



Fim da vida útil de pás eólicas: reutilização e reciclagem

Mariana B. H. Fonseca¹, Monica C. G. Albuquerque²

¹Curso de Engenharia de Energias Renováveis– Universidade Federal do Ceará (UFC)
Av. Humberto Monte SN, Campus do Pici bl 714, Pici cep 60.440-900 – Fortaleza – CE
– Brasil

²Departamento de Engenharia Mecânica – Universidade Federal do Ceará (UFC)
Av. Humberto Monte SN, Campus do Pici bl 714, Pici cep 60.440-900 – Fortaleza – CE
– Brasil

mb100898@gmail.com, monica.albuquerque@ufc.br

Resumo. A energia eólica destaca-se como uma das fontes de eletricidade renovável que mais cresce no mundo. Entretanto, o fim da vida útil das pás eólicas apresenta um desafio, pois o descarte inadequado pode gerar impactos ambientais, como contaminação química e degradação do solo. Este trabalho aborda uma análise detalhada das estratégias disponíveis para o destino ambientalmente correto das pás eólicas, com ênfase em métodos de reciclagem e reutilização. A implementação dessas práticas, além de mitigar os impactos ambientais, contribui para a redução do consumo de matérias-primas virgens, promovendo um sistema mais sustentável no setor de energia eólica.

Abstract. Wind energy stands out as one of the fastest-growing sources of renewable electricity worldwide. However, the end-of-life phase of wind turbine blades presents a significant challenge, as improper disposal can lead to severe environmental impacts, such as chemical contamination and soil degradation. This study provides a detailed analysis of the available strategies for the environmentally sound management of wind turbine blades, with a focus on recycling and reuse methods. Implementing these practices not only mitigates environmental impacts but also reduces the consumption of virgin raw materials, fostering a more sustainable approach within the wind energy sector.

1. Introdução

A energia eólica é uma energia produzida através da ação do vento. O vento é uma fonte de energia sustentável, inesgotável, eficiente, contínua e limpa que fornece alternativas valiosas e sustentáveis aos combustíveis fósseis, pois não emite gases de efeito estufa durante a operação. A energia eólica é uma das fontes de produção de eletricidade renovável em mais rápido crescimento a nível mundial [Global wind Energy Council, 2024].

O aerogerador, equipamento principal e de maior porte de uma usina eólica, é feito de material quase totalmente reciclável. Dentre os seus componentes as pás são constituídas por materiais compósitos, como polímeros termoendurecíveis reforçados com fibras, o que dificulta a sua reciclagem. Os principais componentes das pás são compósitos de resina epóxi reforçados com fibra de vidro [Cheng *et al.*, 2023].

Assim como qualquer equipamento eletromecânico, os aerogeradores possuem uma vida útil de operação prevista em projeto, a qual é influenciada tanto pela durabilidade de componentes específicos, como o gerador, a caixa multiplicadora e as lâminas, quanto pelas condições climáticas e operacionais às quais as turbinas estão sujeitas ao longo de seu ciclo de vida. Fatores como a velocidade do vento, rajadas máximas e modos de operação desempenham um papel crucial na definição dessa vida útil [Zhang e Li, 2021].

Ao término da vida útil (de 20 a 25 anos) das turbinas eólicas, surgem desafios relacionados ao descomissionamento e reciclagem dos componentes, especialmente as pás, que são feitas de materiais compostos difíceis de reciclar. Algumas partes do aerogerador, como por exemplo a torre, a caixa de velocidades, a fundação e o gerador, já são objeto de reciclagem [Spini e Bettini, 2023]. No entanto, os resíduos em fim de vida das turbinas eólicas são uma grande preocupação para o ambiente limpo, devido ao rápido crescimento de fabricação e instalação de turbinas eólicas no mundo [Nolan, 2023].

O gerenciamento eficiente do tempo de vida útil das turbinas eólicas é fundamental para assegurar a continuidade da sustentabilidade associada a esse tipo de energia. À medida que essas turbinas chegam ao final de seu ciclo operacional, torna-se imprescindível adotar práticas rigorosas de descomissionamento que visem mitigar os potenciais impactos ambientais que podem ser causados com o descarte inapropriado [Smith *et al.*, 2023].

Os componentes metálicos da torre e do gerador, como aço, alumínio e cobre, são plenamente recicláveis. Contudo, essa mesma possibilidade não se estende às pás. Apesar de sua robustez e durabilidade, que possibilitam a geração de energia limpa ao longo de um período de vida útil aproximado de 25 anos (que pode ser ampliado para até 30 anos com o devido investimento em manutenção), essas estruturas apresentam um desafio no momento de sua desativação [Inegi, 2024].

As pás eólicas são volumosas e não biodegradáveis, ocupando espaço significativo nos aterros. Com o crescimento do número de turbinas desativadas, estimado em centenas de milhares até 2050, o problema de espaço nos aterros torna-se crítico [Larsen, 2023]. Por um lado, a composição dos materiais utilizados nas pás, que consiste em uma mistura de diferentes componentes, como fibras, resina, cargas e outros elementos, torna a sua separação um desafio considerável. E por outro lado, as grandes dimensões dessas estruturas acarretam complexidades adicionais em termos de desmontagem, corte e transporte, gerando diversas implicações logísticas, econômicas e ambientais. Como as pás não são diretamente biodegradáveis, sua presença em aterros pode dificultar o manejo de outros resíduos e promover reações químicas indesejadas [Finger, 2023]. A decomposição de resinas e polímeros que compõem as pás pode liberar gases nocivos, contribuindo para a poluição atmosférica.

As pás contêm materiais valiosos, como fibra de vidro e resinas epóxi, cuja produção é intensiva em energia. Descartá-las equivale a desperdiçar recursos que poderiam ser reutilizados em novos produtos ou infraestrutura [Coenen *et al.*, 2023].

Atualmente, o descarte em aterros e a incineração são as soluções mais comuns para a disposição das pás, porém, ambas são insustentáveis e prejudiciais ao meio ambiente. Organizações como a WindEurope têm defendido a proibição do depósito de pás em aterros a partir de 2025, em busca de alternativas mais sustentáveis para o

gerenciamento desses resíduos [Noctula, 2023]. Estima-se que os Estados Unidos enfrentarão o descarte de mais de 700 mil toneladas de material proveniente de pás nos próximos 20 anos, e a projeção global sugere que milhões de toneladas poderão ser descartadas até 2050 [Bomgardner e Scott, 2018].

De acordo com a legislação nacional [Lei nº 12.305/2010] que estabelece a Política Nacional de Resíduos Sólidos, todos os resíduos sólidos devem ser geridos de forma ambientalmente adequada. Isso inclui resíduos de equipamentos como as pás eólicas. As Empresas responsáveis pela operação e manutenção de parques eólicos no Brasil devem desenvolver e implementar planos de gerenciamento de resíduos, conforme exigido pela PNRS (Política Nacional de Resíduos Sólidos) e regulamentações estaduais e municipais [Brasil, 2010].

Quando se observa a legislação internacional, na União Europeia (EU) a diretiva WEEE pode se aplicar a componentes de turbinas eólicas, obrigando os fabricantes a gerenciar o descarte de equipamentos e suas partes [União Europeia, 2012]. De acordo com a Diretiva de Resíduos de Produtos de Construção e Demolição, algumas regulamentações podem ser aplicáveis à gestão de resíduos provenientes de aerogeradores, especialmente quando se trata de grandes componentes como as pás [União Europeia, 2008].

Diante desse contexto, o presente trabalho se propôs a discutir as possibilidades de reciclagem e reutilização das pás de turbinas eólicas à luz das tecnologias disponíveis à época. Foram examinadas as soluções tecnológicas existentes, como um estudo de caso, avaliando seu potencial para contribuir de maneira eficaz à gestão sustentável dos resíduos gerados pela desativação dessas estruturas, com foco nos métodos de reciclagem e reutilização aplicados à estrutura completa das pás em escala global.

2. Metodologia

A metodologia adotada neste estudo foi fundamentada em estudos e proposição de soluções alternativas para o descarte de aerogeradores após a vida útil em parques eólicos. O processo incluiu a revisão e comparação de dados específicos, normas vigentes, e práticas recomendadas por especialistas do setor, de modo a construir uma base robusta e fornecer uma visão abrangente sobre o assunto. Essa abordagem possibilitou uma análise detalhada das metodologias e tecnologias emergentes, oferecendo uma visão crítica e fundamentada das diversas perspectivas sobre o tema.

2.1. Identificação dos impactos ambientais e sociais gerados a partir do descarte inapropriado e de um destino ecologicamente correto para as pás eólicas após o fim da sua vida útil

Para esta etapa do trabalho foram consideradas as regulamentações ambientais e incentivos para a economia circular, especialmente na UE, onde existe uma pressão crescente por soluções sustentáveis. Esse contexto fornece *insights* sobre os potenciais benefícios econômicos e ambientais de cada opção de reciclagem, ajudando a orientar políticas e práticas no setor.

Analizando sobre o contexto da União Europeia, a legislação ambiental tem avançado para promover a economia circular e a redução de resíduos, anteriormente foi analisado que era necessário, estabelecer metas de reciclagem e gestão de materiais após o fim de sua vida útil. As pás de turbinas eólicas, compostas por materiais difíceis de

reciclar, como fibra de vidro e resinas epóxi, representam um desafio significativo nesse contexto. Além disso, a taxonomia verde da UE e os incentivos à inovação tecnológica incentivam empresas a desenvolver soluções mais limpas, como novos métodos de reciclagem e o design de pás mais sustentáveis.

A coleta de dados de produção, consumo e desativação de turbinas em locais estratégicos permitiu uma projeção realista da quantidade de materiais que poderia ser reciclada, considerando a proximidade com centros de processamento.

2.2. Identificação e classificação as principais tecnologias de reciclagem utilizadas para o reaproveitamento das pás de turbinas eólicas

O primeiro passo para o dimensionamento de reciclagem de pás eólicas foi a identificação de locais para coleta e armazenamento desses componentes ao final de sua vida útil. Esse processo envolveu um estudo inicial das regiões onde as turbinas estão sendo desativadas, uma vez que a logística de transporte e estocagem das pás é um fator crítico, devido ao grande volume e comprimento dessas peças.

Com a localização dos materiais definida, também avaliou-se as características físicas e químicas das pás, considerando aspectos como o tipo de resina e fibra usada na fabricação. Essas informações são essenciais para selecionar as tecnologias de reciclagem mais adequadas, seja pela abordagem mecânica, química ou termal, e para definir o fluxo operacional da planta, garantindo que o processo maximize a recuperação de materiais de alta qualidade. A análise prévia incluiu ainda um levantamento sobre regulamentações locais e políticas de incentivo à economia circular, uma vez que essas influenciam a comercialização de produtos reciclados.

2.3. Avaliação dos métodos de reutilização das pás de turbinas eólicas em diferentes setores, como na construção civil, arquitetura e infraestrutura urbana

No estudo voltado à análise das opções de reciclagem para pás de turbinas eólicas, vários fatores foram considerados. Inicialmente, o trabalho concentrou-se na avaliação das diferentes tecnologias disponíveis, como a reciclagem mecânica, química e térmica. Cada técnica foi examinada em relação à eficiência, custo e impacto ambiental, com base nas características dos materiais que compõem as pás, como as fibras de vidro e carbono e as resinas.

A reciclagem mecânica, por exemplo, envolve a Trituração das pás, o que permite a recuperação de fibras para uso em produtos de construção, embora a qualidade dessas fibras seja reduzida. A reciclagem química, com processos como a solvólise e a pirólise, dissolve ou degrada a resina para recuperar as fibras de maneira mais íntegra, mas essas técnicas ainda requerem avanços tecnológicos e enfrentam desafios quanto ao consumo energético.

3. Resultados e discussões

3.1. Avaliação dos impactos ambientais

3.1.1. Poluição do solo e da água

As pás de aerogeradores quando descartadas de forma inadequada, podem contaminar solos e corpos d'água, prejudicando a qualidade ambiental [European Commission, 2017].

Quando as pás de aerogeradores são descartadas inadequadamente em áreas de aterros ou no solo aberto, elas podem resultar em vários problemas ambientais tais como:

Contaminação por substâncias químicas: Resinas epóxi e fibras de vidro, que são compostos sintéticos, podem liberar substâncias tóxicas como bisfenol A (BPA) e aminas aromáticas durante o processo de decomposição. Esses produtos químicos podem infiltrar-se no solo e contaminar a água subterrânea, afetando a saúde de ecossistemas locais e até mesmo da fauna e flora.

Comprometimento da qualidade do solo: A presença prolongada dessas matérias pode alterar a estrutura do solo, afetando a capacidade de retenção de água e o equilíbrio de nutrientes. Além disso, a degradação lenta pode obstruir o crescimento de plantas e microorganismos essenciais para a regeneração do solo [Gomez-Martinez, 2021].

Quando são descartadas de forma inadequada perto de corpos d'água ou de forma descontrolada, as consequências podem ser ainda mais graves:

Contaminação da água: O contato das resinas e fibras sintéticas com a água pode liberar substâncias tóxicas diretamente em rios, lagos ou oceanos. Essas substâncias podem afetar a vida aquática, interrompendo cadeias alimentares e tornando os corpos d'água impróprios para consumo ou atividades recreativas [European Commission, 2017]

Acúmulo de resíduos: As pás de aerogeradores são grandes e volumosas, o que dificulta a remoção dos resíduos e aumenta o risco de acúmulo de materiais não biodegradáveis nos ecossistemas aquáticos, onde se tornam microplásticos ao longo do tempo [Nrel, 2021].

3.1.2. Ameaça à fauna e flora

O descarte inadequado das pás de aerogeradores pode representar uma grave ameaça à fauna e à flora em áreas próximas a aterros ou locais onde os resíduos se acumulam descontroladamente. Essas ameaças resultam principalmente da persistência dos materiais compostos, como fibra de vidro e resina epóxi, que não se degradam facilmente no meio ambiente [Koliou, 2020].

Pode ocorrer ingestão de resíduos, animais terrestres e aquáticos podem confundir fragmentos das pás com alimentos, principalmente quando em pedaços pequenos [Gwec, 2022]. A ingestão desses materiais pode causar: obstruções no trato digestivo; redução na capacidade de absorver nutrientes, levando à desnutrição e até à morte; acúmulo de substâncias tóxicas derivadas de compostos químicos, como epóxi, que podem afetar o sistema imunológico e causar disfunções metabólicas [Gall e Thompson, 2015].

Uma outra consequência é o enredamento e aprisionamento, fragmentos de pás eólicas ou partes maiores podem prender aves, répteis, mamíferos ou animais marinhos. Isso é particularmente preocupante em áreas costeiras ou próximas a corpos d'água, onde grandes resíduos podem flutuar e impactar espécies como tartarugas marinhas, golfinhos ou aves aquáticas [Wilcox *et al.*, 2016].

Além disso pode ocasionar uma interrupção de habitats naturais, resíduos volumosos de pás de aerogeradores podem ocupar áreas sensíveis, como campos, florestas ou manguezais, fragmentando habitats e reduzindo o espaço disponível para a fauna se alimentar, se reproduzir ou migrar [European Commission, 2017].

Em relação a flora, pode acarretar, alteração do solo, a presença de grandes resíduos no solo pode sufocar a vegetação nativa ao impedir o crescimento de raízes ou a troca de gases essenciais. Além disso, substâncias químicas liberadas podem ser absorvidas pelo solo, inibindo o desenvolvimento das plantas. De forma que pode resultar na propagação de espécies invasoras, como resíduos depositados em áreas naturais podem criar *micro-habitats* que favorecem o crescimento de espécies invasoras, prejudicando a flora nativa. Pode apresentar ainda, fragmentação de ecossistemas. Em áreas de descarte irregular, o acúmulo de pás de aerogeradores pode criar barreiras físicas, impedindo a regeneração de plantas e alterando a dinâmica do ecossistema local [Leitão, 2019].

3.1.3. Emissão de carbono

O processo de incineração ou decomposição inadequada das pás de aerogeradores contribui para a emissão de carbono e outros gases poluentes, o que é contraditório ao propósito sustentável da energia eólica. Algumas formas que ocorrem as emissões de carbono são: incineradores mal regulados: quando as pás são queimadas em incineradores sem controle adequado, os compostos químicos, como a resina epóxi e a fibra de vidro, liberam dióxido de carbono, monóxido de carbono e dioxinas e furanos, que são extremamente prejudiciais à saúde humana e ao meio ambiente [Koliou, 2020].

Mesmo sem incineração, a decomposição lenta em aterros pode gerar emissões indiretas, como a liberação de metano (CH_4) em condições anaeróbicas, especialmente quando as pás são descartadas junto com outros resíduos orgânicos [European Commission, 2017]. A ausência de reciclagem ou reaproveitamento das pás significa que novos materiais precisarão ser fabricados para substituir as descartadas. Esse processo demanda energia e recursos, contribuindo para a pegada de carbono ao longo do ciclo de vida do produto [Gomez-Martinez, 2021].

Dessa forma, a aplicação dos projetos de reutilização diminui a quantidade de resíduos enviados à aterros. Por exemplo, o *Bade Bridge* aproveita pás de grande porte como vigas estruturais, reduzindo significativamente a carga ambiental. O projeto, não só reaproveita pás desativadas, mas também demonstra sua eficiência em aplicações duráveis, reduzindo a emissão de carbono do setor de construção [Larsen, *et al.*, 2023].

O uso de pás em infraestrutura ou mobiliário urbano pode substituir materiais tradicionais, como aço ou concreto, cuja produção é intensiva em recursos naturais. Estudos apontam que o reaproveitamento de pás pode reduzir a necessidade de extração de areia, uma matéria-prima globalmente em escassez [Jones *et al.*, 2023]. Iniciativas de reciclagem alinharam-se ao modelo de economia circular, promovendo o reaproveitamento de materiais e criando mercados para produtos reciclados [Larsen *et al.*, 2023]. Projetos como *playgrounds* e mobiliário urbano podem gerar espaços comunitários que aumentam a conscientização sobre a importância da sustentabilidade [Harrison, *et al.*, 2024].

A comparação entre o reaproveitamento e o descarte inadequado demonstra que soluções baseadas na reciclagem oferecem não apenas benefícios ambientais, mas também ganhos econômicos e sociais significativos [Coenen, *et al.* 2023]. Com a reutilização dos materiais recuperados das pás eólicas, pode-se contribuir para uma menor dependência da extração de matérias-primas, como areia para concreto ou fibras sintéticas para a produção de novos compósitos. Isso ajuda a conservar recursos naturais e a reduzir os impactos ambientais associados à mineração e ao processamento industrial [Kelly, 2023]. Já a reciclagem química pode substituir parte do processo, reduzindo a pegada de



carbono associada à fabricação de pás eólicas. Além disso, a decomposição controlada dos materiais evita as emissões de gases de efeito estufa que seriam gerados por processos como a incineração [Decomblades, 2024].

3.2. Avaliação dos impactos sociais

3.2.1. Doenças Respiratórias e Outros Problemas de Saúde

A exposição contínua a poluentes, como monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO₂), especialmente em comunidades próximas a locais de descarte inadequado de resíduos, pode causar uma série de doenças respiratórias e cardíacas, afetando particularmente grupos vulneráveis, como crianças, idosos e pessoas com condições preexistentes [Chou, 2016].

A exposição a níveis elevados de CO pode causar: doenças respiratórias como asma e bronquite, podendo levar a sintomas como falta de ar, dor de cabeça, tontura, fadiga e, em casos extremos, morte. O CO também afeta o sistema cardiovascular, contribuindo para o aumento do risco de doenças como hipertensão, infarto do miocárdio e acidente vascular cerebral (AVC). Isso ocorre porque esse gás reduz a capacidade do sangue de transportar oxigênio, forçando o coração a trabalhar mais, o que pode causar danos ao longo do tempo [Vetter, 2019 e Organization, 2018].

Embora o dióxido de carbono seja naturalmente encontrado na atmosfera e não seja tóxico em concentrações normais, a exposição a níveis elevados de CO₂, particularmente em ambientes fechados ou em áreas de alta poluição, pode ser prejudicial à saúde [Vetter, 2019]. A inalação de concentrações elevadas de CO₂, pode causar dificuldades respiratórias, falta de ar e aumento da frequência respiratória, já que o corpo tenta expelir o excesso de gás. O aumento da concentração de CO₂, também pode afetar o sistema cardiovascular, aumentando a pressão arterial e a carga de trabalho do coração, o que pode agravar condições pré-existentes, como insuficiência cardíaca e hipertensão [Chou, 2016].

Um outro impacto gerado está na saúde pública, pois o aumento das doenças relacionadas à poluição ambiental gera custos econômicos substanciais para as comunidades e os sistemas de saúde pública [Currie, 2015]. Quando as populações são expostas a poluentes devido ao descarte inadequado de resíduos, a carga econômica com o tratamento de doenças aumenta consideravelmente, com tratamento médico e internações, além de custos com medicamentos [Murray, 2017].

3.2.2. Turismo e Atração Ambiental

Áreas que dependem do ecoturismo para a economia local enfrentam perdas financeiras quando os turistas evitam regiões poluídas ou danificadas [Gossling, 2012]. O ecoturismo é uma atividade que depende diretamente da preservação dos recursos naturais, e o lixo pode prejudicar não apenas a experiência do visitante, mas também a reputação do destino turístico. Em muitas regiões, as comunidades locais dependem da rentabilidade do turismo sustentável e da agricultura, e a degradação ambiental pode enfraquecer esses setores econômicos [Mascio, 2015].

A perda de atratividade de destinos turísticos devido à poluição pode resultar em uma queda nos fluxos de turistas, afetando não apenas o turismo diretamente, mas também as indústrias associadas, como hospedagem, alimentação e transporte. A

poluição visual e a contaminação de ecossistemas naturais também podem desencorajar as atividades recreativas ao ar livre, como caminhadas, observação de aves e pesca, que são essenciais para a indústria do ecoturismo.

3.3. Identificação e classificação as principais tecnologias de reciclagem utilizadas para o reaproveitamento das pás de turbinas eólicas

3.3.1. Reutilização em Novas Aplicações

3.3.1.1. Projeto *Re-wind*

O projeto Re-Wind Network explora a reutilização de pás eólicas de turbinas desativadas em infraestruturas urbanas, buscando alternativas sustentáveis e soluções que promovam a economia circular. Em vez de destinar as pás a aterros, essas estruturas são transformadas em pontes e suportes arquitetônicos em diversas localidades, incluindo Draperstown, Irlanda do Norte; Cork, Irlanda; e Atlanta, Estados Unidos [Finger *et al.*, 2023].

Além de reduzir a quantidade de pás descartadas em aterros, a reutilização dessas estruturas em pontes oferece benefícios ambientais e econômicos significativos. Em termos de sustentabilidade, o projeto *Re-Wind Network* promove a economia circular, reduz a necessidade de construção de novas infraestruturas a partir de matérias-primas virgens e incentiva outras indústrias a adotarem práticas semelhantes [Bank *et al.*, 2022].

3.3.1.2. Projeto *BladeBridge*

No Reino Unido, este projeto representa uma das iniciativas mais inovadoras de reutilização de pás de turbinas eólicas para aplicações em infraestrutura. Em sua essência, o *BladeBridge* visa a criação de pontes modulares de baixo custo em áreas rurais e de conservação ambiental, aproveitando a resistência e durabilidade das pás, originalmente projetadas para resistir a condições climáticas adversas [Christensen e Moller, 2023]. As pás de turbinas são primeiramente cortadas e adaptadas para suportarem cargas e condições locais. Em seguida, são montadas em estruturas de aço que formam a base da ponte. Essa abordagem modular permite rápida instalação e facilita a manutenção, uma vez que as pás, apesar de leves, têm grande resistência estrutural. A combinação das pás com materiais convencionais, como aço e concreto, resulta em uma ponte que não apenas utiliza menos recursos novos, mas também possui vida útil prolongada, o que é ideal para locais de baixo impacto e tráfego [Nielsen e Larsen, 2024].

A implantação do *BladeBridge* reduz significativamente a necessidade de recursos convencionais, como concreto e aço virgem, e também evita que as pás de turbinas sejam destinadas a aterros, uma prática comum devido à complexidade da reciclagem desses componentes. Como resultado, o projeto reduz a pegada de carbono associada tanto ao descarte quanto à construção de novas infraestruturas, oferecendo uma solução que se alinha com o conceito de economia circular [Andersen e Johasen, 2023]. Essas estruturas têm se mostrado não apenas funcionais, mas também contribuem para o turismo sustentável, pois chamam atenção como exemplos de design ecológico, na Figura 1 visualiza-se uma ponte na área rural.



Figura 1. Duas lâminas LM13, foram usadas para substituir vigas de aço na superestrutura. Adaptado da BladeBridge [2024].

3.3.1.3. Projeto *Bridge2Blade*

Este projeto é uma iniciativa financiada pela General Electric (GE) em colaboração com a Universidade da Geórgia, Estados Unidos, com o objetivo de explorar o potencial das pás de turbinas eólicas desativadas para uso em pontes e outras infraestruturas leves. Utilizando pás que seriam descartadas, a Bridge2Blade contribui para reduzir o volume de resíduos gerados no fim de vida útil das turbinas eólicas e proporciona uma alternativa para o descarte tradicional em aterros [Smith, 2023].

Os estudos envolvem avaliar a durabilidade, capacidade de carga e resiliência dessas estruturas frente a diversas condições climáticas e de uso. Os testes preliminares mostraram que as pás recicladas podem suportar cargas de até 20 toneladas, o que indica sua viabilidade para infraestruturas de uso leve. Este projeto visa promover o uso das pás em áreas onde o tráfego de veículos pesados é limitado, como passarelas, ciclovias e pontes para pedestres [Johnson e Reed, 2024]. O projeto também visa contribuir com a economia circular e promover o uso de materiais reciclados em soluções de engenharia civil.

3.3.2. Mobilidade Urbana e abrigos

A reutilização de pás de turbinas eólicas para mobiliário urbano e abrigos representa uma alternativa inovadora e sustentável para o uso de materiais duráveis que, de outra forma, poderiam ser descartados em aterros. A Siemens Gamesa implementou essa prática ao utilizar pás eólicas desativadas para criar abrigos de bicicleta em suas instalações na Dinamarca (Figura 2) [Larsen *et al.*, 2023].



Figura 2. Bicicletário na Dinamarca feito de pá eólica. Adaptado da Gamesa [2024].

Esses abrigos para bicicletas foram projetados para fornecer proteção contra intempéries, utilizando a estrutura das pás que já foram submetidas a condições ambientais adversas e, portanto, possuem resistência e durabilidade consideráveis. Essa iniciativa reduz a necessidade de fabricar novos materiais e estruturas, promovendo a sustentabilidade ambiental. Além de abrigos de bicicletas, pás eólicas também são exploradas para a criação de outros mobiliários urbanos, como bancos e playgrounds, ampliando o impacto positivo desses projetos de reutilização. Esses projetos não só evitam que as pás sejam descartadas em aterros, mas também representam uma aplicação prática dos princípios de economia circular, onde materiais e produtos são mantidos em uso pelo maior tempo possível, reduzindo a demanda por novos recursos. O uso de pás em mobiliário urbano e outras estruturas permite que os municípios e empresas promovam uma imagem sustentável, além de reduzir custos com novos materiais e construção [González, *et al.*, 2024].

3.3.2.1. Projeto *Blade Made*

Este projeto é uma iniciativa sustentável focada em lidar com o problema do descarte de pás de aerogeradores, suas principais estratégias são transformar as pás desativas em novos produtos como: materiais para a construção civil, como, vigas ou pontes; estruturas arquitetônicas, como bancos e abrigos; obras de arte ou instalações urbanas, como *playground* e bicicletário [Blade Made, 2024]. Na Figura 3, pode-se observar um *playground* infantil em Roterdã na Holanda.



Figura 3. Playground de pá eólica em Roterdã, Holanda. [Blade Made, 2024].

A reutilização de pás eólicas desativadas para a maioria dos produtos, como o projeto do *playground* em Roterdã, na Holanda, envolve diversas etapas cuidadosas para garantir segurança e funcionalidade. Primeiro, as pás são inspecionadas quanto à integridade estrutural e, em seguida, cortadas e moldadas para formar elementos recreativos como túneis e rampas. O corte das pás é realizado com equipamentos especializados para preservar a estrutura e evitar bordas afiadas, garantindo que sejam seguras para o uso infantil [Coenen *et al.*, 2023]. Na Figura 4 pode-se visualizar, um conjunto de bancos em uma área urbana na Holanda, feito de pá eólica.



Figura 4. Projeto arquitetônico de praça. Adaptado de Bkor (2024).

Além do aspecto lúdico, esse tipo de projeto também promove a economia circular, já que as pás desativadas, que antes seriam descartadas, são reaproveitadas de forma funcional e educativa, reduzindo o impacto ambiental [Harrison *et al.*, 2024]. Na Figura 5, é possível ver um banco feito de pá eólica. Esse tipo de reaproveitamento contribui ainda para a redução significativa do impacto ambiental, já que evita o descarte das pás em aterros e reduz a necessidade de fabricar novos materiais.



Figura 5. Banco para área urbana. Adaptado de De Maas en Waler (2024).

3.3.3. Reciclagem Mecânica

A reciclagem mecânica permite que os materiais reciclados sejam reutilizados em produtos de menor valor agregado, como concreto, tijolos, ou outros materiais de construção. No entanto, a qualidade das fibras recuperadas é consideravelmente reduzida, o que limita suas aplicações em produtos mais sofisticados ou de maior valor.

Esta técnica é vista como uma alternativa paliativa para lidar com a crescente quantidade de pás de turbinas eólicas no final de sua vida útil. Embora simples e relativamente barata, a reciclagem mecânica não resolve completamente os problemas ambientais e econômicos associados ao descarte de componentes eólicos. Mesmo assim, algumas iniciativas estão sendo implementadas para melhorar o processo e suas aplicações [Harrison *et al.*, 2024].

3.3.3.1. Reutilização Produtos de Construção Civil

A reutilização de pás de turbinas eólicas em concreto envolve a Trituração das pás para extrair fibras de vidro ou carbono, que são, em seguida, incorporadas ao concreto como reforço. Essa adição melhora a resistência mecânica e a durabilidade da mistura, criando materiais mais leves e com menor pegada de carbono em comparação ao concreto convencional [Lee *et al.*, 2024]. Em termos de processo, as pás são primeiramente coletadas e cortadas em pedaços menores. Após a Trituração e o processamento das fibras, elas são adicionadas ao cimento e misturadas para criar um novo material. Esse concreto reforçado com fibras recicladas pode ser usado para criar blocos, pavimentos, ou até mesmo para infraestruturas de pequeno porte [García *et al.*, 2023].

O uso de materiais triturados de pás eólicas para a fabricação de produtos de construção civil, como blocos e pavimentos, é uma abordagem emergente dentro da economia circular. Projetos que visam o reaproveitamento desses materiais exploram as propriedades de resistência e durabilidade da fibra de vidro e do compósito para criar produtos de uso diário, que reduzem a necessidade de matérias-primas virgens [Brown e George, 2023].

3.3.4. Reciclagem Química

A reciclagem química de pás eólicas é um método inovador que visa abordar os desafios da recuperação de materiais compostos, especialmente as fibras de carbono e vidro, que são difíceis de separar de maneira eficiente. Atualmente, dois processos principais estão em desenvolvimento: a pirólise e a solvólise.

3.3.4.1. Pirólise

A pirólise é um método de reciclagem química onde as pás de turbinas eólicas, compostas principalmente de materiais compósitos reforçados com fibras de vidro ou carbono, são aquecidas a altas temperaturas em um ambiente sem oxigênio. Este aquecimento provoca a quebra das resinas e polímeros que ligam as fibras, permitindo que os componentes sejam recuperados de forma mais eficiente. Esse processo ocorre em reatores especiais e controlados, onde as pás são desintegradas em gases e materiais sólidos, (Figura 6).

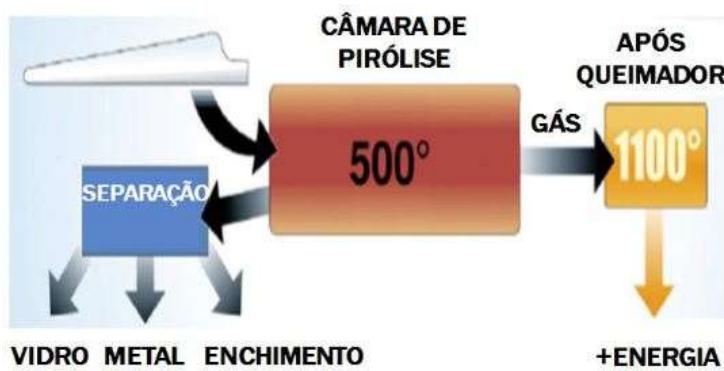


Figura 6. Esquema do processo de pirólise. Adaptado da Larsen [2009].

Durante a pirólise, a resina é decomposta em subprodutos gasosos e líquidos, que podem ser capturados e tratados, enquanto as fibras de vidro e carbono são separadas e recuperadas. Esse procedimento pode gerar fibras com propriedades mecânicas relativamente intactas, dependendo da temperatura e do tempo de exposição, mas exige equipamentos e infraestrutura de controle ambiental para lidar com os gases e vapores tóxicos resultantes, como o monóxido de carbono e compostos orgânicos voláteis [Johnson e Reed, 2024], na Figura 7 é possível verificar efeito do processo de pirólise em uma pá eólica.



Figura 7. Fotografias do “antes e depois” de uma pá eólica submetida ao processo de pirólise. Adaptado de Larsen [2009].

Este processo ainda apresenta desafios em larga escala, pois a alta demanda energética torna o método oneroso. A recuperação e tratamento dos subprodutos é um dos aspectos críticos, exigindo tecnologias adicionais para capturar e reprocessar esses resíduos, a fim de torná-los viáveis e sustentáveis. Com o desenvolvimento de melhores técnicas de controle e reaproveitamento de gases, a pirólise tem o potencial de se tornar mais competitiva.

3.3.4.2. Solvólise

A solvólise é um método de reciclagem química que usa solventes específicos para dissolver a matriz de resina que mantém as fibras unidas, permitindo que as fibras de vidro ou carbono sejam recuperadas sem danos. O objetivo é obter fibras longas e em boas condições, o que seria difícil de alcançar por meio da pirólise ou de métodos

mecânicos, que geralmente degradam a integridade das fibras [Martinez *et al.*, 2023]. Este processo tem a vantagem de preservar as propriedades mecânicas das fibras, o que aumenta seu valor de reaproveitamento em novos produtos, principalmente em setores que demandam materiais de alta qualidade.

Entretanto, um dos principais desafios da solvólise é a necessidade de solventes caros e frequentemente tóxicos, que exigem medidas de segurança rigorosas para evitar a liberação de substâncias nocivas ao meio ambiente. Esse processo também demanda alta precisão na escolha dos solventes e nas condições de operação, como temperatura e tempo de exposição, para garantir uma dissolução eficiente sem comprometer a estrutura das fibras [Smith *et al.*, 2023]. Na Figura 8 é possível verificar como a turbina passa a ser após o processo de solvólise, a parte na cor amarelada é a fração de fibra de vidro recuperada do processo.



Figura 8. Solvólise de um pedaço maior de uma pá de turbina eólica. Adaptado de Mattsson [2020].

Estudos recentes têm mostrado que os métodos de solvólise que minimizam o uso de solventes perigosos e reduzem o consumo energético são promissores, mas a necessidade de desenvolvimento tecnológico e a redução de custos continuam sendo barreiras significativas. Atualmente, iniciativas na Europa e nos Estados Unidos, algumas das quais financiadas pela União Europeia, estão explorando alternativas para viabilizar essas tecnologias de maneira sustentável e acessível para o setor eólico [Li *et al.*, 2021].

4. Conclusões

A questão do descarte e reaproveitamento das pás de turbinas eólicas não é apenas uma preocupação ambiental, mas também social e econômica. Embora a energia eólica seja uma das formas de geração de energia mais limpas e sustentáveis, o manejo dos resíduos gerados ao final da vida útil das turbinas apresenta desafios consideráveis, principalmente devido à complexidade dos materiais utilizados, como fibras de vidro e resinas epóxi, que são difíceis de reciclar ou reaproveitar de maneira eficaz.

As alternativas de reciclagem e reuso, como a reciclagem mecânica e química, possuem um grande potencial, mas ainda enfrentam limitações tecnológicas e econômicas que precisam ser superadas para que se tornem viáveis em larga escala. O custo de implementação de processos avançados de reciclagem e a falta de infraestrutura adequada são obstáculos que exigem inovação e investimentos. Em contrapartida, o reuso direto das pás ou sua transformação em produtos de valor agregado, como materiais de construção ou móveis, representam soluções interessantes, que podem contribuir para a economia circular, mas exigem desenvolvimento em termos de aceitação no mercado e eficiência nos processos de fabricação.

A incineração, que pode ser uma alternativa para a redução do volume de resíduos, tem o mérito de gerar energia, mas gera emissões de gases poluentes e é uma solução com

impactos ambientais consideráveis, o que levanta questionamentos sobre sua compatibilidade com os objetivos de sustentabilidade da energia eólica.

Além disso, o contexto social e econômico também desempenha um papel crucial nesse processo. Comunidades locais podem ser beneficiadas com a criação de empregos relacionados à reciclagem e ao reaproveitamento de materiais. Um esforço colaborativo é fundamental para o desenvolvimento de soluções eficientes e economicamente viáveis. Isso incluiria o avanço das tecnologias de reciclagem, o incentivo a práticas de reaproveitamento criativo e sustentável, e a implementação de políticas públicas que priorizem a responsabilidade ambiental no ciclo de vida dos produtos. Dessa forma seria possível mitigar os impactos ambientais do descarte inadequado das pás de turbinas eólicas e garantir que a energia eólica continue a contribuir para um futuro sustentável.

5. Referências

- Bank, L. C., Plesha, M. e Al-Hassan, M. E. A. (2022) Design and feasibility assessment for bridge applications using decommissioned wind blades. *Materials and Structures*.
- Bkor. (2024) Seating at Willemsplein becomes marker for monument to sexual and gender diversity, <<https://www.bkor.nl/en/nieuws/zitplek-op-het-willemsplein-wordt-markering-voor-monument-seksuele-en-genderdiverseit>>.
- BladeBridge (2024) Midleton to Youghal Greenway Bridge. Acessado: 2024-12-03, <<https://www.bladebridge.ie/products/midleton-to-youghal-greenway-bridge>>.
- Blade Made. (2024) Blade Made - Innovative Reuse of Wind Turbine Blades, <<https://blade-made.com/>>. Acesso em: 22 nov. 2024
- Brasil. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília, DF: [s.n.], 2010. Seção 1, p. 1.
- Brown, L. e George, S. (2023) Durability and performance of recycled composite materials in paving and construction applications. *Journal of Circular Economy in Infrastructure*, v. 10, n. 2, p. 121-135.
- Bomgardner, M. M. e Scott, A. (2018) Recycling renewables. Can we close the loop on old batteries, wind turbines, and solar panels to keep valuable materials out of the trash?. <<https://cen.acs.org/energy/renewables/Recycling-renewables/96/i15>>. Acesso em: 25 out. 2024.
- Cheng, G.; Yang, S., Wang, X., Guo, Z. e Cai, M. (2023) Study on the recycling of waste wind turbine blades. *Journal of Renewable Energy*, Xi'an, v. 35, n. 4, p. 123-140.
- Chou, H. (2016) Chronic exposure to carbon monoxide and carbon dioxide and its cardiovascular effects. *Environmental Pollution*, v. 214, p. 703-710, <<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.04.043>>.
- Coenen, J., Veen, K. V. D. e Smits, R. (2023) Sustainable playground design: Repurposing wind turbine blades in urban spaces. *Journal of Circular Economy and Urban Design*.
- Currie, J. (2015) The economic costs of air pollution-related diseases. *Environmental Health Perspectives*, v. 123, n. 4, p. 403-410, <<https://doi.org/10.1289/ehp.1409245>>.
- Decomblades (2024) Recycling Wind Turbine Blades in Concrete Reinforcement. [S.l.].

- De Maas en Waler. (2024) Regenboogbank weer vernield, <<https://www.demaasenwaler.nl/algemeen/algemeen/48731/regenboogbank-weer-verniel>>.
- European Commission. (2017) Study on the environmental impacts of rotor blade waste. Relatório sobre os desafios do descarte de pás de aerogeradores, destacando o impacto ambiental de materiais compostos em aterros, <<https://ec.europa.eu>>.
- Finger, D., Oliveira, D. B. e Vardar, E. A. (2023) Repurposing decommissioned wind turbine blades into infrastructure elements: Design, testing, and evaluation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Gall, S., Thompson, R. (2015) The impact of debris on marine life. *Marine Pollution Bulletin*, v. 92, n. 1-2, p. 170-179. Revisão sobre os impactos da ingestão de plásticos e materiais não biodegradáveis por organismos marinhos e terrestres., <<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.12.041>>.
- Gamesa, S. (2024) Imagem do produto. Acesso em: 2024-12-04. <<https://www.facebook.com/SiemensGamesa/photos/pcb.3351248838311585/3351248684978267>>.
- García, R., Martínez, F. e López, (2023) A. Repurposing wind turbine blades for sustainable concrete applications. *Journal of Composite Materials and Recycling*, v. 22, n. 1, p. 123-134.
- Gewec - Global Wind Energy Council. (2022) Sustainable waste management in wind energy: Challenges and opportunities. Relatório sobre sustentabilidade e gestão de resíduos na indústria de energia eólica. Disponível em: <<https://gwec.net>>.
- Global Wind Energy Council (2024). Global Wind Report 2024. 2024. <<https://gwec.net/global-wind-report-2024/>>. Acesso em: 21 ago de 2024.
- Gómez -Martinez, J. (2021). Impact of industrial waste on biodiversity in natural ecosystems. *Journal of Environmental Science*, v. 34, n. 4, p. 233-245. Estudo sobre resíduos industriais e seus efeitos na biodiversidade e nos solos.
- González, A., Ramos, R. e Martínez, S. (2024) Urban applications of decommissioned wind blades: Assessing the benefits and challenges. *Journal of Urban Sustainability*. <<https://www.journals.com/urban-sustainability>>.
- Gossling, S. (2012) Ecotourism and the global environmental crisis: A review of the impacts of tourism on natural areas. *Journal of Sustainable Tourism*, v. 20, n. 1, p. 1-23. <<https://doi.org/10.1080/09669582.2011.615030>>.
- Harrison, T., Franklin, M. e Lewis, D. (2024) Recreational use of recycled wind blades: A case study from rotterdam. *European Journal of Sustainable Infrastructure*.
- Inegi - Instituto de Engenharia de Lisboa. (2024) Energia Eólica: O desafio da reciclagem das pás dos aerogeradores. <<https://www.inegi.pt/pt/noticias/energia-eolica-o-desafio-da-reciclagem-das-pas-dos-aerogeradores>>. Acesso em: 28 out. 2024.
- Jones, P., Brown, T. e Energy, G. R. (2023) Innovative use of wind turbine blade fibers in concrete applications. *Sustainable Infrastructure Review*, v. 12, n. 4, p. 211-225.

- Koliou, E. (2020) Environmental risks of composite material waste: A case study of wind turbine blades. *Materials Today*, v. 25, n. 5, p. 457-469. Estudo sobre os riscos ambientais do descarte de materiais compostos, incluindo contaminação do solo e da água.
- Larsen, A., Thomsen, J. e Poulsen, E. (2023) Repurposing wind turbine blades for urban furniture and shelters: Case studies from Denmark. *Journal of Sustainable Design*.
- Larsen, K. (2009) Recycling Wind. 20-23, 25 p. Acesso em: December 4, 2024. <[https://doi.org/10.1016/S0034-3617\(09\)70043-8](https://doi.org/10.1016/S0034-3617(09)70043-8)>.
- Lee, J., Smith, H. e Martinez, R. (2024) Concrete reinforcement with recycled wind turbine blade fibers: A circular economy approach. *International Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies*, v. 15, n. 3, p. 200-215.
- Leitão, R. (2019) Impact of plastic waste on soil and its potential to inhibit plant growth. *Environmental Science Technology*, v. 53, n. 12, p. 6942-6949.
- Li, H., Zhao, X. e Guo, Q. (2021) End-of-life management of wind turbine blades: Options and environmental impacts. *Journal of Cleaner Production*, v. 279, p. 123-134.
- Martínez, J., Toro, P. e Riveira, R. (2023) Waste recovery and reuse of wind turbine blades in civil engineering. *Journal of Environmental Engineering and Technology*, v. 8, n. 1, p. 72-80.
- Mascio, D. D. (2015). The economic impacts of environmental degradation in ecotourism destinations. *Ecological Economics*, v. 112, p. 163-173. <<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2015.02.001>>.
- Mattsson, C. (2020) Chemical recycling of end-of-life wind turbine blades by solvolysis/htl. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 942, p. 012013. Acesso em: Dezembro, 2024.
- Murray, C. (2017) Global burden of disease attributable to air pollution in 2015: A systematic analysis for the global burden of disease study. *The Lancet*, v. 388, n. 10053, p. 749-758. <[https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(16\)30506-2](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(16)30506-2)>
- Noctula (2023) Desafios da reciclagem de pás eólicas. <<https://noctula.pt/desafios-da-reciclagem-de-pas-de-aerogeradores-no-setor-eolico>>. Acesso em: 28 de out. 2024.
- Nolan C. (2023) How wind turbine blades can become playgrounds. <<https://www.irishtimes.com/environment/2023/10/11/how-wind-turbineblades-can-become-playgrounds>>. Acesso em: 28 out. 2024.
- Organization, W. H. (2018) Health effects of black carbon. WHO Regional Office for Europe. <<https://www.euro.who.int>>.
- Smith, G., Lee, H. e Kim, S. (2023) Green solvolysis techniques for sustainable composite recycling. *Sustainable Materials and Technologies*, v. 16, p. 456-468.
- Spini F. e Bettini, P. (2023) End-of-life wind turbine blades: Review on recycling strategies. *Journal of Sustainable Energy*, Milano, v. 12, n. 3, p. 456-478.



União Europeia. Diretiva 2008/98/EC do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de novembro de 2008. Relativa aos resíduos e que altera as Diretivas 2004/12/EC e 2005/20/EC. Luxemburgo: [s.n.].

Vetter, S. (2019) Long-term effects of carbon monoxide exposure on respiratory and cardiovascular health. *Journal of Environmental Health*, v. 81, n. 10, p. 18-23, 2019. <<https://doi.org/10.1080/00207233.2019.1665864>>

Wilcox, C., Sebili E. V. e Hardesty, B. D (2016). Threat of plastic pollution to seabirds is global, pervasive, and increasing. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 113, n. 38, p. 10257-10261.

Zhang X. e Li, X. X. L. Z. L. (2021) Factors influencing the operational life of wind turbines: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 135, p. 110091.