

Uma célula fotovoltaica simples consiste basicamente num díodo de grande área, i.e. um substrato de material semiconductor onde é criado um campo eléctrico interno permanente (chamado junção pn). Quando a radiação atinge um átomo do semiconductor este liberta um electrão que pode ser conduzido pelo campo eléctrico interno para os contactos, contribuindo assim para a corrente produzida pela célula fotovoltaica.

O material de eleição para as células fotovoltaicas é o silício cristalino. As razões para esta escolha estão associadas às características únicas deste material, nomeadamente a sua abundância no planeta (cerca de 30%, no conjunto dos elementos que constituem a crosta terrestre), a sua não-toxicidade, o facto de ser a matéria-prima da indústria electrónica (e portanto ter sido alvo de uma investigação extraordinariamente detalhada nas últimas décadas) e uma série de vantagens técnicas (em particular hiato apropriado à radiação solar, baixo coeficiente de segregação de metais, facilmente dopável, óxido passivante, etc).

A maior desvantagem das tecnologias baseadas no silício cristalino é o facto de exigirem espessuras de células relativamente elevadas (cerca de 0.2 mm em vez de 0.001 mm para as células com filmes finos) com o conseqüente aumento de custo das matérias primas por unidade de área de painel. Este problema tem-se sentido especialmente porque o crescimento explosivo do mercado fotovoltaico, em particular em países como Alemanha e Japão, levou a um excesso de procura e à quase ruptura dos *stocks* de silício cristalino⁵ em 2006-2007. No entanto a indústria respondeu rapidamente e estão já anunciados, ou em fase de instalação, várias projectos de produção em larga escala de silício cristalino apropriado para a fabrico de células solares (a que se chama habitualmente “silício solar”). Naturalmente, outras tecnologias fotovoltaicas, como os referidos filmes finos – que podem ser de silício amorfo, cádmio-telúrio (CdTe) ou cobre-índio-desilénio (CuInSe₂ ou CIS) – têm aproveitado esta janela de oportunidade para gradualmente se introduzirem no mercado, embora só correspondam a uma pequena fracção do mercado global fotovoltaico.

Sistemas fotovoltaicos

A célula solar fotovoltaica é o elemento essencial da conversão da radiação solar em energia eléctrica. Cada célula individual, com cerca de 100mm², gera aos seus terminais uma tensão entre 0.5 e 1 V, com uma corrente típica em curto circuito de algumas dezenas de miliampéres. Esta intensidade da corrente é razoável mas a tensão é demasiado pequena para a generalidade das aplicações pelo que normalmente as células são montadas em série em painéis solares, com 28 a 36 células, gerando tensões DC da ordem dos 12V em condições padrão de iluminação. Estes módulos fotovoltaicos podem ser utilizados individualmente ou montados em série e/ou em paralelo, de modo a obterem-se maiores tensões e/ou correntes, conforme as necessidades da aplicação em concreto.

Uma vez que a energia eléctrica gerada por um sistema fotovoltaico é intermitente e imprevisível, já que depende não só das variações dia/noite mas também das condições climáticas, na grande generalidade das aplicações é necessário prever alguma forma de armazenamento e/ou geração auxiliar de electricidade. No caso de existir localmente uma ligação à rede de distribuição de electricidade, a solução mais simples consiste em fornecer à rede eléctrica o excedente produzido, disponibilizando-a para outros

⁵ Uma das possíveis vítimas deste estrangulamento do mercado, devido ao excesso de procura, pode ter sido a Shell Solar, que no início de 2006 acabou por alienar a divisão de fotovoltaico em silício cristalino por, alegadamente, não poder garantir o fornecimento de matéria prima.

consumidores, e utilizar electricidade fornecida pela rede eléctrica sempre que o sistema não gerar energia eléctrica (nomeadamente no período nocturno)⁶.

Para pequenos sistemas, para aplicações como sistemas de telecomunicações ou sistemas domésticos isolados de pequenas dimensões (SHS, *Stand alone systems*), a solução mais comum para acumular a electricidade fotovoltaica é baseada em baterias electroquímicas, tradicionalmente de chumbo ou de níquel-cádmio. Este tipo de baterias pode acrescentar um custo significativo ao preço do sistema e exige custos de manutenção mais ou menos regulares.

Existem outros tipos de soluções, apropriadas para sistemas de maiores dimensões, que são denominadas sistemas de armazenagem de electricidade de grande capacidade. Aí destacam-se, pela sua simplicidade, os sistemas de bombeamento de água. Durante os períodos de pouca procura utiliza-se a electricidade fotovoltaica excedente para bombear água de um reservatório a baixo nível para um outro reservatório mais elevado. Durante os períodos em que a procura é maior, esta água que foi bombeada para o reservatório mais elevada pode ser utilizada para actuar em turbinas, reconvertendo a energia potencial gravítica em energia eléctrica. A eficiência deste processo de conversão é da ordem dos 60%, o que significa que cerca de 2/3 da electricidade original é recuperada.

A electricidade também pode ser armazenada sob a forma de ar comprimido. Esta técnica é mais complexa do que a dos sistemas de bombeamento de água mas apresenta algumas vantagens relevantes, nomeadamente uma maior densidade energética (exigindo portanto reservatórios mais pequenos, para uma mesma capacidade) e maior flexibilidade para o local de instalação (existindo projectos de demonstração utilizando reservatórios subterrâneos).

A acumulação de electricidade fotovoltaica baseada no hidrogénio é também muitas vezes apresentada como uma solução interessante, sobretudo num futuro a médio prazo. O hidrogénio como vector energético tem a vantagem de poder ser transportado economicamente por *pipeline*, podendo ser utilizado para voltar a produzir energia eléctrica em células de combustível. As eficiências de conversão, limitadas pelo rendimento da electrólise, são para já o grande óbice ao desenvolvimento desta alternativa.

Existem ainda outros processos de acumulação de energia eléctrica, como sistemas magnéticos supercondutores ou sistemas de armazenamento de energia mecânica (*flywheel*) embora estas pareçam ser soluções intrinsecamente mais dispendiosas.

Nos sistemas fotovoltaicos mais simples os painéis solares são ligados directamente à carga, fornecendo electricidade quando se verificam as condições adequadas de iluminação. É o caso de bombeamento de água com motores DC. Subindo o nível de complexidade, em seguida temos os sistemas com acumulador de energia eléctrica, sem sistemas auxiliares de geração. Neste caso é necessário introduzir um regulador de tensão para evitar a sobrecarga das baterias em caso de períodos de muita iluminação. Em aplicações que exijam corrente alternada, a corrente DC que sai dos painéis deve ser convertida em corrente AC, o que é realizado utilizando um inversor. O inversor pode ainda ajustar a tensão de saída mais apropriada à aplicação em causa, usualmente produzindo tensões de 220V-AC. Finalmente, os sistemas fotovoltaicos podem ainda incluir um sistema auxiliar de geração de electricidade (que pode ser uma ligação à rede eléctrica) para superar situações de deficiente iluminação.

⁶ Num próximo artigo, onde se abordarão algumas questões de carácter económico da energia solar fotovoltaica em Portugal, propomo-nos esclarecer o procedimento, e dificuldades burocráticas e administrativas, para a ligação à rede eléctrica.

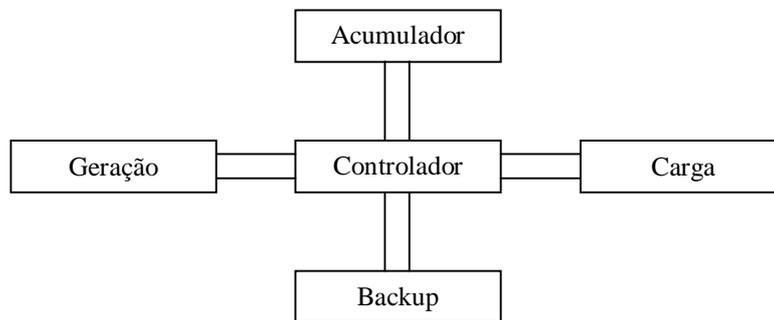


Figura 3: Sistema fotovoltaico. O controlador serve não só de interface entre os diversos componentes do sistema mas pode ainda ter outras funções como regulador de tensão para protecção das baterias, controlo da operação do sistema gerador auxiliar (backup) e adaptador/inversor de tensão mais adequada à carga.

Eficiência de conversão

A eficiência de conversão, ou rendimento, de uma célula fotovoltaica é definido como o quociente entre a potência da luz que incide na superfície da célula fotovoltaica e a potência eléctrica disponível aos seus terminais. A termodinâmica impõe um limite máximo à taxa da eficiência da conversão fotovoltaica (como de resto a todos os processos de transformação de energia) e a própria arquitectura das células fotovoltaicas reduz ainda mais a eficiência máxima das células.

A actual recordista mundial de eficiência de conversão fotovoltaica é uma célula GaInP/GaInAs/Ge da Spectrolab, com 39% de eficiência⁷. Para células de silício, o valor máximo obtido é de 24.4%⁸. Estas células de alta eficiência são dispositivos que requerem uma tecnologia muito complexa como, por exemplo, processos especiais de texturização da superfície, para reduzir a reflectividade da célula, ou a criação de campos eléctricos na traseira da célula para reduzir a recombinação. As células produzidas a nível industrial apresentam eficiências típicas da ordem dos 15%.

A relativamente baixa eficiência de conversão fotovoltaica das células solares é por vezes apresentada como a principal razão para a fraca implementação da energia solar eléctrica. Trata-se de uma afirmação pouco fundamentada pois, por um lado, são muitos os exemplos de processos e dispositivos com eficiências comparáveis (por exemplo a eficiência dos motores de combustão interna, com um século de desenvolvimento tecnológico, apresentam eficiências da ordem dos vinte por cento). Por outro lado, atendendo a que o “combustível” dos painéis fotovoltaicos é a radiação solar, abundante e gratuita, a única implicação da relativa baixa eficiência é a necessidade, para se obter uma determinada potência eléctrica, ser necessária uma maior área de painéis.

A pergunta que então nos ocorre naturalmente é: qual será a área necessária para produzir a electricidade que precisamos⁹ ? Começamos por considerar a radiação solar média em Portugal, que é 1500 kWh/m²/ano. Assumindo um eficiência de conversão de 15% temos 225 kWh/m²/ano de electricidade solar. Como o consumo nacional é da ordem de 4.5x10¹⁰ kWh/ano seriam precisos 200 km² de painéis

⁷ King RR, et al. *Pathways to 40% efficient concentrator photovoltaics*. Conference Proceedings, 20th European Photovoltaic Solar, Energy Conference, Barcelona, June, 2005; 118–123.

⁸ J. Zhao, A. Wang, M.A. Green, F. Ferrazza, *Novel 19.8% efficient honeycomb textured multicrystalline and 24.4% monocrystalline silicon solar cell*, Applied Physics Letters 73 (1998) 1991

⁹ Para uma análise mais rigorosa ver por exemplo Nonhebel S., *Renewable energy and food supply: will there be enough land?*, Energy Reviews 9 (2005) 191–201

solares para produzir toda essa electricidade. Dividindo pelo número de habitantes, 10 milhões, significa que cada português precisaria de 20 m² de painéis fotovoltaicos, com a tecnologia actual, para produzir toda a electricidade que consumimos (não só o consumo doméstico individual mas também o consumo de electricidade na industria e nos serviços). Esta área corresponde a cerca de 20% da área de asfalto nas estradas nacionais!

Podemos então concluir que o obstáculo à expansão da energia solar fotovoltaica não é a sua eficiência mas o custo dos painéis (por unidade de energia produzida). Sobre as estratégias para enfrentar o problema do custo debruçar-nos-emos num próximo artigo.

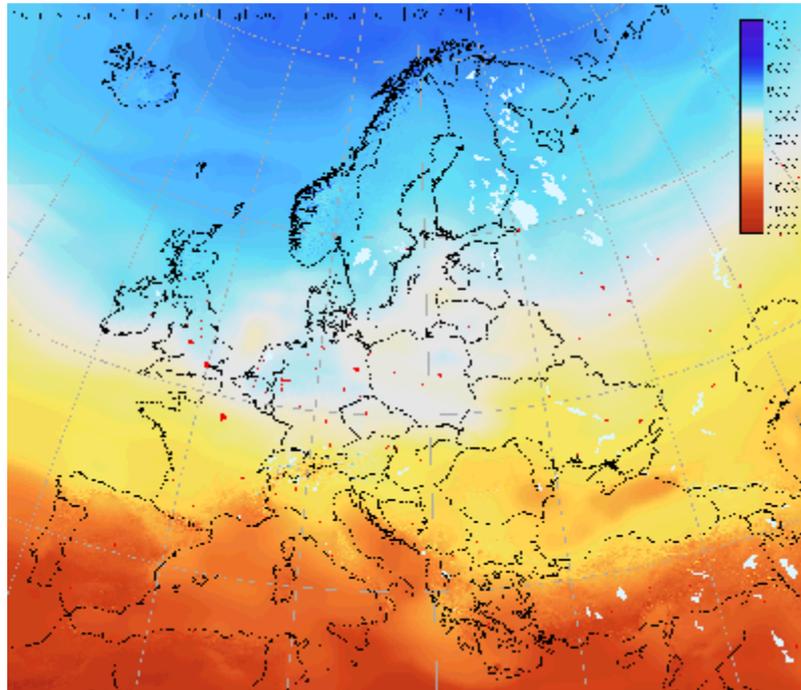


Figura 4: Distribuição geográfica da irradiação solar anual média, medida na horizontal. Portugal é, depois do Chipre, o país da União Europeia com maior exposição solar. [Fonte: PVGIS - Geographical Assessment of Solar Energy Resource © European Communities, 1995-2006]

Tempo de retorno energético

Um outro aspecto que ciclicamente regressa ao debate da energia solar fotovoltaica é o chamado tempo de retorno energético, ou seja, a afirmação de que a energia que se gasta para produzir um painel solar é mais do que a energia que ele vai produzir ao longo da vida. Se assim fosse, os painéis solares eléctricos seriam na verdade consumidores de energia, e consequentemente emissores de gases de efeito de estufa que dizem tentar combater.

Esta afirmação não tem qualquer fundamento. O tempo de retorno energético¹⁰ para os painéis solares eléctricos típicos em condições standard de iluminação é da ordem de 2 ou 3 anos o que significa que, atendendo a que o tempo médio de vida de um painel solar é de pelo menos 30 anos, o painel irá produzir ao longo da sua vida cerca de dez vezes mais energia do que aquela que foi gasta no seu fabrico. Naturalmente que isto significa que um sistema fotovoltaico mal instalado, por exemplo numa fachada vertical que não esteja convenientemente exposta à radiação solar, vai levar mais anos a recuperar o investimento energético (e monetário!) que foi feito para o seu fabrico e instalação.



Figura 5: Fachada sul do Edifício Solar XXI no INETI, em Lisboa. Inclui sistema fotovoltaico com 76 painéis de silício multicristalino (área total de 96m²) que irá produzir, em média, cerca de 12MWh de electricidade por ano. O edifício foi inaugurado em Janeiro de 2006. [Fonte: INETI]

Conclusão

Meio século depois da primeira célula fotovoltaica moderna, a produção de energia eléctrica por conversão da radiação solar é hoje uma promissora tecnologia, limpa e renovável, para a produção de electricidade. Portugal, em particular, oferece condições exemplares para a utilização da tecnologia fotovoltaica para reduzir a sua factura energética e as suas emissões de gases de efeito de estufa associadas à produção de electricidade utilizando combustíveis fósseis.

A utilização de electricidade solar em mais larga escala está ainda limitada por factores tecnológicos mas sobretudo pelo elevado custo por unidade de energia produzida. Num artigo futuro propomo-nos abordar os meios para ultrapassar estes obstáculos.

¹⁰ Para uma análise rigorosa ver Erik Alsema, *Energy payback time and CO2 emissions of PV systems*, Prog. Photovolt. Res. Appl 8 (2000) 17-25 ou Vasilis Fthenakis, *Photovoltaics Energy PaybackTimes, Greenhouse Gas Emissions and External Costs:2004–early 2005 Status*, Prog. Photovolt: Res. Appl. 2006; 14:275–280

Como se fazem células solares

O silício que se utiliza para fabricar células solares provém do dióxido de silício que é o principal composto da areia. O material é derretido em grandes fornos e, depois de purificado com fluxo de oxigénio, solidifica em grandes lingotes. O grau de pureza é da ordem de 98 ou 99%. Cerca de um milhão de toneladas deste material (chamado Silício Metalúrgico) são produzidas anualmente, sobretudo para as indústrias dos ferros e dos alumínio.

Uma pequena parte deste material (alguns milhares de toneladas) passa por um segundo processo de purificação, por destilação, de modo a produzir silício ultrapuro para a indústria electrónica (chamado Silício Semicondutor). O grau de pureza é da ordem de 99.9999%.

A indústria electrónica, assim como a indústria das células solares, precisa não só de silício muito puro mas também que este se encontre em forma cristalina, com muito poucos defeitos. Segue-se portanto um processo de cristalização. Existem diversas tecnologias, distintas e concorrentes, que produzem monocristais (um lingote com um só cristal), multicristais (um lingote com vários cristais, numa “amalgama” de cristais com orientações diferentes) ou fitas de silício multicristalino (finas folhas de silício já com a espessura necessária).

Em seguida, procede-se ao corte dos lingotes em pequenas fatias, ou bolachas (*wafers*) com algumas décimas de milímetro de espessura, onde se vai produzir a célula solar.

O processo de fabrico das células em si consiste essencialmente em dois passos. Primeiro faz-se a deposição dos dopantes para criar a junção pn (o campo eléctrico intrínseco à célula, que vai recolher as cargas produzidas pela radiação no silício) e depois procede-se à deposição dos contactos eléctricos na superfície da célula, para enviar essas cargas para o sistema que se pretende alimentar (ou eventualmente um acumulador).

As células são depois montadas em série num módulo e encapsuladas, para protecção mecânica e isolamento eléctrico.