

ELECTRICIDADE SOLAR, ESTADO ACTUAL E PERSPECTIVAS[†]

Roberto Marçal Gamboa

Escola Superior de Tecnologia do Mar – Instituto Politécnico de Leiria,
Largo de Nossa S^{ra} dos Remédios, 2520 Peniche, Portugal. rgamboa@estm.iplei.pt

A electricidade solar está em franco desenvolvimento, a produção de painéis fotovoltaicos cresceu 44% em 2000, mas o volume ainda é reduzido, 288 MWp. Para que esta energia limpa e renovável seja utilizada em larga escala é ainda necessário uma redução de custos. Este objectivo pode ser atingido através do desenvolvimento tecnológico e/ou pela via da produção em massa.

O silício é o material dominante na produção de células fotovoltaicas, principalmente o silício multicristalino, que pode dominar o mercado a médio prazo. O estudo e o desenvolvimento tecnológico na área da energia fotovoltaica tem como principais objectivos: a produção de células de alto rendimento; o desenvolvimento de células finas; e a utilização de silício de menor custo. Por outro lado, a previsão do aumento de produção de células solares motiva o desenvolvimento de processos de produção de silício solar como matéria prima dedicada à energia fotovoltaica.

A energia fotovoltaica pode ser aplicada como um sistema isolado, ou inserida na rede de distribuição de energia, sendo evitado neste caso recurso a acumuladores. A integração de painéis fotovoltaicos em veículos ou edifícios pode ser explorada envolvendo a estética com a produção de energia limpa e renovável.

Palavras-chave: Energia solar, fotovoltaica, renovável, electricidade solar.

1. Introdução

O crescimento contínuo da população e do consumo de energia à escala mundial, associado à natureza finita dos combustíveis fósseis e à poluição gerada pela sua queima, questiona o actual modelo energético. A procura de um modelo sustentável a longo prazo tem motivado interesse crescente por formas de energia mais limpas e renováveis, de modo a permitir a satisfação das necessidades energéticas, sem alterar demasiado as condições de vida no planeta.

[†] Palestra apresentada na I Jornadas Ambientais – o Ambiente Litoral, Peniche, 25 Outubro de 2001

O consumo mundial de energia primária no ano 2000 foi da ordem de 10^{14} kWh sendo o petróleo a fonte mais utilizada (40%) seguido do gás natural e do carvão. Em Portugal, o consumo de petróleo é ainda mais relevante pois representa 60% das fontes de energia primárias utilizadas. A natureza limitada das fontes de energia fóssil pode ser explicitada pela razão entre as reservas comprovadas e o consumo, que para o petróleo no ano 2000 ronda os 40 anos [1]. As preocupações ambientais, em particular a necessidade de redução das emissões de gases que contribuem para o efeito de estufa, têm levado a uma promoção das energias renováveis, incentivando o investimento.

O Sol é a grande fonte de energia do planeta Terra: por ano a Terra absorve cerca de 10^{18} kWh de energia solar. O problema da energia sustentável pode ser resolvido aproveitando apenas uma pequena parte da energia que naturalmente a Terra recebe do Sol. A conversão desta energia pode ser conseguida através do movimento induzido no ar, energia eólica, através do movimento das águas, energia hídrica ou das ondas, e pode ser também convertida directamente em calor, denominada energia solar térmica, ou em electricidade através de painéis fotovoltaicos, a energia fotovoltaica ou electricidade solar.

A energia fotovoltaica utiliza directamente um recurso global e duradouro, o Sol, as suas vantagens podem ser enumeradas: é limpa, em funcionamento não tem emissões poluentes; é modular; pode ser portátil; tem longa vida útil e manutenção quase nula. O custo dos sistemas fotovoltaicos, embora em processo de redução, representa ainda a maior desvantagem e a limitação da aplicação da electricidade solar em larga escala.

2. Electricidade Solar, estado actual

2.1 Produção Industrial

A electricidade solar está em franco desenvolvimento, a produção industrial de módulos fotovoltaicos tem vindo a crescer ao longo dos anos. O número de células produzidas e o seu rendimento é geralmente integrado recorrendo à potência de pico (Wp). A potência de pico é a potência produzida em condições de funcionamento normalizadas (temperatura de 25°C e espectro AM1.5d, normalizado para 1kW/m^2), será *grosso modo* a potência máxima que o modulo produzirá num dia sem nuvens e com iluminação solar directa. Tomando esta unidade é possível apresentar um gráfico da produção de módulos fotovoltaicos durante os últimos anos, figura 1. O crescimento

é notório, atingindo os 44% em no ano 2000, embora o volume de produção seja ainda reduzido, 288 MWp [2].

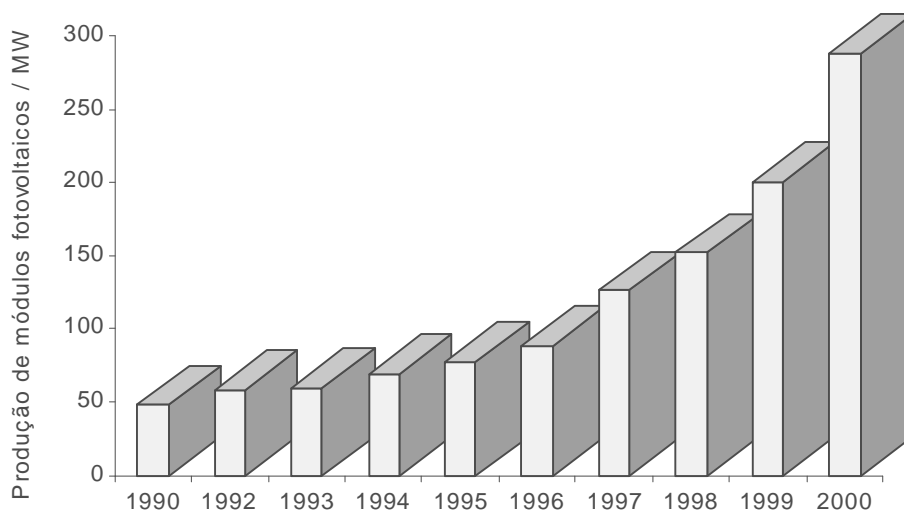


Fig. 1 - Gráfico com dados da produção de módulos fotovoltaicos durante os últimos anos.

O silício cristalino continua a ser a principal matéria prima das células fotovoltaicas produzidas, totalizando cerca de 90% da produção mundial de células no ano 2000, tendência que se deverá manter nos próximos anos. As principais razões para o domínio do silício estão associadas à sua abundância na crosta terrestre, ao facto do seu hiato estar próximo do óptimo para conversão fotovoltaica e ao conhecimento científico acumulado pela investigação associada à indústria electrónica. O silício na forma monocristalina é utilizado na indústria electrónica e dominava também a indústria fotovoltaica. No entanto, o desenvolvimento de processos de cristalização de menor custo, em lingotes multicristalinos, têm levado a uma crescente utilização do silício em forma multicristalina na indústria fotovoltaica. No ano 2000 o silício multicristalino esteve na base de 48% das células fotovoltaicas produzidas, enquanto que o monocristalino representou 38%. O silício amorfo, a-Si, fabricado por deposição sobre um substrato é o mais fabricado dos filmes finos para aplicação fotovoltaica e deteve em 2000 quase 10% do mercado. A produção industrial de silício multicristalino cristalizado directamente em folha, denominado EFG - Si foi iniciada em 1995 e detém já em 2000 mais do que 4% do mercado. Esta cristalização directa em forma de folha permite uma redução de custos associada à eliminação da operação de corte do silício.

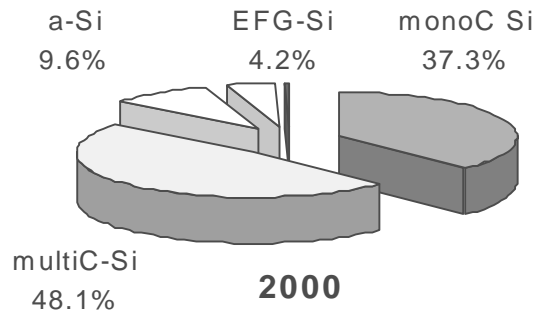


Fig. 2 – Divisão da produção industrial de módulos fotovoltaicos por tecnologia no ano 2000.

O silício utilizado para fabricar células fotovoltaicas é obtido através da purificação do silício metalúrgico (89% de pureza) utilizando a destilação por gás silano ou clorosilano até serem obtidos pedaços de silício semiconductor, com grau de pureza de 99,9999%. Estes pedaços de silício ultrapuro são depois derretidos e cristalizados com baixa densidade de defeitos cristalográficos, geralmente em forma de placas de silício monocristalino ou multicristalino, já dopadas com boro de modo a fabricar silício tipo p.

O silício monocristalino é geralmente cristalizado pelo processo Czochralski, (Cz) onde a ponta de uma semente monocristalina é mergulhada em silício líquido contido num cadinho, que é aquecido por indução electromagnética. Depois de parcialmente fundida, a semente é colocada a rodar (para aumentar a homogeneidade do material) e puxada lentamente. O lingote monocristalino cilíndrico assim produzido tem a orientação cristalográfica da semente, geralmente $\langle 100 \rangle$ e pode ainda ser purificado por fusão de zona. O cilindro é depois cortado com serras de fio, para serem produzidas placas de silício com espessuras de 200 a 300 μm .

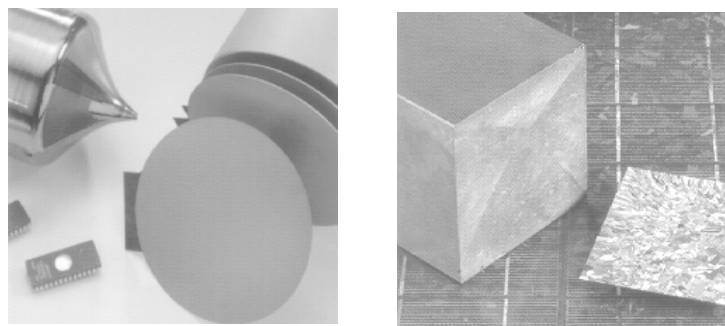


Fig. 3- Fotografias de um lingote de silício monocristalino à esquerda e de um multicristalino.

O silício multicristalino é normalmente produzido por fusão e solidificação em molde, utilizando aquecimento por indução electromagnética com um susceptor de

grafite. A qualidade do silício produzido depende essencialmente das impurezas da matéria prima e do molde, mas também da evolução da interface de solidificação durante a cristalização. O controlo da temperatura no bloco durante o arrefecimento é feito de modo a proporcionar uma frente de solidificação plana e direccionada, de modo a reduzir as tensões internas e os defeitos cristalográficos, deste modo proporcionando o aumento da dimensão média do grão.

O fabrico das células fotovoltaicas consiste na dopagem superficial com fósforo, de modo a formar uma zona tipo n, e na formação dos contactos eléctricos, um na zona n e outro na zona p. As células são depois ligadas em série num painel fotovoltaico e encapsuladas, para protecção eléctrica e mecânica.

2.2 Funcionamento básico das células fotovoltaicas de silício

Uma célula fotovoltaica de silício pode ser descrita aproximadamente como um díodo de grande área. As células solares mais simples têm apenas um semiconductor, o silício e também só uma junção pn.

O silício é um semiconductor com um hiato indirecto com energia de 1.12 eV a 300K e pode ser facilmente dopado com boro e com fósforo de modo a construir, respectivamente, a região p e n. A região tipo p tem falta de electrões, pois o boro tem menos um electrão de valência que o silício. Como tal, existem muitos buracos, ou seja, estados de energia não ocupados na banda de valência. A região tipo n tem excesso de electrões, pois o fósforo tem mais um electrão de valência que o silício. Estes electrões em excesso vão ocupar estados de energia na banda de condução e são os portadores maioritários na região n, onde os buracos são minoritários. Na zona p as posições invertem-se e os portadores minoritários são os electrões.

Na interface entre a zona p e a zona n forma-se um campo eléctrico interno que mantém em equilíbrio as densidades de portadores das duas regiões e arrasta os electrões para a zona n e os buracos para a zona p. Quando uma junção pn é iluminada, os fotões com energia superior à energia do hiato do semiconductor vão promover electrões da banda de valência para a de condução, ou seja, geram um par electrão-buraco. Os pares de portadores gerados termalizam nos limites das bandas de condução e de valência, perdendo a energia acima da do hiato sob forma de calor. Se os

portadores minoritários criados atingirem a região do campo eléctrico são colectados, contribuindo assim para a corrente produzida pela célula fotovoltaica. A recombinação, ou seja, a aniquilação de pares electrão-buraco antes de chegarem à zona onde existe o campo eléctrico, traduz-se na redução da colecção de pares gerados.

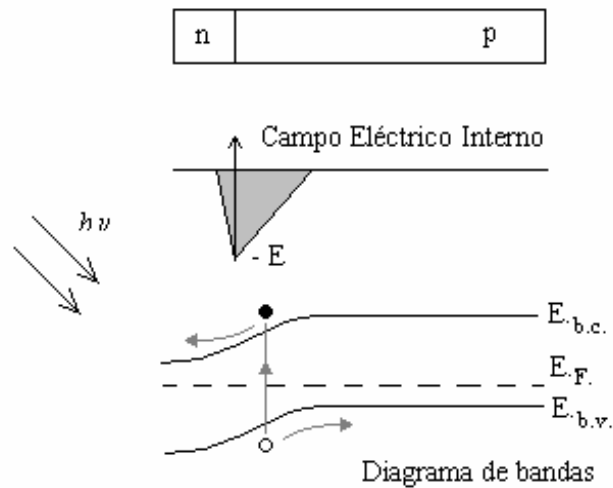


Fig. 4 – Diagrama simplificado da junção pn habitualmente presente nas células solares, com o campo eléctrico interno e o diagrama de bandas de energia [1.9]. E_{bc} - Energia mínima na banda de condução, E_{bv} - Energia máxima na banda de valência, E_F - Energia do nível de Fermi.

A potência eléctrica produzida é o produto da tensão entre os eléctrodos da zona n e da zona p da célula pela corrente produzida, ou seja pela corrente de portadores colectados. O rendimento de conversão da célula é a razão entre a potência da luz que incide na superfície da célula fotovoltaica e a potência eléctrica disponível aos seus terminais. Como a recombinação limita a tensão e a corrente produzida, reduz o rendimento de conversão da célula fotovoltaica. A recombinação aumenta com a quantidade de impurezas e defeitos cristalográficos presentes no material, esta é a principal razão para a utilização de silício de pureza e qualidade elevadas.

O rendimento das células fotovoltaicas produzidas em laboratório é próximo dos 25 %, na produção industrial de células o melhor rendimento é de 18% e nos módulos de 16%. O módulos comerciais têm geralmente rendimentos entre os 13 e os 15%.

2.3 Aplicações

O custo dos sistemas fotovoltaicos é a principal limitação à produção da electricidade solar em larga escala. O tempo de retorno da energia ou seja o tempo necessário para que a energia gasta ao produzir um painel fotovoltaico seja produzida situa-se entre os 3 e os 6 anos, dependendo da tecnologia e das condições de insolação. O custo de fabrico dos módulos comerciais é inferior a 3 euro/Wp, enquanto que, o custo do sistema completo depende da aplicação em causa.

Para o mercado dos sistemas isolados, onde o sistema tem de conter os acumuladores, o custo inicial do sistema completo pode ser superior a 15 euro/Wp [3]. Mesmo assim a opção fotovoltaica pode ser económica se o custo da ligação à rede eléctrica convencional for superior, como é o caso de algumas habitações rurais isoladas ou das antenas de telecomunicações. O mercado das habitações isoladas representa actualmente 35% do mercado total e tem grande potencial de crescimento, principalmente nos países em desenvolvimento com pequena extensão de rede eléctrica. O mercado das telecomunicações representa 25% do total e também está em crescimento [4]. Um outro tipo de sistemas isolados são os satélites, neste caso os problemas de redução de massa e de resistência à radiação, fora da atmosfera terrestre, são mais relevantes que o custo do sistema. Como exemplo desta aplicação a figura 5 representa uma fotografia da estação espacial internacional com os actuais painéis fotovoltaicos.

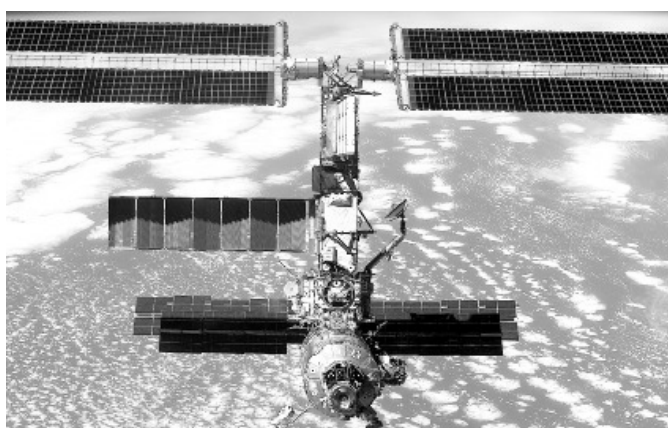


Fig. 5 - Estação espacial internacional, com uma potência fotovoltaica instalada de 256 kW.

Os sistemas ligados à rede eléctrica têm de conter os dispositivos para acondicionar a electricidade produzida, de acordo com as características da rede (nomeadamente o inversor). O custo inicial do sistema total é de 6,1 euro/Wp [3], para um tempo de vida que ronda os 30 anos. Este mercado representa 38% [4] do total e tem sido criado,

essencialmente na Alemanha e no Japão, através e subsídios ao investimento e à produção de energia fotovoltaica. É um mercado dependente de subsídios, mas está em expansão e com boas perspectivas, se forem consideradas as metas colocadas para a produção de energia renovável à escala europeia e mundial.

A produção de electricidade com ligação à rede eléctrica apresenta ainda a possibilidade de redução dos custos de transporte da energia eléctrica, uma vez que esta é produzida junto ao consumidor final.

A instalação de painéis solares em edifícios abre também novas possibilidades estéticas que estão a ser aproveitadas pelos arquitectos em projectos inovadores e eficientes. Como por exemplo o “Solar Office” em Doxford, Reino Unido (figura 6) onde a fachada sul tem um conjunto de painéis fotovoltaicos de silício multicristalino numa estrutura transparente, para permitir a passagem de luz natural. A fachada tem 646 m² de área e potência instalada é de 73 kWp, sendo previsível uma produção anual de 55 MWh o que representará mais do que um quarto da energia necessária para o edifício.



Fig. 6 - Fachada sul do “Solar Office” em Doxford, Reino Unido, com 646 m² e uma potência de 73 kWp, sendo previsível uma produção anual de 55 MWh o que representará mais do que um quarto da energia necessária para o edifício.

A integração de células fotovoltaicas em veículos não é por enquanto um verdadeiro mercado, no entanto as corridas de carros solares constituem um campo de estudo para este tipo de aplicação. No domínio dos barcos de turismo existem já algumas experiências interessantes, como o “Solar Sailor”, a operar na baía de Sydney, com uma potência fotovoltaica instalada de 630 kW chega aos 10 nós e tem capacidade para 100 passageiros. O “Alster Sonne” é outro caso semelhante, opera no lago de Hamburgo e tem também capacidade para 100 passageiros, a figura 6 mostra o aspecto que podem ter os barcos fotovoltaicos.

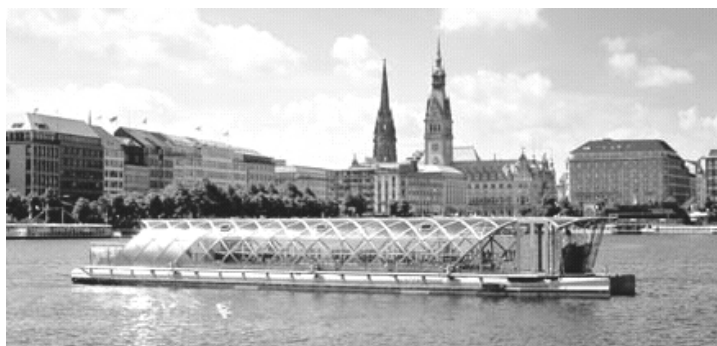


Fig. 6- fotografia do “Alster Sonne” um barco fotovoltaico a operar no lago de Hamburgo.

3. Electricidade solar, perspectivas

A continuação do crescimento da produção industrial de painéis fotovoltaicos é previsível, continuando o silício cristalino a dominar o mercado nos próximos anos. O silício multicristalino deve tomar uma maior parte do mercado e o silício cristalizado em forma de fita pode também ganhar maior mercado devido à redução de custos que permite. A produção de células mais finas e de maior área pode ser uma estratégia a seguir, com vista a uma maior redução do custo dos módulos fotovoltaicos. O aumento do volume de produção acumulado e a evolução natural da curva de aprendizagem faz prever só por si uma redução dos custos a médio prazo.

A próxima geração de células fotovoltaicas será provavelmente baseada nos filmes finos depositados sobre um substrato. O silício amorfo é actualmente o mais utilizado dos filmes finos, detendo quase 10% do mercado, no entanto o potencial de redução de custos deste tipo de células fotovoltaicas é elevado, o que faz prever a longo prazo o domínio do mercado. Encontram-se actualmente no domínio da investigação e da produção laboratorial células interessantes baseadas no telurieto de cádmio (CdTe) no di-selenieto de cobre e índio (CuInSe₂, CIS). As células com junções múltiplas a funcionar sob concentradores solares constituem também uma perspectiva de futuro abrindo a possibilidade de um considerável aumento de rendimento.

Portugal é um dos países da união europeia com melhores condições naturais para a produção de electricidade solar, no entanto, só pontualmente utiliza este recurso. Não existem fabricantes de células ou de módulos fotovoltaicos e a potência total instalada roda os 1000 kW, o que representa apenas 0,1% do parque electroprodutor [5]. Existem no entanto, em fase de discussão, incentivos à produção de energia renovável em geral e

fotovoltaica em particular, no âmbito do programa de modernização do sistema energético nacional, E4 – Eficiência Energética e Energias Endógenas.

4. Conclusões

A electricidade solar é um domínio em franco desenvolvimento no domínio industrial e científico. A produção industrial de células fotovoltaicas continua a subir e o seu custo a baixar, devido ao desenvolvimento tecnológico e ao aumento de produção. Portugal está apenas a começar no aproveitamento deste recurso natural pelo que é necessário desenvolver conhecimentos e capacidades no domínio da electricidade solar.

5. Agradecimentos

Ao grupo de semicondutores da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.

6. Referências

- 1- “BP statistical review of world energy, 2001”, Ed. BP.
- 2- M. Schmela, PV in the fast lane, Photon International, 32-35, 3/2001
- 3- C. Rychaud, Economics of solar electricity, cost vs performance, presented at Photovoltaic Devices, Tomar 2001.
- 4- T. Bruton, Present and future manufacture of solar cells, presented at Photovoltaic Devices, Tomar 2001.
- 5- P. Paes, Energia solar fotovoltaica, breve panorâmica da situação em Portugal, Workshop Energia solar fotovoltaica, Lisboa 2001.