



# Progressos recentes em energia solar fotovoltaica

Miguel Centeno Brito e Killian Lobato

Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

mcbrito@fc.ul.pt

A energia solar fotovoltaica, conversão de radiação solar em eletricidade, é uma fonte de energia limpa, abundante e renovável com um enorme potencial para satisfazer as necessidades crescentes de eletricidade da humanidade. Do ponto de vista científico é uma área do conhecimento interdisciplinar, com ênfase na física e na química, engenharia de materiais e electrotécnica. Este artigo apresenta uma revisão de alguns dos principais desenvolvimentos recentes e tendências futuras, em particular a redução de custos associados à produção de células solares de silício cristalino, eliminação de elementos tóxicos ou menos abundantes na cadeia de produção, condicionamento eléctrico de sistemas fotovoltaicos e novos conceitos de células solares.

## Introdução

O aproveitamento da radiação solar para produção de eletricidade, limpa, abundante e renovável, pode ser feita por via térmica ou por via fotovoltaica, convertendo diretamente em eletricidade os fotões solares incidentes. Desde que a primeira célula fotovoltaica moderna foi revelada ao mundo em 1954 [1], não mais a tecnologia fotovoltaica deixou de evoluir, com melhores desempenhos, menores custos mas também com soluções mais sustentáveis do ponto de vista ambiental. A Figura 1 apresenta um resumo

da evolução da eficiência das várias famílias tecnológicas existentes. Podemos observar que ao longo das quase quatro décadas a que se referem os dados, a eficiência máxima duplicou de pouco mais de 20% em 1975 para 45% em 2012. As células campeãs, células multijunção com eficiências recorde, são verdadeiros feitos da sofisticação tecnológica, mas dificilmente poderão ter utilidade prática devido aos custos de fabrico. São uma espécie de dispositivos fotovoltaicos “fórmula 1” para demonstrar o potencial da tecnologia, mas demasiados caros para os podermos colocar nos nossos telhados.

Na figura estão representadas quatro grandes famílias tecnológicas. Para além das células multijunção (linhas a roxo) temos a família das tecnologias baseadas em silício cristalino (linhas azuis), líder do mercado. As linhas a verde representam os chamados filmes finos, que podem incluir a utilização de outros semicondutores. Por fim, a vermelho apresentam-se as tecnologias do futuro, ou emergentes, que embora hoje ainda não tenham alcançado o mercado, se espera que possam vir a ter um papel relevante no futuro.

A eficiência de uma célula solar é um parâmetro muito relevante para aferir o seu desempenho, mas naturalmente não é o único. De facto, como o combustível de um sistema solar é a radiação solar, sendo portanto abundante e gratuito, a eficiência só é relevante no sentido em que um sistema

# Best Research-Cell Efficiencies

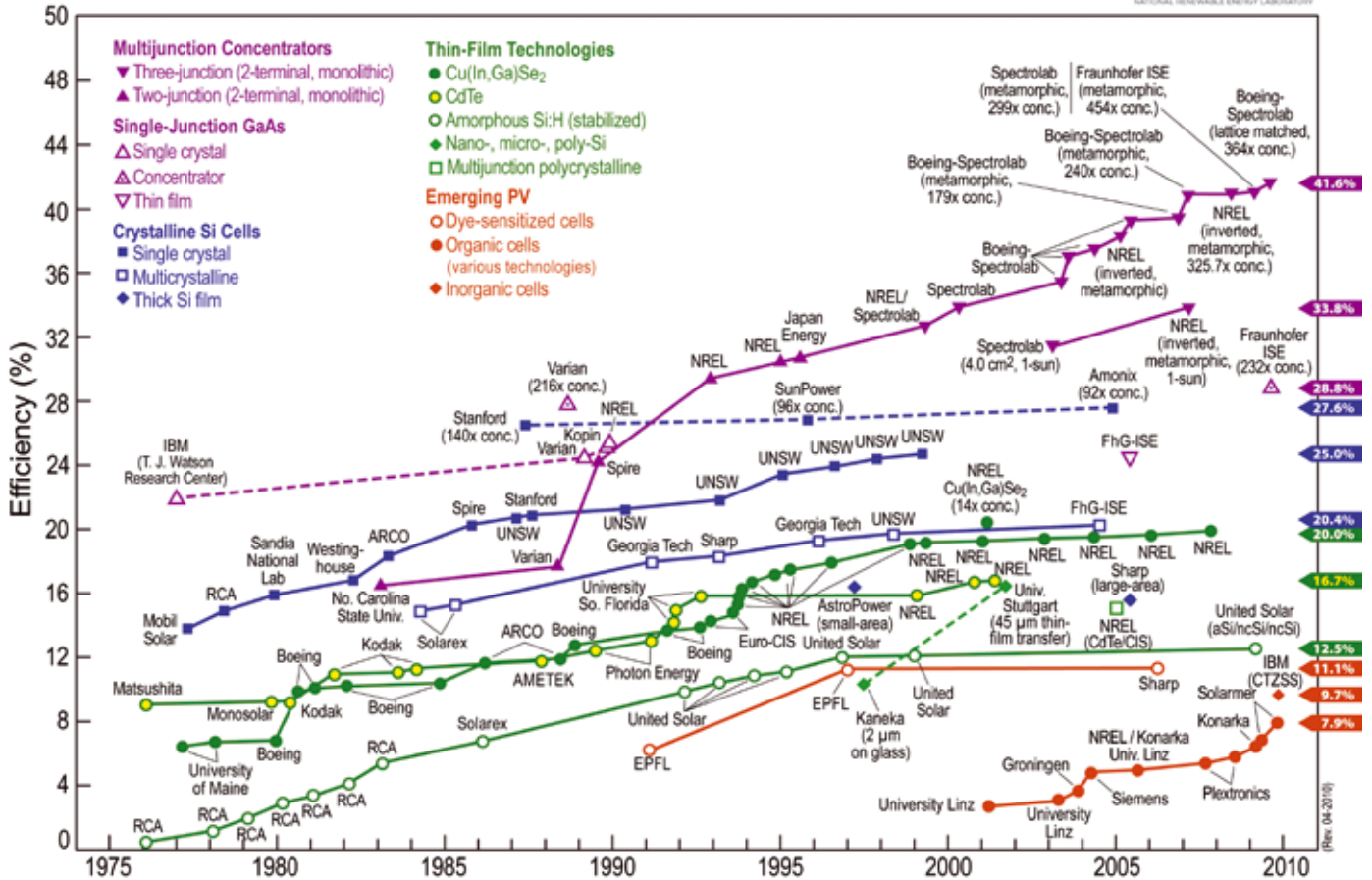


Fig. 1 - Evolução da eficiência recorde das várias famílias tecnológicas de células solares [2].

mais eficiente ocupa uma área menor do que um sistema menos eficiente. Se o custo de fabricar uma célula 1% mais eficiente for maior do que o custo de aumentar a área<sup>1</sup> em 1%, então o bom senso económico determina que o sistema menos eficiente é preferível. Assim, de facto, o verdadeiro indicador que determina se a eletricidade solar pode ser economicamente competitiva com as energias fósseis é o custo da eletricidade solar, medido em euros por quilowatt-hora (€/kWh), que vai depender do custo e da eficiência da célula ou painel solar mas também do resto do sistema fotovoltaico, e até do local onde o sistema está colocado, que pode ter mais ou menos radiação solar disponível ao longo do ano.

A inovação na área do fotovoltaico hoje em dia abarca esses e muitos outros aspetos da cadeia de valor. Podemos por exemplo desenvolver novas tecnologias de gestão de informação geográfica para analisar e otimizar o recurso solar [3], definir estratégias de despacho para a rede elétrica para valorizar a eletricidade solar, mais abundante em horas de “cheia” quando a procura é mais elevada [4], ou articular sistemas de microcrédito para eletrificação solar rural em zonas remotas [5]. Neste artigo, porém, vamos focar a atenção em desenvolvimentos tecnológicos recentes com

ênfase na redução de custos, aumento de desempenho, reforço da sustentabilidade, e também na compreensão de fenómenos físicos e químicos que, um dia, nos poderão levar a desenvolver soluções ainda mais eficientes, mais baratas e limpas.

## Silício cristalino a menor custo

O mercado da energia fotovoltaica tem sido dominado pelas tecnologias baseadas em silício cristalino. A matéria-prima é não-tóxica e muito abundante: o silício encontra-se no quartzo e nos grãos de areia da praia. Contudo, a sua utilização como substrato para as células solares exige um processo de purificação e cristalização que é demorado e energeticamente dispendioso. De facto, um painel solar de silício precisa de funcionar durante dois anos para poder produzir toda a energia que se gastou no seu fabrico. Com tempos de vida superiores a vinte anos, do ponto de vista energético faz sentido investir numa célula solar, mas se conseguíssemos reduzir esse “tempo de amortização energética” seria com certeza importante, tanto do ponto de vista económico como ambiental<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Aqui o custo da área significa não só a área física que a célula ocupa mas todos os outros custos que aumentam com a área ocupada, como por exemplo o custo acrescido por termos que usar cabos eléctricos mais longos, etc.

<sup>2</sup> Como a generalidade da indústria nos dias de hoje, as fábricas onde se fazem os substratos de silício cristalino normalmente recorrem a energias fósseis.

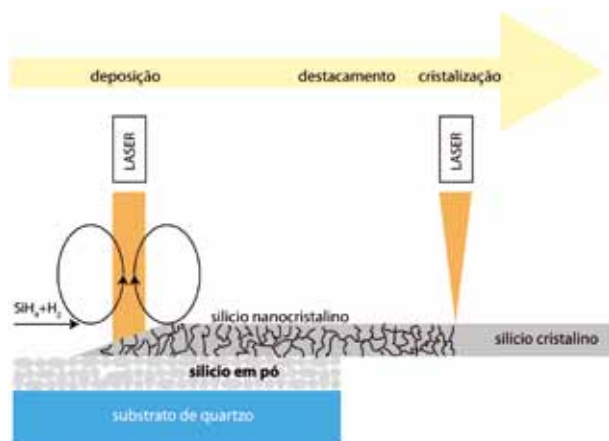


Fig. 2 - Diagrama esquemático do processo SDS

O processo tradicional de preparação do silício para células solares inclui uma complexa sequência de passos para decantação, refinação, vaporização, deposição, fusão e ressolidificação, de modo a obtermos um material hiper-puro e com a estrutura cristalina adequada [6]. O resultado final é um lingote que deve ser cortado em fatias muito finas, com cerca de 0,2 mm de espessura, a partir das quais se vai fabricar a célula fotovoltaica. Normalmente, o processo de corte é feito usando uma serra de fio cuja espessura é da ordem da espessura pretendida das “fatias” de silício. O resultado prático é que acabamos por deitar fora, em “serradura”, quase metade do material que custou tanto tempo e energia a produzir. É pois evidente que o desenvolvimento de novos processos de corte dos substratos de silício poderia ter um enorme impacto no custo final das células solares. Exemplos de resultados recentes interessantes nessa área incluem a propagação controlada de fraturas paralelas à superfície por acoplamento mecânico com outros materiais com coeficientes de expansão térmica diferenciados [7] ou por implantação iónica [8].

Por outro lado, um método que permitisse purificar e cristalizar o silício diretamente com a forma plana evitaria por completo o processo de corte. Uma das técnicas desenvolvidas com essa abordagem mais revolucionária é o processo SDS – *Silicon Dust on Substrate* [9]. Trata-se de um processo com dois passos principais (Figura 2). Primeiro, deposita-se uma camada fina de silício num substrato que consiste em pó de silício. Esta deposição, realizada a partir de silano ( $\text{SiH}_4$ ) à pressão ambiente com radiação focada, permite atingir uma taxa de deposição muito elevada, à custa de uma qualidade cristalográfica inferior à desejada. Depois de destacada do substrato, esta pré-fita de silício muito puro é cristalizada por um processo de zona fundida, o que permite obter uma boa estrutura cristalina enquanto

se procede à segregação de eventuais impurezas residuais na amostra.

A redução da fatura energética das células solares, pela otimização no uso dos materiais, como nos exemplos anteriores, ou aumentando a eficiência de conversão, através da formação de emissores seletivos [10], heterojunções [11], redução da reflectividade da superfície [12], etc, tem permitido reduzir significativamente o custo das células solares por unidade de eletricidade produzida, tornando-as cada vez mais competitivas com a eletricidade produzida a partir de fontes não-renováveis e mais poluentes.

## Eliminação do uso de chumbo nas células solares

Por vezes, contudo, o objetivo de novas técnicas de processamento de células solares não é apenas a redução do custo. Um exemplo é o enorme esforço de investigação e desenvolvimento por parte da indústria fotovoltaica para substituição do chumbo na metalização (formação dos contactos) das células solares. Embora, pelo menos para já, este seja um sector industrial excluído da obrigação de eliminar o uso de chumbo nos seus produtos, a indústria tem consciência que uma das suas mais-valias é o baixo impacto ambiental, pelo que se deve evitar sempre que possível o recurso a materiais tóxicos e perigosos.

Os contactos eléctricos de uma célula solar devem ser bons condutores eléctricos, para serem eficientes a extrair a corrente eléctrica; devem aderir bem ao silício, porque a durabilidade é um aspeto essencial de uma célula solar; e, porque estão na face iluminada<sup>3</sup> da célula, devem formar uma rede com ‘dedos’ muito finos, de modo a não fazer demasiada sombra. Tradicionalmente os contactos são desenhados por serigrafia, usando pastas de vidro com pequenos cristais de prata. A pasta de vidro contém óxido de chumbo que tem duas funções principais: por um lado, facilita o contacto eléctrico entre a prata e o silício (reduzindo a resistividade e por isso as perdas por efeito Joule) e, por outro, reduz a temperatura de fusão do vidro, facilitando a dissolução dos cristais de prata e permitindo que a pasta atinja a fluidez necessária para o processo a uma temperatura mais baixa. Uma célula solar típica contém cerca de 30 mg de chumbo.

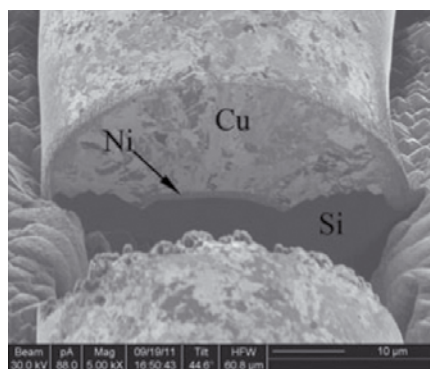


Fig. 3 - Vista de corte de contacto frontal de uma célula solar formado sem recorrer a óxido de chumbo e substituindo prata por cobre [15].

<sup>3</sup> De facto, algumas configurações mais sofisticadas de células solares têm os dois contactos, “positivo” e “negativo”, na face posterior da célula; são as denominadas *back contact solar cells* [26], que atingem eficiências relativamente elevadas mas, de um modo geral, a custos mais elevados.



Os principais desafios na engenharia dos contactos tem-se focado na procura de outros materiais para substituir o chumbo, na redução da quantidade de prata (para redução de custos) e até na procura de alternativas à serigrafia, como por exemplo a impressão com jacto de tinta ou galvanoplastia, com o objetivo de conseguir “dedos” mais altos e magros que fazem menos sombra mas conduzem melhor a eletricidade [13]. Esta é uma área que ferve de atividade, com novos conceitos e produtos a chegarem ao mercado todos os anos [14]. Como ilustração dos progressos mais recentes, apresenta-se na Fig. 3 uma imagem de microscópio eletrónico que apresenta uma vista de corte de um contacto de cobre, com 0,017 mm de espessura, crescido por deposição induzida por luz sobre uma fina camada de níquel, um processo desenvolvido pela Technic Inc. [15].

### Smart-modules

Mas não é só na área da engenharia dos materiais que se registam desenvolvimentos tecnológicos relevantes na indústria fotovoltaica. Uma outra área que vibra de entusiasmo é o condicionamento elétrico dos sistemas, os chamados *smart-modules*.

Um sistema fotovoltaico típico consiste num conjunto de painéis solares ligados em série, que quando iluminados produzem uma determinada corrente contínua (DC). Esta é convertida em corrente alterna (AC) por um conversor, a que chamamos inversor, só então podendo ser injetada na rede elétrica. A corrente e tensão produzidas por um painel solar dependem da intensidade da radiação que o ilumina e da sua temperatura. Se por alguma razão um dos painéis produzir uma corrente menor do que os seus vizinhos (por exemplo, devido a uma sombra de uma chaminé), e porque dado que o sistema se encontra ligado em série, a corrente produzida pelo sistema vai ser limitada pelo painel sombreado, e portanto fazendo com que uma parte da potência dos outros painéis vai-se perder-se inutilmente.

Para minimizar esta perda de eficiência, começam agora a surgir as primeiras soluções de painéis solares inteligentes que impedem a propagação destas ineficiências ao resto do sistema. Podemos por exemplo, colocar à saída de cada painel um conversor DC/DC que se autorregula de modo a não

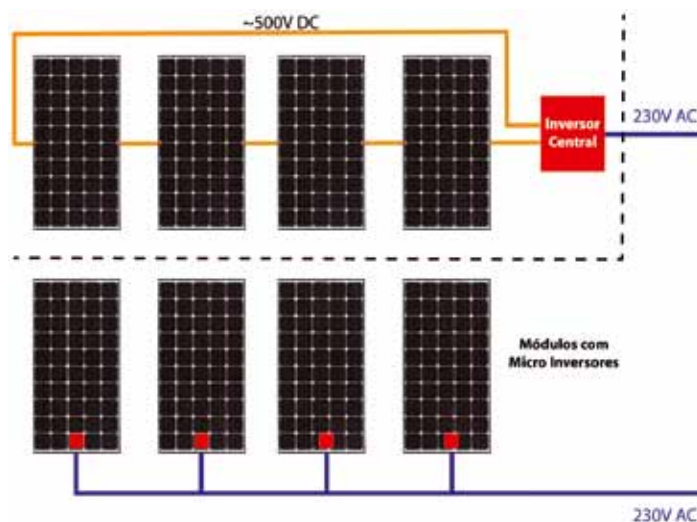


Fig. 4 - Diagrama esquemático de módulos AC

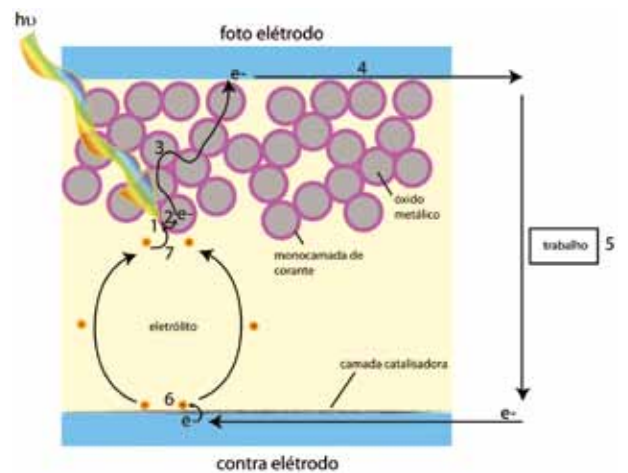


Fig. 5 - Princípio de funcionamento de uma célula solar sensibilizada com corante, ou dispositivo de Grätzel.

puxar corrente dos painéis vizinhos [16]. Uma outra vantagem destes conversores é que fixam a tensão de saída da série, tornando-a independente da temperatura, o que evita a necessidade de sobredimensionar a tensão de entrada do inversor, reduzindo os custos de conversão em corrente alterna.

Uma outra abordagem, ainda mais revolucionária, é a introdução de mini-inversores em cada painel individual [17]. Este conceito é denominado “*plug-and-play*” ou “módulos AC”, pois ficamos com um painel solar que tem uma ficha de 220V-AC como as fichas que temos em casa, pelo que só precisamos de uma tomada para o ligar à rede. Com este conceito, que tal como no caso do conversor DC/DC é tolerante a problemas de sombras, a instalação de painéis solares num telhado deixa de exigir profissionais altamente qualificados e passa a poder ser feita, com toda a simplicidade, pelo consumidor final.

Claro que para estas abordagens, como em todos os casos precedentes, é bem mais fácil dizer do que fazer. A introdução de componentes eletrónicos em painéis individuais não pode encarecer demasiado o painel solar e deve apresentar garantias de funcionamento durante a vida de todo o painel, que pode superar os 40 anos à chuva e ao sol, sem quaisquer intervenções de manutenção. Pior do que um sistema pouco eficiente é um sistema que não funciona!

### Células sensibilizadas com corantes

O desenvolvimento das células solares sensibilizadas com corantes começou em 1991 quando Brian O’Reagan e Michael Grätzel apresentaram um dispositivo simples com uma eficiência de conversão de 7% [18]. A grande promessa das (hoje chamadas) células Grätzel levou a um aumento exponencial na investigação, contando-se mais de 9000 artigos a citar a publicação original, dos quais mais de 1400 publicados só no ano passado. Existem várias razões para tanto entusiasmo. Desde logo, a aparente facilidade com que as células podem ser fabricadas, leva a acreditar que o fabrico

em larga escala poderá ser implementado a baixo custo. Mais, a facilidade de fabrico permite também que qualquer investigador interessado possa criar uma célula solar deste género no seu laboratório, ou seja, a própria investigação de células de Grätzel é também ela de baixo custo. Apesar de tanto entusiasmo comercial e académico, podemos verificar na Figura 1 que do ponto de vista da eficiência só se verificaram grandes saltos qualitativos em 1997. A Figura 5 apresenta esquematicamente o funcionamento de uma célula solar de Grätzel. A absorção da radiação solar é feita por moléculas (o corante) através da transição de um eletrão do estado fundamental para um estado excitado (1). Esse eletrão passa para o semicondutor (2), oxidando o corante que precisa de ser regenerado por espécies doadoras de eletrões que se encontram no eletrólito onde está mergulhado (7). Entretanto, o eletrão atravessa o semicondutor (3) até chegar ao contacto elétrico (4), e depois segue o seu caminho através do circuito elétrico a que ligámos a célula (5). Na parte posterior da célula temos o contra-eléctrodo que recebe eletrões do circuito, regenerando as espécies do eletrólito que já doaram eletrões ao corante (6).

As moléculas que absorvem a luz, corantes ou sensibilizadores, podem ser moléculas orgânicas, *quantum-dots* ou semicondutores em camada fina. A sua natureza e preparação é tão diversificada e flexível que, por exemplo, é possível fabricar células de Grätzel à base de moléculas extraídas de frutos ou vegetais. Esta possibilidade é um excelente exercício que pode ser feito nas escolas em atividades de divulgação de energia solar e ciência em geral [19].

Ao contrário das células solares convencionais, o semicondutor aqui não serve para absorver a luz, mas tem outras funções importantes – nomeadamente, o transporte dos eletrões e a formação de uma estrutura mesoporosa, com uma área grande num volume pequeno. Tipicamente o semicondutor é dióxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ), óxido de zinco ( $\text{ZnO}$ ) ou outro óxido metálico de hiato largo ( $>3$  eV) pois são abundantes e de baixo custo (por exemplo, o  $\text{TiO}_2$  é utilizado para tintas e protetores solares).

O eletrólito mais comum é à base do par RedOx iodeto tri-iodeto em solvente orgânico. Um líquido é ideal para permear a estrutura mesoporosa e assim criar um contacto íntimo entre o semicondutor e as moléculas de corante. No entanto, a utilização de um líquido apresenta sérias dificuldades no que toca à fiabilidade, dado que a célula solar terá que durar, no mínimo dos mínimos, 20 anos. Em Portugal, desenvolveu-se um mecanismo de selagem permanente, com o potencial de contornar o problema do encapsulamento de um líquido volátil [20]. Por outro lado, a procura de alternativas à utilização de um líquido, em particular semicondutores sólidos do tipo-p, é um alvo de pesquisa que tem mobilizado muitos esforços. A principal dificuldade é descobrir como

conseguir preencher um volume altamente poroso com um sólido. E os resultados começam a aparecer. Em 2012 foram finalmente apresentadas células solares de Grätzel completamente sólidas com eficiências superiores a 10%, mas mantendo uma grande simplicidade de preparação [21–23].

Contudo, eficiências da ordem de 10% ainda não são suficientes para tornar competitivo este tipo de tecnologia. Para aumentar a eficiência é preciso agora estudar e desenvolver novos corantes, pois já que os atuais limitam-se a absorver uma parte muito pequena do espectro solar. Uma das ideias é conjugar vários sensibilizadores diferentes, com espectros de absorção adjacentes, para assim conseguir recolher por completo o espectro solar.

## Outros conceitos

Para além dos conceitos discutidos acima, e as suas muitas variantes, existem ainda outras abordagens a ser desenvolvidas. Algumas com materiais novos para a formação de células de junção p-n clássica, mas também outras com formulações completamente diferentes das tecnologias tradicionais.

Um conceito recente com um potencial promissor é o das células solares CZTS (cobre, zinco, estanho e selénio) que podem ser preparadas como “tintas pintadas” e que utilizam matérias-primas abundantes [24]. O dispositivo em si é relativamente simples, formando uma junção p-n onde a camada p é formada por kesterite ( $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ ). O potencial é tal que o gigante IBM tem vindo a liderar a investigação, tendo já demonstrando células solares que ultrapassam os 10% de eficiência.

Completamente diferentes são as chamadas células solares poliméricas [25]. Estas células são constituídas por dois polímeros ou compostos orgânicos, um do tipo-p e o outro tipo-n, ‘misturados’ para formar uma estrutura com uma heterojunção espalhada. Um ou ambos os materiais podem absorver luz, formando um excitão que se propaga até encontrar uma fronteira p-n, ou um aceitador-doador de eletrões, causando a separação da carga. O desempenho deste tipo de células tem vindo a aumentar significativamente, com relatos de eficiências superiores a 10% por empresas como a Mitsubishi Chemical. No entanto, este tipo de células ainda apresentam taxas de degradação muito aceleradas quando expostas à radiação solar e por isso a sua aplicabilidade no futuro próximo estará reservada para aplicações muito específicas como, por exemplo, dispositivos descartáveis.

## Conclusão

A investigação científica na área da energia solar fotovoltaica é inerentemente multidisciplinar, cruzando engenharia dos materiais, física do estado sólido, química orgânica e inorgânica, eletroquímica, eletrónica e até sociologia, sistemas de informação geográfica ou economia. Pelo seu valor de mercado, presente e sobretudo futuro, mas também pelo impacto positivo que pode trazer para a preservação do nosso planeta, não esquecendo o puro prazer da inovação e da compreensão dos fenómenos que nos rodeiam, a investigação em energia solar fotovoltaica é uma aventura que, apesar de já ter começado há mais de meio século, é cada vez mais entusiasmante.



**Miguel Centeno Brito** é professor na Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa no Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia, com responsabilidades no Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente em cadeiras

como Energias Renováveis, Energia Solar Fotovoltaica e Sistemas Sustentáveis de Energia. Licenciado em Engenharia Física Tecnológica, no Instituto Superior Técnico, e doutorado na Universidade de Oxford, no Reino Unido, é investigador no Laboratório Associado Instituto Dom Luiz. As suas principais áreas de interesse são análise do recurso solar, em particular em meio urbano, electrificação solar remota e tecnologias de silício cristalino para aplicação fotovoltaica. É também responsável pelo Campus Solar – Ensaios de Sistemas Solares, no campus da faculdade.



**Killian Lobato** licenciou-se em Física em 2003 na Universidade de Bath, Reino Unido, onde posteriormente completou o seu doutoramento em 2007 na área de Foelectroquímica. Após os seus estudos aceitou a oportunidade de integrar o Centro de Sistemas de

Energias Sustentáveis da Universidade de Lisboa na área de energia fotovoltaica como investigador pós doutoral. Participa em diversos projetos no âmbito de desenvolvimento de novos processos de fabrico de silício e lidera projetos na área de células solares Grätzel. Como complemento às atividades de investigação, leciona nas áreas de Foelectroquímica, Fotovoltaico e Sistemas de Energia.

#### Referências

1. D. M. Chapin, C. S. Fuller, e G. L. Pearson, "A New Silicon p-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power", *Journal of Applied Physics* 25(5), 676 (1954).
2. L. L. Kazmerski, "Best Research-Cell Efficiencies Rev. 11." NREL (2012).
3. M. C. Brito, N. Gomes, T. Santos, e J. A. Tenedório, "Photovoltaic potential in a Lisbon suburb using LiDAR data", *Solar Energy* 86(1), 283 (2012).
4. R. Bhandari e I. Stadler, "Grid parity analysis of solar photovoltaic systems in Germany using experience curves", *Solar Energy* 83(9), 1634 (2009).
5. B. Mainali e S. Silveira, "Financing off-grid rural electrification: Country case Nepal", *Energy* 36(4), 2194 (2011).
6. A. Luque e S. Hegedus, Eds., *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, 1st ed. Wiley (2003).
7. A. Masolin, J. Vaes, F. Dross, J. Poortmans, e R. Mertens, "Thermal curing of crystallographic defects on a slim-cut silicon foil", in 2010 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2180 (2010).
8. F. J. Henley, "Kerf-free wafering: Technology overview and challenges for thin PV manufacturing", in 2010 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 1184 (2010).

9. J. M. Serra, C. R. Pinto, J. A. Silva, M. C. Brito, J. Maia Alves, e A. M. Vallêra, "The silicon on dust substrate path to make solar cells directly from a gaseous feedstock", *Semiconductor Science and Technology* 24(4), 45002 (2009).
10. H. Antoniadis, F. Jiang, W. Shan, e Y. Liu, "All screen printed mass produced Silicon Ink selective emitter solar cells", in 2010 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 1193 (2010).
11. T. Mishima, M. Taguchi, H. Sakata, e E. Maruyama, "Development status of high-efficiency HIT solar cells", *Solar Energy Mat. Solar Cells* 95(1), 18 (2011).
12. J. S. Yoo, I. O. Parm, U. Gangopadhyay, K. Kim, S. K. Dhungel, D. Mangalaraj, e J. Yi, "Black silicon layer formation for application in solar cells", *Solar Energy Mat. Solar Cells* 90 (18-19), 3085 (2006).
13. A. Lennon, Y. Yao, e S. Wenham, "Evolution of metal plating for silicon solar cell metallisation", *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* (2012).
14. G. Beaucarne, G. Schubert, J. Hoornstra, J. Horzel, e S. W. Glunz, "Summary of the Third Workshop on Metallization for Crystalline Silicon Solar Cells", *Energy Procedia* 21, 2, (2012).
15. Y. Yao, A. Lennon, B. S. Tjahjono, e S.R. Wenham, "Use of Inductively-Coupled-Plasma Measurements to Monitor Light-Induced Plating of Silicon Solar Cells", in 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2682 (2010).
16. "Tigo Energy". [www.tigoenergy.com](http://www.tigoenergy.com)
17. J. J. Bzura, "The AC module: An overview and update on self-contained modular PV systems", in IEEE PES General Meeting, 1 (2010).
18. B. O'Regan e M. Gätzel, "A low-cost, high-efficiency solar-cell based on dye-sensitized colloidal TiO<sub>2</sub> films", *Nature* 353(6346), 737 (1991).
19. M. R. Narayan, "Review: Dye sensitized solar cells based on natural photosensitizers", *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 16(1), 208 (Jan. 2012).
20. F. Ribeiro, J. Maçaira, R. Cruz, J. Gabriel, L. Andrade, e A. Mendes, "Laser assisted glass frit sealing of dye-sensitized solar cells", *Solar Energy Mat. Solar Cells* 96(1), 43 (2012).
21. I. Chung, B. Lee, J. He, R. P. H. Chang, e M. G. Kanatzidis, "All-solid-state dye-sensitized solar cells with high efficiency", *Nature* 485(7399), 486 (2012).
22. H.-S. Kim et al. "Lead iodide perovskite sensitized all-solid-state submicron thin film mesoscopic solar cell with efficiency exceeding 9%.", *Scientific reports* 2, 591 (2012).
23. M. M. Lee, J. Teuscher, T. Miyasaka, T. N. Murakami, e H. J. Snaith, "Efficient Hybrid Solar Cells Based on Meso-Superstructured Organometal Halide Perovskites", *Science* (2012).
24. K. Ramasamy, M. A. Malik, e P. O'Brien, "Routes to copper zinc tin sulfide Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> a potential material for solar cells", *Chem. Commun.* 48(46), 5703 (2012).
25. G. Li, R. Zhu, e Y. Yang, "Polymer solar cells", *Nature Photonics* 6(3), 153 (Fev. 2012).
26. E. Van Kerschaver e G. Beaucarne, "Back-contact solar cells: a review", *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 14(2), 107 (2006).