

A energia solar fotovoltaica vai desempenhar um papel cada vez mais relevante na produção de energia eléctrica nas próximas dezenas de anos. A produção actualmente cresce acima de 30%/ano, estimulada por políticas de incentivo, tendo ultrapassado o marco de 1 GW anual de potência instalada. No entanto, a viabilidade da sua penetração em larga escala no mercado da energia depende da evolução das tecnologias no sentido da redução do seu custo. O momento actual é extremamente interessante, porque ainda não se vislumbra sequer quais das numerosas tecnologias em investigação poderão vir a impor-se e nem sequer o material de base está decidido. Portugal tem uma janela de oportunidade para participar activamente nesta corrida e na criação de uma indústria de impacte mundial.

ANTÓNIO VALLÊRA

Centro de Física da Matéria Condensada, Edifício C8,
Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa,
Campo Grande, 1749-016 Lisboa

amvallera@fc.ul.pt

ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Um dos principais argumentos usados para desvalorizar a energia da radiação solar é que nunca será suficiente para satisfazer as necessidades humanas. Façamos alguns cálculos: a radiação que nos chega do Sol tem uma intensidade, ao nível da órbita da Terra, $S = 1367 \text{ W/m}^2$, a chamada constante solar. A partir do valor de S e do raio da órbita de Terra R é fácil calcular a potência total radiada pelo Sol:

$$P = S \times 4 \pi R^2 = 3,87 \times 10^{26} \text{ W}$$

Para termos a noção da grandeza deste número: a energia radiada pelo Sol num segundo daria para satisfazer as necessidades energéticas mundiais actuais durante um milhão de anos! (Fig. 1).

Mas voltemos à Terra e pensemos no nosso país: que área seria necessária para satisfazer o nosso consumo eléctrico médio actual de cerca de 5 GW? É fácil verificar que, com uma eficiência de conversão de 15% (tecnologia actual), bastaria um quadrado com cerca de 5 km de lado coberto de células solares expostas à radiação de intensidade S , ou seja, colocado no espaço.



Fig. 1 - A energia da radiação solar incidente sobre a Terra é cerca de 40 000 vezes o consumo actual mundial de energia eléctrica. Com a tecnologia actual, 20 m² de painéis fotovoltaicos por pessoa seriam suficientes para satisfazer o consumo *per capita* português actual.

Desçamos à superfície da Terra. Aqui há dia e noite, há atmosfera com nuvens, e os raios solares vão variando a sua inclinação ao longo do dia: cada um destes três efeitos contribui com um factor de cerca de $\frac{1}{2}$ para a média da radiação solar que incide na superfície terrestre relativamente ao espaço, pelo que a área necessária na Terra será da ordem de 8 vezes a área necessária no espaço, ou seja, cerca de 200 km². Claro que a situação não é a mesma em todas as regiões da Terra: nos trópicos haverá mais radiação que nos pólos. Portugal situa-se numa posição muito favorável: sabemos que Portugal tem muito sol. Mas é menos conhecido o facto de ser o país da Europa continental com maior radiação solar média: temos em média mais luz solar do que a Espanha, a Itália ou a Grécia. A radiação solar média em Portugal é 1500 kWh m⁻² ano⁻¹.

Tomando este valor e uma eficiência de conversão de 15%, chegamos a uma área necessária de cerca de 200 km². Vejamos o que quer dizer este número:

- aproximadamente 20 m² por pessoa;
- da ordem de grandeza da área disponível nas construções urbanas;

- muito menor que a área das estradas.

Por outras palavras, seria até concebível cobrir toda a nossa necessidade de energia eléctrica com painéis solares fotovoltaicos! Poderemos ainda argumentar que a energia fotovoltaica:

- usa um “combustível” universal e gratuito;
- não polui;
- não tem partes móveis, dura mais de 30 anos praticamente sem manutenção;
- é modular, logo facilmente expansível;
- melhora a estética dos edifícios, podendo substituir revestimentos (telhados ou fachadas);
- melhora a rede eléctrica local e descentraliza (democratiza) a produção de energia.

O que nos impede então de aplicar massivamente células solares fotovoltaicas?

Cada watt de potência eléctrica fotovoltaica instalada em Portugal produzirá cerca de 1,5 kWh/ano. Contando com uma vida útil de 30 anos, a energia total produzida por 1W instalado será de 45 kWh. Se atribuirmos ao quilowatt (kWh) produzido junto ao consumidor um valor de dez cêntimos, o valor total da energia produzida será 4,5 euros. Para uma penetração massiva no mercado da energia (Fig. 2) o preço do watt instalado tem de ser bem inferior a este valor, o que ainda não sucede: este valor é aproximadamente o custo actual da instalação de um watt.

A nível mundial, a energia fotovoltaica conhece desde há aproximadamente 10 anos um crescimento de cerca de

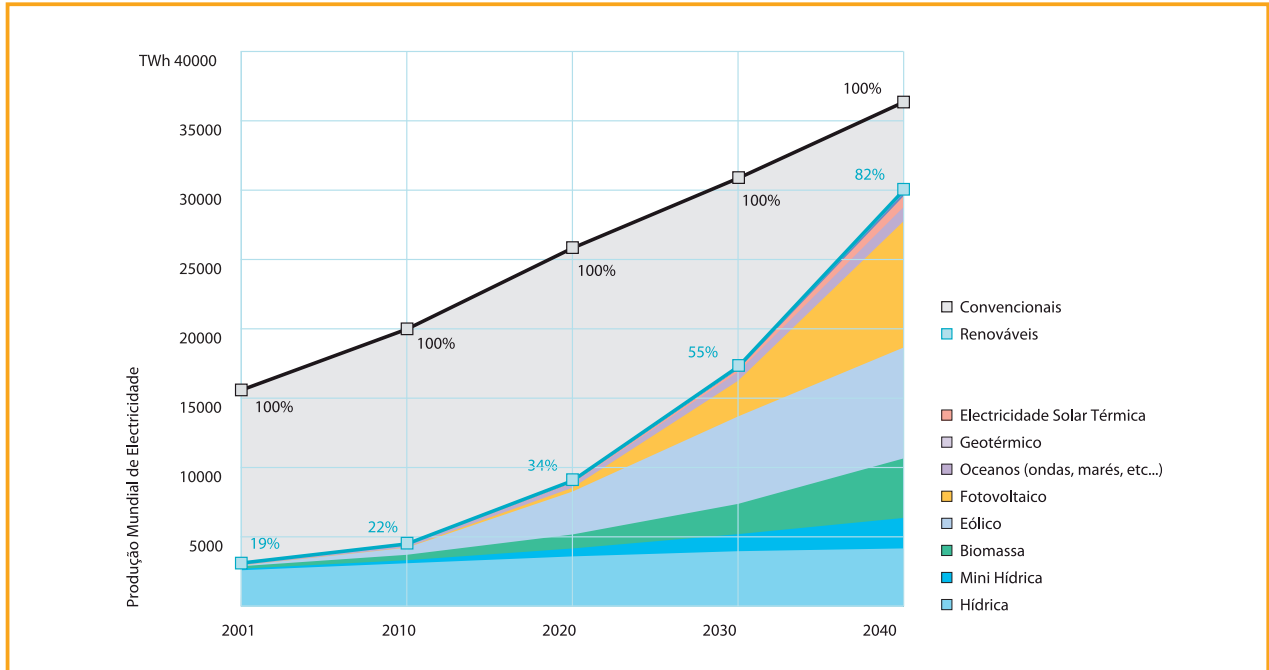


Fig. 2 - Cenário de uma possível evolução da produção mundial de energia eléctrica até 2040. Notar a previsão da explosão da energia solar fotovoltaica a partir de 2020, tornando-se uma das grandes, com a hídrica, a eólica e a biomassa.

(Fonte: European Renewable Energy Council, EREC-2005; http://erec-renewables.org/publications/scenario_2040.htm)

30%/ano (Fig. 3), estimulada por políticas de incentivo, com destaque para a Alemanha e o Japão, tendo ultrapassado o marco de 1GW anual de potência instalada. Em Portugal, apesar de muito boas condições climáticas, estamos muito atrás dos países líderes: a área de células instalada *per capita* é a de um selo do correio; e o grande mercado dos sistemas ligados à rede, dominante a nível mundial (Fig. 3), é ainda muito menor que os sistemas de aplicação remota, sem ligação à rede. No entanto, as iniciativas recentes, estimuladas pelo atraente tarifário actual, poderão inverter esta situação nos próximos anos. Merece particular destaque a futura central de Moura, junto ao Alqueva, licenciada em finais de 2005, que será, com os seus previstos 62 MW, de longe a maior do mundo (actualmente a maior tem 6 MW).

No entanto, a viabilidade da penetração da energia fotovoltaica em larga escala no mercado da energia depende da evolução das tecnologias e da produção em massa que conduzam à redução do seu preço.

UM POUCO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

A radiação solar é uma corrente de fotões, ou *quanta* de energia electromagnética hf (onde f é a frequência e h a constante de Planck). Cada um destes fotões tem a capacidade de ceder a sua energia a um electrão, que a usa para

saltar para um estado quântico de energia mais elevada. Num semiconductor, que é o tipo de material mais comum de que as células solares são feitas, um electrão da banda de valência, absorvendo a energia de um fotão, pode saltar para a banda de energia mais elevada, a chamada banda de condução. Tanto o electrão da banda de condução como o buraco deixado na banda de valência são móveis, comportando-se como partículas livres de carga $-e$ e $+e$, respectivamente. Por outras palavras, um fotão solar cria um par electrão-buraco num semiconductor (exactamente como um fotão gama pode criar um par electrão-positrão no vácuo). Se o semiconductor contiver uma assimetria, que ajude a conduzir os electrões para um eléctrodo (negativo) e os buracos para outro (positivo), teremos uma célula solar fotovoltaica, com uma diferença de potencial V e uma corrente eléctrica I , e portanto uma potência $P=VI$ disponível nos seus eléctrodos. Esta assimetria pode ser criada, por exemplo, por uma junção $p-n$: os buracos irão espontaneamente para a zona p e os electrões para a zona n do semiconductor.

De todos os fotões que incidem no semiconductor, apenas os que têm energia suficiente para criar um par electrão-buraco dão origem a corrente eléctrica: há uma energia limiar, tal como no efeito fotoeléctrico. Para o silício cristalino, o material mais comum de que são feitas as células (mais de 90% do mercado), só fotões com $hf \geq 1,1$ eV contribuem ($D=1,1$ eV é a diferença de energia entre a banda de valência e a de condução do silício); todos os fotões do infravermelho

melho abaixo desta energia são desaproveitados. Por outro lado, ainda que o fóton tenha uma energia $hf \gg D$ (por exemplo, um fóton azul com 3 eV, ou mesmo um ultravioleta com 4 eV), só criará um único par electrão-buraco, e portanto contribuirá, no máximo, com uma carga electrónica para a corrente eléctrica. Entende-se assim facilmente uma razão fundamental para as eficiências relativamente baixas de conversão da energia: muitos fótons são desperdiçados, por terem energia insuficiente; e por cada fóton absorvido, por mais elevada que seja a sua energia, a célula só fornece a energia eV , onde e é a carga do electrão e V a diferença de potencial entre os eléctrodos da célula, sempre menor que $D/e = 1,1$ V (na prática, $V \approx 0,5$ V). Conseguem-se eficiências elevadas para luz monocromática com $hf \sim D$, mas não para um espectro largo como o da luz solar.

A procura dos limites da eficiência de conversão foi uma obsessão científica e tecnológica até meados dos anos noventa. Atingiram-se eficiências de 25% para o silício cristalino, e a melhor célula feita até hoje, construída como uma cascata de diferentes semicondutores, ou “tandem”, ultrapassou 34%. Este trabalho foi importante para ajudar a clarificar os limites e a compreender o que a tecnologia deve realizar para conseguir aproximar-se deles. Mas o que é realmente importante não é a eficiência em si, mas o custo da energia produzida, o que é muito diferente. Como o “combustível” é gratuito, a melhor célula não é a mais eficiente, mas a que produz energia a mais baixo custo. Mais ainda, a tendência crescente é conceber também os painéis solares fotovoltaicos como elementos arquitectónicos e o seu valor como revestimento de substituição em fachadas ou telhados não se limita ao preço do kWh. Como caricaturou em tempos uma arquitecta: “*Dêem-me painéis realmente atraentes e substituirei as minhas fachadas de granito pelos vossos painéis com um pequeno custo adicional. E se, ainda por cima, produzirem energia, ótimo!*”

A situação actual continua a ser extremamente interessante do ponto de vista da investigação e desenvolvimento (I&D): está muito longe de se ter decidido sequer o material de base das células do futuro, que romperão a barreira da produção em larga escala, e muito menos a sua tecnologia. De facto, entre o ruído das “primeiras”, “segundas” e “terceiras gerações” (designações de tipos de tecnologias, sem grande significado real) nada está decidido. O velho silício cristalino, depois de muitas vezes “enterrado” por outros materiais emergentes, soube até agora manter-se à frente na corrida da produção industrial. Os filmes finos de silício amorfo e os filmes policristalinos de CdTe (telurieto de cádmio) e de CIS (selenieto de cobre e índio) são concorrentes fortes, com produção industrial realizada; contudo perfilam-se os orgânicos poliméricos, as células electroquímicas, os filmes de compostos III-V (até agora remetidos para o espaço), as recentes “antenas”, ... Mas as próprias tecnologias de um dado material estão em contínua competição: por exemplo, só neste século a tecnologia de Czochralski de produção de bolachas monocristalinas de silício foi ultrapassada em volume pela tecnologia das multicristalinas obtidas por solidificação direccionada, mas entretanto as técnicas de produção do silício em fita ganharam já em 2005 uma quota de 15%, em crescimento rápido. As técnicas de formação de células a partir do material de base são também objecto de investigação e desenvolvimento em fortíssima competição; e até, de um ponto de vista menos fundamental, as questões de radiação concentrada *versus* natural, da instalação em centrais *versus* distribuída, da ligação à rede *versus* desligada são discutidas.

TRÊS MENSAGENS POLÍTICAS

É possível que uma nova tecnologia faça uma dada fileira energética dar um salto, tornando-a subitamente mais com-

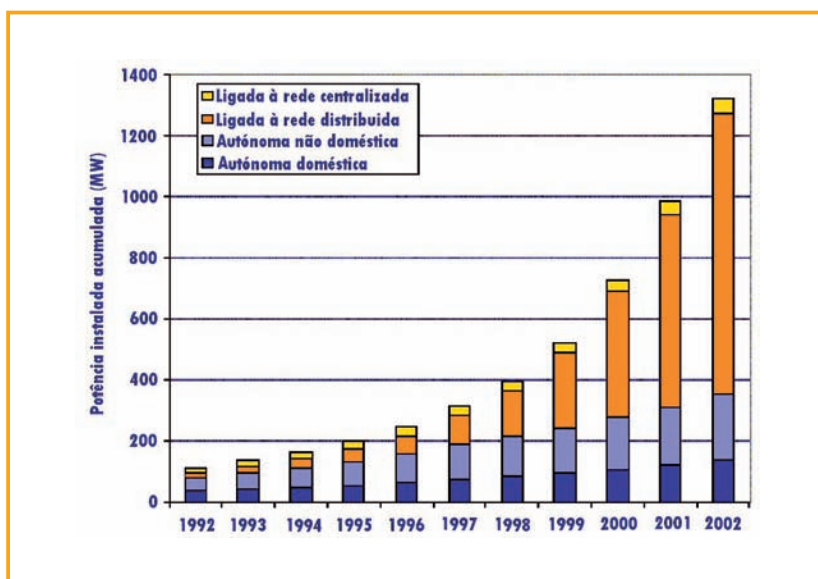


Fig. 3 - O recente crescimento mundial da potência fotovoltaica instalada tem sido alimentado sobretudo pelos sistemas distribuídos ligados à rede, e não pelas grandes centrais nem pelas aplicações remotas (Fonte: Relatório da EIA-Energy International Agency, 2003).

petitiva. Mas há que evitar deslumbramentos, na procura e sempre à espera das últimas modas, das “terceiras gerações”, das energias do futuro. É essencial uma política prudente que tenha em conta as oportunidades e equilibre presente, futuro próximo e longo prazo. Existem oportunidades imediatas, tanto de investigação e desenvolvimento como industriais e de mercado, a par de possibilidades futuras.

A energia nuclear de cisão foi levada até à produção por um enorme investimento público em investigação e desenvolvimento, e o mesmo tem estado a passar-se com a fusão nuclear. Pelo contrário, nas energias renováveis em geral, e na fotovoltaica em particular, não se registou nada de semelhante. Optou-se antes por um investimento público modesto em investigação e desenvolvimento e por um estímulo público ao mercado. A ideia é estimular o florescimento de empresas em toda a fileira, desde a produção dos materiais de base às células e painéis, ao projecto e à instalação, à certificação, etc., e deixar que o mercado decida as soluções tecnológicas, lideradas por empresas. Uma componente teórica do modelo é a da chamada “curva de aprendizagem”: o custo descerá e a qualidade melhorará segundo uma curva monotónica, função (apenas) da produção acumulada (cujo andamento pressupõe uma evolução tecnológica, fruto de investigação e desenvolvimento, não especificada nem prevista). Sem estímulo, o investimento das empresas em investigação e desenvolvimento e em processos tecnológicos mais eficientes seria muito menor: o objectivo dos estímulos é acelerar a “evolução natural”, quebrando barreiras e queimando etapas. Um dos métodos com mais sucesso actual (e adoptado também no nosso país, se bem que ainda em germinação) é o estímulo ao mercado pela via tarifária: a energia produzida por via fotovoltaica é comprada a um preço muito superior ao do mercado livre. Cria-se assim um mercado artificial que pode tornar atraente a instalação de painéis fotovoltaicos.

O problema destas manipulações é acertar na dose correcta do estímulo, e evitar efeitos perversos. De facto, assistimos neste momento a consequências de um sobre-estímulo

tarifário massivo, sobretudo alemão (Fig. 4). A procura aumentou tão rapidamente que há esgotamento e encarecimento da matéria-prima (silício), e o preço de venda dos painéis não está a baixar; a competição entre empresas é muito insuficiente: sobrevivem empresas com más tecnologias, que deveriam ter encerrado para dar lugar às melhores. Claro que a prazo o aumento da procura de matéria-prima estimulou grandes investimentos no silício solar, separada da indústria da microelectrónica, que não ocorreria sem mercado, e a prazo o mercado corrigirá a ineficiência, mas a que custo? Outro problema do crescimento demasiado rápido deste mercado artificial é a falta de tempo para o amadurecimento de novas tecnologias, resultantes de investigação e desenvolvimento: o mercado artificial favorece a investigação e desenvolvimento de curto prazo, as tecnologias já maduras, e dá relativamente pouco espaço a novas ideias.

Em resumo: a ideia deve ser estimular em competição e não deixar de lado a investigação e desenvolvimento de longo prazo. O objectivo é estimular a organização e a produção baixando preços e seleccionando as melhores tecnologias e empresas.

Portugal está em vias de investir no estímulo tarifário à produção de energia fotovoltaica dezenas de milhões de euros por ano. Este estímulo ao mercado terá sempre algumas consequências positivas: estimularemos algumas estruturas industriais, internalizaremos algumas tecnologias, adquiriremos capacidade em qualidade/certificação, e, claro, aumentaremos a quota de produção de energia renovável, embora muito pouco, mas, perante o volume do investimento, não deveríamos tentar ir mais além? Ou seja, iremos ser essencialmente montadores de tecnologia alheia, como tem acontecido na energia eólica (na qual temos um atraso já irremediável)?

Por outras palavras, estamos dispostos a pagar 40 milhões de euros por ano para montar painéis/sistemas, mas não estamos dispostos a investir nem uns poucos por cento

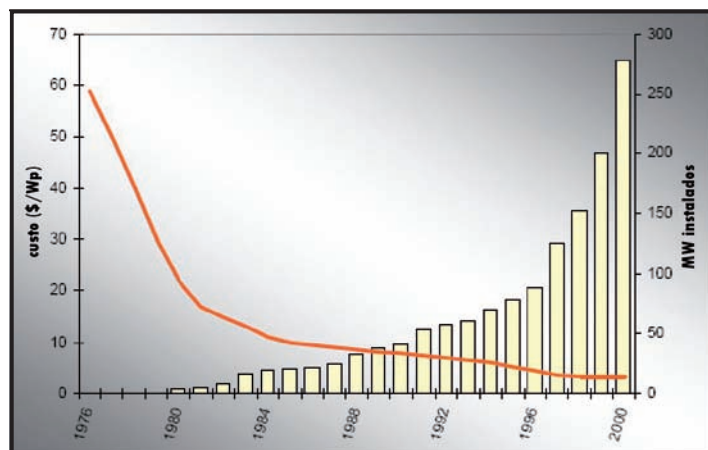


Fig. 4 - O custo de um watt fotovoltaico instalado caiu de um factor de 15 nos últimos 30 anos. No entanto, a explosão do mercado nos últimos anos não tem sido acompanhada da desejada continuada descida nos preços. Haverá sobre-estimulação do mercado? (Fonte: Greenpeace-EPIA)



Fig. 5 - O Hélios, da NASA. Embora as aplicações terrestres, sobretudo em telhados e fachadas de edifícios, sejam as de maior impacto no ambiente, haverá sempre nichos de aplicações que estimulam a imaginação.

deste montante para investigação e desenvolvimento focada na tentativa de criação de uma fileira tecnológica própria, baseada em investigação e desenvolvimento própria, num país que tem o sol como o seu maior recurso energético?

Um dos grandes benefícios potenciais das energias renováveis resulta da criação de toda uma fileira, desde a investigação e desenvolvimento à concepção, produção,

projecto, instalação e exploração. O domínio dessa fileira leva a uma capacidade de intervenção global, com grande parte da produção destinada mesmo à exportação. Foi por esta via, de domínio desde a base tecnológica aos serviços, que foram já criados 300 000 empregos nas energias renováveis na Europa, número que deverá atingir 1 000 000 dentro de poucos anos. Foi o que fizeram os dinamarqueses correctamente, por exemplo na energia eólica. Ora, ao contrário do que se passa na eólica, na fotovoltaica estamos ainda a tempo em Portugal.

O momento actual é extremamente interessante, porque ainda não se vislumbra sequer quais das tecnologias em investigação poderão impor-se - nem sequer o material de base está decidido. Portugal tem uma janela de oportunidade para participar activamente nesta corrida de investigação, desenvolvimento e tecnologia, com a criação de uma indústria de impacto mundial. Quando reconhecerão os políticos que temos uma comunidade de físicos e outros cientistas e engenheiros com capacidade científica e tecnológica, que só necessita de estímulos para avançar? A indústria fotovoltaica não deve ser construída apenas com o telhado, como está a acontecer na eólica...



Associação EURATOM/IST

Coordenação da Participação da Indústria e Unidades de Investigação Portuguesas no Programa de Fusão da EURATOM e no ITER

Fusão Nuclear:

uma energia limpa, segura, amiga do ambiente e praticamente inesgotável