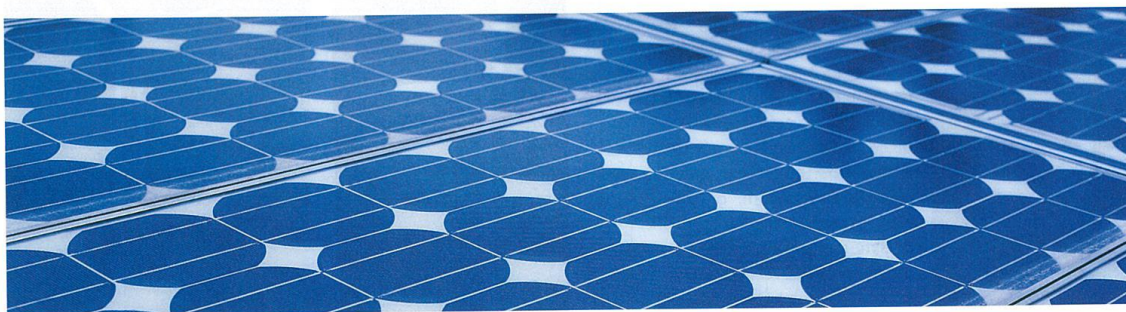


as **tecnologias fotovoltaicas**



Difícilmente se poderá encontrar, dentro do campo das Energias Renováveis, área de maior desenvolvimento tecnológico que a dos sistemas Fotovoltaicos. Com efeito, desde as diferentes gerações de tecnologias de conversão directa de energia solar em electricidade, passando pelo desenvolvimento dos chamados componentes BOS (Balance Of System), designação que se refere a todos os outros componentes para além dos módulos Fotovoltaicos, terminando com a própria topologia dos sistemas adequada a diferentes tipo de aplicações, toda a área Fotovoltaica está no topo das aplicações dos avanços que se têm feito ao nível da Física do Estado Sólido, dos Materiais, da Electroquímica, da Óptica, da Electrónica de Potência, da Robótica e Automação e das Tecnologias de Informação, entre outros domínios tecnológicos.

António Joyce
Investigador Principal da Unidade de Energia Solar, Eólica e dos Oceanos do LNEG
Professor Catedrático Convidado da Universidade de Évora
Vice Presidente da Sociedade Portuguesa de Energia Solar
antonio.joyce@lneg.pt

Este desenvolvimento tecnológico tem sido acompanhado por uma diminuição nos custos de produção, de tal forma, que economias como as dos Estados Unidos da América, do Japão, da Europa e as emergentes da China e da Índia consideram o Fotovoltaico como um dos principais contribuintes para o seu futuro Energético. A nível mundial e em 2010 foram efectivamente instalados 15 GW de sistemas Fotovoltaicos perfazendo um total acumulado de 40 GW. Neste domínio Portugal tem também um objectivo de cerca de 1,5 GW para o Fotovoltaico em 2020 no âmbito da nova Directiva das Energias Renováveis (Directiva 2009/28/CE).

Tem sentido, por isso, que, neste número da Renováveis Magazine, dedicado expressa-

mente ao Fotovoltaico, se ocupem algumas páginas com o desenvolvimento das tecnologias da conversão Fotovoltaica, sabendo-se de antemão que, dada a amplitude e rapidez com que estes desenvolvimentos se fazem, qualquer linha que sobre eles se escreva hoje está desde logo desactualizada.

I. Introdução

Muito se tem escrito e dito sobre a conversão directa (sem passar pelo calor) da Energia Solar em Electricidade, nomeadamente sobre a conversão Fotovoltaica, baseada no Efeito Fotovoltaico descoberto pelo físico francês Edmond Becquerel em 1839. Trata-se basicamente de um processo quântico em que fotões associados à radiação

incidente (Solar ou outra) são absorvidos num material semiconductor e possibilitam a excitação de electrões desde a Banda de Valência para a Banda de Condução, criando pares Electrão/Buraco que, se forem mantidos separados por um campo eléctrico que se gera numa junção de dois materiais semicondutores (junção **pn**), poderão estar disponíveis para produzir uma corrente eléctrica que se estabeleça num circuito entre os dois extremos da junção e desta forma, "alimentar" equipamentos eléctricos (as cargas) que se insiram naquele circuito. Na Figura 1 representa-se de uma forma esquemática este processo.

Deste processo nascem as primeiras células Fotovoltaicas em 1954 e continua a ser

nele que se baseia a quase totalidade dos sistemas Fotovoltaicos. Ele contudo não é o único e mais adiante focar-se-ão outras possibilidades de conversão directa da energia solar em electricidade, algumas já a nível comercial e outras que são importantes apostas para o desenvolvimento futuro.

2. As Tecnologias de conversão

O Silício Cristalino

A tecnologia do Silício Cristalino domina cerca de 80% do actual mercado de Fotovoltaico. Está baseada em células obtidas a partir de "bolachas" (*wafers*) de Silício altamente puro, de espessura da ordem dos 200 a 300 μm , resultantes do corte de lingotes que poderão ser de secção quadrada provenientes do vazamento directo do Silício fundido, obtendo-se neste caso uma estrutura multicristalina, ou de secção circular provenientes de um crescimento lento de um lingote cilíndrico monocristalino (processo CZ – Czochralsky). As células têm hoje uma dimensão típica de 5" ou 6" de lado e têm uma potência de pico (nas condições *standard* de 1.000 W/m^2 de radiação solar incidente e de 25° C de temperatura ambiente) de 3 e 4,5 W_p respectivamente. Trata-se de uma tecnologia com um elevado grau de maturidade e que é herdeira da

tecnologia da industria electrónica. As eficiências destas células variam entre os 14 e os 18% para as células multicristalinas e entre 16 e 22% para as células monocristalinas. Um outro processo de obtenção de células de silício cristalino são as fitas de Silício, *Ribbon sheets*, que crescem continuamente a partir do material fundido o que tem grandes vantagens do ponto de vista da diminuição dos desperdícios de material durante o corte das bolachas. Uma versão das tecnologias de fita de Silício tem vindo a ser desenvolvida em Portugal no âmbito do projecto SDS da Fundação para a Ciência e Tecnologia com participação de várias instituições de I&D nacionais.

As células são depois associadas em série e em paralelo nos módulos solares que em geral têm entre 60 a 72 células o que equivale a potências dos módulos entre 180 e um pouco mais de 300 W_p .

Na Figura 2 pode ver-se um módulo fotovoltaico de Silício monocristalino de 72 células.

A tecnologia do Silício cristalino tem tido, periodicamente, problemas relacionados com a falta de Silício no mercado o que tem levado a aumentos do custo final das células e módulos. Tem também sido discutida a questão da possibilidade de fabrico integrado desta

tecnologia (do Silício metalúrgico ao módulo, passando pelo fabrico das bolachas e das células) e em fábricas com capacidades anuais da ordem de 1 GW o que levará a uma substancial redução do custo final do W_p produzido.

Ainda no domínio desta tecnologia têm sido feitos avanços no que concerne aos processos de fabrico das células e dos módulos. Alguns dos mais promissores são:

- Contactos enterrados (*Buried contacts*). Esta tecnologia permite que em vez de se terem os contactos metálicos superiores (da superfície exposta à radiação) directamente sobre a célula, o que se traduz em perdas por sombreamento, os contactos serem enterrados na camada de Silício por meio de sulcos feitos a laser;
- Contactos nas "costas" da célula. Neste caso os contactos da superfície exposta à radiação são totalmente removidos para as "costas" da célula o que permite aumentar a superfície de Silício exposta à radiação solar e assim aumentar o número de pares Electrão/Buraco gerados;
- Texturização da superfície exposta à radiação solar de forma a diminuir as perdas por reflexão para ângulos extremos do início e do fim do dia;
- Utilização de Heterojunções em que uma

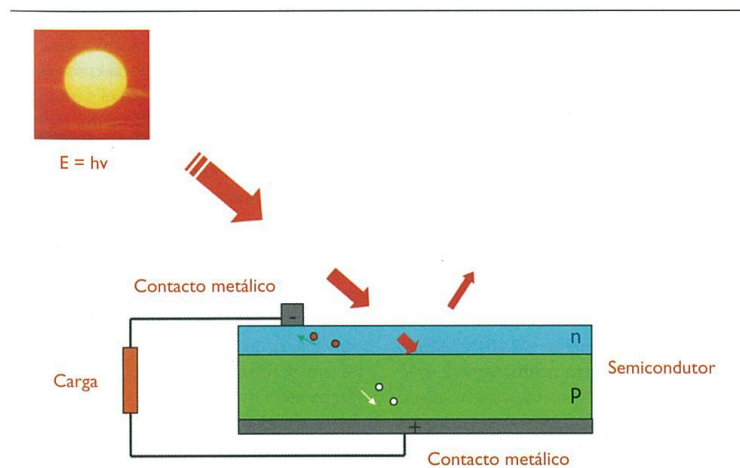


Figura 1 Esquema Base de uma célula Fotovoltaica (Esquema do autor).

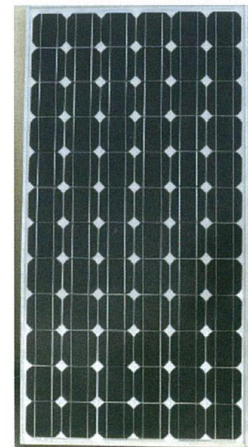


Figura 2 Módulo Fotovoltaico de Silício monocristalino de 230 W (Foto do LNEG).

AS TECNOLOGIAS FOTOVOLTAICAS

bolacha fina monocristalina é utilizada no meio de camadas ultra finas de silício amorfo o que permite simultaneamente diminuir a espessura da célula e melhorar a sua eficiência. Pode considerar-se uma transição para a tecnologia das películas finas.

As Películas Finas

A tecnologia das Películas Finas, que hoje representa cerca de 15 a 20% do Mercado dos sistemas fotovoltaicos é uma aposta na diminuição dos custos por diminuição quer do material de base utilizado (menor espessura das células, que têm aqui valores da ordem dos 6 a 10 μm), quer do próprio custo dos materiais de base por, nomeadamente, se consumir muito menos energia no seu fabrico. Esta tecnologia possui ainda a vantagem de se poder aplicar sobre substratos muito distintos (vidro, aço inox, plásticos) e em particular substratos flexíveis. O problema destas tecnologias é que têm, em geral, eficiências mais baixas que se encontram na gama dos 4 a 11%. As tecnologias de películas finas actualmente disponíveis comercialmente são o Silício Amorfo (a-Si), o Telureto de Cadmio (CdTe), o Diselenieto de Cobre e Índio (CIS), o Diselenieto de Cobre, Índio e Gálio (CIGS) e as multijunções de Silício Amorfo e Microcristalino (a-Si / $\mu\text{c-Si}$).

O **Silício amorfo (a-Si)** é uma das tecnologias mais antigas de Películas Fina que permite uma boa absorção da radiação solar incidente. No entanto a sua eficiência é relativamente baixa, entre os 4 e os 8% e apresenta alguma degradação durante os primeiros tempos de exposição à radiação solar. As espessuras típicas destas películas rondam os poucos μm e sua aplicação tem sido muito vocacionada para a electrónica de consumo (relógios, calculadores) mas também em módulos e em materiais flexíveis usados nos edifícios, como placas de cobertura, rolos de material de impermeabilização e outros.⁸ Recentemente o projecto *Solar Tiles* financiado pelo QREN e com participação de instituições nacionais de I&D e empresas nacionais do sector da Cerâmica está a desenvolver a aplicação de películas de Silício amorfo sobre materiais cerâmicos (telhas e azulejos).



Figura 3 Módulo de Silício Amorfo do parque de estacionamento do Edifício Solar XXI (Foto do LNEG).

Na Figura 3 pode ver-se um módulo de Silício amorfo usado na cobertura do parque de estacionamento do Edifício Solar XXI do LNEG no Lumiar em Lisboa.

As películas finas de **Telureto de Cadmio (CdTe)** têm um custo baixo e eficiências da ordem dos 11%. As principais críticas a esta tecnologia devem-se à toxicidade do Cádmiio e ao facto de utilizar Telúrio que, embora seja um subproduto da indústria mineira do Cobre, pode ter problemas de disponibilidade no futuro.

As tecnologias do **CIS** e **CIGS**, cuja comercialização se iniciou ainda nos anos 90 do séc. XX, apresentam as eficiências em laboratório mais elevadas de todas as películas finas e muito próximas das eficiências do silício cristalino, pelo que são muito promissoras. No entanto o processo de fabrico é complexo e os módulos a nível comercial têm eficiências entre 7 e 12%. Um outro problema inerente a estas tecnologias é a utilização do Índio dado que é um recurso limitado para além do facto da indústria dos LCD competir com a indústria fotovoltaica na sua utilização pelo que o custo do Índio vai permanecer elevado. No Parque de estacionamento do Edifício Solar XXI do LNEG foi recentemente (2010) instalado uma área de sombreamento com 12 kW_p de módulos CIS.

As multijunções **a-Si / $\mu\text{c-Si}$** consistem numa camada de Silício amorfo depositada sobre um substrato e sobre a qual é colocada uma camada de Silício micro cristalino

($\mu\text{c-Si}$), que para além de ter melhores características de absorção espectral permite ter eficiências da ordem dos 10% e menos problemas de instabilidade em relação à tecnologia do Silício amorfo.

As Células de muito alta eficiência

Inicialmente desenvolvidas para aplicações espaciais, as células de muito alta eficiência têm tido, recentemente, aplicações a nível terrestre em especial ligadas a sistemas fotovoltaicos com concentração. De um modo geral estas células recorrem a multijunções de semicondutores, basicamente com elementos dos grupos III e V da Tabela Periódica de que se destacam as junções com Arsenieto de Gálio ou junções com compostos de Arsénio (As), Gálio (Ga), Índio (I) e Fósforo (P) e que têm a particularidade de cada junção constituinte estar adaptada à absorção e conversão de uma parte do espectro da radiação solar. Este facto traduz-se em células cujas eficiências são superiores a 35%. A contrapartida é o elevado custo destas células pelo que, em geral, em aplicações terrestres são utilizadas áreas muito pequenas e se associa esta tecnologia à concentração.

A concentração Fotovoltaica

Esta opção tecnológica dos sistemas Fotovoltaicos (CPV – *Concentration Photovoltaics*) consiste na utilização de uma óptica de concentração, lentes ou espelhos, associada, em geral, a células de alta eficiência com um *record* mundial actual de 42.1% e eficiências de produção de 39.5%, possibilitando, já hoje, rendimentos globais do sistema superiores a 25% e constituindo uma das grandes promessas para a redução do custo do kWh produzido por sistemas fotovoltaicos. Este tema foi abordado no primeiro número da revista *Renováveis Magazine*. Na Figura 4 mostra-se um sistema de concentração baseado numa óptica de lentes de Fresnel e com células de alta eficiência que se encontra em desenvolvimento em Portugal pela Magpower.

Os sistemas Híbridos PV/T

Uma outra área de desenvolvimento tecnológico são os sistemas híbridos Fotovoltaicos/

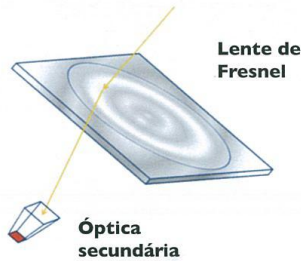


Figura 4 Sistema de Concentração por Lente de Fresnel da Magpower (Foto e Esquema do autor).

Térmicos vulgarmente designados por PV/T que permitem produzir electricidade e calor e cujo interesse é muito elevado no domínio das aplicações em Edifícios. De referir que a dissipação de calor de um sistema Fotovoltaico pode traduzir-se num aumento da eficiência eléctrica da conversão e aumentar também a eficiência global da conversão de energia Solar em energia final (electricidade e calor), a qual pode atingir valores superiores a 60 %. Nesta área pode referir-se o sistema PV/T para Trigeração (Electricidade, Calor e Frio) que se encontra em desenvolvimento em Portugal no âmbito do projecto SOL3 apoiado pelo QREN e que está baseado na dissipação térmica da energia absorvida nas células de módulos de Silício cristalino.

3. Desafios tecnológicos do futuro

São muitas e diversificadas as vias de desenvolvimento da área do Fotovoltaico, desde o melhoramento das tecnologias existentes com vista a elevar a sua eficiên-

cia e baixar o seu custo de fabrico até aos novos conceitos que poderão passar pelo chamado **Termofotovoltaico (TPV)** em que células fotovoltaicas adaptadas aos grandes comprimentos de onda (infravermelho) poderão ser utilizadas como forma de recuperar calor e converter esse calor em electricidade ou ainda a conversão de energia solar em energia eléctrica pelas **Rectennas** que não são mais do que antenas (nano antenas) sintonizadas para os comprimentos de onda da radiação visível e onde conversões com eficiências superiores a 80% poderão ser atingidas. Focam-se em seguida alguns dos desenvolvimentos tecnológicos que se encontram mais próximos da comercialização.

As células orgânicas

São uma das chamadas tecnologias de terceira geração e têm vindo a ser desenvolvidas em Laboratório havendo, no entanto, um ou outro caso em que já existe comercialização. Tipicamente baseiam-se na utilização de materiais orgânicos de baixo custo e com capacidade de serem aplicados a diferentes substratos, nomeadamente substratos flexíveis. A sua utilização em Edifícios tem sido muito referenciada.

Basicamente existem duas grandes áreas no domínio das células orgânicas: as totalmente constituídas por materiais orgânicos, normalmente designadas por OPV (*Organic Photovoltaics*) e as híbridas das quais a tecnologia mais conhecida é a das células solares excitadas por pigmentos ou DSSC (*Dye Sensitized Solar Cells* ou células de Graetzel), em que um semiconductor inorgânico de baixo custo, como por exemplo o Dióxido de Titânio, e com possibilidade de ser aplicado sobre diferentes substratos e por diferentes processos (técnicas de impressão ou deposição por *sputtering* em vácuo), é utilizado em conjunto com pigmentos de origem orgânica que permitem absorver a radiação solar e excitar os electrões para um processo de condução. Uma interessante possibilidade de fabrico destas células são os processos do tipo *Roll to Roll*, ou seja fabrico do semiconductor sobre um rolo de substrato plástico ou folha metálica. As eficiências são, contudo, ainda baixas (entre 4 e 6%) e apresentam alguma degradação com o tempo. Espera-se que o

seu custo em 2020 possa ser da ordem dos 0.5 €/W.

Na Figura 5 mostra-se uma célula deste tipo que se encontra em desenvolvimento no LNEG no âmbito de um projecto da Fundação de Ciência e Tecnologia.

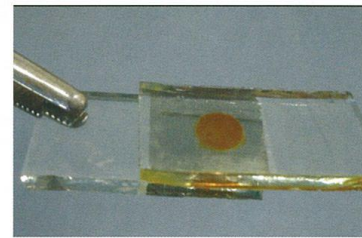


Figura 5 Célula com Pigmentos orgânicos de síntese em desenvolvimento no LNEG (Foto do LNEG).

Células Inorgânicas baseadas em "Quantum Dots"

Para evitar os problemas de reabsorção das cargas eléctricas geradas, que se colocam nas células orgânicas com pigmentos, uma possibilidade é a de utilizar semicondutores inorgânicos sob a forma de pequenas "porções" de 2 a 10 nm (nano partículas) de diâmetro em que cada uma poderá ter uma estrutura quase cristalina e ser adequada a uma parte específica do espectro da radiação solar incidente. Tendo em atenção que será possível por cada fotão incidente excitar múltiplos pares Electrão/Buraco, a eficiência destas células poderá atingir valores da ordem dos 40%. A célula é basicamente constituída por uma matriz polimérica onde são inseridas estas "porções" de semicondutores inorgânicos fabricados com base em precursores químicos, muito estáveis e de muito baixo custo de fabrico. As células baseadas em *Quantum Dots* permitirão não só uma boa utilização da componente de radiação difusa como também dispensar sistemas de seguimento dadas as características tridimensionais das células. Esta é uma das áreas de investigação mais interessantes em termos de conversão fotovoltaica. Veja-se por exemplo o trabalho que tem estado a ser desenvolvido neste domínio pelo *Centre of Nanoscale Materials* do *Argonne National Laboratory* nos Estados Unidos, <http://nano.anl.gov/>.

AS TECNOLOGIAS FOTOVOLTAICAS

Células de CZTS

Uma outra possibilidade em desenvolvimento são as células fotovoltaicas constituídas por materiais abundantes, não tóxicos e sem grandes impactos ambientais, entre as quais as células da chamada "família" CZTS à base de Cobre, Zinco, Estanho e Enxofre e que poderão ser fabricadas com baixo custo por diferentes processos, alguns dos quais não recorrem a tecnologias de vácuo que são altamente consumidoras de energia. Basicamente podem ser consideradas como uma tecnologia de película fina muito semelhante ao CIS mas em que o Índio e o Selénio foram respectivamente substituídos por Zinco e Enxofre. As eficiências são ainda inferiores a 10 % tendo a IBM recentemente (Fevereiro de 2010) registado o *record* de eficiência de células CZTS de 9.6 % num processo de fabrico à base de tinta. A IBM em Outubro de 2010 associou-se à empresa japonesa *Solar Frontier* para o fabrico deste tipo de células.

Possibilidade de desenvolver este tipo de células em tecnologias do tipo pó cristalino (www.crystalsol.com) estão também a ser estudadas e poderão ser altamente promissoras em termos de custo de fabrico (processo *Roll-to-Roll*).

4. A sustentabilidade

As questões ligadas à sustentabilidade têm sido uma constante na avaliação das potencialidades das diferentes tecnologias de conversão fotovoltaica, desde a procura de materiais de base que sejam abundantes e não tóxicos, passando pela utilização de cada vez menos energia no seu processamento levando a tempos de retorno energéticos baixos, até à reciclagem dos materiais constituintes dos módulos, uma vez terminado o seu tempo de vida enquanto produtores de energia eléctrica a partir da energia solar.

A Indústria Fotovoltaica, consciente da importância deste tópico criou uma associação denominada PV CYCLE (www.pvcycle.org) que a nível Europeu promove a reciclagem dos módulos fotovoltaicos que se vendem a nível Europeu.

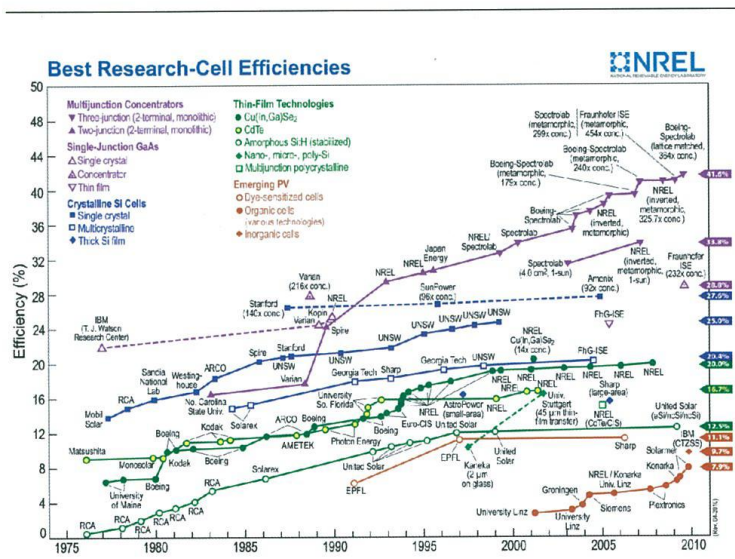


Figura 6 Evolução das eficiências em Laboratório das principais tecnologias de conversão Fotovoltaica (fonte: National Renewable Energy Laboratories, USA).

5. Conclusão

A área da tecnologia de conversão fotovoltaica é, de facto, uma área muito dinâmica com uma elevadíssima actividade de Investigação e Desenvolvimento. A título de exemplo pode ver-se na Figura 6 a evolução ao longo dos últimos 35 anos das melhores eficiências das principais tecnologias de conversão. Neste gráfico, que é periodicamente actualizado pelo *National Renewable Energies Laboratory* dos Estados Unidos da América, pode apreciar-se a diversidade de tecnologias em desenvolvimento e o grau de maturidade da maior parte destas tecnologias, o que permite posicionar o Fotovoltaico como uma das mais promissoras áreas no domínio da conversão de Fontes Renováveis de Energia em Electricidade. [11]

Referências

- "Handbook of Photovoltaic Science and Engineering", Editado por António Luque e Steven Hegedus para a Wiley (2005);
- "Solar Generation VI – Solar Photovoltaic Electricity empowering the world" – Relatório da EPIA – (Fevereiro de 2011).
- Consulta de vários *websites* sobre sistemas Fotovoltaicos entre os quais:
 - www.iea-pvps.org > Photovoltaic Power Systems da Agência Internacional de Energia (IEA);
 - www.epia.org > European Photovoltaic Industry Association;
 - www.eupvplatform.org > European Union PV Platform;
 - www.apesf.pt > APESF - Associação Portuguesa de Empresas do Sector Fotovoltaico;
 - www.apisolar.pt > APISOLAR – Associação Portuguesa da Indústria Solar;
 - www.apren.pt > APREN - Associação de Energias Renováveis.