



Fernanda Bacellar Felix Pereira

Reutilização de pás eólicas na indústria da construção civil

Trabalho de Conclusão de Curso

Trabalho apresentado como requisito parcial à conclusão do curso de Engenharia Civil na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

Orientador: Flávio de Andrade

Rio de Janeiro
Junho de 2023



Agradecimentos

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a todas as pessoas que contribuíram para a conclusão deste trabalho de conclusão de curso. Sem o apoio e incentivo de cada um de vocês, este projeto não teria sido possível.

À minha família: minha mãe Andrea Bacellar Felix, por ter tornado possível a realização desta graduação; minha tia Alessandra Maria Felix, meu primo Luiz Guilherme, meus irmãos Amanda, Anna Clara, Mariana e Andrei por me ajudarem e confiarem em mim.

Aos meus amigos Afrodite, Bruno Dionisio, Priscilla Goullart, Jamerson Motta, Raiane Valle, Gaia, Antunes Moraes, Raphael Epifanio, Mateus Gomes, Luiz Felipe Bodão, meu sincero agradecimento por todo o suporte emocional e encorajamento ao longo desta jornada acadêmica.

Aos meus colegas de curso Guilherme Santos, João Guilherme Abreu de Lima, Pâmela Pires de Paula, por todo o auxílio em todos esses anos de curso.

Gostaria de agradecer também ao meu orientador Flávio de Andrade, pela sua paciência, dedicação e orientação ao longo deste processo. Sua experiência e sabedoria foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.



Agradeço também aos professores Daniel Cardoso de concreto armado 1 e à professora Lidia da Conceicao Domingues Shehata de concreto armado 2, que me forneceram uma sólida base de cálculo estrutural das construções civis, área na qual pretendo seguir. A professora Fernanda Salgado por sempre evidenciar a importância da sustentabilidade na engenharia civil, e, por fim, as professoras Tatiana Soderó, Christine Sertã Costa e Mônica Moreira Barros, que me deram suporte e auxílio no ciclo básico da universidade.

Por todas as pessoas mencionadas e por aquelas que, porventura, eu tenha esquecido de citar, meu sincero agradecimento por cada contribuição, conselho, incentivo e palavra de apoio. Vocês foram essenciais para a conclusão deste trabalho e para minha formação como profissional.

Fernanda Bacellar



Resumo

O objetivo deste trabalho é introduzir a energia eólica, descrever suas características e a composição dos aerogeradores, com especial ênfase nas pás eólicas, e abordar de forma a problemática da disposição final dessas pás. Além disso, busca-se propor soluções viáveis para enfrentar esse desafio.

No que diz respeito à gestão de resíduos, a tecnologia atual permite reciclar aproximadamente 85% a 90% de todos os componentes dos aerogeradores. No entanto, a disposição final das pás ainda é uma preocupação, uma vez que não existe uma norma estabelecida no país para esse processo. O acúmulo de pás de turbinas eólicas é impulsionado por dois fatores: o aumento exponencial da energia eólica, que registrou um aumento de cerca de 892,39% na última década, e o aumento da capacidade média de energia instalada de 22.030 kW para 25.204.623,86 kW.

Dessa forma, a disposição final das pás representa um problema ambiental latente, uma vez que, sem uma política de incentivo para o reuso dessas pás, a incineração ou o descarte em aterros continuarão sendo as soluções mais comumente utilizadas para as pás desativadas. Neste trabalho, exploraremos as soluções atualmente disponíveis para a disposição final dessas pás e discutiremos o que é necessário para resolver essa problemática.

Palavras-chave: Energia eólica, pás eólicas, vida útil, reciclagem, reutilização.



Abstract

The objective of this work is to introduce wind energy, describe its characteristics and the composition of wind turbines, with special emphasis on wind blades, and address in a way the problem of the final disposal of these blades. In addition, it seeks to propose viable solutions to meet this challenge.

With regard to waste management, current technology makes it possible to recycle approximately 85% to 90% of all wind turbine components. However, the final disposition of the blades is still a concern, since there is no established standard in the country for this process. The accumulation of wind turbine blades is driven by two factors: the exponential increase in wind energy, which has registered an increase of about 892.39% in the last decade, and the increase in average installed energy capacity from 22030 kW to 25204623.86 kW.

Thus, the final disposal of the blades represents a latent environmental problem, since, without a policy of incentive for the reuse of these blades, incineration or disposal in landfills will continue to be the most commonly used solutions for the deactivated blades. In this paper, we will explore the solutions currently available for the final disposal of these shovels and discuss what is needed to solve this problem.

Keywords: Wind energy, wind blades, useful life, recycling, reuse.



Sumário

1. Introdução	1
1.1 Objetivo	5
1.2 Contribuições	5
1.3 Estruturação da monografia	6
2 Energia Eólica	7
2.1 Torres eólicas no Brasil	9
2.1.2 Regulamentos vigentes no Brasil	11
2.2 Como a energia é gerada	12
2.3 Características dos Aerogeradores	15
2.3.1 Torres eólicas	
As torres eólicas desempenham um papel essencial nas usinas de energia eólica, sendo responsáveis por capturar e aproveitar o vento como fonte de energia renovável. Essas estruturas são projetadas com características específicas que visam otimizar a eficiência e a produtividade dos aerogeradores.	16
2.3.2 Turbina Eólica	17
2.3.3 Pás Eólicas	20
2.3.3.1 Composição	25
2.4.3.1.1 Fibras de Reforço	26
3. Vida Útil da Torre Eólica	31
4. Alternativas sustentáveis após o fim do ciclo de vida útil	31
4.1 Reciclagem	32
4.1.1 processos mecânicos	33
4.1.2 Processos Térmicos	34
4.1.3 processos Químicos	35
4.2 Reutilização das pás Eólicas	35
4.2.1 Bicletário construído na Dinamarca	35
4.2.2 Ponte para pedestres e bicicletas na Polônia	37
5 CONCLUSÃO	40
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43
ANEXOS	50
ANEXO 1 - Tabela de dados da quantidade de empreendimentos de geração de energia em operação fornecida pela ANEEL	50



ÍNDICE DE QUADROS

Figura 01 – Gráfico Fonte Energética no Brasil.....	1
Figura 02 – Gráfico Fonte Energética no mundo	2
Figura 03 – Gráfico Matriz Energética Renovável	3
Figura 04 – Descarte de pás eólicas em aterro	4
Figura 05 – Usina Eólica.....	7
Figura 06 – Usina eólica no Nordeste do Brasil	8
Figura 07 - Gráfico com a Quantidade de Usinas ao longo dos anos	10
Figura 08 - Gráfico com a média de potência instalada de Usinas ao longo dos anos	10
Figura 09 – Energia cinética acumulado por um aerogerador	13
Figura 10 - Composição de um aerogerador	15
Figura 11 – Torre de concreto armado	16
Figura 12 – Turbina Eólica	17
Figura 13 – Componentes do aerogerador	18
Figura 14 - Pá Eólica	20
Figura 15 - Pá Eólica com 107 m de comprimento.....	24
Figura 16 - Seção transversal genérica de uma pá	25
Figura 17 - Métodos de reciclagem	33
Figura 18 - Pás de turbinas eólicas como bicicletários na Dinamarca.....	36
Figura 19 - Primeira ponte feita reutilizando pás eólicas 1	37
Figura 20 - Primeira fonte feita reutilizando pás eólicas 2	37
Figura 21 – Projeto de ponte de pedestre reutilizando pás eólicas	38
Figura 22 – Construção de ponte de pedestre reutilizando pás eólicas 1....	39



ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 01 - Pás Eólicas com Energia Nominal entre 1,5 MW e 2,0 MW.....	21
Tabela 02 - Pás Eólicas com Energia Nominal entre 2,0 MW e 2,2 MW 1...	22
Tabela 03 -Pás Eólicas com Energia Nominal entre 2,0 MW e 2,2 MW 2....	22
Tabela 04 - Pás Eólicas com Energia Nominal entre 4,0 MW e 6,0 MW.....	23
Tabela 05 - Composições químicas típicas da fibra de vidro.....	27
Tabela 06 - Propriedades elétricas típicas da fibra de vidro	28
Tabela 07 - Propriedades térmicas típicas da fibra de vidro.....	28
Tabela 08 - Resistência à corrosão típica de fibras de vidro.....	29
Tabela 09 - Propriedades mecânicas típicas de epóxi curado/vidro.....	29
Tabela 10 - Comparação do carbono e outras propriedades da fibra	30

ÍNDICE DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Energia Cinética 1.....	12
Equação 2 - Energia Cinética 2	14
Equação 3 - Potência disponível 1	14
Equação 4 - Potência disponível 2	14



1. Introdução

As principais fontes de energia sustentável são energia Solar, Eólica, Hidrelétrica, de Biomassa e Geotérmica. Dentre essas, a energia eólica é hoje uma fonte de energia economicamente viável e, que tem tido um grande desenvolvimento tecnológico nos últimos 20 anos [1,8].

As primeiras tentativas de gerar eletricidade foram feitas no final do século 19, porém o interesse em investimentos na área aumentou significativamente com a crise do petróleo, após a Segunda Guerra Mundial, nos anos 40. [1]

Neste sentido, o alto custo do mercado energético mundial do combustível fóssil, a demanda sempre crescente por energia e os desafios do desenvolvimento pareados com a sustentabilidade geraram um grande interesse dos países por desenvolver meios de geração de eletricidade que contribuísse para a redução da dependência do uso de combustíveis fósseis.

Conforme ilustrado na figura 01, de acordo com a ANEEL, cerca de 83,44% da geração de energia no país provém de fontes renováveis [2]. Esse valor representa uma proporção significativamente maior do que a média mundial, como evidenciado na figura 02.

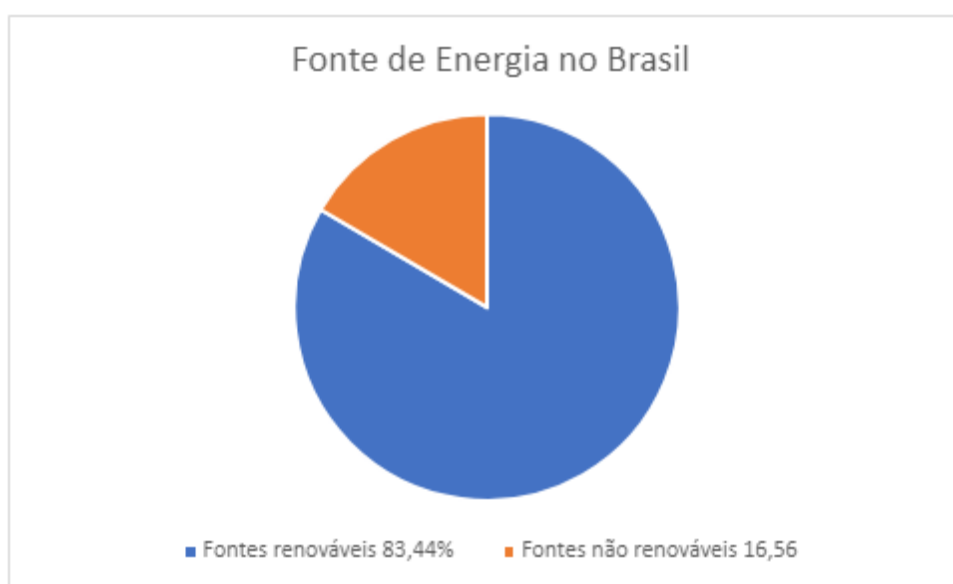


Figura 01 – Gráfico Fonte Energética no Brasil

Fonte: Própria, 2023

Conforme indicado no relatório Renewables 2021 da Agência Internacional de Energia (AIE), no ano de 2020, aproximadamente 29% da demanda global de energia foi atendida por fontes renováveis. Por sua vez, as fontes não renováveis, como combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás natural) e energia nuclear, foram responsáveis pelos 71% restantes [3]

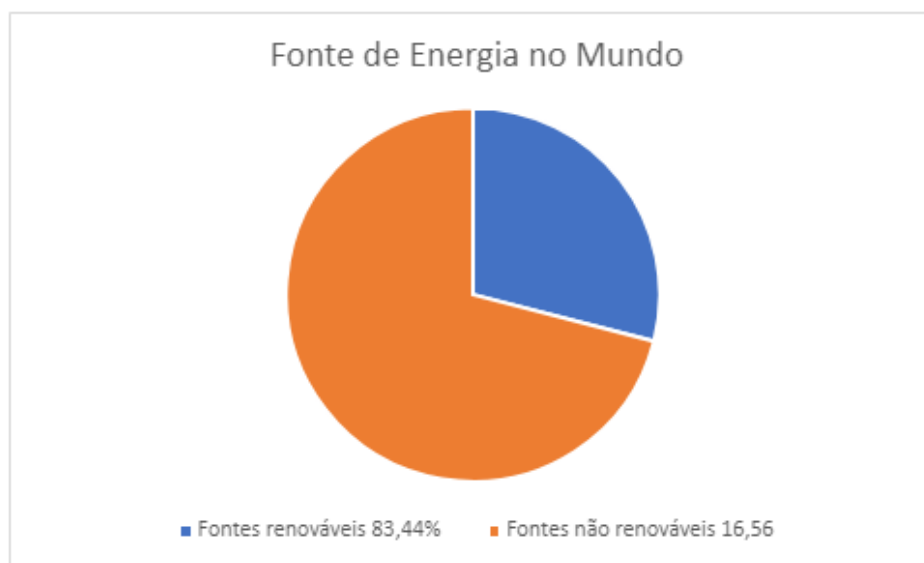


Figura 02 – Gráfico Fonte Energética no mundo

Fonte: Própria, 2023

De acordo com o registro da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o Brasil alcançou uma capacidade instalada centralizada na matriz elétrica de mais de 190 gigawatts (GW). Como pode ser visto na figura 03, as usinas hidrelétricas de grande porte representavam 103,2 GW (53,58% do total), seguidas pelas termelétricas com 46,15 GW (24,70%) e pelas usinas eólicas com 24,92 GW (13,12%) [2].

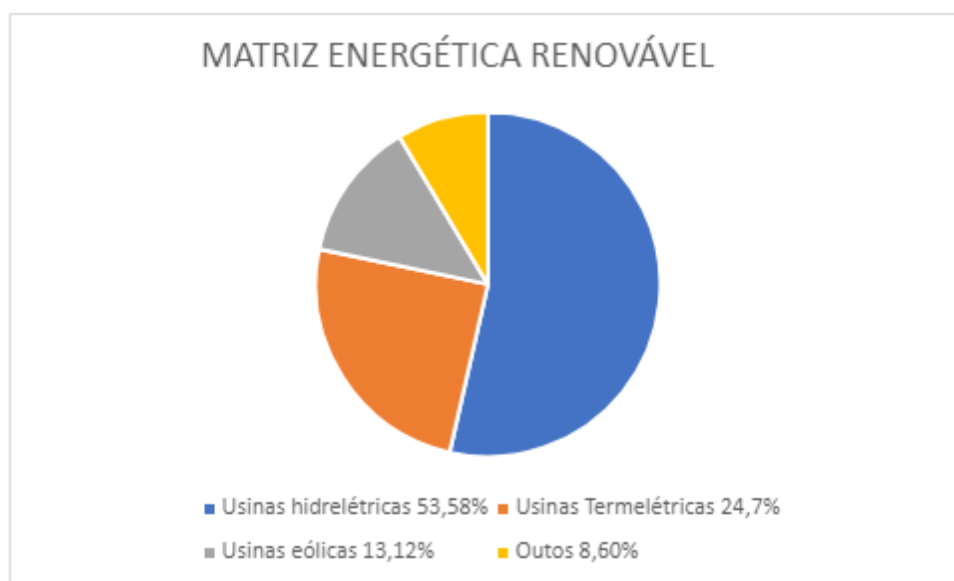


Figura 03 – Gráfico Matriz Energética Renovável

Fonte: Própria, 2023

Dentre as energias renováveis, a energia eólica é hoje a segunda fonte de energia renovável mais utilizada no Brasil, uma vez que se trata de uma fonte de energia com baixos impactos ambientais e de grande viabilidade econômica.[5,6,7]

Atualmente, o Brasil tem capacidade de produzir em média 22.000 MW de energia proveniente das usinas eólica. Conforme o Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro, divulgado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) em abril de 2023, a energia eólica contribuiu com cerca de 10,4% da capacidade instalada de geração de energia elétrica no Brasil até o final de 2022. Além disso, a geração de energia proveniente de usinas eólicas em operação comercial representou aproximadamente 9,5% da matriz energética brasileira em 2022 [2,4].

No entanto, as usinas eólicas são projetadas e construídas com uma expectativa de vida útil de aproximadamente 20 a 25 anos. Após esse período, as turbinas eólicas passam por um processo de repotenciação, que envolve a substituição de componentes, atualização tecnológica ou até mesmo a troca completa da turbina [4].

Consequentemente, a questão da disposição final das pás de turbinas eólicas tornou-se uma preocupação cada vez mais evidente. A imagem abaixo mostra um exemplo de uma disposição inadequada das pás de um conjunto total de 870 peças de pás de turbinas eólicas [12].



Figura 04 – Descarte de pás eólicas em aterro

Fonte: <https://plu7.com/16694/tecnologia/milhares-de-turbinas-eolicas-estao-chegando-ao-fim-d-e-sua-vida-util-a-grande-duvida-e-o-que-faremos-com-suas-pas-depois>

Até 2030, mais de 50 parques alcançarão a faixa dos 20 anos de operação, representando mais de 600 aerogeradores e de 940 MW de potência. Com isso, demandando a reciclagem e reutilização de seus componentes. A maior problemática se encontra especialmente nas pás eólicas, pois são consideradas os elementos mais complexos e dispendiosos de reciclar, devido às suas características físicas, com uma média de mais de 45 metros de comprimento e pesando mais de uma dúzia de toneladas cada, além da complexidade de sua composição material híbrida. [4,11,17]



Diante dessa problemática, será necessário buscar soluções criativas para lidar com o desperdício iminente das pás de turbinas eólicas. A reutilização dessas pás na indústria da engenharia civil surge como uma excelente opção, considerando a resistência e durabilidade que seus componentes possuem. Essa reutilização poderia proporcionar uma redução significativa nos custos dos projetos de engenharia civil, além de promover uma abordagem sustentável. Ao reutilizar as pás eólicas, contribui-se para a redução do desperdício e do descarte inadequado de materiais, agregando valor ao aspecto ambientalmente responsável das práticas construtivas.

1.1 Objetivo

Esse trabalho de conclusão de curso tem como objetivo desenvolver um estudo que promova possíveis soluções para a reutilização das pás eólicas para as usinas de energia, visando uma conclusão que atenda as demandas econômicas da empresa e as socioambientais.

Visto que as usinas eólicas apresentam um crescimento significativo no Brasil e que seu tempo de vida gira em torno de 20 a 25 anos, nos deparamos com a problemática da geração de resíduos que será causado, tendo a questão da reutilização das pás eólicas como a de maior dificuldade, devido às características físicas e materiais desta estrutura que torna este processo complexo e menos viável.

1.2 Contribuições

Dentre as contribuições que esta pesquisa tem, o incentivo a sustentabilidade é o mais significativo, uma vez que a reutilização de pás eólicas na construção civil pode reduzir a necessidade de descarte desses materiais em aterros sanitários, evitando assim a acumulação de resíduos e mitigando o impacto ambiental.

Além disso, esta reutilização pode gerar uma redução de custos para as empresas de construção civil.



1.3 Estruturação da monografia

Este trabalho de conclusão de curso está organizado em cinco capítulos. No Capítulo 1, são apresentados os conceitos da energia eólica no Brasil, bem como a problemática associada ao fim da vida útil das usinas eólicas. Também são delineados os principais objetivos deste trabalho, juntamente com as contribuições que serão oferecidas.

No Capítulo 2, aborda-se a energia eólica, discutindo a sua implementação no Brasil, o crescimento dessa fonte energética no país e o potencial de expansão para os próximos anos. Além disso, são fornecidas explicações técnicas sobre a geração de energia eólica, as características dos aerogeradores e a composição dos principais componentes das pás eólicas, que são o foco deste estudo.

No Capítulo 3, é abordada a vida útil das torres eólicas, destacando as variações possíveis e seu impacto para a sociedade. O Capítulo 4 apresenta alternativas sustentáveis para as pás eólicas na construção civil após o fim de sua vida útil, sendo a reciclagem por meio de processos mecânicos, térmicos ou químicos e a reutilização apontadas como opções viáveis. Por fim, o Capítulo 5 traz as conclusões deste trabalho

2 Energia Eólica

As usinas eólicas são estruturas capazes de converter a energia cinética promovida através da rotação das turbinas de aerogeradores dada pela força dos ventos em energia elétrica. Segue abaixo um exemplo visual de uma usina eólica representada na figura abaixo. [1,13]



Figura 05 – Usina Eólica.

Fonte: <https://fullenergy.grupomidia.com/por-que-a-energia-eolica-e-tao-importante-para-o-brasil/>

Trata-se de uma energia renovável e limpa, por ter a capacidade de ser reposta naturalmente em nosso meio ambiente e por ter baixos teores de emissões de gases de efeito estufa. [1,13]

É importante apontar que se trata de uma fonte de energia sazonal e regional por ser diretamente dependente das correntes de ventos preferencialmente intensas e constantes.[14]

Possui, portanto, sua maior localização na região nordeste do país que apresenta uma das maiores incidências de ventos com grande velocidade, unidirecionais e estáveis do país, conforme aponta o Ministério de Minas e Energia. Além disso, a região apresenta uma topografia plana e costeira que facilita a instalação de parques eólicos. A figura a seguir ilustra um exemplo de usina eólica localizada no Nordeste do Brasil [14]



Figura 06 – Usina eólica no Nordeste do Brasil

Fonte: <https://www.letrasambientais.org.br/posts/nordeste-gera-85-da-energia-eolica-do-brasil>

Contudo, diante da qualidade das correntes de ventos apresentada no Brasil e os preços competitivos impulsionados também pelas políticas públicas de incentivo e investimentos em infraestrutura, nota-se o avanço significativo das usinas eólicas que culminarão no aumento crescente de resíduos gerados ao fim da vida útil dessas usinas.



2.1 Torres eólicas no Brasil

A indústria eólica brasileira teve seu início nos anos 90, quando os primeiros parques eólicos foram instalados. Naquela época, a tecnologia utilizada envolvia turbinas com potência inferior a 1 MW e altura do eixo do cubo menor que 50 metros.

Em 2002, foi estabelecido o PROINFA (Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica) vigente no artigo 3 da lei ordinária - 10438/2002, criado em com o objetivo de aumentar a participação de fontes como eólica, pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) e biomassa no Sistema Interligado Nacional (SIN)

Fica instituído o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica - Proinfa, com o objetivo de aumentar a participação da energia elétrica produzida por empreendimentos de Produtores Independentes Autônomos, concebidos com base em fontes eólica, pequenas centrais hidrelétricas e biomassa, no Sistema Elétrico Interligado Nacional [19]. Esse programa resultou na implementação de 1.283 MW de projetos eólicos, correspondendo a cerca de 3.500 GWh (aproximadamente 400 MW médios) de energia contratada para o ano de 2020, de acordo com a Eletrobras [4].

Posteriormente, os Leilões de Energia se tornaram o principal mecanismo de expansão da energia eólica no Brasil. Foram realizados 22 leilões desde 2009, resultando na contratação de 746 projetos eólicos e totalizando aproximadamente 8.000 MW médios de energia. Esses leilões também contribuíram para uma expressiva redução nos preços da energia comercializada, conforme relatado pela EPE (Empresa de Pesquisa Energética) e pela CCEE (Câmara de Comercialização de Energia Elétrica).

A participação da energia eólica na matriz elétrica brasileira saltou de 0,2% em 2002 para 9% em 2019, tornando-se a terceira fonte em capacidade instalada e a segunda entre as fontes renováveis. Estima-se que até 2029 essa participação chegue a 17%, alcançando cerca de 40 GW, de acordo com o Ministério de Minas e Energia (MME) e a EPE.



Com base nos dados da tabela fornecida pela ANEEL, presente no anexo 1 deste documento, a energia eólica possui atualmente no Brasil 913 usinas em operação, com uma potência média instalada de 25.204.624 KW. Esse resultado representa um crescimento de 7,93% em relação a setembro de 2022, além de um aumento significativo de 892,39% na última década, considerando que em março de 2013 existiam somente 92 usinas em operação. Através dos gráficos apresentados abaixo, é possível visualizar o aumento progressivo do número e da potência média instalada de usinas eólicas ao longo dos anos.

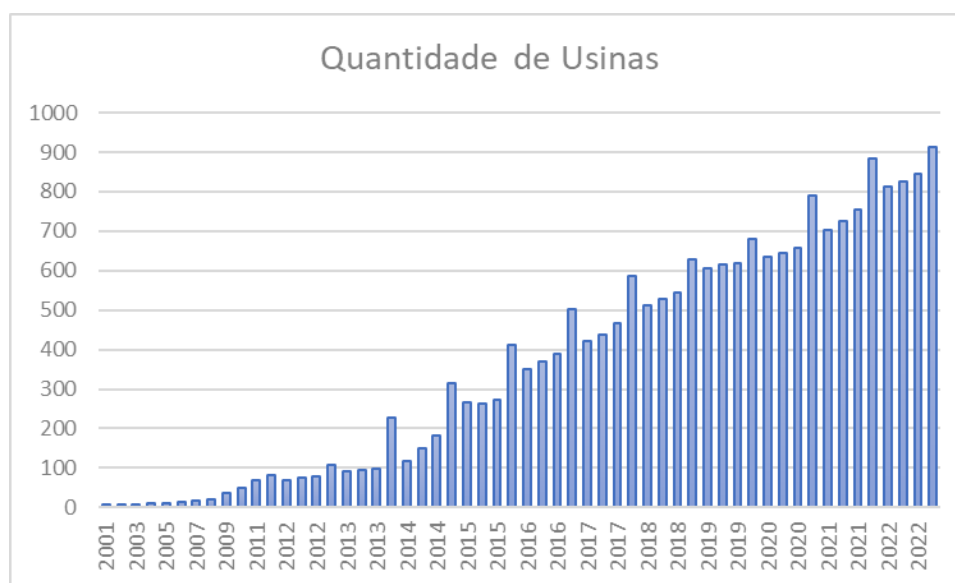


Figura 07 - Gráfico com a Quantidade de Usinas ao longo dos anos

Fonte: Própria, 2023

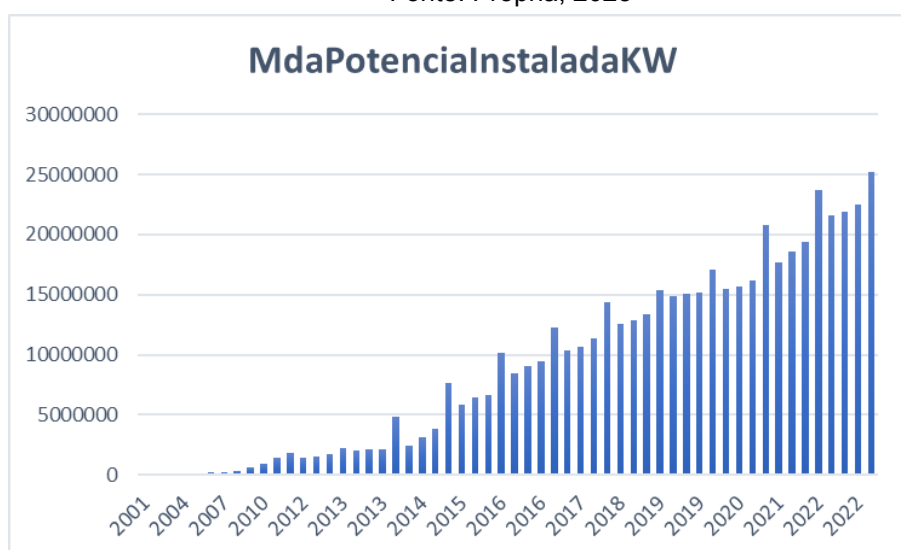


Figura 08 - Gráfico com a média de potência instalada de Usinas ao longo dos anos

Fonte: Própria, 2023



Além disso, de acordo com o "RALIE - Relatório de Acompanhamento da Expansão da Oferta de Geração de Energia Elétrica", que monitora o crescimento da oferta de geração de energia elétrica e abrange todos os projetos em implantação no território nacional pela Aneel (Agência Nacional de Energia Elétrica), é possível observar a expectativa de crescimento do setor de energia no país. Atualmente, existem 22.412 usinas em andamento para implementação, sendo que 8.284 delas já estão com as obras em andamento [37].

Esses dados evidenciam o crescimento expressivo e o potencial contínuo da energia eólica no Brasil, tanto em termos de capacidade instalada quanto de contribuição para a matriz elétrica nacional.

2.1.2 Regulamentos vigentes no Brasil

A regulação e fiscalização das atividades relacionadas à geração de energia elétrica, incluindo a energia eólica, no Brasil, são de responsabilidade da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Embora a ANEEL não possua uma norma específica para a gestão de resíduos gerados pelas usinas eólicas, outras regulamentações ambientais são aplicáveis [4].

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei Federal nº 12.305/2010) e suas regulamentações complementares estabelecem diretrizes gerais para a gestão de resíduos em todo o país. Embora não se refira especificamente aos resíduos de aerogeradores, essa legislação aborda a prevenção e redução na geração de resíduos, a destinação ambientalmente adequada, a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, a coleta seletiva, a logística reversa, entre outros aspectos [36].

Além disso, a gestão de resíduos também pode ser regulada por legislações estaduais e municipais, que podem definir requisitos específicos para a gestão e destinação dos resíduos gerados pelas usinas eólicas. [4]



Recomenda-se a elaboração de um plano de descomissionamento que inclua atividades como levantamento das normas aplicáveis e medidas de mitigação de impactos negativos, verificação das condições das estradas e vias de acesso, estabelecimento de estruturas temporárias e guindastes, separação e correta destinação dos resíduos, remoção de componentes subterrâneos (se necessário) e a demolição e remoção das fundações, com a posterior restauração do terreno. É desejável a participação da população nessa discussão, conforme indicado por um levantamento realizado junto a órgãos ambientais estaduais no Brasil [4].

2.2 Como a energia é gerada

Esta energia renovável é gerada a partir da conversão da energia cinética de translação promovida pelas correntes de ar em energia cinética de rotação através do movimento das pás que giram o motor no interior da nacela do aerogerador e através do multiplicador a energia mecânica chega ao gerador, que finaliza o processo e a converte em energia elétrica.

O vento atinge as pás do aerogerador, nesse momento a energia cinética associada ao movimento do vento.

A energia cinética E_c de uma massa de ar m em deslocamento, a uma velocidade cinética v , é determinada por:

Equação 1 - Energia Cinética 1

$$E_c = \frac{m.v^2}{2}$$

Onde m denota uma determinada massa de ar que pode ser representada pelo produto do seu volume vol pela sua densidade ρ . Considerando uma massa de ar com velocidade constante e uma superfície A percorrida pelas pás do aerogerador de forma circular, com raio igual a R , o volume do ar é dado pela área A multiplicada pelo comprimento do deslocamento l da massa de ar, conforme figura abaixo.

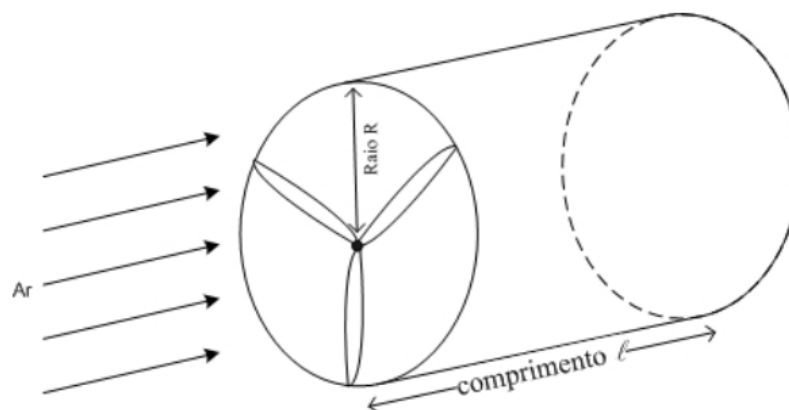


Figura 09 – Energia cinética acumulado por um aerogerador [5]

A rotação das pás movimenta o rotor onde estão fixadas, esse movimento de rotação aciona o eixo, na parte interna da nacela, com isso é produzida a energia mecânica que passa pelo multiplicador. Essa etapa é importante por aumentar a velocidade dos giros, o que permitirá a produção de eletricidade. As pás se movimentam lentamente, mas dentro das naceles a velocidade do giro é elevada.

A energia é transmitida para o gerador, que a transforma em eletricidade. A energia elétrica passa pelo transformador, que irá elevar a tensão, com o objetivo de evitar perdas. Em seguida, a energia vai por uma linha de transmissão para a subestação, conectando o parque eólico ao sistema elétrico, que a levará até os consumidores



Os aerogeradores são equipados ainda com freio, que permite interromper a rotação das pás quando não é necessário gerar energia elétrica, e a unidade de controle, para monitorar as características do vento e fazer com que as pás sejam posicionadas de uma forma que possam aproveitá-lo com mais eficiência.

Logo, a energia cinética será calculada a partir da relação:

Equação 2 - Energia Cinética 2:

$$Ec = \frac{1}{2} A \cdot l \cdot \rho \cdot v^2$$

A potência é dada pela derivada da energia em relação ao tempo:

Equação 3 - Potência disponível 1:

$$P_{disp} = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} A \cdot l \cdot \rho \cdot v^3$$

Obtém-se, portanto, a potência disponível a partir da equação:

Equação 4 - Potência disponível 2:

$$P_{disp} = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} \cdot A \cdot l \cdot \rho \cdot v^3$$

2.3 Características dos Aerogeradores

Os aerogeradores, também conhecidos como turbinas eólicas, são os componentes essenciais das usinas de energia eólica, responsáveis por converter a energia cinética do vento em eletricidade. Essas estruturas mecânicas têm características específicas projetadas para otimizar a captura e a eficiência do vento, além de garantir um funcionamento confiável e seguro.

Nesta seção, vamos explorar as principais características dos aerogeradores, com um foco mais específico na composição das pás eólicas, que são os elementos em análise no estudo em questão.

Os principais componentes de um aerogerador incluem a torre e turbina eólica compostas por gerador, o rotor, a nacele e as pás. Como ilustrado na Figura 10 abaixo.

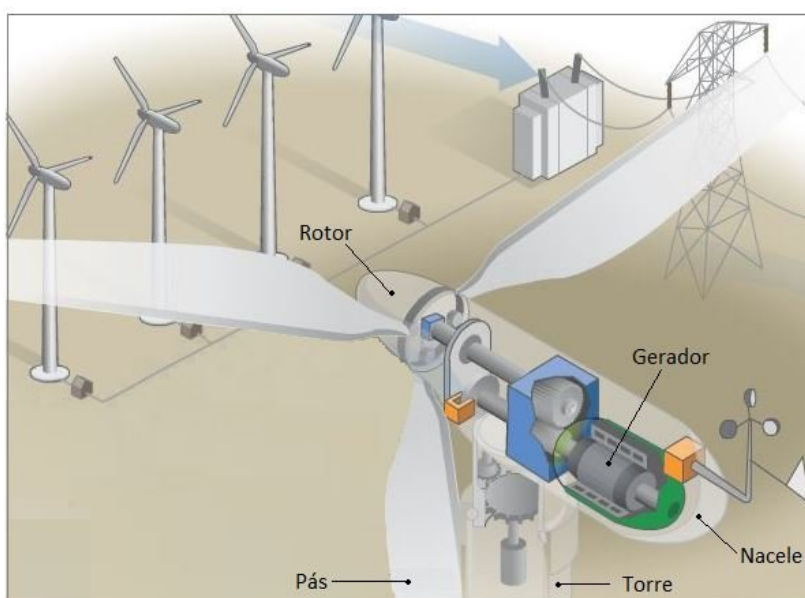


Figura 10 - Composição de um aerogerador

Fonte: https://www.researchgate.net/figure/Figura-6-Componentes-de-uma-torre-de-turbina-eolica_fig4_337978031

2.3.1 Torres eólicas

As torres eólicas desempenham um papel essencial nas usinas de energia eólica, sendo responsáveis por capturar e aproveitar o vento como fonte de energia renovável. Essas estruturas são projetadas com características específicas que visam otimizar a eficiência e a produtividade dos aerogeradores.

Segundo informações fornecidas pela Enel Green Power, as torres de energia eólica possuem alturas que variam de 30 a 120 metros. É importante destacar que quanto maior for a altura da torre, maior será a velocidade do vento capturado. [21].

As torres eólicas são comumente construídas com aço ou concreto armado, visando proporcionar estabilidade e resistência estrutural. Essas torres são projetadas para suportar o peso das pás do rotor e resistir às forças do vento [30]. Na figura abaixo, é apresentado um exemplo da montagem de uma torre de concreto armado.



Figura 11 – Torre de concreto armado

Fonte: <https://www.cimentoitambe.com.br/massa-cinzenta/producao-de-energia-eolica-no-brasil-se-equipara-a-itaipu/>

2.3.2 Turbina Eólica

As turbinas eólicas dividem-se em dois grupos com relação ao tipo de eixo: vertical e horizontal. Entretanto, as turbinas eólicas que são amplamente utilizadas no mercado mundial são as de eixo horizontal, que possuem uma hélice que gira perpendicular à direção do vento. Na figura abaixo pode-se observar um exemplo de turbina de eixo horizontal. [1]



Figura 12 – Turbina Eólica.

Fonte: <https://th.bing.com/th/id/OIP.CDExPnCUsu1vs6jvzDJBQHaG2?pid=ImgDet&rs=1>

Os componentes básicos encontrados na turbina eólica são o rotor com as pás, nacele e o gerador.

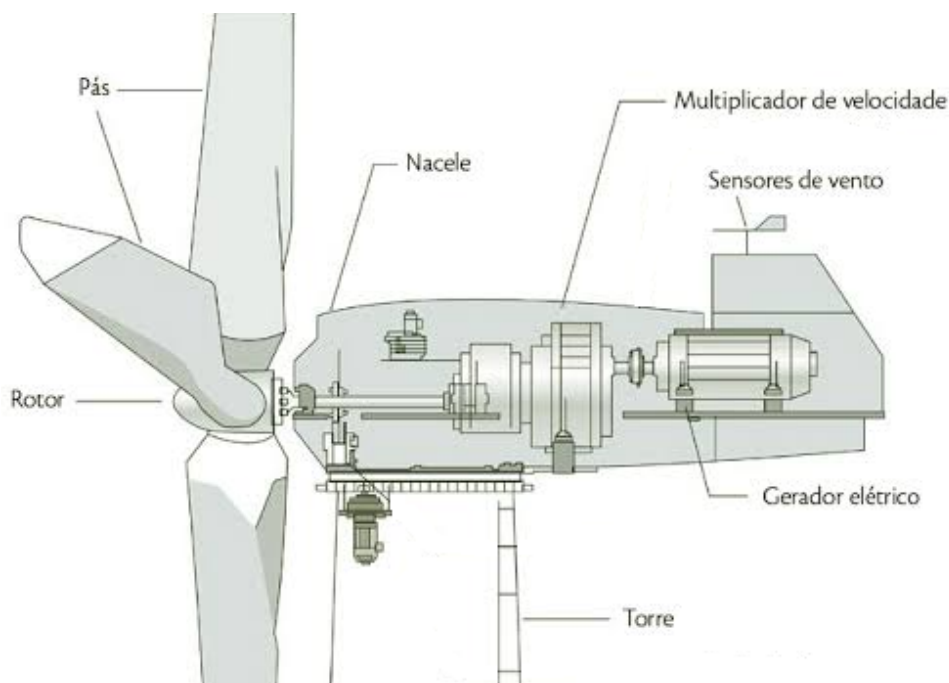


Figura 13 – Componentes do aerogerador

Fonte: <http://windbox.com.br/blog/componentes-dos-aerogeradores/>

O rotor geralmente é composto por um conjunto de três pás, e seu diâmetro varia de 60m a 150m. Ele incorpora um sistema hidráulico que permite capturar o vento com as pás em várias posições ou até mesmo parar o movimento. [22]

A nacele é a parte mais pesada da estrutura, podendo pesar mais de 100 toneladas em alguns casos. É uma cabine que abriga vários componentes do aerogerador, como transformador, multiplicador de velocidade, caixa de engrenagens, freio, gerador e unidade de controle. Ela funciona como uma estação de operação e manutenção, onde os funcionários entram e realizam ajustes no funcionamento do aerogerador. [21]



O gerador é o dispositivo responsável por converter a energia mecânica da rotação do eixo em energia elétrica. Ele está instalado no interior da nacele e pode ser de dois tipos básicos. [20]

Os geradores podem ser assíncronos que são apropriados para trabalhar com rotação constante, ou gerador síncrono, utilizado em sistemas com rotação variável. [1]

2.3.3 Pás Eólicas

As pás eólicas são estruturas em formato de aerofólio, como pode ser observado na imagem abaixo. Essa forma aerodinâmica, inspirada em asas de aeronaves, permite que as pás gerem uma força de elevação perpendicular à direção do vento (Figura XX). Essas pás desempenham um papel essencial na captação e aproveitamento da energia eólica. São construídas com materiais leves e resistentes, garantindo durabilidade e eficiência. Seu design aerodinâmico contribui para a otimização da captura do vento, maximizando a produção de energia renovável [23]



Figura 14 - Pá Eólica

Fonte: <https://arizonagrupo.com.br/voce-sabe-como-e-feito-o-transporte-de-pas-eolicas/>



De acordo com informações da LM Wind Power, uma das principais fabricantes de pás eólicas globais, existe uma grande variação no tamanho das pás utilizadas. Essas medidas geralmente variam entre 40 m e 70 m, com uma exceção notável sendo uma pá eólica de 107 m que alimenta uma turbina offshore. É importante ressaltar que o tamanho das pás tem um impacto significativo na capacidade nominal das turbinas eólicas, uma vez que o comprimento das pás está diretamente relacionado à área de varredura. [22]

Nas tabelas apresentadas nas figuras abaixo, fornecidas pela fabricante LM Wind Power, é possível visualizar a variação dos comprimentos das lâminas comercializadas, de acordo com sua capacidade nominal. [22]

TABELA 1 - 1,5 MW - 2,0 MW DE SAÍDA DE ENERGIA NOMINAL

TIPO DE LÂMINA	ROTOR (M)	DIÂMETRO DO CÍRCULO DO PARAFUSO (MM)	COMPRIMENTO DA LÂMINA (M)
LM 37.3 P2	77	1800	37.25
LM 37.3 P3	77	1800	37.25
LM 40.3 P2	82	1800	40
LM 40.3 P3	82	1800	40
LM 40,3 P	82	1800	40
LM 42.1P	87	1800	42.13
LM 42.1 P2	87	1800	42.13

Tabela 1 - Pás Eólicas com Energia Nominal entre 1,5 MW e 2,0 MW [22]



TABELA 2 - 2,0 MW - 2,2 MW DE SAÍDA DE ENERGIA NOMINAL

TIPO DE LÂMINA	ROTOR (M)	DIÂMETRO DO CÍRCULO DO PARAFUSO (MM)	COMPRIMENTO DA LÂMINA (M)
LM 34,0 P3	70	1800	34
LM 40,0 P	82	2110	40
LM 42,5 P	87	1800	42,5
LM 45,3 P	92	2110	45,2
LM 47,5 P	97	2100	47,5
LM 49,1 P	100	2110	49,05
LM 56,8 P	116	2300	56,8

Tabela 2 - Pás Eólicas com Energia Nominal entre 2,0 MW e 2,2 MW 1. [22]

TABELA 3 - 2,0 MW - 2,2 MW DE SAÍDA DE ENERGIA NOMINAL

TIPO DE LÂMINA	ROTOR (M)	DIÂMETRO DO CÍRCULO DO PARAFUSO (MM)	COMPRIMENTO DA LÂMINA (M)
LM 43,8 P	90	2300	43,8
LM 48,8 P	100	2300	48,7
LM 48,8 P3	100	2300	48,7
LM 48,8 P4	100	2300	48,7
LM 53,2 P	109	2300	53,2
LM 54,8 P	112	2300	54,8
LM 58,7 P	120	2300	58,7
LM 61,2 P	125	2300	61,2

Tabela 3 -Pás Eólicas com Energia Nominal entre 2,0 MW e 2,2 MW 2. [22]



TABELA 4 - 4,0 MW - 6,00 MW DE SAÍDA DE ENERGIA NOMINAL

TIPO DE LÂMINA	ROTOR (M)	DIÂMETRO DO CÍRCULO DO PARAFUSO (MM)	COMPRIMENTO DA LÂMINA (M)
LM 66,5 P	136	3200	66,5
73+	150	3200	73,5

Tabela 4 - Pás Eólicas com Energia Nominal entre 4,0 MW e 6,0 MW. [22]

A pá de turbina eólica de 107 metros também foi fabricada pela A LM Wind Power. Essa pá em particular é notável por ser a primeira no mundo a ultrapassar a marca dos 100 metros de comprimento, tornando-se um dos maiores componentes individuais já construídos. [22]

Essa pá é utilizada para alimentar a turbina eólica offshore Haliade-X, desenvolvida pela GE Renewable Energy. A Haliade-X, com seus 12 MW, é considerada a turbina eólica mais poderosa do mundo até o momento. [22]

A primeira unidade da pá, denominada LM 107.0 P, foi produzida na fábrica offshore da LM Wind Power em Cherbourg, na França, em abril de 2019. É importante destacar que uma única rotação da Haliade-X é capaz de gerar eletricidade suficiente para abastecer uma residência no Reino Unido por mais de dois dias. [22]

Na figura abaixo, é possível observar a magnitude do tamanho dessa unidade de uma pá eólica, com impressionantes 107 metros de comprimento. [22]



Figura 15 - Pá Eólica com 107 m de comprimento.

Fonte: <https://www.lmwindpower.com/en/products/blade-types/lm-wind-power-the-worlds-first-wind-turbine-blade-beyond-100-meters>

2.3.3.1 Composição

As pás dos aerogeradores são feitas de material compósito, constituído por vários materiais com diferentes propriedades, que potenciam o rendimento da energia eólica ao permitir pás mais leves e compridas com forma aerodinâmica otimizada. Embora as composições dos materiais variem entre os tipos e fabricantes de lâminas, as lâminas geralmente são compostas da combinação de fibras e polímeros, conhecida como polímero reforçado com fibra de vidro ou de carbono. [24]

A figura abaixo mostra um corte transversal de uma pá eólica genérica, destacando suas composições.

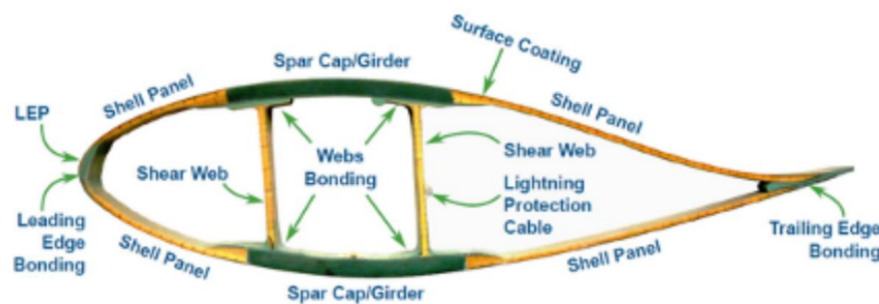


Figura 16 - Seção transversal genérica de uma pá

Fonte:file:///C:/Users/ferna/Downloads/WindEurope-Accelerating-wind-turbine-blade-circularity%20(3)%20(1).pdf

- **Spar Cap/Girder (Tampas/Vigas da longarina):** Vidro/fibra de carbono unidirecional (UD), suportados por uma raiz polimétrica como epóxi, poliéster, poliuretano ou matriz viniléster.
- **Shear Webs e Shell Panels:** Laminados multiaxiais GFRP Sandwich usando Balsa/PVC/PET como material de núcleo e Epóxi, poliéster, poliuretano ou viniléster como sistemas de matriz
- **Trailing Edge Bonding (Borda dianteira/traseira e colagem de tramas):** adesivo estrutural à base de epoy/poliuretano



- **Lightning Protection Cable (Cabo de Proteção Contra Raios):**
Alumínio ou Cobre
- **Surface Coating (Revestimento de superfície):** Verniz à base de poliuretano
- **LEP (Leading Edge Protection):** Laca/fita à base de poliuretano

Em resumo, as lâminas são principalmente compostas por uma mistura de fibras e polímeros, chamados de compósitos de polímero reforçado com fibra (FRP). Esses compósitos costumam ter uma proporção de 60% a 70% de fibras de reforço e 30% a 40% de resina em peso.

2.4.3.1.1 Fibras de Reforço

Fibras de reforço, como vidro e carbono, desempenham um papel essencial nos componentes compostos das pás de turbinas eólicas.

A fibra de vidro é o principal material de reforço utilizado nas pás das turbinas eólicas. Sua resistência e rigidez proporcionam a robustez necessária para suportar as demandas do ambiente eólico. [24]

Embora em menor escala, a fibra de carbono também é utilizada nas pás das turbinas eólicas, principalmente na longarina. Sua resistência e rigidez superiores oferecem várias vantagens em relação à fibra de vidro. No entanto, seu custo mais elevado por volume tem sido um obstáculo para uma adoção mais ampla na indústria de energia eólica. Além disso, existem híbridos que combinam tanto a fibra de vidro quanto a fibra de carbono, buscando um equilíbrio entre desempenho e custo. [24]

- **Fibra de vidro:**

A fibra de vidro é o material mais utilizado nas pás das turbinas eólicas devido a seu menor custo-benefício em relação às demais. Esta apresenta características favoráveis como alta resistência mecânica, baixo peso, boa resistência à corrosão, isolamento térmico e elétrico, baixa condutividade térmica, resistência à tração, baixa expansão térmica, facilidade de moldagem e fabricação, durabilidade e longa vida útil, transparência, não inflamável, baixa absorção de água e umidade.



Na tabela abaixo estão listadas as propriedades típicas para fibras de vidro e materiais compósitos reforçados com fibras de vidro.

TABELA 05 - Composições químicas típicas da fibra de vidro. [25]

	%(peso)	E-Glass	Vidro S-2 (Nominal) 65	Vidro HR (B)
Dióxido de Silício (SiO ₂)		52-56 (A)		63,5 - 65,0
Óxido de Alumínio (Al ₂ O ₃)		12-16 (A)	25	24,0 - 25,5
Óxido de Boro (B ₂ O ₃)		5-10 (A)		
Óxido de Cálcio (CaO)		16-25 (A)		<0,5
Óxido de Magnésio (MgO)		0-5 (A)	10	9,5 - 10,5
Óxido de Lítio (Li ₂ O)				
Óxido de Potássio (K ₂ O)	OC	0,0-0,2		
Óxido de Sódio (Na ₂ O)	OC	0-2		
Óxido de Titânio (TiO ₂)	OC	0-1,5		
Óxido de Cério (CeO ₂)				
Óxido de zircônio (ZrO ₂)				
Óxido de berílio (BeO)				
Óxido de Ferro (Fe ₂ O ₃)	OC	0,0-0,8		
Flúor (F ₂)	OC	0,0-0,1		
Sulfato (SO ₂)				
Óxidos Alcalinos	PPG	0,5-1,5		
Fluoreto de Cálcio (CAF)	PPG	0,0-0,8		
Acabamentos/Aglutinantes		0,5/3,0		



A tabela a seguir apresenta as propriedades elétricas típicas da fibra de vidro.

TABELA 06 - Propriedades elétricas típicas da fibra de vidro. [25]

		E	S-2	RH
Densidade				
	lb/in ³	0,094	0,089	0,090
	g/cm ³	2.59	2.46	2.49
Resistência à tração				
	ksi	500	665	665
	MPa	34.450	45.818	45.818
Módulos de elasticidade				
	msi	10.5	12.6	12.6
	GPa	72,35	86,81	86,81
% Ult. Alongamento		4.8	5.4	5.4
Constante dielétrica				
73°F (23°C) @ 1 MHZ		6.3-6.7	4.9-5.3	QUE

A tabela a seguir apresenta Propriedades térmicas típicas da fibra de vidro.

TABELA 07 - Propriedades térmicas típicas da fibra de vidro. [25]

	E	S-2	SR
Coef. Expansão Térmica, 106			
	in/in/F°	2.8	1.3
	m/m/C°	5.1	2.6
Ponto de Amolecimento °F (°C)	1530 (832)	1810 (988)	1778 (970.)
Ponto de Recozimento °F (°C)	1210 (654)	1510 (821)	1490 (810.)



A tabela a seguir apresenta Resistência à corrosão típica de fibras de vidro (% de perda de peso) em Condições: 200°F (96°C)

TABELA 08 - Resistência à corrosão típica de fibras de vidro. [25]

Fluido	E	S-2	SR
10% H ₂ SO ₄	42	6.8	QUE
10% HCL	43	4.4	QUE
10% HNO ₃	43	3.8	QUE
H ₂ O (destilada)	0,7	0,7	QUE
10% por OH	29	66	QUE
10% KOH	23	66	QUE

A tabela a seguir apresenta Propriedades mecânicas típicas de epóxi curado/vidro.

TABELA 09 - Propriedades mecânicas típicas de epóxi curado/vidro. [25]

Vidro E, tecido estilo 7781	Padrão Estrutural 63	Duplo proposito Estrutural/Adesivo 48
Resistência à tração, ksi (MPa)	(430)	(330)
Módulo de tração, Msi (GPa)	3,8 (36)	2,8 (19)
Resistência à compressão, ksi (MPa)	60. (410)	50. (340)
Módulo de compressão, Msi (GPa)	3,6 (25)	3.2 (22)
Resistência à flexão ksi, (MPa)	80. (550)	65 (450)
Módulo de Flexão Msi, (GPa)	3,7 (26)	3.3 (23)
Cisalhamento interlaminar ksi, (MPa)	2,6 (18)	3,8 (26)
Casca de sanduíche, lb/pol de largura (N/m de largura)	QUE	30. (3.4)
Peeling Metal-metal, lb/lin. pol. (N/lin. m)	QUE	55 (6,3)
Gravidade Específica gm/cm ³ (lb/in ³)	1,8 (0,065)	1,6 (0,058)
Teor de resina curada % em peso.	33	48



- **Fibra de Carbono:**

A fibra de carbono é usada em menor grau devido a seu maior custo por volume, embora a sua resistência e rigidez sejam superiores à da fibra de vidro. [25]

- Alta resistência e rigidez
- Leveza e baixa densidade
- Excelente resistência à tração e flexão
- Baixa condutividade térmica e elétrica
- Alta resistência à corrosão e produtos químicos
- Resistência à fadiga e ao desgaste
- Estabilidade dimensional
- Baixa absorção de umidade e resistência à umidade
- Aparência atraente e flexibilidade no design
- Pode ser moldada em diferentes formas e tamanhos.

As fibras de carbono são feitas predominantemente da carbonização do PAN. As fibras consistem em fibrilas misturadas de grafite turbostrática com planos basais tendendo a se alinhar ao longo do eixo da fibra. Isso forma uma estrutura interna que lembra uma casca de cebola. As fibras de breu podem ter uma estrutura interna diferente, mais como feixes ou raios. [25]

A morfologia altamente anisotrópica dá origem a módulos na faixa de 200-750 GPa paralelos ao longo eixo da fibra, e em torno de 20 GPa na direção normal. [25]

Algumas propriedades importantes da fibra de carbono, incluindo o custo, estão listadas na Tabela

TABELA 10 - Comparação do carbono e outras propriedades da fibra.[25]

	Módulo de tração, Msi	Tração Força, ksi	Densidade, g/cm ³	Fibra Diâmetro, micron	Custo, \$/#
Carbono (PAN)	30-50	350-1000	1,75-1,90	4-8	20-100
Carbono (Pitch)	25-110	200-450	1,90-2,15	8-11	40-200
Carbono (Rayon)		150	1,6	8-9	5-25
Vidro	6 10-12,5	440-670	2,48-2,62	30	5-40
Desempenho	20	410	1,44	--	25-75
Boro	58	730-1000	2,3-2,6	100-200	100-250



3. Vida Útil da Torre Eólica

A norma IEC 61400-1, da Comissão Eletrotécnica Internacional, estabelece que a vida útil mínima de um aerogerador deve ser de 20 anos [27]. No entanto, a vida útil das torres eólicas geralmente varia entre 20 e 25 anos, podendo algumas chegar a 30 anos, dependendo de diversos fatores. Esses fatores incluem a tecnologia aplicada no projeto da usina, as condições climáticas e operacionais enfrentadas pelos equipamentos ao longo do tempo, a qualidade dos materiais utilizados na construção das torres, bem como a adoção de práticas adequadas de uso e manutenção.[4]

É importante ressaltar que o monitoramento contínuo, a manutenção adequada e a atualização tecnológica ao longo do tempo são fatores essenciais para garantir o desempenho e a vida útil das torres eólicas, proporcionando assim uma operação eficiente e segura ao longo dos anos. [26]

No Brasil, em aproximadamente uma década, cerca de 108 empreendimentos atingirão a marca de 20 anos de vida útil, conforme indicado na tabela de dados fornecida pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), disponível no Anexo 1 deste documento. Esse marco irá gerar toneladas de resíduos.

Diante disso, torna-se necessário implementar uma logística adequada para a desmontagem, coleta, transporte e gestão dos resíduos, além de promover a restauração sustentável das áreas afetadas. É fundamental adotar medidas eficientes para lidar com o fim da vida útil desses empreendimentos e minimizar o impacto ambiental associado a esse processo.

4. Alternativas sustentáveis após o fim do ciclo de vida útil

Embora a reciclagem da maioria dos componentes da turbina seja viável, o gerenciamento do fim da vida útil e a reciclagem das pás das turbinas eólicas devido às características dos materiais utilizados nela, conforme mencionado anteriormente no item 2.3.3.1, o reprocessamento e a conversão das pás em novos materiais valiosos representam um desafio técnico.



As discussões sobre o fim de vida útil das pás de turbinas eólicas frequentemente se concentram nas questões técnicas relacionadas aos processos de reciclagem de compósitos termofixos reforçados com fibra de vidro. [26]

4.1 Reciclagem

No aerogerador, o rotor e a nacele são compostos majoritariamente por Aço, Cobre e outros metais que por possuírem valor residual e processos de reciclagem relativamente simples são reciclados em sua maioria no Brasil. [26]

O mesmo ocorre nas torres de aço, que por serem compostas de apenas um material, são 98% recicláveis. Já as torres de concreto armado passam pelo processo de separação do aço e concreto e posteriormente ambos podem ser reciclados, sendo a destinação mais usual da reciclagem do concreto a utilização do concreto granular em estradas e construções. [26]

No entanto, a reciclagem das pás dos aerogeradores é desafiadora devido à complexidade dos materiais compósitos envolvidos, bem como ao seu tamanho e formato volumosos. Além disso, a tecnologia e a infraestrutura necessárias para reciclar esses compósitos ainda não são economicamente viáveis no Brasil. [31]

Apesar disso, estão sendo desenvolvidos projetos e iniciativas em colaboração com universidades, empresas e outras instituições para enfrentar esse desafio. Um exemplo é o projeto liderado pela empresa brasileira CRV Industrial, em parceria com a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e a Fundação CERTI, que busca desenvolver um processo inovador de reciclagem de compósitos de fibra de vidro. Esse projeto utiliza a pirólise para separar os componentes de resina e fibra, produzindo materiais reciclados para diferentes aplicações.

Outro projeto relevante é o Sustentabilidade Eólica, coordenado pela Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica), que tem como objetivo estabelecer uma estratégia de gestão sustentável dos resíduos gerados pela indústria eólica no Brasil, incluindo as pás dos aerogeradores. Essas iniciativas buscam encontrar soluções viáveis para a reciclagem das pás eólicas e promover uma abordagem mais sustentável em relação aos resíduos gerados pela indústria. [18]

Contudo, essas pás podem ser recicladas usando métodos como processos mecânicos, térmicos ou químicos.

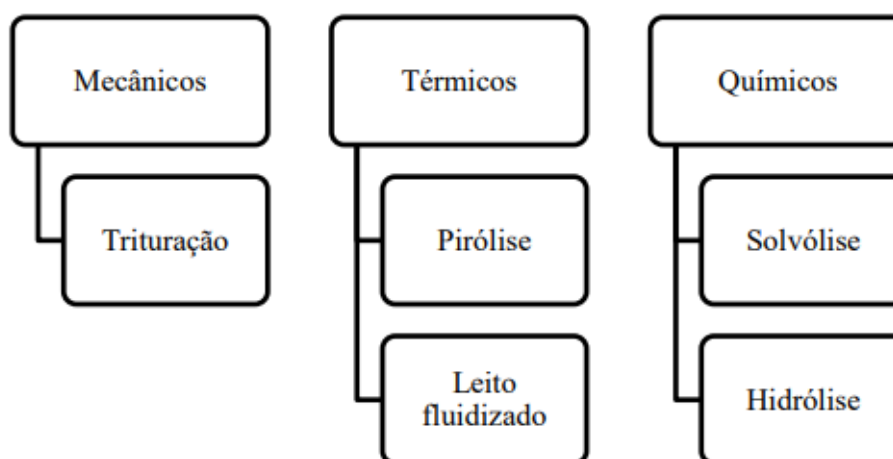


Figura 17 -Métodos de reciclagem

Fonte: <https://bibliotecadigital.ipb.pt/bitstream/10198/26138/1/Tamara%20Trindade.pdf>

4.1.1 processos mecânicos

Os processos mecânicos envolvem a trituração, que consiste em reduzir gradualmente o tamanho do composto.

A trituração mecânica de compósitos é realizada para reduzir os resíduos a pedaços de alguns centímetros ou menos. O material resultante, conhecido como compósito triturado, é então utilizado em novas aplicações. [32]



4.1.2 Processos Térmicos

Tanto a pirólise quanto o processo de leito fluidizado ocorrem em altas temperaturas. A pirólise é um processo em que ocorre a decomposição térmica de derivados lignocelulósicos em uma atmosfera inerte, com baixo teor de oxigênio. Ela envolve a despolimerização a temperaturas elevadas, variando de 350°C a mais de 800°C [33]. Por outro lado, o processo de reciclagem por leito fluidizado é utilizado para queimar a matriz de resina e recuperar as fibras. Inicialmente, o material é decomposto em pequenas pelotas de 20-30 mm e depois é introduzido em um reator de leito fluidizado, que atinge temperaturas de até 550°C, dependendo do composto reciclado [34].

É importante ressaltar que os processos de reciclagem térmica, como a pirólise ou o leito fluidizado, permitem apenas a recuperação das fibras do material compósito. As propriedades mecânicas são reduzidas e esses processos não são amplamente utilizados em escala industrial [34]. No entanto, a reciclagem pirolítica de fibras de carbono em compósitos reforçados é mais viável economicamente devido ao alto valor desses materiais [32].



4.1.3 processos Químicos

Os processos químicos envolvem o uso de produtos químicos para recuperar as fibras das pás eólicas (por meio de calor e solventes para degradar a resina). Um exemplo disso é a solvólise, que está atualmente em um nível de desenvolvimento tecnológico avançado. No entanto, a eficiência desse processo depende das características dos materiais da pá, o que torna complexa a sua aplicação devido à mistura de componentes envolvidos [38].

4.2 Reutilização das pás Eólicas

Como visto no item 2.4.3.1, devido a sua composição as pás são propícias a serem reutilizadas em vários âmbitos da construção civil como na parte estrutural, para construir pontes, edifícios e torres. A sua resistência, leveza e durabilidade fazem delas uma opção viável para esses fins.

Além disso, por ter uma forma levemente curvada a parte estética destas pás também podem ser exploradas, podendo ser usadas para outras destinações como mobiliário urbano, materiais de paisagismo, arte e decoração.

A seguir, apresentam-se exemplos de reutilização de pás eólicas na Europa, onde a questão da destinação sustentável das pás eólicas já é uma preocupação atual.

4.2.1 Bicicletário construído na Dinamarca

O projeto Re-Wind está explorando o potencial de reutilização das pás de turbinas eólicas em estruturas arquitetônicas e de engenharia. Com o desafio iminente do descarte futuro das pás eólicas devido ao fim de vida útil das usinas, empresas do setor criaram o programa Re-Wind, que apoia pesquisadores de várias partes do mundo na busca por alternativas de reutilização dos materiais das turbinas. O projeto visa explorar o potencial de reutilização das lâminas das pás em estruturas arquitetônicas e de engenharia. (Re-Wind, 2023).

Uma das soluções foi desenvolvida na Dinamarca pelo engenheiro civil Brian Rasmussen, que transformou o material em abrigos para bicicletas (Figura XX e Figura XX). Além disso, o Re-Wind escolheu a Irlanda como campo de testes e já instalou um bicicletário lá, servindo como exemplo de como as pás podem ser reaproveitadas de forma criativa e sustentável. [9]



Figura 18 - Pás de turbinas eólicas como bicicletários na Dinamarca

Fonte: <https://ciclovivo.com.br/arq-urb/design/pas-de-turbinas-eolicas-viram-bicicletarios-na-europa/>

4.2.2 Ponte para pedestres e bicicletas na Polônia

A primeira ponte, mostrada nas figuras abaixo, feita reutilizando pás eólicas, foi projetada especificamente para a utilização de pedestres e ciclistas. Sua construção envolveu o aproveitamento de vigas compostas feitas a partir das pás reaproveitadas de turbinas eólicas. Essas pontes inovadoras são o resultado de um extenso trabalho de pesquisa realizado ao longo de três anos, culminando no registro de patentes e planos para sua comercialização. [39]



Figura 19 - Primeira fonte feita reutilizando pás eólicas 1

Fonte: <https://www.theverge.com/2022/2/11/22929059/recycled-wind-turbine-blade-bridges-world-first>

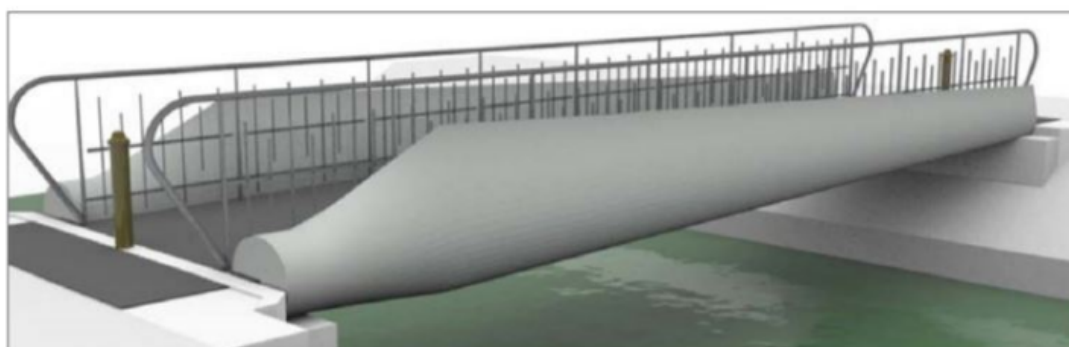


Figura 20 - Primeira fonte feita reutilizando pás eólicas 2

Fonte: Google Maps, 2023

A empresa Anmet, no âmbito do projeto de pesquisa, desenvolveu uma ponte inovadora construída a partir de pás de turbinas eólicas reaproveitadas. Ao longo de aproximadamente três anos, foram realizados testes, obtenção de licenças e a construção da estrutura. As pás utilizadas foram adquiridas de um parque eólico desativado na Alemanha, sendo submetidas a rigorosos testes de engenharia em colaboração com a Universidade de Tecnologia de Rzeszów. De acordo com Sobczyk, desenvolvedor de produtos da Anmet, essas pontes foram projetadas com uma expectativa de vida útil de pelo menos cem anos. [39]

Além disso, a equipe também explorou outras possibilidades de reutilização do material, como a criação de passarelas de pedestres (Figura XX), pontes e barreiras sonoras, contribuindo para a sustentabilidade ao utilizar o material de forma consciente e responsável. [40]



A conceptual design of pedestrian bridge using A29 wind blades as main girders, Re-Wind research project ^[24]

Figura 21 – Projeto de ponte de pedestre reutilizando pás eólicas (Re-wind,2023)

As imagens a seguir apresentam a construção daquela que é reconhecida como a segunda "ponte de pás recicladas" no mundo. Essa iniciativa de reutilização de pás eólicas como estrutura de ponte tem o potencial de se tornar uma tendência significativa no contexto da sustentabilidade, em que antigas pás de turbinas eólicas são aproveitadas em projetos de infraestrutura [40].



Figura 22 – Construção de ponte de pedestre reutilizando pás eólicas 1

Fonte:Engenheiros da Europa estão construindo pontes com pás de turbinas eólicas recicladas
- Blog Canal da Engenharia



Figura 22 – Construção de ponte de pedestre reutilizando pás eólicas 2

Fonte:Engenheiros da Europa estão construindo pontes com pás de turbinas eólicas recicladas
- Blog Canal da Engenharia



5 CONCLUSÃO

A energia eólica é reconhecida como uma tecnologia "verde", devido à sua capacidade de ser naturalmente renovável no meio ambiente e por apresentar baixas emissões de gases de efeito estufa. Conforme discutido no capítulo 1, no Brasil, a energia eólica ocupa a segunda posição entre as fontes de energia limpa, representando 13,12% da matriz energética do país. Atualmente, existem 913 usinas em operação, com uma capacidade média instalada de 25.204.624 KW.

No entanto, a questão relacionada às pás dos aerogeradores após o fim de sua vida útil pode apresentar um desafio ambiental futuro. Estima-se que, dentro de aproximadamente uma década, cerca de 108 empreendimentos atingirão a marca de 20 anos de vida útil, conforme indicado na tabela de dados fornecida pela ANEEL. À medida que o número de usinas eólicas continua a crescer no Brasil, também aumenta a geração de resíduos relacionados a esses empreendimentos.

Como mencionado no capítulo 2, a reciclagem das pás eólicas é um desafio devido à complexidade dos materiais compósitos envolvidos, que consistem principalmente em uma combinação de fibras e polímeros, conhecidos como compósitos de polímero reforçado com fibra (FRP). Esses compósitos geralmente possuem uma proporção de 60% a 70% de fibras de reforço e 30% a 40% de resina em peso. Além disso, o tamanho e o formato volumosos das pás também representam um obstáculo para a reciclagem.

No entanto, foram apresentadas alternativas para lidar com o descarte das pás eólicas em aterros. Soluções como reciclagem mecânica, térmica ou química, assim como a reutilização das pás na construção civil, têm se mostrado viáveis. As pás eólicas apresentam características como alta resistência, leveza e durabilidade, o que as torna adequadas para serem utilizadas como elementos estruturais, como vigas e pilares. Exemplos disso já podem ser observados na Europa, onde bicicletários e pontes de pedestres foram construídos utilizando pás eólicas descomissionadas.



No futuro, os desafios residem na disponibilidade e na abertura dos agentes envolvidos no mercado da indústria eólica. É importante estabelecer um cenário realista para lidar com a questão das pás dos aerogeradores quando elas alcançam o fim de seu ciclo de vida. Para enfrentar esse desafio, é fundamental promover a colaboração entre diferentes setores e incentivar o desenvolvimento de projetos e iniciativas conjuntas com universidades, como o exemplo do projeto liderado pela empresa brasileira CRV Industrial em parceria com a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e a Fundação CERTI que busca desenvolver um processo inovador de reciclagem de compósitos de fibra de vidro.

Como também, o projeto "Sustentabilidade Eólica", coordenado pela Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica), que desempenha um papel relevante nesse contexto, que tem o objetivo de estabelecer uma estratégia de gestão sustentável dos resíduos gerados pela indústria eólica no Brasil.

Esses projetos exemplificam a importância da colaboração entre empresas, instituições acadêmicas e associações para enfrentar os desafios futuros da indústria eólica. A busca por soluções inovadoras e sustentáveis é essencial para garantir o crescimento desse setor de maneira ambientalmente consciente e economicamente viável.

Além disso, é crucial contar com a presença dos órgãos públicos e sua devida fiscalização. No Brasil, a regulação e fiscalização das atividades relacionadas à geração de energia elétrica, incluindo a energia eólica, no Brasil, são de responsabilidade da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Entretanto ainda não há norma específica para a gestão de resíduos gerados pelas usinas eólicas.

A criação de normas regulamentadoras e a fiscalização de um guia técnico para o descomissionamento das pás, com diretrizes específicas para corte, reuso e reciclagem de todo o parque eólico, em particular das pás eólicas, que carecem de informações normativas, seriam essenciais.



Os órgãos ambientais estaduais e municipais também desempenham um papel relevante na regulação e fiscalização da gestão de resíduos, incluindo as pás eólicas. Eles têm a capacidade de estabelecer normas específicas e exigências para um gerenciamento adequado dos resíduos, além de fiscalizar o cumprimento dessas normas.

Portanto, é imprescindível a participação ativa dos órgãos públicos e a efetiva fiscalização para garantir a adequada gestão dos resíduos na indústria eólica. Essa colaboração entre órgãos reguladores, empresas, universidades e demais agentes envolvidos é fundamental para enfrentar os desafios futuros e promover um desenvolvimento sustentável nesse setor estratégico para a matriz energética do país.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] LUERLES SILVA DA PURIFICAÇÃO; RODRIGO BORGES DELLA FONTE. **ESTUDO DE TURBINAS EÓLICAS VERTICAIS COM EXEMPLO DE DIMENSIONAMENTO DE UMA TURBINA EÓLICA DARRIEUS PARA APLICAÇÃO EM EDIFÍCIOS**. 2012. 102 p. Monografia (ENGENHARIA MECÂNICA) — UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO CENTRO TECNOLÓGICO.

Disponível em:

https://mecanica.ufes.br/sites/engenhariamecanica.ufes.br/files/field/anexo/estudo_de_turbinas_eolicas_verticais_com_exemplo_de_dimensionamento_de_uma_turbina_eolica_darrieus_para_aplicacao_em_edificios.pdf.

Acesso em: 17/03/2023.

[2] GOVERNO DO BRASIL. **Energia eólica registra primeiro recorde de geração instantânea de 2022**. 2022. Disponível em:

<https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2022/08/energia-eolica-registra-primeiro-recorde-de-geracao-instantanea-de-2022#:~:text=O%20Brasil%20tem%2C%20atualmente%2C%20capacidade,sendo%20725%20parques%20no%20Nordeste>.

Acesso em: 18/03/2023.

[3] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Renewables 2021: Analysis and forecast to 2026**. [S.l.], 2021. Disponível em:

<https://iea.blob.core.windows.net/assets/5ae32253-7409-4f9a-a91d-1493ffb9777a/Renewables2021-Analysisandforecastto2026.pdf>. Acesso em: 18/03/2023.

[4] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Empreendimentos eólicos ao fim da vida útil: Situação Atual e Alternativas Futuras**. [S.l.], 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: 20/03/2023.



[5] OTENIEL Â. SILIVELI EPALANGA. **ENERGIA EÓLICA – VIABILIDADE TÉCNICA DE PROJETO EÓLICO NA REGIÃO DE URUBICI: Situação Atual e Alternativas Futuras**. 2013. 120 p. Monografia (Engenharia Civil) — UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA CENTRO TECNOLÓGICO. Disponível em:
<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/115460/TCC%20Oteniel%20-%20Energia%20E%C3%B3lica.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 19/03/2023.

[6] AGÊNCIA CANALENERGIA. **Energia eólica chega a 18 GW de capacidade instalada no Brasil: Situação Atual e Alternativas Futuras**. 2021. Disponível em:
<https://www.canalenergia.com.br/noticias/53163929/energia-eolica-chega-a-18-gw-de-capacidade-instalada-no-brasil>. Acesso em: 20/03/2023.

[7] ENGIE. **Usina eólica: entenda o que é e as suas vantagens: Situação Atual e Alternativas Futuras**. 2022. Disponível em:
<https://www.alemdaenergia.engie.com.br/usina-eolica-entenda-o-que-e-e-as-suas-vantagens/>. Acesso em: 20/03/2023.

[8] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Fontes de Energia: Situação Atual e Alternativas Futuras**. Disponível em:
<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/fontes-de-energia#:~:text=S%C3%A3o%20exemplos%20de%20fontes%20renov%C3%A1veis,das%20mar%C3%A9s%20e%20das%20ondas>). Acesso em: 20/03/2023.

[9] ROSA, M. **Pás de turbinas eólicas viram bicicletários na Dinamarca**. 2023. Disponível em:
<https://www.archdaily.com.br/br/969561/pas-de-turbinas-eolicas-viram-bicicletarios-na-dinamarca>. Acesso em: 07/05/2023.

[10] THE VERGE. **Engineers are building bridges with recycled wind turbine blades**. 11/02/2022. Disponível em:
<https://www.theverge.com/2022/2/11/22929059/recycled-wind-turbine-blade-bridges-world-first>. Acesso em: 07/05/2023.

[11] WINDEUROPE; CEFIC; EUCIA. **Accelerating Wind Turbine Blade Circularity: Situação Atual e Alternativas Futuras**. [S.l.], 2020.



[12] VASCONCELOS, F. **Milhares de turbinas eólicas estão chegando ao fim de sua vida útil, a grande dúvida é o que faremos com suas pás depois: Situação Atual e Alternativas Futuras**. 2021. Disponível em: <https://plu7.com/16694/tecnologia/milhares-de-turbinas-eolicas-estao-chegando-ao-fim-de-sua-vida-util-a-grande-duvida-e-o-que-faremos-c>
Acesso em: 25/03/2023.

[13] MELO, M. S. de M. **ENERGIA EÓLICA: ASPECTOS TÉCNICOS E ECONÔMICOS**. 2012. 154 p. Dissertação (Engenharia Civil) — Universidade Federal do Rio de Janeiro.
Disponível em:
http://www.ppe.ufrj.br/images/publica%C3%A7%C3%B5es/mestrado/Marcelo_Silva_de_Matos_Melo.pdf. Acesso em: 02/04/2023.

[14] MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Nordeste registra novo recorde de geração eólica diária**. 2016. Disponível em:
<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/nordeste-registra-novo-recorde-de-geracao-eolica-diaria>. Acesso em: 02/04/2023.

[15] BRASIL 61. **Capacidade instalada da energia eólica no Brasil pode abastecer 28,8 milhões de residências por mês**. 2022. Disponível em:
<https://brasil61.com/n/capacidade-instalada-da-energia-eolica-no-brasil-pode-abastecer-28-8-milhoes-de-residencias-por-mes-pi~:text=Segundo%20a%20Associa%C3%A7%C3%A3o%20Brasileira%20de,e%209.294%20aerogeradores%20em%20opera%C3%A7%C3%A3o>. Acesso em: 02/04/2023.

[16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA E NOVAS TECNOLOGIAS. **boletim anual 2021**. 2021. Disponível em:
https://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2022/07/ABEEOLICA_BOLETIMANUAL-2021_PORT.pdf. Acesso em: 02/04/2023.

[17] ANEEL. **Quantidade de empreendimentos de geração de energia em operação**. 2023.
Disponível em:
<https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/empreendimentos-em-operacao>. Acesso em: 09/04/2023.



[18] ABEEÓLICA. **Energia Eólica: Os bons ventos do Brasil**. 2023.

Disponível em:

<https://abeeolica.org.br/>. Acesso em: 09/04/2023.

[19] PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA CASA CIVIL SUBCHEFIA PARA ASSUNTOS JURÍDICOS. **LEI Nº 10.438, DE 26 DE ABRIL DE 2002**. 2002.

Disponível em:

https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/2002/L10438.htm. Acesso em: 09/04/2023.

[20] WINDBOX. **Componentes dos aerogeradores: conheça toda a sua estrutura**. 2020.

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

Acesso em: 16/04/2023.

[21] ENEL GREEN POWER. **Hélice eólica**. Disponível em:

<https://www.enelgreenpower.com/pt/learning-hub/energias-renoveveis/energia-eolica/helice-eolica>. Acesso em: 16/04/2023.

[22] LM WIND POWER. RECORD-BREAKING BLADES. Disponível em: <https://www.lmwindpower.com/en/products/blade-types>.

Acesso em: 16/04/2023.

[23] ARIZONA, G. **Você sabe como é feito o transporte de pás eólicas?**

Disponível em:

<https://arizonagrupo.com.br/voce-sabe-como-e-feito-o-transporte-de-pas-eolicas/>. Acesso em: 30/04/2023.

[24] WIND EUROPE; EUCIA; CEFIC. **Accelerating Wind Turbine Blade Circularity**. 2020. Acesso em: 07/05/2023.



[25] US DEPARTMENT OF DEFENSE. **COMPOSITE MATERIALS HANDBOOK VOLUME**

3. POLYMER MATRIX COMPOSITES MATERIALS USAGE, DESIGN, AND ANALYSIS. [S.l.]: CRC Press, 2002. 693 p. Acesso em: 07/05/2023.

[26] WIND EUROPE. **Decommissioning of Onshore Wind Turbines.** 2020. Acesso em:14/05/2023.

[27] CENTRO DE TECNOLOGIA DO GÁS E ENERGIAS RENOVÁVEIS -CTGÁS -ER.**Normalização e Desempenho de Aerogeradores.** [S.l.: s.n.], 2012. 46 p. Acesso em:14/05/2023.

[28] BEAUSON, J. et al. **The complex end-of-life of wind turbine blades: A review of the European context.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 155, n. 111847, p. 111847, 2022.

[28] DEENEY, P. et al. End-of-Life alternatives for wind turbine blades: Sustainability Indices based on the UN sustainable development goals. **Resources, conservation, and recycling**, v. 171, n. 105642, p. 105642, 2021.

[29] CIANCIARULLO, M. I. **Torres Eólicas: Aço x Concreto.** Acesso em: 21/05/2023.



- [30] CIANCIARULLO, M. I. **Torres Eólicas: Aço x Concreto**. Acesso em: 21/05/2023.
- [31] WIND EUROPE; EUCIA; CEFIC. **Accelerating Wind Turbine Blade Circularity**. 2020. Acesso em: 21/05/2023.
- [32] BRØNDSTED, J. B. e P. **Pás de turbinas eólicas: o fim da vida Perspectiva**. Acesso em: 28/05/2023.
- [33] ZAMAN, C. Z. et al. **Pyrolysis: A Sustainable Way to Generate Energy from Waste**. Acesso em: 28/05/2023.
- [34] GENTRY, T. R. et al. **Structural analysis of a roof extracted from a wind turbine blade**. *Journal of architectural engineering*, v. 26, n. 4, p. 04020040, 2020.
- [35] RAMOS, E. R.; ENGENHEIRO QUÍMICO, S. MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL Escola de Engenharia Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais -PPGEM **Dióxido de Enxofre: Impacto ambiental e Dessulfuração -Caso aplicado aos gases da combustão do carvão Recreio em leito fluidizado**. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/159449/000212346.pdf;jsessionid=6AB7A9E81C4EFD97C860D043959F027D?sequence=1>>. Acesso em: 04/06/2023.
- [36] PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA CASA CIVIL SUBCHEFIA PARA ASSUNTOS JURÍDICOS. **LEI Nº 12.305, DE 2 DE AGOSTO DE 2010**. Acesso em: 04/06/2023.



[37] ANEEL. **RALIE – Relatório de Acompanhamento da Expansão da Oferta de Geração de Energia Elétrica**. Acesso em: 15/06/2023.

[38] VIGOLO, T. **Descarte de pás dos aerogeradores: uma análise comunicacional**. Disponível em:
<https://bibliotecadigital.ipb.pt/bitstream/10198/26138/1/Tamara%20Trindade.pdf>.
Acesso em: 18/06/2023.

[39] STONE, M. **These are the world's first wind turbine blade bridges**.
Disponível em:
<<https://www.theverge.com/2022/2/11/22929059/recycled-wind-turbine-blade-bridges-world-first>>. Acesso em: 20/06/2023.

[40] BUENO, T. **Engenheiros da Europa estão construindo pontes com pás de turbinas eólicas recicladas**. Blog Canal da Engenharia, 16 fev. 2022.
Disponível em:
<<https://blogcanaldaengenharia.com.br/engenheiros-da-europa-estao-construindo-pontes-com-pas-de-turbinas-eolicas-recicladas/>>. Acesso em: 20/06/2023.



ANEXOS

ANEXO 1 - Tabela de dados da quantidade de empreendimentos de geração de energia em operação fornecida pela ANEEL

DatGeracaoConjuntoDados	SigTipoGeracao	QtdUsinasPeriodo	MdaPotenciaInstaladaKW	MesReferencia	AnoReferencia
31/05/2023	EOL	7	21000	12	2001
31/05/2023	EOL	9	22000	12	2002
31/05/2023	EOL	9	22030	12	2003
31/05/2023	EOL	11	28630	12	2004
31/05/2023	EOL	10	28600	12	2005
31/05/2023	EOL	15	236850	12	2006
31/05/2023	EOL	16	247050	12	2007
31/05/2023	EOL	21	338400	12	2008
31/05/2023	EOL	36	602300	12	2009
31/05/2023	EOL	50	926890	12	2010
31/05/2023	EOL	70	1424792	12	2011
31/05/2023	EOL	82	1820382	12	2012
31/05/2023	EOL	70	1424792	3	2012
31/05/2023	EOL	76	1543042	6	2012
31/05/2023	EOL	80	1692532	9	2012
31/05/2023	EOL	108	2201772	12	2013
31/05/2023	EOL	92	2044538	3	2013
31/05/2023	EOL	95	2092541	6	2013
31/05/2023	EOL	97	2109364	9	2013
31/05/2023	EOL	228	4887689	12	2014



31/05/2023	EOL	117	2441176	3	2014
31/05/2023	EOL	151	3106190	6	2014
31/05/2023	EOL	183	3840138	9	2014
31/05/2023	EOL	316	7629732	12	2015
31/05/2023	EOL	265	5832549	3	2015
31/05/2023	EOL	264	6428397	6	2015
31/05/2023	EOL	273	6629397	9	2015
31/05/2023	EOL	413	10123942,22	12	2016
31/05/2023	EOL	349	8488082	3	2016
31/05/2023	EOL	370	9022700,22	6	2016
31/05/2023	EOL	389	9506960,22	9	2016
31/05/2023	EOL	501	12283243	12	2017
31/05/2023	EOL	423	10364042,38	3	2017
31/05/2023	EOL	439	10701742,7	6	2017
31/05/2023	EOL	466	11386242,7	9	2017
31/05/2023	EOL	585	14390292,86	12	2018
31/05/2023	EOL	511	12537942,86	3	2018
31/05/2023	EOL	529	12920942,86	6	2018
31/05/2023	EOL	544	13370642,86	9	2018
31/05/2023	EOL	629	15377852,86	12	2019
31/05/2023	EOL	606	14872792,86	3	2019
31/05/2023	EOL	614	15063892,86	6	2019
31/05/2023	EOL	618	15145092,86	9	2019
31/05/2023	EOL	681	17131162,86	12	2020



31/05/2023	EOL	636	15495027,86	3	2020
31/05/2023	EOL	645	15722532,86	6	2020
31/05/2023	EOL	657	16204422,86	9	2020
31/05/2023	EOL	789	20771078,86	12	2021
31/05/2023	EOL	704	17729872,86	3	2021
31/05/2023	EOL	725	18559237,86	6	2021
31/05/2023	EOL	753	19437898,86	9	2021
31/05/2023	EOL	883	23727623,86	12	2022
31/05/2023	EOL	812	21585878,86	3	2022
31/05/2023	EOL	824	21886178,86	6	2022
31/05/2023	EOL	846	22535988,86	9	2022
31/05/2023	EOL	913	25204623,86	3	2023

Fonte: ANEEL (2023)