

**REUTILIZAÇÃO DE COMPÓSITOS EÓLICOS EM MORADIAS POPULARES:  
REVISÃO LITERÁRIA APLICADA À CIDADE DE FORTALEZA, CEARÁ**

Michell Anderson Souza **Andrade**<sup>1\*</sup>, Erika da Justa Teixeira **Rocha**<sup>1</sup>, Auzuir Ripardo de **Alexandria**<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE, Campus Maracanaú.

\*Autor para correspondência E-mail: [michellpmanag\\_21@yahoo.com](mailto:michellpmanag_21@yahoo.com)

Recebido: 03.02. 2024      Aceito: 27.06. 2024

**RESUMO:** A crescente demanda por energia, exacerbada pelas mudanças climáticas, enfatiza a necessidade de fontes sustentáveis, como a energia eólica, que tem destaque no Brasil, especialmente no Ceará, líder nacional com significativa capacidade instalada. Contudo, a expansão da energia eólica gera resíduos, principalmente pás de turbinas, cujo descarte apresenta desafios ambientais. Este estudo, fundamentado em uma revisão de literatura e análise de dados de fontes relevantes, investiga a viabilidade social de reutilizar pás eólicas desativadas na construção de habitações populares em Fortaleza, promovendo sustentabilidade ambiental e atendendo à necessidade de moradia acessível. Os resultados indicam que, embora a reutilização das pás em estruturas habitacionais seja viável, a complexidade de sua composição e geometria apresenta desafios significativos. A literatura revela diversas possibilidades de reutilização, desde elementos estruturais até mobiliário urbano, demonstrando que, com as abordagens adequadas, as pás eólicas podem contribuir para a redução de resíduos e a melhoria das condições habitacionais em áreas precárias. Conclui-se que a colaboração entre governo, sociedade civil e setor privado é crucial para implementar soluções inovadoras que integrem sustentabilidade ambiental e justiça social, transformando resíduos em recursos valiosos para enfrentar o déficit habitacional.

**Palavras-chave:** Energia eólica; Sustentabilidade; Reutilização de pás eólicas; Habitação popular; Gestão de resíduos.

---

**REUSE OF WIND TURBINE COMPOSITES IN LOW-INCOME HOUSING:  
LITERATURE REVIEW APPLIED IN FORTALEZA, CEARÁ**

**ABSTRACT:** The increasing demand for energy, exacerbated by climate change, underscores the need for sustainable sources such as wind energy, which is prominent in Brazil, especially in Ceará, a national leader with significant installed capacity. However, the expansion of wind energy generates waste, primarily from turbine blades, whose disposal presents environmental challenges. This study, based on a literature review and data analysis from relevant sources, investigates the social feasibility of repurposing decommissioned wind turbine blades for the construction of affordable housing in Fortaleza, promoting environmental sustainability and addressing the need for accessible housing. The findings indicate that while repurposing blades for housing

structures is feasible, their complex composition and geometry pose significant challenges. The literature reveals various reuse possibilities, from structural elements to urban furniture, demonstrating that with appropriate approaches, wind turbine blades can contribute to waste reduction and improved housing conditions in disadvantaged areas. It concludes that collaboration between government, civil society, and the private sector is crucial to implementing innovative solutions that integrate environmental sustainability and social justice, transforming waste into valuable resources to address the housing deficit.

**Keywords:** Wind energy; Sustainability; Wind turbine blade repurposing; Affordable housing; Waste management.

---

## **REUTILIZAÇÃO DE COMPUESTOS EÓLICOS EN VIVIENDAS POPULARES: REVISIÓN LITERARIA APLICADA EN FORTALEZA, CEARÁ**

**RESUMEN:** La creciente demanda de energía, exacerbada por los cambios climáticos, subraya la necesidad de fuentes sostenibles como la energía eólica, destacada en Brasil, especialmente en Ceará, líder nacional con significativa capacidad instalada. Sin embargo, la expansión de la energía eólica genera residuos, principalmente palas de turbinas, cuyo desecho presenta desafíos ambientales. Este estudio, basado en una revisión de literatura y análisis de datos de fuentes relevantes, investiga la viabilidad social de reutilizar palas eólicas desactivadas en la construcción de viviendas populares en Fortaleza, promoviendo la sostenibilidad ambiental y satisfaciendo la necesidad de vivienda accesible. Los resultados indican que, aunque la reutilización de las palas en estructuras habitacionales es factible, la complejidad de su composición y geometría presenta desafíos significativos. La literatura revela diversas posibilidades de reutilización, desde elementos estructurales hasta mobiliario urbano, demostrando que, con enfoques adecuados, las palas eólicas pueden contribuir a la reducción de residuos y a la mejora de las condiciones habitacionales en áreas precarias. Se concluye que la colaboración entre gobierno, sociedad civil y sector privado es crucial para implementar soluciones innovadoras que integren la sostenibilidad ambiental y la justicia social, transformando residuos en recursos valiosos para abordar el déficit habitacional.

**Palabras clave:** Energía eólica; Sostenibilidad; Reutilización de palas eólicas; Vivienda popular; Gestión de residuos.

## **INTRODUÇÃO**

As mudanças climáticas estão aumentando a pressão sobre organizações e economias globais, com uma crescente preocupação (Bichara e Bezerra, 2022). Invernos mais rigorosos e verões prolongados estão elevando a demanda por energia, especialmente de fontes convencionais, aumentando custos (Reges et al., 2015).

Alternativas sustentáveis são cruciais para um desenvolvimento seguro, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis.

A demanda global por energia até 2050 é estimada em níveis significativos, com 70% potencialmente supridos por fontes sustentáveis como energia solar e eólica (Nota Técnica DEA 13/15 da EPE; GWEC, 2022). No Brasil, a energia eólica se destaca, especialmente no Nordeste, com estados como Bahia, Rio Grande do Norte, Piauí e Ceará contribuindo significativamente (GWEC, 2022).

O Ceará é líder nacional em energia eólica, com 98 parques eólicos e uma capacidade instalada de 2,5 GW (ABEEólica, 2021). O estado aproveita ventos intensos no segundo semestre, aumentando a produção em 117% em 2022 (ABEEólica, 2021). No entanto, o crescimento gera resíduos, especialmente das pás eólicas compostas por materiais difíceis de reciclar (Wind Europe, 2020; Sommer et al., 2020).

No Brasil, espera-se que muitos projetos do PROINFA atinjam o fim da vida útil até 2035 (SIGA ANEEL). Globalmente, até 2050, podem ser geradas 2,0 milhões de toneladas de resíduos de pás de turbinas eólicas anualmente (Liu e Barlow, 2017), exigindo estratégias sustentáveis para gestão (Marsh, 2017).

Recentemente, surgiram oportunidades de reutilização das pás em habitação e infraestrutura (Geiger et al., 2017), como materiais de cimento ecoeficientes (Akbar e Liew, 2020). Reciclagem mecânica é viável para aplicações menos exigentes (Ratner et al., 2020).

Este artigo explora a viabilidade social de reutilizar pás eólicas em habitações populares em Fortaleza, visando promover sustentabilidade ambiental e atender demandas por habitação acessível (Geiger et al., 2017).

## **METODOLOGIA**

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, MDPI e o Scielo, nos últimos dez anos.

Os critérios utilizados para a identificação e seleção dos estudos para compor

esta revisão integrativa foram:

- 1) Elaboração das perguntas orientadoras:
  - Como as atuais soluções corroboram para a correta destinação de pás eólicas em fim de vida útil e como essas soluções podem possibilitar a resolução de problemas sociais?
  - Quais são os desafios que a população de baixa renda da cidade de Fortaleza/CE enfrentam em relação aos assentamentos precários?
- 2) A escolha da plataforma eletrônica de periódicos acadêmicos nas bases de dados para a condução das buscas nesta revisão sistemática recaiu sobre a Google Acadêmico, Science Direct, MDPI e o Scielo.
- 3) A definição de descritores e combinações com busca de palavras-chave de acordo com a plataforma escolhida: 1) “*wind turbine blade*” and “*end of life*” and “*reuse*” and “*housing*” 2) “Assentamento”, “Moradia Popular” e “Ceará”.
- 4) A seleção primária dos artigos encontrados de acordo com os seguintes critérios:
  - Avaliação da pertinência dos conteúdos em relação ao tema abordado neste trabalho;
  - Inclusão de trabalhos nos idiomas inglês e português;
  - Preferência por trabalhos de pesquisa ou revisão da literatura;
  - Exclusão de teses e dissertações;
- 5) Após uma leitura completa do artigo, foi realizada uma seleção secundária dos trabalhos. Utilizando os descritores mencionados anteriormente, identificamos um total de 76 estudos, dos quais 14 foram obtidos da Science Direct, 13 do MDPI e 49 do Google Scholar. Posteriormente, aplicando os critérios previamente estabelecidos, 12 trabalhos foram escolhidos, sendo sete provenientes da Science Direct, MDPI e cinco do Google Scholar. Após uma análise detalhada, excluímos seis estudos que não atenderam às questões norteadoras, resultando na seleção de seis trabalhos considerados pertinentes para integrar esta revisão sistemática.

A pesquisa incorporou, também, dados recentes obtidos a partir dos sites oficiais de entidades relevantes, como a ABEEólica, GWEC, ANEEL e EPE. A análise das informações divulgadas por essas fontes constituiu uma base sólida para a investigação.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 01, apresentada no estudo, delinea de maneira clara a sequência adotada, os critérios utilizados, e os resultados alcançados durante o processo de seleção dos artigos.

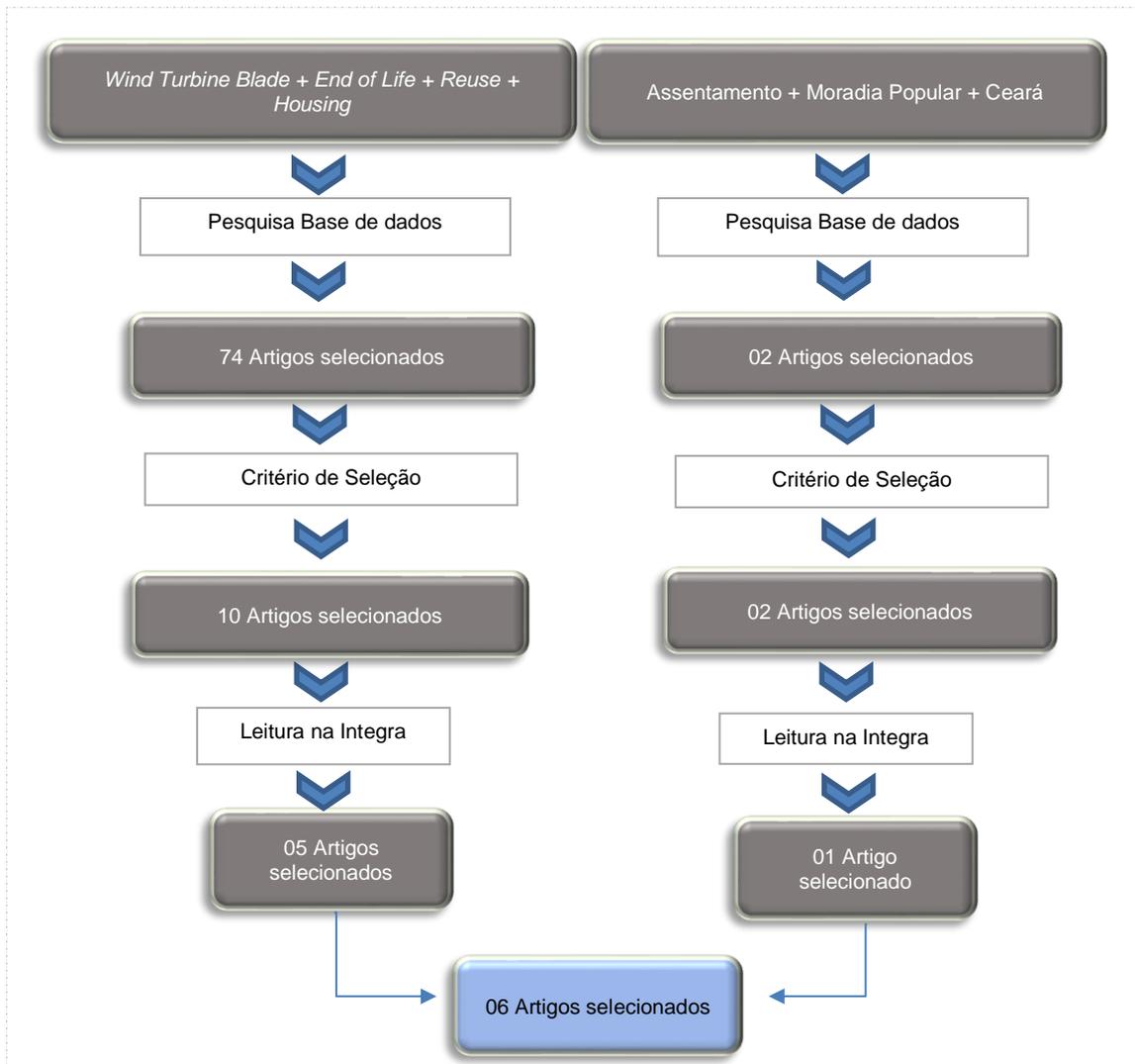


Figura 1. Seleção de artigos acadêmicos para compor a revisão de literatura.

Fonte: Autor.

Na Tabela 1 estão descritos os seis artigos selecionados que serviram de suporte para o desenvolvimento desse estudo, contendo o título do artigo, o autor nº 1, o país de origem do artigo, o periódico, e ano de publicação.

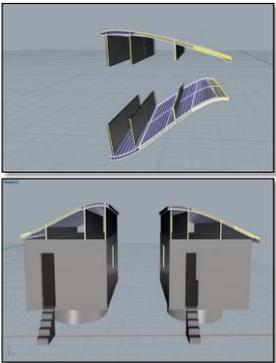
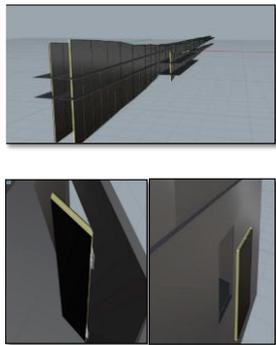
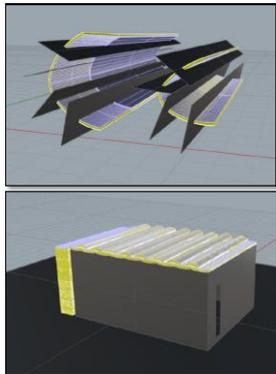
**Tabela 1.** Artigos selecionados em plataformas.

#	Título	Autor	Ano	Periódico
1	Concepts for Reusing Composite Materials from Decommissioned Wind Turbine Blades in Affordable Housing	Bank	2017	MDPI
2	Structural reuse of wind turbine blades through segmentation	Joustra	2021	Science Direct
3	Sustainable End-of-Life Management of Wind Turbine Blades: Overview of Current and Coming Solutions	Mishnaevsky	2021	MDPI
4	Composite Material Recycling Technology—State-of-the-Art and Sustainable Development for the 2020s	Krauklis	2021	MDPI
5	A Decommissioned Wind Blade as a Second-Life Construction Material for a Transmission Pole	Alshannaq	2021	MDPI
6	Os assentamentos precários em Fortaleza: Um breve panorama da qualidade de vida dos excluídos	Nobrega	2021	RDC

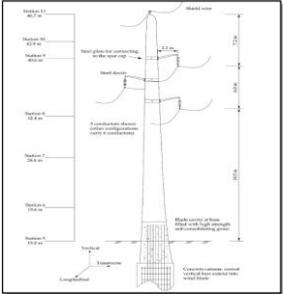
Fonte: Autor.

O Quadro 1 apresenta um resumo das possíveis aplicações das pás eólicas ao término de sua vida útil, destacando sua utilidade como recurso viável para ser aproveitado em projetos residenciais. São delineados os principais domínios de estudo que podem contribuir significativamente para promover o desenvolvimento de iniciativas locais voltadas para habitações sociais e a urbanização de áreas, explorando a reciclagem das pás eólicas que já não estão mais em operação. Estas ações, centradas na reutilização de recursos já existentes, especialmente as pás de turbinas eólicas desativadas, desempenham um papel crucial na atenuação da escassez de moradias acessíveis e na revitalização de regiões urbanas subdesenvolvidas. O enfoque nessas iniciativas não apenas proporciona soluções habitacionais economicamente acessíveis, mas também promove a sustentabilidade ao reduzir o desperdício e estabelecer práticas de reutilização eficientes.

**Quadro 1.** Propostas de utilização de pás eólicas descomissionadas na construção de assentamentos comunitários

Propostas	Descrição	Pontos positivos	Pontos negativos	Fonte
<b>Estrutura para casas</b>				
	Estrutura de telhados	Utilização de cascas da pá eólica e seções de elementos estruturais, como as almas, como estruturas de telhados	O estudo usa como padrão pás de 100 metros de comprimentos. Historicamente, pás em operação no Brasil que se aproximam do fim de vida útil, possuem comprimento que variam de 40 a 60 metros	Bank et al (2017)
	Portas e janelas	Utilização de seções da alma principal para fabricação de portas e janelas	O estudo usa como padrão pás de 100 metros de comprimentos. Historicamente, pás em operação no Brasil que se aproximam do fim de vida útil, possuem comprimento que variam de 40 a 60 metros	Bank et al (2017)
	Telhados onduladas e intertravadas	Utilização de segmentos do bordo de ataque	O estudo usa como padrão pás de 100 metros de comprimentos. Historicamente, pás em operação no Brasil que se aproximam do fim de vida útil, possuem comprimento que variam de 40 a 60 metros	Bank et al (2017)

Mobília				
	Mesa e bancos coletivos	Utilização de segmentos de pás para obtenção de móveis de baixa densidade, baixo custo, e sendo fonte de reciclagem	Material base é madeira balsa que quando exposto a umidade pode danificar com maior facilidade. Há necessidade de um tratamento superficial da peça para evitar desgaste prematuro	Joustra et al (2021)
Área de lazer				
	Áreas de recreação	Utilização de segmentos de pás	A utilização de pás para essa aplicação é limitada e o volume de pás utilizadas corresponde a um número inferiormente menor ao previsto para descarte	Mishnaevsky (2021)
Infraestrutura				
	Paradas de ônibus	Utilização de segmentos de pás	A aplicação de pás nesse contexto é restrita, e a quantidade de pás empregadas é consideravelmente menor do que a prevista para descarte	Mishnaevsky (2021)
	Cobertura para bicicletas	Utilização de segmento de pás	A aplicação de pás nesse contexto é restrita, e a quantidade de pás empregadas é consideravelmente menor do que a prevista para descarte	Krauklis (2021)

	<p>Poste de iluminação</p>	<p>Pá utilizada como poste apresentaram uma boa condição estrutura para uso, onde estas podem ser submetidas às cargas de projeto sem qualquer risco a integridade da estrutura, com fatores de segurança razoáveis e deflexões e dentro dos limites permitidos</p>	<p>Análise ainda em um patamar preliminar, sendo necessárias análises adicionais, como simulações por elementos finitos, para analisar outros estados limites e casos de carga de simulações mais complexas</p>	<p>Alshannaq 2021</p>
---	----------------------------	---	---	---------------------------

Fonte: Autor.

### **Soluções para a correta destinação de pás eólicas como aplicação em componentes estruturais de residências**

O estudo realizado por Bank et al. (2017) informa que existem rotas possíveis para as pás das turbinas eólicas desmontadas: aterro industrial (que está em processo de desuso em países europeus por se tratar de disposição, sem valorização como insumo para outro processo); incineração (sendo o calor da incineração utilizado para gerar eletricidade, bem como alimentar o sistema de aquecimento de um distrito), reciclagem e reutilização. As opções de reutilização consistem em reutilizar toda a pá ou grandes partes dela em novas aplicações estruturais. Os autores sugeriram reutilizar partes de pás eólicas em projetos habitacionais reformados no México, encontrados em condições ambientais adversas (água e alta umidade). Para o estudo foi utilizado um modelo de pá eólica de 100 m de comprimento, sendo simulados casos de aplicação em fundações, estruturas de telhado e sistemas de telhado interligados de casas. A dimensão apresentada no estudo corresponde a pás eólicas mais modernas, cujas dimensões podem se adequar mais facilmente às necessidades apresentadas no estudo. Isso é um ponto negativo quando se comparam as pás em operação no estado do Ceará, que se aproximam do seu tempo de vida útil e possuem dimensões que variam de, aproximadamente, 45 a 55 metros. 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).

**Desafios enfrentados pela população de baixa renda da cidade de Fortaleza/CE em relação aos assentamentos precários**

Conforme abordado Nobrega et al. (2021), desafios continuam sendo 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. O caráter de marginalização é agravado pelo fato de que a sociedade pós-moderna demanda indivíduos consumistas para impulsionar o desenvolvimento social e alcançar o status de país desenvolvido. Evidências apontam que sociedades mais desiguais apresentam maior incidência de assentamentos precários, onde as carências de serviços básicos, como educação, saúde, saneamento e alimentação, são mais severas. A situação socioeconômica dos habitantes desses assentamentos frequentemente perpetua o ciclo de pobreza, impedindo a ascensão social das gerações futuras. Um exemplo dessa realidade é observado na capital do Estado do Ceará, onde os assentamentos precários abrigam atualmente 40% da população de Fortaleza, ocupando 12% do espaço demográfico da cidade.

Em sua publicação, Nobrega et al. (2021) argumenta que as políticas públicas adotadas pela administração de Fortaleza visam abordar a longo prazo as complexas questões da pobreza e desigualdade. No entanto, a eficácia dessa abordagem na eliminação ou melhoria da qualidade de vida nos assentamentos precários é motivo de debates. O estímulo à economia, com foco no aumento do emprego formal e na estruturação do comércio, parece ser uma medida de curto prazo ao incrementar modestamente a renda dessas famílias. Para combater a pobreza nos assentamentos precários de forma efetiva, sugere-se que as políticas públicas busquem uma transformação definitiva dessas localidades. Isso envolve oferecer oportunidades para que os habitantes superem a situação de pobreza por meios próprios. A regularização da informalidade ou o investimento em meios de produção limitados podem prejudicar o desenvolvimento da sociedade, diferindo dos casos em que há um investimento direto do Estado.

Assim, é crucial implementar políticas públicas que intervenham em fenômenos capazes de transformar a sociedade por si mesma, permitindo seu desenvolvimento sem depender constantemente da intervenção direta do Estado. Propõe-se a alocação de recursos públicos, tanto estaduais quanto municipais, para a Educação e o contexto

familiar como solução para a extrema pobreza nos assentamentos precários, considerando esses elementos fundamentais para o avanço social e econômico de grupos específicos.

### **Estudos desenvolvidos para a reutilização de pás eólicas em fim de vida útil na construção civil**

Atualmente, o Ceará ocupa a quarta posição no Brasil, com uma notável geração de 7,06 TWh registrada em 2022 (ABEEólica, 2022). Esse desempenho impressionante na geração de energia eólica na região cearense não apenas reforça a segurança energética local, mas também permite a exportação de energia para outras áreas, especialmente durante o segundo semestre, quando a intensidade dos ventos no Nordeste atinge seu pico.

Até o ano de 2035, está previsto o encerramento dos contratos de aproximadamente 311 empreendimentos relacionados ao Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), cujos contratos têm duração de 20 anos. Esse cenário representa cerca de 29,43% da capacidade total instalada no Brasil em 2023, sendo que 16% desses empreendimentos estão localizados no Estado do Ceará (ANEEL, 2024). Após a conclusão dos contratos e os devidos procedimentos de manutenção, torna-se essencial avaliar a condição dos aerogeradores e dos componentes dos parques eólicos, o que pode resultar em modernização ou desativação.

Um dos desafios associados às pás das turbinas eólicas está relacionado à composição de resina termofixa e fibra de vidro, que, de maneira convencional, não é facilmente reciclável, levando ao descarte desses materiais em aterros sanitários (Lucena, 2023) ou até disposições em áreas irregulares, como ilustrado na Figura 02.



Figura 02. Pás eólicas descartadas. Rodovia CE-040, estado do Ceará.  
Fonte: Autor.

No entanto, uma alternativa promissora, destacada em um estudo conduzido por Yazdanbakhsh (2018), envolve o processo de trituração das pás eólicas, convertendo os resíduos resultantes em granulados. Esses granulados podem ser empregados na fabricação de diversos produtos, como pisos, paletes e tubulações, demonstrando um considerável potencial para a construção de edifícios comerciais e industriais, assim contribuindo para uma gestão mais sustentável dos resíduos provenientes da energia eólica.

Adicionalmente, estudos conduzidos por Beauson (2016), demonstram a viabilidade de aproveitar fragmentos das pás das turbinas eólicas como reforço em aplicações na construção civil, incluindo pontes e torres de transmissão, projetados pela Re-Wind Network. A remanufatura das pás eólicas também é recomendada como um processo de reutilização na criação de mobiliário urbano, como abrigos para paradas de ônibus, pontes para pedestres e parques infantis, contando com o apoio de escritórios de arquitetura urbana e incentivos de entidades empresariais (Jensen e Skelton, 2018). Essa prática de reaproveitamento de materiais reduz a necessidade de matéria-prima virgem, contribuindo significativamente para a diminuição dos impactos ambientais associados à produção, transporte e extração.

Bank et al. (2017), examinaram a viabilidade de reutilizar as estruturas das pás de turbinas eólicas em elementos de habitação, como caixilhos de telhados, portas e coberturas de janelas. A reutilização oferece a vantagem de preservar a estrutura e a qualidade dos materiais compósitos, sem a necessidade de um reprocessamento significativo, resultando na redução do impacto ambiental ao longo do ciclo de vida do

produto. No entanto, desafios podem surgir ao adaptar esses materiais a diferentes modelos de turbinas e variações nas geometrias das pás eólicas.

Para abordar essa questão, Tasistro-Hart et al. (2019) exploraram a possibilidade de recriar geometrias tridimensionais das pás de turbina eólica utilizando métodos de metrologia tridimensional sem contato, permitindo que engenheiros e arquitetos trabalhem com modelos tridimensionais das pás eólicas sem depender de informações confidenciais dos fabricantes. Um desafio adicional crucial é a avaliação do estado de danos nas pás eólicas, resultantes de anos de operação e manutenção, sendo um aspecto central para garantir a integridade e segurança, representando uma preocupação fundamental na pesquisa científica nesse campo.

Algumas das barreiras para o reaproveitamento de pás eólicas são as mesmas do reaproveitamento de resíduos de construção e demolição, como a falta de padrões para a avaliação de materiais usados ou recuperados e a percepção do consumidor (Shooshtarian et al., 2020). No entanto, o reaproveitamento da pás apresenta outros desafios. A geometria é bastante complexa, com poucas seções planas ou lineares para trabalhar, o que dificulta o projeto de grandes seções das pás (Gentry, 2020). Os fabricantes de pás não estão dispostos a divulgar detalhes do projeto ou da geometria interna da pá e, portanto, a engenharia reversa é necessária para determinar as propriedades estruturais (Ruane, 2022). Finalmente, a estética pode revelar-se um desafio, especialmente em comunidades onde a energia eólica não é popular (Kwon, 2019).

De modo geral, a análise dos artigos revelou que as pás das turbinas eólicas apresentam desafios significativos em termos de reciclagem, dada a complexidade de sua composição. Uma alternativa viável é a reutilização dessas pás em projetos estruturais, de moradias ou estruturas para esse tipo de empreendimento, aproveitando seu design e propriedades mecânicas. Essas soluções abrangem o desenvolvimento de pás projetadas para aumentar a circularidade do material pós-uso, bem como a inovação em processos e produtos para a reciclagem eficaz desses componentes.

À luz das oportunidades de reutilização e frente às necessidades das cidades brasileiras por moradias para famílias de baixa renda, temos o exemplo de Fortaleza. De acordo com o Canal Habitação, portal online de programas habitacionais de Fortaleza, em 2010 foram contabilizados 856 assentamentos precários na cidade, nos quais aproximadamente 271.539 famílias viviam em condições insalubres, com carência de habitações dignas, infraestrutura domiciliar adequada e acesso apropriado a

equipamentos e serviços públicos de qualidade. Desse total de assentamentos, 634 foram classificados como favelas, representando 74%. A Figura 03 ilustra o mapa de assentamentos precários da cidade de Fortaleza, com as tipologias detalhadas sobre o mapa e as coordenadas da cidade no ano de 2012.

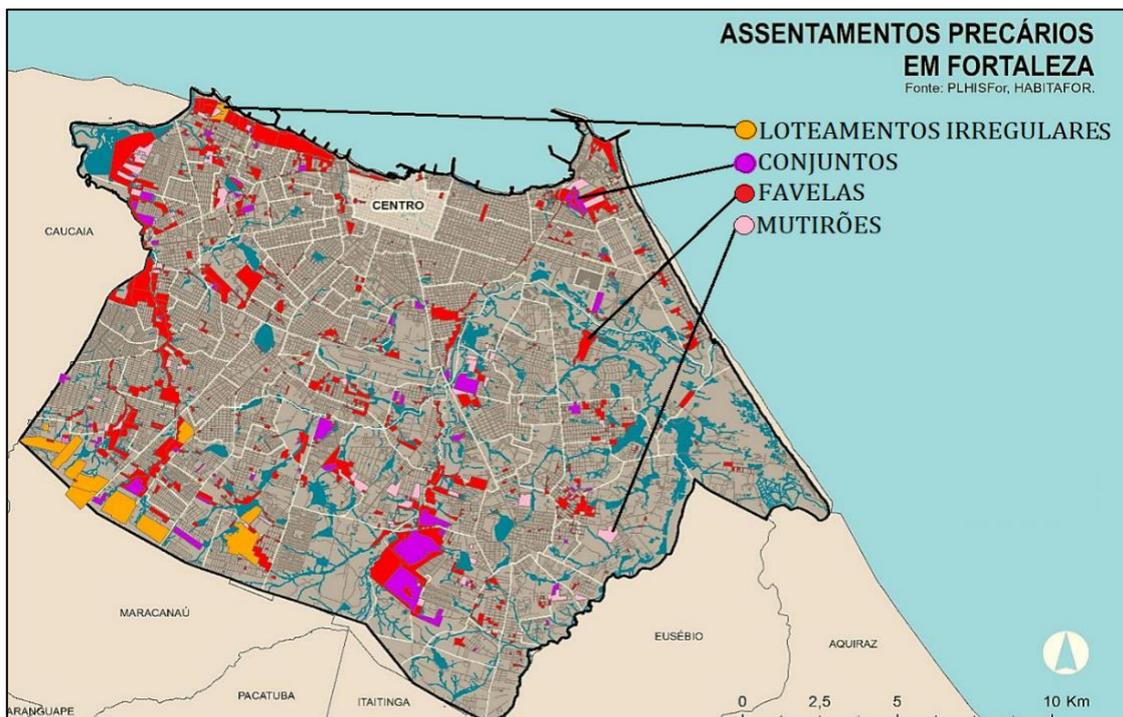


Figura 03. Mapa de assentamento precários da cidade de Fortaleza em 2012.  
Fonte: Adaptado de PLHISFor, HABITAFOR.

A Prefeitura de Fortaleza, através da Secretaria Municipal do Desenvolvimento Habitacional (HABITAFOR), desempenha um papel fundamental na edificação de moradias de cunho social, destinadas a famílias com renda familiar de até três salários mínimos. Além da construção habitacional, o órgão público também é responsável pela promoção da infraestrutura na região e pela construção de equipamentos que fomentam o desenvolvimento dos serviços essenciais nas proximidades dos empreendimentos (Canal Habitação, 2024).

Em suma, a análise abrangente das dinâmicas habitacionais nas cidades brasileiras, com enfoque especial em Fortaleza, revela desafios persistentes e multifacetados. Os dados alarmantes de déficit habitacional e assentamentos precários indicam a urgência de estratégias mais eficazes e inclusivas. Diante desse cenário, é imperativo repensar as abordagens habitacionais, priorizando a sustentabilidade social e ambiental, e reafirmar o compromisso com o direito fundamental à moradia adequada.

A superação desses desafios requer uma ação coordenada entre o governo, a sociedade civil e o setor privado para promover soluções inovadoras e inclusivas. Isso visa construir um ambiente urbano mais justo e equitativo para todos, onde materiais atualmente vistos como sucata, como as pás eólicas, podem ter um papel fundamental na minimização ou eliminação da carência por moradias dignas.

## **CONCLUSÃO**

Após a avaliação dos estudos, é possível concluir que a destinação das pás utilizadas nas turbinas dos parques eólicos é um problema que afeta todos os países que possuem este tipo de geração de energia. É crucial que uma reflexão sobre o desafio crescente ligado ao descarte sustentável de pás eólicas descomissionadas em meio ao rápido avanço do setor de energia eólica no Brasil. O enfoque vai além do simples aumento na capacidade de geração de energia limpa, abarcando também a necessidade premente de uma gestão responsável dos resíduos provenientes dessas turbinas.

A análise sublinha soluções diretas, mas impactantes, capazes de abordar duas questões fundamentais: a urgência de fornecer habitações adequadas para famílias de baixa renda e a correta disposição dos resíduos de parques eólicos desativados. A proposta não apenas almeja mitigar o impacto ambiental do descarte de pás eólicas, mas também busca contribuir ativamente para a inclusão social, ao oferecer soluções habitacionais sustentáveis.

Este estudo, fundamentado em uma revisão de literatura abrangente, revela oportunidades concretas para reutilizar pás de turbinas eólicas em diversas aplicações, desde elementos de infraestrutura até habitações populares. A incorporação de métodos inovadores, como a reconstrução de geometrias tridimensionais e o aproveitamento de resíduos triturados em novos produtos, destaca a viabilidade dessas abordagens.

Os resultados obtidos salientam a importância de iniciar discussões e implementar ações de forma imediata, considerando as perspectivas de significativo aumento no descarte de pás eólicas nos próximos anos. As abordagens preliminares apresentadas neste contexto oferecem um ponto de partida para futuras investigações

e ressaltam a necessidade de regulamentações mais rígidas, visando evitar possíveis impactos adversos, como a formação de "cemitérios de pás eólicas".

Essa pesquisa se mostra crucial para um público diversificado, incluindo pesquisadores, profissionais da indústria e tomadores de decisão, ao destacar a urgência de repensar a gestão de resíduos no setor de energia eólica e promover soluções inovadoras para desafios sociais e ambientais. A leitura é imperativa para todos que buscam uma compreensão aprofundada das questões entrelaçadas entre a transição para fontes de energia limpa, gestão de resíduos e a promoção de moradias acessíveis no contexto brasileiro.

## REFERÊNCIAS

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.

Associação Brasileira de Energia Eólica e Novas Tecnologias (ABEEólica). Boletim Anual, 2021. 19 p. Disponível em: <[www.abeeolica.org.br](http://www.abeeolica.org.br)>. Acesso em: 11 de novembro de 2023.

Associação Brasileira de Energia Eólica e Novas Tecnologias (ABEEólica). Boletim Anual, 2022. 19 p. Disponível em: <[www.abeeolica.org.br](http://www.abeeolica.org.br)>. Acesso em: 11 de novembro de 2023.

Associação Brasileira de Incorporadoras Imobiliárias (ABRAINC). 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.

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. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123001.

Alshannaq, A.A.; Bank, L.C.; Scott, D.W.; Gentry, R. A Decommissioned Wind Blade as a Second-Life Construction Material for a Transmission Pole. *Constr. Mater.* 2021, 1, 95–104. DOI: 10.3390/constrmater1020007.

Bank, L. C. et al. Concepts for Reusing Composite Materials from Decommissioned Wind Turbine Blades in Affordable Housing. *Recycling*, v. 3, n. 3, 2018. DOI: 10.3390/recycling3010003.

Beauson, J. et al. Recycling of Shredded Composites from Wind Turbine Blades in New Thermoset Polymer Composites. *Composites: Part A*, Roskilde, Dinamarca, v. 90, julho 2016, p. 390-399. DOI: 10.1016/j.compositesa.2016.07.009.

Canal Habitação - Prefeitura Municipal de Fortaleza. Habitafor. Disponível em: <https://habitacao.fortaleza.ce.gov.br/inicio/habitafor-fortaleza.html>. Acesso em: 02 de novembro de 2023.

Bichara, Jean-Pierre; Bezerra, Renata de Almeida. A participação das cidades no combate à mudança climática: a omissão do município de Natal. *Revista FIDES*, v. 13, n. 1, p. 60-79, 29 abr. 2022. DOI: 10.5281/zenodo.6599.

Canal Habitação - 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.

Global Wind Energy Council (GWEC). *Global Wind Report: 2022*. Organização: Global Wind Energy Council. Autores: LEE, Joyce; ZHAO, Feng. Disponível em: <https://gwec.net/global-wind-report-2022/>.

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.

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. DOI: 10.1088/1757-899X/942/1/012016.

Gentry, T.R., Al-Haddad, T., Bank, L.C., Arias, F.R., Nagle, A., Leahy, P., 2020. Structural Analysis of a Roof Extracted from a Wind Turbine Blade. *J. Archit. Eng.* 26, 04020040. DOI: 10.1061/(asce)ae.1943-5568.0000440.

Jensen, J.P.; Skelton, K. Wind Turbine Blade Recycling: Experiences, Challenges, and Possibilities in a Circular Economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 97, 2018, p. 165–176. DOI: 10.1016/J.RSER.2018.08.041.

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. DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.105393.

Kraulis, 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. DOI: 10.3390/jcs5010028 .

Kwon, E., Pehlken, A., Thoben, K.D., Bazylak, A., Shu, L.H., 2019. Visual Similarity to Aid Alternative-Use Concept Generation for Retired Wind-Turbine Blades. *J. Mech. Des. Trans. ASME* 141, 1–13. DOI: 10.1115/1.4042336.

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).

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. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.02.007.

Marsh, G. What's to be done with 'Spent' Wind Turbine Blades? *Renewable Energy Focus*, v. 22, p. 20-23, dezembro de 2017. DOI: 10.1016/j.ref.2017.10.002.

Mishnaevsky, L. Jr. Sustainable End-of-Life Management of Wind Turbine Blades: Overview of Current and Coming Solutions. *Materials*, v. 14, 2021. DOI: 10.3390/ma14051124.

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. DOI: 10.12957/rdc.2021.64644.

Plano Local de Habitação de Interesse Social (PLHISFOR). Resumo - Diagnóstico Preliminar. Produto III. Novembro de 2010. Disponível em: <https://acervo.fortaleza.ce.gov.br/download-file/documentById?id=fcd18692-a091-4677-ac71-346c5cff1010>. Acesso em: 21 dedezembro de 2023.

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. DOI: 10.3390/app10124339.

Reges, J. P. et al. Thermographic image processing application in solar followers. *IEEE Latin America Transactions*, IEEE, v. 13, n. 10, p. 3350–3358, 2015. DOI: 10.1109/TLA.2015.7387242.

Re-Wind Network. The Re-Wind Network [WWW Document]. Disponível em: <https://www.re-wind.info/>. Acesso em: 18 de dezembro de 2023.

Ruane, K., Zhang, Z., Nagle, A.J., Huynh, A., Alshannaq, A.A., Mcdonald, A., Leahy, P.G., Soutsos, M., McKinley, J.M., Russell Gentry, T., Bank, L.C., 2022. Material and Structural Characterization of a Wind Turbine Blade for use as a Bridge (Accepted for Jan, 2022 Conference), in: 102nd Annual Transportation Research Board. Washington D.C. DOI: 10.1177/03611981221083619.

Shooshtarian, S., Caldera, S., Maqsood, T., Ryley, T., 2020. Using recycled construction and demolition waste products: A review of stakeholders' perceptions, decisions, and motivations. *Recycling* 5, 1–16. DOI: 10.3390/recycling5040031.

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. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.06.043.

Tasistro-Hart, B. et al. Reconstruction of wind turbine blade geometry and internal structure from point cloud data. In: Computing in Civil Engineering 2019: Data, Sensing, and Analytics - Selected Papers from the ASCE International Conference on Computing in Civil Engineering 2019. American Society of Civil Engineers (ASCE), 2019. DOI:10.1061/9780784482438.017.

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.

Yazdanbakhsh, Ardavan et al. Concrete with discrete slender elements from mechanically recycled wind turbine blades. Resources, Conservation and Recycling, v. 128, 2018. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.08.005.