

Projeção de resíduos de aerogeradores no Brasil até 2050 e desafios para a economia circular

Ananda Letícia Martins D'Ávila ^I
Altem Nascimento Pontes ^{II}

Resumo: O Brasil destaca-se por sua matriz energética predominantemente renovável, na qual a energia eólica emerge como uma fonte essencial, representando a segunda maior contribuição na matriz nacional. Este estudo avaliou a sustentabilidade e os desafios da economia circular no setor eólico brasileiro, projetando os resíduos de aerogeradores até 2050. Utilizando uma abordagem estatística, analisou-se as capacidades instaladas, a distribuição geográfica dos parques eólicos e o potencial de geração de resíduos. Os resultados indicam o crescimento na capacidade de geração de energia eólica, com previsão de 6,25 milhões de toneladas (Mt) de resíduos até 2050, principalmente concentrados no Nordeste. Embora a economia circular seja reconhecida como estratégia para mitigar esses impactos, custos elevados, barreiras tecnológicas, falta de infraestrutura dos canais reversos, ausência de legislação e regulamentações específicas são obstáculos para a plena circularidade. O estudo ressalta a necessidade urgente de planejamento eficaz para a gestão sustentável de resíduos no setor eólico.

^I Universidade do Estado do Pará (UEPA), Belém, PA, Brasil.

^{II} Universidade do Estado do Pará (UEPA), Belém, PA, Brasil.

Palavras-chave: Turbinas; usinas eólicas; sustentabilidade; energia renovável; gestão ambiental.

São Paulo. Vol. 29, 2026

Artigo Original

DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4422asoc01591vu29L2AO>

Introdução

Na 21ª Conferência das Partes, realizada em Paris, estabeleceu-se o compromisso global para enfrentar a mudança climática (Depledge *et al.*, 2021). O acordo de Paris visa limitar o aumento da temperatura média global a 2 °C acima dos níveis pré-industriais, com esforços para não ultrapassar 1,5 °C (ONU, 2015). Com base na redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE), destaca-se a descarbonização do setor energético, dada sua contribuição para as emissões (Sadai *et al.*, 2022). A otimização da matriz energética é uma prioridade global, viável mediante investimentos em fontes renováveis, como em energia eólica (Kastanaki; Giannis, 2022).

A América Latina promove grandes projetos solares e eólicos com previsão de aumento em 460% na capacidade de produção de energias renováveis até 2030. Neste cenário, o Brasil assume a liderança como um dos principais produtores de energia solar e eólica (Bauer *et al.*, 2023). Em consonância a isto, Kati *et al.* (2021) afirmam que a energia eólica emerge como líder, com projeções indicando que suprirá entre um quarto e um terço da demanda global de eletricidade até 2050.

Contudo, no setor eólico, a inovação tecnológica inclui externalidades, como novos e intensificados impactos ambientais. Os efeitos de recuperação climática projetados e associados ao campo energético podem resultar em reduções líquidas de emissões previstas, ou mesmo em aumentos de emissões de GEE devido a gestão ineficaz dos resíduos. A dependência excessiva de conhecimentos e fornecedores estrangeiros representa um desafio a mais (IPCC, 2023).

Adicionalmente, a transição energética impulsiona a demanda por materiais, incluindo cobre, lítio, cobalto, níquel, elementos de terras raras e do grupo da platina (Viana, 2025). O sucesso na implementação de tecnologias renováveis depende do suprimento confiável desses materiais (Calderon *et al.*, 2020).

Diante disto, a aplicação da economia circular (EC) é um instrumento essencial na descarbonização energética. Integrar os princípios da EC na concepção industrial e nos processos pode reduzir significativamente os custos de produção, a demanda por materiais virgens, emissões de GEE, volume final de resíduos e outros poluentes. Em contrapartida, amplia a disponibilidade de matérias-primas, o aprimoramento da competitividade do setor, propicia novas oportunidades de mercado, rendimentos e empregos (IPCC, 2023; IRENA, 2023).

A estruturação da cadeia de suprimentos reversa (CSR) para resíduos de equipamentos de energia renovável, também é fundamental para assegurar a distribuição da responsabilidade pela reciclagem. Com o adiamento do debate sobre o tema, os stakeholders podem enfrentar desafios dispendiosos da organização tardia dos fluxos reversos. Como exemplo, prevê-se que 720.000 toneladas de pás de turbinas eólicas sejam direcionadas a aterros nos EUA nos próximos 20 anos (Atasu *et al.*, 2021).

Embora a EC apresente potencial para atender as demandas de matérias-primas, ainda permanece inexplorada. Obstáculos como custos elevados, barreiras tecnológicas, falta de capacidade para implementar soluções e, principalmente, limitado acesso à in-

formação sobre a EC na indústria de energias renováveis são os principais desafios para a transformação energética (IRENA, 2023).

Este estudo se justifica pela falta de dados e avaliações específicas para o cenário brasileiro, principalmente sobre a quantificação de resíduos de aerogeradores e em analisar os desafios para a implementação de princípios de EC (Turkmen; Babuna, 2024). A previsão do volume futuro de resíduos de aerogeradores ao fim da vida útil (EOL) e do potencial de reciclagem é complexa e envolve incertezas significativas (Rathore; Panwar, 2022). Variáveis como a definição do EOL, a estimativa precisa das quantidades de resíduos, a localização geográfica da desativação e o conhecimento sobre o número real de aerogeradores desativados precisam ser melhor compreendidas e projetadas para um planejamento eficaz (Karavida; Nõmmik, 2015, Delaney *et al.*, 2023; Majewski *et al.*, 2022).

Nesse sentido, esta pesquisa busca avaliar a sustentabilidade da expansão da energia eólica no Brasil, por meio da projeção da geração de resíduos de aerogeradores até 2050 e da análise dos desafios para a implementação de princípios de economia circular no setor. Para tanto, a questão central que norteia este trabalho é como a projeção da geração de resíduos de aerogeradores *onshore*, ou terrestres, no Brasil até 2050 se relaciona com a sustentabilidade do setor eólico brasileiro e quais os principais obstáculos para a implementação da EC nesse contexto.

Material e Métodos

Área de Estudo

Divergindo do cenário mundial, na qual a matriz energética da maioria dos países ainda é predominantemente fundamentada em fontes fósseis, o Brasil apresenta sua matriz energética estruturada em fontes renováveis (Freire; Fontgalland, 2022; Krell; Sousa, 2020). Conforme dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) para o ano de 2024, 84,47% da energia nacional gerada provém de matriz renovável, composta por fonte hídrica (54,40%), eólica (15,05%), biomassa (8,34%) e solar (6,68%), enquanto 15,53% da matriz energética advém de fontes não renováveis, tais como gás natural (8,87%), petróleo (3,96%), carvão mineral (1,71%) e nuclear (0,99%) (ANEEL, 2024).

Diante desse contexto, Werner e Lazaro (2023) ressaltam que a acentuada inserção das energias renováveis na configuração da matriz energética brasileira se deve à evolução energética do país ao longo do processo de industrialização, em paralelo a crise de abastecimento energético de 2001 e dada a emergência de questões ambientais relacionadas à variabilidade climática e à escassez de água. Concomitantemente, inúmeros mecanismos no país foram instaurados como estímulo para a transição em direção a uma economia de baixa emissão de carbono (Lazaro; Soares, 2024).

Coleta de Dados

A pesquisa realizou uma investigação minuciosa em plataformas da Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica), Agência Nacional de Energia Elétrica (ANE-

EL), Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e International Renewable Energy Agency (IRENA). Em busca de dados robustos, confiáveis e atualizados, tais fontes foram escolhidas por sua relevância e credibilidade nacional e internacional na coleta de dados e na produção de documentos sobre o setor eólico brasileiro.

As informações mais pertinentes ao tema incluíram dados sobre a capacidade de operação do setor, o número de usinas comerciais licenciadas ou em operação, e a localização dessas usinas no Brasil, disponíveis na plataforma SIGA da ANEEL. A quantidade de aerogeradores foi obtida por meio de relatórios da ABEEólica, enquanto o ONS e a IRENA forneceram informações complementares sobre o contexto da energia eólica no país.

A ABEEólica, fundada em 2002, é uma entidade sem fins lucrativos que representa a indústria eólica brasileira e desempenha um papel relevante na divulgação de informações globais sobre energia eólica no Brasil por meio do Global Wind Energy Council (GWEC) (ABEEólica, 2024). Enquanto a IRENA, é uma agência intergovernamental que atua como a principal plataforma para a cooperação internacional, além de fornecer dados e análises atuais do campo das energias renováveis (IRENA, 2024).

Somada às fontes de dados selecionadas nesta pesquisa, a ANEEL é uma entidade reguladora brasileira, cuja função é de regular e fiscalizar a geração, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica no país. Sua plataforma online possibilita a consulta de dados estatísticos relevantes sobre geração, transmissão e consumo de energia elétrica no Brasil.

Ao passo que o ONS é a entidade responsável pela coordenação e operação do Sistema Interligado Nacional (SIN) de energia no país. Atua em tempo real na estabilidade e segurança do sistema, otimização do uso dos recursos energéticos, minimização dos riscos de interrupções no fornecimento e promoção da eficiência operacional. No portal eletrônico da entidade podem ser encontradas informações sobre a operação do SIN, bem como publicações técnicas, estudos de planejamento energético e relatórios de desempenho operacional.

Ambas as entidades são vinculadas ao Ministério de Minas e Energia, que desempenha o papel de supervisão e coordenação, delineando diretrizes e políticas para o setor elétrico brasileiro. Em suma, a ANEEL e o ONS trabalham em sinergia para assegurar o fornecimento eficiente de energia elétrica no Brasil.

Também, para a produção dos resultados deste trabalho, fez-se imperativo a definição de dados específicos acerca dos aerogeradores para a estruturação dos cálculos. De acordo com Paulsen e Enevoldsen (2021), os aerogeradores de usinas comerciais têm em média uma vida útil de 20 a 25 anos. Contudo, considerou-se para esta pesquisa o tempo de vida útil de 20 anos para os aerogeradores, conforme estabelece a norma IEC 61400-1 que recomenda o tempo mínimo para projetos de aerogeradores (ABNT, 2023). Ressalta-se que este prazo é considerado nos cálculos, modelagens, testes em laboratório com protótipos e ensaios de resistência mecânica no campo (Beauson *et al.*, 2022).

A projeção da geração de resíduos de aerogeradores requer a definição de um modelo base representativo, cujas características técnicas, como potência e peso, permitam

estimar a quantidade de resíduos ao final de sua vida útil. Conforme observado no início da expansão do setor eólico no Brasil, os aerogeradores de usinas comerciais possuíam, em 2012, potências predominantemente entre 1,6 MW e 3 MW e alturas em torno de 100 metros (ABREEólica, 2012; CEPEL, 2017).

Tendo em vista que a SIEMENS-GAMESA figura dentre as principais fabricantes de aerogeradores de grande porte no Brasil (ABEEólica, 2021), foi considerado como referência para o cálculo as características do aerogerador de modelo SWT-2.3-93 da fabricante como peso médio de 386 toneladas e altura de 100 metros. A escolha se justifica pela sua representatividade no período de consolidação inicial e desenvolvimento do setor eólico brasileiro, sendo um modelo de potência e altura alinhado com as características gerais das turbinas comerciais instaladas.

Análise de Dados

Os dados utilizados na pesquisa foram organizados em planilhas eletrônicas no software Microsoft Excel, estruturando cronologicamente o número de aerogeradores instalados no Brasil. Para a projeção, considerou-se que o peso integral da estrutura dos aerogeradores se torne resíduo. Ainda, adotou-se o peso médio de 386 toneladas por aerogerador e o peso acumulado dos aerogeradores desde o início da operação dos parques eólicos, em 2005, até o ano de 2030, que passado o tempo de vida útil de 20 anos, tais aerogeradores já terão se tornados resíduos no ano de 2050.

Foram aplicadas técnicas de estatística descritiva para ordenar os dados, calcular os totais acumulados e analisar a tendência de crescimento do peso de resíduos ao longo do tempo (Fisher; Marshall, 2009). Para projetar a geração de resíduos de aerogeradores até 2050, foi utilizada uma regressão linear, com base na forte associação observada entre as variáveis “ano” (variável independente x) e “peso acumulado de resíduos” (variável dependente y). A equação obtida foi:

$$y = 0,3047x - 612,29$$

Onde:

- y representa a massa acumulada de resíduos em toneladas;
- x é o ano considerado na projeção;
- 0,3047 é o coeficiente angular da reta, representando o aumento médio anual de resíduos;
- - 612,29 é o coeficiente linear necessário para ajustar a linha de tendência aos dados históricos.

A escolha do modelo linear justifica-se pelos elevados valores do coeficiente de correlação de Pearson (r) e do coeficiente de determinação (R^2), demonstrando uma

associação linear muito forte entre as variáveis analisadas. O coeficiente r varia entre -1 e 1 e indica a força e a direção da relação linear entre duas variáveis, sendo que quanto mais próximo de 1 ou -1 , maior é essa associação (Grácio; Oliveira, 2015; Trindade *et al.*, 2001).

Um valor de $r = 1$ representa correlação positiva perfeita, enquanto $r = -1$ indica correlação negativa perfeita, já $r = 0$ sugere ausência de relação linear (Cargnelutti Filho *et al.*, 2012; Ribeiro *et al.*, 2005). Em geral, valores absolutos de r acima de $0,9$ são considerados como indicativos de forte correlação, o que reforça a validade do uso da regressão linear para análises e projeções (Martins, 2014; Chein, 2019).

Adicionalmente, o padrão visual dos dados em gráfico revelou uma tendência linear clara, com baixo erro residual, o que reforça a adequação da abordagem adotada. Embora modelos estatísticos alternativos, como exponencial ou polinomial, tenham sido considerados, estes apresentaram menor ajustamento aos dados históricos.

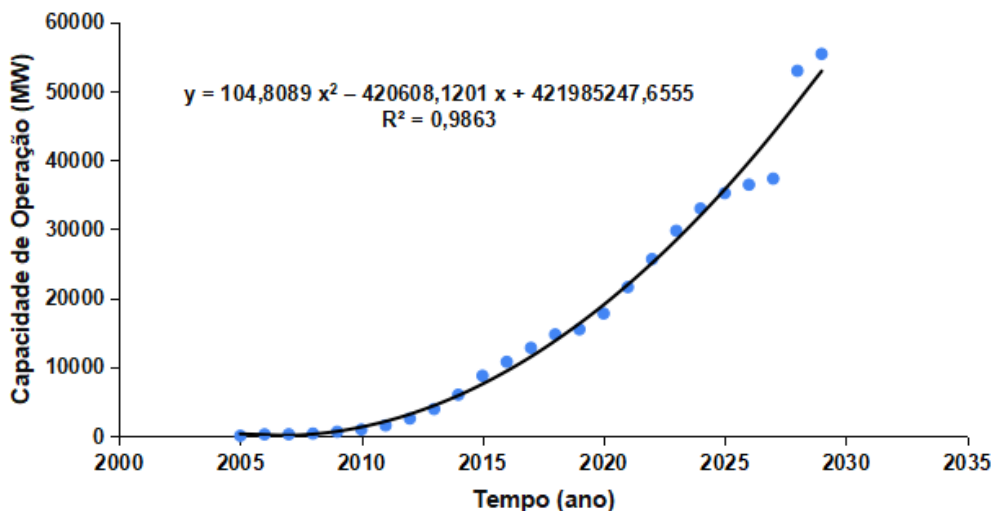
Por fim, é importante destacar que a projeção se refere exclusivamente aos resíduos estimados para o fim da vida útil dos aerogeradores, não sendo considerados resíduos oriundos de perdas no transporte, instalação, manutenção ou substituição de componentes, devido à ausência de dados consolidados sobre tais processos no setor eólico brasileiro.

Resultados e Discussão

Análise da evolução na capacidade de geração de energia eólica no Brasil

Desde o início da exploração dos recursos eólicos *onshore* no Brasil até os dias atuais, a capacidade de operação de energia eólica tem continuado a crescer. A efetivação do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA) em 2002, juntamente com a realização de leilões para impulsionar a construção de usinas eólicas no país, marcou o início dessa exploração em 2005, com uma capacidade de operação de 22 MW. Os anos seguintes avançaram com um crescimento modesto da capacidade de operação. No entanto, a partir de 2010, quando a capacidade de operação atingiu 928 MW, o crescimento se tornou mais acentuado, como evidenciado na Figura 1.

Figura 1 – Gráfico da capacidade de operação (MW) de energia eólica no Brasil.



Fonte: Autores, 2024.

Desde Assim, ao longo do tempo, o Brasil tem testemunhado um crescimento constante e progressivo na capacidade de geração de energia eólica *onshore*. Em 2015, registrou-se uma potência instalada de 8.723 MW, que dobrou até atingir 17.747 MW em 2020. Em 2024, o país alcançou um novo recorde, com uma capacidade de geração de energia eólica *onshore* de 30.956,55 MW. Considerando que a capacidade de operação continue apresentando um crescimento quadrático, a projeção indica que até 2029 a capacidade de operação nacional poderá chegar a 55.455,72 MW, levando em conta as usinas eólicas em processo de licenciamento ou construção.

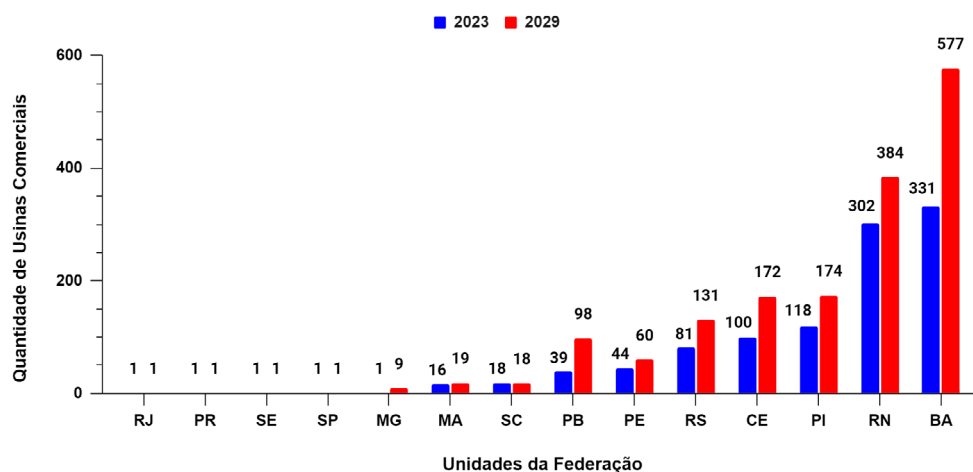
Contudo, destaca-se que o Brasil está imerso em um intenso processo de transição energética, onde a energia eólica desponta como a segunda maior fonte renovável na matriz energética nacional (ANEEL, 2024). Espera-se ainda mais crescimento na exploração eólica *onshore*, bem como um avanço significativo no setor de exploração eólica marítima, também denominada *offshore*. Estima-se que a capacidade de geração eólica marítima atinja 234.235 MW, representando um importante marco na diversificação e expansão da matriz energética brasileira. Jansen *et al.* (2022) preveem que 97% de toda a capacidade eólica *offshore* global seja leiloadada até 2030.

Distribuição de usinas comerciais de energia eólica em território nacional

Os resultados apontam que a região Nordeste do Brasil se destaca com uma expressiva concentração de usinas eólicas em operação no país. Atualmente, com base na investigação realizada na plataforma da ANEEL (2024), existem 1054 parques eólicos em funcionamento, dos quais 90,23% estão localizados na região Nordeste, 9,49% estão

situados na região Sul e apenas 0,28% operam na região Sudeste. Os estados que mais se destacaram na exploração dos recursos eólicos para a geração de energia foram a Bahia (331), Rio Grande do Norte (302), Piauí (118) e Ceará (100), ambos da região Nordeste do Brasil. Conforme pode ser verificado na Figura 2.

Figura 2 – Indicativo atual e projeção da quantidade de usinas eólicas *onshore* nos estados do Brasil.



Fonte: Autores, 2024.

Devido à expressiva concentração de usinas eólicas na região Nordeste do Brasil, como afirmam Lima *et al.* (2024), essa região apresenta as mais altas velocidades de vento em escala nacional, além de apresentar o maior potencial eólico do país (Traldi, 2021). Os dados do ONS (2024) corroboram a eficiência energética das usinas eólicas instaladas nessa área, destacando um fator de capacidade (FC) de 39,92% para o ano de 2023, superior à média nacional de 39,5%. Em comparação com os líderes mundiais em energia eólica, o FC do Brasil (39,5%) supera o dos EUA (35%), Alemanha (25%), China (24%) e Índia (19%) (De Araújo; Willcox, 2018). É importante ressaltar que a avaliação do FC considera a disponibilidade do recurso eólico em relação à geração energética obtida pela usina durante um determinado período (Brasil, 2020).

Em 2023, o Brasil teve um ano recorde, no qual foi listado dentre os cinco principais mercados mundiais para novas instalações de usinas comerciais de geração de energia eólica, sendo o grupo formado pela China, EUA, Brasil, Alemanha e Índia (GWEC, 2024). Com a projeção de novos parques eólicos para 2029, nota-se um acentuado aumento de usinas eólicas na região Nordeste, consolidando-a como um importante centro produtor de energia eólica *onshore* no Brasil.

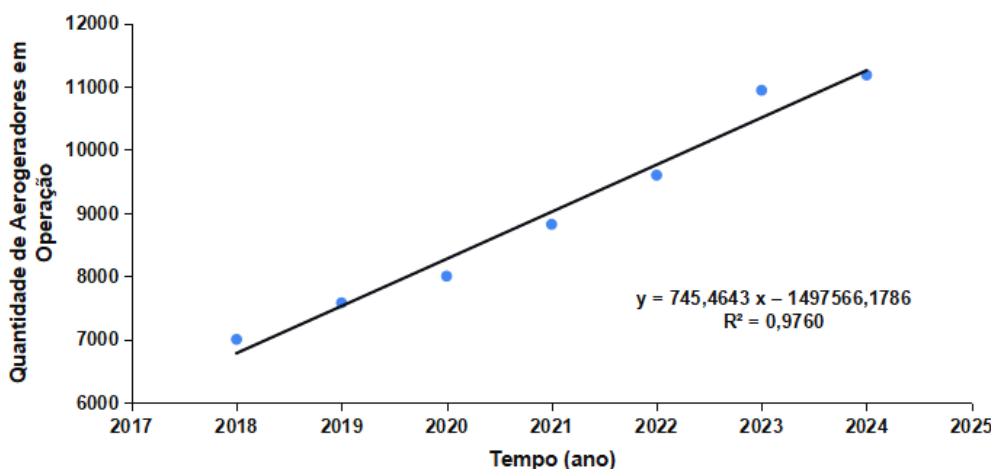
Todavia, embora não tenha destaque nos resultados apresentados, a região Sul também possui um importante potencial de geração de energia eólica *onshore*, com altas velocidades de vento principalmente entre maio e setembro (Dos Santos *et al.*, 2024).

Com a futura operação de parques *offshore* no país, a região Sul ganhará visibilidade devido à significativa exploração dos recursos eólicos marítimos, sobretudo no estado do Rio Grande do Sul, que atualmente possui 26 processos de licenciamento de usinas eólicas comerciais *offshore* em tramitação (IBAMA, 2024).

Quantitativo de aerogeradores em operação no Brasil

Com o levantamento na plataforma da ABEEólica, identificou-se a crescente instalação de aerogeradores nas usinas eólicas *onshore* no Brasil. Em 2018, já havia 7.000 aerogeradores em funcionamento no país. Com a expansão dos parques, percebeu-se uma tendência linear de crescimento no número de aerogeradores, conforme mostrado na Figura 3. Em 2021, o total de aerogeradores atingiu 8.820 unidades e, em março de 2024, chegou a 11.183 aerogeradores em operação. Isto representa um crescimento significativo de 59,76% de aerogeradores no intervalo de 2018 a 2024.

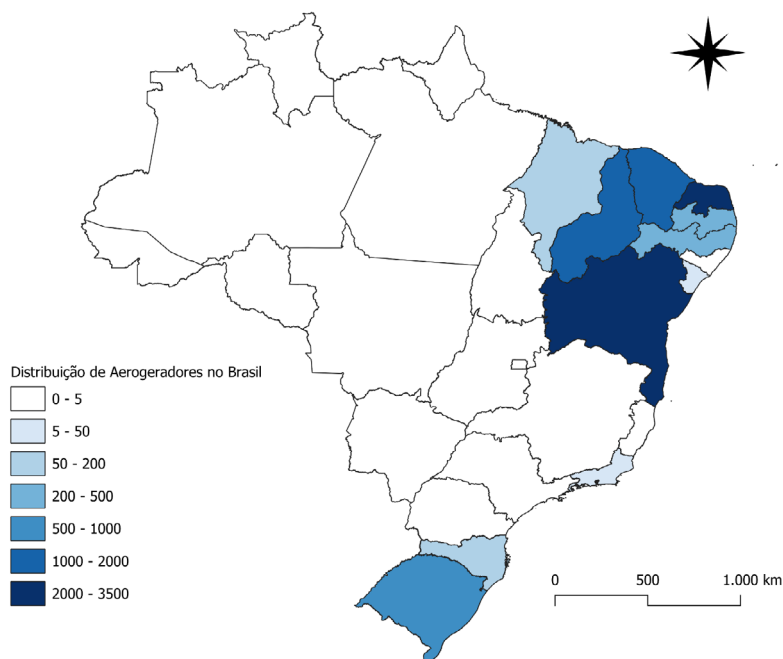
Figura 3 – Crescimento unitário da quantidade de aerogeradores no Brasil.



Fonte: Autores, 2024.

Em consonância com a predominância de usinas eólicas no Nordeste do Brasil, a maior quantidade de aerogeradores também está localizada nessa região. O estado do Rio Grande do Norte, apesar de ser o segundo em quantidade de parques eólicos, logo atrás da Bahia, se destaca com a maior quantidade de aerogeradores em operação, com o total de 3.413 unidades. Consequentemente, é o estado líder em produção de energia eólica, com uma capacidade operacional de 9.963,9 MW. Destaca-se ainda que dos 11.183 aerogeradores em funcionamento no país, 10.133 estão localizados na região Nordeste, representando cerca de 90,61% do total nacional (ABEEólica, 2024), como ilustrado na Figura 4.

Figura 4 – Mapa de distribuição quantitativo de aerogeradores no Brasil.

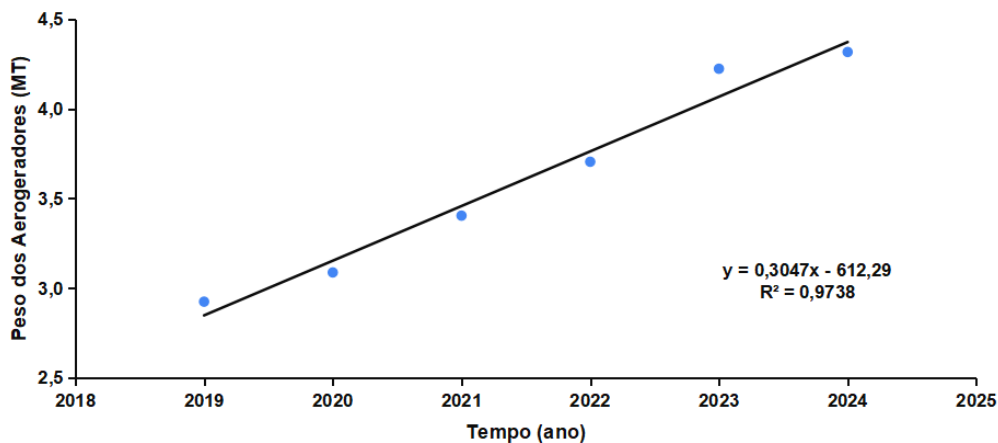


Fonte: Autores, 2024.

Projeção da geração de resíduos de aerogeradores no Brasil até 2050

Dado o tratamento e organização dos dados, o gráfico gerado apontou que o crescimento do peso dos aerogeradores ao longo dos anos se consolidou em uma tendência linear. Dessa forma, a função que descreve o comportamento dos dados indica que cerca de 6,25 milhões de toneladas de resíduos de aerogeradores *onshore* serão gerados no Brasil até o ano de 2050, conforme apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Peso dos Aerogeradores.



Fonte: Autores, 2024.

Com o resultado apontado da projeção de resíduos de aerogeradores no Brasil, ao ser comparado com estimativas de publicações encontradas revela diferenças significativas em termos de volume, temporalidade, contexto geográfico e componentes. A previsão de 6,25 milhões de toneladas de resíduos de aerogeradores *onshore* no Brasil até 2050, é uma das mais altas entre os países avaliados nas pesquisas. Este valor reflete a expansão do setor de energia eólica no Brasil, que tem se consolidado como um dos principais produtores de energia renovável (Da Silva *et al.*, 2013).

De acordo com Chen *et al.* (2021), espera-se que a província Guangdong, na China, produza cerca de 16 Mt de resíduos de até 2025, abrangendo aerogeradores *onshore* e *offshore*. Enquanto Volk *et al.* (2021), apresenta projeções mais modestas para a Alemanha de resíduos provenientes da exploração *onshore*, variando entre 325.726 t e 429.525 t de resíduos de plásticos reforçados com fibra de vidro até 2040. Em relação ao Reino Unido, os autores Tota-Maharaj e McMahon (2021) destacam uma projeção de 6,16 Mt de resíduos de aerogeradores que serão geradores entre os anos de 2035 e 2039, indicando uma fase de descomissionamento massiva de aerogeradores em um curto período ao considerar a exploração *onshore* e *offshore*.

Diante da investigação realizada por Tazi *et al.* (2019), na região de Champagne-Ardenne, na França, previu-se 1,61 milhões de toneladas (Mt) de pás *onshore* descomissionadas entre 2002 e 2016. A abordagem utilizada pelos autores Andersen *et al.* (2016) apontam que a geração de energia eólica *onshore* na Suécia resultará em 270 mil toneladas de resíduos de aerogeradores até 2034. Para o cenário mundial, os autores Papadakis *et al.* (2010) também avaliaram resíduos de pás em operações *onshore* e *offshore*, estimando 300 mil toneladas descomissionadas até 2028.

Já as atividades de geração de energia eólica em parques *onshore* e *offshore*, na Di-

namarca, foram estudadas por Abrahamsen *et al.* (2023), que estimaram a geração anual de resíduos de pás entre 2.000 t em 2028 e um valor máximo de 5.000 t em 2045. Para o Canadá, os autores Heng *et al.* (2021) investigaram estritamente a exploração *onshore*, sucedendo em projeções de 275 mil toneladas de pás descomissionadas até 2050. No conjunto de publicações encontradas, por fim, a pesquisa de Alavi *et al.* (2024) previu a geração de cerca de 14,3 Mt de resíduos de aerogeradores *onshore*, na Austrália, até o ano de 2060.

Portanto, a projeção de 6,25 Mt de resíduos de aerogeradores no Brasil até o ano de 2050 levanta questões sobre as práticas de sustentabilidade na indústria de energias renováveis. Dentre os resíduos gerados, apenas os componentes que constituem as pás dos aerogeradores representam um obstáculo significativo para a revalorização, já que a indústria ainda não apresenta tecnologia viável frente à reciclagem desafiadora da estrutura (Tyurkay *et al.*, 2024).

Os outros componentes que constituem cerca de 81% a 85% do peso total dos resíduos de aerogeradores, como torre, caixa de engrenagens, eixo principal, gerador, peças fundidas, rolamentos, peças da nacele e do hub, podem ser reciclados utilizando processos industriais bem estabelecidos (Xu *et al.*, 2024; Garrett; Ronde, 2012; Gonzalez *et al.*, 2018).

Com base nos resultados das projeções de resíduos realizadas neste estudo, aproximadamente 5,31 Mt de resíduos provenientes dos aerogeradores apresentarão potencial de reciclabilidade no Brasil até 2050. No entanto, conforme afirmam Gast *et al.* (2024), os fluxos de resíduos dos aerogeradores atualmente estão longe de ser circulares e ressaltam a escassez de dados disponíveis para essas atividades, que raramente são acessíveis. Ainda assim, há possibilidade para desviar os materiais dos aterros em direção à revalorização, seja por meio da reciclagem ou da reutilização.

Os autores Kramer *et al.* (2024) acrescentam que um planejamento realista dos fluxos de componentes e materiais é fundamental para a estruturação das cadeias de suprimentos reversa. Além disso, devem ser estabelecidos mecanismos de coordenação internacional para padrões técnicos e industriais para minimizar o desperdício de resíduos de aerogeradores e facilitar o intercâmbio de tecnologia (Martinez-Marquez *et al.*, 2022). Enquanto Vettters *et al.* (2024) sublinham a importância de um quadro legislativo claro, sem ambiguidade na atribuição de responsabilidades, que contemple uma gestão adequada destes resíduos (Lazaro; Thomaz, 2021). Associado a isto, o autor Parker (2018) ressalta que o aspecto político é fator preponderante no desenvolvimento sustentável do setor de energias renováveis.

Nesse mesmo sentido, Tyurkay *et al.* (2024) ainda apontam como principais obstáculos que prejudicam a circularidade e a sustentabilidade da gestão dos resíduos de aerogeradores a falta de dados sobre a composição dos materiais, a incerteza nos números futuros de descomissionamento e volume de resíduos. Também, destacam a incerteza na capacidade das tecnologias atuais para tratar os resíduos das pás dos aerogeradores, os complexos desafios de descomissionamento, a reatividade dos stakeholders em assumir responsabilidades e, principalmente, a falta de clareza nas atribuições de responsabilidades.

Diante da projeção de geração de 6,25 Mt de resíduos de aerogeradores até 2050, dos quais 90,61% serão gerados na região Nordeste do Brasil, emerge uma relevante questão no setor das energias eólicas. Ao considerar o grande potencial para a geração de energia eólica *onshore*, aliado à futura exploração eólica *offshore* na costa brasileira, o país deve se preparar para uma contínua e progressiva geração de resíduos do setor. Portanto, é imprescindível que os stakeholders, somados ao governo, assumam responsabilidades no planejamento e operação dos fluxos reversos, a fim de promover a economia circular e garantir a eficiência na gestão dos resíduos de aerogeradores.

Conclusões

Considerando a descarbonização do setor energético como uma prioridade global, o Brasil apresenta uma matriz energética fortemente baseada em fontes renováveis, das quais atualmente 84,47% da energia nacional gerada provém de fontes renováveis, com a energia eólica sendo a segunda maior fonte de energia na matriz nacional. Assim, a aplicação da EC torna-se um instrumento essencial no setor eólico, pois integrar seus princípios na concepção industrial e nos processos pode reduzir significativamente os custos de produção, a demanda por materiais virgens, as emissões de GEE, o volume final de resíduos e outros poluentes.

Com base numa análise estatística descritiva dos dados investigados, prevê-se a geração de cerca de 6,25 Mt de resíduos de aerogeradores *onshore* no Brasil até 2050, dos quais 90,61% serão gerados na região Nordeste. Aproximadamente 5,31 Mt desses resíduos apresentarão potencial de reciclabilidade. No entanto, existem obstáculos que prejudicam a circularidade e a sustentabilidade na gestão dos resíduos de aerogeradores, impedindo que os fluxos de resíduos sejam completamente circulares.

Assim, destaca-se a inadequação da atual infraestrutura dos canais reversos de resíduos de aerogeradores no Brasil, especialmente devido à ausência de legislação e regulamentações específicas para o gerenciamento desses resíduos. Observa-se também que o estímulo à expansão das energias renováveis no Brasil, diante da necessidade de organização e planejamento de sistemas capazes de promover a circularidade de resíduos no setor, se mostra omissivo.

Com a estruturação da CSR no setor, os resultados não só contribuirão para a minimização dos danos ambientais, mas também favorecerão a criação de postos de trabalho. Além disso, a energia eólica já se consolida como um setor de fundamental importância na geração de energia, com tendência de aumento contínuo da geração de resíduos, cenário previsto não apenas no Brasil, mas em todo o mundo. Portanto, torna-se imperativo que os stakeholders se comprometam com a estruturação da logística reversa desses resíduos para evitar o acúmulo futuro de prejuízos socioambientais e econômicos.

Os resultados desta pesquisa contribuem para a literatura ao fornecer projeções sobre a quantidade de resíduos de aerogeradores no Brasil e ao destacar a importância do planejamento de fluxos reversos no setor de energia eólica. Como limitações deste

estudo, a utilização de um único modelo de aerogerador, como referência para todos os aerogeradores implantados no país, pode não refletir a real diversidade tecnológica, de materiais e de vida útil dos diferentes modelos existentes no Brasil, o que pode impactar a precisão das estimativas de resíduos.

Adicionalmente, a análise feita com aerogeradores *onshore* não abrange a geração de resíduos proveniente de futuros parques eólicos *offshore*, que apresentam desafios distintos. A compreensão dos obstáculos à EC foi delineada com base em informações existentes, no entanto a profundidade da análise limita-se pela disponibilidade de dados específicos sobre a infraestrutura de LR e tecnologias de reciclagem para materiais complexos no Brasil, a exemplo das pás eólicas, bem como pela ausência de cenários detalhados de políticas públicas e incentivos econômicos.

Pesquisas futuras poderiam explorar outros métodos de projeção de resíduos de aerogeradores, avaliar os componentes recicláveis e analisar o impacto econômico da reciclagem desses equipamentos no Brasil. Assim, este estudo destaca a urgente necessidade de um planejamento estratégico no gerenciamento de resíduos do setor eólico para garantir a sustentabilidade a longo prazo.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Brasil.

Referências

ABEEOLICA - Associação Brasileira de Energia Eólica e Novas Tecnologias. **Energia Eólica**, 2024. Disponível em: <https://abeeolica.org.br/>. Acesso em: 02 de Jun. 2024.

ABEEOLICA - Associação Brasileira de Energia Eólica e Novas Tecnologias. **Boletim Anual de Geração Eólica**, 2012. Disponível em: https://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2022/03/Boletim_anual_de_geracao_eolica_2012.pdf. Acesso em: 02 de Jun. 2024.

ABEEOLICA - Associação Brasileira de Energia Eólica e Novas Tecnologias. **Relatório Anual**, 2021. Disponível em: https://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2022/07/424_ABEEOLICA_RELATORIO-ANUAL-2021_V3.pdf. Acesso em: 02 de Jun. 2024.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR IEC 61400-1: Aerogeradores - Parte 1: Requisitos para segurança de projetos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2023. 172 p.

ABRAHAMSEN, A. B.; BEAUSON, J.; LUND, K. W.; MADSEN, E. S.; RUDOLPH, D. P.; JENSEN, J. P. *Method for estimating the future annual mass of decommissioned wind*

turbine blade material in Denmark. **Wind Energy**, v. 27, n. 2, p. 165-178, Nov. 2023. DOI: 10.1002/we.2882. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/we.2882>. Acesso em: 5 abr. 2024.

ALAVI, Z.; KHALILPOUR, K.; FLORIN, N. *Forecasting End-of-Life Wind Turbine Material Flows in Australia under Various Wind Energy Deployment Scenarios*. **Energies**, v. 17, n. 4, p. 914, Feb. 2024. DOI: 10.3390/en17040914. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en17040914>. Acesso em: 21 ago. 2024.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Centrais de Conteúdos, Relatórios e Indicadores, Geração, SIGA**, 2024. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNjc4OGYyYjQtYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOiR9>. Acesso em: 02 jun. 2024.

ANDERSEN, K.; ERIKSSON, O.; HILLMAN, K.; WALLHAGEN, M. *Wind turbines' end-of-life: Quantification and characterisation of future waste materials on a national level*. **Energies**, v. 9, n. 12, p. 999, Nov. 2016. DOI: 10.3390/en9120999. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en9120999>. Acesso em: 17 jun. 2024.

ATASU, A.; DURAN, S.; WASSENHOVE, L. *The dark side of solar power*. **Harvard Business Review**, 2021. Disponível em: <https://hbr.org/2021/06/the-dark-side-of-solar-power>. Acesso em: 04 de Mar. 2024.

BAUER, S.; O'MALIA, K.; PRASAD, S.; CLARK, G.; BEHRISIN, I. GEM - Global Energy Monitor. **Uma corrida para o topo: América Latina**. Relatório, 2023. Disponível em: <https://globalenergymonitor.org/wp-content/uploads/2023/03/GEM-LATAM-report-Portuguese.pdf>. Acesso em: 10 de Mar. 2024.

BEAUSON, J.; LAURENT, A.; RUDOLPH, D. P.; JENSEN, J. P. *The complex end-of-life of wind turbine blades: A review of the European context*. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 155, p. 111847, Mar. 2022. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111847. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111847>. Acesso em: 18 ago. 2024.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Plano Nacional de Energia 2050. Brasília: MME, 2020. Anexo A. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-563/PNE%202050%20-%20Anexo.pdf>. Acesso em: 10 de Jun. 2024.

CALDERON, J. L.; BAZILIAN, M.; SOVACOO, B.; GREENE, S. *Responsible or reckless? A critical review of the environmental and climate assessments of mineral supply chains*. **Environmental Research Letters**, v. 15, Oct. 2020. DOI: 10.1088/1748-9326/ab9f8c. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab9f8c>. Acesso em: 15 jul. 2024.

CARGNELUTTI FILHO, A.; LOPES, S. J.; BRUM, B.; TOEBE, M.; SILVEIRA, T. R.; CASAROTTO, G. *Sample size to estimate the Pearson correlation coefficient among characters of castor bean*. **Semina: Ciências Agrárias**, ed. 33, v. 3, p. 953-962, 2012. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2012v33n3p953>. Disponível em: <https://ojs.uel.br/revistas/uel/index.php/semagrarias/article/view/6638>. Acesso em: 11 de jul. 2025.

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro: Simulações 2013**. Rio de Janeiro: 2017. Disponível em: <file:///C:/Users/>

Ananda%20D%60%C3%81vila/OneDrive%20-%20AMAZON%20CONNECTION%20CARBON/1_artigo/REFERENCIAS/NovoAtlasdoPotencialEolico_BrasileiroSIM_2013.pdf. Acesso em: 15 jul. 2025.

CHEIN, F. Introdução aos modelos de regressão linear. Brasília: ENAP, 2019. Disponível em: https://sgr.unisced.edu.mz/bitstream/123456789/3419/1/Livro_Regress%C3%A3o%20Linear.pdf. Acesso em: 3 de jul. 2025.

CHEN, Y.; CAI, G.; ZHENG, L.; ZHANG, Y.; QI, X.; KE, S.; GAO, L.; BAI, R.; LIU, G. Modeling waste generation and end-of-life management of wind power development in Guangdong, China until 2050. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 169, p. 105533, Jun. 2021. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105533. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105533>. Acesso em: 2 jul. 2024.

DA SILVA, N. F.; ROSA, L. P.; FREITAS, M. A. V.; PEREIRA, M. G. Wind energy in Brazil: From the power sector's expansion crisis model to the favorable environment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 22, p. 686–697, Jun. 2013. DOI: 10.1016/j.rser.2012.12.054. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.054>. Acesso em: 20 ago. 2024.

DE ARAUJO, B. P.; WILLCOX, L. D. BNDES. Reflexões críticas sobre a experiência brasileira de política industrial no setor eólico. Eólica. BNDES Setorial, ed. 47, p. 163-220, 2018. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/15360>. Acesso em: 27 mai. 2024.

DELANEY, E. L.; LEAHY, P. G.; MCKINLEY, J. M.; GENTRY, T. R.; NAGLE, A. J.; ELBERLING, J.; BANK, L. C. Sustainability Implications of Current Approaches to End-of-Life of Wind Turbine Blades: A Review. *Sustainability*, ed. 15, v. 16, p. 12557, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/su151612557>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/16/12557>. Acesso em: 16 de jun. 2025.

DEPLEDGE, J.; VIÑUALES, J. E.; LEES, E.; REINER, D. Climate Policy after the 2015 Paris Climate Conference. *Routledge*, ed. 1, 2021. DOI: <https://doi.org/10.4324/9781003191582>. Disponível em: <https://www.taylorfrancis.com/books/edit/10.4324/9781003191582/climate-policy-2015-paris-climate-conference-joanna-depledge-jorge-vi%C3%B1uales-emma-lees-david-reiner>. Acesso em: 04 de jun. 2025.

FISHER, M. J.; MARSHALL, A. P. Understanding descriptive statistics. *Australian Critical Care*, n. 22, p. 93-97, May. 2009. DOI: 10.1016/j.aucc.2008.11.003. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aucc.2008.11.003>. Acesso em: 13 mai. 2024.

FREIRE, A. I.; FONTGALLAND, I. Marco regulador da matriz elétrica Brasileira. *Latin American Journal of Energy Research*, v. 9, n. 2, p. 11–17, 2022. DOI: 10.21712/lajer.2022.v9.n2.p11-17. Disponível em: <https://doi.org/10.21712/lajer.2022.v9.n2.p11-17>. Acesso em: 22 abr. 2024.

GARRETT, P.; RONDE, K. Life cycle assessment of wind power: comprehensive results from a state-of-the-art approach. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 18, p. 37-48, Jun. 2012. DOI: 10.1007/s11367-012-0445-4. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0445-4>. Acesso em: 19 abr. 2024.

GAST, L.; MENG, F.; MORGAN, D. Assessing the circularity of onshore wind turbines: Using material flow analysis for improving end-of-life resource management. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 204, p. 107468, May. 2024. DOI: 10.1016/j.resconrec.2024.107468. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107468>. Acesso em: 11 jun. 2024.

GONZALEZ, E.; ORTEGO, A.; TOPHAM, E.; VALERO, A. Is the future development of wind energy compromised by the availability of raw materials?. **Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing**, Sep. 2018. p. 012028. DOI: 10.1088/1742-6596/1102/1/012028. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1102/1/012028>. Acesso em: 2 ago. 2024.

GRÁCIO, M. C. C.; OLIVEIRA, E. F. T. Indicadores de proximidades em análise de cocitação de autores: Um estudo comparativo entre coeficiente de Correlação de Pearson e Cosseno de Salton. **Inf. & Soc**, v. 25, n. 2, p. 105-116, 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Maria-Claudia-Cabrini-Gracio/publication/282993891_Proximity_indicators_in_Author_Co-citation_Analysis_A_comparative_study_between_the_Pearson's_Correlation_Coefficient_and_Salton's_Cosine/links/57dc66d608aeea195935ca0f/Proximity-indicators-in-Author-Co-citation-Analysis-A-comparative-study-between-the-Pearsons-Correlation-Coefficient-and-Saltons-Cosine.pdf. Acesso em: 10 de jul. 2025.

GWEC - Global Wind Energy Council. **Global Wind Report 2024**. Bruxelas: GWEC, 2024. Disponível em: < https://gwec.net/wp-content/uploads/2024/04/GWR-2024_digital-version_final.pdf >. Aceso em: 10 de Jun. 2024.

HENG, H.; MENG, F.; MCKECHNIE, J. Wind turbine blade wastes and the environmental impacts in Canada. **Waste Management**, v. 133, p. 59-70, Sep. 2021. DOI: 10.1016/j.wasman.2021.07.032. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.07.032>. Acesso em: 30 jul. 2024.

IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, 2024. **Mapas de projetos em licenciamento - complexos eólicos offshore**. Disponível em: <https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/laf/consultas/mapas-de-projetos-em-licenciamento-complexos-eolicos-offshore>. Acesso em: 23 mai. 2024.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**, p. 35-115, 2023.

IRENA - International Renewable Energy Agency. **About IRENA**, 2024. Disponível em: <https://www.irena.org/About>. Acesso em: 10 de Jun. 2024.

IRENA - International Renewable Energy Agency. **World Energy Transitions Outlook 2023: 1.5°C Pathway.**, v.1, 2023. Disponível em: <https://www.irena.org/Publications/2023/Jun/World-Energy-Transitions-Outlook-2023>. Acesso em: 18 abr. 2024.

JANSEN, M.; BEITER, P.; RIEPIN, I.; MÜSGENS, F.; GUAJARDO-FAJARDO, V. J.; STAFFELL, I.; BULDER, B.; KITZING, L. Policy choices and outcomes for offshore wind auctions globally. **Energy Policy**, v. 167, p. 113000, Aug. 2022. DOI: 10.1016/j.en-

pol.2022.113000. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113000>. Acesso em: 24 ago. 2024.

KARAVIDA, S.; NÖMMIK, R. *Waste management of end-of-service wind turbines. Aalborg University: Denmark*, 2015. Disponível em: https://projekter.aau.dk/projekter/files/213319772/Waste_management_of_end_of_service_wind_turbines.pdf. Acesso em: 23 de jun. 2025.

KASTANAKI, E.; GIANNIS, A. *Energy decarbonisation in the European Union: Assessment of photovoltaic waste recycling potential. Renewable Energy*, v. 192, p. 1 - 13, Jun. 2022. DOI: 10.1016/j.renene.2022.04.098. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.04.098>. Acesso em: 25 ago. 2024.

KATI, V.; KASSARA, C.; VRONTISI, Z.; MOUSTAKAS, A. *The biodiversity-wind energy-land use nexus in a global biodiversity hotspot. Science of the Total Environment*, v. 768, p. 144471, May. 2021. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.144471. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144471>. Acesso em: 9 jul. 2024.

KRAMER, K. J.; ABRAHAMSEN, A. B.; BEAUSON, J.; HANSEN, U. E.; CLAUSEN, N. E.; VELENTURF, A. P. M.; SCHMIDT, M. *Quantifying Circular Economy Pathways of Decommissioned Onshore Wind Turbines: The Case of Denmark and Germany. Social Science Research Network*, Sep. 2024. DOI: 10.1016/j.spc.2024.06.022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.06.022>. Acesso em: 25 abr. 2024.

KRELL, A. J.; SOUSA, C. B. C. A sustentabilidade da matriz energética brasileira: o marco regulatório das energias renováveis e o princípio do desenvolvimento sustentável. *Revista de Direito Econômico e Socioambiental*, v. 11, n. 2, p. 157-188, 2020. DOI: 10.7213/rev.dir.econ.soc.v11i2.26872. Disponível em: <https://doi.org/10.7213/rev.dir.econ.soc.v11i2.26872>. Acesso em: 12 jul. 2024.

LAZARO, L. L. B.; SOARES, R. S. *The energy quadrilemma challenges - Insights from the decentralized energy transition in Brazil. Energy Research & Social Science*, v. 113, p. 103533, Jul. 2024. DOI: 10.1016/j.erss.2024.103533. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2024.103533>. Acesso em: 17 ago. 2024.

LAZARO, L. L. B.; THOMAZ, L. F. *Stakeholder participation in the formulation of Brazilian biofuel policy (RenovaBio). Ambiente & Sociedade*, v. 24, p. e00562, 2021. DOI: 10.1590/1809-4422asoc20200056r2vu2021L4DE. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc20200056r2vu2021L4DE>. Acesso em: 9 jun. 2024.

LIMA, G. C.; RODRIGUES, D. T.; SILVA, C. M. S.; COSTA, P. C. S. *Evolution of wind speed observed in Brazil between 1961 and 2020. International Journal of Climatology*, v. 44, n. 6, p. 1932-1954, Mar. 2024. DOI: 10.1002/joc.8433. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/joc.8433>. Acesso em: 18 jun. 2024.

MAJEWSKI, P.; FLORIN, N.; JIT, J.; STEWART, R. A. *End-of-life policy considerations for wind turbine blades. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 164, p. 112538, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112538>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032122004385>. Acesso em: 27 de jun. 2025.

MARTINEZ-MARQUEZ, D.; FLORIN, N.; HALL, W.; MAJEWSKI, P.; WANG, H.; STEWART, R. A. *State-of-the-art review of product stewardship strategies for large composite wind turbine blades*. **Resources, Conservation & Recycling Advances**, v. 15, p. 200109, Nov. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2022.200109>. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2022.200109>. Acesso em: 30 mai. 2024.

MARTINS, M. Coeficiente de correlação amostral. **Rev. Ciência Elem.**, v. 2, ed. 02, p. 42, 2014. DOI: <https://doi.org/10.24927/rce2014.042>. Disponível em: <https://rce.casadasciencias.org/rceapp/static/docs/artigos/2014-042.pdf>. Acesso em: 6 de jul. 2025.

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Dados Gerais**. Dados de Geração Eólica e Solar. Fator de Capacidade, 2024. Disponível em: <https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/fator-capacidade.aspx>. Acesso em: 10 jun. 2024.

ONU - Naciones Unidas. **Aprobación del Acuerdo de París**. Convención Marco sobre el Cambio Climático, París, 2015. Disponível em: https://unfccc.int/sites/default/files/spanish_paris_agreement.pdf. Acesso em: 16 abr. 2024.

PAPADAKIS, N.; RAMÍREZ, C.; REYNOLDS, N. *Designing composite wind turbine blades for disposal, recycling or reuse*. **Management, Recycling and Reuse of Waste Composites**, p. 443-457, 2010. DOI: 10.1533/9781845697662.5.443. Disponível em: <https://doi.org/10.1533/9781845697662.5.443>. Acesso em: 19 jul. 2024.

PARKER, C. *Energy transition in South America: Elite's views in the mining sector, four cases under study*. **Ambiente & Sociedade**, v. 21, p. e00891, 2018. DOI: 10.1590/1809-4422asoc0089r1vu18L1AO. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc0089r1vu18L1AO>. Acesso em: 22 jun. 2024.

PAULSEN, E. B.; ENEVOLDSEN, P. A *Multidisciplinary Review of Recycling Methods for End-of-Life Wind Turbine Blades*. **Energies**, v. 14, p. 4247, Ju. 2021. DOI: 10.3390/en14144247. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en14144247>. Acesso em: 15 jun. 2024.

RATHORE, N.; PANWAR, N. L. *Environmental impact and waste recycling technologies for modern wind turbines: An overview*. **Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy**, ed. 41, v. 4, p. 744-759, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1177/0734242X221135527>. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/0734242X221135527>. Acesso em: 23 de jun. 2025.

RIBEIRO, G. M.; MAIA, C. E.; MEDEIROS, J. F. Uso da regressão linear para estimativa da relação entre a condutividade elétrica e a composição iônica da água de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, n. 1, p.15-22, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662005000100003>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/QFdD44S96krgFct5FHw7gZg/?lang=pt&format=html>. Acesso em: 11 de jul. 2025.

SADAI, S.; SPECTOR, R. A.; DECONTO, R.; GOMEZ, N. *The Paris Agreement and Climate Justice: Inequitable Impactsof Sea Level Rise Associated With Temperature Targets*. **Earth's Future**, v. 10, p. 12, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1029/2022EF002940>.

Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2022EF002940>. Acesso em: 4 de jun. 2025.

SANTOS, F. S.; NASCIMENTO, K. K. F.; JALE, J. S.; XAVIER JÚNIOR, S. F. A.; FERREIRA, T. A. E. *Brazilian wind energy generation potential using mixtures of Weibull distributions*. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 189, p. 113990, Jan. 2024. DOI: 10.1016/j.rser.2023.113990. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113990>. Acesso em: 10 ago. 2024.

TAZI, N.; KIM, J.; BOUZIDI, Y.; CHATELET, E.; LIU, G. *Waste and material flow analysis in the end-of-life wind energy system*. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 145, p. 199-207, Jun. 2019. DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.02.039. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.02.039>. Acesso em: 4 abr. 2024.

TOTA-MAHARAJ, K.; MCMAHON, A. *Resource and waste quantification scenarios for wind turbine decommissioning in the United Kingdom*. **Waste Disposal & Sustainable Energy**, v. 3, n. 2, p. 117-144, Dec. 2021. DOI: 10.1007/s42768-020-00057-6. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42768-020-00057-6>. Acesso em: 13 mai. 2024.

TRALDI, M. *Accumulation by dispossession and green grabbing: wind farms, lease agreements, land appropriation in the Brazilian semiarid*. **Ambiente & Sociedade**, v. 24, p. e00522, 2021. DOI: 10.1590/1809-4422asoc20200052r2vu2021L4TD. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc20200052r2vu2021L4TD>. Acesso em: 17 mai. 2024.

TRINDADE, A. V.; DANTAS, J. L. L.; ALMEIDA, F. P.; MAIA, I. C. S. *Estimativa do coeficiente de determinação genotípica em mamoeiros (Carica papaya L.) inoculados com fungo micorrízico arbuscular*. **Rev. Bras. Frutic**, ed. 23, v. 3, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-29452001000300033>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbf/a/xPbBkTkDZQghRkM4tZQ7LGg/?lang=pt>. Acesso em: 10 de jul. 2025.

TURKMEN, B. A.; BABUNA, F. G. *Life Cycle Environmental Impacts of Wind Turbines: A Path to Sustainability with Challenges*. **Sustainability**, ed. 16, v.13, p. 5365, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16135365>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/13/5365>. Acesso em: 1 de jul. 2025.

TYURKAY, A.; KIRKELUND, G. M.; LIMA, A. T. M. *State-of-the-art circular economy practices for end-of-life wind turbine blades for use in the construction industry*. **Sustainable Production and Consumption**, v. 47, p. 17–36, Jun. 2024. DOI: 10.1016/j.spc.2024.03.018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.03.018>. Acesso em: 21 jul. 2024.

VIANA, H. R. G. *Mineração e transição energética: desafios jurídicos e estratégicos para o Brasil*. Dissertação: **Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN**, 2025. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/server/api/core/bitstreams/ebd76027-9e9e-468f-aaaf-33fe9cb758ca/content>. Acesso em: 2 de jul. 2025.

VETTERS, J.; THOMASSEN, G.; VAN PASSEL, S. *Sailing through end-of-life challenges: A comprehensive review for offshore wind*. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 199, p. 114486, Jul. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114486>. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114486>. Acesso em: 8 jun. 2024.

VOLK, R.; STALLKAMP, C.; HERBST, M.; FRANK SCHULTMANN, F. M. *Regional rotor blade waste quantification in Germany until 2040*. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 172, p. 105667, Sep. 2021. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105667. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105667>. Acesso em: 25 ago. 2024.

WERNER, D.; LAZARO, L. L. B. *The policy dimension of energy transition: The Brazilian case in promoting renewable energies (2000–2022)*. **Energy Policy**, v. 175, p. 113480, Apr. 2023. DOI: 10.1016/j.enpol.2023.113480. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113480>. Acesso em: 2 mai. 2024.

XU, Y. WANG, F.; LIANG, D.; LV, G.; CHEN, C. *A comprehensive review of waste wind turbine blades in China: Current status and resource utilization*. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 12, p. 113077, Jun. 2024. DOI: 10.1016/j.jece.2024.113077. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.113077>. Acesso em: 13 jun. 2024.

Ananda Letícia Martins D'Ávila

✉ ananda.davila@aluno.uepa.br

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-2804-3629>

Editor Responsável

Pedro Roberto Jacobi

Altem Nascimento Pontes

✉ altem.pontes@uepa.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9001-4603>

Editor Associado

Ricardo César Guabiroba

Submetido em: 09/01/2025

Aceito em: 01/10/2025

2026;29:e00159

Declaração de disponibilidade de dados:

Os autores afirmam que todos os dados utilizados na pesquisa foram disponibilizados publicamente, e podem ser acessados por meio das plataformas:

Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica)

<https://abeeolica.org.br/energia-eolica/dados-abeeolica/>

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL)

<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNGE3NjVmYjAtNDZkZC00MDY4LTliNTItM-TVlkZTU4NWYzYzFmIiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIjImMiOiR9>

International Renewable Energy Agency (IRENA)

<https://www.irena.org/Publications>

Proyección de residuos de aerogeneradores en Brasil hasta 2050 y desafíos para la economía circular

Ananda Leticia Martins D'Ávila
Altem Nascimento Pontes

Resumen: Brasil se destaca por su matriz energética predominantemente renovable, en la cual la energía eólica surge como una fuente esencial, representando la segunda mayor contribución en la matriz nacional. Este estudio evaluó la sostenibilidad y los desafíos de la economía circular en el sector eólico brasileño, proyectando los residuos de aerogeneradores hasta 2050. Utilizando un enfoque estadístico, se analizaron las capacidades instaladas, la distribución geográfica de los parques eólicos y el potencial de generación de residuos. Los resultados indican un crecimiento en la capacidad de generación de energía eólica, con una previsión de 6,25 millones de toneladas (Mt) de residuos hasta 2050, concentrados principalmente en la región Noreste. Aunque la economía circular es reconocida como una estrategia para mitigar estos impactos, los altos costos, las barreras tecnológicas, la falta de infraestructura para los canales reversos y la ausencia de legislación y regulaciones específicas representan obstáculos para una circularidad plena. El estudio destaca la necesidad urgente de una planificación eficaz para la gestión sostenible de residuos en el sector eólico.

São Paulo. Vol. 29, 2026

Artículo original

Palabras-clave: Turbinas; plantas eólicas; sostenibilidad; energía renovable; gestión ambiental.

Projection of wind turbines waste in Brazil by 2050 and challenges for the circular economy

Ananda Leticia Martins D'Ávila
Altem Nascimento Pontes

Abstract: Brazil stands out for its predominantly renewable energy matrix, in which wind power emerges as an essential source, representing the second-largest contribution to the national energy mix. This study evaluated the sustainability and challenges of the circular economy in the Brazilian wind sector by projecting wind turbine waste through 2050. Using a statistical approach, the study analyzed installed capacities, the geographical distribution of wind farms, and the potential for waste generation. The results indicate growth in wind energy generation capacity, with an estimated 6.25 million tons (Mt) of waste by 2050, mainly concentrated in the Northeast region. Although the circular economy is recognized as a strategy to mitigate these impacts, high costs, technological barriers, lack of infrastructure for reverse logistics, and the absence of specific legislation and regulations are obstacles to full circularity. The study highlights the urgent need for effective planning to ensure sustainable waste management in the wind energy sector.

Keywords: Turbines; wind farms; sustainability; renewable energy; environmental management.

São Paulo. Vol. 29, 2026

Original Article