

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CAMPUS DE ENGENHARIAS E CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIA

YASMIM MELLO PAES

**REUTILIZAÇÃO ADAPTATIVA DE PÁS EÓLICAS: REVISÃO DA LITERATURA
SOBRE APLICAÇÕES E DESAFIOS TÉCNICOS**

Rio Largo - AL
2026

YASMIM MELLO PAES

**REUTILIZAÇÃO ADAPTATIVA DE PÁS EÓLICAS: REVISÃO DA LITERATURA
SOBRE APLICAÇÕES E DESAFIOS TÉCNICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia de Energia da
Universidade Federal de Alagoas, como
requisito parcial à obtenção do título de
Bacharel em Engenharia de Energia.

Orientador: Profa. Dra. Jerusa Goes Aragão
Santana.

Rio Largo - AL

2026

**Catálogo na Fonte Universidade
Federal de Alagoas
Biblioteca Campus de Engenharias Ciências Agrárias
Bibliotecário Responsável: Stefano João dos Santos**

P586r Paes, Yasmim Mello

Reutilização adaptativa de pás eólicas: revisão da literatura sobre aplicações e desafios técnicos. – Rio Largo - Al, 2026.

90 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de energia)
Universidade Federal de Alagoas, Campus Ceca – Rio largo, 2026.

Orientador: Profa. Dra. Jerusa Goes Aragão Santana

1 . energia eólica; pás eólicas ; sustentabilidade

CDU: 631.531

Folha de Aprovação

YASMIM MELLO PAES

REUTILIZAÇÃO ADAPTATIVA DE PÁS EÓLICAS: REVISÃO DA LITERATURA SOBRE APLICAÇÕES E DESAFIOS TÉCNICOS

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à banca examinadora do curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal de Alagoas e aprovada em 26 de Maio de 2026.



Documento assinado digitalmente
JERUSA GOES ARAGAO SANTANA
Data: 01/06/2026 14:12:32-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

(Orientador(a) – Profa. Dra Jerusa Goes Aragão Santana, CECA/UFAL

Banca examinadora:



Documento assinado digitalmente
ISABELA CRISTINA DA SILVA PASSOS TIBURCIO
Data: 28/05/2026 14:09:54-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Isabela Cristina da Silva Passos Tiburcio, CECA/UFAL



Documento assinado digitalmente
DJAYRALVES BISPO JUNIOR
Data: 28/05/2026 16:38:16-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Djayr Alves Bispo Junior CECA/UFAL

Dedico aos meus pais, por terem me incentivado a cursar Engenharia de Energia, à minha irmã e primo por terem estado presentes durante a minha vida na universidade e ao meu namorado por todo companheirismo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus, pois sem Ele nada disso seria possível.

Agradeço aos meus pais por todo esforço que fizeram para eu chegar onde estou, por tudo que fizeram por mim e minha irmã, sem nunca nos deixar faltar nada, e por me ensinarem a importância do estudo.

Agradeço ao meu melhor amigo e namorado por estar presente em todos os momentos e sempre me motivar a continuar.

Agradeço à minha irmã e ao meu primo por sempre me ajudarem quando precisei.

Agradeço aos meus colegas de turma por terem participado dessa trajetória comigo.

Agradeço em especial a Prof. Dr. Jerusa Goes Aragão Santana por ter me orientado durante esse trabalho.

Agradeço ao Campus de Engenharias e Ciências Agrárias (CECA) e todo o corpo docente do curso de Engenharia de Energia, por todo conhecimento que me foi passado e compartilhado.

RESUMO

O descomissionamento de pás eólicas ao final de sua vida útil configura um desafio ambiental crescente, especialmente diante da expansão da energia eólica no Brasil e no mundo. Essas estruturas são compostas por materiais compósitos como fibras de vidro e resinas poliméricas e apresentam elevada resistência mecânica e baixa biodegradabilidade, o que dificulta sua reciclagem e favorece práticas como disposição em aterros ou coprocessamento. Nesse contexto, a busca por alternativas de descarte mais sustentáveis torna-se necessária, destacando-se o reuso adaptativo como estratégia alinhada aos princípios da economia circular. Este estudo foi desenvolvido com o objetivo de avaliar o potencial de reutilização de pás eólicas como alternativa ao descarte convencional. A metodologia envolveu a coleta e análise de dados em literatura técnica e científica, permitindo identificar tecnologias de reciclagem, critérios de viabilidade para o reuso e experiências já aplicadas em diferentes países. Os resultados indicam que o reuso adaptativo tem sido empregado principalmente em aplicações de menor complexidade estrutural, como mobiliário urbano, passarelas, abrigos e elementos arquitetônicos, contribuindo para a extensão do ciclo de vida dos materiais e a redução dos impactos ambientais. Observa-se, entretanto, que no Brasil ainda há limitações relacionadas à ausência de regulamentações específicas, à logística de transporte e à necessidade de avaliações estruturais mais detalhadas. Conclui-se que o reuso adaptativo representa uma alternativa promissora para a gestão sustentável de resíduos provenientes de pás eólicas, sendo recomendada a ampliação de estudos e o desenvolvimento de políticas públicas que incentivem sua aplicação em escala nacional.

Palavras-chave: energia eólica; pás eólicas; reuso adaptativo; sustentabilidade; economia circular.

ABSTRACT

The decommissioning of wind turbine blades at the end of their service life represents a growing environmental challenge, especially in view of the expansion of wind energy in Brazil and worldwide. These structures are made of composite materials such as glass fibers and polymeric resins, presenting high mechanical strength and low biodegradability, which hinders recycling processes and favors practices such as landfilling or co-processing. In this context, the search for more sustainable disposal alternatives becomes necessary, with adaptive reuse standing out as a strategy aligned with the principles of the circular economy. This study was developed with the objective of evaluating the potential for reusing wind turbine blades as an alternative to conventional disposal. The methodology involved the collection and analysis of data from technical and scientific literature, enabling the identification of recycling technologies, feasibility criteria for reuse, and experiences already implemented in different countries. The results indicate that adaptive reuse has been mainly applied in lower structural complexity uses, such as urban furniture, footbridges, shelters, and architectural elements, contributing to the extension of the material life cycle and the reduction of environmental impacts. However, in Brazil there are still limitations related to the absence of specific regulations, transportation logistics, and the need for more detailed structural assessments. It is concluded that adaptive reuse represents a promising alternative for the sustainable management of waste from wind turbine blades, and the expansion of studies as well as the development of public policies that encourage its application on a national scale are recommended.

Keywords: wind energy; wind turbine blades; adaptive reuse; sustainability; circular economy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Principais componentes de um aerogerador.....	23
Figura 2	- Principais componentes na estrutura da pá.....	26
Figura 3	- Circularidade para pás eólicas.....	37
Figura 4	- Representação de um <i>blade</i> pole em uma linha de transmissão de 230 kV.....	58
Figura 5	- Pás eólicas modelo Nordex N29.....	59
Figura 6	- Ponte <i>Midleton-Youghal Greenway</i> (<i>Cork</i> , Irlanda).....	60
Figura 7	- Instalação da ponte na Polónia.....	61
Figura 8	- Ponte na Polónia.....	62
Figura 9	- Visão frontal do Abrigo <i>Achil</i> , Irlanda.....	63
Figura 10	- Visão superior do Abrigo <i>Achil</i> , Irlanda.....	63
Figura 11	- Abrigo de <i>Rathfarnham</i> em Dublin, Irlanda.....	64
Figura 12	- Visão frontal de um dos dois abrigos.....	65
Figura 13	- Dois abrigos de ônibus na praça.....	65
Figura 14	- Parquinho <i>Wikado</i> , Holanda.....	66
Figura 15	- Vista interior do parquinho.....	67
Figura 16	- Conjuntos de bancos em Roterdã.....	68
Figura 17	- Conjuntos de bancos em Roterdã (nova pintura).....	68
Figura 18	- Bancos da <i>Canvus</i> em <i>Cleveland</i> , Estados Unidos.....	69
Figura 19	- Banco no parque <i>Every Child's Playground</i> , em Avon, Ohio.....	70
Figura 20	- Arte feita com pás eólicas.....	70
Figura 21	- Píer feito com pá eólica.....	71
Figura 22	- Banco de praça feito com pá eólica.....	71
Figura 23	- Casas elevadas em seções da raiz da pá.....	74
Figura 24	- Porta feita com a alma da pá.....	74
Figura 25	- Cobertura de janela feita com a alma da pá.....	75
Figura 26	- Estruturas de telhado com pás.....	75

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	- Evolução da capacidade instalada global.....	19
Gráfico 2	- Evolução da capacidade instalada no Brasil.....	21

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Capacidade instalada dos principais países em energia eólica (2024).....	20
Tabela 2	- Distribuição dos parques eólicos por estado no Brasil.....	22
Tabela 3	- Principais instrumentos legais estaduais relacionados à gestão de resíduos sólidos.....	43
Tabela 4	- Métodos de reciclagem de compósitos termorrígidos e suas características...	52
Tabela 5	- Tabela comparativa entre construção tradicional e reuso de pás eólicas para produção de um poste de transmissão.....	57
Tabela 6	- Comparação das principais alternativas de reaproveitamento de pás eólicas.	76

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABBEEólica	ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AWEA	<i>American Wind Energy Association</i>
CanWEA	<i>Canadian Wind Energy Association</i>
CBEE	Centro Brasileiro de Energia Eólica
CELPE	Companhia Energética de Pernambuco
CH ₄	Metano
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CRESESB	CENTRO DE REFERÊNCIA DAS ENERGIAS SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO
EPE	EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA
GEEs	Gases do Efeito Estufa
GWEC	GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL
IEC	International Electrotechnical Commission
kN	Quilonewton
LCC	Análise de Custo do Ciclo de Vida
LER	Leilão de Energia de Reserva
NDT	Inspeção não destrutiva
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólido
PRFV	Polímero Reforçado com Fibra de Vidro
PROEÓLICA	Programa Emergencial de Energia Eólica
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
SIN	Sistema Interligado Nacional
WFD	<i>Waste Framework Directive</i>
WWEA	<i>World Wind Energy Association</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	Justificativa.....	15
1.2	Objetivos.....	16
1.2.1	Geral.....	16
1.2.2	Específicos.....	17
1.3	Organização do trabalho.....	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	18
2.1	Energia Eólica.....	18
2.1.1	Panorama da energia eólica no mundo.....	19
2.1.2	Panorama da energia eólica no Brasil.....	20
2.2	Aerogeradores.....	22
2.2.1	Definição e principais componentes.....	22
2.2.1.1	Torre.....	23
2.2.1.2	Nacele.....	23
2.2.1.3	Caixa de engrenagens.....	24
2.2.1.4	Rotor.....	24
2.2.1.5	Gerador.....	24
2.3	Pás eólicas.....	24
2.3.1	Composição das pás.....	25
2.3.2	Estrutura das pás.....	25
2.3.3	Processo de fabricação.....	27
2.3.4	Vida útil das pás.....	29
2.3.5	Ciclo de vida das pás.....	30
2.3.6	Descarte de pás eólicas.....	31
2.3.6.1	Panorama no Brasil e no mundo.....	32
2.3.6.2	Impactos ambientais gerados.....	32
2.3.6.2.1	Poluição do solo e da água.....	32
2.3.6.2.2	Ameaça à fauna e flora.....	33
2.3.6.2.3	Emissão de carbono.....	34
2.4	Sustentabilidade e economia circular.....	34
2.4.1	Desenvolvimento sustentável.....	35
2.4.2	Economia circular.....	36

2.4.3	Hierarquia da gestão de resíduos.....	37
2.4.4	Os 7 Rs da sustentabilidade.....	38
2.5	Gestão de resíduos.....	40
2.5.1	Normas e diretrizes internacionais.....	40
2.5.2	Legislação brasileira.....	42
2.5.3	Classificação das pás como resíduo.....	43
2.5.4	Descomissionamento de parques eólicos.....	44
2.6	Reaproveitamento de pás eólicas.....	45
2.6.1	Reuso adaptativo.....	45
2.6.2	Formas de reutilização existentes.....	46
2.6.3	Benefícios ambientais.....	48
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	49
3.1	Coleta de dados.....	49
3.2	Análise dos dados.....	49
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	51
4.1	Tecnologias empregadas para reciclagem de pás eólicas.....	51
4.2	Critérios para viabilidade do reuso adaptativo de pás eólicas.....	53
4.2.1	Avaliação estrutural.....	53
4.2.2	Avaliação da logística de transporte.....	54
4.2.3	Avaliação da viabilidade ambiental e econômica do reuso de pás eólicas (ISO14040 ACV).....	55
4.3	Iniciativas internacionais de reutilização de pás eólicas.....	58
4.3.1	Construção de ponte para pedestres.....	59
4.3.2	Mobilidade urbana e abrigos.....	62
4.3.3	Abrigos para passageiros.....	64
4.3.4	Mobiliário urbano.....	65
4.4	Iniciativas nacionais de reutilização de pás eólicas.....	71
4.5	Desafios e limitações do reuso adaptativo de pás eólicas.....	72
4.6	Futuras aplicações de reuso adaptativo.....	73
4.7	Análise crítica e perspectivas para o contexto brasileiro.....	76
5	CONCLUSÃO.....	78
	REFERÊNCIAS.....	80
	ANEXO A.....	89

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por fontes de energia limpa e a necessidade de mitigação das mudanças climáticas têm impulsionado a expansão das energias renováveis em todo o mundo. Nesse cenário, a energia eólica se destaca como uma das alternativas sustentáveis para a geração de eletricidade, apresentando baixos índices de emissão de gases de efeito estufa (GEEs) e elevada competitividade econômica (*Global Wind Energy Council - GWEC*, 2026). No Brasil, essa fonte tem apresentado crescimento significativo nas últimas décadas, consolidando-se como um dos pilares da matriz elétrica nacional (*ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA - ABBEEólica*, 2026).

Apesar dos benefícios associados à geração de energia eólica, a expansão dessa tecnologia também traz desafios ambientais relevantes, especialmente relacionados ao fim da vida útil dos aerogeradores. Dentre os componentes que compõem essas estruturas, as pás eólicas representam um dos maiores problemas em termos de destinação final, devido às suas grandes dimensões e à sua composição predominantemente baseada em materiais compósitos, como fibras de vidro e resinas poliméricas, que apresentam elevada resistência mecânica e baixa biodegradabilidade.

Tradicionalmente, a destinação das pás eólica tem ocorrido por meio de disposição em aterros ou processos de coprocessamento (LIU; BARLOW, 2017), soluções que, embora viáveis do ponto de vista operacional, não são consideradas ideais sob a perspectiva de eficiência e ambientalmente adequadas, capazes de reduzir os impactos associados ao descarte da sustentabilidade. Dessa forma, surge a necessidade de desenvolvimento de alternativas mais desses materiais.

Dentre as estratégias possíveis, destaca-se o reuso adaptativo, que consiste na reutilização de componentes em novas aplicações, preservando, sempre que possível, suas propriedades estruturais originais (BANK *et. al*, 2018). Essa abordagem está alinhada aos princípios da economia circular, que visam a maximização do uso de recursos e a minimização da geração de resíduos.

1.1 Justificativa

O crescimento acelerado da energia eólica nas últimas décadas tem contribuído significativamente para a diversificação da matriz energética global e para a redução das emissões de GEEs. No Brasil, a expansão dessa fonte, também tem sido relevante, com

destaque para a região Nordeste, que concentra grande parte da capacidade instalada nacional. Esse avanço, embora positivo do ponto de vista energético e ambiental, traz consigo novos desafios relacionados ao ciclo de vida dos equipamentos e à gestão de resíduos gerados pelo setor.

Entre os principais componentes dos aerogeradores, as pás eólicas se destacam pela aerodinâmica complexa e pela diversidade de materiais utilizado na sua fabricação. Diferente de metais como aço e cobre, amplamente recicláveis, os materiais compósitos ainda enfrentam limitações tecnológicas e econômicas para a reciclagem que restringem sua re inserção em processos produtivos convencionais.

Com o fim do ciclo de vida dos primeiros parques eólicos instalados em larga escala, inclusive no Brasil, projeta-se um aumento expressivo no volume de pás descartadas nas próximas décadas. De acordo com Liu e Barlow (2017) estima-se que milhões de toneladas de resíduos provenientes dessas estruturas poderão ser geradas até meados do século, configurando um problema ambiental emergente. Diante do exposto, é essencial a busca por soluções sustentáveis para a gestão dessas estruturas.

A reutilização de pás eólicas, surge como uma alternativa alinhada aos princípios da economia circular, que propõe a extensão do ciclo de vida dos materiais e a redução da geração de resíduos. Em vez de tratar essas estruturas como rejeitos, o reuso adaptativo permite sua reintegração em novas aplicações, agregando valor e minimizando impactos ambientais. O reaproveitamento de pás em aplicações arquitetônicas e estruturais, como passarelas, coberturas e mobiliário urbano já é uma realidade em países como, Irlanda, Holanda e Polônia (BANK *et al.*, 2018). No entanto, no contexto brasileiro, ainda há escassez de estudos sistematizados sobre o tema (OLIVEIRA, 2024). Dessa forma, o desenvolvimento desta pesquisa justifica-se pela relevância ambiental, tecnológica e científica do tema, contribuindo para a discussão sobre sustentabilidade no setor energético e para a ampliação do conhecimento acerca de alternativas de destinação para resíduos de difícil reciclagem.

1.2 Objetivos

1.2.1 Geral

Analisar o potencial de reutilização de pás eólicas como alternativa sustentável ao descarte convencional.

1.2.2 Específicos

- Analisar, com base na literatura, as possibilidades de reaproveitamento das pás eólicas e seus benefícios ambientais;
- Discutir o reuso das pás sob a perspectiva da sustentabilidade e da economia circular, destacando sua relevância como solução para a destinação final desses materiais;
- Analisar experiências práticas já desenvolvidas em contextos internacionais.

1.3 Organização do trabalho

Para uma melhor compreensão dos assuntos, este trabalho foi organizado em seções conforme descrito abaixo:

Na presente seção é apresentada uma introdução da temática a ser desenvolvida, bem como a justificativa deste trabalho e os objetivos que nortearam a sua realização;

Na seção 2 são abordados conceitos básicos e informações relevantes sobre a energia eólica, os aerogeradores e as pás eólicas, incluindo sua composição, ciclo de vida e impactos ambientais, além de conceitos de sustentabilidade, economia circular e gestão de resíduos, com ênfase no reaproveitamento de pás eólicas;

A seção 3 descreve a metodologia adotada para o desenvolvimento do trabalho, incluindo a coleta de dados e a análise bibliográfica realizada para a avaliação do potencial de reutilização das pás eólicas;

Na seção 4 é apresentada a análise das tecnologias de reciclagem, os critérios de viabilidade do reuso adaptativo, bem como a apresentação de iniciativas internacionais e nacionais, desafios, limitações e possíveis aplicações futuras para o reaproveitamento das pás eólicas. Finalmente, a seção 5 apresenta as considerações finais do trabalho, destacando os principais resultados obtidos, as contribuições da pesquisa e recomendações para estudos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Energia Eólica

Os primeiros registros históricos da utilização da energia eólica remontam a mais de três mil anos, quando o vento passou a ser empregado como fonte natural de energia em atividades agrícolas, como a moagem de grãos e o bombeamento de água (MARTINS; GUARNIERI; PEREIRA, 2008). Nesse período, surgiram os primeiros moinhos primitivos de eixo vertical, desenvolvidos para substituir a força humana e animal em tarefas que exigiam grande esforço físico. Registros históricos indicam que esses dispositivos foram utilizados por volta de 200 a.C. na Pérsia, difundindo-se posteriormente para outras regiões do mundo e sendo empregados durante vários séculos (DUTRA, 2008). Com o passar do tempo, houve evolução tecnológica dessas estruturas, incluindo o desenvolvimento de moinhos de eixo horizontal, amplamente utilizados na Europa a partir da Idade Média, contribuindo para a mecanização de atividades agrícolas e para o avanço econômico de diversas sociedades.

No final do século XIX, a energia eólica passou por um importante marco tecnológico com a adaptação dos tradicionais cata-ventos para a geração de eletricidade. Um dos principais registros desse período foi o sistema desenvolvido por Charles Francis Brush, em 1888, na cidade de Cleveland, nos Estados Unidos, considerado um dos primeiros projetos de aerogeradores destinados à produção de energia elétrica em escala experimental (BURTON *et. al.*, 2011). Esse equipamento utilizava múltiplas pás e era conectado a um sistema de armazenamento por baterias, permitindo o suprimento energético de sua residência e laboratório.

Nas primeiras décadas do século XX, o interesse pela conversão da energia do vento em eletricidade cresceu gradativamente, sobretudo em regiões rurais e comunidades isoladas, onde o acesso à rede elétrica ainda era inexistente. Assim, diversos países passaram a investir no desenvolvimento de turbinas eólicas de pequeno porte, voltadas ao atendimento de demandas locais, como iluminação, bombeamento de água e pequenas cargas elétricas. Entretanto, nesse período, os sistemas funcionavam de maneira independente, operando de forma autônoma e desconectada das redes públicas de distribuição, o que limitava sua expansão em larga escala.

A geração de eletricidade por meio de parques eólicos começou a ganhar forma no final do século XX, com os primeiros projetos voltados à produção comercial de energia elétrica a partir do vento. O primeiro parque eólico foi instalado em 1980 nos Estados Unidos,

composto por 20 turbinas de 30 quilowatt (kW) cada, conectadas à rede elétrica, marcando o início dos grandes projetos de geração eólica conectados à rede elétrica (NATIONAL GRID, 2024). A partir da década de 1990, a tecnologia se expandiu rapidamente, com países europeus como Dinamarca, Alemanha e Reino Unido construindo grandes parques terrestres e, depois, *offshore*, como o parque de *Vindeby* na Dinamarca, o primeiro marítimo do mundo (1991).

Atualmente, a energia eólica é uma das principais fontes renováveis em expansão no mundo, caracterizada pelo uso de aerogeradores de grande porte, instalados tanto em parques eólicos terrestres (*onshore*) quanto marítimos (*offshore*). Seu crescimento está diretamente associado às políticas de mitigação das mudanças climáticas, à redução das emissões de gases de efeito estufa e ao fortalecimento da transição energética global.

2.1.1 Panorama da energia eólica no mundo

De acordo com o relatório da *World Wind Energy Association* (WWEA, 2025), a capacidade instalada mundial de energia eólica ultrapassou 1.173 GW em 2024. No mesmo ano, foram adicionados aproximadamente 121 GW de nova capacidade, evidenciando a consolidação da fonte em escala global. O Gráfico 1 apresenta a evolução histórica da capacidade instalada mundial de energia eólica, demonstrando o crescimento expressivo observado nas últimas décadas. A China manteve posição dominante no setor, sendo responsável por cerca de 72% das novas instalações no ano, enquanto países como Brasil, Estados Unidos e Alemanha figuraram entre os principais mercados em expansão.

Gráfico 1 - Evolução da capacidade instalada global.



Fonte: Adaptado de WWEA (2025).

A Tabela 1 apresenta a capacidade instalada dos países líderes no setor eólico mundial. Além destes países, outros 30 já apresentam participação da energia eólica superior à média global na geração elétrica, e em alguns casos a fonte responde por mais de 30% da eletricidade consumida, demonstrando sua maturidade tecnológica e crescente relevância estratégica. Esse avanço reflete não apenas políticas de descarbonização, mas também fatores como segurança energética, redução da dependência de combustíveis fósseis e queda nos custos das tecnologias associadas.

Tabela 1 - Capacidade instalada dos principais países em energia eólica (2024).

País	Capacidade instalada em 2024 (GW)	Total (MW)
China	86.892	561.492
Estados Unidos	4.154	154.609
Alemanha	3.208	72.683
Índia	3.427	48.163
Brasil	5.420	34.000
Reino Unido	2.324	32.360
Espanha	1.210	32.007
França	909	24.383
Canadá	1.449	18.435
Suécia	1.015	17.266

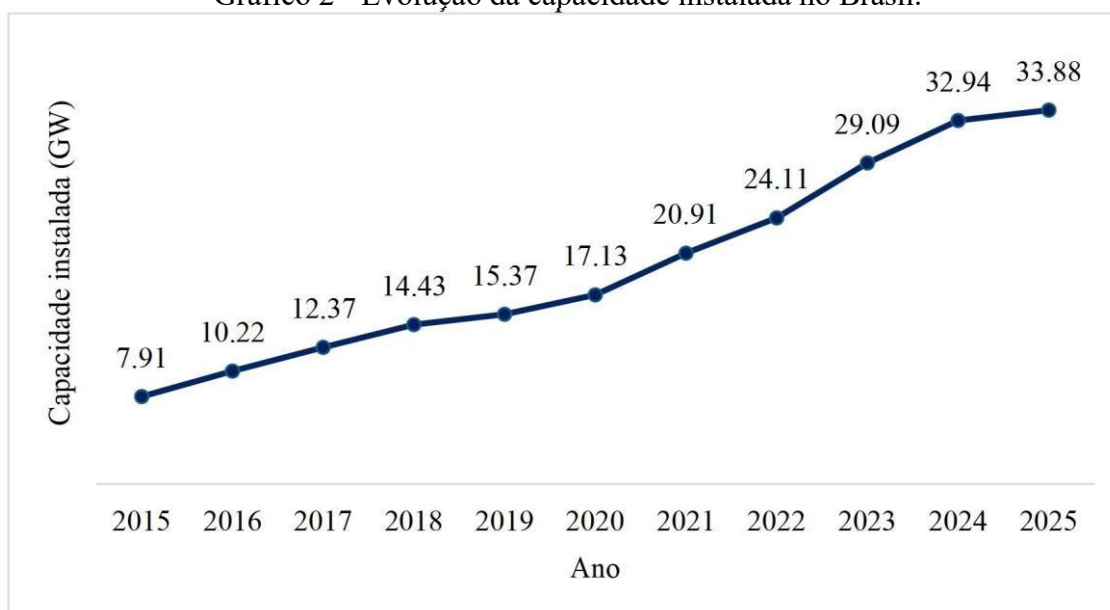
Fonte: adaptado de WWEA (2025).

2.1.2 Panorama da energia eólica no Brasil

A energia eólica no Brasil teve início em 1992, com a entrada em operação do primeiro aerogerador no arquipélago de Fernando de Noronha, fruto de uma parceria entre o Centro Brasileiro de Energia Eólica (CBEE) e a Companhia Energética de Pernambuco (CELPE), com apoio do instituto dinamarquês *Folkecenter* (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA - ABBEEólica, 2026). Nas décadas seguintes, o avanço da fonte foi limitado, principalmente devido ao alto custo da tecnologia e à ausência de políticas públicas de incentivo. Durante a crise energética de 2001, foi criado o Programa Emergencial de Energia Eólica (PROEÓLICA), posteriormente substituído pelo Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), que impulsionou a inserção da energia eólica na matriz elétrica e fomentou a instalação da indústria nacional de componentes e aerogeradores (ABBEEólica, 2025).

A consolidação da fonte eólica ocorreu a partir de 2009, com a realização do primeiro leilão exclusivo, o Leilão de Energia de Reserva (LER), que contratou cerca de 1,8 GW. Desde então, a energia eólica apresentou crescimento contínuo, deixando de ser considerada uma fonte alternativa e assumindo papel estratégico na matriz elétrica brasileira. O Brasil, consolida-se, atualmente, entre os principais mercados globais de energia eólica, chegando a ser o 5º país do mundo em potência instalada (WWEA, 2025). O Gráfico 2 mostra a evolução da capacidade instalada no Brasil.

Gráfico 2 - Evolução da capacidade instalada no Brasil.



Fonte: Adaptado de ABEEólica (2025).

No Brasil, existem 1.103 parques eólicos instalados, que correspondem a aproximadamente 33,7 GW de potência instalada, distribuídos por diversos estados do país, com destaque para Bahia, Piauí e Rio Grande do Norte, que concentram a maior parcela dessa capacidade, conforme apresentado na Tabela 2 (ABEEólica, 2025). Essa predominância da região Nordeste está associada às condições favoráveis de vento, caracterizadas por elevada constância e intensidade ao longo do ano, com baixa variabilidade de velocidade e direção. A maior parte dos empreendimentos é composta por parques eólicos terrestres (*onshore*), integrados ao Sistema Interligado Nacional (SIN).

Tabela 2 - Distribuição dos parques eólicos por estado no Brasil.

Estado	Número de parques eólicos	Potência total (GW)
Bahia	377	11,83
Rio Grande do Norte	321	10,68
Piauí	126	4,42
Ceará	101	2,68
Rio Grande do Sul	83	2,14
Paraíba	62	1,68
Pernambuco	45	1,26
Maranhão	15	0,43

Fonte: Adaptado de ABEEólica (2025).

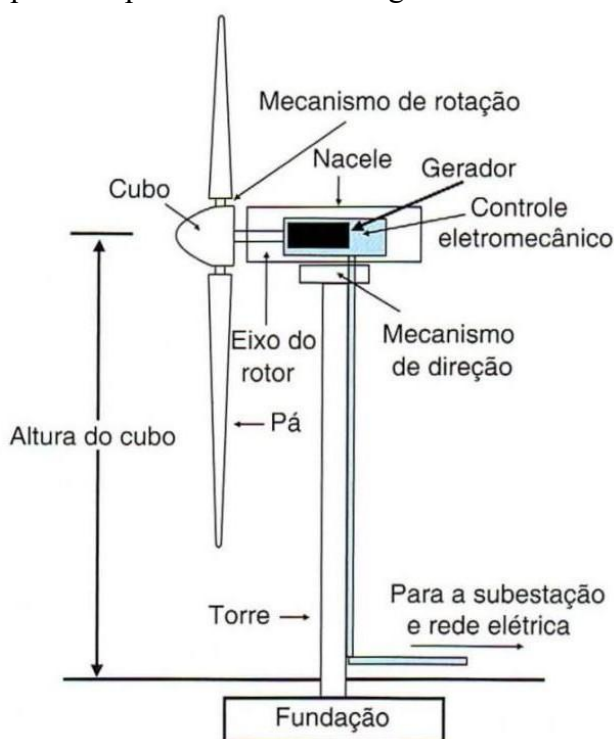
2.2 Aerogeradores

2.2.1 Definição e principais componentes

De acordo com Pinto (2013), aerogerador é o equipamento responsável por gerar eletricidade a partir da energia do vento. A energia cinética presente no ar em movimento aciona a turbina, gerando energia mecânica, que é então transmitida ao gerador, onde ocorre sua conversão em energia elétrica. Segundo o autor, além da turbina, outros componentes importantes em aerogeradores de eixo horizontal são a torre, nacelle, caixa de engrenagens, cubo, gerador e pás, como pode ser visto na Figura 1.

Embora importantes para o perfeito funcionamento do equipamento, mas considerando que este trabalho tem como foco as pás eólicas, os demais componentes do aerogerador serão apresentados de forma sucinta.

Figura 1 - Principais componentes de um aerogerador de eixo horizontal.



Fonte: Pinto (2013).

2.2.1.1 Torre

É o componente responsável por sustentar o rotor e a nacelle na altura ideal para a operação da turbina eólica. Trata-se de um elemento estrutural de grande porte, com participação significativa no custo inicial do sistema. Geralmente, as torres são construídas em metal (nos formatos treliçado ou tubular) ou em concreto (CENTRO DE REFERÊNCIA DAS ENERGIAS SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO - CRESESB, 2012).

2.2.1.2 Nacelle

Também conhecida como gôndola, a nacelle é a estrutura localizada na parte superior da torre do aerogerador que abriga os componentes internos do sistema, como o sistema de transmissão e o gerador elétrico. Sua principal função é proteger esses elementos das condições climáticas externas, garantindo o funcionamento adequado do equipamento (IBERDROLA, 2026).

2.2.1.3 Caixa de engrenagens

A caixa de engrenagens, instalada no interior da nacele, tem a função de ajustar a baixa rotação das pás para a velocidade adequada de operação do gerador. Embora muitos fabricantes utilizem esse sistema, algumas turbinas modernas dispensam a caixa de transmissão. Aerogeradores que contam com esse conjunto multiplicador, formado por engrenagens e acoplamentos, são considerados mais complexos em termos de projeto (PINTO, 2013).

2.2.1.4 Rotor

O rotor é o conjunto formado pelas pás e pelo cubo (responsável por conectar as pás). Esse conjunto tem a função de captar a energia cinética dos ventos e convertê-la em energia mecânica por meio do movimento de rotação (WINDBOX, 2020; PINTO, 2013).

2.2.1.5 Gerador

É o componente responsável por transformar a energia mecânica na energia elétrica (ENERGÊS CONSULTORIA E TREINAMENTO LTDA, 2020). Devido à diferença entre a baixa rotação do rotor e a alta rotação exigida pelo gerador, é comum o uso de uma caixa multiplicadora de velocidade; entretanto, existem modelos de acoplamento direto, que utilizam geradores com maior número de polos e rotação mais baixa (PINTO, 2013).

2.3 Pás eólicas

As pás eólicas são componentes aerodinâmicos responsáveis por interagir diretamente com o vento, convertendo parte de sua energia cinética em energia mecânica de rotação. Seu desempenho influencia diretamente a eficiência do aerogerador, uma vez que o projeto das pás deve equilibrar diferentes requisitos, como maximizar a produção de energia, suportar cargas extremas e de fadiga e limitar deformações estruturais que possam comprometer a segurança do equipamento. Além disso, busca-se evitar fenômenos de ressonância e reduzir o peso e os custos de fabricação (BURTON *et al.*, 2011).

2.3.1 Composição das pás

De acordo com Pires (2010) a composição das pás eólicas é predominantemente baseada em materiais compósitos, sendo o polímero reforçado com fibra de vidro (PRFV) o mais utilizado na indústria de aerogeradores, devido à sua combinação de elevada resistência mecânica, baixo peso e custo relativamente reduzido. Em aplicações mais recentes, também podem ser incorporados outros materiais, como fibras de carbono e núcleos estruturais de madeira balsa ou espumas poliméricas, visando melhorar o desempenho estrutural e reduzir o peso das pás.

Os materiais compósitos são constituídos pela combinação de dois ou mais materiais distintos, de modo a obter propriedades superiores às dos constituintes isolados. Segundo Callister e Rethwisch (2016), esses materiais são formados por duas fases principais: a matriz e o reforço. A matriz, geralmente composta por resinas poliméricas termofixas, como epóxi, poliéster ou viniléster, tem como função envolver e proteger as fibras, garantir a coesão do material, distribuir as cargas mecânicas e atuar na transferência de esforços entre as fibras. Já o reforço, normalmente na forma de fibras de vidro ou carbono, é responsável por conferir resistência mecânica e rigidez ao compósito, especialmente na direção dos esforços aplicados (MOREIRA, 2009).

A combinação entre matriz e reforço resulta em um material com elevada resistência específica, durabilidade e baixa degradação ambiental. Entretanto, essas mesmas características que tornam as pás eficientes durante sua vida útil também dificultam sua reciclagem ao final do ciclo de vida, uma vez que as resinas termofixas não podem ser remoldadas após a cura.

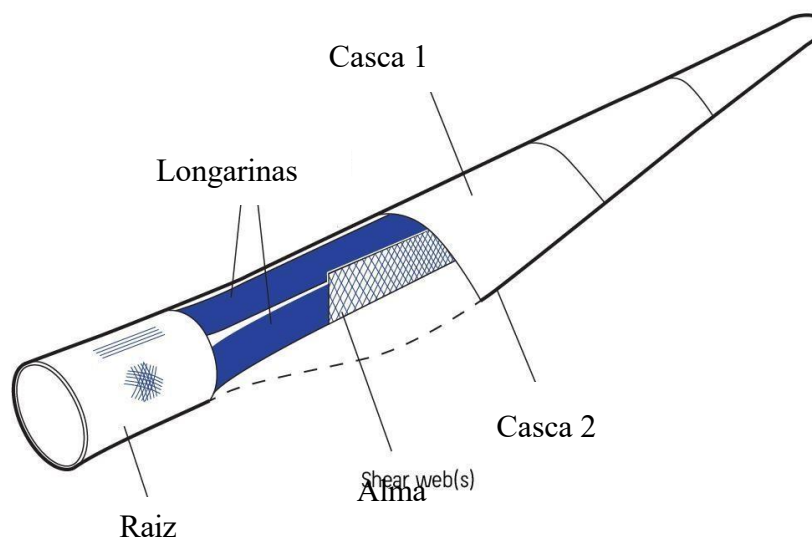
2.3.2 Estrutura das pás

Uma pá pode ser dividida em 4 componentes principais, onde cada componente contém uma função primordial ao seu funcionamento. A Figura 2 mostra uma secção transversal classificando os 4 componentes principais que são as cascas, longarinas, almas, e a raiz (WIND TURBINE BLADES, 2019).

As cascas formam a geometria externa da pá e são divididas em duas partes; a parte casca de sucção (casca 1) e a parte casca de pressão (casca 2) (WIND TURBINE BLADES, 2019). Na casca de sucção, o escoamento do ar ocorre com maior velocidade, resultando em uma região de menor pressão. Já na casca de pressão, o ar apresenta menor velocidade e,

consequentemente, maior pressão. A diferença de pressão entre essas superfícies gera forças aerodinâmicas responsáveis pela rotação do rotor e pela conversão da energia cinética do vento em energia mecânica (HANSEN, 2008).

Figura 2 - Principais componentes na estrutura da pá.



Fonte: WIND TURBINE BLADES (2019).

As longarinas (principal e secundária) são os componentes que basicamente suportam a maior parte da carga aerodinâmica durante a operação das pás e transfere-as para a raiz cilíndrica. Elas são infundidas com as cascas do lado sucção e pressão (WIND TURBINE BLADES, 2019).

A alma é o componente que exerce a função de ligar as longarinas do lado pressão com as longarinas do lado sucção fazendo com que a pá se comporte como uma viga e mantenha sua rigidez (WIND TURBINE BLADES, 2019). A quantidade de almas em uma pá eólica depende principalmente do comprimento da pá e das cargas estruturais que ela precisa suportar, ou seja, pás menores geralmente possuem uma única alma, enquanto pás maiores podem apresentar duas ou mais almas (MARINHO, 2021).

A raiz da pá é a região onde ocorrem os maiores esforços estruturais. Sua principal função é transmitir o momento de flexão gerado ao longo da pá para o cubo do rotor de forma uniforme. Por essa razão, essa região apresenta maior espessura estrutural, pois abriga os parafusos responsáveis pela fixação da pá ao cubo.

2.3.3 Processo de fabricação

De acordo com Marinho (2021), a fabricação das pás eólicas pode ser dividida em 12 macroprocessos. Alguns desses processos podem variar de acordo com o modelo de pá produzido, porém todas passam por etapas fundamentais semelhantes, que serão descritas a seguir:

- Corte dos tecidos e preparação dos kits

Esse procedimento é necessário porque os materiais chegam à fábrica em rolos e precisam ser recortados de acordo com a geometria específica da pá. Após o corte dos tecidos de fibra de vidro, os materiais são organizados em conjuntos denominados kits, contendo a quantidade e a disposição de camadas necessárias para cada componente da estrutura da pá (cascas, longarinas, alma e raiz).

- *Lay-up* (posicionamento das camadas)

Após a preparação dos kits, os materiais são levados aos moldes das cascas de sucção e de pressão da pá. Inicia-se então, a etapa conhecida como *lay-up*, que consiste no posicionamento manual e sequencial das camadas de fibra de vidro conforme especificado no projeto estrutural. Durante esse processo, também são posicionados elementos estruturais importantes, como as longarinas e os materiais de núcleo (geralmente madeira balsa ou espuma de PVC) que contribuem para aumentar a rigidez da estrutura sem elevar significativamente o peso da pá.

- Preparação do plano de infusão

Concluído o posicionamento das camadas estruturais, são adicionados materiais auxiliares que permitirão a realização do processo de infusão da resina. Esse conjunto de materiais compõe o chamado plano de infusão, responsável por garantir a correta impregnação das fibras. Primeiramente é aplicada uma camada de *nylon* sobre as fibras com a finalidade de gerar rugosidade na superfície da peça após a cura, facilitando processos posteriores de colagem entre componentes. Em seguida, é aplicado um filme desmoldante, que é um material plástico antiaderente que permite a passagem de ar e gases voláteis durante o processo de vácuo, além de evitar a aderência da resina aos materiais auxiliares. Posteriormente, coloca-se o tecido respirador, que permite a circulação do ar durante o processo de vácuo, facilitando a remoção de bolhas e garantindo melhor consolidação das

camadas estruturais. Por fim, todo o conjunto é coberto com um filme plástico de vácuo, que é fixado ao molde por meio de selantes adesivos, garantindo a vedação necessária para a criação do vácuo durante a infusão.

- Processo de infusão

Após a preparação do plano de infusão, inicia-se o processo de retirada do ar do sistema por meio de bombas de vácuo. Quando o nível de pressão especificado é atingido, a resina é introduzida através de tubos distribuídos ao longo da estrutura. Devido à diferença de pressão entre o ambiente externo e o interior do molde, a resina é conduzida através das camadas de fibra, impregnando completamente o material e formando o compósito estrutural da pá.

- Cura da resina

Antes da infusão, a resina termofixa é misturada a um catalisador responsável por iniciar a reação química de polimerização. Esse processo resulta na solidificação da resina e na formação da matriz que mantém as fibras unidas. A reação é exotérmica, liberando calor durante a cura. Por esse motivo, o controle da temperatura é fundamental, pois variações podem alterar a viscosidade da resina e comprometer a impregnação adequada das fibras.

- Desmoldagem dos componentes

Após a cura completa da resina, os materiais auxiliares utilizados no plano de infusão (tecido respirador, filme desmoldante e plástico de vácuo) são removidos. A camada de *nylon*, entretanto, permanece temporariamente na superfície para preservar a rugosidade necessária para etapas posteriores de colagem. A desmoldagem deve ocorrer dentro das condições de temperatura especificadas, pois a remoção prematura pode provocar deformações na geometria do componente.

- Colagem estrutural e fechamento da pá

Nessa etapa ocorre a união dos principais componentes da pá. As cascas estruturais, que já contêm as longarinas internas, são preparadas para a colagem das almas estruturais. As superfícies de contato são lixadas para aumentar a aderência do adesivo estrutural. Durante essa etapa, também são instalados cabos de proteção contra descargas atmosféricas e caixas de balanceamento. Após a aplicação do adesivo, os moldes são fechados para que ocorra a

cura da estrutura completa da pá.

- Rebarbação

Após a cura da colagem, a pá é retirada do molde e submetida ao processo de rebarbação. Nessa etapa são removidos excessos de material resultantes da fabricação, garantindo que a geometria final esteja de acordo com o projeto.

- Corte, furação e reparos

Posteriormente, a pá passa por uma inspeção estrutural completa. Caso sejam identificadas imperfeições, são realizados reparos utilizando novas camadas de fibra e resina. Dependendo do projeto, também é realizada a furação da raiz da pá, onde serão instalados os parafusos responsáveis pela conexão com o cubo do aerogerador.

- Acabamento superficial

Na etapa de acabamento, toda a superfície da pá é lixada para garantir melhor aderência das camadas de proteção. Eventuais irregularidades são corrigidas com massas de nivelamento e, em seguida, a pá recebe pintura protetora contra radiação solar e intempéries.

- Balanceamento

Como as pás operam em movimento rotacional, é essencial que apresentem massas e momentos equivalentes. Dessa forma, após o acabamento, cada pá é pesada e analisada para garantir o balanceamento adequado. Quando necessário, são adicionadas massas nas caixas de balanceamento para ajustar o peso e evitar vibrações excessivas no aerogerador.

- Embalagem e armazenamento

Após todas as etapas de fabricação e controle de qualidade, as pás são acondicionadas em estruturas metálicas de transporte e encaminhadas ao estoque, onde permanecem até serem enviadas para instalação nos parques eólicos.

2.3.4 Vida útil das pás

De acordo com a *International Electrotechnical Commission* (IEC), norma 61400-1 que especifica os requisitos essenciais de projeto de turbinas eólicas para garantir a

integridade estrutural, é recomendado que a vida útil mínima de um projeto seja de 20 anos. Esse período corresponde ao tempo adotado nos cálculos, nas modelagens numéricas, nos ensaios laboratoriais com protótipos e nos testes de resistência mecânica dos componentes, bem como, em experiências e observações em campo.

Vale ressaltar que as condições climáticas e operacionais adotadas na fase de projeto tendem a diferir das condições reais de operação dos equipamentos. Dessa forma, a vida operacional efetiva pode ser superior ou inferior à vida útil prevista em projeto. Além disso, ao longo dos anos, as turbinas eólicas apresentam redução gradual da sua eficiência operacional, uma vez que o desgaste dos componentes resulta no aumento da frequência de manutenções (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE, 2021).

2.3.5 Ciclo de vida das pás

O ciclo de vida refere-se ao conjunto de etapas pelas quais um material ou produto passa ao longo de sua existência. De acordo com Pereira (2016), esse conceito, quando aplicado a um produto, funciona como uma ferramenta que auxilia a equipe de projeto na identificação e análise das fases de produção, consumo, descarte, reutilização, reciclagem e remanufatura de produtos semelhantes ao que está sendo desenvolvido. A análise dessas informações permite aos projetistas compreender melhor as soluções adotadas no mercado, identificar possíveis limitações e oportunidades de melhoria e, assim, contribuir para o desenvolvimento de produtos mais eficientes e competitivos. Em geral, essa abordagem é aplicada desde as fases iniciais do processo de projeto. No Brasil, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é regida pelas seguintes normas: ABNT NBR ISO 14040:2025 (Gestão ambiental- Avaliação do ciclo de vida- Princípios e estrutura) e ABNT NBR ISO 14044:2025 (Gestão ambiental -Avaliação do ciclo de vida- Requisitos e orientações) (ABNT, 2025).

No contexto da energia eólica, o ciclo de vida das pás compreende todas as etapas associadas à sua existência, desde a obtenção das matérias-primas até sua destinação final, após o término da vida útil. De acordo com Crawford (2009), a ACV de turbinas eólicas considera inicialmente a extração e processamento dos materiais, etapa na qual são produzidos os insumos utilizados na fabricação das pás, como fibras de vidro, resinas poliméricas e outros materiais compósitos. Em seguida, ocorre a fase de fabricação, na qual esses materiais são transformados nos componentes estruturais da turbina. No caso das pás eólicas, essa etapa envolve processos industriais como laminação das fibras, infusão de resina e montagem estrutural. Após a fabricação, os componentes são transportados até o local de

instalação, iniciando-se a fase de construção e montagem do parque eólico.

A fase operacional corresponde ao período de funcionamento da turbina, no qual as pás interagem com o vento para converter energia cinética em energia mecânica, posteriormente transformada em energia elétrica. Essa etapa é geralmente a mais longa do ciclo de vida, podendo atingir cerca de 20 anos de operação.

Por fim, após o término da vida útil do equipamento, ocorre a fase de descomissionamento, que envolve a desmontagem das turbinas e a destinação dos materiais. Nessa etapa, alguns componentes podem ser reciclados ou reaproveitados. Entretanto, materiais compósitos presentes nas pás eólicas ainda representam desafios para reciclagem em larga escala (CRAWFORD, 2009).

2.3.6 Descarte de pás eólicas

De acordo com a *American Wind Energy Association* (AWEA, 2020), materiais como aço, cobre e outros metais, que compõem a maior parte de uma turbina eólica, possuem valor residual e podem ser reciclados. Entretanto, componentes como as pás eólicas e os lubrificantes à base de óleo e graxa, em geral, apresentam maior dificuldade de reaproveitamento e, frequentemente, acabam sendo descartados (KNUTSON, 2019).

Ao final de sua vida útil, as pás eólicas precisam ser removidas e destinadas de forma adequada. Estudos indicam que o descarte dessas estruturas representa um desafio ambiental significativo, principalmente devido à sua composição em materiais compósitos, como fibras de vidro associadas a resinas poliméricas, que apresentam elevada resistência mecânica e baixa biodegradabilidade. Tradicionalmente, muitas pás desativadas são encaminhadas para aterros sanitários ou utilizadas em processos de coprocessamento em fornos de cimento (LIU; BARLOW, 2017).

Nos últimos anos, o setor eólico tem buscado alternativas mais sustentáveis para a destinação desses componentes. Neste contexto, a associação *WindEurope* (2026), estabeleceu um compromisso do setor para evitar o descarte de pás em aterros sanitários, incentivando o desenvolvimento de soluções de reutilização, reaproveitamento estrutural, reciclagem e recuperação energética.

2.3.6.1 Panorama no Brasil e no mundo

Estudos indicam que o volume de resíduos provenientes de pás eólicas tende a crescer significativamente nas próximas décadas. Projeções apontam que, até 2050, a quantidade acumulada de resíduos de pás poderá atingir aproximadamente 43 milhões de toneladas em escala global, sendo que a China deverá concentrar cerca de 40% desse total, seguida pela Europa (25%), Estados Unidos (16%) e outras regiões do mundo (19%) (LIU; BARLOW, 2017). Na Europa, por exemplo, estima-se que aproximadamente 55 mil toneladas de material proveniente de pás eólicas sejam desativadas anualmente até 2030 (WINDEUROPE, 2026). Esse cenário está diretamente relacionado ao crescimento expressivo da capacidade instalada de energia eólica nas últimas décadas e ao envelhecimento dos primeiros parques eólicos implantados em diversos países. À medida que esses empreendimentos atingem o fim de sua vida útil, aumenta também a necessidade de soluções adequadas para a gestão dos resíduos gerados, especialmente no caso das pás, que são fabricadas com materiais compósitos de difícil reciclagem.

No Brasil, o descarte de pás de aerogeradores ainda enfrenta desafios significativos, principalmente devido à ausência de regulamentações específicas e à limitação de infraestrutura voltada para o tratamento desses resíduos. Atualmente, uma das práticas mais utilizadas é a disposição em aterros industriais, considerada uma alternativa viável do ponto de vista operacional e econômico. Entretanto, essa solução apresenta limitações ambientais, uma vez que a composição das pás podem representar riscos ambientais a longo prazo (OLIVEIRA, 2024).

2.3.6.2 Impactos ambientais gerados

2.3.6.2.1 Poluição do solo e da água

O descarte de pás eólicas gera impactos ambientais significativos devido à dificuldade de reciclagem dos materiais compósitos utilizados em sua fabricação, o que frequentemente resulta na destinação inadequada desses componentes. Nesse contexto, quando as pás de aerogeradores são descartadas de forma inadequada, pode ocorrer contaminação do solo e dos corpos hídricos, comprometendo a qualidade ambiental das áreas afetadas (EUROPEAN COMMISSION, 2017). Isso ocorre porque os materiais que as constituem podem liberar substâncias potencialmente tóxicas durante seu processo de degradação. Esses compostos

podem infiltrar-se no solo e atingir águas subterrâneas, afetando ecossistemas locais e causando impactos à fauna e à flora (GOMEZ-MARTINEZ, 2021).

A baixa degradabilidade dos compósitos pode alterar propriedades físicas do solo, como sua estrutura e capacidade de retenção de água, além de interferir no equilíbrio de nutrientes. Esse processo pode dificultar o desenvolvimento de plantas e afetar a atividade de microrganismos essenciais para a manutenção da fertilidade e regeneração do solo (ALBUQUERQUE; FONSECA, 2025).

Os impactos podem ser ainda mais significativos quando o descarte ocorre próximo a corpos d'água ou de maneira descontrolada no ambiente. Nesse contexto, há risco de contaminação hídrica, uma vez que o contato das resinas e fibras sintéticas com a água pode promover a liberação de substâncias tóxicas em rios, lagos ou oceanos. Essas substâncias podem prejudicar organismos aquáticos, interferir nas cadeias alimentares e comprometer a qualidade da água para consumo humano e outras atividades (EUROPEAN COMMISSION, 2017).

2.3.6.2.2 Ameaça à fauna e flora

O descarte inadequado de pás de aerogeradores também pode representar uma ameaça significativa à fauna e à flora, especialmente em áreas próximas a aterros ou locais onde esses resíduos se acumulam de forma descontrolada. Esses impactos estão associados principalmente à baixa degradabilidade dos materiais compósitos utilizados em sua fabricação, como fibras de vidro e resinas epóxi, que apresentam baixa degradabilidade no ambiente (KOLIOU, 2020).

Entre os impactos sobre a fauna, destaca-se a ingestão de fragmentos desses materiais por animais terrestres e aquáticos, que podem confundi-los com alimento. Esse processo pode causar obstruções no trato digestivo, redução na absorção de nutrientes e acúmulo de substâncias tóxicas provenientes dos compostos químicos presentes nas resinas, podendo levar à desnutrição e até a morte dos organismos afetados (GALL; THOMPSON, 2015; GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL - GWEC, 2022). Além disso, fragmentos ou partes maiores das pás podem provocar o enredamento e aprisionamento de animais, especialmente em ambientes próximos a corpos d'água, representando risco para espécies como aves, tartarugas marinhas e mamíferos aquáticos (HARDESTY *et al.*, 2016).

No que se refere à flora, o acúmulo desses resíduos pode alterar as propriedades do solo e comprometer o desenvolvimento da vegetação. A presença de grandes estruturas pode

difícultar o crescimento das raízes e a troca de gases no solo, além de favorecer a liberação de substâncias químicas que podem inibir o crescimento das plantas. Adicionalmente, o descarte irregular pode provocar fragmentação de habitats e favorecer a proliferação de espécies invasoras, alterando a dinâmica dos ecossistemas naturais (EUROPEAN COMMISSION, 2017; LEITÃO, 2019).

2.3.6.2.3 Emissão de carbono

O processo de incineração ou a decomposição inadequada das pás de aerogeradores pode contribuir para a emissão de carbono e de outros gases poluentes, o que contrasta com o caráter sustentável associado à geração de energia eólica. Quando esses resíduos são submetidos à queima em incineradores sem controle adequado, os materiais compósitos presentes nas pás, como resinas epóxi e fibras de vidro, podem liberar dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO) e compostos tóxicos, como dioxinas e furanos, que representam riscos significativos à saúde humana e ao meio ambiente (KOLIOU, 2020). Além disso, mesmo na ausência de incineração, o descarte em aterros pode gerar emissões indiretas de gases de efeito estufa.

Em condições anaeróbicas, especialmente quando as pás são dispostas em conjunto com resíduos orgânicos, pode ocorrer a liberação de metano (CH₄), um gás com elevado potencial de aquecimento global (EUROPEAN COMMISSION, 2017). Ademais, a falta de estratégias de reciclagem ou reaproveitamento implica na necessidade de produção de novos materiais para substituição das pás descartadas, o que demanda energia e recursos naturais adicionais, aumentando a pegada de carbono ao longo do ciclo de vida desses componentes (GOMEZ-MARTINEZ, 2021).

2.4 Sustentabilidade e economia circular

A consolidação das energias renováveis como estratégia de descarbonização da matriz energética mundial exige uma visão mais ampla da sustentabilidade, ou seja, é necessário considerar não apenas a geração de energia limpa, mas também os impactos associados ao ciclo de vida dos equipamentos. Nesse sentido, conceitos como desenvolvimento sustentável, economia circular e gestão adequada de resíduos são necessários para garantir que o avanço das tecnologias energéticas ocorra de maneira ambientalmente responsável.

No Brasil, a estrutura normativa relacionada à sustentabilidade ambiental é respaldada por instrumentos legais e compromissos internacionais que orientam políticas públicas e práticas produtivas, especialmente no que se refere à redução de impactos ambientais e à gestão eficiente de recursos naturais.

2.4.1 Desenvolvimento sustentável

O conceito de desenvolvimento sustentável se refere à capacidade de atender às necessidades atuais sem comprometer a possibilidade de as futuras gerações atenderem às suas próprias demandas. Esse princípio orienta políticas globais voltadas à conciliação entre crescimento econômico, proteção ambiental e bem-estar social. Em 2015, a Organização das Nações Unidas estabeleceu a Agenda 2030, composta por 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que buscam enfrentar desafios como mudanças climáticas, uso responsável dos recursos naturais e acesso à energia limpa (NAÇÕES UNIDAS, 2015).

Entre os ODS, destacam-se aqueles relacionados à transição energética e à gestão ambiental, como o ODS 7 (energia limpa e acessível), o ODS 12 (consumo e produção responsáveis) e o ODS 13 (ação contra a mudança global do clima). Esses objetivos reforçam a necessidade de que o avanço tecnológico ocorra de forma alinhada à sustentabilidade, incluindo a gestão adequada de resíduos e o ciclo de vida dos produtos (NAÇÕES UNIDAS, 2015). Nesse cenário, as fontes renováveis de energia se destacam por utilizarem recursos naturais e apresentarem menores GEEs (Gases do Efeito Estufa) quando comparadas às fontes fósseis. Entretanto, o crescimento expressivo da energia eólica implica no aumento futuro do volume de componentes descomissionados, especialmente das pás eólicas. Essas estruturas, quando descartadas sem planejamento adequado, podem gerar impactos ambientais relevantes, devido ao grande volume ocupado e à dificuldade de degradação dos materiais compósitos. Assim, a discussão sobre desenvolvimento sustentável no setor energético deve considerar não apenas a geração de energia limpa, mas também estratégias para a gestão adequada dos resíduos associados a essas tecnologias.

2.4.2 Economia circular

A economia circular é uma alternativa ao atual modelo linear de produção, isto é, que não prevê o retorno saudável dos materiais para o ciclo econômico ou para a natureza. A alternativa consiste em fazer a gestão de recursos finitos para recuperar os seus valores, prezando pela regeneração e pela diminuição do uso de materiais.

De acordo com a *Ellen MacArthur Foundation* (2010) o modelo da economia circular se baseia em três pilares principais:

- Eliminar o desperdício e a poluição desde a concepção do produto;
- Manter produtos e materiais em uso pelo maior tempo possível e;
- Regenerar os sistemas naturais.

O primeiro princípio refere-se à eliminação do desperdício e da poluição ainda na fase de projeto. Nesse contexto, o *design* assume papel estratégico, uma vez que as decisões tomadas no desenvolvimento do produto influenciam diretamente sua durabilidade, possibilidade de reparo, reutilização e reciclagem. Assim, resíduos não são compreendidos como inevitáveis, mas como resultado de escolhas técnicas inadequadas.

O segundo princípio consiste em manter produtos e materiais em circulação. Isso significa prolongar sua utilização por meio de estratégias como reutilização, manutenção, remanufatura e reciclagem. A economia circular distingue dois ciclos principais: o ciclo técnico, no qual materiais não biodegradáveis permanecem em uso por processos industriais, e o ciclo biológico, no qual materiais orgânicos retornam de forma segura ao meio ambiente.

O terceiro princípio está relacionado à regeneração dos sistemas naturais. A economia circular propõe que a extração de recursos ocorra dentro dos limites de regeneração ambiental, promovendo práticas que contribuam para a recuperação dos ecossistemas. No âmbito industrial, isso envolve ações como gestão adequada de resíduos, logística reversa e uso responsável de matérias-primas.

A aplicação dos princípios da economia circular no setor eólico pode ser observada na destinação das pás de aerogeradores ao final de sua vida útil. Conforme ilustrado na Figura 3, essas estruturas podem seguir diferentes rotas, como reutilização, reuso adaptativo (reuso), reciclagem e recuperação, priorizando a manutenção do valor dos materiais pelo maior tempo possível.

Figura 3 - Circularidade para pás eólicas.



Fonte: Adaptado de WindEurope (2025).

2.4.3 Hierarquia da gestão de resíduos

A hierarquia da gestão de resíduos constitui um dos principais instrumentos orientadores das políticas ambientais brasileiras, sendo formalmente estabelecida pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). De acordo com o Art. 9º da referida legislação, a gestão e o gerenciamento de resíduos sólidos devem obedecer à seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos (BRASIL, 2010). Essa estrutura normativa estabelece que a disposição em aterros deve ser adotada apenas como última alternativa, aplicável somente aos rejeitos, isto é, resíduos que não apresentem viabilidade técnica ou econômica de reaproveitamento. Dessa forma, a legislação brasileira privilegia soluções que mantenham os materiais em circulação pelo maior tempo possível, reduzindo impactos ambientais e o consumo de novos recursos naturais.

A PNRS também introduz o princípio da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, atribuindo deveres aos fabricantes, importadores, distribuidores,

comerciantes, consumidores e ao poder público quanto à destinação ambientalmente adequada dos resíduos. Tal diretriz reforça a necessidade de planejamento prévio quanto ao descomissionamento de equipamentos industriais, incluindo aqueles pertencentes ao setor de energias renováveis.

2.4.4 Os 7 Rs da sustentabilidade

O conceito mais difundido de sustentabilidade surgiu na década de 1980 com o slogan “Reduzir, Reutilizar e Reciclar”, conhecido como os 3 Rs. Com o passar do tempo, novos princípios foram incorporados, ampliando essa abordagem para estimular mudanças nos hábitos cotidianos. O objetivo é promover o uso mais consciente dos recursos, reduzir o consumo excessivo e evitar desperdícios (AVILA, 2021)

Atualmente, existem 7 Rs da sustentabilidade, que correspondem a um conjunto de princípios voltados à redução dos impactos ambientais associados aos padrões de consumo e produção. Esses princípios incluem: repensar, recusar, reduzir, reparar, reutilizar, reciclar e reintegrar (AVILA, 2021; GALRÃO RENOVÁVEIS, 2022).

- Repensar

O primeiro passo consiste em repensar os hábitos de consumo. Antes de realizar uma compra, é importante refletir se o produto ou serviço é realmente necessário. Adotar escolhas mais conscientes e responsáveis representa uma das formas mais eficazes de evitar o consumo excessivo e reduzir os impactos ambientais associados;

- Recusar

O segundo princípio consiste em recusar produtos, serviços ou práticas que não estejam alinhados com valores ambientais, sociais e éticos. Ao repensar os próprios hábitos de consumo, torna-se mais fácil identificar aquilo que deve ser evitado ou rejeitado no cotidiano;

- Reduzir

O terceiro princípio dos 7 Rs da sustentabilidade é reduzir. Após repensar os hábitos de consumo e recusar aquilo que não faz mais sentido ou que gera impactos negativos, o próximo passo é buscar formas de diminuir a quantidade de recursos utilizados e de resíduos gerados no processo de consumo;

- Reparar

O quarto princípio dos 7 Rs da sustentabilidade é reparar. Esse conceito ganha ainda mais relevância no contexto atual, marcado pela chamada obsolescência programada, em que muitos produtos são projetados para ter uma vida útil limitada, incentivando o consumidor a substituí-los por versões mais novas em um curto período de tempo. Diante disso, antes de descartar um objeto e adquirir outro, é importante avaliar a possibilidade de realizar o conserto ou a manutenção do item. Em muitos casos, reparar pode ser uma alternativa mais econômica e, ao mesmo tempo, mais sustentável, pois evita o descarte prematuro de produtos que ainda podem ter utilidade;

- Reutilizar

Quando não é possível reparar ou consertar determinado objeto, a reutilização surge como uma alternativa relevante para prolongar sua vida útil e evitar o descarte prematuro de materiais. A reutilização pode ocorrer de diferentes formas. A primeira refere-se ao uso de produtos naturalmente reutilizáveis, substituindo itens descartáveis por alternativas duráveis. Outra forma de reutilização está associada ao conceito de upcycling, que consiste na transformação de um objeto ou material descartado em um novo produto com utilidade distinta daquela originalmente prevista. Essa prática tem ganhado destaque por aliar sustentabilidade, criatividade e design, possibilitando a criação de novos usos para materiais que, de outra forma, seriam descartados.

- Reciclar

Quando não é possível reparar ou reutilizar um produto, a reciclagem se apresenta como uma alternativa importante para reduzir a quantidade de resíduos destinados aos aterros e possibilitar o reaproveitamento de materiais no ciclo produtivo. Para que esse processo ocorra de maneira eficiente, é fundamental realizar a separação adequada dos resíduos, destinando materiais como plástico, papel e papelão, vidro, óleo de cozinha usado e pilhas aos sistemas de coleta seletiva ou a pontos de descarte específicos. Essa prática contribui para facilitar o tratamento e o reaproveitamento desses materiais na cadeia produtiva, reduzindo a necessidade de extração de novos recursos naturais;

- Reintegrar

Esse conceito refere-se à devolução de materiais de origem orgânica ao meio ambiente,

de forma que possam ser reinseridos nos ciclos naturais. Nesse contexto, resíduos que não podem ser reciclados, como restos de alimentos e outros materiais orgânicos, podem ser reintegrados à natureza por meio de processos adequados de tratamento. Um dos métodos mais utilizados para esse fim é a compostagem, que consiste na decomposição controlada da matéria orgânica, resultando na produção de um composto rico em nutrientes que pode ser utilizado como adubo no solo.

2.5 Gestão de resíduos

2.5.1 Normas e diretrizes internacionais

Diversos países têm desenvolvido regulamentações e diretrizes voltadas para a gestão de resíduos, incluindo aqueles provenientes de aerogeradores, especialmente no que se refere ao descarte e à reciclagem de materiais compósitos utilizados nas pás eólicas.

Na União Europeia, a principal base regulatória para a gestão de resíduos é a Diretiva 2008/98/EC, conhecida como *Waste Framework Directive* (WFD) (UNIÃO EUROPEIA, 2008). Essa diretiva estabelece o marco legal para a gestão de resíduos nos países-membros, definindo conceitos fundamentais como reciclagem, recuperação e disposição final. Um dos seus principais instrumentos é a hierarquia de resíduos, que estabelece uma ordem de prioridade para o tratamento dos resíduos: prevenção, reutilização, reciclagem, recuperação energética e, como última alternativa, a disposição em aterros sanitários. A diretiva também incorpora princípios importantes que determinam que o gerador do resíduo deve arcar com os custos de sua gestão, e que aos fabricantes são responsáveis pelo destino final de seus produtos após o uso.

As diretrizes acima citadas têm forte influência na indústria eólica europeia, incentivando soluções de reciclagem e reaproveitamento de componentes, como as pás de turbinas, ao invés do descarte em aterros. Além disso, iniciativas ligadas à *European Sustainable Chemistry Platform*, uma iniciativa público-privada da União Europeia focada em química sustentável, promovem discussões e estratégias voltadas à redução do impacto ambiental de materiais compósitos e fibras utilizados em diversas indústrias, incluindo o setor eólico (*Sustainable Chemistry* - SUSCHEM, 2026). Como as pás de aerogeradores são compostas por compósitos de fibra de vidro ou carbono associados a resinas poliméricas, esses materiais apresentam grande durabilidade e baixa biodegradabilidade, o que torna essencial o desenvolvimento de tecnologias e políticas voltadas à reutilização e reciclagem

desses componentes.

Na Alemanha, a gestão de resíduos é regulamentada principalmente pela *Kreislaufwirtschafts - und Abfallgesetz*, conhecida como Lei de Economia Circular e Gestão de Resíduos (ALEMANHA, 2012). Essa legislação tem como objetivo promover o uso eficiente de recursos naturais e reduzir a geração de resíduos, incentivando práticas de reutilização, reciclagem e recuperação de materiais. Um dos aspectos relevantes dessa política é a restrição ao envio de determinados resíduos para aterros sanitários. Desde 2005, o país proibiu o descarte em aterros de resíduos não tratados provenientes de residências e empresas, medida que visa evitar impactos ambientais associados à decomposição de resíduos, como emissão de gases de efeito estufa e contaminação do solo e das águas subterrâneas (BMUKN, 2009). Essa política acabou influenciando indiretamente a gestão de resíduos provenientes de turbinas eólicas, pois dificulta o descarte convencional de materiais compósitos em aterros. Dessa forma, empresas e centros de pesquisa alemães têm investido em soluções alternativas, como reciclagem mecânica, coprocessamento em fornos de cimento e reaproveitamento estrutural das pás desativadas.

A França possui regulamentações específicas voltadas ao descomissionamento de turbinas eólicas, estabelecidas pelo *Arrêté du 22 juin 2020* (FRANÇA, 2020). Essa legislação determina que os operadores de parques eólicos são responsáveis pela desmontagem das turbinas ao final de sua vida útil e pela correta destinação de seus componentes. Um dos pontos mais relevantes da norma é a exigência de reciclagem ou reutilização de uma porcentagem mínima da massa do rotor, que inclui as pás e o cubo da turbina. Inicialmente, essa exigência era de 35% da massa total do rotor. Posteriormente, o percentual foi ampliado para 45% em 2023 e 55% a partir de 2025, reforçando o compromisso do país com a economia circular e a redução do descarte de resíduos industriais em aterros.

Nos Estados Unidos, a gestão de resíduos sólidos é regulada principalmente pela *Resource Conservation and Recovery Act* (ESTADOS UNIDOS, 1976). Essa legislação federal estabelece diretrizes para o manejo seguro, transporte, tratamento, armazenamento e descarte de resíduos sólidos e perigosos. O objetivo da lei é proteger a saúde pública e o meio ambiente, garantindo que os resíduos sejam gerenciados de forma adequada ao longo de todo o seu ciclo de vida.

Embora o país não possua uma legislação federal específica voltada ao descarte de pás eólicas, alguns estados aplicam taxas sobre o envio de resíduos para aterros sanitários, conhecidas como *landfill tipping fees* (ENVIRONMENTAL RESEARCH & EDUCATION FOUNDATION - EREF, 2024). Essas taxas podem ser baseadas no peso ou volume dos

resíduos descartados e funcionam como um instrumento econômico para incentivar alternativas mais sustentáveis, como reciclagem ou reaproveitamento de materiais.

No Reino Unido, uma das principais políticas relacionadas ao descarte de resíduos é a aplicação de taxas sobre aterros sanitários, também conhecidas como *landfill tax* (OFFICE FOR BUDGET RESPONSIBILITY, 2026). Esse mecanismo econômico busca desestimular o envio de resíduos para aterros ao tornar essa opção mais cara em comparação com alternativas como reciclagem e recuperação energética. Dessa forma, a política incentiva empresas e indústrias a investir em tecnologias de reaproveitamento de materiais e redução da geração de resíduos.

Na China ainda não existem proibições diretas ou requisitos específicos voltados ao descarte ou à reciclagem de pás eólicas. Entretanto, a gestão de resíduos sólidos é abordada pela *Law of the People's Republic of China on the Prevention and Control of Environmental Pollution by Solid Waste* (CHINA, 2020), além de diretrizes estratégicas como as orientações para o aproveitamento abrangente de resíduos sólidos durante o 14º Plano Quinquenal, elaboradas pela *National Development and Reform Commission of China People's Republic of China* (*National Development and Reform Commission* - NDRC, 2021).

2.5.2 Legislação brasileira

De acordo com a Resolução nº 462/2014 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), o licenciamento ambiental de parques eólicos estabelece diretrizes para a implantação e operação desses empreendimentos, incluindo a adoção de medidas voltadas à prevenção e mitigação de impactos ambientais (BRASIL, 2014). Entre essas exigências, destaca-se a necessidade de planejamento e controle da geração de resíduos ao longo das diferentes fases do empreendimento, abrangendo desde a instalação até a operação e eventual descomissionamento das turbinas. Dessa forma, os empreendedores devem prever estratégias adequadas para o manejo, armazenamento, transporte e destinação final dos resíduos gerados, de modo a minimizar impactos ambientais e atender às exigências dos órgãos ambientais competentes. Além disso, a Lei nº 12.305/2010 institui a PNRS, que estabelece os princípios e instrumentos para a gestão integrada e o gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos no país (BRASIL, 2010). De acordo com essa legislação, a destinação final ambientalmente adequada compreende um conjunto de processos que priorizam a reutilização, reciclagem, compostagem, recuperação e aproveitamento energético dos

resíduos, bem como outras formas de destinação aprovadas pelos órgãos ambientais. O objetivo dessas medidas é evitar danos à saúde pública e reduzir os impactos ambientais decorrentes da disposição inadequada de resíduos. No contexto da energia eólica, essa legislação pode ser aplicada à gestão de componentes ao final da vida útil das turbinas, como as pás eólicas, incentivando soluções que priorizem o reaproveitamento de materiais e a redução do envio desses resíduos para aterros.

Os estados brasileiros também possuem regulamentações próprias relacionadas à gestão de resíduos sólidos, complementando a PNRS. Essas legislações estaduais buscam adaptar as diretrizes nacionais às realidades regionais, estabelecendo instrumentos de planejamento, metas de gestão e incentivos à reciclagem e à logística reversa. Considerando a relevância da geração de energia eólica em determinadas regiões do país, a Tabela 3 apresenta alguns dos principais instrumentos legais estaduais relacionados à gestão de resíduos sólidos nos estados que concentram maior número de parques eólicos instalados no Brasil.

Tabela 3 - Principais instrumentos legais estaduais relacionados à gestão de resíduos sólidos.

Estado	Legislação
Bahia	Lei Estadual n.º 12.932/2014 – Institui a Política Estadual de Resíduos Sólidos, e dá outras providências.
Rio Grande do Norte	Lei Estadual n.º 11.669/2024 – Dispõe sobre a Política Estadual de Resíduos Sólidos e dá outras providências.
Piauí	Lei Estadual n.º 8.456/2024 – Institui o Selo de Logística Reversa de Resíduos Sólidos no estado do Piauí
Ceará	Lei Estadual n.º 16.032/2016 – Institui A Política Estadual De Resíduos Sólidos No Âmbito Do Estado Do Ceará
Rio Grande do Sul	Lei Estadual n.º 14.528/2014 – Institui a Política Estadual de Resíduos Sólidos e dá outras providências.

Fonte: Adaptado de OLIVEIRA (2024).

2.5.3 Classificação das pás como resíduo

A ABNT NBR 10004-1:2024 (ABNT, 2024) estabelece critérios para a classificação dos resíduos sólidos gerados pelos aerogeradores, com base nos riscos potenciais que apresentam ao meio ambiente e à saúde pública. De acordo com essa norma, componentes como óleos lubrificantes e fluidos hidráulicos utilizados nos sistemas mecânicos e hidráulicos das turbinas são classificados como resíduos perigosos (Classe I), devido ao seu potencial de contaminação do solo e da água. Por outro lado, materiais como cabos elétricos, plásticos e metais estruturais podem ser classificados como resíduos não perigosos (Classe II), uma vez

que apresentam possibilidade de biodegradação, combustibilidade ou solubilidade em água, sendo frequentemente passíveis de reciclagem ou reutilização em processos industriais.

As pás de aerogeradores, constituídas por materiais compósitos, também são enquadradas como resíduos não perigosos. Entretanto, esse tipo de resíduo apresenta baixa reatividade química e não sofre decomposição significativa ao longo do tempo, o que resulta em uma degradação extremamente lenta no ambiente. Em função dessas características, o gerenciamento e a destinação final das pás eólicas representam um desafio para a gestão de resíduos sólidos, especialmente no que se refere ao desenvolvimento de tecnologias de reciclagem ou alternativas de reutilização desses materiais.

2.5.4 Descomissionamento de parques eólicos

Em alguns casos, a repotenciação (substituição completa ou parcial do aerogerador) ou a extensão da vida útil dos equipamentos não se mostram alternativas economicamente ou tecnicamente viáveis, sendo o descomissionamento do parque eólico a solução adotada. Esse processo envolve a desmontagem das estruturas, a descontaminação de componentes quando necessário e a preparação dos materiais para sua destinação ou disposição final, de modo a atender aos requisitos legais de segurança e às normas de proteção ambiental. Nesse contexto, todos os elementos associados ao empreendimento devem ser removidos. Em determinadas situações, mesmo quando o empreendedor dispõe de recursos financeiros para realizar a repotenciação completa do parque, pode-se optar pela desativação do empreendimento e pela implantação de um novo projeto em outra localidade. Contudo, sob a perspectiva ambiental, essa decisão pode resultar em impactos mais significativos, pois envolve a retirada total das estruturas existentes e a implantação de novas instalações em outro local (MACHUCA, 2015).

De acordo com a EPE (2021) as etapas que orientam o descomissionamento de um parque eólico podem variar conforme as características técnicas da usina, o tempo de operação e os objetivos associados à desativação. Em alguns casos, o processo é conduzido visando à reutilização dos aerogeradores ou de seus componentes em outros empreendimentos. Em outros, a desmontagem ocorre com o objetivo de separar os materiais para reutilização, revenda, reciclagem ou descarte definitivo.

O descomissionamento pode ocorrer de diferentes formas: as torres podem ser demolidas ou os componentes podem ser desmontados individualmente para possibilitar o reaproveitamento das peças, o que torna o processo mais cuidadoso e, conseqüentemente, mais demorado. De modo geral, as etapas do descomissionamento incluem o planejamento

das atividades, a desconexão dos sistemas elétricos, a desmontagem dos componentes principais das turbinas e a destinação adequada dos materiais removidos, conforme descrito por *Canadian Wind Energy Association* (CanWEA, 2026).

2.6 Reaproveitamento de pás eólicas

O reaproveitamento de pás eólicas tem surgido como uma das principais estratégias para lidar com os desafios associados ao fim da vida útil desses componentes, especialmente diante do crescimento acelerado da energia eólica em escala global. Considerando que as pás são fabricadas a partir de materiais compósitos de alta resistência e difícil degradação, sua destinação final representa um problema ambiental relevante, exigindo soluções que conciliem viabilidade técnica, econômica e sustentabilidade (LIU e BARLOW, 2017). Neste contexto, o reaproveitamento se destaca como uma alternativa promissora em relação às práticas tradicionais de descarte, como a disposição em aterros ou a incineração, que além de apresentarem impactos ambientais significativos, não aproveitam o valor residual desses materiais (OLIVEIRA, 2024). Diferente da reciclagem convencional, que frequentemente envolve a perda de propriedades mecânicas dos compósitos, o reaproveitamento busca manter, total ou parcialmente, a integridade estrutural das pás, ampliando seu ciclo de vida e reduzindo a demanda por novos recursos (JOUSTRÁ *et al.*, 2021). Além disso, essa abordagem está diretamente alinhada aos princípios da economia circular, que propõem a maximização do uso de materiais e a minimização de resíduos ao longo do ciclo produtivo (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2010). Dessa forma, o reaproveitamento de pás eólicas não deve ser compreendido apenas como uma solução técnica para gestão de resíduos, mas como uma estratégia integrada que envolve inovação em engenharia, design sustentável e políticas públicas voltadas à sustentabilidade.

2.6.1 Reuso adaptativo

O reuso adaptativo consiste na transformação de produtos, estruturas ou componentes descartados em novas aplicações distintas daquelas originalmente previstas, preservando, sempre que possível, suas propriedades físicas, mecânicas e estruturais. No caso das pás eólicas, essa abordagem apresenta elevado potencial, devido às características desses elementos, como: alta resistência mecânica, durabilidade, leveza e geometria aerodinâmica

otimizada para suportar condições operacionais severas (MISHNAEVSKY JR., 2021; JOUSTRA *et al.*, 2021).

As pás eólicas são projetadas para resistir a esforços intensos ao longo de décadas, incluindo variações de carga, intempéries e fadiga estrutural, o que as torna particularmente adequadas para aplicações secundárias que demandam desempenho estrutural confiável (CRAWFORD, 2009). Nesse sentido, o reuso adaptativo se diferencia de outras formas de reaproveitamento, por explorar diretamente o valor estrutural do material, evitando processos industriais intensivos que poderiam comprometer suas propriedades.

Segundo Joustra *et al.* (2021), o reuso adaptativo de compósitos estruturais representa uma oportunidade relevante em aplicações estruturais, uma vez que permite explorar diretamente o desempenho mecânico dos materiais, sem a necessidade de processos industriais intensivos. Diferente da reciclagem, que frequentemente resulta na degradação das propriedades do material, o reuso adaptativo preserva seu valor estrutural original. Além disso, estudos recentes apontam que o reuso adaptativo pode ser implementado em diferentes escalas, desde soluções locais, até projetos de maior complexidade. Ramaswamy et al. (2025a) destacam que a utilização de segmentos de pás em sistemas modulares pode contribuir para a redução de custos, otimização de recursos e inovação em soluções construtivas. Dessa forma, o reuso adaptativo se configura não apenas como uma alternativa sustentável, mas também como uma oportunidade para o desenvolvimento de novas abordagens no campo da engenharia e arquitetura.

2.6.2 Formas de reutilização existentes

A reutilização de pás eólicas já vem sendo explorada em diferentes contextos ao redor do mundo, refletindo tanto a necessidade de soluções sustentáveis quanto o avanço de práticas associadas à economia circular. As aplicações existentes demonstram a versatilidade desses componentes e podem ser organizadas em diferentes categorias, de acordo com sua finalidade e escala de utilização (JOUSTRA *et al.*, 2021).

- Aplicações estruturais

No campo da engenharia civil, as pás eólicas têm sido empregadas como elementos estruturais em obras como pontes, passarelas, vigas e coberturas. A elevada resistência mecânica, aliada à geometria alongada, permite sua utilização como componentes portantes, capazes de substituir parcialmente materiais convencionais como aço e concreto. Essa

substituição pode resultar em redução do peso estrutural, economia de recursos e diminuição dos impactos ambientais associados à construção (JOUSTR *et al.*, 2021; RE-WIND NETWORK, 2026).

- Arquitetura e urbanismo

Na arquitetura, as pás têm sido incorporadas em projetos que exploram tanto suas propriedades estruturais, quanto seu potencial estético. Sua forma curva e perfil aerodinâmico possibilitam a criação de fachadas, abrigos, quiosques e mobiliário urbano com design inovador. Além de contribuir para soluções arquitetônicas diferenciadas, essa aplicação reforça a adoção de práticas sustentáveis e agrega valor ambiental aos projetos (JOUSTR *et al.*, 2021).

- Infraestrutura urbana e rural

As pás também vêm sendo utilizadas em aplicações de infraestrutura, como barreiras acústicas, cercas, silos agrícolas e estruturas de contenção. Essas soluções são particularmente relevantes em regiões com grande concentração de parques eólicos, onde o reaproveitamento local pode reduzir custos logísticos e emissões associadas ao transporte. Segundo Tayebi *et al.* (2024), essa estratégia aumenta a viabilidade prática do reaproveitamento e favorece sua implementação em escala regional.

- Design e arte

No campo do design e das artes, as pás eólicas têm sido utilizadas na criação de esculturas, instalações e mobiliário. Nesses casos, além da funcionalidade, destaca-se o valor simbólico do material, associado à sustentabilidade e à transição energética. Embora essas aplicações tenham menor impacto em termos de volume reaproveitado, desempenham papel relevante na conscientização pública e na valorização do reuso (RE-WIND NETWORK, 2026).

A diversidade de aplicações, conforme citada, evidencia que o reaproveitamento de pás eólicas não se limita a uma única abordagem, mas abrange múltiplas possibilidades que podem ser adaptadas conforme as necessidades técnicas, econômicas e contextuais.

2.6.3 Benefícios ambientais

O reaproveitamento de pás eólicas oferece uma série de benefícios ambientais significativos, especialmente quando comparado a alternativas como disposição em aterros ou incineração. Esses benefícios estão diretamente relacionados à redução de impactos ao longo do ciclo de vida dos materiais e à promoção de práticas mais sustentáveis no setor energético. Um dos principais benefícios é a redução significativa do volume de resíduos sólidos, uma vez que as pás possuem grandes dimensões e são compostas por materiais de difícil degradação. A reutilização evita a ocupação de espaço em aterros e reduz potenciais impactos ambientais associados à disposição inadequada (PSOMOPOULOS *et al.*, 2019).

Outro benefício importante é a redução na demanda por matérias-primas virgens, uma vez que ao reutilizar componentes já existentes, reduz-se a necessidade de extração de recursos naturais, bem como os impactos ambientais associados, como consumo de energia, emissão de poluentes e degradação de ecossistemas. Além disso, o reaproveitamento contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa. Estudos de avaliação do ciclo de vida indicam que o reuso adaptativo apresenta menor pegada de carbono em comparação com a reciclagem ou a fabricação de novos materiais, principalmente por evitar etapas industriais intensivas em energia (CIEŚLEWICZ *et al.*, 2025).

Por fim, o reaproveitamento contribui para a promoção da economia circular, incentivando práticas sustentáveis e a inovação em design e engenharia. Segundo Jensen (2018), estratégias de segunda vida para pás eólicas são fundamentais para tornar o setor eólico verdadeiramente sustentável.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Coleta de dados

Este trabalho adotou uma abordagem teórica, fundamentando-se na revisão da literatura sobre energia eólica, com ênfase nas pás de aerogeradores e nas questões relacionadas ao seu ciclo de vida, especialmente no que diz respeito ao descarte e às alternativas de reaproveitamento. Inicialmente, foram abordados aspectos conceituais da energia eólica e dos aerogeradores, seguidos pela caracterização das pás, incluindo composição, estrutura, fabricação e vida útil. Em seguida, foram discutidos os impactos ambientais associados ao descarte desses componentes e as estratégias voltadas à reutilização, com destaque para o reuso adaptativo.

A coleta de dados ocorreu por meio da consulta a diferentes bases de dados e provedores de acesso, como *ScienceDirect*, *SciELO* e o Portal de Periódicos da CAPES. Além disso, foram utilizadas fontes bibliográficas e documentais incluindo artigos científicos, livros técnicos, dissertações e teses, bem como relatórios institucionais e publicações de entidades atuantes no setor eólico. Também foram consideradas informações provenientes de normas técnicas, como as da ABNT, a fim de complementar a base teórica e garantir a atualização dos dados.

As buscas foram realizadas utilizando palavras-chave em português e inglês, de modo a ampliar o alcance dos resultados. Entre os principais termos empregados, destacam-se: “pás eólicas”, “*wind turbine blades*”, “reutilização de pás eólicas”, “reuso adaptativo”, “*adaptive reuse*”, “reciclagem de compósitos” e “*end-of-life wind turbine blades*”.

Para a seleção do material analisado, foram adotados critérios como relevância para o tema, consistência das informações e disponibilidade do conteúdo completo. Foram priorizadas publicações no período de 2016 a 2026, nos idiomas português e inglês. Estudos que não apresentavam relação direta com o objeto de pesquisa ou que não contribuíam de forma significativa para a discussão proposta foram excluídos.

3.2 Análise dos dados

A análise dos dados foi realizada de forma qualitativa, a partir da interpretação das informações obtidas na literatura. Após a seleção dos materiais, os conteúdos foram organizados em categorias, permitindo a sistematização das informações e a identificação dos

principais aspectos relacionados ao reaproveitamento de pás eólicas.

As categorias de análise compreenderam temas como métodos de reciclagem, estratégias de reuso adaptativo, aplicações práticas já implementadas e desafios técnicos, econômicos e regulatórios para a adoção dessas soluções.

Além da análise descritiva dos estudos selecionados, buscou-se estabelecer relações entre os conceitos de sustentabilidade, economia circular e reaproveitamento de materiais compósitos, de modo a compreender como essas estratégias podem contribuir para a redução dos impactos ambientais gerados pelo setor eólico. Também foram avaliadas as vantagens e limitações das diferentes alternativas de destinação para pás eólicas em fim de vida útil, destacando-se o potencial do reuso adaptativo como alternativa sustentável.

Para facilitar a apresentação e interpretação dos resultados, foram elaboradas tabelas, permitindo sintetizar informações relevantes encontradas nos estudos analisados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Tecnologias empregadas para reciclagem de pás eólicas

A reciclagem de pás de aerogeradores surge, à primeira vista, como uma solução adequada para o problema do descarte desses componentes ao final de sua vida útil. No entanto, apesar da existência de diferentes tecnologias, a reciclagem ainda enfrenta limitações técnicas, econômicas e logísticas que dificultam sua aplicação em larga escala.

Um dos principais fatores que dificultam a reciclagem das pás eólicas está relacionado à sua composição. Como visto anteriormente, esses componentes são fabricados com materiais compósitos, especialmente polímeros termorrígidos reforçados com fibras de vidro e, em menor proporção, fibras de carbono. Esse tipo de material apresenta elevada resistência mecânica e durabilidade, características desejáveis durante a operação, mas que tornam sua reciclagem um processo complexo (CHENG *et al.*, 2023). Essa complexidade está associada principalmente à natureza dos polímeros termorrígidos. Após o processo de cura, esses materiais formam uma rede tridimensional de ligações covalentes cruzadas, o que os torna infusíveis e insolúveis.

Diferente dos polímeros termoplásticos, que podem ser fundidos e reprocessados diversas vezes, os termorrígidos não podem ser remoldados por aquecimento. Como consequência, a reciclagem desses materiais exige processos mais complexos, como degradação térmica ou química da matriz polimérica, o que aumenta significativamente o custo e a dificuldade operacional (ESPER *et al.*, 2016). Além disso, as pás eólicas apresentam uma estrutura heterogênea e multicamada, composta por diferentes materiais, como fibras de reforço, resinas poliméricas, núcleos estruturais (como espuma ou madeira balsa), adesivos estruturais e revestimentos protetores. Essa combinação de materiais dificulta a separação e o reaproveitamento eficiente de cada componente, uma vez que muitos desses materiais estão fortemente aderidos entre si. A separação seletiva exige processos adicionais, que aumentam o consumo de energia e os custos envolvidos (SHIINO e REZENDE, 2020).

Outro aspecto crítico está relacionado à cadeia de reciclagem como um todo. Para que a reciclagem de compósitos seja viável, é necessário que todas as etapas do processo estejam bem estruturadas e integradas, incluindo a geração de resíduos, coleta, transporte, processamento e comercialização dos materiais reciclados. No entanto, a ausência de uma cadeia consolidada para compósitos dificulta essa integração. Em muitos casos, a quantidade de resíduos gerados ainda não é suficiente para garantir economia de escala, o que limita o

desenvolvimento de infraestrutura dedicada e reduz o interesse industrial (ESPER *et al.*, 2016).

As tecnologias atualmente disponíveis para reciclagem de pás eólicas podem ser classificadas em três principais categorias: mecânica, térmica e química, cada uma com vantagens e limitações específicas.

A reciclagem mecânica consiste na trituração das pás em partículas menores, que podem ser utilizadas como carga em novos materiais, como concreto, asfaltos ou compósitos de menor desempenho. Apesar de ser uma tecnologia relativamente simples e de menor custo, esse processo resulta em perda significativa das propriedades mecânicas das fibras, o que reduz o valor agregado do material reciclado e limita suas aplicações (ALBUQUERQUE, 2025).

Os processos térmicos, como a pirólise, envolvem a decomposição da matriz polimérica por meio de altas temperaturas, permitindo a recuperação das fibras de reforço. No entanto, esses processos apresentam elevado consumo energético e podem gerar emissões gasosas que necessitam de controle ambiental. Além disso, a qualidade das fibras recuperadas pode ser comprometida, especialmente no caso das fibras de vidro, que apresentam redução significativa de resistência mecânica após o processo, o que limita sua reutilização em aplicações estruturais (ESPER *et al.*, 2016).

A reciclagem química, por sua vez, inclui técnicas como a solvólise, nas quais solventes específicos são utilizados para degradar a matriz polimérica e recuperar as fibras com menor perda de propriedades. Embora essa abordagem apresente resultados promissores em termos de qualidade dos materiais recuperados, ela ainda enfrenta desafios relacionados ao alto custo dos solventes, à necessidade de condições operacionais controladas (como pressão e temperatura elevadas) e à dificuldade de escalonamento industrial (ALBUQUERQUE, 2025).

A Tabela 4 traz um resumo das principais formas de reciclagem de materiais compósitos termorrígidos e suas principais características.

Tabela 4 - Métodos de reciclagem de compósitos termorrígidos e suas características.

Método de reciclagem	Características
Mecânica	Trituração dos resíduos
Térmica	Queima controlada do material
Química	Uso de reagentes químicos

Fonte: Adaptado de Fernandes *et. al* (2021).

Diante das limitações técnicas, econômicas e ambientais associadas à reciclagem de pás eólicas, o reuso adaptativo surge como uma estratégia promissora, uma vez que busca preservar as propriedades estruturais das pás e ampliar seu ciclo de vida. No entanto, a adoção dessa abordagem requer uma análise criteriosa de diferentes fatores que influenciam sua aplicabilidade prática. Assim, torna-se fundamental estabelecer critérios que permitam avaliar a viabilidade do reuso adaptativo.

4.2 Critérios para viabilidade do reuso adaptativo de pás eólicas

A viabilidade da utilização de pás eólicas descomissionadas em novas aplicações não depende de um único critério isolado, mas sim de uma análise integrada que envolve diversos aspectos. A literatura recente demonstra que o reuso desses componentes deve ser avaliado de forma a considerar desde as condições residuais do material até sua adaptação funcional e os impactos associados ao seu ciclo de vida. Nesse contexto, diferentes autores convergem ao indicar que a tomada de decisão deve estar fundamentada em critérios técnicos bem definidos, capazes de garantir segurança estrutural, viabilidade econômica e benefícios ambientais (MISHNAEVSKY Jr., 2021; NAGLE, 2022; LUND e MADSEN, 2024).

4.2.1 Avaliação estrutural

Um dos aspectos mais críticos refere-se às propriedades mecânicas e à integridade estrutural das pás após o descomissionamento, as quais estão diretamente relacionadas à sua durabilidade e confiabilidade em uma nova aplicação. Esses componentes são projetados para suportar carregamentos complexos ao longo de décadas de operação, o que implica a possibilidade de degradação por fadiga, delaminação (separação das camadas que compõem o material), microfissuração e danos internos acumulados. Dessa forma, a reutilização exige uma avaliação detalhada da resistência residual dos materiais compósitos, uma vez que falhas internas podem comprometer significativamente o desempenho estrutural, mesmo quando não são visíveis externamente. Para isso, a literatura aponta o uso de técnicas de inspeção não destrutiva (NDT), como ultrassom, termografia infravermelha e emissão acústica, que permitem identificar danos internos e mapear regiões críticas da pá sem comprometer sua integridade (CIVERA; SURACE, 2022; QIN *et al.*, 2026).

Além da inspeção inicial, a avaliação da viabilidade estrutural envolve a realização de ensaios mecânicos e análises de fadiga, que permitem verificar a capacidade resistente do

material e seu comportamento sob carregamentos repetitivos.

Estudos mostram que a fadiga é o principal mecanismo de falha em pás eólicas, sendo fundamental avaliar a quantidade de ciclos já acumulados e sua influência na vida útil remanescente. Ensaaios em escala real e testes laboratoriais têm sido utilizados para simular condições operacionais e validar o desempenho estrutural de pás descomissionadas, evidenciando que, em muitos casos, esses componentes ainda apresentam capacidade resistente suficiente para aplicações secundárias, desde que devidamente avaliados (ZHOU *et al.*, 2014; OLABI *et al.*, 2021). Nesse cenário, destaca-se também a importância da modelagem da vida útil e da confiabilidade estrutural, que busca estimar o tempo de serviço seguro na nova aplicação. Métodos baseados em curvas de fadiga, mecânica do dano e monitoramento estrutural permitem prever a evolução de falhas e a probabilidade de ruptura ao longo do tempo. Estudos recentes propõem abordagens integradas que combinam técnicas experimentais e modelos analíticos para avaliar a integridade estrutural de componentes reutilizados, demonstrando que é possível quantificar a confiabilidade dessas estruturas e validar seu uso em aplicações de engenharia (JOHST *et al.*, 2025; RAMASWAMY *et al.*, 2025b). Dessa forma, a durabilidade do material reutilizado não depende apenas do seu estado inicial, mas também do histórico de uso e das condições futuras.

A escolha do tipo de processamento e adaptação das pás também exerce papel central, especialmente no que diz respeito à prevenção de concentrações de tensões e à manutenção do desempenho estrutural. O corte, a perfuração e a conexão dos elementos reutilizados devem ser projetados de forma a minimizar descontinuidades geométricas, que podem atuar como pontos críticos para o início de falhas. A literatura destaca que a viabilidade do reuso está fortemente associada à capacidade de aproveitar a geometria original das pás, reduzindo a necessidade de modificações significativas e, conseqüentemente, preservando suas propriedades mecânicas (JOUSTRA *et al.*, 2021).

4.2.2 Avaliação da logística de transporte

Outro aspecto importante está relacionado à logística de transporte e manuseio das pás descomissionadas, frequentemente apontado como um dos principais desafios práticos para o reuso. Devido às suas grandes dimensões, o transporte dessas estruturas pode implicar custos elevados e dificuldades operacionais significativas. Estudos mostram que, em muitos casos, a viabilidade do reuso está diretamente ligada à proximidade entre o local de descomissionamento e a nova aplicação, sendo comum a necessidade de realizar o corte ou a

segmentação das pás ainda no local de origem. No entanto, essas intervenções devem ser cuidadosamente planejadas, pois podem influenciar diretamente a integridade estrutural e a distribuição de tensões no material (LUND, MADSEN, 2024; ANDRÉ *et al.*, 2024).

Pelo exposto, observa-se que a viabilidade da utilização de pás eólicas descomissionadas está condicionada a uma abordagem integrada na qual, fatores estruturais, logísticos e tecnológicos são analisados de forma interdependente. A ausência de avaliação adequada da integridade estrutural e da vida útil remanescente pode comprometer significativamente a segurança da aplicação, mesmo quando outros critérios são favoráveis. Portanto, o reuso adaptativo dessas estruturas exige não apenas conhecimento técnico sobre materiais compósitos, mas também a aplicação de metodologias consolidadas de avaliação estrutural, capazes de garantir seu desempenho seguro, eficiente e sustentável ao longo do tempo.

4.2.3 Avaliação da viabilidade ambiental e econômica do reuso de pás eólicas (ISO14040 ACV)

A avaliação da viabilidade ambiental e econômica do reuso de pás de aerogeradores é feita, na teoria e na prática industrial, considerando o ciclo de vida completo do material. Diferente de análises simplificadas baseadas apenas no custo inicial ou na disponibilidade do resíduo, estudos recentes demonstram que a tomada de decisão nesse contexto deve ser fundamentada em metodologias consolidadas, principalmente a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e a Análise de Custo do Ciclo de Vida (LCC)¹. Essas ferramentas permitem comparar, de forma quantitativa, o desempenho de soluções baseadas no reuso com alternativas convencionais, como estruturas em aço ou concreto, considerando tanto impactos ambientais quanto custos ao longo do tempo (NAGLE *et al.*, 2022; HENAO *et al.*, 2024).

A ACV é amplamente utilizada para mensurar os impactos ambientais associados ao reuso das pás, abrangendo todas as etapas do sistema, desde o descomissionamento até o fim da nova vida útil do componente. Nesse tipo de análise, são considerados processos como transporte, corte, adaptação e instalação, bem como a substituição de materiais convencionais. Os principais indicadores avaliados incluem emissões de gases de efeito estufa, consumo energético e uso de recursos naturais.

¹LCC (Life Cycle Cost) - sigla mantida em inglês para melhor distinção entre os métodos de avaliação empregados neste trabalho.

Estudos indicam que o reuso direto de pás tende a apresentar vantagens ambientais significativas, sobretudo por evitar a produção de novos materiais estruturais, que geralmente possuem elevada energia incorporada (JOHST *et al.*, 2023; CIEŚLEWICZ *et al.*, 2025). No entanto, esses benefícios podem ser reduzidos em cenários onde há necessidade de transporte de longa distância ou processamento intensivo.

Paralelamente, a LCC é empregada para avaliar a viabilidade econômica das soluções de reuso, considerando não apenas os custos iniciais, mas também despesas ao longo de toda a vida útil da aplicação. Essa análise inclui custos de aquisição (frequentemente reduzidos no caso das pás descartadas), transporte, processamento, adaptação, instalação, manutenção e eventual descarte final. De acordo com Henao *et al.* (2024), o reuso de pás pode se tornar economicamente competitivo em relação a soluções tradicionais, especialmente quando há redução significativa na necessidade de materiais novos. Contudo, o autor também destaca que custos logísticos e de adaptação podem representar uma parcela relevante do investimento total, sendo fatores críticos na determinação da viabilidade econômica.

A integração entre ACV e LCC permite uma análise mais completa, na qual os impactos ambientais são verificados em conjunto com os custos. Essa abordagem tem sido aplicada em diversos estudos de caso, onde é possível comparar diretamente o desempenho ambiental e econômico com soluções convencionais. Os resultados indicam que o reuso pode proporcionar reduções expressivas no consumo de matéria-prima e nas emissões de carbono, ao mesmo tempo em que apresenta custos competitivos, dependendo das condições específicas do projeto (RUANE *et al.*, 2023; SILVERMAN *et al.*, 2026).

A Tabela 5 apresenta uma comparação entre duas tecnologias empregadas para a produção de um poste de transmissão: o sistema construtivo tradicional (postes em aço) e o reuso adaptativo de pás eólicas. Observa-se que, embora as soluções convencionais apresentem maior previsibilidade técnica e logística consolidada, o reaproveitamento das pás, como postes de transmissão (*bladepoles*), ainda em estágio emergente de desenvolvimento, destaca-se pelos benefícios ambientais e pelo potencial de redução no consumo de matérias-primas. No entanto, sua viabilidade econômica está diretamente condicionada a fatores como transporte, processamento e adequação da geometria à nova aplicação, reforçando a necessidade de análises integradas baseadas no ciclo de vida.

Tabela 5 - Tabela comparativa entre construção tradicional e reuso de pás eólicas para produção de um poste de transmissão.

Critério	Construção tradicional (aço)	Reuso de pás eólicas
Custo de material	Elevado, devido à extração e processamento de matéria-prima	Reduzido ou baixo, pois utiliza material já existente (resíduo)
Custo de transporte	Moderado, com logística convencional	Potencialmente elevado devido às grandes dimensões das pás
Processamento	Padronizado, com técnicas consolidadas e amplamente difundidas	Requer adaptação (corte, reforço, ajuste), podendo aumentar custos e tempo
Mão de obra	Convencional, com técnicas amplamente difundidas	Pode exigir mão de obra especializada para adaptação e montagem
Tempo de execução	Moderado	Pode ser reduzido se houver bom aproveitamento da geometria da pá
Desempenho estrutural	Altamente previsível e normatizado	Dependente da integridade residual e avaliação estrutural
Durabilidade	Alta, com comportamento bem conhecido	Variável, depende da vida útil remanescente e condições de uso
Impacto ambiental (CO ₂ , energia)	Elevado (produção intensiva de aço)	Reduzido, devido à reutilização e menor consumo de recursos
Geração de resíduos	Alta (produção e construção)	Baixa (valorização de resíduo existente)
Flexibilidade de projeto	Alta (materiais moldáveis)	Limitada pela geometria original da pá
Viabilidade econômica	Alta previsibilidade	Dependente da logística e nível de adaptação
Viabilidade ambiental	Menor (alto consumo de recursos naturais)	Maior, especialmente em cenários de baixo processamento
Necessidade de avaliação técnica	Baixa, devido à padronização dos materiais e métodos	Alta, exige inspeções, ensaios mecânicos e análise estrutural detalhada

Fonte: Adaptado de NAGLE *et al.* (2022); HENAO *et al.* (2024).

A Análise de Custo do Ciclo de Vida (LCC) de um poste de transmissão de alta-tensão com 30 m de altura, foi avaliada por Henao *et al.* (2024), comparando-se a construção da estrutura em aço com a tecnologia que utiliza pás eólicas descomissionadas (*blade pole*). Utilizando diferentes níveis de tensões (161 e 230 kV) e três específicas configurações de postes (estrutura angular de ancoragem, estrutura com ângulo de passagem e estrutura tangente), os autores observaram que em todos os cenários, a LCCs decorrentes da utilização da *blade pole* apresentaram reduções. Assim, por exemplo, postes de transmissão com 30 m de

altura, tensão de 230 kV, utilizando estrutura angular de ancoragem, construído em aço e construído com pás descomissionadas apresentaram custos totais, respectivos, de US\$ 344.836 e US\$ 221.953 (economia de US 122.883). Tais custos envolvem diferentes etapas da cadeia de suprimento, como por exemplo, reparo e manutenção, instalação, fundação, material e transporte. Esse resultado evidencia que, embora o reuso não elimine custos associados à logística e ao processamento, há uma redução significativa relacionada à substituição de matéria-prima. A Figura 4 mostra a representação de um *blade pole* em uma linha de transmissão de 230 kV

Figura 4 - Representação do *blade pole* em uma linha de transmissão de 230 kV.



Fonte: Bank *et al.* (2018).

4.3 Iniciativas internacionais de reutilização de pás eólicas

O potencial de reaproveitamento de pás eólicas é elevado em escala global, impulsionado pelo crescimento contínuo da energia eólica e pelo consequente aumento no volume de resíduos gerados ao final da vida útil dos aerogeradores. Países europeus, como Alemanha, Dinamarca e Holanda, têm liderado iniciativas de reutilização, impulsionadas por políticas públicas voltadas à economia circular e restrições ao descarte em aterros.

Segundo Lund e Madsen (2024), a implementação de cadeias de valor para o reaproveitamento de pás pode gerar benefícios econômicos, ambientais e sociais, incluindo a criação de novos mercados e empregos. Nesse contexto, diferentes empresas e projetos internacionais, como o mostrado na Figura 4, vêm propondo soluções inovadoras para o

reaproveitamento das pás eólicas, configurando alternativas mais sustentáveis para a gestão desses resíduos, conforme será detalhado nos tópicos a seguir.

4.3.1 Construção de ponte para pedestres

A *Re-Wind Network* foi fundada em 2017 como um consórcio internacional composto por pesquisadores e profissionais da indústria nos Estados Unidos, Reino Unido e Irlanda, com o objetivo de enfrentar a crescente problemática associada aos resíduos de pás de turbinas eólicas. Suas atividades concentram-se no desenvolvimento de soluções para a reutilização de pás fabricadas em PRFV em aplicações estruturais. Nesse contexto, destaca-se a *BladeBridge*, uma *start-up* sediada em *Cork*, Irlanda, formada por pesquisadores vinculados à própria rede, que atua em parceria com parques eólicos e empresas de gestão de resíduos para a aquisição e reaproveitamento de materiais provenientes de pás eólicas descomissionadas.

A empresa é responsável pelo projeto *BladeBridge*, que foi desenvolvido por pesquisadores de instituições como a *Georgia Institute of Technology*, *University College Cork* e *Munster Technological University*, com foco na utilização das pás como vigas estruturais em pontes para pedestres. Nesse projeto, foram utilizadas pás provenientes de turbinas do modelo Nordex N29 (Figura 5), com comprimento original de aproximadamente 13,4 metros.

Figura 5 - Pás eólicas modelo Nordex N29.



Fonte: The Wind Power (2023)

A equipe do *Re-Wind* obteve as pás desativadas de uma empresa com sede na Irlanda do Norte especializada em gestão de ativos de energia eólica. Essas pás, compostas principalmente por materiais compósitos reforçados com fibras, foram reaproveitadas como vigas principais na construção de uma ponte para pedestres com cerca de 5 metros de vão, instalada no condado de *Cork*, na Irlanda (Figura 6).

Figura 6 - Ponte *Midleton-Youghal Greenway* (*Cork*, Irlanda).



Fonte: BladeBridge (2026).

Para avaliar a viabilidade estrutural da aplicação, os pesquisadores realizaram diversos ensaios laboratoriais e análises estruturais (apresentados de forma sucinta no ANEXO A), dentre eles:

- Ensaios de tração e compressão (para determinar as propriedades mecânicas do material compósito);
- Testes de queima de resina (para identificar a fração volumétrica de fibras);
- Análises de rigidez à flexão ao longo do comprimento da pá;
- Ensaios de flexão em quatro pontos (para avaliar o comportamento estrutural sob carregamento).

Os testes acima citados permitiram caracterizar as propriedades estruturais das pás e verificar sua capacidade de suportar esforços típicos de estruturas de pequeno porte. Os resultados indicaram que as pás apresentavam elevada rigidez estrutural (capacidade de uma estrutura resistir a deformações quando submetido a forças externas, mantendo sua forma original) e podiam substituir, em determinadas aplicações, vigas metálicas convencionais utilizadas em pontes.

As análises estruturais demonstraram que, sob uma carga concentrada de aproximadamente 50 quilonewton (kN) aplicada no meio do vão, as tensões geradas nos materiais compósitos permaneceram significativamente abaixo da resistência do material. Isso indicou que a estrutura possuía um alto fator de segurança, confirmando a viabilidade técnica da reutilização das pás como elemento estrutural.

Além da viabilidade estrutural, o projeto *BladeBridge* também demonstrou o potencial da reutilização adaptativa como estratégia de economia circular no setor de energia eólica. Ao reaproveitar pás desativadas em novas infraestruturas, foi possível reduzir a quantidade de resíduos destinados a aterros, além de substituir materiais convencionais como aço e concreto, que possuem elevado impacto ambiental em sua produção.

Assim como a *Rewind Network*, a *Wings for Living* é uma iniciativa vinculada à empresa polonesa ANMET, voltada ao reaproveitamento de pás eólicas descomissionadas, principalmente na produção de mobiliário externo de alto padrão. Seu modelo de atuação está baseado no conceito de *upcycling*, no qual as pás são cortadas em seções menores e reaproveitadas com o mínimo de processamento, preservando suas características estruturais e reduzindo o consumo energético do processo. Mas, além do mobiliário externo, a ANMET também desenvolve soluções em infraestrutura, como pontes para pedestres e ciclistas construídas a partir de pás eólicas reutilizadas. Um exemplo disso, é a instalação de uma ponte na Polônia, como mostram as Figuras 7 e 8. A estrutura é resultado de pesquisas e testes estruturais que comprovaram a viabilidade do uso desses materiais compósitos como elementos de suporte em obras de engenharia.

Figura 7 - Instalação da ponte na Polônia.



Fonte: Anmet (2026).

Figura 8 - Ponte na Polônia.



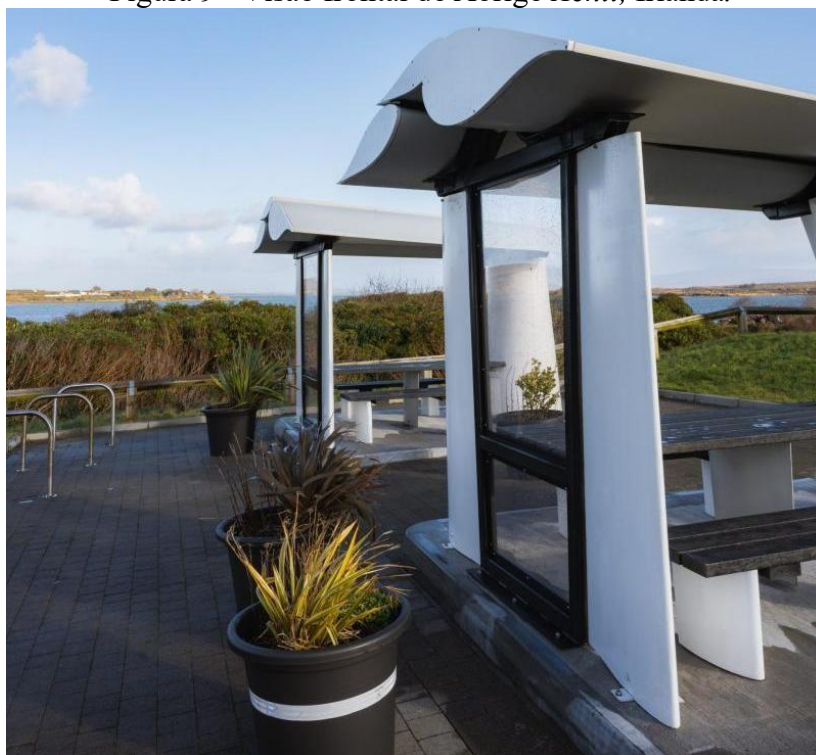
Fonte: Anmet (2026).

4.3.2 Mobilidade urbana e abrigos

Um dos projetos construídos pela empresa *BladeBridge* é o Abrigo *Achill* (*Achill Shelters*), que são dois estacionamentos para bicicletas e áreas cobertas com mesas de piquenique localizados em *Achill Sound*, na entrada da *Achill Greenway* (Condado de *Mayo*, Irlanda), uma trilha de ciclismo e caminhada.

Cada abrigo foi construído reaproveitando uma pá inteira de 20 metros do aerogerador Bonus B39, proveniente do parque eólico de *Barnesmore*, em *Donegal* na Irlanda. As estruturas foram projetadas para resistir ao rigoroso clima costeiro do Condado de *Mayo*, oferecendo estacionamento coberto para bicicletas e incorporando uma janela lateral para que os pais possam supervisionar facilmente as crianças no parquinho adjacente. As Figuras 9 e 10 mostram o abrigo construído.

Figura 9 - Visão frontal do Abrigo *Achil*, Irlanda.



Fonte: BladeBridge (2026).

Figura 10 - Visão superior do Abrigo de *Achil*, Irlanda.



Fonte: BladeBridge (2026).

Além do Abrigo *Achill*, também foi construído o Abrigo de *Rathfarnam*, que é um abrigo com mesa de piquenique de 8 metros e estacionamento para bicicletas (Figura 11), entregue ao Conselho do Condado de *South Dublin* (Irlanda) como parte do Projeto de Melhorias do Distrito de *Rosemount*. Ambos os projetos utilizaram seções de pás Bonus B39 provenientes do Parque Eólico de *Barnesmore*. As seções da corda máxima foram

reaproveitadas como montantes estruturais, os segmentos do meio da pá formaram a estrutura de policarbonato do telhado e as seções da ponta da pá foram transformadas nos pés do banco e da mesa. Essa abordagem de design focada nos materiais maximizou a recuperação de valor de cada componente da pá, ao mesmo tempo que proporcionou uma forma arquitetônica coesa.

Figura 11 - Abrigo de *Rathfarnam* em Dublin, Irlanda.



Fonte: BladeBridge (2026).

4.3.3 Abrigos para passageiros

Além da *BladeBridge*, a *Superuse Studios* é um coletivo internacional de arquitetura e design focado em sustentabilidade e economia circular fundado em 1977 e conhecido também, por reaproveitar materiais existentes, como pás de turbinas eólicas, para construir produtos, interiores e edifícios. Neste contexto, a empresa projetou abrigos para os milhares de passageiros diários que utilizam uma estação de ônibus e trem na Holanda.

O design durável e indestrutível do abrigo utiliza quatro pás de rotor de 30 metros. Duas lâminas de 30 metros foram usadas para criar dois grandes abrigos (Figuras 12 e 13). A forma variável ao longo do comprimento das lâminas proporciona um teto que se transforma em diferentes formas, dependendo do ângulo de visão. Todas as partes de cada lâmina foram aproveitadas.

Figura 12 - Visão frontal de um dos dois abrigos.



Fonte: Denis Guzzo (2026).

Figura 13 - Dois abrigos de ônibus na praça.



Fonte: Denis Guzzo (2026).

4.3.4 Mobiliário urbano

O parquinho *Wikado*, localizado em Roterdã, na Holanda, foi outro projeto desenvolvido pelo escritório de arquitetura *Superuse Studios*, que posteriormente originou a iniciativa *Blade-Made*, voltada especificamente para reaproveitamento de pás de turbinas eólicas em projetos urbanos. Esse parquinho foi construído utilizando cinco pás de turbinas eólicas desativadas, que foram cortadas e reorganizadas para formar diferentes estruturas de lazer. As pás foram posicionadas tanto verticalmente quanto horizontalmente, criando torres, túneis, pontes e escorregadores que compõem o espaço recreativo (Figura 14).

Figura 14 - Parquinho Wikado, Holanda.



Fonte: Denis Guzzo (2026).

Uma das cinco lâminas de 30 m foi usada intacta. A parte cilíndrica da lâmina de 30 m tem 1,4 m de diâmetro, um tamanho adequado para crianças que podem usar o espaço interno para brincar. As quatro lâminas restantes foram cortadas em três seções; suas extremidades cilíndricas foram transformadas em torres, colocadas ao redor da zona central. Cada torre tem uma característica distinta e reconhecível:

- a “torre - apartamento” possui três cômodos com buracos para espiar;
- a “torre de vigia” tem um antigo *cockpit* de F16 (cabine de pilotagem de um caça) no topo;
- a “torre d’água” tem uma bomba manual para as crianças encherem de água para misturar com areia;
- e a “torre do escorregador” é onde ficavam os antigos escorregadores.

As lâminas sobrepostas compõem uma diversidade de espaços para diferentes faixas etárias e atividades. A intenção era criar um labirinto onde as crianças pudessem correr uma atrás das outras indefinidamente entre os elementos, encontrando também abrigo nos espaços internos para diferentes formas de brincar (Figura 15).

Figura 15 - Vista interior do parquinho.



Fonte: Denis Guzzo (2026).

A reutilização de pás eólicas descomissionadas em diferentes aplicações, como no projeto de parque infantil em Roterdã, na Holanda, envolve uma sequência de etapas técnicas cuidadosamente planejadas para garantir segurança e funcionalidade. Conforme descrito por Albuquerque (2024), inicialmente as pás passam por inspeções para avaliação de sua integridade estrutural. Em seguida, são submetidas a processos de corte e conformação, permitindo sua adaptação em elementos recreativos, como túneis e rampas.

O corte é realizado com o uso de equipamentos especializados, de modo a preservar as propriedades mecânicas do material compósito e evitar a formação de arestas cortantes, assegurando a segurança dos usuários, especialmente no caso de crianças.

Outra iniciativa desenvolvida pela *Blade-Made*, foi um conjunto de bancos instalados em *Willemsplein*, uma praça pública localizada em Roterdã, na Holanda, produzidos a partir de seções de pás eólicas reutilizadas, como pode ser observado nas Figuras 16 e 17.

Figura 16 - Conjuntos de bancos em Roterdã, Holanda.



Fonte: Denis Guzzo (2026).

Figura 17 - Conjuntos de bancos em Roterdã (nova pintura).



Fonte: Denis Guzzo (2026).

Outra empresa que trabalha com mobiliário urbano é a *Canvus*, empresa sediada nos Estados Unidos que atua na reutilização de pás eólicas descomissionadas, transformando-as em bancos, mesas, jardineiras e estruturas para espaços públicos. Seu modelo de atuação baseia-se no conceito de *upcycling*, assim como a empresa ANMET.

O processo produtivo envolve o corte das pás, geralmente em segmentos de aproximadamente 12 metros, seguido de etapas de acabamento, como limpeza, selagem e pintura com resina epóxi. Além disso, a empresa integra outros materiais reciclados, como

borracha proveniente de pneus e plásticos reaproveitados, aumentando o caráter sustentável dos produtos. Em alguns casos, cada pá pode gerar dezenas de peças de mobiliário, ampliando significativamente o aproveitamento do material.

A *Canvus* também se destaca pelo seu modelo colaborativo, estabelecendo parcerias com organizações sem fins lucrativos e entidades públicas para instalar seus produtos em cidades e comunidades. Os mobiliários podem ser patrocinados por empresas ou cidadãos, promovendo engajamento social e viabilizando financeiramente os projetos. Adicionalmente, a empresa trabalha com artistas que realizam intervenções visuais nas peças, transformando-as em elementos de arte funcional nos espaços urbanos.

Nas Figuras 18 e 19, observa-se um exemplo de bancos produzidos a partir de pás eólicas reutilizadas pela *Canvus*, evidenciando a aplicação prática dessa abordagem em espaços públicos e o potencial estético e funcional desse tipo de solução.

Figura 18 - Bancos da *Canvus* em *Cleveland*, Estados Unidos.



Fonte: Desing World (2024).

Figuras 19 – Banco no parque *Every Child's Playground*, em Avon, Ohio.



Fonte: Desing World (2024).

Além da ponte para pedestres, a empresa ANMET é responsável por produtos que abrangem tanto mobiliário urbano quanto residencial, apresentando acabamento artesanal e direcionamento para aplicações de menor escala e maior valor agregado. Entre as principais aplicações destacam-se píeres de pesca e recreação, abrigos de estacionamento, torres de observação, instalações artísticas, bicicletários e reforços de taludes, além da produção de peças sob encomenda. As Figuras 20 a 23 ilustram alguns exemplos desses mobiliários e suas diferentes possibilidades de aplicação.

Figura 20 - Arte feita com pás eólicas.



Fonte: Anmet (2026).

Figura 21 - Píer feito com pá eólica.



Fonte: Anmet (2026).

Figura 22 - Banco de praça feito com pá eólica.



Fonte: Anmet (2026).

4.4 Iniciativas nacionais de reutilização de pás eólicas

No Brasil, o setor eólico tem apresentado crescimento significativo, especialmente na região Nordeste, que concentra a maior parte da capacidade instalada. No entanto, ainda há uma lacuna significativa em relação à gestão do fim de vida das turbinas. O país apresenta grande potencial para o desenvolvimento de soluções de reaproveitamento, devido à disponibilidade de matéria-prima (pás desativadas), demanda por infraestrutura e necessidade de soluções sustentáveis. Além disso, o reaproveitamento pode ser integrado a políticas públicas de economia circular e desenvolvimento regional. Entretanto, para que esse potencial seja efetivamente explorado, é necessário avançar em áreas como regulamentação, incentivo

econômico, pesquisa e capacitação técnica, de modo a viabilizar o reaproveitamento em escala mais ampla. Nesse contexto, algumas iniciativas nacionais começam a emergir, principalmente no âmbito acadêmico e experimental. Um estudo feito por Andrade *et al.*, (2024) investigou o reaproveitamento de compósitos de pás eólicas na construção civil, especialmente na forma de elementos estruturais ou mobiliário urbano, como vigas, passarelas e abrigos, aproveitando a alta resistência mecânica desses materiais. Essa proposta demonstra viabilidade técnica e potencial aplicação em habitações populares, sobretudo em regiões com déficit habitacional.

No setor industrial da energia eólica, ainda são limitadas as iniciativas estruturadas, mas há registros de empresas e fornecedores da cadeia eólica que têm buscado desenvolver soluções para redução de resíduos, incluindo o reaproveitamento de núcleos estruturais e materiais poliméricos provenientes da fabricação de pás. Essas ações indicam uma movimentação inicial do setor industrial em direção à sustentabilidade, ainda que sem ampla escala ou padronização (RAMOS JÚNIOR; ALMEIDA, 2021).

Apesar das iniciativas citadas, observa-se que o Brasil ainda se encontra em estágio inicial quando comparado a países europeus, onde soluções de reutilização já são aplicadas em escala comercial. Dessa forma, o avanço das iniciativas nacionais depende da criação de políticas públicas específicas, incentivos à inovação e fortalecimento da pesquisa aplicada, visando transformar o passivo ambiental das pás eólicas em oportunidades econômicas e sociais.

4.5 Desafios e limitações do reuso adaptativo de pás eólicas

Apesar de seu elevado potencial, o reaproveitamento de pás eólicas enfrenta uma série de desafios que limitam sua implementação em larga escala. Esses desafios envolvem aspectos logísticos, técnicos, econômicos e regulatórios, exigindo abordagens integradas para sua superação.

Do ponto de vista logístico, as grandes dimensões das pás representam um obstáculo relevante, dificultando seu transporte e manuseio. Esse fator pode elevar significativamente os custos operacionais e limitar a viabilidade de projetos de reaproveitamento, especialmente em regiões distantes dos locais de descarte.

Em termos técnicos, a heterogeneidade dos materiais compósitos dificulta processos de adaptação e padronização. As pás são compostas por diferentes camadas de fibras e resinas, o que exige técnicas específicas de corte, conexão e reaproveitamento (MISHNAEVSKY Jr.,

2021).

No aspecto econômico, os custos associados ao reaproveitamento ainda são elevados, principalmente devido à ausência de processos padronizados e à falta de escala industrial. Além disso, a competitividade com materiais convencionais ainda representa um desafio.

Há também barreiras regulatórias, uma vez que normas técnicas e códigos de construção nem sempre contemplam o uso de materiais reaproveitados, o que pode dificultar sua aprovação em projetos de engenharia.

Por fim, questões relacionadas à segurança estrutural e durabilidade exigem estudos aprofundados, incluindo análises de fadiga, resistência e comportamento em diferentes condições ambientais.

4.6 Futuras aplicações de reuso adaptativo

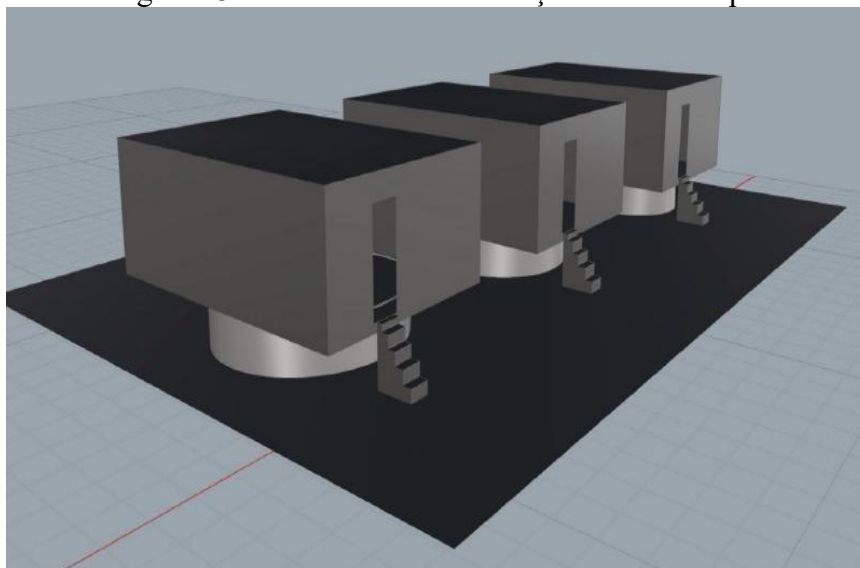
Diante do crescimento da geração de resíduos provenientes de pás eólicas ao final de sua vida útil, a literatura científica tem direcionado esforços para o desenvolvimento de novas aplicações de reuso, com foco na ampliação da escala e na viabilidade técnica e econômica dessas soluções. Embora diversas iniciativas já tenham sido apresentadas, observa-se que grande parte das propostas ainda encontra-se em estágio conceitual ou experimental, exigindo avanços adicionais para sua consolidação.

Uma das principais perspectivas está relacionada ao reuso de pás eólicas em estruturas de maior porte, como pontes, elementos portantes (partes da estrutura que sustentam o peso da construção) em edificações e postes de transmissão, que apesar dos resultados promissores, ainda se encontra em estágio de desenvolvimento e demonstração. Estudos como os de Alshannaq *et al.* (2021) e Joustra *et al.* (2021) indicam que as propriedades mecânicas das pás permitem sua aplicação como componentes estruturais, especialmente quando segmentadas e adaptadas para usos específicos. Essa abordagem possibilita o aproveitamento direto do material, preservando sua resistência e reduzindo a necessidade de processamento industrial. No entanto, desafios como a variabilidade geométrica, a avaliação de danos e a ausência de padronização ainda limitam sua aplicação em larga escala.

No campo da construção civil, destaca-se o potencial de aplicação em sistemas construtivos e habitação, especialmente em contextos de baixo custo. Um dos estudos mais relevantes nesse sentido é apresentado por Bank *et al.* (2018), que propõem o aproveitamento de segmentos de pás na construção de habitações de interesse social. Os autores demonstram, de forma conceitual, que componentes estruturais das pás (como seções curvas e reforçadas)

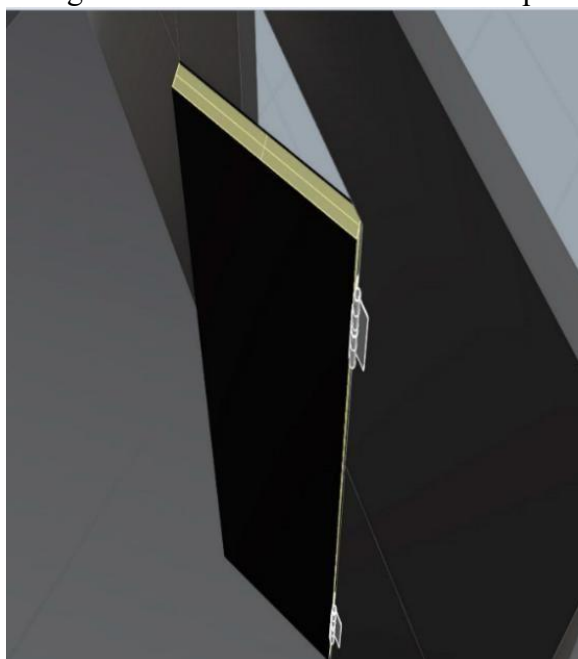
podem ser adaptados para uso em coberturas, paredes, portas, etc., como mostram as Figuras 24 a 27, aproveitando suas propriedades mecânicas e resistência a condições ambientais severas. O estudo também destaca a aplicabilidade em regiões costeiras sujeitas a eventos extremos, onde os materiais compósitos podem oferecer maior durabilidade em comparação a soluções convencionais. Apesar de promissora, a proposta ainda se encontra em estágio de desenvolvimento conceitual, dependendo de validações experimentais, padronização e análise de viabilidade econômica para sua implementação em larga escala.

Figura 23 - Casas elevadas em seções da raiz da pá.



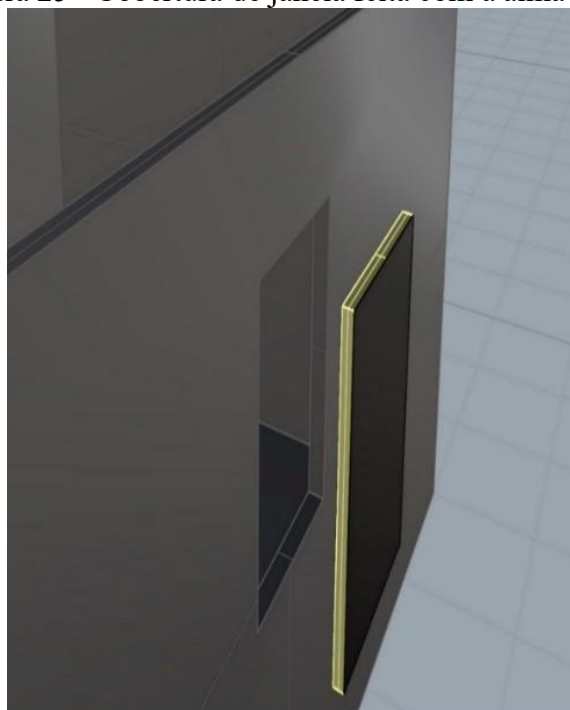
Fonte: Bank et al. (2018).

Figura 24 - Porta feita com a alma da pá.



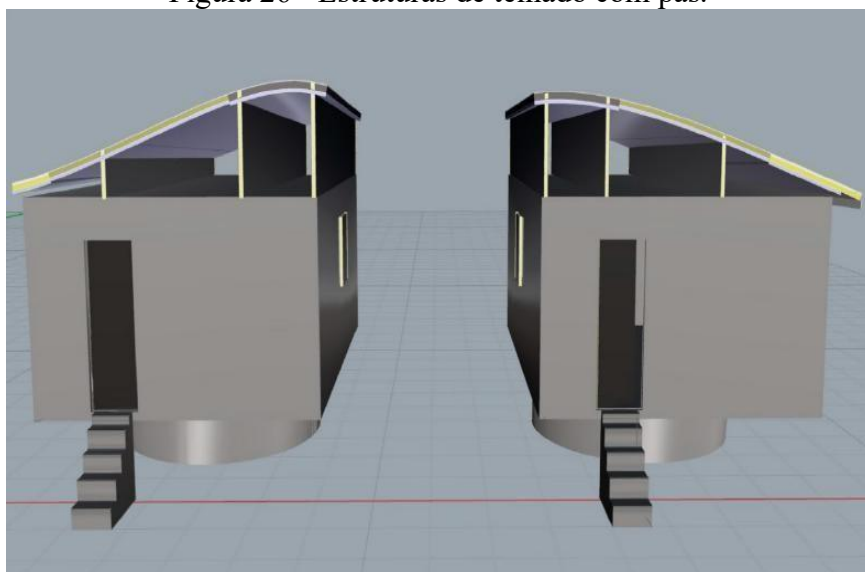
Fonte: Bank et al. (2018).

Figura 25 - Cobertura de janela feita com a alma da pá.



Fonte: Bank et al. (2018).

Figura 26 - Estruturas de telhado com pás.



Fonte: Bank et al. (2018).

Observa-se, portanto, que as futuras aplicações de reuso de pás eólicas apresentam elevado potencial, especialmente no contexto da economia circular e da construção sustentável. No entanto, sua consolidação depende da integração entre avanços tecnológicos, desenvolvimento normativo e articulação entre setor público, privado e academia, de modo a transformar soluções atualmente experimentais em práticas amplamente adotadas.

4.7 Análise crítica e perspectivas para o contexto brasileiro

A análise das iniciativas mostra que o reaproveitamento de pás eólicas apresenta potencial significativo para reduzir os impactos ambientais associados ao descarte desses componentes ao final de sua vida útil. No entanto, as diferentes aplicações identificadas apresentam níveis distintos de estágio de desenvolvimento, viabilidade econômica e potencial de aplicação em larga escala. Dessa forma, torna-se necessário comparar as alternativas disponíveis, considerando não apenas seus benefícios ambientais, mas também os desafios relacionados à sua implementação. A Tabela 6 mostra as vantagens e limitações de cada alternativa vista anteriormente.

Tabela 6 - Comparação das principais alternativas de reaproveitamento de pás eólicas.

Alternativa	Vantagens	Limitações
Aplicações estruturais	Elevado aproveitamento das propriedades originais da pá; redução do uso de aço e concreto	Necessidade de certificação estrutural e ensaios específicos
Arquitetura e urbanismo	Possibilita soluções inovadoras e sustentáveis; valor estético agregado	Aplicação limitada a projetos específicos
Infraestrutura urbana e rural	Menor necessidade de processamento; aproveitamento de grandes segmentos das pás	Custos logísticos e ausência de normas específicas
Design e arte	Facilidade de implementação; promoção da conscientização ambiental	Aplicações pontuais e poucas pás descartadas são reutilizadas

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Observa-se que as aplicações relacionadas ao *design* e às artes possuem importante papel na disseminação de conceitos associados à sustentabilidade e à economia circular. Entretanto, elas utilizam apenas uma pequena parcela do material disponível e, portanto, possuem impacto limitado na solução do problema do descarte em larga escala. De forma semelhante, aplicações arquitetônicas podem gerar resultados positivos do ponto de vista ambiental e estético, porém geralmente estão associadas a projetos pontuais e de menor abrangência. Por outro lado, as aplicações estruturais e de infraestrutura destacam-se por possibilitarem o aproveitamento de grandes segmentos das pás, preservando grande parte de suas propriedades mecânicas originais. Além de reduzir a geração de resíduos, essa

abordagem contribui para a diminuição da demanda por matérias-primas convencionais, como aço e concreto, ampliando os benefícios ambientais associados ao reaproveitamento.

No contexto brasileiro, as aplicações voltadas à infraestrutura urbana e rural apresentam maior potencial de implementação. Isso ocorre porque grande parte dos parques eólicos encontra-se localizada em regiões que demandam investimentos contínuos em infraestrutura, especialmente no Nordeste. Elementos como passarelas, cercas, abrigos e estruturas de contenção podem ser produzidos com menor necessidade de processamento dos materiais, reduzindo custos operacionais e aumentando a viabilidade econômica dos projetos.

Apesar das oportunidades identificadas, diversos desafios ainda precisam ser superados para que o reaproveitamento de pás eólicas seja implementado em larga escala no Brasil. Entre os principais obstáculos destacam-se os custos associados ao transporte de componentes de grandes dimensões, a necessidade de estudos para avaliação da integridade estrutural das pás após sua vida útil operacional e a inexistência de normas técnicas específicas para regulamentar seu reaproveitamento.

Outro aspecto relevante refere-se à regulamentação. Atualmente, não existem normas brasileiras específicas voltadas ao reuso adaptativo de pás eólicas. Entretanto, normas como a ABNT NBR 8681:2025 (ações e segurança nas estruturas), a ABNT NBR 6118:2023 (projeto de estruturas de concreto) e a ABNT NBR 8800:2024 (projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas) podem servir como base para o desenvolvimento de futuras regulamentações. A criação de diretrizes específicas para inspeção, caracterização estrutural, durabilidade e segurança dos componentes reutilizados constitui uma etapa fundamental para ampliar a confiança técnica e a aceitação dessas soluções.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo analisar o potencial do reuso adaptativo de pás eólicas como alternativa para a gestão sustentável desses componentes ao final de sua vida útil, considerando seus aspectos técnicos, ambientais e econômicos. A partir da revisão da literatura e da análise de iniciativas já desenvolvidas, foi possível compreender que, embora a energia eólica desempenhe um papel importante na transição energética global, sua expansão está diretamente associada ao surgimento de novos desafios ambientais, especialmente relacionados à destinação final das pás de aerogeradores. Neste contexto, verificou-se que as pás eólicas, devido à sua composição em materiais compósitos de elevada resistência e baixa biodegradabilidade, representam uma dificuldade significativa para a gestão de resíduos, uma vez que os métodos tradicionais de descarte (como a disposição em aterros e o coprocessamento), não são considerados soluções sustentáveis. Diante disso, o reuso adaptativo se destaca como uma alternativa promissora, ao possibilitar a extensão do ciclo de vida desses materiais, mantendo, em grande parte, suas propriedades estruturais e reduzindo a necessidade de novos recursos naturais.

A análise das iniciativas existentes evidencia que o reuso adaptativo vem sendo aplicado, principalmente, em projetos de menor complexidade estrutural, como mobiliário urbano, elementos arquitetônicos e pequenas infraestruturas, nos quais as exigências normativas são menos restritivas e a adaptação das pás é mais viável. Por outro lado, aplicações de maior porte, como pontes e estruturas de engenharia civil, ainda se encontram com poucas aplicações. Além disso, foram evidenciadas limitações relevantes que dificultam a consolidação do reuso em larga escala, como a variabilidade geométrica das pás, os desafios logísticos associados ao transporte e adaptação, e a ausência de normativas específicas que orientem sua reutilização. Tais fatores indicam que, apesar do potencial técnico do reuso adaptativo, sua viabilidade ainda depende de avanços no campo da engenharia, da padronização de processos e do desenvolvimento de diretrizes regulatórias.

Do ponto de vista ambiental, o reuso adaptativo apresenta vantagens significativas ao evitar processos industriais intensivos e prolongar a vida útil de materiais compósitos. No entanto, sua aplicabilidade está relacionada à compatibilidade entre as características estruturais das pás e as exigências das novas aplicações, o que limita sua adoção de forma universal.

No contexto brasileiro, observa-se que o reuso adaptativo de pás eólicas ainda é pouco explorado, mesmo diante do crescimento expressivo da capacidade instalada de energia eólica

no país. Esse cenário revela uma lacuna entre o avanço tecnológico do setor energético e o desenvolvimento de soluções para a gestão dos resíduos gerados, evidenciando a necessidade de maior integração entre políticas públicas, setor industrial e meio acadêmico.

Conclui-se, que o reuso adaptativo de pás eólicas possui elevado potencial como alternativa sustentável para a gestão desses resíduos, contribuindo para a redução de impactos ambientais e para a valorização de materiais descartados. Entretanto, sua efetiva consolidação depende de avanços técnicos, da criação de normativas específicas, da redução de custos logísticos e do fortalecimento de políticas públicas e incentivos que viabilizem sua aplicação em maior escala.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, M. C. G.; FONSECA, M. B. H. Fim da vida útil de pás eólicas: reutilização e reciclagem. Roraima, 2025. **Revista de Ciência e Tecnologia**. ISSN 2447-7028.
- ALEMANHA. **Lei da Economia Circular (2012)**. Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG). Berlin: Bundesgesetzblatt (BGBl.), v. I, p. 212, 24 fev. 2012. Disponível em: www.gesetze-im-internet.de. Acesso em: 14 mar. 2026.
- ALSHANNAQ, A.A.; BANK, L.C.; SCOTT, D.W.; GENTRY, R. A. Decommissioned Wind Blade as a Second-Life Construction Material for a Transmission Pole. **Constr. Mater.** 2021, 1, 95–104. DOI: 10.3390/constrmater1020007.
- AMERICAN WIND ENERGY ASSOCIATION – AWEA. **Decommissioning**. 2020. Disponível em: <https://www.awea.org/policy-and-issues/project-development/state-and-local-ermitting/decommissioning>. Acesso em: 24 fev. 2026
- ANDRADE, M. A. S.; ROCHA, E. J. T.; ALEXANDRIA, A. R. (2024). Reutilização de compósitos eólicos em moradias populares. **Revista Ouricuri**. Disponível em: <https://www.revistas.uneb.br/ouricuri/article/view/19636>. Acesso em: 14 abr. 2026.
- ANDRÉ, A.; BRU, T.; ABBASI, A. G.; SINHA, S.; NUNES, S.; JUNTIKKA, M.; KAZMIERCZAK, K.; EGILSSON, N. O.; FRID, G.; SOBCZYK, M.; HAGHANI, R. A **holistic and circular approach for managing end-of-service wind turbine blades**. Sustainability, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/17/7858>. Acesso em: 2 abr. 2026.
- ANMET, 2026. **Obras e projetos**. Disponível em: <https://www.anmet.com.pl/multimedia/prace-i-realizacje/>. Acesso em: 18 mar. 2026.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA E NOVAS TECNOLOGIAS – ABEEÓLICA, 2025. **Boletim Anual 2024**. Disponível em: <https://abeeolica.org.br/energia-eolica/dados-abeeolica/>. Acesso em: 10 fev. 2026.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA E NOVAS TECNOLOGIAS – ABEEÓLICA, 2025. **O Setor: Desenvolvimento da Eólica no Brasil**. Disponível em: <https://abeeolica.org.br/energia-eolica/o-setor/>. Acesso em: 10 fev. 2026.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 10004:2024-1 - **Resíduos sólidos – Classificação. Part 1: Requisitos de Classificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 8681:2025 - **Ações e segurança nas estruturas - Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2025.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6118:2023 - **Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 8800:2024-

Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 14040:2025-
Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro: ABNT, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO 14044:2025
Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações. Rio de Janeiro: ABNT, 2025.

ÁVILA, Rafael (2021). **Repense seus hábitos com os 7 Rs da Sustentabilidade.** Disponível em: <https://sustentabilidadeagora.com.br/os-7-rs-da-sustentabilidade/>. Acesso em: 17 mar. 2026

BAHIA. **Lei nº 12.932, de 7 de janeiro de 2014.** Institui a Política Estadual de Resíduos Sólidos, e dá outras providências. Diário Oficial do Estado da Bahia, Salvador, 8 jan. 2014. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=264190>. Acesso em: 16 mar. 2026.

BANK, L. C.; ARIAS, F. R.; YAZDANBAKHS, A.; GENTRY, T. R.; AL-HADDAD, T.; CHEN, J.-F.; MORROW, R. (2018). **Concepts for Reusing Composite Materials from Decommissioned Wind Turbine Blades in Affordable Housing.** Recycling, v. 3, n.3.

BLADEBRIDGE, 2022. **Repurposing Solutions.** Disponível em: <https://bladebridge.ie/>. Acesso em: 03 mar. 2026.

BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMASCHUTZ, NATURSCHUTZ UND NUKLEARE SICHERHEIT - BMUKN, 2009. **Regulamento sobre o descarte ambientalmente correto de resíduos urbanos.** Disponível em: <https://www.bundesumweltministerium.de/gesetz/verordnung-ueber-die-umweltvertragliche-ablagerung-von-siedlungsabfaellen-und-ueber-biologische-abfallbehandlungsanlagen>. Acesso em: 28 maio 2026.

BRASIL, **LEI Nº 12.305 de 2 de Agosto de 2010.** Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm. Acesso em: 02 de mar. 2026.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 462, de 24 de julho de 2014.** Estabelece procedimentos para o licenciamento ambiental de empreendimentos de geração de energia elétrica a partir de fonte eólica em superfície terrestre. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 2014. Disponível em: <https://conama.mma.gov.br>. Acesso em: 7 jun. 2026.

BURTON, T.; SHARPE, D.; JENKINS, N.; BOSSANYI, E. **Wind Energy Handbook.** 2. ed. Chichester: Wiley, 2011.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução.** 9ª ed. LTC, 2016

CANADIAN WIND ENERGY ASSOCIATION (CanWEA). **Decommissioning/Repowering a Wind Farm**. Disponível em: canwea.ca . Acesso em 15 mar. 2026.

CEARÁ. **Lei nº 16.032, de 20 de junho de 2016**. Institui a Política Estadual de Resíduos Sólidos no âmbito do Estado do Ceará. Diário Oficial do Estado do Ceará, Fortaleza, 29 jun. 2016. Disponível em: <https://mpce.mp.br/wp-content/uploads/2015/12/Lei-Estadual-n%C2%BA16.032-2016-Institue-a-Pol%C3%ADtica-Estadual-de-Res%C3%ADduos-S%C3%B3lidos-no-Estado-do-Cear%C3%A1.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2026.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO – CRESESB, 2012. **Quais são os componentes de um aerogerador?**. Disponível em: https://cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&cid=13&filter%5B%5D=l. Acesso em: 02 mar. 2026.

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.

CHINA. **Law of the People's Republic of China on the Prevention and Control of Environmental Pollution by Solid Waste**. Pequim: Standing Committee of the National People's Congress, 29 abr. 2020. Disponível em: <https://www.gov.cn/>. Acesso em: 16 mar. 2026.

CIEŚLEWICZ, N.; PILARSKI, K.; PILARSKA, A. A. **End-of-life strategies**. **Energies**, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/18/19/5182>. Acesso em: 2 abr. 2026.

CIVERA, M.; SURACE, C. **Structural health monitoring of wind turbines**. **Sensors**, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/4/1627>. Acesso em: 2 abr. 2026.

CRAWFORD, R. H. **Life Cycle Energy and Greenhouse Emissions Analysis of Wind Turbines and the Effect of Size on Energy Yield**. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 9, p. 2653–2660, 2009.

DENIS G.; 2026. **Work: Superuse**. Disponível em: <https://www.denisguzzo.com/work-photography-superuse>. Acesso em: 15 mar. 2026.

DESING WORLD, 2024. **Recycled wind turbine blades make artful furniture for public spaces**. Disponível em: <https://www.designworldonline.com/recycled-wind-turbine-blades-make-artful-furniture-for-public-spaces/>. Acesso em: 20 mar. 2026.

DUTRA, R. (org.). **Energia eólica: princípios e tecnologia**. Rio de Janeiro: CRESESB, 2008.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2010. **What is the meaning of a circular economy and what are the main principles?**. Disponível em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview>. Acesso em: 1 mar. 2026

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA -EPE. **Empreendimentos eólicos ao fim da vida útil Situação Atual e Alternativas Futuras**. 2021. Disponível em:

<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-563/NT-EPE-DEE-012-2021.pdf>. Acesso em 20 fev. 2026.

ENERGÊS, CONSULTORIA E TREINAMENTO LTDA. **Componentes do Aerogerador que você Precisa Conhecer**, 2020. Disponível em: <https://energes.com.br/componentes-aerogerador/?srsId=AfmBOopVIQ90i-EQG6iNRmMcaRpD-ZCuahCyd4mlfIVSLyYxBAuLuHSv>. Acesso em: 13 mar. 2026.

ENVIRONMENTAL RESEARCH & EDUCATION FOUNDATION - EREF, 2024. **Analysis of MSW Landfill Tipping Fees**. Disponível em: <https://erefdn.org/product/2024-analysis-of-municipal-solid-waste-msw-landfill-tipping-fees/>. Acesso em: 28 maio 2026.

ESPER, F. J.; KERSTING, D. F.; WIEBECK, H. **Estudo sobre o tratamento de resíduos de compósitos estruturais produzidos com fibra de vidro e fibra de carbono - uma revisão**. In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 22, 2016, Natal.

ESTADOS UNIDOS. **Resource Conservation and Recovery Act (1976)**. Public Law 94-580. Washington, DC: U.S. Government Printing Office, 21 out. 1976. Codificado em 42 U.S.C. § 6901 et seq. Disponível em: www.epa.gov. Acesso em: 16 mar. 2026

EUROPEAN COMMISSION. Study on the environmental impacts of rotor blade waste, 2017. **Relatório sobre os desafios do descarte de pás de aerogeradores, destacando o impacto ambiental de materiais compostos em aterros**. Disponível em: <https://ec.europa.eu>. Acesso em: 14 mar. 2026.

FERNANDES, A. P., & PAIVA, J. M. F. (2021). **Aproveitamento de resíduos pós-consumo provenientes de pás eólicas utilizadas na produção de energia: uma revisão sistemática**. *Exacta*, 19(2), 302-323.

FRANÇA. **Ministério da Transição Ecológica**. Arrêté du 22 juin 2020 portant modification des prescriptions relatives aux installations de production d'électricité utilisant l'énergie mécanique du vent au sein d'une installation soumise à autorisation au titre de la rubrique 2980. Paris: Journal Officiel de la République Française, 30 jun. 2020. Disponível em: www.legifrance.gouv.fr. Acesso em: 14 mar. 2026.

GALL, S.; THOMPSON, R. (2015) The impact of debris on marine life. **Marine Pollution Bulletin**, v. 92, n. 1-2, p. 170–179.

GÓMEZ -MARTINEZ, J. (2021). Impact of industrial waste on biodiversity in natural ecosystems. **Journal of Environmental Science**, v. 34, n. 4, p. 233–245.

GALRÃO RENOVÁVEIS, 2022. **Os 7 R's da Sustentabilidade**. Disponível em: <https://galraorenovaveis.pt/index.php/2022/02/08/os-7-rs-da-sustentabilidade/>. Acesso em: 17 mar. 2026.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL – GWEC, 2022. **Sustainable waste management in wind energy: Challenges and opportunities**. Disponível em: <https://gwec.net>. Acesso em: 14 mar. 2026.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL – GWEC, 2026. **Global Wind Report 2026**. Disponível em: <https://www.gwec.net/reports/globalwindreport>. Acesso em: 14 mar. 2026.

HANSEN, M. O. L. **Aerodynamics of Wind Turbines**. 2. ed. London: Earthscan, 2008.

HARDESTY, B. D; SEBILI, E. V.; WILCOX, C. (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.

HENAO, Y.; GRUBERT, E.; KOREY, M.; BANK, L. C.; GENTRY, R. Life cycle assessment and life cycle cost analysis of repurposing decommissioned wind turbine blades as high-voltage transmission poles. **Journal of Construction Engineering and Management**, 2024. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/JCEMD4.COENG-13718>. Acesso em: 2 abr. 2026.

IBERDROLA. **10 termos relevantes energia eólica offshore. Conheça os dez termos mais relevantes da energia eólica offshore com a Iberdrola**, 2026. Disponível em: <https://www.iberdrola.com/quem-somos/nossa-atividade/energia-eolica-offshore/10-termos-relevantes>. Acesso em: 12 de mar. 2026.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION - IEC. **Norma IEC 61400-1: Wind Turbines – Part 1: Design Requirements**. Genebra, 2019.

JENSEN, J. P.; SKELTON, K. Wind turbine blade recycling. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118306233>. Acesso em: 2 abr. 2026.

JOHST, P.; KUCHER, M.; BÜHL, M.; SCHULZ, P.; KUPFER, R.; SCHILLING, L.; SANTOS, R. M.; CARNEIRO, C.; VOIGT, P.; MODLER, N.; BÖHM, R. **Identification and Environmental assessment of repurposed wind turbine blades**. **Circular Economy and Sustainability**, 2023. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42824-023-00085-7>. Acesso em: 2 abr. 2026.

JOHST, P.; LEE, S.; KIM, E.; BAE, S.; BÖHM, R.; NA, W. **Structural integrity assessment using acoustic emission**. **Composites Part B**, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836825003919>. Acesso em: 2 abr. 2026.

JOUSTRA, J.; FLIPSEN, B.; BALKENENDE, R. **Structural reuse of high-end composite products**. **Resources, Conservation & Recycling**, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344920307114>. Acesso em: 2 abr. 2026.

KNUTSON, K. 2019. **Wind farm repowering and decommissioning is big business**. Energy Central. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/wind-farm-repowering-decommissioning-big-business-kent-knutson/>. Acesso em: 20 fev. 2026.

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.

LIU P.; BARLOW C. 2017. Wind turbine blade waste in 2050. **Waste Management**, v. 62, p. 229-240, ISSN 0956-053X.

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.

LIU, P.; BIRKETT, M. Recycling of wind turbine blades: Recent developments. **Journal of Cleaner Production**, v. 174, p. 1079–1090, 2018.

LUND, K. W.; MADSEN, E. S. Value chain roadmap. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2024.

MACHUCA, M. N. **Análise Ambiental, técnica e econômica da pósoperação de parque eólico**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 118p., 2015.

MARINHO, T. (2021). **Os 12 macro-processos de manufatura de pás eólicas**. Disponível em: <https://pt.linkedin.com/pulse/os-12-macro-processos-de-manufatura-das-p%C3%A1s-e%C3%B3licas-thayc-marinho>. Acesso em: 5 mar. 2026

MARTINS, F.R.; GUARNIERI, R.A.; PEREIRA, E.B. **O aproveitamento da energia eólica**. Revista Brasileira de Ensino de Física, [S.L.], v. 30, n. 1, p. 1304.1-1304.13, 2008. FapUNIFESP (SciELO).

MISHNAEVSKY JR, L. Sustainable end-of-life management of wind turbine blades. **Materials**, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/5/1124>. Acesso em: 2 abr. 2026.

MOREIRA, A. M. **Materiais Compósitos**. 2009, 11p. Tese (Graduação em Engenharia Civil) - Instituto Politécnico de Tomar, Portugal, 2009.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL. **Objetivos do Desenvolvimento Sustentável**. 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 01 mar. 2026.

NAGLE, A. J. **Sustainability assessment of the repurposing of wind turbine blades**, 2022. Disponível em: <https://cora.ucc.ie/>. Acesso em: 2 abr. 2026.

NAGLE, A. J; MULLALLY, G.; LEAHY, P. G.; DUNPHY, N. P. Life cycle assessment of the use of decommissioned wind blades in second life applications. **Journal of Environmental Management**, 2022.

NATIONAL GRID, 2024. **The history of wind energy**. Disponível em: https://www.nationalgrid.com/stories/energy-explained/history-wind-energy?_cf_chl_tk=ZlYlFqYS2gCTqHVmA6cdPSYopVyu1IYQOW2CwbN7RA-1774562539-1.0.1.1-EdRQgiJHNXNHg2lcnScRzfelFGfRnmInwycd0i5BxM Acesso em: 06 fev 2026.

NATIONAL DEVELOPMENT AND REFORM COMMISSION OF CHINA - NDRC. **Guidance on the Comprehensive Utilization of Bulk Solid Waste during the 14th Five-**

Year Plan Period. Beijing, 2021. Disponível em: <https://en.ndrc.gov.cn>. Acesso em: 28 maio 2026.

OFFICE FOR BUDGET RESPONSIBILITY, 2026. **Landfill tax.** Disponível em: <https://obr.uk/forecasts-in-depth/tax-by-tax-spend-by-spend/landfill-tax/>. Acesso em: 28 maio 2026.

OLABI, A. G.; WILBERFORCE, T.; ELSAID, K.; SAYED, E. T.; SALAMEH, T.; ABDELKAREEM, M. A.; BAROUTAJI, A. **Failure modes of wind turbine components.** *Energies*, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/17/5241>. Acesso em: 2 abr. 2026.

OLIVEIRA, G. M. de. **Desafios e Perspectivas na Destinação Sustentável de Pás de Aerogeradores no Brasil.** 2024, 69p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina. Centro Tecnológico Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Florianópolis.

PEREIRA, J. C. **Metodologia de projeto aplicada à concepção de sistemas mecatrônicos a partir da elaboração de um modelo prescritivo de desenvolvimento [manuscrito]** / Jean Carlos Pereira. – 2016. 94 f., enc.: il.

PIAUÍ. **Lei nº 8.456, de 25 de julho de 2024.** Institui o Selo de Logística Reversa de Resíduos Sólidos no estado do Piauí. Diário Oficial do Estado do Piauí, Teresina, 25 jul. 2024. Disponível em: https://sapl.al.pi.leg.br/media/sapl/public/normajuridica/2024/6308/sei_00010.007661_2024_22.pdf. Acesso em: 15 mar. 2026.

PINTO, M. **Fundamentos de energia eólica.** Rio de Janeiro: LTC, 2013

PIRES, J. C. P. **Estudo de rotor para turbina eólica de eixo horizontal de pequeno porte com aplicação de modelagem e simulação virtual.** 2010, 102p. Tese (Mestrado em Design) Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Faculdade de Arquitetura. Porto Alegre.

PSOMOPOULOS, C. S. et al. **Recovery of blade waste. Recycling,** 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2313-4321/4/1/7>. Acesso em: 2 abr. 2026.

QIN, G.; JIN, Y.; QIAO, L.; WU, Z. **Non-destructive testing technologies for wind turbine blades.** *Sensors*, 2026. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/26/6/1773>. Acesso em: 2 abr. 2026.

RAMASWAMY, N.; JOSHI, B.; SONG, G.; MO, Y. L. **Repurposing wind turbine blades. Renewable and Sustainable. Energy Reviews,** 2025a.

RAMASWAMY, N.; JOSHI, B.; SONG, G.; MO, Y. L. **Residual mechanical properties of decommissioned blades. Composite Structures,** 2025b. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822325009043>. Acesso em: 2 abr. 2026.

RAMOS JÚNIOR, M. J., & ALMEIDA, E. S. (2021). **Destinação de pás de turbinas eólicas instaladas no estado da Bahia, Brasil. Revista Brasileira de Gestão Ambiental.**

Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/353758006_Destinacao_de_pas_de_turbinas_eolicas_instaladas_no_estado_da_Bahia_Brasil. Acesso em: 14 abr. 2026.

RE-WIND NETWORK. **Re-Wind: Repurposing wind blades.** Disponível em:

<https://www.re-wind.info>. Acesso em: 28 mar. 2026.

RIO GRANDE DO NORTE. **Lei nº 11.669, de 10 de janeiro de 2024.** Dispõe sobre a Política Estadual de Resíduos Sólidos e dá outras providências. Diário Oficial do Estado do Rio Grande do Norte, Natal, 10 jan. 2024. Disponível em:

<https://www.al.rn.leg.br/storage/legislacao/2024/plf8gk5x539794xsu2mey3hqakpjb7.pdf>.

Acesso em: 15 mar. 2026.

RIO GRANDE DO SUL. **Lei nº 14.528, de 16 de abril de 2014.** Institui a Política Estadual de Resíduos Sólidos e dá outras providências. Diário Oficial do Estado do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, n.º 074, 17 abr. 2014. Disponível em:

<https://www.al.rs.gov.br/filerepository/replegis/arquivos/lei%2014.528.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2026.

RUANE, K.; SOUTSOS, M.; HUYNH, A.; ZHANG, Z.; NAGLE, A.; MCDONALD, K.; GENTRY, T. R.; LEAHY, P.; BANK, L. C. **Construction and cost analysis of blade bridges. Sustainability**, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/4/3366>. Acesso em: 2 abr. 2026.

SILVERMAN, A. G.; ACKALL, G. P.; JOHANSEN, G. E.; GENTRY, T. R.; BANK, L. C. **Environmental and economic analysis of repurposed wind turbine blades for bridges. Sustainability**, 2026. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/18/3/1439>. Acesso em: 2 abr. 2026.

SHIINO, M. Y.; REZENDE, M. C. Materiais compósitos: desafios da reciclagem e reúso. In: VILANOVA, M. R. N., and SHIINO, M. Y., eds. **Fronteiras da engenharia e ciências ambientais: perspectivas multidisciplinares** [online]. São Paulo: Editora UNESP, 2020, pp. 163-185. ISBN: 978-65-5714-009-3.

SUSCHEM. **What is SusChem? European Technology Platform for Sustainable Chemistry.** Disponível em: <https://suschem.org/about/>. Acesso em: 28 mai 2026.

TAYEBI, S. T.; SAMBUCCI, M.; VALENTE, M. Waste management of wind turbine blades. **Sustainability**, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/11/4517>. Acesso em: 2 abr. 2026.

THE WINDPOWER (2023). **Wind Energy Market Intelligence.** Disponível em: https://www.thewindpower.net/turbine_en_151_nordex_n29-250.php. Acesso em: 20 mar. 2026.

UNIÃO EUROPEIA. **Diretiva 2008/98/EC do Parlamento Europeu e do Conselho**, de 19 de novembro de 2008, relativa aos resíduos e que revoga determinadas diretivas. Jornal da União Europeia, Bruxelas, n. L 312, p. 3-30, 22 nov. 2008. Disponível em: <https://eur->

lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/HTML/?uri=CELEX:32008L0098&from=EN . Acesso em: 14 mar. 2026.

WINDEUROPE. **Where do wind turbine blades go after decommissioning?**, 2026.

Disponível em: <https://windeurope.org/about-wind/circularity/>. Acesso em: 03 mar. 2026.

WINDBOX. **Componentes dos aerogeradores: conheça toda a sua estrutura**, 2020.

Disponível em: <https://windbox.com.br/blog/componentes-dos-aerogeradores/>. Acesso em: 13 mar. 2026.

WIND TURBINE BLADES. **The Blade Handbook**. Escrito por Bladena e KIRT x THOMSEN em LEX, RATZ, EWIC e CORTIR projeto fundado principalmente por EUDP (Energy Technology Development and Demonstration Programme), 2019. p.124. THE BLADE HANDBOOK, 2019

WORLD WIND ENERGY ASSOCIATION - WWEA, 2025. **WWEA Annual Report 2024:**

A Challenging Year for Windpower. Disponível em: <https://wwindea.org/GlobalStatistics>. Acesso em: 30 jan. 2026.

ZHOU, H.; DOU, H. Y.; QIN, L. Z.; CHEN, Y.; NI, Y. Q.; KO, J. M. Full-scale structural testing of wind turbine blades. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, 2014.

ANEXO A – Ensaio empregados para verificação das propriedades estruturais das pás

Para a caracterização das propriedades mecânicas e estruturais das pás eólicas, especialmente em estudos voltados ao seu reaproveitamento, são realizados diversos ensaios experimentais que permitem compreender o comportamento do material compósito sob diferentes condições de carregamento. No estudo analisado para a construção da *BladeBridge*, foram realizados ensaios, cujas metodologias são descritas brevemente abaixo:

- **Ensaio de tração e compressão**

Tem como objetivo determinar propriedades mecânicas fundamentais, como resistência e rigidez do material. Esses testes permitem avaliar o desempenho das fibras e da matriz polimérica quando submetidas a esforços opostos, sendo essenciais para a compreensão do comportamento estrutural do compósito.

- **Ensaio de flexão em quatro pontos**

Utilizado para avaliar o comportamento estrutural da pá sob carregamento. Nesse tipo de ensaio, a peça é apoiada em dois pontos e carregada em outros dois, criando uma região de momento fletor constante, o que permite uma análise mais precisa da resistência à flexão e dos mecanismos de falha do material. Esse procedimento é especialmente relevante por simular condições mais próximas das solicitações reais que a estrutura pode enfrentar em aplicações práticas.

- **Análises de rigidez à flexão ao longo do comprimento da pá**

Tem como objetivo avaliar a capacidade estrutural da pá eólica em resistir a deformações quando submetidos a esforços mecânicos. Devido à sua geometria variável e à distribuição não uniforme dos materiais compósitos, essa rigidez não é constante, sendo mais elevada na região da raiz e diminuindo em direção à ponta. Para sua determinação, utilizam-se ensaios experimentais nos quais a pá ou segmentos representativos são posicionados em configurações estruturais específicas, como engastados ou simplesmente apoiados, e submetidos à aplicação de cargas conhecidas em pontos estratégicos.

Durante o ensaio, a deflexão resultante (deformação ou desvio da estrutura na direção transversal ao seu eixo longitudinal quando submetido a cargas) é medida por meio de sensores de deslocamento ou sistemas ópticos, permitindo calcular a rigidez à flexão a partir da relação entre força aplicada e deslocamento observado. Esse procedimento é repetido ao longo de diferentes seções da pá, possibilitando a construção de um perfil de rigidez ao longo de sua extensão.

- **Testes de queima de resina**

Conhecidos como *resin burnout*, tem a finalidade de identificar a fração volumétrica e mássica das fibras presentes no material. Nesse procedimento, as amostras são submetidas a altas temperaturas para que a matriz polimérica seja eliminada, restando apenas as fibras. A partir dessa análise, torna-se possível determinar a proporção de reforço no compósito e compreender melhor sua arquitetura interna, fator diretamente relacionado às propriedades mecânicas do material.

Os ensaios acima descritos em conjunto, permitem uma caracterização abrangente das propriedades dos materiais compósitos presentes nas pás eólicas, fornecendo dados fundamentais para a avaliação de sua viabilidade em aplicações de reuso estrutural, como elementos em pontes ou outras soluções arquitetônicas.