

o fim de **vida** dos **módulos** fotovoltaicos

Este artigo aborda a temática do fim de vida dos módulos fotovoltaicos, aspeto que virá a ter cada vez mais relevância à medida que vão chegando ao fim da sua vida útil os painéis fotovoltaicos instalados no passado. Trata-se de uma questão premente a vários níveis, face ao crescimento das instalações fotovoltaicas a nível mundial e, mais especificamente, no nosso país e face à legislação comunitária vigente. Dado o número de painéis fotovoltaicos obsoletos estimado, uma solução sustentável e circular para estes é de primordial importância.

Luis Gil, João Isidro

Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG)

luis.gil@dgeg.pt; joao.isidro@dgeg.pt

Introdução

A reciclagem é uma via para reduzir a procura de matérias-primas primárias ao gerar fluxos secundários de materiais. Nem tudo o que parece sustentável permanece como tal em todo o seu ciclo de vida, pelo que há que analisar os diversos aspetos relacionados.

Apesar da vasta investigação ao nível da tecnologia fotovoltaica, pouco se sabe relativamente à perspetiva sobre como o fim de vida dos módulos fotovoltaicos será tratado. A pesquisa neste domínio específico tem-se concentrado na recuperação e reciclagem destes equipamentos mas faz-se sobretudo a uma escala laboratorial. Aspetos como a avaliação do ciclo de vida e a logística inversa, que são dois assuntos críticos, têm sido pouco abordados, sendo que ainda há muitos países que não desenvolveram a sua infraestrutura de reciclagem neste domínio [1].

Os painéis fotovoltaicos estão projetados para gerar energia renovável durante 25 a 30 anos embora esta possa chegar até aos 40 anos, vida durante a qual poderão perder 6-20% da sua capacidade de produção de energia [2]. As primeiras instalações significativas começaram nos anos 90

estando agora a atingir o seu fim de vida útil [3], pelo que urge começar a desenvolver ações para resolver este problema, identificando o seu destino final, tratamento e aproveitamento do material recuperado.

O grande volume de materiais que virá a estar disponível via reciclagem dos módulos fotovoltaicos poderá ser usado na produção de futuros equipamentos ou ser aproveitado para outros produtos/mercados. A indústria recicladora deste tipo de painéis permite a recuperação de materiais como, por exemplo, vidro, alumínio e cobre para os painéis C-Si, que constituem até mais de 85% do peso do total dos painéis [4]. Há mesmo referência a que 90-97% do peso dos módulos pode ser reciclado e, se aplicável, no máximo, 5% pode ir parar ao aterro sendo que o vidro ou a película de EVA são bons para o revestimento dos aterros [5].

Em 13 de agosto de 2012 foi publicada a Diretiva Europeia 2012/19/EU (*Waste Electrical and Electronic Equipment – WEEE*) que tem como objetivo alvos específicos de recuperação e reciclagem dos painéis fotovoltaicos imputando os custos aos produtores [3], [6]. Trata-se de um procedimento legislativo à escala europeia relacionado com a responsabilidade do produtor: São indicadas as regras e obrigações legais fundamentais relacionadas com a recolha e a reciclagem dos painéis fotovoltaicos na União Europeia, incluindo, como referido, alvos mínimos [3]. Em Portugal, a transposição da Diretiva para o quadro legislativo nacional atribuiu esta responsabilidade aos produtores deste tipo de equipamentos, a partir de 7 de maio de 2014 [7]. Atualmente, a Europa é a única região do mundo que possui uma forte e clara estrutura reguladora e de apoio à reciclagem dos módulos fotovoltaicos, aplicada a todos os países desde 2014 [6], [8]. Países com um mercado fotovoltaico em grande expansão, como a China, Japão, Índia, Austrália e Estados Unidos ainda não possuíam, em 2018, regulamentos específicos neste domínio [8]. No entanto, a Associação de Energia Fotovoltaica do Japão (JPEA) publicou em 2017 um conjunto de linhas orientadoras sobre a forma de tratar os módulos fotovoltaicos em fim de vida [9].

Em 2017, mais de 70% dos produtores de painéis fotovoltaicos europeus faziam parte da rede PV CYCLE, associação sem fins lucrativos para apoio à gestão dos resíduos, nomeadamente de equipamentos fotovoltaicos, que os ajuda a respeitar as determinações da Diretiva WEEE [2].

Uma breve história dos vários passos dados a nível internacional no que se refere à reciclagem no domínio do fotovoltaico, é referida por Raju (2019) [10]:

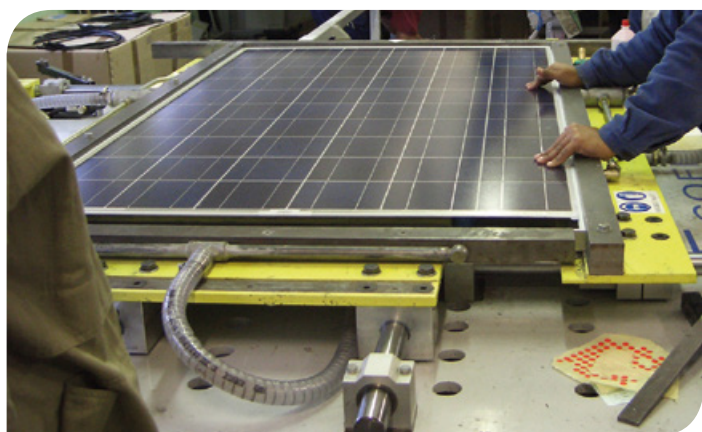


Figura 1 Estrutura de alumínio anodizado aplicada em módulo fotovoltaico (via WikiCommons, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pv_module_lamination_05.jpg).

- 2005 – primeiro programa global de recolha e reciclagem de módulos fotovoltaicos desenvolvido pela First Solar;
- 2007 – apresentação do *Okopol Study* – “*Study on the development of a take back and recovery system for photovoltaic products*”;
- 2007 – constituição da Associação PV CYCLE;
- 2012 – publicação da Diretiva WEEE 2012/19/RU;
- 2017 – publicação do *Final Draft* do projeto de Norma EN50625 – *Collection logistics & treatment requirements for WEEE. Part 2-4: Treatment requirements for photovoltaic panels*;
- 2019 – publicação de uma determinação legal obrigatória na Alemanha.

Recolha e reciclagem dos módulos

A capacidade instalada a nível mundial de energia fotovoltaica atingiu 222 GW no final de 2015 (dados do IEA Key World Energy Statistics 2018 apontavam já para 300 GW em 2016), altura em que se esperava que esta aumentasse até 4500 GW em 2050. Esta tremenda capacidade de crescimento aumentará, naturalmente, os resíduos associados ao setor. É também esperado que no final da próxima década a reciclagem ou reutilização de componentes de painéis solares fotovoltaicos em fim de vida aumente significativamente, com a “redescoberta” de materiais e componentes com um valor de mercado estimado em cerca de 13 000 milhões de euros [4], [11].

Existem vários conjuntos de dados sobre a quantidade de painéis fotovoltaicos instalados e os seus previsíveis resíduos. Assim, estima-se que em 2050 exista um valor cumulativo global de 78 milhões de toneladas de painéis solares obsoletos (vários tipos de resíduos, sobretudo vidro). Este material, se aproveitado (como se viu até >90%) poderá ser suficiente para produzir 2000 milhões de novos painéis (equivalente a 630 GW) [2], [4]. Segundo a Greenmatch (2019) [2], é referido que existem 4 milhões de toneladas de painéis fotovoltaicos instalados na Europa e que o total previsto para 2050 é de 60 milhões de toneladas tendo havido, apenas em 2017, 43 500 toneladas destes resíduos. Por sua vez, Lempkowicz (2019) refere um valor de 151 000 toneladas de painéis obsoletos antes de 2030 [5].

A nível nacional, com base em dados da Direção Geral de Planeamento Energético e Estatística da Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG), dados esses relacionados com a potência instalada de painéis fotovoltaicos instalados em Portugal em parques fotovoltaicos, para os vários anos de 2005 a 2018, foi possível calcular o número de painéis existentes (ver Tabela 1). Este número cumulativo, que não inclui painéis extra parques fotovoltaicos, ou seja, as instalações de produção descentralizada (mini, micro, UPAC e UPP) atinge um valor de quase 1,3 milhões de painéis. Se usarmos um valor indicativo de 20 kg/módulo [12], teremos apenas nesta contabilização cerca de 26 000 toneladas totais cumulativas (2005-2018). Saliente-se que falta ainda contabilizar os módulos instalados antes de 2005. Estes dados são indicados na tabela seguinte:

Ano de montagem	Potência unitária kW	Número de painéis	Potência instalada kW	Ano de montagem	Potência unitária kW	Número de painéis	Potência instalada kW	Ano de montagem	Potência unitária kW	Número de painéis	Potência instalada kW
2005	0,17	210,00	35,70	2013	0,24	4 800,00	1 152,00	2014	0,26	10 368,00	2 643,84
2006	0,20	24,00	4,80	2013	0,24	4 800,00	1 152,00	2014	0,25	4 392,00	1 098,00
2006	0,18	360,00	63,00	2013	0,24	3 200,00	768,00	2014	0,26	4 296,00	1 095,48
2006	0,20	17 138,00	3 427,60	2013	0,24	3 200,00	768,00	2015	0,11	7 992,00	879,12
2006	0,20	10 528,00	2 105,60	2013	0,24	3 200,00	768,00	2015	0,13	1 188,00	156,82
2006	0,20	9 603,00	1 920,60	2013	0,24	4 800,00	1 152,00	2015	0,13	1 188,00	156,82
2006	0,30	4 428,00	1 328,40	2013	0,24	4 800,00	1 152,00	2015	0,13	1 188,00	156,82
2006	0,20	6 304,00	1 260,80	2013	0,24	4 800,00	1 152,00	2015	0,13	1 080,00	142,56
2006	0,20	1 991,00	398,20	2013	0,24	4 800,00	1 152,00	2015	0,13	1 080,00	142,56
2006	0,20	1 552,00	310,40	2013	0,24	4 800,00	1 152,00	2015	0,13	1 080,00	142,56
2006	0,30	756,00	226,80	2013	0,24	4 800,00	1 152,00	2015	0,13	972,00	128,30
2008	0,17	139 464,00	23 708,88	2013	0,24	4 800,00	1 152,00	2015	0,13	864,00	114,05
2008	0,18	122 616,00	22 070,88	2013	0,24	4 800,00	1 152,00	2015	0,15	38 400,00	5 760,00
2009	0,22	45 440,00	9 996,80	2013	0,24	4 800,00	1 152,00	2015	0,16	37 100,00	5 750,50
2010	0,23	84 672,00	19 474,56	2013	0,24	4 800,00	1 152,00	2015	0,16	29 820,00	4 622,10
2010	0,23	84 672,00	19 474,56	2013	0,24	4 800,00	1 152,00	2015	0,16	7 080,00	1 132,80
2010	0,23	5 328,00	1 198,80	2014	0,09	13 776,00	1 294,94	2015	0,16	7 080,00	1 132,80
2011	0,06	1 700,00	102,00	2014	0,26	8 646,00	2 204,73	2015	0,11	9 720,00	1 069,20
2011	0,15	252,00	37,80	2014	0,26	8 646,00	2 204,73	2016	0,13	13 500,00	1 782,00
2011	0,15	195,00	29,25	2014	0,12	18 360,00	2 203,20	2017	0,26	4 488,00	1 144,44
2012	0,23	72,00	16,56	2014	0,30	7 200,00	2 160,00	2017	0,25	1 080,00	264,60
2012	0,28	60,00	16,50	2014	0,30	7 200,00	2 160,00	2017	0,26	864,00	220,32
2012	0,19	76,00	14,44	2014	0,30	7 200,00	2 160,00	2017	0,25	140,00	34,30
2012	0,24	36 696,00	8 807,04	2014	0,40	2 800,00	1 120,00	2017	0,26	132,00	33,66
2012	0,24	28 320,00	6 796,80	2014	0,30	6 900,00	2 070,00	2017	0,31	9 360,00	2 901,60
2012	0,24	28 320,00	6 796,80	2014	0,30	3 474,00	1 042,20	2017	0,17	9 000,00	1 494,00
2012	0,24	9 504,00	2 280,96	2014	0,30	3 460,00	1 038,00	2018	0,34	23 664,00	8 045,76
2013	0,13	8 352,00	1 102,46	2014	0,09	99 360,00	9 141,12	2018	0,34	6 264,00	2 129,76
2013	0,13	8 352,00	1 102,46	2014	0,09	44 460,00	4 001,40	2018	0,34	3 654,00	1 242,36
2013	0,24	4 800,00	1 152,00	2014	0,26	31 464,00	8 180,64	2018	0,34	1 740,00	591,60
2013	0,24	4 800,00	1 152,00	2014	0,27	19 412,00	5 144,18				
2013	0,24	4 800,00	1 152,00	2014	0,25	24 624,00	6 156,00	Total	----	1 272 461,00	249 898,52

Tabela 1 Painéis fotovoltaicos instalados em parques fotovoltaicos em Portugal no período 2005-2018.

As conclusões foram de que a construção de uma unidade de reciclagem dos módulos fotovoltaicos reduzia as emissões de CO₂. No entanto verificar-se-iam perdas económicas, embora, face aos volumes crescentes de material para reciclar ao longo do tempo, o investimento se tornasse interessante a partir de 2028. Esta análise, para o caso italiano, abordou também a possibilidade de tratar material proveniente do estrangeiro.

Também segundo dados da DGEG, a potência total instalada de fotovoltaico, para o mesmo período (2005 – 2018), atingiu um valor total de 356 454 kW, o que indica uma existência extra de painéis não contabilizados acima, correspondente à diferença entre este valor e o valor total da tabela, diferença essa que corresponde a 106 556 kW (equivalente, com uma estimativa com base na razão 249 898,2 kW : 1 272 461 painéis, a mais de 500 000 painéis, ou seja cerca de 10 000 toneladas), para além dos instalados até ao final de 2004. Isto significa que muitos mais painéis para além os referidos na **Tabela 1** anterior virão a estar obsoletos no futuro, no nosso país.

Ficam, assim, aqui alguns valores que permitem avaliar o volume de material existente para reciclagem a nível nacional e estimar a possível quantidade ao longo dos próximos anos para fins de estudo ou de análises de investimento.

Noutra perspetiva, uma análise financeira é sempre importante e uma aproximação ao caso da reciclagem dos módulos obsoletos já foi efetuada. Esta baseou-se num caso de estudo baseado no contexto italiano, em 2015 [13], [14]. As conclusões foram de que a construção de uma unidade de reciclagem dos módulos fotovoltaicos reduzia as emissões de CO₂. No entanto verificar-se-iam perdas económicas, embora, face aos volumes crescentes de material para reciclar ao longo do tempo, o investimento se tornasse interessante a partir de 2028. Esta análise abordou também a possibilidade de tratar material proveniente do estrangeiro.

Como os módulos existentes atualmente pertencem essencialmente a dois tipos diferentes, baseados em silício ou não, isso determina o processo de reciclagem a ser usado. Assim existem vários processos mecânicos, térmicos e químicos [2], [3], [8] que se podem exemplificar:

- para módulos baseados em silício (cerca de 90% do total): estruturas de alumínio e caixas de junção que são desmanteladas manualmente; o módulo é subsequentemente triturado e os seus componentes são separados, podendo sofrer um tratamento térmico de alta temperatura, recuperando-se até cerca de 80% do painel, a maior parte sendo vidro;

- para painéis não à base de silício podem ser usadas diversas técnicas de reciclagem; por exemplo os painéis de telureto de cádmio (CdTe) são primeiramente triturados em diferentes frações, e existem vários banhos químicos para separar os vários materiais semicondutores, permitindo a recuperação de até 95% de tais componentes, banhos que também são utilizados para módulos fotovoltaicos de seleneto de cobre e índio (CIS) e (di)seleneto de cobre e índio e gálio (CIGS).

Refira-se que, a título de exemplo, os painéis de silício (como mencionado atrás, com valor indicativo de 20 kg [12]) têm uma composição aproximada de 76% de vidro, 10% de plástico, 8% de alumínio, 5% de sílica e 1% de outros metais e os painéis de filme fino têm 89% de vidro, 6% de alumínio, 4% de plástico e 1% de outros metais [2]. Em média é referido em [5] que um módulo fotovoltaico tem 78% de vidro, 10% de alumínio, 7% de plásticos e 5% de metais e semicondutores. Um esquema para o processo de reciclagem destes dois tipos de painéis pode ser também observado em [2].

Num estudo relacionado com a reciclagem de módulos fotovoltaico de silício monocristalino por reciclagem mecânica obteve-se a seguinte composição [12]:

Material	Vidro	Al	Si	Ag	Sn	Zn	Cu	Pb	outros
% de material no módulo (%)	74	10,3	3,35	0,17	0,12	0,07	0,57	0,06	0,05
Quantidade de material num módulo (máximo 20 kg) (kg)	14,9	2,06	0,67	0,034	0,024	0,014	0,114	0,012	0,01
Rendimento da reciclagem (%)	95	100	81	50	100	100	100	100	---

Tabela 2 Composição exemplificativa de um painel de silício monocristalino.

Um dado relacionado que permite aferir da capacidade de reciclagem/reutilização de componentes dos módulos fotovoltaicos é referido em [10]: um semiconductor de CdTe pode ser reciclado até 40 vezes e, se usado em contínuo em módulos fotovoltaicos, pode auxiliar a gerar eletricidade durante 1230 anos.

Segundo a associação PV CYCLE [5] em 2017 foram recolhidas e tratadas 2409 toneladas de módulos fotovoltaicos obsoletos, a nível europeu, estimando-se para 2018 mais de 5000 toneladas no âmbito da sua intervenção, maioritariamente na Alemanha, Itália e França, com uma repartição

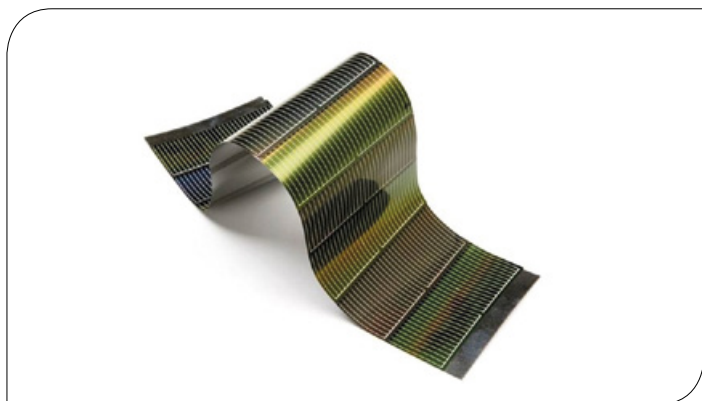


Figura 2 Filme fotovoltaico CIGS (via WikiCommons, CIGS Solarzellen [CC BY-SA 4.0] (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)).



Figura 3 Instalação fotovoltaica de filme fino de CdTe (via Wiki Commons, NREL [Public domain]).

de 84,0% para painéis à base de silício, 12,2% de CIGS e 2,1% de CdTe. Também segundo esta associação, a reciclagem de 1 tonelada de módulos fotovoltaicos obsoletos evita aproximadamente a emissão de 1,2 toneladas de CO₂ [5].

Também a título de exemplo refira-se que uma empresa de serviços ambientais, a Veolia, tem em França, onde o setor solar tem crescido 40% ao ano (84 000 toneladas em 2017), um Centro de Reciclagem de Painéis Solares, que é considerado como sendo o primeiro inteiramente dedicado para este fim. Esta empresa estabeleceu um contrato com a PV CYCLE France tendo previsto reciclar 1300 toneladas de painéis em 2018 subindo esse valor para 4000 toneladas em 2022. Esta empresa pretende construir instalações similares noutros países [15].

Dado que existem metais pesados na composição dos módulos, a sua deposição em aterro pode resultar em problemas ambientais, além dos custos associados. Além disso, a presença de materiais valiosos como o cobre e a prata, que estão também presentes e em maior quantidade, representam uma oportunidade económica que não é de rejeitar [8]. Embora as células solares de filme fino usem muito menos material do que as células c-Si, existem preocupações acerca da disponibilidade e toxicidade de materiais como o telúrio (Te), índio (In) e cádmio (Cd) [8]. É indicado que num painel fotovoltaico representativo existem as seguintes % em peso de vários metais: chumbo-0,12%; prata-0,14%, estanho-0,12% e cobre-0,37% [12].

Para se ter uma ideia da complexidade do processo de reciclagem dos módulos de CdTe é descrito em seguida um processo desenvolvido pela FirstSolar [8], [10]. O processo inicia-se com a trituração dos módulos



Figura 4 Painéis fotovoltaicos (Imagem por bernswael, via Pixabay).

em grandes pedaços e, subsequentemente, em fragmentos menores (<5 mm) num moinho de martelos. Nas 4-6 horas seguintes os filmes semicondutores são removidos num tambor lento de lixiviação. O vidro remanescente é exposto a uma mistura de ácido sulfúrico e peróxido de hidrogénio, após o que o vidro é novamente separado. A seguir separa-se o vidro dos pedaços maiores de acetato de etileno vinilo (EVA) através de um peneiro de vibração. O vidro limpo é enviado para reciclagem, e usa-se então o hidróxido de potássio para precipitar os compostos metálicos que são enviados para uma empresa que os purifica para um uso posterior. É, assim, recuperado 90% do vidro e 95% dos semicondutores.

PUB

A eletricidade do futuro instala-se hoje!

Soluções integradas com bomba de calor e energia solar fotovoltaica



Gestão inteligente de energia

No futuro, as nossas casas não só produzirão a sua própria eletricidade verde para autoconsumo, como também fornecerão calor e arrefecimento a partir de energia renovável. Na Viessmann, o futuro já está disponível hoje, graças às soluções de autoconsumo que combinam a aerotermia com a energia fotovoltaica.

Saiba mais em www.viessmann.pt.

Principais vantagens:

- Instalação de módulos fotovoltaicos que fornecem a eletricidade consumida pela bomba de calor;
- Garantia ampliada de 12 anos de produto e 25 anos de rendimento, para os módulos fotovoltaicos, e 5 anos de garantia do compressor das bombas de calor (consultar condições);

- Sistemas fáceis de instalar que facilitam os trabalhos de manutenção, sem necessidade de áreas mínimas obrigatórias;
- Cobertura praticamente total das necessidades energéticas do edifício;
- Cómoda gestão remota através de Internet desde o Smartphone;
- Aconselhamento sem compromisso pelo nosso departamento técnico na produção de propostas e estudos;
- Amortização do investimento a curto prazo e aumento da certificação energética do edifício.



Parceiro oficial em Portugal
Termomat, SA
Tlf: (+351) 219 830 886
E-mail: info@viessmann.pt
www.viessmann.pt

VIESSMANN

Assinale-se que taxas de reciclagem típicas na indústria automóvel são de cerca de 75% e nos equipamentos das tecnologias de informação são de 45% [10].

Outros processos são também descritos [8] incluindo as suas vantagens e desvantagens. De referir ainda aqui, a título de exemplo de tecnologias, uma patente [16] relativa a um processo para reciclar células solares de filme fino de CdTe/Cds ou um processo de aquecimento eletrotérmico aplicado à reciclagem de painéis c-Si [13].

Num estudo comparativo [12] foram usados 3 métodos de reciclagem dos painéis fotovoltaicos, térmico, químico e mecânico. Concluíram os seus autores que o método térmico era mais vantajoso do que o método químico, por este ser mais curto e ter um menor investimento. Este método tem, porém, a desvantagem da formação de gases por decomposição do polímero EVA. No processo mecânico tem que se ter em atenção que tecnologias e dispositivos são adequados à trituração. O processo químico baseava-se na imersão do material consecutivamente em ácido nítrico, ácido clorídrico, ácido sulfúrico, hidróxido de potássio e água. Verificaram também que o material triturado contendo menos de 0,07% de prata não era economicamente vantajoso para processar quimicamente.

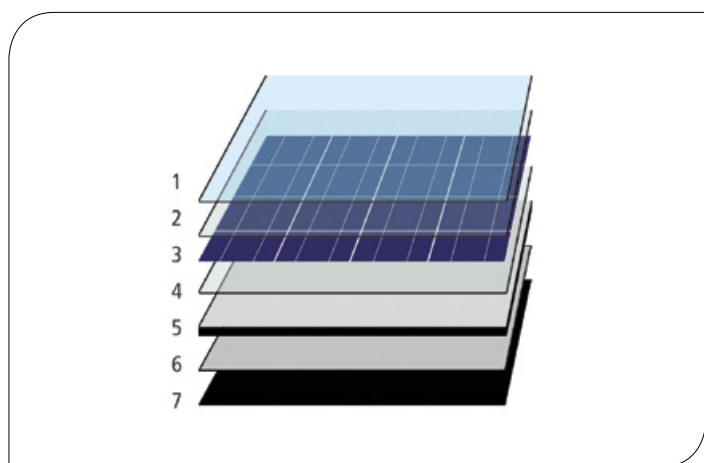


Figura 5 Estrutura esquemática de um módulo fotovoltaico (via Wiki Commons, Debora Castelnuovo [Copyrighted free use]).

No desenvolvimento da tecnologia fotovoltaica são apontadas como futuro neste domínio, as células baseadas em perovskites, com rendimentos superiores às de silício, embora ainda com alguns problemas de estabilidade e ainda não em produção industrial. Essa grande potencialidade levou mesmo alguns investigadores a abordarem a sua avaliação do ciclo de vida [17], antecipando desenvolvimentos futuros e foram já dados alguns passos ao nível do estudo da reciclagem deste tipo de painéis [18].

Conclusão

Deve haver uma estratégia de gestão holística dos painéis fotovoltaicos obsoletos [1], embora os volumes atuais de resíduos sejam ainda baixos [8]. Este tema da gestão e tratamento deste tipo de resíduos tem acelerado a curva de aprendizagem da indústria e é da maior importância assegurar o progresso e permitir uma reciclagem sustentável e uma cadeia de valor adequada [13].

Há oportunidades e desafios no que se refere à reciclagem dos equipamentos fotovoltaicos, mas os métodos de reciclagem necessitam ainda de ser melhorados [8]. No entanto há já empresas/entidades a trabalhar neste domínio que poderão ser parceiros de potenciais interessados.

No desenvolvimento da tecnologia fotovoltaica são apontadas como futuro neste domínio, as células baseadas em perovskites, com rendimentos superiores às de silício, embora ainda com alguns problemas de estabilidade e ainda não em produção industrial.

Existe, assim, uma oportunidade de negócio relacionado com a reciclagem deste tipo de painéis fotovoltaicos, que poderá ser interessante para alguns investidores, nomeadamente os que estão já a trabalhar em áreas de reciclagem afins.

Referências

- [1] Mahmoudi S., et al., *End-of-life photovoltaic modules: A systematic quantitative literature review*, *Resources, Conservation and Recycling*. Vol. 146, julho 2019, p. 1-16.
- [2] www.greenmatch.co.uk/blog/2017/10/the-opportunities-of-solar-panel-recycling, acessado em 29-07-2019.
- [3] www.solarwaste.eu/ acessado em 29-07-2019.
- [4] IRENA & IEA-PVPS, Weekend S., Wade A., Heath G. *End-of-life Management: Solar Photovoltaic Panels*. 2016.
- [5] Lempkowicz B., *With 151.000 tons of end-of-life PV panels expected before 2030, recycling is not an option*. Webinar – PV end-of-life management- reduce, reuse, recycle. ATA Insights, 7th March 2019.
- [6] European Union. Directive 2012/19/EU of the European parliament and of the Council of 4 July 2012 on Waste electrical and Electronic Equipment (WEEE): *Official Journal of the European Commission*. 2012:L 197/38-71.
- [7] Decreto-Lei n.º 67/2014, de 7 de maio.
- [8] Lunardi M. M. et al., *A Review of Recycling Processes for Photovoltaic Modules*. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.74390>. Chapter 2 in *Solar Panels and Photovoltaic Materials*. Ed. Beddiaf Zaidi, IntechOpen, 2018, DOI: 10.5772/intechopen.72061.
- [9] www.pv-tech.org/news/japan-issues-guidelines-on-proper-disposal-of-used-solar-modules acessado em 01-08-2019.
- [10] Raju S., *Enabling a virtuous Cycle – Life Cycle Management in Photovoltaics*. Webinar PV end-of-life management- reduce, reuse, recycle. ATA Insights. 7th March 2019.
- [11] IRENA. *Solar PV Recycling Offers Significant Untapped Business Opportunity. New Report Shows – Technical potential of materials recovered from end-of-life solar PV panels could exceed \$15 billion by 2050*. Munich, junho 2016.
- [12] Strachala D. et al., *Methods for recycling photovoltaic modules and their impact on environment and raw material extraction*. *Acta Montanistica Slovaca*. Vol. 22, n.º 3, 2017, p. 257-269.
- [13] Doni A., Dughiero F. *Electrothermal Heating Process Applied to c-Si PV Recycling*, *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*. 38th IEEE, 2012.
- [14] Cucchiella F., D'Adamo I., Rosa P., *End-of-life of used photovoltaic modules: A financial analysis*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 47, 2015, p. 552-561.
- [15] <http://noctula.pt/o-que-fazer-aos-paineis-solares-fotovoltaicos-em-fim-de-vida/> acessado em 30-07-2019.
- [16] Campo M. D. et al., *Process for recycling CdTe/Cds thin film solar cell modules*. Patente US 6.572.782, 2003.
- [17] Jaume-Adrià A. et al., *Perovskite Photovoltaic Modules: Life Cycle Assessment of Pre-industrial Production Process*. *iScience*, n.º 9, 30 novembro 2018, p. 542-551.
- [18] Kadro J. M. et al., *Proof-of-concept for facile perovskite solar cell recycling*, *Energy & Environmental Science*. Vol. 9, n.º 10, 2016, p. 3172-3179. doi.org/10.1039/C6EE02433A