

# UMA REVISÃO SOBRE AS TECNOLOGIAS FOTOVOLTAICAS ATUAIS

**Alexandre José Bühler** – [alexandre.buhler@farroupilha.ifrs.edu.br](mailto:alexandre.buhler@farroupilha.ifrs.edu.br)

**Fernando Hoefling dos Santos** – [fernando.santos@farroupilha.ifrs.edu.br](mailto:fernando.santos@farroupilha.ifrs.edu.br)

**Ivan Jorge Gabe** – [ivan.gabe@farroupilha.ifrs.edu.br](mailto:ivan.gabe@farroupilha.ifrs.edu.br)

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, IFRS - Campus Farroupilha  
Grupo de Pesquisa Aplicada em Energias Renováveis - GPAER

**Resumo.** *Este documento apresenta uma revisão sobre as principais tecnologias fotovoltaicas existentes hoje no mercado ou a nível de pesquisa. São apresentados os recordes de eficiência de conversão para células e módulos, bem como as eficiências típicas encontradas no mercado. Também é realizada uma análise sobre a participação no mercado por tecnologia.*

**Palavras-chave:** *Silício amorfo, CdTe, Tecnologias fotovoltaicas*

## 1. INTRODUÇÃO

Nenhuma outra fonte de energia apresentou um crescimento como a energia solar fotovoltaica no passado recente. Entre os anos de 2010 e 2016 esta fonte de energia apresentou um crescimento anual médio de 40%, saltando de uma potência instalada de menos de 50GW em 2010 para mais de 320 GW no final de 2016 (Fraunhofer, 2017). Somente no ano de 2016 foram instalados cerca de 76 GW em todo o mundo (IEA, 2017). Considerando módulos de 250 W, que é uma potência bastante usual para módulos no mercado fotovoltaico, isso significa que foram instalados, somente em 2016, mais de 34 mil módulos por hora.

Este crescimento da fotovoltaica se deve a vários fatores, entre os quais se podem citar a diminuição nos custos de fabricação, aumento na eficiência dos módulos e facilidade na implementação de sistemas de pequeno e grande porte. Também é interessante notar que muitos dos fatores que contribuem para o crescimento da energia solar fotovoltaica são retroalimentados. Um exemplo interessante disso é apontado em um relatório deste ano do Fraunhofer Institute. Nos últimos 36 anos, a cada vez que a produção de módulos dobra, o preço cai em 24%, ou seja, quanto mais cresce a potência instalada, mais cai o preço e mais se instala.

Dentre as varias possibilidades de uso da energia fotovoltaica, está a utilização no ambiente construído, do inglês *Built Integrated Photovoltaics* (BIPV). Sistemas baseados em BIPV apresentam diversas vantagens, não somente a geração de energia no local de consumo, mas também relativo à melhoria do conforto térmico e das condições de iluminação interna, além é claro de agregar valor estético à construção.

Na Europa, o Plano de Eficiência Energética identificou o setor da construção como a área onde está a maior possibilidade de economia de energia e de emissão de gases do efeito estufa. O plano exige que 3% de todos os edifícios públicos sejam renovados por ano, até 2020. Depois de 2020, todos os edifícios construídos devem ser virtualmente isentos de carbono, ou seja, devem ser capazes de gerar a energia para seu consumo (European Commission, 2011). Não somente por esta razão, mas fortemente apoiada por ela, o mercado fotovoltaico tem voltado esforços nos últimos anos para desenvolver produtos que, além de gerar energia com eficiências não muito distantes dos módulos fotovoltaicos tradicionais, também tenham uma aparência diferenciada. Neste ponto, as tecnologias da chamada primeira geração não apresentam um atrativo tão interessante. Por outro lado, outras tecnologias tem ganhado cada vez mais espaço no ambiente construído, notadamente as de segunda geração. Ainda, as chamadas tecnologias de terceira geração, as células de Perovskita, representam uma grande expectativa para o futuro, no sentido de aumento de eficiência e diminuição de custos.

Este artigo faz uma breve revisão sobre as principais tecnologias de células fotovoltaicas existentes hoje no mercado mundial e aborda algumas tendências para o futuro.

## 2. PRINCIPAIS TECNOLOGIAS FOTOVOLTAICAS

Existem atualmente muitas tecnologias fotovoltaicas em desenvolvimento, algumas com grande expectativa de oferecer uma revolução em termos de relação preço/eficiência. Entretanto, existem apenas seis tecnologias com representatividade no mercado fotovoltaico mundial hoje, tal qual apresentado na Figura 1.

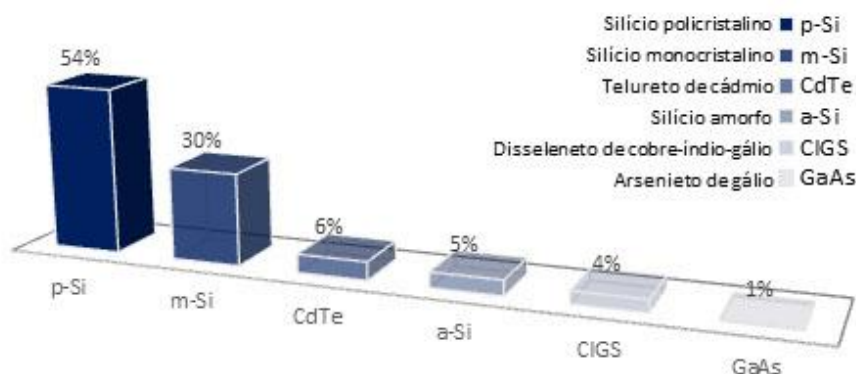


Figura1 - Participação no mercado mundial de cada tecnologia fotovoltaica. Adaptado de Osarumen, O. et al (2016).

De forma geral pode-se dividir as tecnologias que existem atualmente em três categorias, denominadas gerações, tal como apresentado na Figura 2.

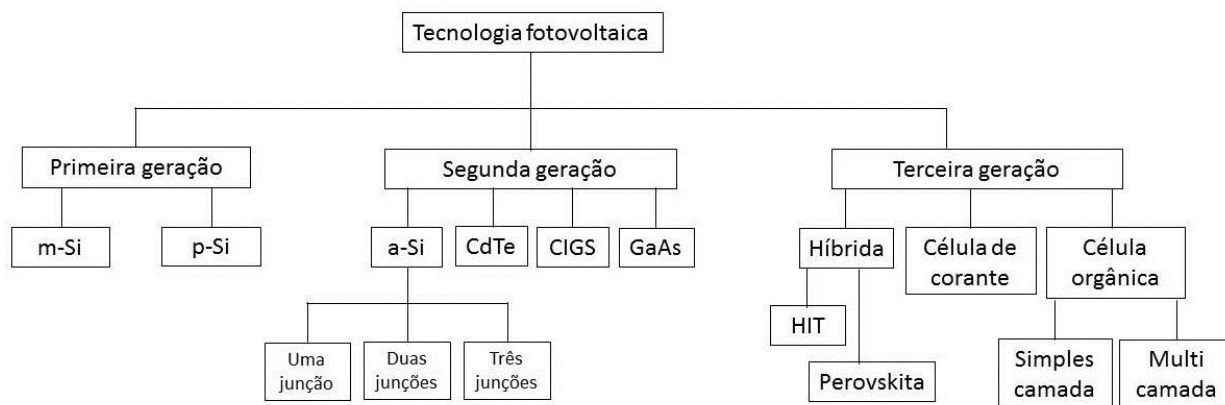


Figura2 - Diagrama para as principais tecnologias de células fotovoltaicas existentes atualmente. Adaptado de Kumar, M., Kumar, A. (2017).

### 2.1. Primeira geração

A primeira geração é constituída pelo silício cristalino e o arseneto de gálio. Recebe este nome porque correspondem as primeiras tecnologias de células fotovoltaicas que obtiveram uso comercial em meados de 1950. Atualmente as células de silício cristalino são produzidas a partir de discos muito finos, entre 100 e 200 μm (Goodrich, A, et al, 2013). A primeira geração, além de ser a que possui maior representatividade no mercado mundial, cerca de 84%, é também a que apresenta as maiores eficiências de conversão (excluindo células com mais de uma camada). Além disso, apresenta os preços mais baixos no mercado mundial. Como exemplo, no caso da Europa, é fácil encontrar módulos custando menos de 0,40 €/W e é possível encontrar módulos chineses custando menos de 0,30 €/W (PV Europe, 2017).

A primeira geração é constituída de dois representantes:

**Silício monocristalino (m-Si).** Basicamente é o silício obtido a partir do crescimento de um único cristal com alto grau de pureza (impurezas representam apenas algumas partes por milhão). Devido ao processo e natureza do crescimento do cristal, método Czochralski (Honsberg e Bowden, 2017), o produto obtido é um cilindro. Do cilindro são laminados discos finos (da ordem de 100 μm). Como a eficiência de conversão de um dispositivo fotovoltaico é definida pela Eq. (1), no caso de um módulo, quanto maior for a área preenchida com material fotovoltaico, maior será a eficiência. Por essa razão, os discos obtidos da laminação do tarugo de m-Si são cortados em quatro lados de forma a dar um aspecto quadrado. Isto é feito para minimizar a área do módulo que não esta preenchida com material fotovoltaico.

$$\eta = \frac{E_{out}}{E_{in}} = \frac{P_m}{G_{std}A_m} \tag{1}$$

Onde:  $\eta$  é a eficiência do módulo,  $E_{out}$  é a energia de saída do módulo,  $E_{in}$  é a energia de entrada do módulo,  $P_m$  é a máxima potência do módulo,  $G_{std}$  é a irradiância na condição padrão de ensaio ( $1000 \text{ W/m}^2$  com distribuição espectral AM1.5) e  $A_m$  é a área do módulo, medida desde a moldura do mesmo, caso esta exista.

O custo de fabricação de um módulo de m-Si é mais elevado em comparação com boa parte das tecnologias fotovoltaicas existentes. Isso ocorre devido ao processo de fabricação das células de silício monocristalino ser complexo, sofisticado e caro (Kumar, M., Kumar, A., 2017).

Excluindo células compostas por mais de uma camada, que tem a propriedade de aproveitar uma faixa ampla do espectro solar, o silício monocristalino apresenta a maior eficiência de conversão para módulos comerciais. Considerando também módulos para aplicações especiais, o arseneto de gálio possui eficiência mais alta. O módulo disponível hoje no mercado com a maior eficiência de conversão é o SPR-X21-345, fabricado pela empresa Sun Power com 21,5% de eficiência, embora o recorde de eficiência para um módulo seja um pouco maior, 24,1% (Smith, D.D., 2016). Em geral módulos de silício monocristalino apresentam eficiências entre 16 e 18%.

**Silício policristalino (p-Si).** Devido ao processo de produção, o custo do p-Si é consideravelmente menor que o m-Si. As células policristalina são obtidas a partir da solidificação do silício, formando um cubo que pode então ser cortado em células quadradas. Por esse processo ocorre a formação de inúmeros cristais. A eficiência de uma célula de p-Si é menor que uma célula de m-Si. Esta eficiência é tanto menor quanto menores forem os cristais que a formam, o que justifica as eficiências mais altas dos módulos mais recentes que apresentam cristais com tamanhos da ordem de centímetros. Por outro lado, como as células podem ser cortadas em quadrados, a área de um módulo efetivamente preenchida com material fotovoltaico é maior no caso do p-Si em comparação ao m-Si. Por essa razão, em geral, a eficiência de um módulo de silício policristalino é próxima a de um módulo de silício monocristalino. A Fig. 3 apresenta uma comparação entre um módulo típico de m-Si e p-Si e a relação de quadratura das células.

A eficiência de módulos de p-Si atualmente se encontra entre 14 % e 16 % embora seja possível encontrar módulos dessa tecnologia com eficiências superiores a 17%. Os módulos da família Tallmax da empresa Trina Solar possuem eficiências de até 17,3%.

Atualmente, o p-Si é a tecnologia com a maior representatividade no mercado mundial. Isto se deve a vários fatores, mas principalmente ao baixo custo de produção e eficiência comparável ao m-Si.

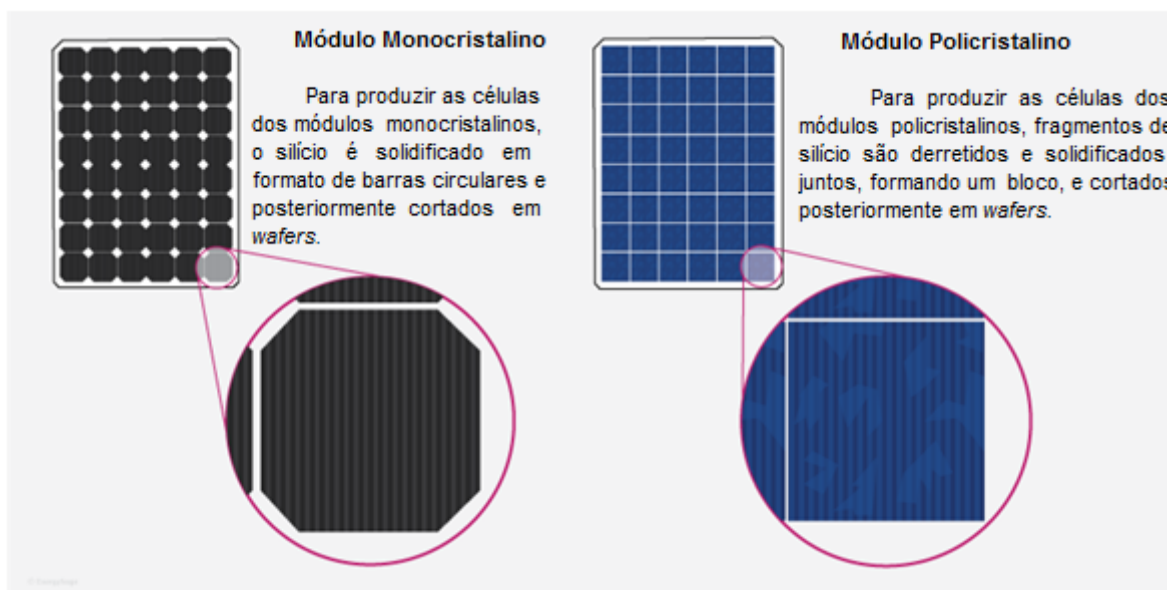


Figura 3 – Comparação entre células de p-Si e m-Si e sua disposição em módulos fotovoltaicos. Se observa que quanto maior a quadratura da célula, maior a eficiência do módulo. Adaptado de Energysage (2017).

## 2.2. Segunda geração

A segunda geração corresponde aos filmes finos. Filme fino é uma denominação dada a tecnologias fotovoltaicas que empregam materiais com espessuras da ordem de apenas  $1 \mu\text{m}$  (aproximadamente 100 vezes menos espessa do que lâminas de silício cristalino). O processo de fabricação é muito diferente do silício cristalino, consistindo basicamente na deposição de uma ou mais camadas de filme fotossensível em um substrato, como o vidro, plástico, cerâmico ou metal (Fthenakis, V.M., 2004). Esta deposição pode se dar por meio de diversos processos, tais como pulverização catódica, eletrodeposição, CBD (deposição por banho químico), CSS (sublimação em espaço reduzido) e LPCVD (deposição química a vapor em baixas pressões).

Uma vez que módulos de filmes finos empregam muito menos material na sua fabricação, essa tecnologia apresenta um alto potencial de redução de custos. Entretanto, até o presente momento, apesar dos custos terem baixado

muito nos últimos anos, não se observou um crescimento percentual significativo dos filmes finos no mercado. Isso ocorre, principalmente, pela significativa redução de preço de módulos de primeira geração, aliados a sua maturidade no mercado e razoável eficiência de conversão.

Basicamente os filmes finos se dividem em três materiais a seguir descritos:

**Silício amorfo (a-Si).** A absorvidade da radiação solar do a-Si é 40 vezes mais eficiente do que o silício monocristalino, o que permite que uma lâmina de apenas 1  $\mu\text{m}$  seja capaz de absorver 90% da energia solar útil (Lasnier, F. e Ang, T. G., 1990). Sendo utilizado pela primeira vez em células solares no ano de 1974, o a-Si é o material entre os filmes finos mais estudado até o presente momento. Este material apresenta uma resposta espectral mais voltada para a região do azul do espectro eletromagnético, o que aumenta a sua eficiência sob irradiação difusa.

Um detalhe importante a favor do a-Si é que sua potência diminui com o aumento da temperatura, mas em uma taxa relativa menor do que ocorre com a tecnologia cristalina como pode ser observado em Virtuani, A., Strepparava, D. (2017). Um aspecto negativo importante do silício amorfo é que nos primeiros meses de utilização seu desempenho elétrico diminui muito devido ao chamado efeito Staebler-Wronski. A empresa Unisolar, por exemplo, especifica que seus módulos têm uma redução na máxima potência da ordem de 15 % nas primeiras oito a dez semanas de uso, entretanto, de acordo com um trabalho publicado por Rüther et al. (2003) essa diminui  o pode chegar a 35 % em módulos desta tecnologia. Ainda neste trabalho constata-se que o tempo de estabiliza  o da potência gerada por um módulo de silício amorfo    da ordem de cinco meses. Existe, porém outro efeito importante que ocorre com o a-Si chamado de *thermal annealing* (recozimento térmico). Basicamente, o que ocorre    que uma vez exposto a altas temperaturas, que podem ser atingidas durante a exposi  o dos módulos a irradia  o solar, parte da degrada  o causada pelo efeito Staebler-Wronski    revertida, fazendo assim com que a eficiência dos módulos aumente. Essa    a principal razão pela qual diversos autores afirmam que o a-Si    mais apropriado para regiões de climas quentes. Maiores detalhes sobre o efeito de *thermal annealing* podem ser encontrados em Makrides, G., et al. (2011).

Existem diversas configura  es de módulos de a-Si, incluindo módulos flexíveis onde as caixas de conexão ficam na parte frontal do módulo, permitindo assim que esses módulos sejam instalados diretamente sobre o telhado de uma residência ou fábrica, o que elimina custos com estruturas de fixa  o. A eficiência de módulos comerciais de silício amorfo encontra-se na faixa de 5% a 8%, sendo o recorde mundial para uma célula de 10,2% (Green, M. A., et al., 2017).

Apesar de baixa, a eficiência do a-Si experimenta um aumento de até 20 % nos meses mais quentes do ano, como comentado por Notton, G. (2010). Esse aumento se deve principalmente ao efeito de *thermal annealing*. Além disso, embora a eficiência de conversão seja considerada baixa se comparada a outras tecnologias, módulos para BIPV de silício amorfo podem apresentar incríveis razões de performance de até 1,245 como apresentado em Myong, S. Y. (2016).

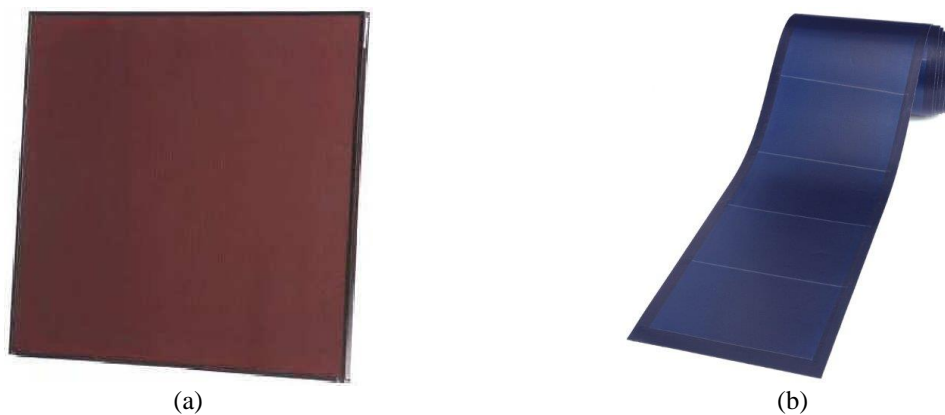


Figura 4 – Exemplos de módulo de silício amorfo de uma jun  o rígido (a) e de tripla jun  o flexível (b).

**Arsenieto de Gálio (GaAs).** As células fotovoltaicas baseadas em GaAs correspondem a uma combina  o de gálio (Ga) e ars  nio (As) e têm estrutura cristalina podendo ser depositado na forma de filmes finos (Akinyele, D. O., 2015). Possui uma propriedade única de resistência ao calor, e isso torna uma op  o adequada para sistemas fotovoltaicos com concentra  o e aplica  es espaciais.

O GaAs possui alto nível de absor  o. Exige apenas alguns  $\mu\text{m}$  de espessura para absorver a luz solar e possui têm uma eficiência de conversão de 29%, que    a mais alta para qualquer célula de jun  o única (Kapusta, R., 2014).

Células de GaAs possuem maior eficiência e menor peso se comparadas ao silício cristalino, porém o custo de fabrica  o têm muito mais elevado. Devido ao seu alto custo, o GaAs    usado apenas em casos especiais de alto   ndice de radia  o e temperatura. As principais utiliza  es deste material incluem células de multi-jun  o, sistemas com concentra  o, satélites e carros solares (Kapusta, R., 2014).

A Fig. 5 apresenta uma célula de GaAs de filme fino depositada sobre um substrato de Ge.

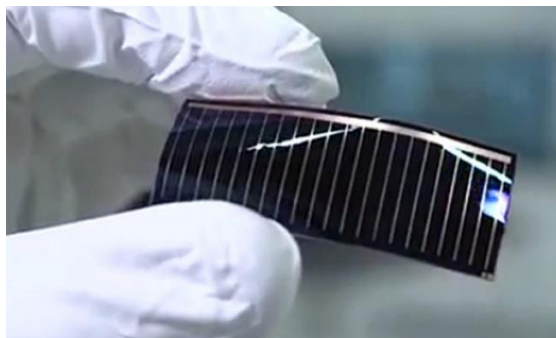


Figura 5 -. Célula de GaAs de filme fino depositada sobre um substrato de Ge (Alta Devices, 2017).

**Disseleneto de cobre-índio e cobre-índio-gálio (CIS e CIGS).** Os materiais CIS e CIGS correspondem a uma forma multicristalina de filmes finos cujas propriedades vêm sendo estudadas desde 1980. Assim como o a-Si o CIGS também possui um elevado coeficiente de absorção, o que permite absorver cerca de 90 % dos fótons incidentes com energia superior a 1 eV para uma espessura de 1  $\mu\text{m}$  a 3  $\mu\text{m}$ . Outro fator favorável a esta tecnologia é a boa resistência ao aquecimento que ela possui, propriedade fundamental para aplicações espaciais. Também, tal qual o a-Si ou o CdTe estes materiais apresentam uma excelente aparência estética o que possibilita seu uso em telhados e fachadas, constituindo instalações incorporadas à construção.

Existem diversas empresas que comercializam módulos da família do CIGS, tais como a inglesa BIPV, a Tailandesa Eterbright Solar e a norte americana Solartech Power. O recorde de eficiência para módulos, entretanto, pertence à empresa Japonesa Solar Frontier com 19,2% para um submódulo de 30 x 30 cm (Green, M. A., 2017), embora esse módulo não esteja comercialmente disponível. Valores de eficiência entre 13 e 14% são mais comumente encontrados em módulos da família CIGS. Valores acima de 14% podem ser encontrados no modelo STL-155A da empresa Stion (14,5%) ou no modelo TS-160C1 da empresa TSMC (14,7%).

Tal como o CdTe, os materiais da família CIS e CIGS apresentam o chamado efeito de *light soaking* e, portanto, uma margem de segurança com relação à tensão de circuito aberto também deve ser levada em conta no dimensionamento de um sistema que utilize módulos dessa tecnologia. Com relação à variação da eficiência desses módulos em função da temperatura, os mesmos apresentam variações similares a de módulos de silício cristalino.

**Telureto de Cádmio (CdTe).** Graças ao seu alto nível de absorvidade ótica, células de CdTe podem ser fabricadas com eficiências de conversão próximas ao p-Si, mas utilizando apenas 1 % a 2 % do material requerido para essa tecnologia. A eficiência de conversão do CdTe, assim como do a-Si, apresenta uma variação mais intensa do que o m-Si e p-Si ao longo do dia e ao longo do ano. Isso ocorre porque, sendo a curva de resposta espectral mais estreita, variações na distribuição espectral da radiação solar podem afetar significativamente a parcela do espectro que se encontrara dentro da resposta espectral do CdTe. A Fig. 6 apresenta algumas curvas de resposta espectral típicas para sete diferentes tecnologias fotovoltaicas. Pode-se observar como a largura das curvas do silício cristalino e do CIGS são maiores do que a dos outros materiais.

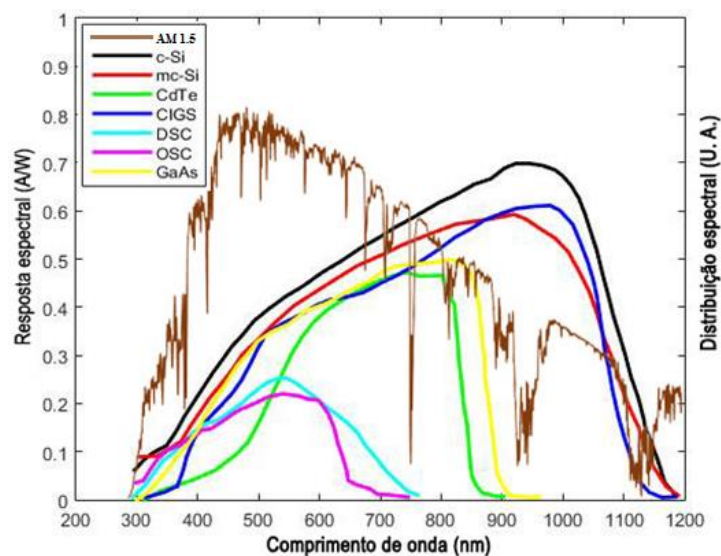


Figura 6 – Curvas de resposta espectral de algumas tecnologias fotovoltaicas e espectro solar padrão para radiação global AM 1.5. Adaptado de Sandia National Laboratories (2017).



O recorde de eficiência para uma célula depositada em vidro de CdTe esta hoje em 21% e pertence à empresa *First Solar*. No caso dos módulos comerciais, a maior eficiência de conversão pertence ao modelo FS 4122-3 da empresa *First Solar* com 17% de eficiência.

Existem diversas empresas que fabricam módulos de CdTe atualmente das quais se podem citar a chinesa *Advanced Solar Power*, a alemã *Antec Solar* e a empresa de Singapura *Microsys International*. Entretanto, a maior fabricante de módulos de CdTe no mundo é a empresa americana *First Solar*, capaz de produzir módulos com um valor de apenas US\$ 0,46/Wp (Rix, A., 2015). Entretanto, o preço dos módulos para compras em quantidades reduzidas, para instalações residenciais, por exemplo, é consideravelmente maior.

Módulos baseados em CdTe apresentam importantes efeitos ativados por exposição à luz, denominado em inglês por *light soaking*. Esses efeitos metaestáveis consistem basicamente em um aumento na eficiência de conversão do dispositivo fotovoltaico após horas de exposição à radiação solar. O tempo necessário para que os efeitos metaestáveis se pronunciem varia muito com a técnica de fabricação e com outros diversos aspectos, de forma que esse tema ainda é objeto de estudo pertinente na comunidade científica. Para ter uma ideia da importância que esse efeito no dimensionamento de um sistema com módulos de CdTe, em um trabalho publicado por Del Cueto e Von Roedern (2006) os autores chamam a atenção de que a tensão de circuito aberto de cada módulo pode aumentar em até 6% após algumas centenas de horas de exposição à irradiação solar.

Atualmente o CdTe é a tecnologia de filmes finos com maior importância no cenário mundial. Isto se deve, por exemplo, ao fato de que desde 2007, a cada ano a maior fatia do mercado fotovoltaico entre os filmes finos pertence ao CdTe. Em 2016 foram produzidos 3,1 GW de CdTe contra 1,3 de CI(G)S e apenas 0,5 GW de a-Si. Grandes centrais fotovoltaicas compostas por módulos de CdTe também representam uma parcela expressiva do potencial instalado no mundo. Um exemplo é a Topaz Solar Farm, usina instalada na Califórnia, EUA que conta com 550 MW de potência fornecida por 9 milhões de módulos de CdTe.

### 2.3. Terceira geração

As células solares de terceira geração usam materiais orgânicos, como pequenas moléculas ou polímeros, são representantes da terceira geração as solares orgânicas (OSC) e as células solares sensibilizadas por corante (CSSC), também conhecidas como células de Grätzel. A terceira geração também abrange as células solares de múltiplas junções, que por absorverem uma faixa ampla do espectro solar correspondem às células com as maiores eficiências entre todos os dispositivos fotovoltaicos.

As tecnologias que pertencem à terceira geração possuem como principal objetivo o aumento da eficiência de conversão, redução no custo de fabricação e adesão de características diferenciadas nas células e módulos para usos específicos, como em BIPV. Pode-se considerar que células solares de terceira geração ainda estão em seus estágios iniciais de desenvolvimento (Grossiord, N., 2012).

**Células de corante (CSSC).** Uma CSSC é um dispositivo composto, em geral, por um material semicondutor, duas faces de vidro condutor, um eletrólito, um contra eletrodo e o corante (sensibilizador). Em uma das faces do vidro condutor é depositado um filme de óxido semicondutor mesoporoso. Essa camada de óxido é sensibilizada por um corante. Na outra face de vidro condutor é depositada uma fina camada de platina, que atua como contra-eletrodo da célula. As duas partes são unidas e o eletrólito é inserido (Fernandes, S. L., 2016). Já existem dispositivos desta tecnologia em comercialização por empresas como a israelense 3GSolar que comercializa módulos como o da fotografia da Fig. 7.

O recorde de eficiência para uma CSSC pertence à empresa Sharp e é de 11,9%. Para minimódulos, o recorde é também da empresa Sharp, 10,7%.



Figura 7 – Módulo comercial de CSSC par aplicação em ambiente construído (3GSolar, 2017).

**Células orgânicas (OSC).** As células solares orgânicas correspondem a uma tecnologia que vem se desenvolvendo e ganhando popularidade como um material alternativo para células solares. Algumas propriedades interessantes das OSC são flexibilidade mecânica, baixo custo de material e produção, leves e semitransparentes. Também chamadas de células solares plásticas, são compostas por materiais orgânicos com espessura da ordem de 100 nm, como polímeros e pentaceno, ftalocianina de cobre, polifenileno vinileno e fulereno de carbono (Pandey, A., et al., 2016).

O recorde de eficiência para uma célula orgânica pertence à empresa Toshiba, 11,2%. Para mini-módulos, o recorde é também da empresa Toshiba, com 9,7%.

O princípio de funcionamento das OSC é semelhante aos materiais inorgânicos, pois também envolve a formação de pares elétron-lacuna, porém envolve um nível de complexidade maior.

Baseia-se no par de buracos elétrico (doador / aceitador). Quando são iluminados, os fótons de energia da luz estimulam o doador e fornecem força suficiente para transferir o elétron para o aceitante, criando um buraco no lado do doador, esse processo continua indefinidamente, o par elétron é então transportado e coletado antes que ocorra uma recombinação dentro da rede cristalina do semiconductor. As células solares orgânicas são particularmente atraentes para a construção de energia fotovoltaica integrada devido à sua flexibilidade mecânica e semi-transparente, mas a eficiência de conversão e a confiabilidade em longo prazo são barreiras significativas para sua implementação em grande escala.

O maior problema enfrentado atualmente pelas OSC é a baixa estabilidade *outdoor*. Isto ocorre principalmente devido a penetração de oxigênio e água nas camadas da célula com consequente diminuição na eficiência de conversão (Kim, S.H., et al., 2016). A participação das OSC no mercado mundial é ainda muito pequena. Uma das poucas empresas que produzem dispositivos baseados nesta tecnologia é a inglesa Eight19 (Eight19, 2017).

**Tecnologias híbridas.** Essas tecnologias correspondem a materiais que se obtém unindo silício em diferentes formas cristalinas com filmes finos.

Como representantes desse grupo estão as células produzidas pela empresa Panasonic de tecnologia HIT (*Heterojunction with Intrinsic Thin layer*) (hetero união com camada fina intrínseca) que correspondem a uma célula de silício monocristalino envolta por duas camadas ultrafinas de silício amorfo.

Outro exemplo de tecnologia híbrida que tem conquistado espaço nos últimos anos são as células de silício microcristalino/amorfo ( $\mu\text{-Si/a-Si}$ ) e nanocristalino/amorfo ( $\text{nc-Si/a-Si}$ ) também chamadas simplesmente de silício micromorfo ou nanomorfo. No caso das células HIT, eficiências consideravelmente altas são obtidas, tendo a melhor célula uma eficiência de 26,6% e o módulo mais eficiente 19,5 % (Panasonic, 2017). Os módulos de silício micromorfo apresentam eficiências bem abaixo dos módulos HIT. Valores entre 7 % e 10 % são normalmente encontrados, sendo o recorde para um módulo de  $\text{nc-Si/a-Si}$  de 12,3%.

Também pode ser considerada uma tecnologia mista as células solares de Perovskita (CSP). Essa tecnologia talvez seja a mais promissora dos últimos anos, já que em 2009 apresentava uma eficiência de apenas 3,81% e apenas 7 anos depois, em 2017 superava os 19% (Toshniwal, A., et al., 2017). O recorde atual de eficiência é de 19,7% para uma célula e 16% para um minimódulo.

A estrutura perovskita teve origem através da descoberta do  $\text{CaTiO}_3$  pelo mineralogista Russo Lev Perovski. Após o primeiro registro, surgiram diversos novos materiais com a mesma estrutura. Cristais de Perovskita possuem a fórmula geral  $\text{ABX}_3$ . Quando são utilizados em células solares, A é tipicamente um pequeno cátion molecular orgânico-inorgânico, B é um íon metálico tal como chumbo, estanho ou germânio e X é um halogênio tal como o iodo, bromo ou cloro.

Estes materiais híbridos orgânico-inorgânico são particularmente promissores devido as suas excelentes propriedades físicas. Outra vantagem é que estes materiais podem ser preparados facilmente por meio de processos químicos, os quais possuem potencial para aplicação em larga escala devido ao baixo custo e baixa temperatura utilizada (Toshniwal, A., et al., 2017). Por outro lado, até o presente momento, essa tecnologia ainda não se encontra em comercialização. Ocorre que algumas desvantagens das CSP precisam ser superadas, em especial a instabilidade das células.

O Brasil possui alguns grupos trabalhando na elaboração de células de Perovskita. Como exemplo citam-se a Universidade de Campinas (Szostak, R., et al., 2017) e a UNESP (Fernandes, S. L., 2016).

Tab.1: Tempo de retorno de energia (anos), taxa de degradação (% por ano) e recorde de eficiência de conversão (%) para as principais tecnologias fotovoltaicas presentes no mercado mundial.

Fontes: Green et al. (2017), Wild-Scholten, (2013), Jordan et al. (2013) e Mohr, (2007).

<i>Tecnologia</i>	<i>Tempo de retorno de energia</i>	<i>Taxa de degradação</i>	<i>Recorde de eficiência para uma célula</i>	<i>Recorde de eficiência para um módulo</i>
<i>m-Si</i>	1,74 – 2,12	0,36	26,7	24,4
<i>p-Si</i>	1,02 – 1,23	0,64	21,9	19,9
<i>a-Si</i>	1,04	0,87	10,2*	12,3**
<i>CIGS</i>	0,78 – 0,79	0,96	21,7	19,2
<i>CdTe</i>	0,42	0,40	21,0	18,6
<i>GaAs</i>	4,6 – 5,0	?	28,8	24,8

\*Célula de uma camada de a-Si

\*\*Módulo de dupla camada (silício amorfo/microcristalino)

### 3. CONCLUSÕES

A energia solar fotovoltaica ainda está em seus passos iniciais no Brasil. Da pouca potência instalada que o país possui, a imensa maioria é constituída por módulos de silício cristalino. Entretanto, como este trabalho apontou, existem outras várias tecnologias disponíveis no mercado mundial com características peculiares, que podem definir a escolha do tipo de módulo em uma determinada instalação.

Módulos de silício cristalino possuem uma confiabilidade do mercado mundial, primeiramente por ser utilizado comercialmente a mais de 65 anos, e por consequência, seu valor de fabricação diminui muito com o aumento da produção dos mesmos. Este fato, além de consolidar seu espaço no mercado mundial, aproximadamente 84%, fez com que pesquisadores se dedicassem ao aprimoramento desta tecnologia, visando aumento de eficiência e melhora nos processos de fabricação.

As tecnologias de segunda geração ainda são vistas com certa desconfiança pelo mercado, pois embora já apresentem eficiências significativas, também possuem custos elevados, principalmente para pequenos sistemas fotovoltaicos. Já as tecnologias de terceira geração, notadamente as células orgânicas e de corante, apresentam uma grande expectativa para o futuro, porém, ainda carecem de muito estudo, principalmente na questão de estabilidade a longo prazo. Dentre as tecnologias de filmes finos de segunda geração destacam-se as células de GaAs com a maior eficiência de todas as células monojunção, de 29%, e as células de CdTe com um recorde de conversão de 21%. Os módulos de CIGS apresentaram um recorde de produção em um módulo de 0,06 m<sup>2</sup>, porém sobre com o abastecimento de I (Índio), pois de toda a extração deste material 75% é destinado à fabricação de monitores de tela plana. Para os filmes finos de terceira geração, desçam-se as células HIT e de Perovskita com eficiências de 26,6% e 19,7% respectivamente.

### Agradecimentos

Os autores agradecem ao apoio financeiro do Instituto Federal do Rio Grande do Sul para a realização deste trabalho.

### REFERÊNCIAS

- 3GSolar – solar energy modules, 2017. Disponível em <http://www.3gsolar.com>. Acessado em 22 de agosto de 2017.
- Alta Devices. Disponível em : <https://www.altadevices.com/technology>. Acessado em 21 de agosto de 2017.
- Akinyele, D. O., Rayudu, R. K., Nair, N. K. C. Global progress in photovoltaic technologies and the scenario of development of solar panel plant and module performance estimation – Application in Nigeria, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 48, 2015, Pages 112-139. DOI: [dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.021](https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.021).
- Del Cueto, J. A. and von Roedern, B. ,2006. Long-term Transient and Metastable Effects in Cadmium Telluride Photovoltaic Modules. *Progress in Photovoltaics*, 14 , pp. 615–628.
- Eight19, 2017. Disponível em: <http://www.eight19.com/products/>. Acessado em 22 de agosto de 2017.
- Energysage. Disponível em: <https://www.energysage.com/solar/101/monocrystalline-vs-polycrystalline-solar-panels/>. Acessado em 22 de agosto de 2017.
- European Commission. Plano de eficiência energética de 2011. Disponível em: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1407839592178&uri=CELEX:52011DC0109>
- Fernandes, S. L., Desenvolvimento de Células Solares de Perovskita Baseadas em Filmes de Óxidos Nanoestruturados 2016. 132 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia dos Materiais), UNESP, Instituto de Química, Araraquara, 2016
- Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE. Photovoltaics Report. Relatório técnico. Disponível em: [www.ise.fraunhofer.de](http://www.ise.fraunhofer.de). Acessado em 10 de agosto de 2017.
- Fthenakis VM. Life cycle impact analysis of cadmium in CdTe PV production. *Renew Sustain Energy Rev* 2004.
- Goodrich A, Hacke P, Wang Q, Sopori B, Margolis R, James TL, Woodhouse M. A wafer-based monocrystalline silicon photovoltaics road map: utilizing known technology improvement opportunities for further reductions in manufacturing costs, [Jul.]. *Solar Energy Mater Sol Cells* 2013;114:110–35.
- Green, M. A., Hishikawa, Y., Warta, W., et al. Solar cell efficiency tables (version 50). *Prog Photovolt Res Appl*. 2017;25:668–676. <https://doi.org/10.1002/pip.2909>
- Grossiord, N., Kroon, J. M., Andriessen, R., Blom, P. W. M. Degradation mechanisms in organic photovoltaic devices *Org. Electron.*, 13 (3) (2012), pp. 432-456. DOI: [10.1016/j.orgel.2011.11.027](https://doi.org/10.1016/j.orgel.2011.11.027)
- Honsberg e Bowden. PVEducation.org, czochralski silicon, 2017. Disponível em: <http://www.pveducation.org/pvcdrom/manufacturing/czochralski-silicon>. Acessado em 21 de agosto de 2017.
- International Energy Agency (IEA). Snapshot of global photovoltaic market. Relatório anual. Disponível em <http://www.iea-pvps.org>. Acessado em 10 de agosto de 2017.



- Jordan, D. C. and Kurtz, S. R. (2013), Photovoltaic Degradation Rates—an Analytical Review. *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, 21: 12–29. doi:10.1002/pip.1182
- Kim SH, Son HJ, Park SH, Hahn JS, Kim DH. A study for degradation of flexible organic photovoltaic modules via damp-heat test: by accessing individual layers of the module. *Sol Energy Mater Sol Cells* 2016;144:187–93.
- Kumar, M., Kumar, A. Performance assessment and degradation analysis of solar photovoltaic technologies: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 78, 2017, Pages 554-587, ISSN 1364-0321. DOI: dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.083.
- Lasnier, F. e Ang, T. G. (1990). *Photovoltaic Engineering Handbook*, Adam Hilger, New York. 568p.
- M. J. (Mariska) de Wild-Scholten. Energy payback time and carbon footprint of commercial photovoltaic systems. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Volume 119, 2013, Pages 296-305, DOI: dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2013.08.037.
- Makrides, G., Zinsser B., Phinikarides, A., Schubert, M. e Georghiou, G. E. (2012). Temperature and thermal annealing effects on different photovoltaic technologies. *Renewable Energy*, 43, pp. 407-417, DOI:10.1016/j.renene.2011.11.046
- Mohr, N. J., Schermer, J. J., Huijbregts, M. A. J., Meijer, A. and Reijnders, L. (2007), Life cycle assessment of thin-film GaAs and GaInP/GaAs solar modules. *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, 15: 163–179.
- Myong, S. Y., Jeon, S.W. Efficient outdoor performance of esthetic bifacial a-Si:H semi-transparent PV modules, *Applied Energy*, Volume 164, 2016, Pages 312-320. DOI: dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.11.063.
- Notton, G., Lazarov, V. e Stoyanov, L. (2010). Optimal sizing of a grid-connected PV system for various PV module Technologies and inclinations, inverter efficiency characteristics and locations. *Renewable Energy*, 35, pp. 541-554. DOI: 10.1016/j.renene.2009.07.013
- Osarumen O. Ogbomo, Emeka H. Amalu, N.N. Ekere, P.O. Olagbegi, A review of photovoltaic module technologies for increased performance in tropical climate, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 75, 2017, Pages 1225-1238, DOI: dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.109.
- Panasonic <http://www.panasonic.com/global/corporate/technology-design/technology/hit.html>
- Pandey A, Tyagi V, Jeyraj A, Selvaraj L, Rahim N, Tyagi S. Recent advances in solar photovoltaic systems for emerging trends and advanced applications. *Renew.Sustain Energy Rev* 2016;53:859–84.
- PV Europe, 2017. Disponível em <http://www.pveurope.eu/News/Markets-Money/Solar-panel-price-Further-drop-expected-in-2017>. Acessado em 21 de agosto de 2017.
- Rich Kapusta C. Vice President, marketing, Alta devices (Sunnyvale, “silicon vs.gallium arsenide which photovoltaic material Performs Best,”. NASA Tech Briefs 2014.
- Rix, A., Steyl, J.D.T., Rudman, J., Terblanche, U. e van Niekerk, J.L. First Solar’s CdTe module technology – Performance, life cycle, health and safety impact assessment. Technical Report, 2015.
- Rüther, R; Tamizh-Mani, G., Del Cueto, J., Adelstein, J., Montenegro, A. A. e von Roedern, B. (2003). Performance test of amorphous silicon modules in different climates: higher minimum operating temperatures lead to higher performance levels, 3<sup>rd</sup> World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, pp 11-18, Osaka, Japan
- Sandia National Laboratories – PV Performance Modeling Collaborative. Disponível em: <https://pvpmmc.sandia.gov/modeling-steps/2-dc-module-iv/effective-irradiance/spectral-response/>. Acessado em 22 de agosto de 2017.
- Smith, D.D., Reich, G., Baldrias, M., Reich, M., Boitnott, N., Bunea, G., S. Corporation, S. Jose, Silicon Solar Cells with total area efficiency above 25 %, in: 43rd IEEE Phot. Spec. Conf., 2016
- Szostak, R., Castro, J. A. P, Marques, A. S. e Nogueira, A. F. Understanding perovskite formation through the intramolecular exchange method in ambient conditions. *Journal of Photonics for Energy* 7(2), 2017. DOI: dx.doi.org/10.1117/1.JPE.7.022002
- Toshniwal, A., Kheraj, V. Development of organic-inorganic tin halide perovskites: A review, *Solar Energy*, Volume 149, 2017, Pages 54-59. DOI: dx.doi.org/10.1016/j.solener.2017.03.077.
- Virtuani, A., Strepparava, D. Modelling the performance of amorphous and crystalline silicon in different typologies of building-integrated photovoltaic (BIPV) conditions, *Solar Energy*, Volume 146, 2017, Pages 113-118. DOI: dx.doi.org/10.1016/j.solener.2017.02.035.

## A REVIEW OF CURRENT PHOTOVOLTAIC TECHNOLOGIES

**Abstract.** *This paper presents a review on the main photovoltaic technologies existing in the market or at a research level. The conversion efficiency records for cells and modules are presented, as well as the typical efficiencies found in the market. An analysis of market share by technology is also carried out.*

**Keywords:** *Amorphous silicon, CdTe, Photovoltaic technologies*