



RETULIZAÇÃO DE COMPÓSITOS EÓLICOS EM MORADIAS POPULARES: REVISÃO LITERÁRIA APLICADA EM FORTALEZA, CEARÁ

MICHELL ANDERSON SOUZA ANDRADE; ERIKA DA JUSTA TEIXEIRA ROCHA;
AUZUIR RIPARDO DE ALEXANDRIA

RESUMO

As mudanças climáticas têm impulsionado a rápida adoção de soluções tecnológicas sustentáveis por organizações globais. No entanto, há uma escassez de discussões no contexto brasileiro sobre os desafios que surgem quando esses empreendimentos são desativados, especialmente no que diz respeito à gestão dos resíduos das pás de turbinas eólicas. Materiais compósitos, como polímeros reforçados, enfrentam dificuldades de reciclagem ao atingirem o final de seu ciclo de vida. Uma alternativa promissora é a reutilização dessas pás na construção civil, contribuindo para a sustentabilidade ambiental e atendendo à demanda por habitação acessível no Brasil. Este estudo avalia a viabilidade da reutilização das pás de turbinas em soluções sociais, destacando oportunidades técnicas para uma economia circular. O objetivo é fornecer uma contribuição significativa das pás eólicas como componentes de construções e infraestruturas, visando melhorar a qualidade de vida das famílias em assentamentos precários em Fortaleza, Ceará. Dados indicam que até 2035, 311 empreendimentos do PROINFA no Brasil gerarão resíduos, com 16% deles localizados no Ceará. A possibilidade de utilizar esses resíduos para mitigar parte do déficit habitacional apresenta uma abordagem inovadora e sustentável. O estudo ressalta os desafios e destaca a necessidade de ações para evitar a formação de "cemitérios" de pás eólicas, decorrente de regulamentações deficientes. O objetivo é demonstrar as oportunidades técnicas decorrentes do uso das pás eólicas no final de sua vida útil, enfatizando o potencial de uma economia circular na qual esses componentes desempenham um papel crucial no desenvolvimento de infraestrutura e habitação.

Palavras-chave: Mudanças climáticas; Materiais compósitos; Soluções sustentáveis; Economia circular, Habitação acessível.

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas estão colocando pressão sobre organizações e economias globalmente, aumentando a preocupação. A demanda por energia está crescendo devido a invernos mais rigorosos e verões mais longos, resultando em custos mais altos, especialmente para fontes de energia convencionais. É crucial buscar alternativas sustentáveis para um desenvolvimento seguro e livre de riscos, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis (Reges et al., 2015).

De acordo com a Nota Técnica DEA 13/15 da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a demanda global por energia deverá aumentar consideravelmente até 2050. A Global Wind Energy Council (GWEC) destaca que cerca de 70% dessa demanda pode ser atendida por fontes sustentáveis, como energia solar e eólica. No Brasil, a energia eólica é destacada pela

sua eficiência e crescimento notável, especialmente na região Nordeste, com estados como Bahia, Rio Grande do Norte, Piauí e Ceará contribuindo significativamente (GWEC, 2022). O estado do Ceará, em particular, ocupa uma posição proeminente na geração de energia eólica, com uma capacidade instalada de 2,5 GW (GWEC, 2022). No entanto, o crescimento da energia eólica traz desafios, como a gestão de resíduos. As turbinas eólicas, cada vez maiores, geram grandes volumes de resíduos, especialmente as pás compostas por materiais difíceis de reciclar (Lucena, 2023). Segundo o Sistema de Informações de Geração (SIGA) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), espera-se que muitos projetos associados ao Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA) atinjam o fim de sua vida útil até 2035. Globalmente, estima-se que 2,0 milhões de toneladas de pás de turbinas eólicas serão descartadas anualmente até 2050 (Liu e Barlow, 2017). Esse substancial aumento na geração de resíduos demanda uma análise profunda sobre a elaboração de estratégias sustentáveis do ponto de vista ambiental, econômico e social para a gestão das pás de aerogeradores descartadas, como enfatizado por (Marsh, 2017).

Publicações recentes sugerem oportunidades para reutilizar pás de turbinas eólicas em habitação, linhas de transmissão e pontes (Geiger et al., 2017). A reciclagem de resíduos plásticos reforçados com fibra de carbono em materiais de cimento ecoeficientes também é viável (Akbar e Liew, 2020). Além disso, o método mecânico de reciclagem de materiais compósitos é simples, porém prejudica as fibras individuais, resultando em uma redução das características mecânicas. Esse material reciclado é comumente utilizado em aplicações menos exigentes, como agregados para madeira artificial, asfalto e concreto na construção civil (Ratner et al., 2020).

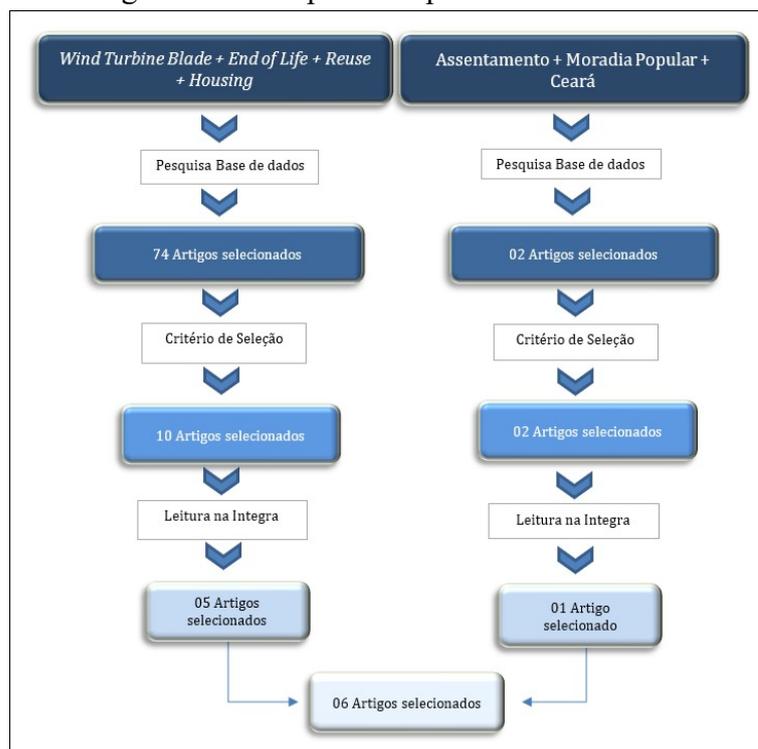
Atrelando o resultado dessas recentes publicações ao percentual da população da cidade de Fortaleza no Ceará, sem moradia própria e com condições básicas de uso, este artigo tem o propósito de analisar a viabilidade do uso de pás de turbinas eólicas desativadas em soluções voltadas para o contexto social, a fim de proporcionar uma segunda vida a esses materiais como elementos essenciais no desenvolvimento de infraestrutura e habitações populares. Isso visa demonstrar soluções que promovam a sustentabilidade ambiental e sinalizem o potencial de atender às crescentes demandas por habitação acessível no Brasil, onde programas de habitação popular deveriam desempenhar um papel crucial na inclusão social e no desenvolvimento socioeconômico.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo é constituído de uma revisão de literatura que explora a reutilização de pás de turbinas eólicas no final de sua vida útil para a construção de moradias. Esse levantamento se baseou em dados eletrônicos obtidos de fontes nacionais e internacionais como livros, artigos e revistas previamente publicados em plataformas de pesquisa, incluindo o Google Acadêmico, Science Direct e o Scielo.

Os critérios utilizados para a identificação e seleção dos estudos para compor esta revisão sistemática foram:

Figura 01: Seleção de artigos acadêmicos para compor a revisão de literatura.

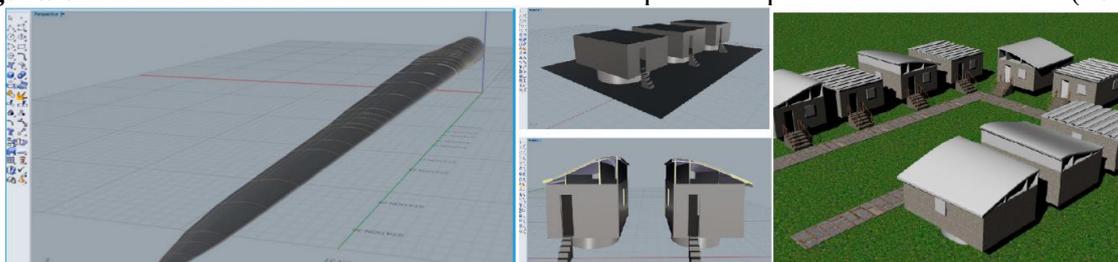


Após uma leitura completa dos artigos, foi realizada uma seleção secundária dos trabalhos. Utilizando os descritores mencionados anteriormente, 06 trabalhos foram escolhidos, sendo 03 provenientes da Science Direct, 01 do MDPI e 02 do Google Scholar. Estes foram considerados pertinentes para integrar esta revisão sistemática. Artigos selecionados:

- Concepts for Reusing Composite Materials from Decommissioned Wind Turbine Blades in Affordable Housing (Bank et al., 2017)
- Structural reuse of wind turbine blades through segmentation (Joustra et al., 2021);
- Sustainable End-of-Life Management of Wind Turbine Blades: Overview of Current and Coming Solutions (Mishnaevsky, 2021)
- Composite Material Recycling Technology—State-of-the-Art and Sustainable Development for the 2020s (Krauklis et al., 2021)
- A Decommissioned Wind Blade as a Second-Life Construction Material for a Transmission Pole (Alshannaq et al., 2021)
- Os assentamentos precários em Fortaleza: Um breve panorama da qualidade de vida dos excluídos (Nobrega et al., 2021).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O estudo realizado por Bank et al. (2018) indicam que as pás das turbinas eólicas desmontadas podem seguir diversas rotas: aterro industrial, incineração, reciclagem e reutilização. As opções de reutilização incluem o uso em novas aplicações estruturais, como projetos habitacionais reformados em condições adversas, como as encontradas no México. O estudo utiliza um modelo de pá eólica de 100 metros de comprimento, simulando sua aplicação em fundações, estruturas de telhado e sistemas interligados de telhado em casas. No entanto, observa-se que as pás em operação no estado do Ceará, que se aproximam do fim de sua vida útil, possuem dimensões menores, variando de aproximadamente 45 a 55 metros, o que pode ser um ponto negativo em relação à aplicabilidade direta do estudo.

Figura 02: Conceito de comunidade construída com partes de pás eólicas. Bank et al. (2018)

É citado por Joustra et al. (2020) que as dimensões, a forma complexa e a composição complexa do material das pás eólicas restringem as oportunidades de reutilização, no entanto podem ser cortados em seções para utilização em elementos de construção práticos e utilizáveis, como vigas e painéis. A reutilização como estrutura é viável, mas novas abordagens de segmentação precisam ser empregadas para lidar com a forma e estrutura complexas do produto, aproveitando melhor as seções. Além da aplicação em estruturas complexas, os autores trazem aplicações mais simples, como a fabricação de móveis. As pás são geralmente consideradas seguras para uso em aplicações tão diferentes, seja estrutural ou que demandem menos critérios de resistência, mas que se fazem necessário precauções tratamentos de superfície para evitar a exposição dos usuários a objetos pontiagudos fibras de vidro e degradação da resina devido à exposição a UV e umidade. Tais aplicações são, no entanto, desafiadoras. No estudo desenvolvido por Mishnaevsky (2021), uma alternativa ao reaproveitamento de pás de turbinas eólicas para sua destinação direta é a reutilização de pás ou parte delas em diferentes estruturas, como abrigos de ônibus, bancos urbanos ou playgrounds. Krauklis et al. (2021) faz uma abordagem similar, onde em seu artigo é apresentado um conceito de bicicletário feito de pás de turbinas eólicas desativadas, implementado pela fabricante de turbinas eólicas Siemens Gamesa em colaboração com o projeto Re-Wind na Dinamarca. Os autores de um estudo publicado recentemente simularam o uso de uma parte de uma pá de turbina eólica descomissionada como poste de transmissão de energia com capacidade de 230 kV. Segundo os autores, espera-se que postes fabricados com polímero reforçado com fibra de vidro durem mais do que os postes convencionais de aço, concreto ou madeira. Os autores testaram as análises estruturais para diferentes casos de carga: vento extremo, gelo e vento simultâneos; gelo extremo, gelo diferencial, condutor quebrado e escudo quebrado; e governando casos de carga para flexão, cisalhamento e torção. Os resultados mostraram as seções de pás submetidas as cargas do projeto podem resistir às cargas esperadas com fatores de segurança razoáveis e que as deflexões estão dentro dos limites permitidos. No entanto, são necessárias análises adicionais, como simulações por elementos finitos, para analisar outros estados limites e casos de carga de simulações mais complexas como, por exemplo, galope de condutores, desprendimento de vórtices de pás eólicas. Além disso, o efeito do envelhecimento do material precisa ser investigado para garantir aplicações de segunda vida (Alshannaq, 2021).

Arelado a essas soluções que podem viabilizar a construção de moradias de baixo custo, Nobrega et al. (2021) aborda que os desafios enfrentados no tocante a precariedade de assentamentos na sociedade pós-moderna. Essas áreas persistem como regiões subdesenvolvidas, onde se concentram populações marginalizadas incapazes de contribuir para o progresso dos grupos sociais em constante evolução. As rápidas transformações ocorridas nas cidades brasileiras nos últimos anos, impulsionadas por programas governamentais, estimularam a indústria da construção civil como resposta à crise econômica. O objetivo era expandir o mercado habitacional para atender às famílias de baixa renda. No entanto, programas como o Minha Casa Minha Vida, lançado em 2009 pelo Governo Federal, enfrentaram desafios evidentes ao longo de sua implementação. Em vez de aliviar o déficit

habitacional, o programa, como apontado por Maricato (2011), agravou as dificuldades de acesso à moradia para os mais desfavorecidos, contribuindo para a criação de bairros particularmente vulneráveis ao crime organizado. Dados de 2017 evidenciavam que o Brasil estava lidando com um desafio considerável relacionado à escassez de moradias, apresentando um déficit de 7,7 milhões de unidades habitacionais, sendo que 5,5 milhões delas estavam localizadas em áreas urbanas. Além disso, aproximadamente 45,2 milhões de brasileiros viviam em cerca de 14,2 milhões de residências com pelo menos uma inadequação habitacional, como a falta de um banheiro de uso exclusivo, a utilização de materiais não duráveis nas paredes externas, superlotação nas moradias, ônus excessivos com aluguel e a ausência de documentos que atestassem a propriedade das habitações. Esses números realçam a complexidade dos desafios habitacionais que o país enfrenta (ABRAINC, 2019). Em 2010, a cidade de Fortaleza abrigava uma população de 2.452.185 habitantes, caracterizada por um modelo de desenvolvimento excludente e acentuada desigualdade socioespacial. Assim como muitas outras cidades, Fortaleza enfrentava um desafio significativo devido à presença de muitos assentamentos precários e um substancial déficit habitacional (IBGE, 2010). Foram contabilizados 856 assentamentos precários, nos quais aproximadamente 271.539 famílias viviam em condições precárias, com carência de habitações dignas, infraestrutura domiciliar adequada e acesso apropriado a equipamentos e serviços públicos de qualidade. Desse número total de assentamentos, 634 foram classificados como favelas, equivalendo a 74% (CANALHABITAÇÃO, 2023).

4 CONCLUSÃO

O descarte das pás das turbinas eólicas é um desafio global urgente, especialmente com o crescimento rápido da energia eólica no Brasil. Este estudo destaca a necessidade de uma gestão responsável desses resíduos, propondo uma solução que fornece habitações para famílias de baixa renda e trata adequadamente os resíduos das turbinas desativadas. A pesquisa sugere reutilizar as pás em diversas aplicações, incluindo infraestrutura e habitações populares, usando métodos inovadores como reconstrução tridimensional e reciclagem. Destaca-se a importância de iniciar discussões e ações imediatas diante do aumento esperado no descarte das pás eólicas. Aborda-se a necessidade de regulamentações mais rígidas para evitar possíveis problemas, como a formação de "cemitérios de pás eólicas". Este estudo é relevante para pesquisadores, profissionais e tomadores de decisão, oferecendo insights sobre a gestão de resíduos na energia eólica e promovendo soluções inovadoras para desafios sociais e ambientais, incluindo habitações acessíveis no Brasil.

REFERÊNCIAS

ABRAINC. Associação Brasileira de Incorporadoras Imobiliárias. Déficit habitacional é recorde no País. 7 de janeiro de 2019. Disponível em: <https://www.abrainc.org.br/noticias/2019/01/07/deficit-habitacional-e-recorde-no-pais/>. Acesso em: 02 de novembro de 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). SIGA: Sistema de Informações de Geração da ANEEL. Disponível em: <https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/siga-sistema-de-informacoes-de-geracao-da-aneel>. Data de referência de dados: 02 de janeiro de 2024). Acesso em: 08 de novembro de 2023).

AKBAR, A.; LIEW, K. M. Assessing recycling potential of carbon fiber reinforced plastic waste in production of eco-efficient cement-based materials. *Journal of Cleaner Production*, v. 274, 123001, 2020.

ALSHANNAQ, A.A.; BANK, L.C.; SCOTT, D.W.; GENTRY, R. A Decommissioned Wind Blade as a Second-Life Construction Material for a Transmission Pole. *Constr. Mater.* 2021, 1, 95–104.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA E NOVAS TECNOLOGIAS (ABEEÓLICA). Boletim Anual, 2022. 19 p. Disponível em: www.abeeolica.org.br. Acesso em: 11 de novembro de 2023.

BANK, L. C. ET AL. Concepts for Reusing Composite Materials from Decommissioned Wind Turbine Blades in Affordable Housing. *Recycling*, v. 3, n. 3, 2018.

CANALHABITAÇÃO - PREFEITURA MUNICIPAL DE FORTALEZA. Habitafor. Disponível em: <https://habitacao.fortaleza.ce.gov.br/inicio/habitafor-fortaleza.html>. Acesso em: 02 de novembro de 2023.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Ministério de Minas e Energia. Nota Técnica DEA 13/15 - Demanda de Energia 2050. Rio de Janeiro, janeiro de 2016.

GEIGER, R.; HANNAN, Y.; TRAVIA, W.; NABONI, R.; SCHLETTE, C. Composite wind turbine blade recycling: Value creation through Industry 4.0 to enable circularity in repurposing of composites. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 942, 012016, 2020.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL (GWEC). Indústria Eólica teve seu segundo melhor ano, mas zerar as emissões líquidas de gases de efeito estufa requer avanço político, 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Censo 2010, Fortaleza. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ce/fortaleza/pesquisa/23/27652>. Acesso em: 02 de novembro de 2023.

JOUSTRA, JELLE; FLIPSEN, BAS; BALKENENDE, RUUD. Structural Reuse of High-End Composite Products: A Design Case Study on Wind Turbine Blades. *Resources, Conservation & Recycling*, v. 167, 2021.

KRAUKLIS, A.E.; Karl, C.W.; Gagani, A.I.; Jørgensen, J.K. Composite Material Recycling Technology—State-of-the-Art and Sustainable Development for the 2020s. *J. Compos. Sci.* 2021, 5, 28.

LIU, P.; BARLOW, Y. Wind Turbine Blade Waste in 2050. *Waste Management*, Cambridge, Reino Unido Grã-Bretanha, v. 62, p. 229-240, fevereiro de 2017.

LUCENA, JULIANA DE ALMEIDA YANAGUIZAWA Energia eólica: volume 4 [recurso eletrônico] / Juliana de Almeida Yanaguizawa Lucena. - Florianópolis: ENBPar /IFSC, 2023. 134 p.:il. color. (Projeto EnergIF, vol.4).

MARICATO, ERMÍNIA. O impasse da política urbana no Brasil. Petrópolis: Vozes, 2011.
MARSH, G. What's to be done with 'Spent' Wind Turbine Blades? *Renewable Energy Focus*, v. 22, p. 20-23, dezembro de 2017.

MISHNAEVSKY, L. JR. Sustainable End-of-Life Management of Wind Turbine Blades: Overview of Current and Coming Solutions. *Materials*, v. 14, 2021.

NOBREGA, A. C. O.; SILVA, A. A. B. DA; CIDRÃO, T. V. (2021). Os assentamentos precários em Fortaleza: um breve panorama da qualidade de vida dos excluídos. *Revista De Direito Da Cidade*, 13(2), 1023–1051.

RATNER, S.; GOMONOV, K.; REVINOVA, S.; LAZANYUK, I. Eco-design of energy production systems: The problem of renewable energy capacity recycling. *Applied Sciences*, v. 10, n. 12, p. 4339, 2020.

SOMER, V.; STOCKSCHLADER, J.; WALTHER, G. Estimation of glass and carbon fiber reinforced plastic waste from end-of-life rotor blades of wind power plants within the European Union. *Waste Management*, v. 115, 2020, p. 83-94.

WIND EUROPE. Accelerating Wind Turbine Blade Circularity, 2020. Disponível em: <https://windeurope.org/data-and-analysis/product/?id=86>. Acesso em: 19 de dezembro de 2023.