

painéis fotovoltaicos e turbinas eólicas em fim de vida: problema ou oportunidade?

Carlos Nogueira

Investigador LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia, I.P.

carlos.nogueira@lneg.pt

As energias renováveis desempenham hoje em dia um papel crucial no combate aos efeitos das alterações climáticas, sendo um dos sectores que tem evoluído positivamente e de forma sustentada. A transição energética para uma economia descarbonizada, nomeadamente na geração de eletricidade, teve importantes progressos nas últimas décadas, nomeadamente no nosso país, nem sempre acompanhado com a mesma celebridade por outros vetores, igualmente essenciais, como a eficiência energética e a descarbonização da mobilidade.

Nesta transição, a geração de eletricidade por via eólica fez o seu caminho nas últimas décadas, com a instalação de um conjunto considerável de parques eólicos. Atualmente, a geração de eletricidade por via fotovoltaica está em pleno desenvolvimento, devido à diminuição dos seus custos, tal como demonstrado no sucesso dos recentes leilões de energia solar. Estes programas irão decerto continuar, permitindo a curto e médio prazo aumentar substancialmente a capacidade de energia fotovoltaica no nosso país.

A procura crescente das energias renováveis tem, contudo, várias implicações a diferentes níveis, sendo talvez a mais relevante a disponibilidade de materiais necessários para essas tecnologias. Sendo os recursos limitados, e em regiões onde os recursos minerais não são abundantes, como é o caso da Europa, a questão torna-se particularmente premente. O próprio Set-Plan e outros instrumentos de política europeia têm identificado esses constrangimentos. As

tecnologias eólicas e fotovoltaicas necessitam de diversos tipos de materiais, alguns considerados críticos por serem escassos, por serem produzidos em locais com problemas geopolíticos, ou por serem dificilmente substituíveis por outros mais abundantes (vd. **Tabela 1**). Nas tecnologias fotovoltaicas com células de silício destaca-se o próprio silício metálico, considerado crítico por ser produzido com pureza muito elevada a partir de matéria-prima (sílica) também com especificações limitadas, e os elementos dopantes. Nas células de filmes finos do tipo CIGS (cobre-índio-gálio-selénio), utilizam-se elementos raros e caros, como o índio e o gálio. Relativamente às turbinas eólicas, destacam-se os magnetos permanentes utilizados nos geradores das turbinas de elevada potência, do tipo NdFeB, constituídos por elementos de terras-raras, nomeadamente o neodímio, mas também em menor teor o praseodímio e o disprósio.

Sendo verdade que a gestão sustentável dos materiais classificados como críticos tem que ser encarada frontalmente, uma estratégia verdadeiramente sustentável tem que envolver todos os materiais, ou pelo menos, a maioria deles. Seria um erro focar apenas a atenção nos materiais considerados mais críticos, raros, essenciais, esquecendo os outros. Até porque a criticidade é variável e evolutiva, e depende de muitos fatores também eles inconstantes, como a relação entre a oferta e a procura, as condições geopolíticas dos produtores, a identificação de novas reservas minerais, entre outros.

Tanto as tecnologias eólicas como as fotovoltaicas têm um tempo de vida útil entre 20 a 30 anos, dependendo do uso, das condições atmosféricas e de outros fatores que influenciam a sua durabilidade.

No caso das turbinas eólicas, estará para breve prazo prevista a geração de enormes quantidades de materiais em fim-de-vida (seguramente algumas centenas de milhares de toneladas, na Europa) para os quais são necessárias soluções apropriadas, sendo a reciclagem a opção mais valorizante, em alternativa à deposição em aterro, sempre a evitar. O principal material das turbinas é o aço (vd. **Figura 1**), mas outros materiais têm que ser considerados pelo seu potencial valor ou dimensão, como o cobre, os materiais dos magnetos (caso existam) e os compósitos de fibra de vidro ou carbono / resina polimérica, constituintes das pás. Estes últimos são efetivamente os mais problemáticos dos materiais, porque são difíceis de reciclar e constituem um volume imenso de material a gerir.

A instalação de painéis fotovoltaicos em grande escala foi mais recente, mas a médio prazo a mesma questão colocar-se-á: enormes quantidades de painéis em fim-de-vida para gerir.

| Tecnologia | Materiais críticos |
|--------------------------------------|--|
| Turbinas eólicas | Terras-raras (Neodímio, Praseodímio, Disprósio) – magnetos permanentes |
| Células fotovoltaicas (silício) | Silício metálico e dopantes (Fósforo) |
| Células fotovoltaicas (filmes finos) | Índio, Gálio – células GIGS |

Tabela 1 Identificação de materiais considerados críticos nas tecnologias eólica e fotovoltaica.

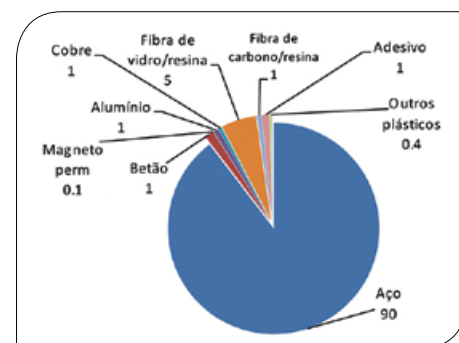


Figura 1 Distribuição média de materiais (% em peso) em turbinas eólicas.

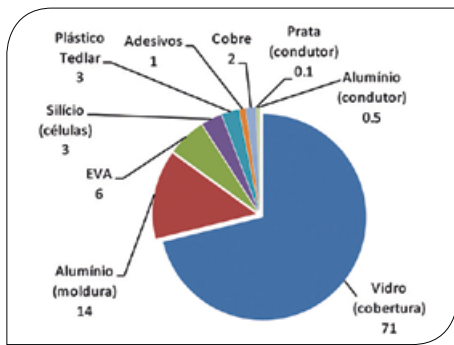


Figura 2 Distribuição média de materiais (% em peso) em painéis fotovoltaicos (Si).

Neste caso, a relação de materiais constituintes é substancialmente diferente (Figura 2), sendo o vidro utilizado na cobertura do painel o prevalente, destacando-se também o alumínio da moldura lateral, os componentes poliméricos (as películas encapsulantes de filme de EVA – etileno acetato de vinilo – e a camada protetora de Tedlar – PVF), as células com as respetivas linhas de condução (prata, alumínio) e a caixa de junção com diodos e cabos elétricos.

A reciclagem de turbinas eólicas e de painéis fotovoltaicos tem características muito diferentes, pelos materiais constituintes, pelo tipo de utilizadores e também pela dimensão dos equipamentos. As turbinas eólicas são essencialmente utilizadas nos centros electroprodutores da rede elétrica, podendo haver também turbinas dispersas em microgeração, mas claramente menos importantes. O processo de reciclagem (Figura 3) inicia-se pelo desmantelamento das torres, sendo um processo complexo, semelhante a uma demolição, mas que deverá preservar ao máximo a integridade dos principais constituintes (nacelle, pás) para permitir o seu

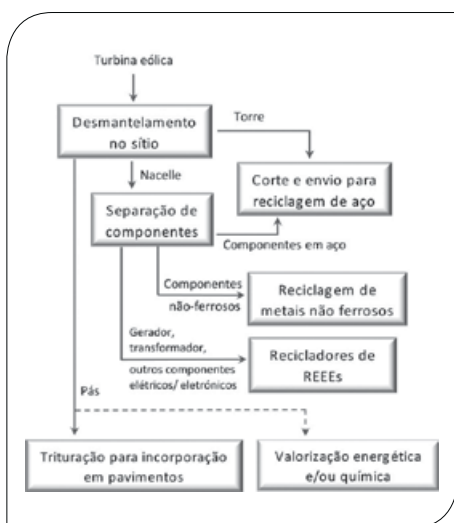


Figura 3 Processo esquemático de reciclagem de turbinas eólicas em fim-de-vida.

tratamento individualizado e a subsequente separação dos diversos componentes (gerador, transformador, eixos, suportes, rotor, e outros componentes elétricos). Um desmantelamento eficiente que permita separar materiais por tipologias possibilitará desde logo encaminhar partes substanciais das turbinas para sistemas de reciclagem já instalados, como o caso do aço, dos metais não ferrosos e dos recicladores de resíduos de material elétrico e eletrónico. O destino das pás é bem mais complexo. Primeiro importa proceder ao seu corte no terreno, usando máquinas pesadas de cisalhamento. O destino final pode ser a deposição em aterro, embora haja soluções de valorização por trituração e produção de granulados para pavimentos, mas esta é uma solução de downcycling e não constitui uma alternativa consistente para todo o resíduo gerado. Existem outras opções que passam por tratamentos mecânicos, térmicos e/ou químicos, que visam reciclar a fibra e aproveitar a energia do polímero, mas estas soluções ainda necessitam de otimização e de redução dos custos. A reciclagem dos compostos das pás constitui ainda um desafio em que importa apostar.

A recolha dos painéis fotovoltaicos fora de uso tem algumas características diferentes. Embora também haja produção centralizada em parques fotovoltaicos, há também muitos painéis utilizados em microgeração, em soluções de autoconsumo e, potencialmente no futuro próximo, integrados em comunidades de energia. O seu uso, mais disperso, poderá ocasionar ineficiências nos circuitos de recolha e encaminhamento para reciclagem. Contudo, a experiência acumulada na gestão de fluxos desta natureza, tipicamente “domésticos”, poderá ser uma mais valia para promover sistemas eficientes. Para além disso, os painéis fotovoltaicos são classificados como um fluxo específico de resíduo, integrados da categoria 4 (equipamentos de grandes dimensões) dos resíduos de equipamentos elétricos e eletrónicos (REEE), estando sujeitos à regulamentação aplicável a estes fluxos específicos e à responsabilidade alargada do produtor na implementação de processos que visem a sua correta gestão.

Os painéis em fim-de-vida, após a recolha e encaminhamento para instalações de tratamento (Figura 4), deverão ser também desmantelados para separação do vidro e da moldura de alumínio, que podem ser encaminhados para os respetivos sistemas de reciclagem. A cablagem e outros dispositivos elétricos (inversor, seguidor, caso exista, e outros) também têm destinos apropriados em empresas que tratam resíduos de componentes elétricos. O processo prossegue com a decomposição dos adesivos e materiais aglomerantes, por tratamento térmico, com recuperação de calor; resultando as células de silício separadas, que poderão ser reutilizadas (se mantida a sua integridade) ou enviadas para fornos de fusão de silício para produção de Si metálico

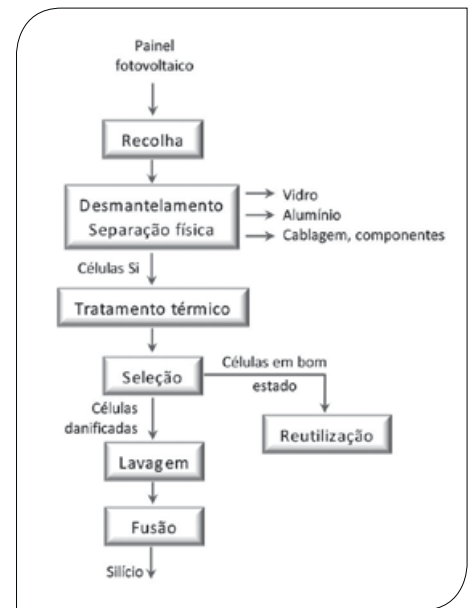


Figura 4 Processo esquemático de reciclagem de painéis fotovoltaicos em fim-de-vida.

e reintrodução no mercado. Este processo ilustra uma possível via de tratamento, havendo já desenvolvidas outras propostas alternativas.

O tratamento de células de filmes finos terá necessariamente processos de refinação finais ajustados, que passarão por operações metalúrgicas em instalações dedicadas, essencialmente por via hidrometalúrgica, para a separação e recuperação dos elementos mais valiosos (In, Ga, Te).

O sucesso da reciclagem depende do esforço dos vários atores, desde logo do compromisso por parte dos detentores dos resíduos, das autoridades e das empresas que reciclam as quais desenvolvem uma atividade industrial com interesse económico. Exemplo disso é o projeto em consórcio entre a Veolia e a PVCycle, em França, que desde 2018 anunciaram a implementação de uma unidade de reciclagem de painéis fotovoltaicos com capacidade de tratamento de uma quantidade substancial dos resíduos gerados na Europa nos próximos anos.

Pelo atrás exposto, são muitos os desafios que se colocam ao desenvolvimento das tecnologias das energias renováveis, nomeadamente no que respeita à disponibilidade de materiais. A resposta é multidisciplinar, e passa pelo desenvolvimento de materiais substituintes, pela procura de novos recursos naturais, pela implementação de estratégias de economia circular; sendo a reciclagem sempre uma ferramenta essencial à eficiência da circularidade. A reciclagem permitirá recuperar materiais para reincorporar na economia, evitar impactos ambientais derivados dos resíduos e também promover novas oportunidades de negócio e de emprego. As soluções serão sempre encontradas nos compromissos entre as várias opções. [tm](#)