



© WALDENMAR / UNSPLASH

PANORAMA DAS ESTRATÉGIAS DE CIRCULARIDADE NA ENERGIA EÓLICA E SOLAR FOTOVOLTAICA EM PORTUGAL

ENQUADRAMENTO

Na versão revista em junho de 2023 do Plano Nacional de Energia e Clima [1], as perspectivas de evolução da capacidade instalada para a produção de eletricidade através das tecnologias eólica e solar fotovoltaica no horizonte 2030 são as seguintes:

- Eólica: 12,4 GW (dos quais 10,4 GW onshore e 2 GW offshore);
- Solar fotovoltaica (PV): 20,4 GW (dos quais, 14,9 GW serão centralizados e 5,5 GW descentralizados).

Estes valores correspondem a um cenário associado a um aumento muito significativo na procura de energia resultante de diversos projetos industriais verdes, e outros, previstos serem implementados em Portugal na presente década. Isto implica a descarbonização praticamente total da produção de eletricidade, e uma forte redução das emissões da mobilidade e transportes e dos edifícios até ao final da próxima década.

Embora reconhecendo o papel crucial das energias renováveis no combate às alterações climáticas, e concretamente da eólica e do solar fotovoltaico, a quantidade e tipo de materiais necessários para a sua implementação são uma preocupação, tanto a nível de materiais estruturais, como de materiais específicos de cada tecnologia. São aqui de referir as matérias-primas críticas (MPC), assim classificadas pelo risco associado ao seu fornecimento e a sua importância estratégica [2]. De acordo com o estudo eMaPriCe sobre MPC e estratégias em Portugal [3], foi possível calcular as seguintes necessidades de MPC no caso dos módulos solares fotovoltaicos: 1 t/GW de gálio, 4 t/GW de índio e 43 t/GW de magnésio. Já os magnetos permanentes das turbinas eólicas utilizam Elementos de Terras Raras Leves (LREE) e Pesadas (HREE), com os seguintes coeficientes unitários [3]: 59 t/GW de LREE e 9 t/GW de HREE no caso da energia eólica *onshore* e 242 t/GW de LREE e 31 t/GW para a eólica *offshore*. Quanto a outros materiais, considerados

não críticos, os impactes ambientais associados à sua produção (p.ex., no caso do betão) são também um constrangimento. Assim, o aumento da circularidade dos equipamentos associados a estas fontes de energia é uma prioridade, sob pena de se transferir um problema energético para um problema de materiais. A reciclagem é atualmente a principal solução para o fim de vida dos parques eólicos e solares. Contudo, numa ótica de sustentabilidade e circularidade, dois dos principais objetivos são a redução do consumo de recursos e a manutenção do máximo valor de materiais e produtos em circulação na economia, durante o maior tempo possível. A reciclagem representa a perda substancial desse valor, uma vez que a sua eficiência é baixa e tem também diversos impactes e custos elevados associados.

ENERGIA EÓLICA

Portugal conta atualmente com 5,8 GW de capacidade instalada, sendo que grande parte

desta foi instalada entre 2005 e 2012 (cerca de 4GW). Atualmente, esta tecnologia é responsável pela produção de 13 TWh/ano de energia [4].

O Parque Eólico Nacional em Portugal é caracterizado por turbinas eólicas com potência nominal em torno de 2MW, as quais são constituídas pelos componentes, e respetivas massas, apresentados na Figura 2.

De uma forma geral, grande parte das turbinas eólicas atualmente em operação são compostas por materiais recicláveis, sendo os componentes mais problemáticos as pás. Estas, cuja massa representa cerca de 9% da totalidade da turbina, são constituídas por materiais termoplásticos e resinas, os quais exigem técnicas mais sofisticadas de reciclagem.

Atualmente, existem já vários Parques Eólicos a chegar ao fim da sua vida útil (tipicamente, 20 a 25 anos) num horizonte de 5 a 10 anos, o que representa cerca de 700 MW da capacidade instalada.

Quando um Parque Eólico atinge o seu fim de vida útil, i) são recicladas as componentes possíveis e as restantes vão para aterros, ii) são reutilizadas noutros mercados, ou iii) são implementadas estratégias de extensão de vida dos equipamentos.

A maioria dos componentes de uma turbina eólica – fundação, torre, componentes da caixa de engrenagem e gerador – são recicláveis e tratados como tal. Contudo são as pás das turbinas eólicas que representam um desafio não só devido pela sua elevada dimensão, mas também pela natureza complexa dos materiais utilizados no seu fabrico.

Neste momento, existem quatro grandes desafios para fazer face a este problema [8]:

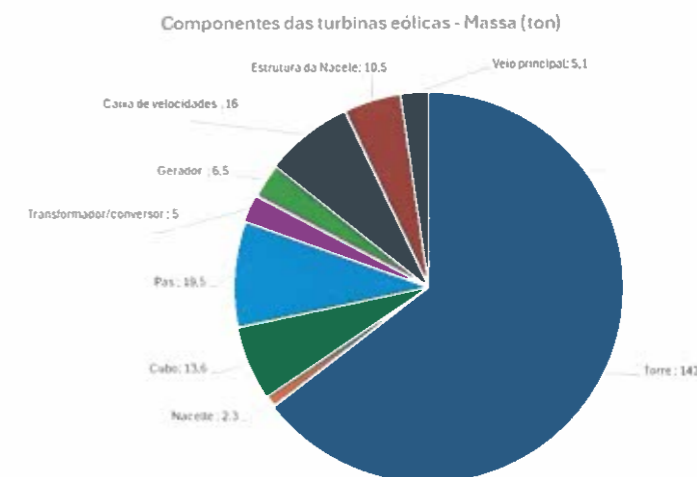
- investir em I&D para avaliação e escalabilidade nas tecnologias de reciclagem;
- incentivar o uso de materiais reciclados nas novas turbinas;
- investir em I&D no desenvolvimento e utilização de novos materiais recicláveis no fabrico das pás e
- estabelecer uma plataforma europeia inter-setorial para partilha de boas práticas.

A investigação na área dos materiais tem evoluído de forma marcante nos últimos anos, sendo possível atualmente aplicar metodo-

FIGURA 1 Energia eólica: capacidade instalada vs. acumulada em Portugal até dezembro de 2023 [5] [6]



FIGURA 2 Componentes das turbinas eólicas [6]



logias de separação dos materiais que compõem as pás através de métodos sofisticados e relativamente eficientes.

Atualmente, existem essencialmente três tipos de reciclagem aplicáveis aos componentes das pás eólicas [7], [9]:

Reciclagem mecânica: que envolve a trituração mecânica (TRL 9) ou a trituração por pulso de alta voltagem (TRL 6) – geralmente após a separação – dos materiais para que possam ser reutilizados, muitas vezes como material de enchimento, principalmente em materiais de construção ou plásticos.

Reciclagem termoquímica: onde as lâminas

são incineradas, produzindo energia e decompondo os compostos. Este processo preserva certas características dos materiais fibrosos, tornando-os adequados para uso posterior. Um dos processos conhecidos é a pirólise (TRL 9), mas que nesta vertente se encontra ainda num TRL 4/5.

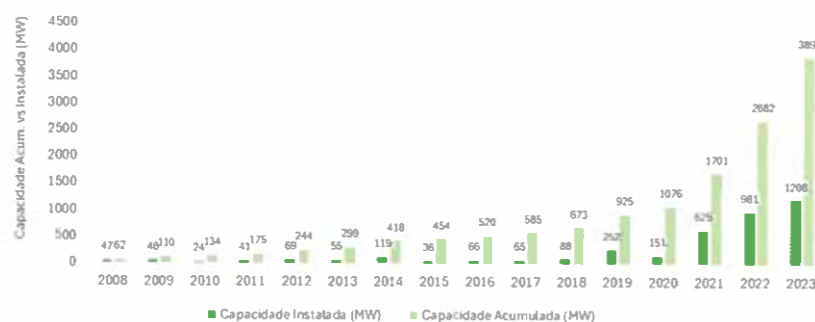
Reciclagem química: são utilizadas técnicas como o leito fluidizado (TRL 5/6) ou solvólise (TRL 5/6) que, por meio de solventes e processos térmicos, separam as resinas das fibras para que ambos os materiais possam ser reutilizados. Alguns estudos referem a reciclagem por solvólise como a solução mais circular e de baixo carbono.

QUADRO 1 Taxas de reciclagem e deposição para componentes de turbinas eólicas [6]

Material	Taxa de Reciclagem/Deposição	Destino
Alta liga ferrosa	98	Reciclagem
Metais ferrosos	95	Reciclagem
Aço	-	Reciclagem
Alumínio e ligas de alumínio	95	Reciclagem
Cobre, magnésio, níquel, zinco e as suas ligas	98	Reciclagem
Metais preciosos e outros não ferrosos e ligas	98	Reciclagem
Plásticos, borrachas e outros materiais orgânicos	100	Incineração com recuperação de energia
Eletrónica	50	Reciclagem com recuperação de energia
Baterias	100	Reciclagem
Betão, tijolo, etc	64	Aterro
Areias e gravilhas	0	Permanece no solo após o desmantelamento do parque
Pás*	95	Aterro ou reciclagem
Restantes materiais	-	Incineração ou aterro

* Fibras reforçadas (vidro, carbono, aramida ou basalto); matriz polimérica (termoplasticos como epóxidos, poliésteres, ésteres vinílicos, poliuretanos ou termoplásticos); um núcleo em sanduíche (madeira de balsa ou espumas como polivinil PVC, PET; revestimentos (PE, PUR); metais (fios de cobre, parafusos de aço, etc.) [7].

FIGURA 3 Energia solar fotovoltaica: capacidade instalada vs acumulada em Portugal até dezembro de 2023. Fonte: elaboração própria, a partir de [4], [5].



QUADRO 2 Composição média de módulos fotovoltaicos [10], [13]

Materiais	Módulos de silício cristalino		Módulos de filme fino (CdTe, CIS/CIGS)
	Fonte [13]	Fonte: [10]	Fonte: [13]
Vidro	76%	71%	89%
Plástico • EVA • Tedlar	10%	-- • 6% • 3%	4%
Alumínio	8%	14%	6%
Silício (células)	5%	3%	--
Adesivos	--	1%	--
Outros metais • Cobre • Prata • Alumínio condutor	1%	-- • 2% • 0,1% • 0,5%	1%

CdTe: telureto de cádmio
CIS/CIGS: cobre-índio-selénio/cobre-índio-gálio-selénio

Existem projetos piloto na maioria das vertentes descritas anteriormente, devido ao problema atual de necessidade de repotenciação (*repowering*) bem como dos parques em fim de vida útil. Contudo há outras iniciativas orientadas para a resolução de questões de ciclo de vida e de economia circular, não só pela vertente do design, mas também dos modelos de negócio que daí advirão. Nomeadamente as questões relacionadas com a durabilidade dos materiais/componentes e produtos, a sua reparação/manutenção/substituição, modularidade/adaptabilidade, reutilização dos materiais e componentes, entre outras.

ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Em Portugal, há um forte impulso para expandir a capacidade de geração de energia solar, com políticas e incentivos destinados a aumentar a penetração da energia fotovoltaica na matriz energética nacional. Na Figura 3 mostra-se a capacidade instalada e acumulada a partir de 2008 (até 2007, a capacidade instalada era de 15 MW [5]) e, tal como se pode verificar, nos últimos anos o aumento do solar fotovoltaico em Portugal foi muito significativo, sendo atualmente a capacidade instalada desta tecnologia de cerca de 3,9 GW.

Os módulos solares fotovoltaicos contêm materiais como vidro e alumínio, bem como MPC (silício de elevada pureza, índio e gálio) [10] e podem conter materiais perigosos, como o cádmio e chumbo [11]. O Quadro 2 apresenta dados sobre a composição média de módulos fotovoltaicos de primeira geração (silício cristalino, que correspondem a cerca de 90 % do total existente em Portugal [12]) e de segunda geração (módulos de filme fino).

Em Portugal, a capacidade solar fotovoltaica (PV) próxima do fim de vida útil (25-30 anos) ainda não é significativa, pois o país adotou esta tecnologia em larga escala, nos últimos anos [14]. No entanto, à medida que os equipamentos envelhecem, a necessidade de gestão e reciclagem adequadas dos materiais tornar-se-á mais relevante.

A UE, estabelece na sua diretiva sobre resíduos de equipamentos elétricos e eletrónicos (REEE) metas concretas para a recolha e reciclagem de módulos PV e obriga os produtores a assumirem os custos associados a essa gestão [15]. Em Portugal, a adoção desta

diretiva atribuiu aos fabricantes a responsabilidade pela gestão adequada dos resíduos gerados [16]. Com o avanço da tecnologia PV, torna-se crucial que a indústria de reciclagem desenvolva infraestruturas adaptáveis para lidar com os componentes dos módulos solares.

A abordagem de reciclagem preconizada na diretiva sobre REEE assenta no seguinte [17]:

- Substâncias potencialmente perigosas, como o chumbo, o cádmio e o selénio, são removidas e contidas durante o tratamento;
- Materiais raros (p. ex., prata, telúrio e índio) são recuperados;
- Materiais com elevada energia incorporada (p. ex., silício e vidro) são reciclados.

Os métodos de reciclagem dos módulos PV podem sintetizar-se da seguinte forma [13]:

Módulos de silício:

- Desmantelamento das estruturas de alumínio e dos vidros, o que permite um aproveitamento de 95 % do vidro e 100 % do metal.
- Tratamento térmico de alta temperatura para evaporação da cobertura de plástico e separação física das células PV – parte destas (80 %) é reutilizada as restantes são sujeitas a um processo químico e térmico, que permite recuperar 85 % do silício.

Módulos de filme fino:

- Trituração dos módulos, obtendo-se peças de 4-5 mm.
- Separação mecânica da parte sólida da parte líquida.
- Remoção química do filme, a que se segue, por um lado, precipitação e desidratação, seguidas da separação e processamento dos metais e permite recuperar 95 % do material semiconductor; por outro lado, a recuperação do vidro (90 %) removendo os materiais das camadas intermédias através de vibração e enxaguamento do vidro.

Atualmente, não existe uma monitorização ou reporte da taxa de reciclagem de módulos PV [18], mas, segundo a Agência Internacional de Energia, a França, a Alemanha, a Itália e o Japão processam algumas toneladas de resíduos de módulos PV anualmente [19].

Deste modo, a reciclagem dos módulos sola-

ecodeal

GESTÃO INTEGRAL DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS PERIGOSOS

SINERGIAS SUSTENTÁVEIS

SERVIÇOS

- ▶ Gestão Integrada de resíduos perigosos e não perigosos;
- ▶ Recolha e transporte de resíduos;
- ▶ Intervenção em situações de emergência ambiental. Limpezas Industriais;
- ▶ Descontaminação de solos (in-situ e ex-situ);
- ▶ Serviços técnicos de gestão de resíduos especializados;
- ▶ Gestão de passivos ambientais;
- ▶ Acondicionamento e armazenagem de resíduos.



CADA VEZ MAIS, É RECONHECIDO QUE É NECESSÁRIA UMA COMBINAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE CIRCULARIDADE PARA OTIMIZAR TODO O SISTEMA E MINIMIZAR EXTERNALIDADES NEGATIVAS A NÍVEL AMBIENTAL, SOCIAL E ECONÓMICO.

www.ecodeal.pt