências Bibliográficas

- ¹ Komp, R. J. *Practical photovoltaics: eletricity from solar cells*, 3a. ed., aatec publications: Ann Arbor, 2001.
- ² Smestad, G. P. *Optoelectronics of solar cells*, 1a. ed., SPIE: Bellingham, 2002.
- ³ Grätzel, M. Photoelectrochemical cells. *Nature* **2001**, *414*, 338. [CrossRef] [PubMed]
- ⁴ Hagfeldt, A.; Boschloo, G.; Sun, L.; Kloo, L.; Pettersson, H. Dye-Sensitized Solar Cells. *Chemical Reviews* **2010**, *110*, 6595. [CrossRef] [PubMed]
- ⁵ Service, R. F. Is It Time to Shoot for the Sun? *Science* **2005**, *309*, 548. [CrossRef] [PubMed]
- ⁶ Schiermeier, Q.; Tollefson, Jeff.; Scully, T.; Witze, A.; Morton, O. Electricity without carbon. *Nature* **2008**, *454*, 816. [CrossRef] [PubMed]
- ⁷ Sítio do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito – Perguntas Frequentes – FAQ Solar. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/content.php?catid%5B%5D=2&catid%5B%5D=5>>. Acesso em: 17 janeiro 2014.
- ⁸ Sítio da Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica – Proposta para inserção da energia solar fotovoltaica na matriz elétrica brasileira. Disponível em: <<http://www.abinee.org.br/informac/arquivos/profotov.pdf>>. Acesso em: 22 janeiro 2014.
- ⁹ Sítio da Empresa de Pesquisa Energética – Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2013. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/AnuarioEstatisticoEnergiaEletrica/Forms/Anurio.aspx>>. Acesso em: 22 janeiro 2014.
- ¹⁰ Sítio da Agência Nacional de Energia Elétrica – Resolução Normativa Nº 482, de 17 de Abril de 2012. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 22 janeiro 2014.
- ¹¹ Mori, V.; Santos, R. L. C.; Sobral, L. G. S. *Metalurgia do silício: processos de obtenção e impactos ambientais*, 1a. ed., CETEM/MCT: Rio de Janeiro, 2007.
- ¹² Green, M. A. Crystalline silicon photovoltaic cells. *Advanced Materials* **2001**, *13*, 1019. [CrossRef]
- ¹³ Sítio do MIT Open Course Ware – Fundamentals of Photovoltaics / Fall 2008. Disponível em: <<http://ocw.mit.edu/courses/mechanical-engineering/2-626-fundamentals-of-photovoltaics-fall-2008/lecture-notes/lecture9.pdf>>. Acesso em: 12 fevereiro 2014.
- ¹⁴ Guimarães, A. P. C.; Ribeiro, C. M.; Bastos, L. E. G.; Valente, L. C. G.; Silva, P. C.; Oliveira, L. X. *Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos*, edição especial, CRESEB: Rio de Janeiro, 1999.
- ¹⁵ Sítio da Tecnometal. Disponível em: <<http://www.tecnometalenergiasolar.com.br/index.html>>. Acesso em: 22 janeiro 2014.
- ¹⁶ Sítio do Departamento de Energia dos Estados Unidos. Disponível em: <<http://energy.gov/eere/energybasics/article/s/photovoltaic-silicon-cell-basics>>. Acesso em: 12 fevereiro 2014.
- ¹⁷ Staebler, D. L.; Wronski, C. R. Optically induced conductivity changes in discharge-produced hydrogenated amorphous silicon. *Journal of Applied Physics* **1980**, *51*, 3262. [CrossRef]
- ¹⁸ Sítio do Departamento de Energia dos Estados Unidos. Disponível em: <http://www1.eere.energy.gov/solar/sunshot/pv_asi.html>. Acesso em 20 junho 2013
- ¹⁹ Konagai, M. Present status and future prospects of silicon thin-film solar cells. *Japanese Journal of Applied Physics* **2011**, *50*, 1. [CrossRef]
- ²⁰ Carlson, D. E.; Wronski, C. R. Amorphous silicon solar cell. *Applied Physics Letters* **1976**, *28*, 671. [CrossRef]
- ²¹ Staebler, D. L.; Wronski, C. R. Reversible conductivity changes in discharge produced amorphous Si. *Applied Physics Letters* **1977**, *31*, 292. [CrossRef]
- ²² Sítio do National Renewable Energy Laboratory – 2010 Solar Technologies Market Report. Disponível em: <<http://www.nrel.gov/docs/fy12osti/51847.pdf>>. Acesso em: 22 janeiro 2014

- ²³ Bosio, A.; Menossi, D.; Mazzamuto, S.; Romeo, N. Manufacturing of CdTe thin film photovoltaic modules. *Thin Solid Films* **2011**, *519*, 7522. [CrossRef]
- ²⁴ Kim, S.; Chung, J.-W.; Lee, H.; Park, J.; Heo, Y.; Lee, H.-M. Remarkable progress in thin-film silicon solar cells using high-efficiency triple-junction technology. *Solar Energy Materials and Solar Cells* **2013**, *119*, 26. [CrossRef]
- ²⁵ Sítio do Departamento de Energia dos Estados Unidos – SunShot Vision Study, February 2012. Disponível em: < <http://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/47927.pdf>>. Acesso em 22 janeiro 2014.
- ²⁶ Colombo, E.; Bosio, A.; Calusi, S.; Giuntini, L.; Lo Giudice, A.; Manfredotti, C.; Massi, M.; Olivero, P.; Romeo, A.; Romeo, N.; Vittone, E. Artigo: IBC analysis of CdTe/CdS solar cells. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* **2009**, *267*, 2181. [CrossRef]
- ²⁷ Kamat, P. V. Quantum dot solar cells. Semiconductor nanocrystals as light harvesters. *The Journal of Physical Chemistry C* **2008**, *112*, 18737. [CrossRef]
- ²⁸ Greenham, N. C. Polymer solar cells. *Philosophical Transactions of the Royal Society A* **2013**, *371*, 1. [CrossRef] [PubMed]
- ²⁹ Brabec, C. J.; Durrant, J. R. Solution-processed organic solar cells. *Materials Research Society Bulletin* **2008**, *33*, 670. [CrossRef]
- ³⁰ Hau, S. K.; Yip, H.-L.; Jen, A. K.-Y. A review on the development of the inverted polymer solar cells architecture. *Polymer Reviews* **2010**, *50*, 474. [CrossRef]
- ³¹ Su, Y.-W.; Lan, S.-C.; Wei, K.-H. Organic photovoltaics. *Materials Today* **2012**, *15*, 554. [CrossRef]
- ³² Small, C. E.; Chen, S.; Subbiah, J.; Amb, C. M.; Tsang, S.-W.; Lai, T.-H.; Reynolds, J. R.; So, F. High-efficiency inverted dithienogermole-thienopyrrolodione based polymer solar cells. *Nature Photonics* **2012**, *6*, 115. [CrossRef]
- ³³ He, Z.; Zhong, C.; Su, S.; Xu, M.; Wu, H.; Cao, Y. Enhanced power-conversion efficiency in polymer solar cells using an inverted device structure. *Nature Photonics* **2012**, *6*, 591. [CrossRef]
- ³⁴ Günes, S.; Neugebauer, H.; Sariciftci, N. S. Conjugated Polymer-Based Organic Solar Cells. *Chemical Reviews* **2007**, *107*, 1324. [CrossRef] [PubMed]
- ³⁵ Clarke, T. M.; Durrant, J. R. Charge Photogeneration in Organic Solar Cells. *Chemical Reviews* **2010**, *110*, 6736. [CrossRef] [PubMed]
- ³⁶ O'Regan, B.; Grätzel, M. A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films. *Nature* **1991**, *353*, 737. [CrossRef]
- ³⁷ Jena, A.; Mohanty, S. P.; Kumar, P.; Naduvath, J.; Gondane, V.; Lekha P.; Das, J.; Narula, H. K.; Mallick, S.; Bhargava, P. Dye sensitized solar cells: A review. *Transactions of the Indian Ceramic Society* **2012**, *71*, 1. [CrossRef]
- ³⁸ Ito, S.; Chen, P.; Comte, P.; Nazeeruddin, M. K.; Liska, P.; Péchy, P.; Grätzel, M. Fabrication of screen-printing pastes from TiO₂ powders for dye-sensitized solar cells. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* **2007**, *15*, 603. [CrossRef]
- ³⁹ Lin, C.-J.; Yu, W.-Y.; Chien, S.-H. Transparent electrodes of ordered opened-end TiO₂-nanotube arrays for highly efficient dye-sensitized solar cells. *Journal of Materials Chemistry* **2010**, *20*, 1073. [CrossRef]
- ⁴⁰ Parussulo, A. L. A.; Iglesias, B. A.; Toma, H. E.; Araki, K. Sevenfold enhancement on porphyrin dye efficiency by coordination of ruthenium polypyridine complexes. *Chemical Communications* **2012**, *48*, 6939. [CrossRef] [PubMed]
- ⁴¹ Guimaraes, R. R.; Parussulo, A. L. A.; Toma, H.E.; Araki, K. New tunable ruthenium complex dyes for TiO₂ solar cells. *Inorganic Chimica Acta* **2013**, *404*, 23. [CrossRef]
- ⁴² Hardin, B. E.; Snaith, H. J.; McGehee, M. D. The renaissance of dye-sensitized solar cells. *Nature Photonics* **2012**, *6*, 162. [CrossRef]
- ⁴³ Kamat, P. V.; Tvrdy, K.; Baker, D. R.; Radich, J. G. Beyond Photovoltaics: Semiconductor Nanoarchitectures for Liquid-Junction Solar Cells. *Chemical Reviews* **2010**, *110*, 6664. [CrossRef] [PubMed]
- ⁴⁴ Huang, X.; Han, S.; Huang, W.; Liu, X. Enhancing solar cell efficiency: the search for luminescent materials as spectral converters. *Chemical Society Reviews* **2013**, *42*, 173. [CrossRef] [PubMed]

- ⁴⁵ Muzakir, S. K.; Alias, N.; Yusoffab, M. M.; Jose, R. On the missing links in quantum dot solar cells: a DFT study on fluorophore oxidation and reduction processes in sensitized solar cells. *Physical Chemistry Chemical Physics* **2013**, *15*, 16275. [CrossRef] [PubMed]
- ⁴⁶ Johnston, K. W.; Pattantyus-Abraham, A. G.; Clifford, J. P.; Myrskog, S. H.; MacNeil, D. D.; Levina, L.; Sargent, E. H. Schottky-quantum dot photovoltaics for efficient infrared power conversion. *Applied Physics Letters* **2008**, *92*, 151115. [CrossRef]
- ⁴⁷ Saunders, B. R.; Turner, M. L. Nanoparticle-polymer photovoltaic cells. *Advances in Colloid and Interface Science* **2008**, *138*, 1. [CrossRef] [PubMed]
- ⁴⁸ Sítio da Empresa de Pesquisa Energética – Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira 2012. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/geracao/Documents/Estudos_23/NT_EnergiaSolar_2012.pdf>. Acesso em: 23 janeiro 2014.
- ⁴⁹ Sítio da Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica – Relatório do Grupo de Trabalho de Geração Distribuída com Sistemas Fotovoltaicos – GT-GDSF – Portaria n.º 36, de 26 de Novembro de 2008. Disponível em: <<http://www.abinee.org.br/informac/arquivos/mmegtsf.pdf>>. Acesso em: 23 janeiro 2014.
- ⁵⁰ Sítio da U. S. Geological Survey – Mineral Commodity Summaries 2013. Disponível em: <<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2013/mcs2013.pdf>>. Acesso em: 09 janeiro 2014
- ⁵¹ Sítio da Universidade Estadual de Campinas – Jornal da UNICAMP, 2012. Disponível em: <<http://www.unicamp.br/unicamp/ju/530/grupo-purifica-silicio-para-fabricacao-de-celulas-solares>>. Acesso em: 09 janeiro 2014
- ⁵² Sítio da Usina Solar Cidade Azul. Disponível em: <<http://www.tractebelenergia.com.br/wps/portal/internet/parque-gerador/usinas-complementares/solar-cidade-azul>>. Acesso em: 13 setembro 2014.