

A primeira célula solar moderna foi apresentada em 1954. Tinha apenas dois centímetros quadrados de área e uma eficiência de 6%, gerando 5 mW de potência eléctrica. Cinquenta anos depois, em 2004, foram produzidos cerca de mil milhões de células, com eficiências da ordem dos 16%, ultrapassando pela primeira vez a barreira de 1 GW de potência eléctrica anual instalada.

ANTÓNIO M. VALLÊRA

Departamento de Física e Centro de Física da  
Matéria Condensada (CFMC),  
Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa  
Campo Grande, 1749-016 Lisboa

amvallera@fc.ul.pt

MIGUEL CENTENO BRITO

Centro de Física da Matéria Condensada (CFMC)  
Campo Grande, 1749-016 Lisboa

mcbrito@fc.ul.pt

# MEIO SÉCULO D

# HISTÓRIA FOTO

O efeito fotovoltaico foi observado pela primeira vez em 1839 por Edmond Becquerel que verificou que placas metálicas, de platina ou prata, mergulhadas num electrólito, produziam uma pequena diferença de potencial quando expostas à luz [1].

Mais tarde, em 1877, dois inventores norte americanos, W. G. Adams e R. E. Day, utilizaram as propriedades fotocondutoras do selénio para desenvolver o primeiro dispositivo sólido de produção de electricidade por exposição à luz [2].

Tratava-se de um filme de selénio depositado num substrato de ferro e com um segundo filme de ouro, semitransparente, que servia de contacto frontal. Apesar da baixa eficiência de conversão, da ordem de 0,5%, nos finais do século XIX o engenheiro alemão Werner Siemens (fundador do império industrial com o seu nome) comercializou células de selénio como fotómetros para máquinas fotográficas.

A história da energia fotovoltaica teve de esperar os grandes desenvolvimentos científicos da primeira metade do século XX, nomeadamente a explicação do efeito fotoeléctrico por Albert Einstein em 1905, o advento da mecânica quântica

# DE VOLTAICA

e, em particular, a teoria de bandas e a física dos semicondutores, assim como as técnicas de purificação e dopagem associadas ao desenvolvimento do transistor de silício: sem a ciência moderna, seria impensável o nascimento da energia solar eléctrica. As descobertas acidentais e o desenvolvimento empírico nunca nos teriam levado a ultrapassar o limiar de eficiência que a tornou viável.

## O nascimento: a primeira célula solar moderna

A história da primeira célula solar começou em Março de 1953 quando Calvin Fuller, um químico dos Bell Laboratories (Bell Labs), em Murray Hill, New Jersey, nos Estados Unidos da América, desenvolveu um processo de difusão para introduzir impurezas em cristais de silício, de modo a controlar as suas propriedades eléctricas (um processo chamado “dopagem”). Fuller produziu uma barra de silício dopado com uma pequena concentração de gálio, que o torna condutor, sendo as cargas móveis positivas (e por isso é chamado silício do “tipo p”). Seguindo as instruções de Fuller, o físico Gerald Pearson, seu colega nos Bell Labs, mergulhou esta barra de silício dopado num banho

quente de lítio, criando assim na superfície da barra uma zona com excesso de electrões livres, portadores com carga negativa (e por isso chamado silício do “tipo n”). Na região onde o silício “tipo n” fica em contacto com o silício “tipo p”, a “junção p-n”, surge um campo eléctrico permanente.

Ao caracterizar electricamente esta amostra, Pearson verificou que produzia uma corrente eléctrica quando a amostra era exposta à luz. Pearson tinha acabado de fazer a primeira célula solar de silício. Morton Prince, um outro físico dos Bell Labs, conta numa entrevista [3] como Pearson ficou surpreendido com a descoberta e o chamou ao laboratório para que testemunhasse as medidas, assinando o seu caderno de laboratório.

Entusiasmado, Pearson foi ter com o engenheiro Daryl Chapin, também seu colega nos Bell Labs, que estudava soluções para substituir as baterias eléctricas que mantinham em funcionamento redes telefónicas remotas. Chapin ensaiara células solares de selénio, conhecidas há muito, mas com resultados decepcionantes: a eficiência máxima que conseguira era bem inferior a 1%. Ensaando a nova célula, Chapin e Pearson verificaram que a eficiência de conversão era de cerca de 4%, muitas vezes maior do que a melhor célula de selénio.

Continuando o estudo da nova célula, rapidamente o grupo encontrou vários obstáculos. Por um lado a célula revelava uma resistência-série muito significativa<sup>1</sup>, devida à dificuldade em soldar contactos eléctricos ao material. Por outro lado, mesmo à temperatura ambiente, verificaram que o lítio migrava para o interior do silício, pelo que a junção p-n (a “zona activa” da célula solar) ficava cada vez mais profunda e inacessível aos fótons da radiação solar, diminuindo assim a eficiência da célula.

Fuller experimentou fazer a dopagem do tipo n usando uma difusão de fósforo, e obteve uma junção p-n mais estável do que a anterior. Porém, o problema dos contactos persistia.

Foi então que Fuller substituiu o gálio por arsénio (formando um substrato do tipo n) seguido por uma difusão



Fig. 1 - Calvin Fuller prepara uma amostra de silício dopado com arsénio para a colocar num forno de difusão de modo a criar uma junção p-n.

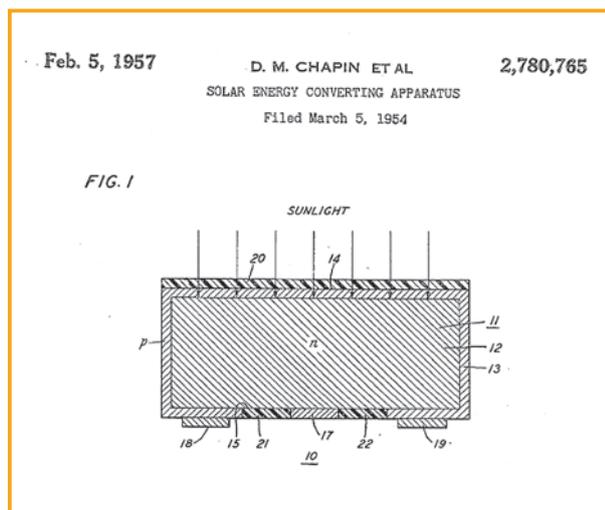


Fig. 2 - Extracto da patente da primeira célula solar, registada em Março de 1954.

de boro (formando uma zona do tipo p à superfície). As novas células podiam agora ser facilmente soldadas e revelaram uma eficiência recorde, atingindo 6%.

Perante estes resultados, e depois de o Pentágono ter autorizado a sua publicação, a primeira célula solar foi apresentada na reunião anual da National Academy of Sciences, em Washington, e anunciada numa conferência de imprensa no dia 25 de Abril de 1954. Os resultados foram submetidos para publicação no *Journal of Applied Physics* [4] e foi registada uma patente [5] (Fig. 2).

A demonstração pública da “pilha solar” consistiu numa transmissão via rádio de algumas palavras entre D. E. Thomas e Morton Prince usando um sistema portátil alimentado por uma célula solar<sup>2</sup>. A reacção da imprensa foi entusiástica. Nas páginas do *New York Times* podia ler-se que aquela primeira célula solar “marca o princípio de uma nova era, levando, eventualmente, à realização de um dos mais belos sonhos da humanidade: a colheita de energia solar sem limites, para o bem-estar da civilização”.

A primeira aplicação das células solares de Chapin, Fuller e Pearson (Fig. 3) foi realizada em Americus, no estado da Georgia, para alimentar uma rede telefónica local (Fig. 4). O painel, com nove células com 30 mm de diâmetro, foi montado em Outubro de 1955 e removido em Março de 1956. Os resultados foram promissores, embora o painel tivesse ficado rapidamente coberto por uma massa opaca de fezes ornitológicas! [6].

No entanto, rapidamente se compreendeu que o custo das células solares era demasiado elevado, pelo que a sua utilização só podia ser economicamente competitiva em aplicações muito especiais, como, por exemplo, para pro-

duzir electricidade no espaço. Recordemos que o primeiro satélite, o Sputnik, lançado em 1957, acabara de inaugurar oficialmente a corrida ao espaço entre os Estados Unidos e a União Soviética.



Fig. 3 - Gerald Pearson, Daryl Chapin, Calvin Fuller e a sua primeira célula solar, desenvolvida nos laboratórios da Bell Telephone C. em 1954.



Fig. 4 - A primeira aplicação de uma célula solar de silício foi como fonte de alimentação de uma rede telefónica local em Americus, na Geórgia, Estados Unidos da América, em 1955.

### Infância e adolescência

Inicialmente, os satélites usaram pilhas químicas ou baseadas em isótopos radioactivos. As células solares eram consideradas uma curiosidade, e foi com grande relutância que a NASA aceitou incorporá-las, como *back-up* de uma pilha convencional, no *Vanguard I*, lançado em Março de 1958 (Fig. 5). A pilha química falhou, mas o pequeno painel com cerca de 100 cm<sup>2</sup>, que produzia quase 0,1 W, manteve o transmissor de 5 mW em funcionamento muito para além de todas as expectativas: o *Vanguard I* manteve-se operacional durante oito anos. Depois desta demonstração de fiabilidade, durabilidade e baixo peso, o programa espacial norte-americano adoptou as células solares como fonte de energia dos seus satélites.

Também o programa espacial soviético viu nas células solares a solução para uma fonte de energia inesgotável para os seus satélites. Dois meses depois do lançamento do *Vanguard I*, foi a vez do *Sputnik-3*. E muitos outros se seguiram nas décadas seguintes. Hoje, todos os veículos espaciais são equipados com células solares, desde a *Inter-*

*national Space Station* aos *Mars Rover*, que ao fim de dois anos continuam a percorrer o solo marciano.

O desenvolvimento de células solares cada vez mais eficientes para utilização no espaço levou a alguns avanços tecnológicos importantes na década que se seguiu. É o caso da substituição, a partir de 1960, do contacto frontal único por uma rede de contactos mais finos mas espalhados, reduzindo a resistência série e aumentando a eficiência [7].

Enquanto nas primeiras células solares norte-americanas o substrato das células era silício do tipo n, os investigadores do programa espacial soviético escolheram substratos do tipo p, por ser mais económico de produzir. Mais tarde, verificou-se que o silício do tipo p é mais resistente à radiação pelo que, depois da descoberta das cinturas de radiação de Van Allen, em 1960, o programa espacial norte americano começou também a desenvolver células em substrato do tipo p [8].

Outro avanço importante foi a chamada “célula violeta”, dos COMSAT Laboratories [9]. Esta célula tinha uma do zona tipo n significativamente mais fina que as anteriores, o que permitiu eliminar a zona inactiva à superfície, melhorando portanto a resposta no azul. A célula violeta obteve uma eficiência recorde de 13,5%. Destaque-se ainda a utilização de um campo eléctrico na superfície posterior da célula (o *Back Surface Field* - BSF) criado por uma difusão de alumínio, para melhorar a resposta da célula no vermelho<sup>3</sup> [10], e a texturização da superfície frontal para reduzir as perdas por reflexão [11].

Mas, se o desenvolvimento das células solares nos anos sessenta foi sobretudo motivado pela corrida ao espaço, o que levou a células mais eficientes mas não necessariamente mais económicas, foi nessa década que surgiram as primeiras aplicações terrestres. Foi o caso das células da SOLAREX, uma empresa de Joseph Lindmeyer, que começou a produzir painéis fotovoltaicos para sistemas de telecomunicações remotos e bóias de navegação. Este tipo de aplicações muito específicas eram então as únicas economicamente interessantes devido à inexistência de fontes de energia alternativas à electricidade solar. Esta situação viria a mudar de figura quando, no outono de 1973, o preço do petróleo quadruplicou.

O pânico criado pela crise petrolífera de 1973 levou a um súbito investimento em programas de investigação para reduzir o custo de produção das células solares. Algumas das tecnologias financiadas por estes programas revolucionaram as ideias sobre o processamento das células solares. É o caso da utilização de novos materiais, em particular o silício multicristalino (em vez de cristais únicos de silício, monocristais, muito mais caros de produzir) ou de métodos de produção de silício directamente em fita (elimi-

nando o processo de corte dos lingotes de silício, e todos os custos associados). Outra inovação particularmente importante do ponto de vista de redução de custo foi a deposição de contactos por serigrafia em vez das técnicas tradicionais: a fotolitografia e a deposição por evaporação em vácuo [12]. O resultado de todos estes avanços foi a redução do custo da electricidade solar de 80 \$/Wp para cerca de 12 \$/Wp em menos de uma década<sup>4</sup>.

Do ponto de vista da eficiência de conversão das células solares, a barreira dos 20% de eficiência foi pela primeira vez ultrapassada pelas células de silício monocristalino da Universidade de New South Wales, na Austrália [13], enquanto a equipa de Dick Swanson atingiu os 25% de eficiência em células com concentrador<sup>5</sup> [14].

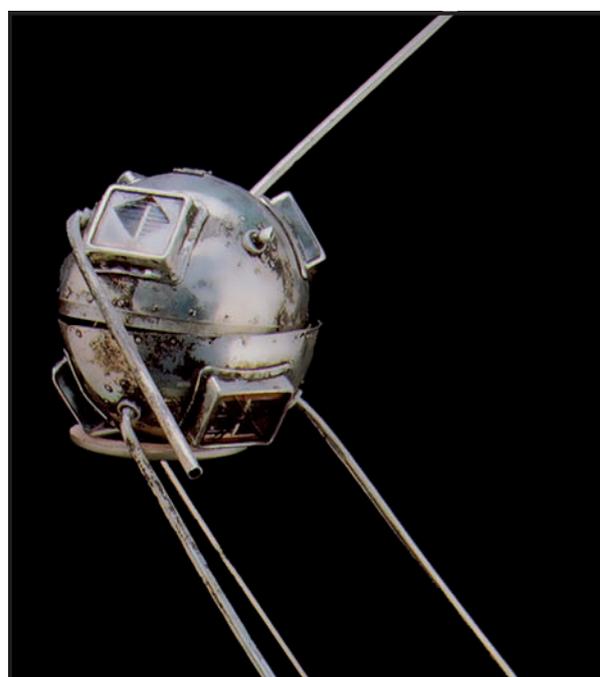


Fig. 5 - Imagem do *Vanguard I*, o primeiro satélite com células solares, lançado em Março de 1958 levando a bordo um pequeno painel solar com 100 cm<sup>2</sup> visível na janela em cima à esquerda.

### A maturidade

As décadas de oitenta e noventa foram também marcadas por um maior investimento em programas de financiamento e de demonstração motivados sobretudo pela consciência crescente da ameaça das alterações climáticas devido à queima de combustíveis fósseis<sup>6</sup>. Exemplos destas iniciativas são a instalação da primeira central solar de grande envergadura (1 MWp) na Califórnia, em 1982, e o lançamento dos programas de “telhados solares” na Alemanha (1990) e no Japão (1993). Os poderes políticos compreenderam então que a criação de um verdadeiro mercado

fotovoltaico não poderia basear-se apenas no desenvolvimento tecnológico, aumentando a eficiência das células (como na época da corrida ao espaço), ou reduzindo o seu custo de produção (como depois da crise do petróleo) mas também através de uma economia de escala: quantas mais células forem fabricadas menor será o custo unitário. Um exemplo do impacto deste tipo de política fica bem claro quando se consultam as conclusões de um estudo financiado pela Comissão Europeia, o MUSIC FM, que mostrou que, utilizando tecnologia actual, melhorada apenas por investigação focada com resultados previsíveis, uma fábrica de painéis solares com um nível de produção da ordem dos 500 MW anuais levaria a uma redução dos custos dos painéis solares para valores competitivos com a energia convencional (1 euro/Wp) [15].

Foi do resultado de iniciativas de estímulo ao mercado fotovoltaico, como por exemplo a lei das tarifas garantidas na Alemanha, que resultou o crescimento exponencial do mercado da electricidade solar verificado no final dos anos noventa e princípios deste século: em 1999 o total acumulado de painéis solares atingia a fasquia do primeiro gigawatt, para, três anos depois, o total acumulado ser já o dobro.

Entretanto, o desenvolvimento tecnológico do fotovoltaico não pára. Assim, em 1998 foi atingida a eficiência recorde de 24,7%, com células em silício monocristalino [16], enquanto, no ano passado, o grupo do Fraunhofer Institut for Solar Energy Systems anunciou uma eficiência superior a 20% para células em silício multicristalino [17]. Células solares com configurações mais complexas, as chamadas células em cascata (ou *tandem*) que consistem na sobreposição de várias células semicondutoras, cada uma optimizada para um dado comprimento de onda da radiação, permitem atingir rendimentos de conversão superiores a 34% [18].

### O futuro

A European Photovoltaic Industry Association (EPIA) publicou em 2004 um roteiro que avança as perspectivas da indústria fotovoltaica para as próximas décadas. Prevendo um crescimento do mercado semelhante ao dos últimos anos (superior a 30% por ano) e uma redução nos custos proporcional ao crescimento de painéis instalados, a EPIA antecipa que em 2020 cerca de 1% da electricidade consumida mundialmente será de origem fotovoltaica, elevando-se essa fracção para cerca de 26% em 2040 [19]. Ainda segundo o mesmo relatório, do ponto de vista tecnológico o ênfase será dado à redução de custos através da redução da matéria-prima (silício) utilizada por unidade de potência instalada, usando células mais finas ou produzidas directamente em fita. Destaque-se ainda o desenvolvimento de novas técnicas de soldadura dos contactos eléctricos

entre células individuais que hoje limitam fortemente a automatização dos processos de montagem de painéis solares.

### Conclusão

Decorrido meio século desde a construção da primeira célula solar de silício, a tecnologia fotovoltaica atingiu finalmente uma fase de maturidade que permite antecipar que, nas próximas décadas, o fotovoltaico se pode vir a transformar numa das mais importantes formas de produção de electricidade.

Se à sombra da corrida ao espaço, os primeiros 25 anos de vida da célula solar assentaram na procura de maiores eficiências, o choque petrolífero e a percepção da ameaça das alterações climáticas devido à emissão de gases e consequente efeito de estufa estimularam o início do desenvolvimento de técnicas de processamento de células com menores custos. Hoje é dado ênfase a mecanismos de apoio à criação e desenvolvimento de um verdadeiro mercado de electricidade solar sustentável que, nos próximos 25 anos, possa levar a energia fotovoltaica a muitos dos lares do planeta.

### BIBLIOGRAFIA

Para mais detalhes sobre a história das células solares de silício consultar os seguintes textos:

1. Flood, M., *Solar cells, Design and Innovation*, Open University Press (1986) 56.
2. Green, M., “Silicon Photovoltaic Modules: A Brief History of the First 50 Years”, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* **13** (2005) 447.
3. Perlin, J., Kazmerski, L. and Moon, S., “Silicon solar cell turns 50”, *Solar Today* **1** (2004).
4. Siemer J., “First steps into the solar age”, *Photon International* **6** (2004) 65.
5. Treble, F., “Milestones in the development of crystalline silicon solar cells”, *Renewable Energy* **15** (1998) 473.
6. Willeke, G. P., “The crystalline silicon solar cell: history, achievements and perspectives”, *Proceedings 19th EPVSEC* (2004).

## REFERÊNCIAS

- [1] Becquerel, E., “Memoires sur les effets electriques produits sous l’influence des rayons”, *Comptes Rendues* **9** (1839) 561.
- [2] Adams, W.G. and Day, R.E., “The action of light on selenium”, *Proceedings of the Royal Society*, **A25** (1877) 113.
- [3] Chapin, D. M., Fuller, C. S. and Pearson, G. L., “A New Silicon p-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power”, *Journal of Applied Physics* **25** (1954) 676.
- [4] Chapin, D. M., Fuller, C. S. and Pearson, G. L., *Solar Energy Converting Apparatus*, Patent US2780765.
- [5] Pearson, G. L., “Conversion of solar to electric energy”, *American Journal of Physics* **25** (1957) 591.
- [6] Wolf, M., “Limitations and possibilities for improvement of photovoltaic solar energy converters”, *Proceedings of the IRE* **48** (1960) 1246.
- [7] Koltun, M. M., “History of solar cell development in the Soviet space program and the terrestrial potential for this technology”, *Solar Energy Materials and Solar cells* **44** (1996) 293-317.
- [8] Lindemeyer, J. and Allison, J. F., “An improved solar cell: the violet cell”, *Proceedings 9th IEEE PSC*, Silver Spring (1972) 83.
- [9] Mandelkorn, J. and Lamneck, J. H., “Simplified fabrication of back surface electric filed silicon cell and novel characteristics of such cells”, *Proceedings 9th IEEE PSC*, Silver Spring (1972) 66.
- [10] Haynos, J. G. et al., “The COMSAT non-reflexive silicon solar cell: a second generation improved cell”, *Proceedings International Conference on PV Power Generation*, Hamburg (1974) 487.
- [11] Ralph, E. L., “Recent advances in low cost solar cell processing”, *Proceedings 11th IEEE PVSC* (1975) 315.
- [12] Green, M. A. et al., “Improvements in silicon solar cell efficiency”, *Proceedings 18th IEEE PVSC*, Las Vegas, Nevada (1985) 39.
- [13] Sinton, R. A. et al., “Silicon point contact concentrator solar cells”, *Proceedings 18th IEEE PVSC*, Las Vegas, Nevada (1985) 61.
- [14] Bruton, T. et al., “Multimegawatt upscaling of silicon and thin film solar cell and module manufacturing”, *MUSIC FM, Final Report RENA-CT94-0008* (1997).
- [15] Zhao, J., Wang, A., Green, M. A. and Ferrazza, F., “Novel 19.8% efficient honeycomb textured multicrystalline and 24.4% monocrystalline silicon solar cell”, *Applied Physics Letters* **73** (1998) 1991.
- [16] Schultz, O., Glunz, S. W. and Wileke G. P., “Multicrystalline Silicon Solar Cells Exceeding 20% Efficiency”, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* **12** (2004) 553.
- [17] King, R. R., et al., “Lattice-matched and metamorphic GaInP/GaInAs/Ge concentrator solar cells”, *Proceedings of the World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-3)*, Osaka (2003).
- [18] Viaud, M., Hoffman, W. and Aulich H., “European PV Industry roadmap”, *Proceedings 19th EPVSEC* (2004).

## NOTAS

<sup>1</sup> A resistência série de uma célula solar representa o conjunto das diversas perdas ôhmicas do dispositivo que reduzem o rendimento da célula.

<sup>2</sup> Cinquenta anos depois, uma destas células originais foi rerepresentada na Conferência Mundial de Energia Fotovoltaica, que teve lugar em Osaka, no Japão, em Maio de 2003. Passado meio século, a sua eficiência degradou-se um pouco e é agora de 5,1% (medição certificada pelo NREL).

<sup>3</sup> O BSF repele os portadores da superfície posterior da célula solar, diminuindo efectivamente a sua probabilidade de recombinação.

<sup>4</sup> O  $W_p$  (watt-peak) é a unidade de medida da potência eléctrica de um painel fotovoltaico quando iluminado em determinadas condições padrão (1000 W/m<sup>2</sup>, temperatura ambiente de 25 °C e o espectro da radiação solar AM1.5).

<sup>5</sup> Os concentradores focam a radiação solar numa área mais pequena, onde se encontra a célula solar.

<sup>6</sup> Com a excepção dos E.U.A., que introduziram cortes significativos no financiamento da energia fotovoltaica durante a administração Reagan.