

reciclagem de componentes de sistemas de produção de eletricidade de origem eólica ou solar

Este artigo aborda o tema da reciclagem de alguns componentes de sistemas/equipamentos usados na produção de eletricidade de origem eólica ou solar fotovoltaica. O fim de vida crescente dos sistemas e equipamentos que foram instalados nos anos 80 e 90 impõe a consideração da sua reciclagem, de forma a conseguir uma solução sustentável e circular adequada. Neste artigo irão ser especialmente abordados os casos das pás dos aerogeradores e dos painéis fotovoltaicos.

Luís Gil¹, Carlos Nogueira²

¹Coordenador da Divisão de Materiais e Energia da Sociedade Portuguesa de Materiais, luis.gil@sdgeg.gov.pt

²Laboratório Nacional de Energia e Geologia, carlos.nogueira@lneg.pt

Introdução

O Plano de Ação de Economia Circular (RCM n.º 190A/2017, de 11 de dezembro) e outros instrumentos de políticas públicas nacionais contribuem com propostas de medidas e ações, ao nível dos Governos e dos agentes económicos, para potenciar a promoção das energias renováveis para uma transição circular:

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 [1].

Os painéis fotovoltaicos estão projetados para uma vida útil de 25 a 30, vida durante a qual poderão perder 6-20% da sua capacidade de produção de energia [1][2]. A nível nacional uma estimativa efetuada aponta para os painéis fotovoltaicos existentes um número de cerca de 1,8 milhões com um peso aproximado de 36 000 toneladas [1].

Saliente-se que em 13 de agosto de 2012 foi publicada a Diretiva Europeia 2012/19/EU (*Waste Electrical and Electronic Equipment, WEEE*) tendo como objetivo alvos específicos de recuperação e reciclagem dos painéis fotovoltaicos e imputando os custos aos produtores [1][3][4]. No nosso país, a transposição da diretiva para o quadro legislativo nacional atribuiu, a partir de 7 de maio de 2014, esta responsabilidade aos produtores deste tipo de equipamentos [1][5].

Nas últimas décadas, o crescimento acentuado da procura de soluções de energias renováveis para a produção de eletricidade levou à instalação em diversas partes do mundo e também no nosso país, em larga escala, de parques eólicos. A produção de eletricidade renovável tem sido essencialmente realizada por via eólica, a par da produção hídrica.

Os aerogeradores ou turbinas eólicas têm, em média, um tempo de vida médio estimado de cerca de 20 anos, embora esse tempo possa ser prolongado por mais tempo, dependendo das circunstâncias. Isso significa que muito brevemente haverá um conjunto acentuado de turbinas que atingirão o seu fim de vida, gerando resíduos aos quais deverão ser dados destinos adequados. A nível das pás dos aerogeradores, é referido que existem globalmente

dezenas de milhares desses componentes que atingiram o seu fim de vida. Só nos Estados Unidos preveem 8000/ano e na Europa 3800/ano, nos próximos anos. A maior parte destas tem mais de uma década com dimensões que são menos de 1/5 das atuais [6]. Outra referência estima que o número de turbinas a atingir o fim de vida nos próximos 5 anos, na Europa, possa atingir as 14 000, constituindo cerca de 62 000 ton de resíduos de compósitos para gerir [7].

Pela dimensão e pelas características multimateriais, os resíduos das turbinas eólicas têm uma complexidade acrescida, pelo que o estudo e desenvolvimento de processos para o seu tratamento tem particular relevância, objetivando a máxima recuperação material e/ou energética, numa perspetiva de economia circular. As pás das turbinas constituem o principal problema a gerir, porque a sua reciclagem não é fácil e a solução encontrada em alguns países tem sido a deposição em aterro, por falta de melhores alternativas, tanto no ponto de vista técnico como económico [8]. Algumas soluções existem, mas sendo dispendiosas, a sua aplicação prática tem-se tornado difícil. Existe assim o risco de acumulação de elevadas quantidades de pás de turbinas eólicas em fim de vida, sem solução nem destino à vista.

Reciclagem de pás de aerogeradores

As turbinas eólicas são constituídas por três partes fundamentais: a torre, a nacelle e as pás. A torre, suportada em fundações, é composta por aço e betão, constituindo cerca de 60-75% do peso total da turbina. A nacelle é a caixa que envolve todos os componentes ativos da turbina, como o gerador; o transformador; a caixa de transmissão, os medidores/controladores, o sistema de travagem e os eixos. Todos estes componentes são peças e máquinas essencialmente metálicas, mas que também contêm outros materiais. A pá da turbina é formada por compósitos fibra/polímero e está ligada ao eixo de rotação através de uma peça metálica – o centro do rotor ou cubo. A Figura 1 apresenta uma distribuição média, em peso, dos principais componentes de uma turbina [9]. Nos dados apresentados, a torre representa cerca de 65% do peso, enquanto as pás menos de 9%, sendo os restantes 26% compostos pelos equipamentos elétricos,

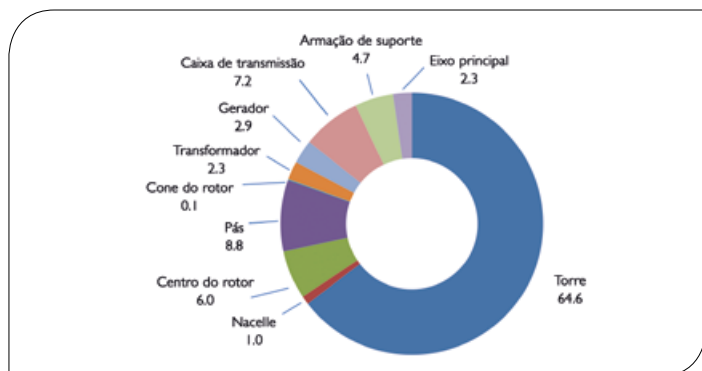


Figura 1 Distribuição (%) em peso dos principais constituintes de uma turbina eólica de 2 MW, de 220 t (gráfico construído a partir de valores da ref. [9]).

de transformação e de transmissão. Há contudo outros dados que revelam que a contribuição do peso das pás poderá ser apenas de 4% [10].

A **Tabela 1** resume os principais materiais por componente e a **Tabela 2** a quantificação dos materiais, destacando-se o aço como o principal material (cerca de 90%), os plásticos reforçados com fibra de vidro (cerca de 6%), o betão (1,3%) e os metais não ferrosos (Al e Cu, cerca de 1,3%). Nas turbinas mais antigas e nas recentes com menor potência, usam-se motores sem magnetos permanentes, sendo neste caso o teor de cobre substancialmente superior (cerca de 1,6%).

Componente	Subcomponente	Materiais principais
Torre	—	Aço e betão
Nacelle	Caixa de transmissão	Aço, algum alumínio e cobre
	Gerador	Aço e cobre
	Outra maquinaria e caixa exterior	Aço, algum alumínio e cobre, e alguns plásticos
Dispositivos das pás	Cubo de encaixe	Aço
	Pás	Compósito fibra/resina polimérica

Tabela 1 Principais materiais utilizados nos componentes das turbinas eólicas [10].

Material	% em peso
Aço	89,6
Betão	1,34
Magneto permanente	0,10
Alumínio	0,80
Cobre	0,51
Fibra de vidro / plástico	5,37
Fibra de carbono / plástico	0,76
Adesivo	1,14
Outros plásticos	0,38

Tabela 2 Distribuição (% em peso) dos principais materiais das turbinas eólicas.

PUB

coeptum

produza a sua energia

Especialistas em equipamentos e soluções de produção e autoconsumo fotovoltaico

www.coeptum.pt
info@coeptum.pt
+351 253 813 209
Rua da Demanda, 198, 4740-023 Gandra, Esposende, Portugal

SOLAR MOUNTING SYSTEMS

ALTERNATIVE ENERGY POWER

SUNGROW

FISKALPHI PHOTOVOLTAIC PRODUCTS

Innovative & Smart

Panasonic

renováveismagazine 27

No que respeita às pás das turbinas, estas são essencialmente constituídas por compósitos de fibra de vidro (~75%), que conferem elasticidade e resistência, e de resina polimérica (25%), que é a matriz agregadora [7] [11], destacando-se:

- Fibras de reforço: fibra de vidro ou carbono (fibras de aramida ou de basalto também podem ser encontradas);
- Matriz polimérica: termoendurecíveis como resina epóxida, poliéster, ésteres vinílicos, poliuretano, e por vezes também alguns termoplásticos;
- Reforço central: um núcleo interior que reforça a estrutura interior oca, baseado em espumas de PVC ou PET.

Têm ainda outros componentes menores, como revestimentos exteriores de polietileno ou poliuretano, adesivos, laminados de carbono e algumas pequenas peças metálicas como fios de cobre e parafusos de aço.

O primeiro problema que existe no tratamento em fim de vida das turbinas eólicas é o seu desmantelamento: é complexo, e por isso, caro. O transporte de peças e componentes de grandes dimensões para os destinos de tratamento pode também ser difícil. Uma solução mais apropriada será o corte no local, particularmente no caso das pás. Para tal terá de se recorrer a maquinaria pesada como guilhotinas mecanizadas.

Por outro lado, o processamento de resíduos de grande dimensão também proporciona a possibilidade de desmantelamento eficiente dos seus principais componentes, possibilitando o seu encaminhamento para soluções de valorização apropriadas (reciclagem, valorização energética). É o caso da maioria dos componentes metálicos (da torre, dos equipamentos elétricos como transformadores e gerador, do rotor, da transmissão) que uma vez individualizados poderão ser encaminhados para recicladores que os tratam através de processos físico-químicos e metalúrgicos adequados. Componentes em aço (ferro e suas ligas), em alumínio e em cobre seguem estes destinos, o mesmo acontecendo para outros metais secundários. Também existem vias de reciclagem estabelecidas para componentes eletrónicos (resíduos elétricos e eletrónicos) e baterias. A **Figura 2** ilustra os destinos habituais dos principais componentes das turbinas bem como as respetivas taxas de reciclagem expectáveis.

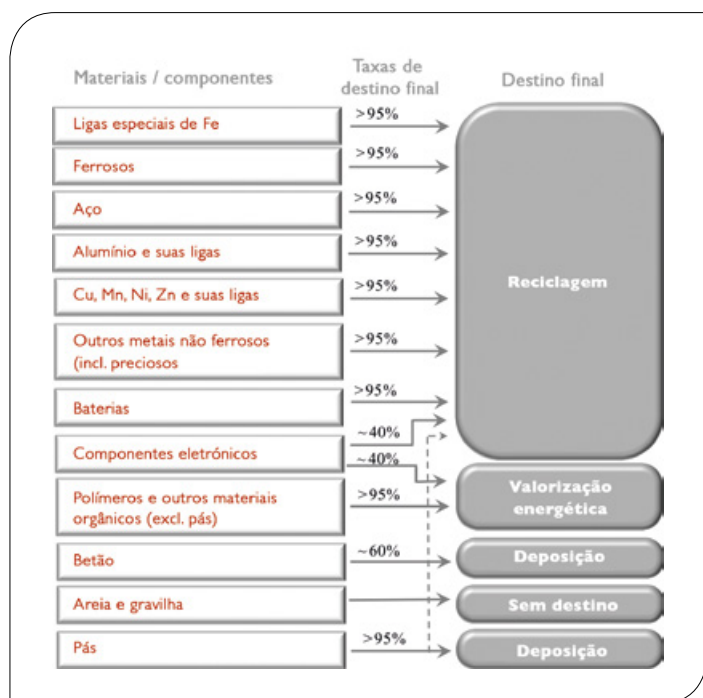


Figura 2 Principais materiais de uma turbina eólica e identificação dos destinos em fim de vida habituais. A partir de dados da ref [9], adaptados.

Sendo uma mistura compósita muito complexa, a reciclagem das pás encerra muitos problemas técnicos. A maioria dos processos físicos e mecânicos existentes são ineficientes e não permitem a separação dos principais constituintes: a fibra e o polímero. (...) Nos EUA, estão inclusivamente a enterrá-las. Na União Europeia algumas pás são queimadas para aproveitamento energético no fabrico de cimento ou produção de eletricidade, mas o seu conteúdo energético é baixo e emitem poluentes

Como os principais componentes das turbinas, em peso, são os componentes metálicos, as taxas globais de reciclabilidade são relativamente elevadas, estimando-se em cerca de 85-90% [7]. Este facto não invalida o problema da reciclagem dos compósitos das pás, que embora representando um pequeno componente, em peso, constituem um elevado volume de material. As soluções de valorização são difíceis ou dispendiosas, e muitas estão ainda em fase de desenvolvimento.

Sendo uma mistura compósita muito complexa, a reciclagem das pás encerra muitos problemas técnicos. A maioria dos processos físicos e mecânicos existentes são ineficientes e não permitem a separação dos principais constituintes: a fibra e o polímero. De momento, apenas soluções de aplicações pouco "nobres" são possíveis de considerar, e que correspondem à produção de agregados da mistura, após trituração, para aplicar em construção (p.ex. pavimentos exteriores ou interiores). Nos EUA, estão inclusivamente a enterrá-las. Na União Europeia algumas pás são queimadas para aproveitamento energético no fabrico de cimento ou produção de eletricidade, mas o seu conteúdo energético é baixo e emitem poluentes [6].

Os processos de reciclagem dos compósitos podem dividir-se essencialmente em três classes:

- Processos mecânicos: fragmentação e recuperação dos agregados ou pós para outras aplicações;
- Processos térmicos: incineração, pirólise, com recuperação de energia e eventualmente com recuperação de materiais já transformados;
- Processos químicos: ataque químico da matriz com separação de constituintes (fibra e polímero), com ou sem transformação em novos produtos.

As principais tecnologias aplicáveis à reciclagem dos compósitos de pás eólicas, enquadradas nas classes anteriores, são seguidamente resumidas, sendo indicado em cada uma o nível de maturação tecnológica (TRL = *Technology Readiness Level*):

- Coprocessamento na indústria cimenteira (TRL9): aproveitando o valor energético dos polímeros e a incorporação no cimento dos materiais das fibras, ricas em sílica, e outros enchimentos.
- Fragmentação mecânica (TRL 9): processo de moagem com libertação de materiais com diferentes granulometrias, permitindo obter concentrados de fibras (mais grosseiros) e de resina (mais finos), mas com separações apenas parcialmente eficientes.
- Fragmentação pulsada de Alta Tensão (TRL 6): processo mecânico que permite a separação das fibras e das resinas, em frações com diferentes granulometrias.
- Gasificação (TRL 5/6): tratamento térmico em atmosfera controlada, vulgarmente em leito fluidizado, com recuperação de energia e produção de fibras para eventual utilização.
- Solvólise (TRL 5/6): tratamento termoquímico com solventes, sob pressão, permitindo a separação dos materiais, nomeadamente com recuperação das fibras e da resina polimérica, potenciando a sua eventual utilização (processo dispendioso).

- Pirólise (TRL 9): Tratamento térmico em atmosfera controlada, permitindo a decomposição dos polímeros em frações líquidas ou gasosas, para utilização noutras aplicações. As fibras são recuperadas mas com contaminação.

A fragmentação e produção de agregados para aplicação em pavimentos é uma das opções já em condições de implementação industrial. Esta, contudo, poderá não ser a melhor solução para processar as enormes quantidades de compósitos que serão gerados nos próximos anos. No entanto, várias experiências estão a ser feitas para contornar este problema. Por exemplo, a Global Fibreglas Solutions desenvolveu um método para reduzir as pás a partículas e prensá-las para a obtenção de peletes e aglomerados para pavimentos e paredes. Conseguem processar 99,95% do material. Num outro projeto piloto, a Veolia reduziu a partículas finas as pás, mas teve como objetivo a recuperação de produtos químicos a partir deste material [6].

O coprocessamento na indústria cimenteira é outra opção, permitindo aproveitar a energia dos polímeros e incorporar o material fibroso rico em sílica como componente do cimento, mas a utilização destes resíduos em substituição e outras matérias-primas dependerá de uma avaliação técnica, económica e ambiental, em cada caso. A pirólise é outra opção em condições de aplicação industrial, porém o seu custo pode ser superior e as temperaturas de processamento (300-700°C) podem alterar as propriedades mecânicas das fibras impedindo a sua reutilização para as mesmas aplicações [9], e apenas poderão ser consideradas soluções de *downcycling* ou deposição, para esta fração.

Os outros processos descritos estão ainda em fase de desenvolvimento e demonstração, carecendo ainda de serem comprovados como alternativas efetivas de aplicação.

Reciclagem dos módulos fotovoltaicos

Segundo dados do IEA Key World Energy Statistics 2018 a capacidade instalada global mundial de energia fotovoltaica atingiu cerca de 300 GW em 2016 e esperava-se que esta aumentasse até 4500 GW em 2050. Estima-se que em 2050 exista um valor cumulativo global de 78 milhões de toneladas de painéis solares obsoletos. Como referido, estima-se o número de painéis fotovoltaicos existentes em cerca de 1,8 milhões com um peso aproximado de 36 mil toneladas [1]. Consequentemente, é esperado que no final da próxima década a reciclagem ou reutilização de componentes de painéis solares fotovoltaicos em fim de vida aumente significativamente, com um valor de mercado estimado em cerca de 13 mil milhões de euros [1][2][12][13].



Figura 3 Milhares de painéis fotovoltaicos virão a estar disponíveis no futuro para reciclagem [Tschoder / CC BY-SA (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0>)].

TECNOBAT

BATERIAS INDUSTRIAIS

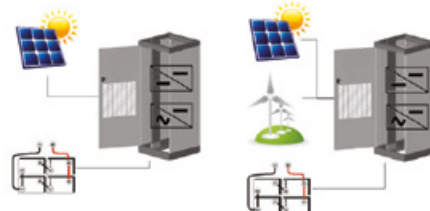
VRLA BATTERY – PROFESSIONAL SERIES



BATTERY® Distribuidor Oficial
CSB >>> Portugal

A nossa energia

LivEN
 BATTERY
 >> Portugal



BATERIAS COM TECNOLOGIA GEL PARA A INDÚSTRIA SOLAR



BATTERY®
TCB

TECNOLOGIA AGM

LISBOA / CACÉM
 PHONE (+351) 214 338 975
 MOBILE (+351) 918 266 344
 E-MAIL jm.tecnobat@tecnobat.pt

PORTO / MAIA
 PHONE (+351) 229 428 740
 MOBILE (+351) 918 266 255
 E-MAIL comercial@tecnobat.pt

TECNOBAT
 SISTEMAS DE BATERIAS E ACUMULADORES, LDA

www.tecnobat.pt

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][14] que foram sintetizados em [1]:

- para módulos baseados em silício (cerca de 90% do total); estruturas de alumínio e caixas de junção que são desmontadas 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 existindo vários banhos químicos para separar os vários materiais semicondutores, permitindo a recuperação de até 95% de tais componentes, banhos que também são empregues para módulos fotovoltaicos de seleneto de cobre e índio (CIS) e (di)seleneto de cobre e índio e gálio (CIGS).

Os painéis de silício (como mencionado atrás, com valor indicativo de 20 kg [15]) 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 [1][2].

Segundo [16] em 2017 foram recolhidas e tratadas 2409 toneladas de módulos fotovoltaicos obsoletos, a nível europeu, estimando-se para 2018 mais de 5 mil toneladas no âmbito da sua intervenção, com uma repartição de 84,0% para painéis à base de silício, 12,2% de CIGS e 2,1% de CdTe. A reciclagem de 1 tonelada de módulos fotovoltaicos obsoletos evita aproximadamente a emissão de 1,2 toneladas de CO₂ [1][16].

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 [1][14]. 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% [1][15].

Uma descrição de vários processos de reciclagem dos vários tipos de módulos e a sua comparação pode ser encontrada em [1], pelo que não será aqui efetuada.

Finalmente, refira-se que as células baseadas em perovskites são apontadas como o futuro a nível da tecnologia fotovoltaica, por apresentarem rendimentos superiores às de silício, embora ainda com alguns problemas de estabilidade e não estando ainda em produção industrial. Por isso, alguns investigadores abordaram a avaliação do seu ciclo de vida [17], e foram já dados alguns passos a nível do estudo da reciclagem deste tipo de painéis [1][18].

Conclusão

Há oportunidades e desafios no que se refere à reciclagem de componentes de sistemas de produção de eletricidade de origem eólica ou fotovoltaica, mas os métodos de reciclagem necessitam ainda de ser melhorados ou comprovados. No entanto há já empresas/entidades a trabalhar neste domínio, havendo uma aceleração da aprendizagem pelos *stakeholders* sendo da maior importância assegurar o progresso e permitir uma reciclagem sustentável e uma cadeia de valor adequados.

Na prática, a reciclagem dos compostos das pás eólicas deverá porventura passar por várias tecnologias, dependendo dos condicionalismos de cada país ou região (necessidades de matéria-prima, custo de energia, etc). A solução de deposição em aterro deverá ser sempre evitada, e deverão sempre promover-se soluções de valorização material e/ou energética destes resíduos.

Com a implementação crescente da produção renovável de eletricidade e a eletrificação progressiva da economia que se está a verificar na transição energética em marcha, serão também crescentes os volumes de componentes em fim de vida, pelo que, para além dos aspetos ambientais e de sustentabilidade, existe também uma oportunidade de negócio a este nível que deve ser considerada.

Com a implementação crescente da produção renovável de eletricidade e a eletrificação progressiva da economia que se está a verificar na transição energética em marcha, serão também crescentes os volumes de componentes em fim de vida, pelo que, para além dos aspetos ambientais e de sustentabilidade, existe também uma oportunidade de negócio a este nível que deve ser considerada.

Referências

- [1] Gil, L. Isidro, J., *O fim de vida dos módulos fotovoltaicos*, *Renováveis magazine*, n.º 39, 2019, p. 36-40.
- [2] <https://www.greenmatch.co.uk/blog/2017/10/the-opportunities-of-solar-panel-recycling> acedido em 29-07-2019.
- [3] <http://www.solarwaste.eu/> acedido em 29-07-2019.
- [4] *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.
- [5] Decreto-Lei n.º 67/2014, de 7 de Maio.
- [6] Chris Martin, *Wind turbine blades can't be recycled so they are piling up in landfills* <https://www.bloomberg.com/news/features/2020-02-05/wind-turbine-blades-can-t-be-recycled-so-they-re-piling-up-in-landfills> , acedido em 20-02-2020.
- [7] Wind Europe. *Blade recycling: a top priority for the wind industry*. feb 12, 2020. <https://windeurope.org/newsroom/news/blade-recycling-a-top-priority-for-the-wind-industry/> , acedido em 19 de fevereiro de 2020.
- [8] Stella C. *Unfurling the waste problem caused by wind energy*. NRP.sept 10, 2019. <https://www.npr.org/2019/09/10/759376113/unfurling-the-waste-problem-caused-by-wind-energy?t=1582195170931> (acedido em 20 de fevereiro de 2020)
- [9] Andersen, P.D., Bonou, A., Beauson, J., Brøndsted, P. *Recycling of wind turbines*. In: *H DTU International Energy Report 2014: Wind energy – drivers and barriers for higher shares of wind in the global power generation mix*. Technical University of Denmark. 2014.
- [10] Joeman, I. *Alternatives on afterlife use of amortized turbine blades in the Netherlands*. Master Thesis. University of Twente. 2019.
- [11] Mishnaevsky, L., Branner, K., Petersen, H.N., Beauson, J., McGugan, M., Sørensen, B.F. *Materials for Wind Turbine Blades: An Overview*. Materials. 10. 1275. 2017.
- [12] IRENA & IEA-PVPS, Weekend S., Wade A., Heath G. *End-of-life Management: Solar Photovoltaic Panels*, 2016.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [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. <https://doi.org/10.1039/C6EE02483A>