

## UMA VISÃO SOBRE OS CONCEITOS DE TERCEIRA GERAÇÃO DAS TECNOLOGIAS FOTOVOLTAICAS

Matheus Jeferson de Oliveira Peixoto\*

### RESUMO

Com mais de cem anos de existência, a tecnologia fotovoltaica ainda esta longe de atingir todo seu potencial. Sabe-se que uma célula solar convencional de junção única possui uma eficiência termodinâmica máxima de pouco mais de 33%. Conceitos que podem, pelo menos teoricamente, superar este limite ficaram conhecidos como a “terceira geração” das tecnologias fotovoltaicas. Este artigo apresenta algumas das principais idéias, como as células solares multijunção, concentração fotovoltaica, conversão espectral ascendente e descendente, geração de múltiplas excitações, células de banda intermediária e células solares de portadores quentes. Células multijunção consistem de filmes finos sobrepostos, desta forma elas são capazes de atingirem alta eficiência quando separadas em camadas com gaps de energia diferentes. O atual recorde mundial de eficiência fotovoltaica é de 46% em uma célula multijunção de semicondutores III-V com uma concentração de 508 sóis. Um dos maiores problemas das células convencionais é o fato de cada fóton poder gerar no máximo um par de elétron-hole. Este desafio poderia ser superado com os próximos conceitos. A conversão ascendente e as células solares de banda intermediária abordam o problema dos fótons de baixa energia, que não seriam capazes de excitar um par elétron-hole. Já a conversão descendente e a geração de múltipla excitação, abordam os fótons de alta energia que acabam perdendo energia na forma de calor. Células de portadores quentes consistem em reduzir as perdas de energia em termos da refrigeração do portador. Uma discussão sobre os benefícios e dificuldades destes conceitos será apresentada.

Palavras-chave: Energia Solar. Fotovoltaica. Terceira Geração.

---

\*Engenheiro de Produção, Universidade Federal Fluminense. Servidor público na Prefeitura Municipal de Angra dos Reis. E-mail: matheusjeferson@gmail.com

## 1 INTRODUÇÃO

Com mais de cem anos de existência, a tecnologia fotovoltaica ainda continua longe de atingir todo seu potencial quando comparada a outras fontes de energia elétrica. As primeiras células solares produzidas em escala comercial são aquelas formadas por placas de silício cristalino. Porém, devido a seu alto custo de produção e baixa eficiência (menor que 20%), esta madura tecnologia não se popularizou e ficou conhecida como a “primeira geração” fotovoltaica.

No começo dos anos 1980 parecia que a indústria fotovoltaica estava à beira de fazer uma transição para uma “segunda geração” de tecnologia de células solares com filmes finos. Independentemente do tipo de semicondutor, a tecnologia de filmes finos oferece uma grande perspectiva com relação aos custos iniciais eliminando as placas de silício (GREEN, 2002). Quanto à eficiência energética, a “segunda geração” não é capaz de superar a primeira, ou seja, possui um baixo rendimento.

Em 1961, William Shockley e Hans Queisser realizaram uma pesquisa buscando encontrar o limite superior de uma célula solar com junção p-n e conseguiram chegar a uma eficiência máxima de 30% para um gap de energia de 1,1 eV. Medida esta que ficou conhecida como “limite Shockley-Queisser” e sabe-se nos dias atuais ser de pouco mais de 33%. Assumindo que um espectro AM1.5 é incidido em uma célula solar, a temperatura ambiente de 300K.

Todas as células solares das chamadas primeira e segunda gerações utilizam uma única junção p-n. Desta forma sua máxima eficiência teórica não é capaz de ultrapassar o valor estabelecido pelo “limite Shockly-Queisser”. Buscando superar esta barreira (preferencialmente a um baixo custo), novos conceitos vêm sendo discutido ao longo dos últimos anos. O objetivo deste artigo é apresentar e debater as principais idéias a respeito destes conceitos que ficaram conhecidos como a “terceira geração” das tecnologias fotovoltaicas.

Agora veremos algumas limitações fundamentais da clássica junção única das células solares. Primeiramente, nas placas solares de junção p-n, apenas um material com gap de energia é utilizado. Desta forma uma grande fração da energia dos fótons mais energéticos acaba sendo perdida na forma de calor. Ela poderia ser melhor aproveitada caso fossem utilizados adsorventes com gap de energia alto, ou

se conseguisse excitar mais de um elétron na banda de condução. Segundo, quase todos os conceitos de células solares se baseiam em um nível de irradiação incidente de 1 sol. No entanto, uma maior irradiação significaria uma maior geração de corrente e também níveis mais elevados de tensão, resultando numa maior eficiência total. Por último, os fótons com energias menores que as do gap de energia não são absorvidos. Assim eles não resultam na excitação dos portadores de carga (SMETS *et al.*, 2016).

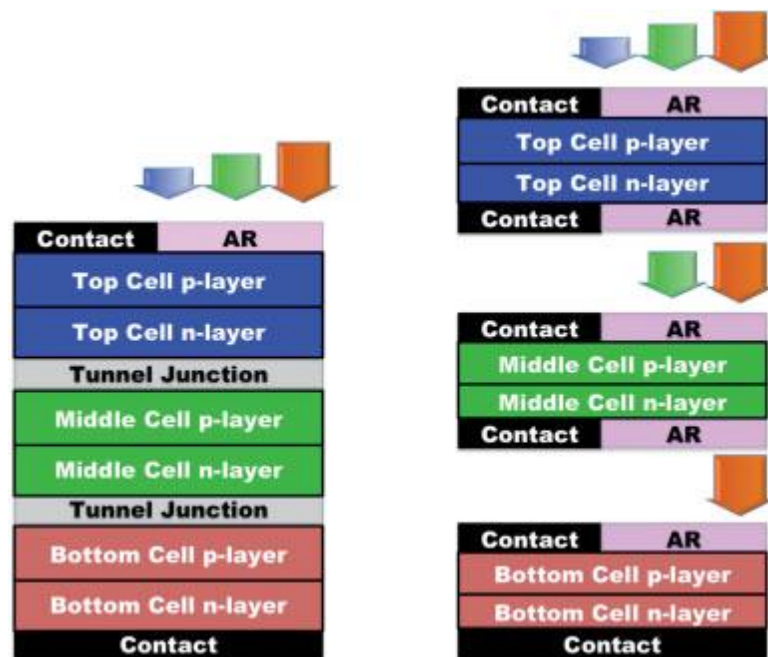
Os fotovoltaicos de “terceira geração” buscam combinar as vantagens dos dispositivos das gerações anteriores. Este artigo se concentrará nas principais tentativas de melhorar a eficiência dos fotovoltaicos para superar o limite Shockley-Quesser através dos métodos: células solares multijunção, concentração fotovoltaica, conversão espectral ascendente e descendente, geração de múltiplas excitações, células de banda intermediária e células solares de portadores quentes. Sendo que, além da multijunção e a abordagem do concentrador, nenhum dos outros conceitos resultaram em células solares de alta eficiência. Todos eles, entretanto, compartilham a mesma promessa de reduzir o preço por watt para um nível onde eles possam se tornar uma grande parcela do fornecimento global de energia (BROWN; WU, 2009).

## **2 CÉLULAS SOLARES MULTIJUNÇÃO**

Alguns autores consideram as células solares multijunção como sendo parte da segunda e outros como da terceira geração, pois sua composição consiste na utilização de filmes finos sobrepostos. Porém, elas são capazes de atingir uma alta eficiência quando separadas em camadas de semicondutores com gaps de energia diferentes. Desta forma, os fótons de alta energia são absorvidos pela junção de maior gap, nas células superiores, e os fótons de baixa energia nas faixas de banda inferior (BROWN; WU, 2009). Isso permite que uma maior parcela do espectro solar seja absorvida, podendo desta forma superar o limite teórico da junção única.

Estas células podem ser dispostas em duas configurações: uma forma é com a célula “empilhada mecanicamente”, na qual cada camada da pilha é tratada como um dispositivo separado com dois terminais para cada uma; Ou então uma célula

“em série” como cada semiconductor na pilha conectado em série, de modo que a célula geral tenha apenas dois terminais na parte frontal e traseira da pilha inteira. Em um espectro solar fixo e com design ótimo, essas duas configurações apresentariam a mesma eficiência. Mas para um espectro real e variável, o design empilhado mecanicamente proporciona maior flexibilidade devido a sua capacidade de otimizar a curva I-V de cada célula e depois conectá-las em um circuito externo (CONIBEER, 2007).



**Figura 1** – Exemplos de células solares multijunção  
Fonte: BROWN; WU (2009, p. 3).

Na figura 1, à esquerda temos uma célula solar multijunção monolítica (de dois terminais) é mostrada. Nela três células com gap de energia diferentes estão conectadas em serie umas as outras com um contato na frente e outro na parte de trás. A sigla “AR” representa os revestimentos anti-reflexos que são utilizados para aumentar a quantidade de luz solar absorvida na estrutura. Como existem apenas dois contatos neste tipo de célula multijunção, o menor produtor de corrente individual limita a corrente total da estrutura. Estas três células estão conectadas por junções de túnel, que usualmente são regiões muito finas de semicondutores altamente dopados. O propósito das junções de túnel é permitir que holes e elétrons se recombinem entre duas células vizinhas, ao mesmo tempo em que devem ser opticamente transparentes. Na direita da figura 1, temos uma célula multijunção

mecanicamente empilhada que possui dois contatos para cada célula individual. Esta estrutura não coloca nenhuma restrição quanto à ordem das camadas e seu arranjo com os gaps de energias é menos importante. No entanto, cada célula requer cuidados próprios durante as etapas de fabricação tornando a estrutura muito mais cara e complicada de se fazer (BROWN; WU, 2009).

As células solares de maior eficiência atualmente são as multijunção contendo semicondutores III-V. O recorde mundial é de 46,0% para uma célula de quatro junções GaInP/GaAs; GaInAsP/GaInAs e que foi utilizado um concentrador de sistema fotovoltaico. Entretanto, foi empregado um alto fator de concentração de 508 sóis, o que aumentou a eficiência geral, assim, também abordamos a segunda limitação apresentada na introdução. Como resultado disto, o limite Shockley-Queisser pode ser superado em mais de 10% (GREEN *et al.*, 2015).

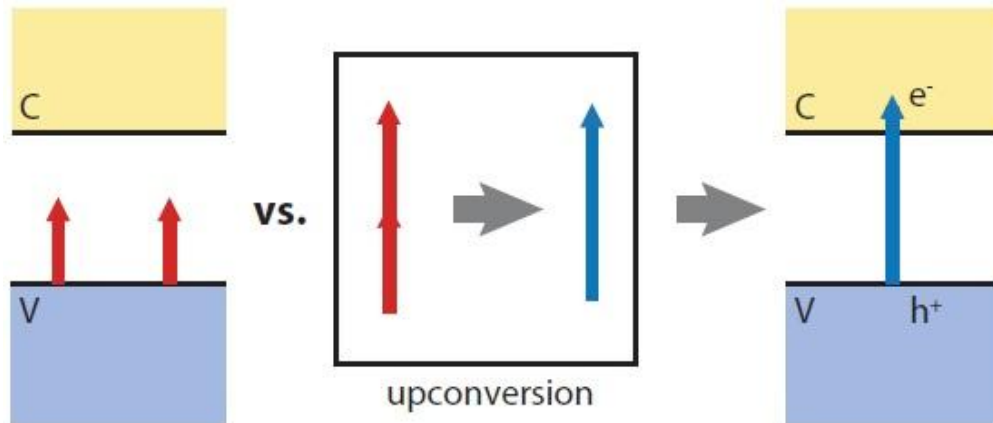
### **3 CONVERSÃO ESPECTRAL**

Um problema em que as células solares de junção única enfrentam é o fato de cada fóton poder gerar no máximo um par de elétron-hole. Este problema poderia ser solucionado através da conversão espectral. Conversão esta, que se daria adicionando uma camada à célula solar, sendo ela feita de um material que seria capaz de alterar o espectro incidente. Os materiais em pesquisa para a conversão espectral são: corantes orgânicos, íons lantanídeos, pontos quânticos e metais de transição (VAN SARK *et al.*, 2013).

#### **3.1 Conversão ascendente de energia espectral (*upconversion*)**

Dois distintos materiais vêm sendo utilizado para produzir conversão ascendente de fótons para células solares: em primeiro lugar, conversores de aniquilação triplo-triplete (TTA-UC), que usam pares de cromóforos orgânicos com níveis de energia racionalmente ordenados (SCHULZE; SCHMIDT, 2015) e, em segundo lugar, os chamados “conversores de terra-rara”, que fazem uso de

transições atômicas dentro de íons lantanídeos, de elementos como érbio e itérbio (GOLDSCHMIDT; FISCHER, 2015).



**Figura 2** – Ilustração do princípio de conversão ascendente espectral  
 Fonte: SMETS *et al.* (2016, p. 247).

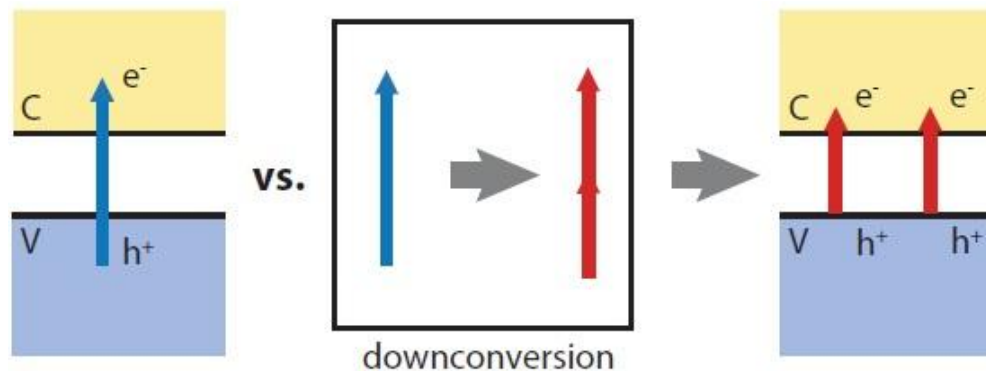
A figura 2 esquematiza o princípio da conversão ascendente espectral. Nele dois fótons de baixa energia absorvidos seriam convertidos em apenas um, mas com energia superior, que seria capaz de atingir a camada de condução excitando um par elétron-hole. O que na teoria aumentaria a eficiência da célula.

Os sistemas TTA-UC, que dependem de absorventes moleculares, funcionam melhor com um comprimento de onda entre 500 a 800 nm, enquanto as terras-raras trabalham na região próxima de 1500 nm, onde absorvem os íons. Portanto, a escolha da tecnologia de conversão ascendente também depende do gap de energia da célula solar, a qual esta conectada. Tendo já sido inclusive demonstrado experimentalmente (SMETS *et al.*, 2016).

A camada de conversão ascendente deve ser colocada na parte de trás da célula solar, pois assim os fótons de baixa energia podem passar através dos absorventes das células para esta camada e assim podem ser convertidos em fótons de alta energia que são absorvidos pela célula solar em uma segunda passagem (VAN SARK *et al.*, 2013). Desta forma, mesmo as camadas de conversão ascendente com baixa eficiência podem ajudar a aumentar a fotocorrente da célula solar. Além disso, ao se colocar as camadas de conversão ascendente na parte traseira impede que elas sejam irradiadas por fótons de alta energia que possam reduzir sua vida útil. Devido à absorção parasita, não é aconselhável colocar essas camadas na frente da célula solar (SMETS *et al.*, 2016).

### 3.2 Conversão descendente de energia espectral (*downconversion*)

A idéia da conversão descendente espectral é dividir um fóton de alta energia em fótons de menor energia, como ilustrado na figura 3. Um fóton com alta energia é absorvido na frente da célula solar e convertido em pelo menos dois fótons com energias mais baixas. Se a energia inicial do fóton incidente for maior que as energias dos dois fótons resultantes e se elas ainda forem maiores do que o gap de energia do material absorvente, ambos os fótons seriam absorvidos e usados como transportadores de cargas excitadas. Como resultado, um fóton de alta energia, como os do espectro azul, poderia resultar em dois elétrons excitados. Em outras palavras, a Eficiência Quântica Externa (EQE) máxima teórica de 100% ao comprimento de onda do fóton azul poderia ser aumentada para 200%, e assim sucessivamente. Em contraste com a conversão ascendente, uma camada de conversão descendente deve estar na frente da célula solar, já que os fótons muito energéticos são sempre absorvidos na camada absorvente. Assim, a absorção parasita pode ser um problema nesta tecnologia (SMETS *et al.*, 2016).



**Figura 3** – Ilustração do princípio de conversão descendente espectral  
 Fonte: SMETS *et al.* (2016, p. 248).

Uma possibilidade que vem sendo investigada para a realização de conversão descendente espectral é usar os chamados pontos quânticos (*quantum dots*, QDs). Eles são nanopartículas esféricas feitas de materiais semicondutores com diâmetros em torno de 4 nanômetros. Essas partículas semicondutoras ainda se comportam como um material semicondutor, no entanto, devido ao chamado confinamento quântico, o gap de energia dos pontos quânticos do semicondutor pode ser maior que do mesmo material quando em uma configuração em massa. O

gap de energia dos pontos quânticos pode ser ajustado de acordo com seu tamanho. Quanto menor as partículas, maior a banda. Isso possibilita interessantes oportunidades para a engenharia do gap de energia, como células solares multijunção baseadas em junções com diferentes tamanhos em cada camada (SMETS *et al.*, 2016).

Jurbergs (*et al* 2006), conseguiram demonstrar alguns resultados experimentais da conversão descendente baseada em pontos quânticos de silício em uma faixa espectral estreita (650 a 800 nm). Em cerca de 790 nm, foi alcançada uma eficiência de conversão descendente na casa dos 60%. A Eficiência Quântica Externa (EQE) conseguiu exceder os 100% na região azul de 3,1 até 3,4 eV. O principal desafio é ter camadas de pontos quânticos com uma resposta espectral superior a 100% nas energias fotônicas mais baixas, porque o espectro solar contém muito mais fótons nesse intervalo espectral. Na prática, apenas pequenos aprimoramentos na eficiência devido a conversores alto / baixo foram demonstrados.

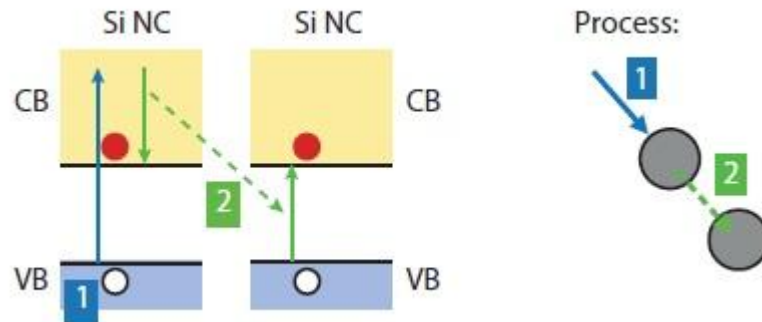
#### **4 GERAÇÃO DE MÚLTIPLA EXCITAÇÃO**

Existe uma maneira de melhorar a excitação do carregador de carga por um único fóton energético que é chamada geração de múltipla excitação (*multiple exciton generation*, MEG). Desta forma ao invés de ser perdido na forma de calor, o excesso de energia pode criar pares de elétron-holes adicionais, sendo possível assim aumentar a eficiência. Evidências para a criação de mais de um par de elétron-hole por fóton de alta energia foi documentada desde a década de 1960 para Si e Ge, geralmente atribuída a ionização de impacto pelas operadoras fotoexcitadas (GREEN, 2001).

Assim como na conversão descendente, a geração de múltipla excitação (MEG) pode ser realizada com pontos quânticos, como ilustrado na figura 4. Nela, em uma partícula, um elétron é excitado para a banda de condução e o excesso de energia é transferido para o ponto quântico vizinho, onde um segundo elétron é excitado para a banda de condução do segundo ponto quântico. Entretanto aqui, os transportadores de carga nos dois pares de elétron-hole são separados antes que eles possam se recombinar de tal forma que um fator fotônico incidente resulte em



mais de um elétron gerado. Assim como para a conversão espectral, aqui também, as eficiências quânticas superiores a 100% são teoricamente possíveis quando um fóton incidente cria estatisticamente portar mais de uma carga. Semonin (*et al.*, 2011) conseguiram alcançar uma eficiência quântica externa (EQE) máxima de 114% com uma camada absorvente que consiste em pontos quânticos de PbSe.



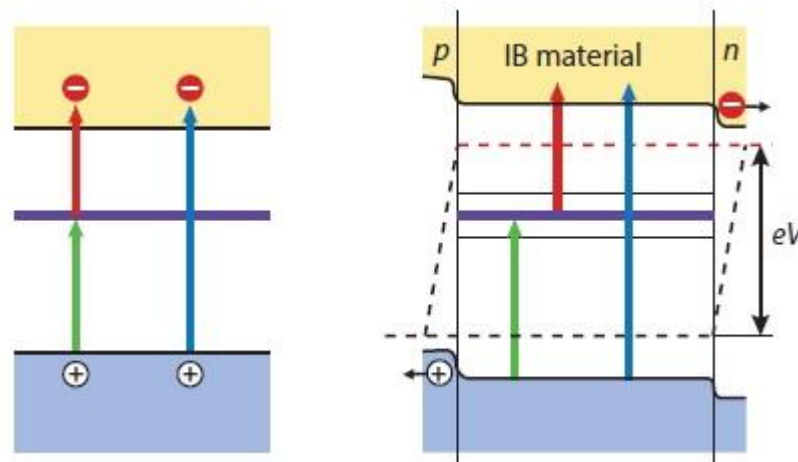
**Figura 4** – Ilustração da geração de múltipla excitação com pontos quânticos  
Fonte: SMETS *et al.* (2016, p. 250).

Outra maneira de se realizar conversão descendente espectral é utilizar a fissão singlet, que, por exemplo, pode ser feito usando tetraceno, um hidrocarboneto aromático policíclico. Na realidade, a fissão de singlet é o equivalente a geração múltipla de excitação em materiais orgânicos, onde um estado de excitação de alta energia excita as fissões em dois estados de tripleto de baixa energia em moléculas vizinhas. Tayebjee; Gray-Weale; Schimidt (2012) conseguiram alcançar experimentalmente com tal processo eficiências de cerca de 40% em células orgânicas.

## 5 CÉLULAS SOLARES DE BANDA INTERMEDIÁRIA

O conceito de células solares de banda intermediária tenta abordar o problema dos fótons com energia abaixo do gap de energia e que não podem ser utilizados para geração de corrente. A figura 5 mostra à esquerda, o nível de energia das células de banda intermediária são criados artificialmente dentro do gap de energia do material absorvente. Assim como nas células solares convencionais, de junção única, os fótons com energia suficiente podem excitar um elétron da banda

de valência para a banda de condução. No entanto, diferentemente dos semicondutores convencionais, os fótons com energia abaixo do gap de energia podem excitar um elétron da banda de valência para a banda intermediária. E assim, um segundo fóton de baixa energia poderia excitar o elétron da banda intermediária para a banda de condução. A direita da figura 5, portanto, a absorção de dois fótons com energias menores que a do gap de energia pode resultar em uma divisão do nível de Fermi que excede a energia de cada um desses fótons (SMETS *et al.*, 2016).



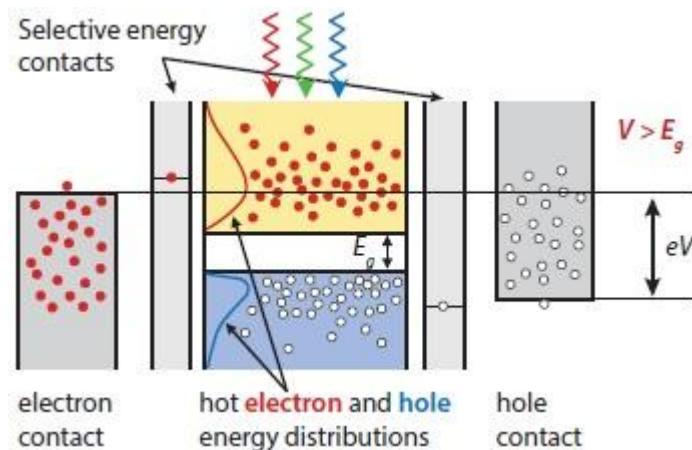
**Figura 5** – À esquerda uma banda intermediária e, à direita com o nível de Fermi  
 Fonte: SMETS *et al.* (2016, p. 252).

Vários estudos foram realizados sobre como células de banda intermediária podem ser geradas, com destaque para Luque; Martí; Stanley (2012). Nessas células solares, uma camada com estados intermediários é colocada entre as camadas p e n. Aqui também podem ser utilizados os pontos quânticos para gerar os estados intermediários. Além disso, vários materiais a granel são estudados para a geração dos estados intermediários. Um dos principais problemas das células de banda intermediárias experimentais é que as tensões são inferiores às tensões das células de referência sem as estruturas intermediárias.

## 6 CÉLULAS SOLARES DE PORTADORES QUENTES

A ideia das células solares de portadores quentes consiste em reduzir as perdas de energia em termos da refrigeração do portador, trabalhar as condições de

seletividade do portador para os contatos seletivos e o comportamento do dispositivo macroscópico (KÖNIG *et al.*, 2010). A figura 6 ilustra o princípio de funcionamento das células de portadores quentes, nela a termização deve ser conseguida através da coleta de pares elétron-hole de fótons de alta energia logo após a excitação da luz e antes que eles tenham a chance de relaxar de volta às bordas das bandas eletrônicas. Na figura, a população dos níveis do transportador de carga reflete a situação logo após a excitação pela absorção de um fóton. Esta distribuição não está em equilíbrio térmico, pois muitos elétrons são excitados para uma posição mais adiante na banda de condução e os holes são excitados para níveis mais baixos da banda de valência. Esses transportadores de carga são chamados de elétrons e holes quentes.



**Figura 6** – Ilustração do funcionamento de uma célula solar de portador quente  
 Fonte: SMETS *et al.* (2016, p. 252).

Leva apenas alguns picosegundos ( $10^{-12}$ s) para os transportadores de cargas quentes relaxarem de volta para as bordas das bandas eletrônicas. A ideia de células de transportadores quentes é coletar os carregadores de carga, desde que ainda estejam quentes. Assim, uma energia maior do que a do gap de energia pode ser utilizada por um transportador de carga excitado e a utilização média do gap de energia é excedida (SMETS *et al.*, 2016).

O desafio fundamental é coletar os portadores quentes antes de relaxarem de volta para as bordas das bandas eletrônicas. Para isso, este conceito exigiria contatos seletivos, que apenas selecionariam elétrons acima de um nível de energia particular na banda de condução e holes abaixo de um certo nível de energia na banda de valência, respectivamente. No momento, o principal desafio é aumentar a

vida útil dos portadores de carga quente, que modo que eles tenham tempo para se mover do material absorvente para os contatos seletivos (SMETS *et al.*, 2016).

A eficiência limitante na conversão da luz solar terrestre em energia elétrica não é de pouco mais de 31%, como visto anteriormente, mas 74%. Para alcançar os custos mais baixos possíveis e, portanto, atingir seu potencial como principal fonte de energia sustentável, parece que a energia fotovoltaica deve evoluir para dispositivos que visem à maior eficiência possível. E nesse contexto a célula solar de portador quente, apesar de apresentar desafios substanciais, é, sem dúvida, o conceito de terceira geração de maior eficiência sugerida e, portanto, digno de esforços para investigar sua viabilidade (GREEN, *et al.*, 2010).

## 7 DISCUSSÃO

As células solares multijunção deram uma sobrevida à tecnologia dos filmes finos, já existente há mais de três décadas. A ideia de sobrepor materiais semicondutores com diferentes gaps de energia permite um aproveitamento maior do espectro solar. Entretanto, dependendo da configuração a confecção destas células solares pode ser bem complexa e de alto valor. Ao lado da concentração fotovoltaica, as células multijunção são os únicos conceitos de terceira geração que foram capazes de ultrapassar o limite Shockley-Queisser, gerando dispositivos de alta eficiência.

A conversão espectral certamente oferece uma ideia inovadora, e que se posta em prática, tem potencial para atingir uma alta eficiência. A conversão ascendente, em especial, se for capaz de conseguir fazer do espectro infravermelho utilizável na tecnologia fotovoltaica, provavelmente se tornaria o grande conceito desta geração. Já a conversão descendente apesar de enfrentar o problema das perdas parasitas, conseguiu experimentalmente exceder os 100% na eficiência quântica externa em uma pequena faixa espectral. Ou seja, fez com que um fóton excitasse mais de um elétron.

O conceito da geração de múltipla excitação tem uma abordagem que se aproxima muito da conversão descendente. Entretanto, ele apenas funcionaria para a faixa mais alta do espectro solar (luz azul), visto que sua função é aproveitar os

fótons mais energéticos para excitar mais de elétron, ao invés de terem seus excessos perdidos como calor. O ponto positivo desta tecnologia veio através da utilização da fissão de singlet para a produção para gerar múltiplas excitações em materiais orgânicos, podendo fazer assim células solares orgânicas atingirem alta eficiência.

Certamente um dos conceitos mais interessantes é o de células solares de banda intermediária, que assim como a conversão ascendente, busca tornar utilizável os fótons de menor energia (maioria no espectro solar). Porém, nos primeiros testes elas apresentaram tensões inferiores as da mesma célula sem a estrutura intermediária. O domínio dos pontos quânticos também é necessário nesta tecnologia, sua maior facilidade de utilização e redução do preço ainda são desafios para a energia fotovoltaica.

Com a maior eficiência teórica possível entre todos os conceitos, as células solares de portadores quentes poderiam reduzir drasticamente as perdas de energia no princípio fotovoltaico. Coletar portadores quentes na casa dos picosegundos certamente é um grande desafio, assim como contatos seletivos e aumentar a vida útil destes portadores. Enfim, dominar esta técnica é um objetivo que merece esforços, mesmo parecendo improvável seu sucesso.

## **8 CONCLUSÃO**

A terceira geração dos fotovoltaicos, ainda parece longe do sonho de baixar o valor do watt por dólar para um patamar economicamente competitivo, a ponto de fazer da energia solar uma prioridade na questão de pesquisa e desenvolvimento, assim como para as outras fontes de energia renovável. Entretanto, ela apresenta conceitos muito promissores, apesar de apenas a concentração fotovoltaica e as células multijunção ainda terem apresentado resultados efetivamente superiores ao limite termodinâmico teórico da junção única. As células de portadores quentes apresentam um novo horizonte, mesmo que ainda apenas no campo teórico. A manipulação da energia espectral ao que tudo indica poderá ser a grande chave para se dominar tecnologias altamente eficientes, fazendo com que a tecnologia fotovoltaica assuma seu papel de maior fonte de energia sustentável do planeta.

## REFERÊNCIAS

- BROWN, G. F.; WU, J. Third generation photovoltaics. **Laser & Photonics Reviews**, New Jersey, v. 3, n. 4, p. 394-405, 2009.
- CHEN, C. J. **Physics of solar energy**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2011.
- CLADY, R. *et al.* Interplay between the hot phonon effect and intervalley scattering on the cooling rate of hot carriers in GaAs and InP. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, New Jersey, v. 20, n. 1, p. 82-92, 2012.
- CONIBEER, G. Third-generation photovoltaics. **Materials today**, Amsterdam, v. 10, n. 11, p. 42-50, 2007.
- GOLDSCHMIDT, J. C.; FISCHER, S. Upconversion for photovoltaics—a review of materials, devices and concepts for performance enhancement. **Advanced Optical Materials**, New Jersey, v. 3, n. 4, p. 510-535, 2015.
- GREEN, M. A. *et al.* Hot carrier solar cells: Challenges and recent progress. In: **Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2010 35th IEEE**. IEEE, 2010. p. 57-60.
- GREEN, M. A. *et al.* Solar cell efficiency tables (Version 45). **Progress in photovoltaics: research and applications**, New Jersey, v. 23, n. 1, p. 1-9, 2015.
- GREEN, M. A. Third generation photovoltaics: solar cells for 2020 and beyond. **Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures**, Amsterdam, v. 14, n. 1, p. 65-70, 2002.
- GREEN, M. A. Third generation photovoltaics: Ultra-high conversion efficiency at low cost. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, New Jersey, v. 9, n. 2, p. 123-135, 2001.
- GUPTA, N. *et al.* Prospects of nanostructure-based solar cells for manufacturing future generations of photovoltaic modules. **International Journal of Photoenergy**, London, v. 2009, 2009.
- JURBERGS, D. *et al.* Silicon nanocrystals with ensemble quantum yields exceeding 60%. **Applied physics letters**, College Park, v. 88, n. 23, p. 233116, 2006.
- KÖNIG, D. *et al.* Hot carrier solar cells: Principles, materials and design. **Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures**, Amsterdam, v. 42, n. 10, p. 2862-2866, 2010.
- LUQUE, A.; MARTÍ, A.; STANLEY, C. Understanding intermediate-band solar cells. **Nature Photonics**, London, v. 6, n. 3, p. 146-152, 2012.

- SCHULZE, T. F.; SCHMIDT, T. W. Photochemical upconversion: present status and prospects for its application to solar energy conversion. **Energy & Environmental Science**, London, v. 8, n. 1, p. 103-125, 2015.
- SEMONIN, O. E. *et al.* Peak external photocurrent quantum efficiency exceeding 100% via MEG in a quantum dot solar cell. **Science**, Washington, v. 334, n. 6062, p. 1530-1533, 2011.
- SMETS, A. *et al.* **Solar Energy, the physics and engineering of photovoltaic conversion technologies and systems**. Cambridge: UIT Cambridge, 2016.
- SMITH, M. B.; MICHL, J. Singlet fission. **Chemical reviews**, Washington, v. 110, n. 11, p. 6891-6936, 2010.
- SHOCKLEY, W.; QUEISSER, H. J. Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells. **Journal of Applied Physics**, College Park, 32:510–519, 1961.
- TANABE, K. Enhanced energy conversion efficiencies of solar cells by multiple carrier excitation. **Electronics Letters**, Stevenage, v. 43, n. 18, p. 998-999, 2007.
- TAYEBJEE, M. J. Y.; GRAY-WEALE, A. A.; SCHMIDT, T. W. Thermodynamic limit of exciton fission solar cell efficiency. **The Journal of Physical Chemistry Letters**, Washington, v. 3, n. 19, p. 2749-2754, 2012.
- VAN SARK, W. G. *et al.* Upconversion in solar cells. **Nanoscale research letters**, London, v. 8, n. 1, p. 81, 2013.