



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE ANGICOS
CURSO INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

DAYZI VALKIRIA LEITE DA SILVA

**ESTUDO DA VIABILIDADE DE USO DE AEROGERADORES SEM PÁS
BASEADAS NO DESPRENDIMENTO DE VÓRTICES NO SEMI-ÁRIDO
NORDESTINO**

ANGICOS

2025

DAYZI VALKIRIA LEITE DA SILVA

**ESTUDO DA VIABILIDADE DE USO DE AEROGERADORES SEM PÁS
BASEADAS NO DESPRENDIMENTO DE VÓRTICES NO SEMI-ÁRIDO
NORDESTINO**

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Interdisciplinar em Ciências e Tecnologia.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Vinícius Cândido
Henriques

ANGICOS

2025

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

S586e Silva, Dayzi Valkiria Leite da .
Estudo da Viabilidade de Uso de Aeroogeradores
Sem Pás Baseadas no Desprendimento de Vórtices no
Semi-Árido Nordeste / Dayzi Valkiria Leite da
Silva. - 2025.
55 f. : il.

Orientador: Marcos Vinícius Cândido Henriques.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e
Tecnologia, 2025.

1. Energia eólica. 2. Matriz energética. 3.
Sustentabilidade. 4. Turbinas eólicas. 5.
Vórtices. I. Henriques, Marcos Vinícius Cândido ,
orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Biblioteca Campus Angicos
Bibliotecário: Helder Romero Maia Duarte
CRB: 15/673

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

DAYZI VALKIRIA LEITE DA SILVA

**ESTUDO DA VIABILIDADE DE USO DE AEROGERADORES SEM PÁS
BASEADAS NO DESPRENDIMENTO DE VÓRTICES NO SEMI-ÁRIDO
NORDESTINO**

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Interdisciplinar em ciência e tecnologia.

Defendida em: 21 / 03 / 2025.

BANCA EXAMINADORA

Marcos Vinícius Cândido Henrique , Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente

Cintia Raquel Duarte de Freitas, Prof^ª . Dr^ª. (UFERSA)
Membro Examinador

Sileide de Oliveira Ramos, Prof^ª. Dr^ª. (UFERSA)
Membro Examinador

*Dedico a minha família e amigos, meu avô
Francisco Caetano Leite (Chico Carpinteiro).
A energia que colocamos no universo é a mesma que ele devolve para nós.*

AGRADECIMENTOS

Nenhuma conquista é alcançada sozinha, e este momento tão especial é o reflexo de muitas mãos que me sustentaram, muitas palavras que me inspiraram e muitos corações que acreditaram em mim. Agradeço, primeiramente, ao meu orientador, Marcos Vinícius Cândido Henriques, por sua dedicação e por acreditar no meu potencial. Seus ensinamentos foram muito mais do que acadêmicos, eles me ajudaram a crescer como pessoa e a enxergar além das dificuldades. À minha mãe, Valdineide Silva Leite, devo tudo o que sou, seu amor incondicional, sua força e sua determinação sempre foram minha maior inspiração. Sou profundamente grata aos meus irmãos e ao meu pai, que sempre me apoiaram com palavras de incentivo e amor. Vocês foram minha base e eu me lembrei, em todos os momentos, de que não estava sozinho. Um agradecimento especial ao meu amigo Carlos Alberto, pelo seu apoio desde o início. A todos os meus familiares, que de diversas formas me motivaram a seguir em frente, meu coração está repleto de gratidão. Às minhas amigas da residência, que compartilharam comigo momentos de aprendizado, amizade e alegria, sou imensamente grata. Por fim, não poderia deixar de mencionar todos os professores que, com paciência e generosidade, desenvolveram para eu chegar até aqui. Vocês foram mais do que mestres; foram guias que deixaram marcas profundas no meu caminho.

“Onde o mundo vê entulho, a África recicla.
Onde o mundo vê lixo, a África vê o
renascimento.”

(O Menino que Descobriu o Vento)

RESUMO

A busca por fontes de energia renováveis tem se intensificado, e a energia eólica se destaca por sua eficiência e sustentabilidade. Os aerogeradores sem pás, baseados no desprendimento de vórtices, surgem como uma inovação promissora, com vantagens como menor impacto ambiental, redução de ruídos e custos mais acessíveis. Este estudo investiga sua viabilidade no Semiárido Nordeste, região com grande potencial eólico, mas com desafios climáticos específicos. A pesquisa tem como objetivos avaliar a eficiência desses aerogeradores no clima semiárido, analisar sua viabilidade econômica e discutir impactos ambientais. Justifica-se pela necessidade de diversificação da matriz energética e desenvolvimento sustentável. A metodologia inclui análise de dados de velocidade média do vento em setores diferentes, estudos comparativos dos modelos Tacoma e Atlantis, para estimar o desempenho da tecnologia. Os resultados indicam que, apesar do potencial, ajustes técnicos são necessários para melhor adaptação ao clima da região. Com investimentos em pesquisa, os aerogeradores sem pás podem contribuir significativamente para a geração de energia limpa e acessível, fortalecendo o Brasil no setor de energias renováveis.

Palavras-chave: Energia eólica; Matriz energética; Sustentabilidade; Turbinas eólicas; Vórtices.

ABSTRACT

The search for renewable energy sources has intensified, with wind energy standing out for its efficiency and sustainability. Bladeless wind turbines, based on vortex shedding, have emerged as a promising innovation, offering advantages such as lower environmental impact, noise reduction, and more affordable costs. This study investigates their prospects in the Brazilian Semi-Arid region, an area with significant wind potential but specific climatic challenges. The research aims to assess the efficiency of these turbines in semi-arid climates, analyze their economic forecasts, and discuss environmental impacts. It is justified by the need to diversify the energy matrix and promote sustainable development. The analysis methodology includes data on average wind speed across different sectors and comparative studies of the Tacoma and Atlantis models to estimate the technology's performance. The results indicate that, despite its potential, technical adjustments are necessary for better adaptation to the region's climate. With investments in research, bladeless wind turbines can significantly contribute to the generation of clean and accessible energy, strengthening Brazil's role in the renewable energy sector.

Keywords: Wind energy; Energy matrix; Sustainability; Wind turbines; Vortices.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Ilustração de um moinho de vento	20
Figura 2	– Aerogerador sem pás, modelo Tacoma da Vortex Bladeless	27
Figura 3	– Figura de Aerogerador offshore	29
Figura 4	– Aerogerador modelo Atlantis em modelagem da Vortex Bladeless	32
Figura 5	– Aerogerador modelo Tacoma Vortex Bladeless	33
Figura 6	– Aerogerador modelo Atlantis Vortex Bladeless	34
Figura 7	– Conversão de energia por oscilações provocadas pelo vento	35
Figura 8	– Visualização da ponte Tacoma Narrows	36
Figura 9	– Desprendimento de Vórtices	37
Figura 10	– Ilustração da estrutura de um aerogerador da empresa Vortex Bladeless	39
Figura 11	– Visão da Tecnologia de Geração de Energia com Ímãs Permanentes: Movimento (a), Movimento (b) e Movimento (c)	40
Figura 12	– Representação de uma cidade com aerogeradores da empresa Vortex Bladeless ..	41
Figura 13	– Indústria eólica e pássaros podem compartilhar o mesmo vento	42
Figura 14	– Exposição dos arranjos 4 - 2x2 (a), 9 - 3x3 (b), 16 - 4x4 (c), de Aerogeradores (a)	47
Figura 15	– Fotografias do arranjo de placas solares da usina de solo do Campus Angicos....	48
Figura 16	– Esboço da área de 100 aerogeradores Atlantis no Campus de Angicos	49

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	–	Evolução da Capacidade Eólica instalada no Brasil (em MW)	25
Gráfico 2	–	Velocidades médias do vento a 10 metros de altitude: Brasil (a), Rio Grande do Norte (b) e Angicos (c)	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	–	Potência nominal e área de arranjo de aerogeradores Tacoma com altura 2,75 m	46
Tabela 2	–	Potência nominal e área de configurações de aerogeradores Atlantis com altura 9 m	46
Tabela 3	–	Dados gerais das usinas solares do campus Angicos da UFERSA	48
Tabela 4	–	Dados médios da demanda ativa de energia elétrica consumida no Campus Angicos em 2024 (exceto dezembro)	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CH ₄	Metano
CO ₂	Dióxido de Carbono
H ₂ V	Hidrogênio Verde
HFCs	Hidrofluorcarbonos
N ₂ O	Óxido Nitroso
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
PFCs	Perfluorcarbonos
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
RN	Rio Grande do Norte
SF ₆	Hexafluoreto de Enxofre
TEEH	Turbina Eólica de Eixo Horizontal
TEEV	Turbina Eólica de Eixo Vertical
UFERSA	Universidade Federal Rural do Semi-Árido
VIV	Vibração Induzida por Vórtice (Vibração Induzida por Vórtices)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	18
2.1	Objetivo Geral	18
2.2	Objetivos Específicos.....	18
3	ENERGIA EÓLICA	19
3.1	Energia Eólica no Mundo	19
3.2	Energia Eólica no Brasil	23
3.3	Tecnologias Desenvolvidas na geração de Energia Limpa	26
4	AEROGERADORES SEM PÁS BASEADAS NO DESPRENDIMENTO DE VÓRTICES	31
4.1	Mecanismo de Geração de Energia	34
4.2	Introdução ao Funcionamento	38
5	METODOLOGIA	44
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	53
	REFERÊNCIAS	54

1 INTRODUÇÃO

A trajetória da civilização humana sempre esteve entrelaçada com o uso de diferentes fontes de energia, refletindo a nossa capacidade de adaptação e inovação ao longo dos séculos. Lopes (2002) destaca que desde os tempos antigos, o vento tem sido um aliado importante na geração de energia, essa conexão com a energia eólica tem levado ao desenvolvimento de tecnologias que compõem e moldam a dinâmica social, estimulando não só o crescimento econômico, mas também a criatividade humana. Amorim (2021) ressalta que a energia eólica não apenas beneficia o meio ambiente, mas também exerce um impacto positivo na economia.

No Brasil, as políticas públicas têm desempenhado um papel essencial na produção da energia eólica, destacando a integração de políticas ambientais e energéticas para impulsionar o desenvolvimento sustentável. Dentre os modelos de Turbinas Eólicas de Eixo Vertical (TEEV), destacam-se os de Darrieus e Savonius, que apresentam a vantagem de captar vento de qualquer direção. Por outro lado, as Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal (TEEH) precisam estar constantemente alinhadas com a direção do vento para obter um melhor aproveitamento energético. Além disso, como TEEH são instalados sobre torres elevadas, pois a altura favorece a captação de ventos mais intensos, aumentando a eficiência da geração de energia, como estudado por Coelho (2014).

Nesse contexto, as TEEHs, mais comuns em parques eólicos, possuem o eixo paralelo ao solo e requerem alinhamento contínuo com o vento para maximizar a captura de energia. A viabilidade da utilização de aerogeradores sem pás, baseados no desprendimento de vórtices, foi estudada por Figueiredo (2020), nesse contexto, a turbina eólica consiste em um cilindro vertical, um suporte fixo e um eixo flexível, permitindo que a haste se mova livremente em resposta ao fluido. A ausência de pás conseguem aliviar o impacto ambiental e o risco para as aves, reduzindo os ruídos, e proporcionando uma maior compatibilidade para o uso em áreas residenciais, dessa maneira os custos de produção e manutenção de turbinas eólicas sem pás conseguem ser reduzidos.

Em consequência, o estudo dos aspectos técnicos, econômicos e ambientais da geração de energia eólica na região do Semiárido Nordeste faz-se necessário. Ruiz (2016) observa que a oscilação na intensidade e na direção do vento, resulta diretamente na produção de energia elétrica das turbinas eólicas, otimizando a importância da utilização de soluções tecnológicas capazes de solucionar problemas. Em destaque, as regiões Nordeste e Sul do Brasil, que possuem um grande potencial em energia limpa a ser utilizada. A aplicação dos aerogeradores por vorticidade oferece vantagens significativas, como a ausência de rotação e eixo na estrutura. Além de não possuírem peças móveis, esses dispositivos são fáceis de fabricar, exigem pouca manutenção e utilizam

materiais flexíveis, proporcionando um excelente custo-benefício. O desenvolvimento das tecnologias de aerogeradores sem pás, apesar de ser recente no setor de energias eólicas, vem ganhando espaço no cenário mundial.

Entretanto, em comparação com a tecnologia de aerogeradores com pás, os aerogeradores sem pás se encontram em um estágio inicial de aplicação. Dantas (2021) evidencia que a energia eólica mostra-se em grande crescimento no Brasil e apresenta forte destaque nos últimos anos. Diante desse contexto, o presente trabalho busca responder à seguinte questão: a adoção de aerogeradores sem pás no semiárido nordestino é viável do ponto de vista técnico, econômico e ambiental?

Analisando a possibilidade de instalações de turbinas desse modelo sem pás, no semiárido nordestino algumas dificuldades, como condições de temperatura e do impacto do custo de implementação dessa tecnologia, os materiais utilizados na construção de aerogeradores podem ter sua estabilidade e desenvolvimento comprometidos pela disponibilidade de recursos, que é um fator essencial para a viabilização de projetos em áreas menores. A gestão adequada desses recursos é crucial para garantir a eficiência e a durabilidade das estruturas nessas regiões. Diante das mudanças climáticas, surgiram fontes renováveis, mas com obstáculos para sua implementação, como argumenta Amorim (2021) que:

Os riscos e as consequências da prolongada mudança do clima impuseram uma necessária reflexão sobre o modo de produção e a utilização dos recursos energéticos. Como resultado, surgiu a proposta do uso alternativo de fontes de energia renovável e menos emissoras desses gases. No entanto, as fontes alternativas, como indústria nova, podem enfrentar alguns obstáculos e barreiras à sua implementação (AMORIM, 2021, p. 23).

A necessidade de fontes renováveis é evidente, mas os desafios práticos para sua implementação exigem soluções inovadoras. Com o avanço das mudanças climáticas, os padrões de vento estão se tornando mais imprevisíveis, o que pode influenciar a eficiência da energia eólica. Enquanto algumas áreas podem experimentar um aumento na geração, outras podem sofrer com a diminuição da força dos ventos. Além disso, condições climáticas extremas podem representar um risco para a durabilidade das turbinas, exigindo estratégias mais eficazes para garantir sua operação segura. Uma dessas soluções está no aproveitamento do desprendimento de vórtices, um fenômeno que ocorre quando o vento passa por uma estrutura, gerando forças que se desprendem da superfície em ângulo reto em relação à direção do vento.

Villarreal (2018) destaca que a influência de vários fatores faz com que mudanças aconteçam no desprendimento de vórtices, como o comprimento da estrutura utilizada, a velocidade que o vento se encontra e o tamanho da estrutura é outro fator importante para que esse fenômeno seja bem sucedido. Quando se compara um aerogerador com pás a um aerogerador sem pás,

observa-se que a superfície com áreas circulares tende a gerar uma vorticidade mais considerável e um desempenho superior.

Além de contribuir para o avanço no setor da agricultura, eletrificação rural, mobilidade sustentável, turismo ecológico e abastecimento hídrico. Segundo Dias (2024), as fontes renováveis representam uma parcela significativa da matriz elétrica brasileira, atingindo 83,79% de sua composição. Ao explorar o impacto das novas tecnologias na matriz energética, esta pesquisa contribui para a compreensão de estratégias que podem fortalecer a sustentabilidade do setor, promovendo maior acesso à energia limpa e favorecendo o desenvolvimento econômico e social.

O desenvolvimento de tecnologias em energia renovável é essencial para aumentar a competitividade global do Brasil. Investir em pesquisa e desenvolvimento de energia eólica e tecnologias sustentáveis pode permitir ao país alcançar uma posição de destaque no mercado global, incentivando a atração de capital externo e a intensificação da cooperação internacional em projetos de inovação tecnológicas, conforme exposto nos estudos de Bezerra (2019), que afirma:

Além disso, a efervescência dessa indústria, cujo crescimento tem sido vertiginoso e sustentável nos últimos anos, ensejou a criação de cursos de capacitação em universidades brasileiras, bem como a formação de grupos de pesquisa nessa área. Espera-se, assim, que o Brasil e a Região nordestina, em particular, possam, com o passar do tempo, gerar inovações no campo da geração eólica, consolidando o processo de internalização dessa tecnologia no País (BEZERRA, 2019, p. 4).

Ao investir em pesquisa e qualificação profissional, o Brasil, especialmente o Nordeste, tem o potencial de se tornar um polo de inovação e desenvolvimento na energia eólica, aumentando sua autonomia tecnológica.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

A pesquisa teve como objetivo avaliar a viabilidade da implementação de aerogeradores sem pás na UFERSA, campus Angicos, no Semiárido Nordestino, por meio de um estudo qualitativo e quantitativo. Para tanto, analisaram-se critérios técnicos, econômicos e ambientais, com ênfase nos desafios impostos pelas condições climáticas locais, como a baixa velocidade dos ventos e a ocorrência de variações extremas de temperatura e umidade. Além disso, avaliou-se o potencial de adoção dessa tecnologia na região, mediante a comparação de seu desempenho operacional com sistemas eólicos convencionais e a verificação de sua adaptabilidade ao contexto semiárido. Por fim, discutiram-se as implicações socioambientais e energéticas da implementação, visando contribuir para o debate sobre fontes renováveis em áreas com restrições climáticas.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Este estudo teve como objetivo verificar se os aerogeradores sem pás são uma opção viável para o campus Angicos da UFERSA, no Semiárido Nordestino. Para isso, foram analisados:

- Avaliar a eficácia dessa tecnologia na região em questão;
- Analisar a viabilidade de integração com sistemas fotovoltaicos;
- Investigar os impactos ambientais, identificando potenciais benefícios ou desafios associados.

3 ENERGIA EÓLICA

3.1 ENERGIA EÓLICA NO MUNDO

A energia eólica se destaca como uma das fontes renováveis de maior crescimento no mundo, devido à sua abundância, sustentabilidade e contribuição significativa para a mitigação das mudanças climáticas. Embora pequeno no mercado global, o Brasil tem grandes oportunidades no setor eólico, Bezerra (2019) explora essa problemática ao afirmar que:

O Brasil, apesar de participar com apenas 2,4% do total mundial, representa um mercado muito promissor, em virtude da competitividade da fonte eólica nos leilões de energia, aliado ao fato de o País apresentar excelentes “jazidas” de vento, principalmente no Nordeste (BEZERRA, 2019, p. 3).

Esse cenário dá ao Brasil uma oportunidade de não apenas fortalecer sua posição no mercado interno, mas também destaca o cenário global da energia eólica. Desde as primeiras civilizações, a humanidade tem aproveitado as forças dos ventos para diversas atividades específicas, como a operação de moinhos, a construção naval e até mesmo a secagem e armazenamento de alimentos. Com o aumento crescente da conscientização global sobre os impactos ambientais causados pelos combustíveis fósseis, o mundo tem se direcionado cada vez mais para fontes de energia alternativas e mais sustentáveis.

A energia eólica tem seu destaque nesse contexto, surgindo como uma solução promissora para mitigar os efeitos negativos da dependência de fontes tradicionais de energia, o que torna a energia eólica tão atraente é sua capacidade de converter energia do vento em eletricidade, uma fonte limpa que atende a muitas das necessidades da sociedade. Como aponta Ribeiro (2017), desde a implementação do PROINFA, em 2002, a energia eólica começou a ser mais integrada ao Brasil, superando barreiras de rentabilidade e deficiência de suporte político e tecnológico.

Além disso, a energia tem um grande potencial para reduzir significativamente as emissões de gases de efeito estufa, sem gerar poluição, contribuindo assim para a luta contra as mudanças climáticas e promovendo um futuro energético. Diferentemente de outras fontes de energia, como o petróleo e o carvão, a energia eólica se destaca por não gerar emissões atmosféricas durante a produção de eletricidade, isso faz com que ela desempenhe um papel fundamental na redução dos impactos ambientais, especialmente quando comparada a fontes mais poluentes. Apesar da energia eólica não dispensar todos os impactos ambientais, como qualquer outra forma de geração de energia, seu potencial apresenta proporções consideráveis no seu crescimento.

Com o avanço contínuo da tecnologia, ela se torna cada vez mais eficiente e capaz de reduzir ainda mais os danos ao meio ambiente, por ser uma fonte renovável e limpa, existem grandes chances de continuar se desenvolvendo e se tornando uma das principais soluções para reduzir a

poluição e conter boa parte das mudanças climáticas, o futuro energético parece cada vez mais voltado para a energia eólica, que se posiciona como uma alternativa acessível e favorável para um mundo mais verde e sustentável, essa visão é reforçada por Alves (2009), que pontua:

O Brasil é um país que possui uma das matrizes energéticas mais limpas do mundo, com a participação de 43,8% das energias renováveis no total de energia consumida. Se comparado com a média mundial, o país posiciona-se na vanguarda do setor energético mundial, com uma utilização sustentável dos seus recursos naturais (ALVES, 2009, p. 171).

Com sua matriz energética voltada para fontes renováveis, o Brasil está em direção aos seus objetivos de sustentabilidade, cada vez mais próximo do cenário global, como um verdadeiro protagonista na busca por um futuro mais verde. A Integração em larga escala da energia pode conceder melhorias importantes nas matrizes energéticas globais, propiciando uma substituição mais rápida para fontes de energia limpas e renováveis, países que investem em parques eólicos, tanto *onshore* quanto *offshore*, estão se beneficiando de seu enorme potencial energético.

Ao longo dos séculos, o desenvolvimento da energia eólica destacou-se como uma solução inovadora e versátil, começando com os primeiros moinhos de vento na Pérsia por volta de 200 AC, como aponta Lopes (2012). Esses primeiros dispositivos foram utilizados para a suavidade de grãos e bombeamento de água, aproveitando o vento como uma fonte natural de energia. Na Europa, essa tecnologia evoluiu continuamente, passando por diversas transformações ao longo dos séculos, desde a utilização de moinhos de fins úteis até sua adaptação para a geração de eletricidade no século XIX. Como observado na figura 1 mostra um modelo de moinho.

Figura 1 - Modelo de um moinho de vento.



Fonte: Pexels (2017).

Ao longo do tempo, avanços significativos foram feitos na eficiência e no design dos aerogeradores, permitindo que essa tecnologia evoluísse de estruturas rudimentares para máquinas altamente sofisticadas e eficientes. O aprimoramento dos materiais, o desenvolvimento de turbinas

de maior porte e o aperfeiçoamento dos sistemas de controle desenvolvidos para melhorar a captação da energia eólica, tornando os aerogeradores uma das principais fontes de energia renováveis da atualidade. Modelos inovadores, como os aerogeradores sem pás, surgiram como alternativas promissoras, buscando minimizar problemas de poluição sonora e riscos para a fauna.

Com o passar dos séculos, o uso do vento expandiu-se para outras áreas, como a navegação, onde as velas permitiram o avanço das embarcações, impulsionando o comércio e a exploração entre civilizações. Apesar disso, foi somente durante a Revolução Industrial, no século XIX, que a energia eólica se consolidou como uma fonte relevante de eletricidade, marcando uma nova etapa em sua aplicação prática, como menciona Soares (2015):

Nos anos 80 do século XIX, Poul La Cour começou a desenvolver a ideia de utilizar moinhos de vento para produzir energia zonas rurais. La Cour retoma o projeto, construindo o seu primeiro moinho experimental em 1891 e no qual tem apoio financeiro por parte do governo dinamarquês (SOARES, 2015, p. 9).

Essa inovação foi especialmente relevante para áreas rurais e regiões afastadas da época. Os avanços tecnológicos ao longo do século XX permitiram a evolução das turbinas eólicas, que se tornaram mais simples, robustas e eficientes. Os avanços tecnológicos no século XX tornaram as turbinas eólicas mais eficientes, favorecendo a expansão da energia eólica *offshore*, uma alternativa crescente para a geração de energia renovável em áreas marítimas. O Parque Hornsea Project One, liderado pela Dong Energy, foi planejado para ser o maior parque eólico *offshore* do planeta, com uma capacidade de geração de 1,2 GW, e foi finalizado em 2020, conforme as observações de Silva (2016).

Comparada às fontes tradicionais, como carvão e gás natural, a energia eólica destacou-se por seu potencial renovável e competitivo, impulsionada por investimentos e incentivos governamentais, a energia eólica está entre as fontes de energia que mais crescem no mundo, Oliveira (2017) chama a atenção para o seguinte ponto que:

Além disso, com os avanços tecnológicos, contribuíram significativamente no barateio na produção eólica, no ano de 2017 o preço médio de um gerador é 45% menos do que há 10 anos atrás, com o barateio dos componentes, o modelo eólico é a segunda fonte de energia mais barata no Brasil, atrás apenas das hidrelétricas, a energia eólica brasileira é a mais barata do mundo (BBC, 2015) (OLIVEIRA, 2017, p. 35).

A redução nos preços traz benefícios consideráveis para as políticas de incentivo à energia renovável em todo o país, fortalecendo ainda mais a transição para fontes limpas e sustentáveis. Com avanços contínuos na tecnologia e uma maior aceitação global, a energia eólica promete desempenhar um papel crucial na transição para um sistema energético mais sustentável, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis e combatendo as mudanças climáticas.

No cenário global, é possível observar o progresso pelo setor energético, o que contribuirá para o crescimento econômico. A energia eólica, em particular, tornou-se uma fonte cada vez mais popular. Ao longo dos últimos anos, como aponta Nascimento e Silva (2016), o setor eólico cresceu de forma expressiva, impulsionado pela estratégia de grandes empresas que, após a crise de 2008, voltaram seus investimentos para países emergentes, como Brasil, Rússia, Índia e China. Nesse contexto, a energia eólica ganhou popularidade, firmando-se como uma fonte sustentável de energia.

O progresso é promovido pela introdução de novas tecnologias, que não só melhoram a eficiência, mas promovem uma relação sustentável entre a energia e o ambiente. Entre essas inovações, destacam-se tecnologias alternativas, como os aerogeradores sem pás, que utilizam o efeito Magnus, esses dispositivos, que funcionam com base no movimento de cilindros ou outros elementos verticais, oferecem uma abordagem promissora para superar algumas das limitações dos aerogeradores tradicionais, como o impacto visual e a necessidade de grandes áreas de terra, em conexão com isso Esteves (2019) pontua que:

A explicação física dos fenômenos que geram o efeito Magnus envolve diversos conceitos e parâmetros de física e aerodinâmica, como por exemplo a velocidade de rotação do cilindro, tendo em conta a velocidade a que fluido o encontra, como também a rugosidade da sua superfície, visto ter impacto na força final, uma vez que altera a fricção entre o fluido e o cilindro (ESTEVEZ, 2019, p. 4).

A densidade e a temperatura do fluido também desempenham um papel importante na interação com o cilindro, impactando diretamente a força gerada pelo efeito Magnus. As regiões marítimas são especialmente favoráveis para essa tecnologia devido à força e constância dos ventos, que garantem maior eficiência na geração de energia. As matrizes energéticas têm experimentado um grande avanço com a implementação de projetos em várias regiões ao redor do mundo.

Isso está diretamente relacionado à conscientização e planejamento necessários para alcançar os passos críticos que permitam a expansão da energia eólica numa vasta gama de setores. Além de ser benéfica para o ambiente ao substituir a energia fóssil, a energia eólica também criou potencial econômico de emprego com a evolução tecnológica. A redução dos custos de instalação e operação em comparação com os antigos aerogeradores abre portas para novos investimentos, cria empregos e incentiva o desenvolvimento de novos negócios no setor, o crescimento da energia eólica, iniciou nos anos 1990, levou a Europa a atingir 70% da capacidade instalada mundial até 2000, um reflexo da evolução das tecnologias e da queda dos custos operacionais, como destacado por Ferreira (2014), tornando a energia eólica mais acessível.

As matrizes energéticas têm experimentado um grande avanço com a implementação de projetos em várias regiões ao redor do mundo. No Brasil, o Nordeste tem se destacado, nos

últimos anos, pelo aumento significativo na instalação de parques eólicos, o que tem contribuído de forma relevante para o crescimento da produção de energia no país, apontado pela ANEEL (2021), esclarece essa questão ao enfatizar que:

Outro fator importante, como incentivo, é a possibilidade de complementaridade entre a geração hidrelétrica e a geração eólica, visto que o maior potencial eólico, na região Nordeste, ocorre durante o período de menor disponibilidade hídrica (ANEEL, 2021, p. 100).

O uso estratégico da energia eólica para complementar a hidrelétrica, especialmente em períodos de seca, pode minimizar os riscos de desabastecimento energético no Brasil. Dantas (2021) ressalta que no Rio Grande do Norte, uma grande parte das usinas eólicas é equipada em regiões serranas, especialmente em sua parte central. Já a outra parte, incluindo os parques mais antigos, se distribui ao longo da costa norte do estado, sendo uma área com maior concentração de parques eólicos. A redução dos custos de instalação e operação em comparação com os antigos aerogeradores abre portas para novos investimentos e incentiva o desenvolvimento de novos negócios no setor.

Apesar dos desafios enfrentados pela energia eólica, como a integração com as redes elétricas e a flutuação dos ventos, os avanços tecnológicos contínuos são fundamentais. Estas melhorias permitiram que a energia eólica se torne um interveniente fundamental no setor energético e desempenhe um papel importante na criação de um sistema mais sustentável, reduzindo as emissões de carbono, conforme apresentado por Lima e Oliveira (2015), suas análises exibem que:

Por ser uma energia renovável, a energia eólica gera menos degradação ao meio ambiente, não emitindo em seu ciclo de produção gases do efeito estufa que são principalmente: gás carbônico (CO₂), metano (CH₄), óxido de nitrogênio (N₂O), hidrofluorcarbonos (HFCs), perfluorcarbonos (PFCs) e hexafluoreto de enxofre (SF₆) (LIMA & OLIVEIRA, 2015, p. 623).

Isso reforça seu papel essencial na diversificação da matriz energética e na diminuição da dependência de combustíveis fósseis. Impulsionada por inovações tecnológicas e políticas de apoio, a energia eólica, em constante evolução, tem todas as chances de seguir sua trajetória de expansão, tornando-se uma fonte cada vez mais necessária para o futuro energético global.

3.2 ENERGIA EÓLICA NO BRASIL

O grande território brasileiro, aliado ao seu desenvolvimento crescente, proporciona um ambiente ideal para o aproveitamento da energia eólica. O Brasil se destaca como um dos dez maiores produtores de energia eólica do mundo, tornando-se um exemplo para o setor energético global. De acordo com Araújo (2018), a energia eólica no Brasil se torna indispensável nos períodos de seca, quando os ventos intensos contribuem para suprir a demanda energética. A

principal vantagem do país é a sua localização geográfica estratégica, especialmente nas áreas costeiras do Nordeste, onde a velocidade dos ventos e as condições climáticas favorecem a implementação de parques eólicos.

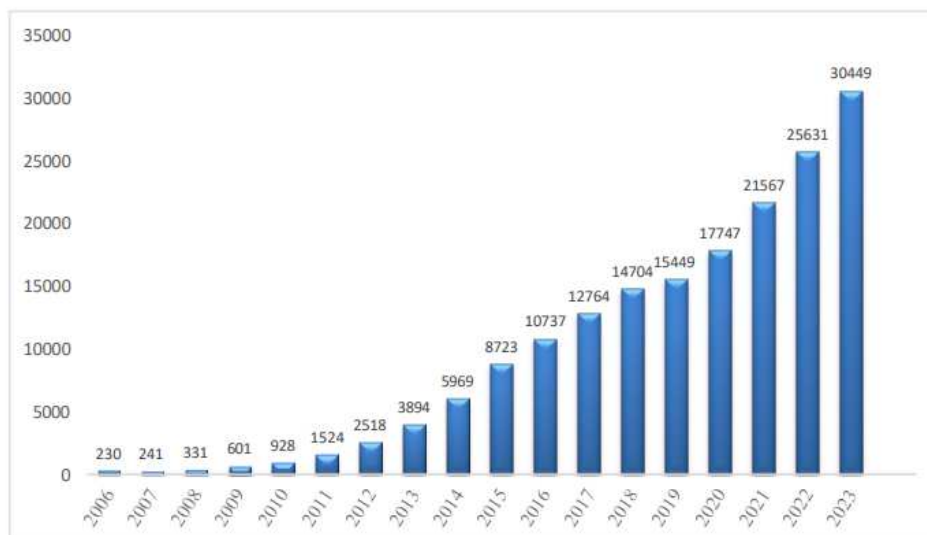
Além disso, o crescimento desse setor no Brasil está alinhado com as metas globais de sustentabilidade. A evolução tecnológica tem sido outro fator crucial para esse avanço, com turbinas mais eficientes que geram mais energia a custos operacionais reduzidos. Nesse cenário, o governo desempenha um papel essencial ao promover leilões de energia renovável, que não só incentivam a expansão dos parques eólicos pelo país, mas também garantem contratos de longo prazo. Isso ajuda a reduzir os riscos para os investidores e abre espaço para novos projetos no setor, tornando o Brasil mais competitivo no mercado global, Simas (2012) explora essa questão ao confirmar que:

Nesse cenário, o governo desempenha um papel essencial ao promover leilões de energia renovável, que não só incentivam a expansão dos parques eólicos pelo país, mas também garantem contratos de longo prazo. Isso ajuda a reduzir os riscos para os investidores e abre espaço para novos projetos no setor, tornando o Brasil ainda mais competitivo no mercado global de energia renovável (SIMAS, 2012, p. 35).

Ao incentivar a geração de energia limpa e oferecer contratos de longo prazo, o governo traz mais confiança e segurança para os investidores. Com isso, os custos da energia eólica diminuem, tornando-a mais acessível e competitiva. A energia eólica no Nordeste do Brasil cresceu de forma impressionante nos últimos anos, transformando a região em um dos principais polos de geração de energia eólica do país.

O crescimento das energias renováveis também trouxe questionamentos sobre seus impactos econômicos, especialmente no que diz respeito à geração de investimentos e à concessão de subsídios governamentais. Simas (2012) menciona que, no início dos anos 2000, as discussões sobre a criação de empregos nesse setor se intensificaram diante das incertezas sobre a eficácia dessas políticas. Conforme apresentado no Gráfico 1, é possível observar a evolução da geração de energia eólica no Brasil ao longo do tempo, evidenciando seu crescimento e sua contribuição para a matriz energética do país.

Gráfico 1 - Evolução da Capacidade Eólica instalada no Brasil (em MW).



Fonte: ABEEólica (2022).

O impacto econômico do sector eólico é evidente à medida que novos empregos são criados em muitas áreas durante a construção e operação do parque. Além disso, os investimentos em infraestrutura e serviços desempenham um papel importante no fortalecimento da economia local, ao substituir fontes poluentes, a energia eólica ajuda a reduzir as emissões de gases de efeito estufa, o que está em linha com as metas climáticas do Brasil.

Apesar de eventuais desafios, muitos proprietários de terras ganham uma renda extra com a locação dos terrenos, o que acaba fortalecendo a economia local e trazendo melhorias para essas comunidades. O Brasil tem conquistado avanços importantes com o apoio de investimentos privados, tanto nacionais quanto internacionais, que enxergam o enorme potencial do mercado de energia no país. Esse interesse reflete a confiança na capacidade do Brasil de liderar no setor energético. Com os avanços tecnológicos, as energias renováveis têm se mostrado cada vez mais eficientes e econômicas, os estudos de Costa (2023) indicam que:

Uma transição energética verdadeiramente sustentável significa incluir a economia circular desde a fase de projeto. Além disso, é necessária uma mudança radical para a energia renovável, afastando-se, sempre que possível, do gás natural e do petróleo e direcionando-se para outras fontes de energia como a solar, eólica, hidrogênio, geotérmica, ou outra tecnologia de emissão zero, como as suportadas por baterias especiais, com anodos de lítio e silício, de alta capacidade de armazenamento (COSTA, 2023, p. 46).

Para uma transição energética bem-sucedida, é essencial investir em fontes renováveis, deixar os combustíveis fósseis para trás e adotar tecnologias de armazenamento como as baterias de lítio e silício. Soluções inovadoras, como tecnologias de armazenamento de energia e sistemas mais sustentáveis, têm elevado o setor a outro patamar, ajudando a superar desafios como a qualidade e

a constância dos ventos. Esse progresso reforça o papel estratégico da energia no desenvolvimento do país e no alcance de uma matriz energética mais limpa e confiável.

O setor de energia eólica no Brasil possui um grande potencial de expansão, especialmente em áreas pouco exploradas, como o interior do Nordeste e o litoral das regiões Sul e Sudeste. Porém, ainda enfrenta desafios significativos, como a ausência de infraestrutura adequada para a transmissão de energia nas áreas mais remotas e a variação dos ventos, que demanda o uso de tecnologias avançadas, como baterias de alta capacidade, para o armazenamento da produção excedente. De acordo com Dutra e Szklo (2006), o PROINFA visa promover a expansão das fontes alternativas de energia no Brasil. Pelo meio, o programa realiza a contratação de projetos em energia eólica, biomassa e PCH, com a execução por Produtores Independentes de Energia, com ou sem a participação das concessionárias.

3.3 TECNOLOGIAS DESENVOLVIDAS NA GERAÇÃO DE ENERGIA LIMPA

A transição para um modelo energético mais sustentável é um dos temas mais debatidos no cenário global, impulsionado pelas crescentes preocupações com a mudança climática, a segurança energética e a necessidade de diversificação das fontes de energia. Isso tem gerado uma grande procura por soluções inovadoras, impulsionando o crescimento no setor de energia eólica, como colocado por Alves (2009):

Desde o início de sua criação, a ANEEL vem trabalhando em parceria com Centros de Referência em Energias Renováveis e Universidades, na execução de estudos que venham proporcionar condições para aumentar a oferta de energia. E, também, buscando a democratização do acesso a energia em suas formas mais adequadas, favorecendo a geração de empregos e a melhoria na qualidade de vida da sociedade (ALVES, 2009, p. 174).

Com essas parcerias, a ANEEL está criando oportunidades para um mercado energético mais flexível e inovador, onde a troca de ideias entre as universidades e a indústria resulta em soluções rápidas e mais conectadas com as necessidades de uma sociedade em constante mudança. Tradicionalmente, esses aerogeradores utilizam turbinas com pás, mas, com o avanço da tecnologia, surgiram alternativas mais modernas, como os aerogeradores sem pás, essa inovação não só permite o aproveitamento mais eficiente do vento, como também contribui para a redução dos impactos ambientais, uma preocupação constante nos modelos tradicionais.

Além disso, outra grande inovação no setor são as usinas *offshore*, com a possibilidade de instalação de turbinas em alto-mar, essa tecnologia traz soluções para melhorar a eficiência na geração de energia eólica, ao mesmo tempo em que minimiza os impactos ambientais das instalações de eólicas *onshore*. O desenvolvimento dessas tecnologias está transformando a forma

como vemos a energia eólica, abrindo portas para um futuro mais sustentável e eficiente na geração de eletricidade.

O efeito Magnus, combinado aos aerogeradores sem pás, apresenta uma tecnologia distinta em relação às tradicionais. Em vez das pás rotatórias, essa abordagem utiliza cilindros girando rapidamente, gerando força e eficiência de uma forma mais sustentável. O efeito ocorre quando um cilindro em rotação cria uma diferença de pressão ao interagir com o vento, transformando a energia do vento em movimento, Villarreal (2018) observa um aspecto crucial ao assegurar que:

A ausência de partes móveis permite coletar energia do sol com manutenção mínima e sem impacto de ruído ambiental. Além disso, é bem conhecido que o uso combinado de diferentes fontes de energia renovável é sinérgico devido à compensação mútua nos períodos de ausência de vento, luz solar, etc (VILLARREAL, 2018, p. 1, tradução da autora).

Os benefícios desta tecnologia incluem um menor desgaste mecânico, um impacto visual reduzido e a capacidade de operar de maneira mais eficiente em áreas de acesso, como regiões urbanas ou locais com ventos de menor intensidade. Além disso, sua estrutura inovadora pode contribuir para uma manutenção difícil mais simplificada e custos operacionais reduzidos, uma vez que elimina componentes mecânicos móveis.

Embora ainda esteja em fase de pesquisa e desenvolvimento, os avanços recentes mostram que essa tecnologia tem um grande potencial para revolucionar o setor energético nos próximos anos, oferecendo uma alternativa viável às turbinas convencionais. Seu funcionamento mais silencioso e sua menor interferência na paisagem também tornam essa solução promissora para aplicações em áreas com restrições ambientais e urbanísticas. Na figura 2, pode-se observar um modelo aerogerador sem pás.

Figura 2 - Aerogerador sem pás, modelo Tacoma da Vortex Bladeless.



Fonte: Vortex Bladeless (2019).

As tecnologias *offshore*, que consistem na instalação de turbinas eólicas no mar, têm se mostrado uma solução promissora ao longo das últimas décadas para aproveitar ventos mais fortes e constantes. Ao contrário dos aerogeradores convencionais, que precisam de uma base sólida no solo, as turbinas *offshore* flutuantes são ancoradas no fundo marinho por meio de plataformas flutuantes. Ferreira (2019) ressalta que os parques eólicos marítimos estão se firmando como uma das principais apostas para a geração de energia, graças à sua habilidade em aproveitar melhor os ventos.

Com a crescente demanda por fontes de energia mais sustentáveis, essa tecnologia tem atraído um aumento considerável nos investimentos, refletindo o interesse e o potencial do setor. Essa inovação permite que as turbinas operem em águas mais profundas, onde as condições de vento são consideravelmente mais favoráveis e estáveis, ao contrário das áreas terrestres, que muitas vezes apresentam ventos irregulares e variáveis.

Essa capacidade de operar em locais mais afastados e em águas profundas abre novas possibilidades para a expansão da energia eólica, aproveitando áreas oceânicas ricas em vento que não são acessíveis para turbinas tradicionais. Com o avanço da tecnologia e o aumento dos investimentos no setor, as turbinas *offshore* têm o potencial de transformar a forma como geramos energia, contribuindo para um futuro mais sustentável e com menos impactos ambientais, ao mesmo tempo em que fornecem uma alternativa robusta às fontes de energia convencionais, a implementação de uma tecnologia como essa, provê vantagens para a melhoria na eficiência e no aperfeiçoamento da estabilidade, Carvalho (2017) chama atenção para esse detalhe ao dizer:

Uma das modalidades da energia eólica, a energia eólica *offshore*, consiste na obtenção de energia proveniente dos ventos por meio da construção de parques eólicos ao longo da costa marítima. Esta tecnologia proporciona algumas vantagens face aos parques eólicos terrestres como aumento da potência instalada de energia eólica e menor impacto visual e sonoro (CARVALHO, 2017, p. 18).

Além disso, por estar longe das cidades, essa tecnologia ajuda a reduzir os impactos nas comunidades ao redor e ainda cuida melhor do meio ambiente em terra. Outro benefício significativo das turbinas *offshore* é a diminuição do impacto visual, como ficam no mar, longe das áreas urbanas e paisagens naturais, elas são menos visíveis, o que reduz preocupações com a estética e o impacto ambiental, isso pode facilitar a aprovação de projetos eólicos em regiões que possuem resistência a turbinas no solo, além disso, as turbinas *offshore* podem ser uma peça-chave para a diversificação das fontes de energia renovável, ampliando as opções de geração de eletricidade limpa para atender à crescente demanda.

A energia das turbinas no mar oferece uma fonte estável e escalável, representando uma alternativa viável às energias fósseis e contribuindo para a luta contra as mudanças climáticas, à

medida que a tecnologia avança e os investimentos aumentam, as turbinas *offshore* têm o potencial de ser fundamentais no futuro da geração de energia renovável. A figura 3 exibe modelos de aerogeradores *offshore*. Outro aspecto a ser considerado são os impactos ambientais da instalação e operação de parques eólicos *offshore*. Embora a energia eólica seja uma fonte limpa, a construção de aerogeradores no mar pode abranger ecossistemas marinhos, incluindo a fauna e a flora aquática. A corrosão das estruturas das turbinas devido à água salgada também representa um desafio ambiental, pois pode resultar na liberação de substâncias contaminantes no ambiente marinho, afetando a qualidade da água e a vida marinha.

Figura 3 - Figura de Aerogerador *offshore*.



Fonte: *Boattrip* (2009).

Os aerogeradores de eixo vertical e as usinas solares ganham cada vez mais destaque entre as fontes. No entanto, essas tecnologias ainda enfrentam desafios ambientais relevantes. Riger (2014) observa que a análise do custo social envolve examinar os impactos no meio ambiente, nas condições de trabalho, no comércio internacional, nas reservas de energia mais acessíveis, além dos subsídios e gastos públicos. Em casos específicos da energia eólica de eixo vertical, seu funcionamento é diferente dos modelos tradicionais de eixo horizontal, o que levanta preocupações sobre os impactos na fauna e flora das regiões onde os parques estão instalados, especialmente no que se refere às aves.

Embora o risco seja considerado menor, ele continua sendo preocupante, principalmente em áreas urbanas, onde a interação com ecossistemas delicados pode representar ameaças à biodiversidade. Já as usinas solares, reconhecidas por sua eficiência e caráter sustentável, também apresentam desafios, como o uso extensivo de terras, que reduz as áreas disponíveis para a agricultura, e os impactos sobre a biodiversidade local.

Preservar os recursos naturais, que são fundamentais para manter o equilíbrio da vida na Terra, tem se tornado uma preocupação cada vez mais evidente diante dos impactos ambientais.

Como apontam Inatomi e Udaeta (2005), embora a humanidade dependa da energia elétrica para avançar e se desenvolver, é crucial buscar formas de geração que respeitem o meio ambiente, já que ele é a base dos recursos essenciais para a nossa sobrevivência. Além disso, o processo de fabricação dos painéis solares consome muitos recursos, contribuindo para o desequilíbrio ecológico, desta forma, torna-se essencial o avanço contínuo dessas tecnologias, aliado às inovações, para minimizar os impactos ambientais e torná-las cada vez mais sustentáveis.

A sustentabilidade nos aerogeradores tornou-se uma meta essencial no desenvolvimento tecnológico, os avanços na eficiência da conversão de energia eólica estão sendo acompanhados por esforços inovadores para minimizar os impactos ambientais em todas as etapas do ciclo de vida das turbinas. A reutilização das lâminas, como apontado por Leite (2020), pode ser realizada por meio de sua reparação e instalação em turbinas, sejam elas antigas ou novas, ou ainda pela conversão das lâminas em novos produtos com funções distintas. Os novos modelos de aerogeradores têm como prioridade o uso de materiais sustentáveis, com destaque para a reciclagem das lâminas, que antes representavam um grande desafio ambiental devido à dificuldade de reaproveitamento.

4 AEROGERADORES SEM PÁS BASEADAS NO DESPRENDIMENTO DE VÓRTICES

Com o avanço das tecnologias voltadas para a geração de energia eólica, surgiram os aerogeradores sem pás, uma alternativa sustentável que apresenta modelos promissores para superar os desafios enfrentados até hoje. Essa inovação ganha destaque devido ao seu design simples e à fácil adaptação, utilizando princípios de ressonância para gerar energia elétrica, eliminando assim a necessidade de pás giratórias, características dos aerogeradores de eixo vertical, ao contrário dos aerogeradores convencionais, que dependem de pás para captar o movimento do vento e convertê-lo em energia elétrica, essa tecnologia baseada em vibração aproveita de forma mais eficiente o vento que seria desperdiçado.

A estrutura simples dessa turbina, que dispensa mecanismos de adaptação à direção do vento e possibilita a instalação do equipamento de conversão de energia próximo ao solo, é destacada por Tedesco (2015). Isso ocorre graças ao uso de um sistema vertical que vibra com o impacto do vento, proporcionando maior eficiência energética, embora enfrentem alguns desafios ao longo de seu desenvolvimento e implementação, assim como acontece com qualquer nova tecnologia, essas limitações são compensadas por outras vantagens, especialmente em locais onde os ventos têm menor intensidade. Os aerogeradores verticais são uma alternativa eficiente e ambientalmente amigável, com o seguinte princípio de funcionamento como abordado por Pinhas *et al.* (2023):

O princípio do aerogerador vertical baseia-se em aproveitar as oscilações provocadas numa estrutura absorvendo a energia mecânica desse movimento, produzindo em consequência energia elétrica. Este novo sistema produz menos ruído e representa um risco muito inferior para o ecossistema das aves e o meio ambiente envolvente (PINHAS *et al.*, 2023, p. 12).

Essa tecnologia diminui ainda mais o impacto no ambiente, aproveitando o vento de forma mais eficiente e sustentável com a natureza. Mesmo assim, os aerogeradores sem pás têm grande potencial para complementar as tecnologias existentes, contribuindo para a expansão da matriz energética de forma prática e sustentável. A transformação da energia do movimento oscilatório em eletricidade é feita por indução eletromagnética, utilizando um alternador. Quando o mastro está em posição vertical, a interação entre ímãs permanentes e bobinas é otimizada, melhorando a captura da energia gerada pelas oscilações.

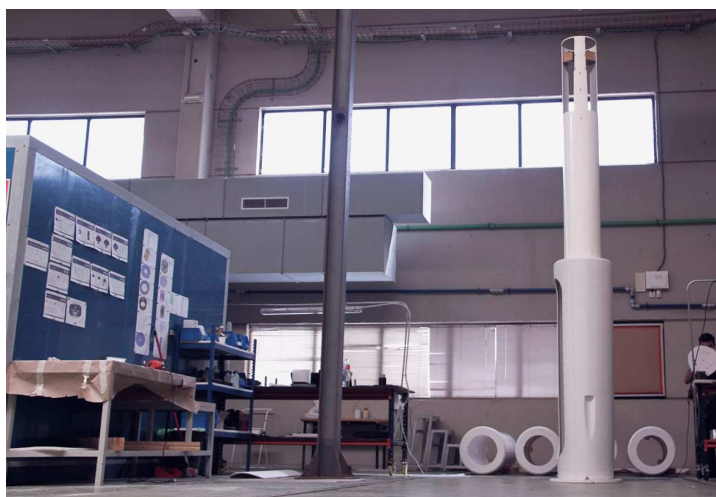
Além disso, o uso de materiais com forte revestimento eletromecânico pode aprimorar essa conversão, superando a eficiência dos sistemas piezoelétricos, que são mais adequados para aplicações de baixa potência devido à sua simplicidade e compactação. Para que a conversão da energia cinética do vento em energia mecânica seja a mais eficiente possível, ela deve se aproximar

do limite de Betz. O mastro, é uma parte fundamental da estrutura, interage diretamente com o vento, permitindo a alteração de seu diâmetro conforme a altura. Com essa alteração, as forças perpendiculares ao vento agem sincronizadamente, elevando o desempenho do sistema, como observado essa questão por Villarreal (2018).

Ao ajustar o diâmetro do mastro ao longo de sua extensão, é possível otimizar a sincronização das forças com o fluxo de vento, resultando em uma conversão de energia eólica mais eficiente e um rendimento superior do sistema. Um benefício importante dos aerogeradores sem pás é a simplificação mecânica. Sem a presença de pás giratórias ou sistemas complexos de engrenagens, esses aerogeradores exigem menos manutenção, o que resulta na redução dos custos operacionais e no prolongamento de sua vida útil.

A adoção de turbinas eólicas sem pás no setor das energias renováveis tem crescido rapidamente devido às suas principais vantagens, entre as vantagens, está o menor impacto visual e ambiental, tornando-se mais discretos na paisagem, e operação silenciosa, reduzindo a poluição sonora em comparação com turbinas eólicas convencionais, e a relevância da modelagem surge da diversidade de formas empregadas em sua estrutura. O modelo Atlantis é representado na figura 4, mostrando seu design e composição.

Figura 4- Aerogerador modelo Atlantis em modelagem da Vortex Bladeless.



Fonte: Vortex Bladeless (2023).

O aerogerador Vortex® Bladeless é formado por três partes principais, a base tem a função de captar as forças do vento e passar essa carga para o estator e a haste, o estator, fica no meio, entre a base e a haste, ajudando a absorver as forças geradas nessa interação, para que a haste seja a responsável por lidar com as forças que causam o movimento de oscilação, garantindo o equilíbrio do equipamento. No campo da engenharia de turbinas eólicas, os aerogeradores Tacoma e Atlantis representam inovações essenciais para o futuro da energia renovável.

A ponte Tacoma Narrows e o modelo de aerogerador sem pás Tacoma apresentam uma semelhança fundamental no que diz respeito à preocupação com os efeitos da ressonância aeroelástica. Observe na Figura 5 os detalhes do modelo Tacoma, que incorpora esses aprendizados para garantir segurança e eficiência em condições de vento extremo.

Figura 5 - Aerogerador modelo Tacoma Vortex Bladeless.



Fonte: Vortex Bladeless (2019).

Ambas as estruturas, embora tenham propósitos diferentes, uma focada no transporte e outra na geração de energia, mostram como é essencial equilibrar eficiência e segurança em ambientes onde forças naturais, como o vento, estão constantemente em ação. O aerogerador Tacoma, aproveitou as lições aprendidas com o colapso da ponte Tacoma Narrows, incorporando soluções de engenharia que o tornam mais resistente e adaptável às variações do vento. Como parte dessas inovações, estão a simetria axial completa e o uso de componentes aerodinamicamente otimizados, como destacado por Villarreal (2018) ao mencionar que:

Outro aspecto importante a ser levado em conta no projeto do alternador é a necessidade de manter uma simetria axial completa. O dispositivo deve se comportar de forma idêntica independente da direção do vento. Assim, o uso de ímãs permanentes dispostos em anel e fixados ao mastro são novamente a estratégia mais indicada. Por fim, devem ser destacados os benefícios aerodinâmicos relacionados a um mastro leve (amplitude do mastro e alcance de lock-in) [7]. O uso simultâneo do anel móvel para geração de energia e ajuste da estrutura economiza peso e custos (VILLARREAL, 2018, p. 4, tradução da autora).

Além dos aspectos técnicos já mencionados, é fundamental considerar a influência das condições ambientais no desempenho do alternador. Essa resistência é especialmente importante em locais com climas extremos, onde a confiabilidade do sistema pode ser posta à prova. O modelo Atlantis, por sua vez, integra design sustentável e inovações tecnológicas, aproveitando as forças naturais sem a necessidade de complexos mecanismos, o que contribui para uma maior

durabilidade. O modelo Atlantis, como ilustrado na figura 6, permite uma compreensão de sua aplicação.

Figura 6 - Aerogerador modelo Atlantis Vortex Bladeless.



Fonte: Vortex Bladeless (2023).

4.1 MECANISMO DE GERAÇÃO DE ENERGIA

A geração de energia por meio do fenômeno conhecido como *Vortex shedding* (ou desprendimento de vórtices) representa uma abordagem inovadora para o aproveitamento de forças naturais. Essa alternância gera forças oscilatórias que induzem vibrações, denominadas vibrações induzidas por vórtices (VIV, na sigla em inglês). A energia produzida por essas vibrações pode ser convertida em eletricidade através da indução eletromagnética, utilizando sistemas, dispensando a necessidade de peças rotativas.

Assim como um alternador convencional, o dispositivo utiliza a interação entre bobinas e campos magnéticos para gerar eletricidade por indução eletromagnética. A diferença é que, aqui, não há necessidade de rotação em um eixo ou de uma complexa caixa de engrenagens, o que simplifica o design e reduz custos de manutenção. Além disso, os ímãs atuam como um “Sistema de Sintonia”, ajustando a constante de elasticidade aparente do mastro. Isso permite que o dispositivo opere de forma eficiente em uma ampla faixa de velocidades do vento, otimizando as oscilações e garantindo maior aproveitamento da energia eólica, mesmo em condições variáveis. Na Figura 7 ilustra a conversão de energia por oscilações provocadas pelo vento.

Figura 7 - Conversão de energia por oscilações provocadas pelo vento.



Fonte: Vortex Bladeless (2025).

Essa característica torna os sistemas baseados em VIV especialmente adequados para ambientes que exigem baixa manutenção ou que enfrentam condições operacionais desafiadoras, como locais remotos ou expostos a condições climáticas adversas. A combinação de simplicidade, eficiência e adaptabilidade faz desses sistemas uma solução promissora para a geração de energia renovável em contextos onde tecnologias tradicionais podem não ser viáveis. O colapso da ponte Tacoma Narrows, em 1940, é lembrado como um dos maiores exemplos do poder destrutivo do fenômeno de desprendimento de vórtices, a alternância de vórtices ao redor da ponte gerou vibrações tão fortes que a estrutura não conseguiu suportá-las e desabou, como explicado por Ramos e Cargnelutti (2024):

A Ponte de Tacoma construída no estado de Washington tornou-se uma lição para a engenharia civil, pois a ponte colapsou quatro meses após a sua inauguração [2]. A ponte é uma estrutura longa, estreita e rasa está vulnerável aos efeitos aerodinâmicos, pois, a natureza da estrutura confere uma flexibilidade considerável (RAMOS & CARGNELUTTI, 2024, p. 1).

O colapso da ponte Tacoma Narrows, ocorrido em 7 de novembro de 1940, embora tenha sido um evento trágico, revelou-se um marco fundamental para o estudo das vibrações causadas por vórtices, conhecido como vortex shedding. Esse evento, que destruiu a ponte devido à ressonância causada pelo desprendimento periódico de vórtices em ventos de aproximadamente 64 km/h, impulsionou avanços significativos na engenharia estrutural e na aerodinâmica.

Os engenheiros passaram a compreender melhor como as oscilações aerodinâmicas podem comprometer a estabilidade de estruturas, levando ao desenvolvimento de projetos mais robustos e à incorporação de análises dinâmicas em pontes e edifícios altos. A figura 8 mostra a ponte Tacoma, onde uma tragédia impulsionou a inovação.

Figura 8- Visualização da ponte Tacoma Narrows.

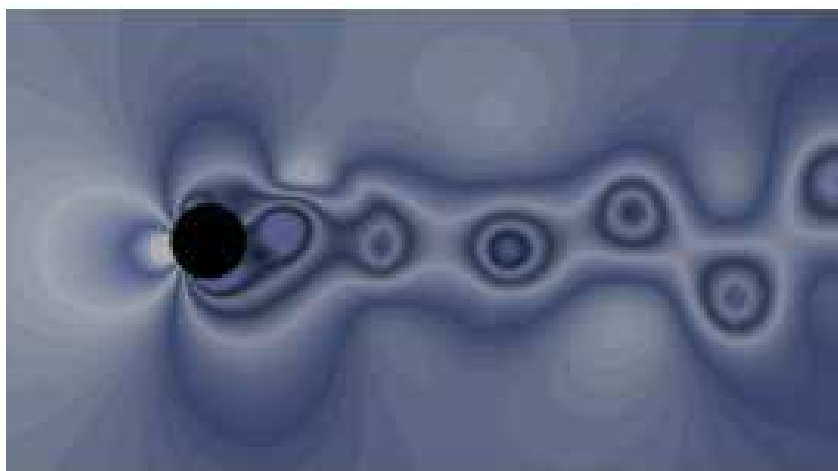


Fonte: Flickr (2016).

O fenômeno *Vortex Shedding* (desprendimento de vórtices), ocorre quando o vento flui em torno de uma estrutura, gerando vórtices de pressão alternados. A frequência desses vórtices depende da velocidade do vento. Se a frequência natural de ressonância da estrutura coincidir com a dos vórtices, ela entra em oscilação, transformando a energia cinética do vento em movimento mecânico.

Dispositivos que aproveitam o fenômeno de *vortex shedding* precisam ser projetados para resistir a vibrações intensas e imprevisíveis, geradas pela interação entre o fluido e a estrutura. Isso ocorre quando os vórtices se formam e se desprendem alternadamente de cada lado do corpo, criando forças cíclicas que induzem oscilações. Essas forças podem ser aproveitadas para gerar um movimento periódico que, por sua vez, pode ser convertido em energia mecânica ou elétrica. Na Figura 9 observa-se o desprendimento de Vórtices.

Figura 9 - Desprendimento de Vórtices.



Fonte: Villarreal (2018).

No entanto, essas vibrações não estão sozinhas, como frisado por Freire (2006), o fenômeno de *Vortex-Induced Vibration* (VIV) surge quando um corpo, livre para oscilar em um fluido, altera o fluxo ao seu redor, formando vórtices que amplificam as vibrações. Essa combinação de *Vortex shedding* e VIV representa um desafio complexo para a engenharia, mas também uma oportunidade para inovação.

Com o uso de simulações e testes avançados, os engenheiros conseguem prever e mitigar os efeitos desses fenômenos, garantindo que os dispositivos operem de forma segura e eficiente. À medida que as energias renováveis ganham relevância e a busca por soluções sustentáveis se intensifica, novas tecnologias têm sido criadas para unir inovação e preservação do meio ambiente, com os aerogeradores sem pás se destacando nesse contexto.

Os modelos Tacoma e o Atlantis não só abordam questões de sustentabilidade, mas também enfrentam desafios técnicos, como as vibrações induzidas por vórtices, que precisam ser controladas para garantir a estabilidade e eficácia da tecnologia. O controle adequado dessas vibrações é essencial para garantir a segurança e a eficácia dos aerogeradores, promovendo, assim, um equilíbrio entre sustentabilidade e estética. A tecnologia dos aerogeradores sem pás, exemplificada pelos modelos Tacoma e Atlantis, representa uma solução tecnológica avançada e ambientalmente sustentável.

Tanto o Tacoma, como o Atlantis tem sua estrutura sofisticada e modelos discretos, com seus formatos fluidos que remetem a elementos naturais, foram projetados para integrar-se a paisagens naturais e urbanas. Essa abordagem busca minimizar os impactos visuais e promover uma coexistência equilibrada entre a tecnologia e o meio ambiente, alinhando inovação técnica à preservação estética e ecológica.

4.2 INTRODUÇÃO AO FUNCIONAMENTO

A Vortex® Bladeless tem o intuito de criar um futuro mais sustentável e inovador para a energia renovável com a introdução de seus aerogeradores sem pás, oferecendo uma abordagem única para a geração de energia eólica. A Vortex Bladeless (2019) detalha a questão, afirmando que:

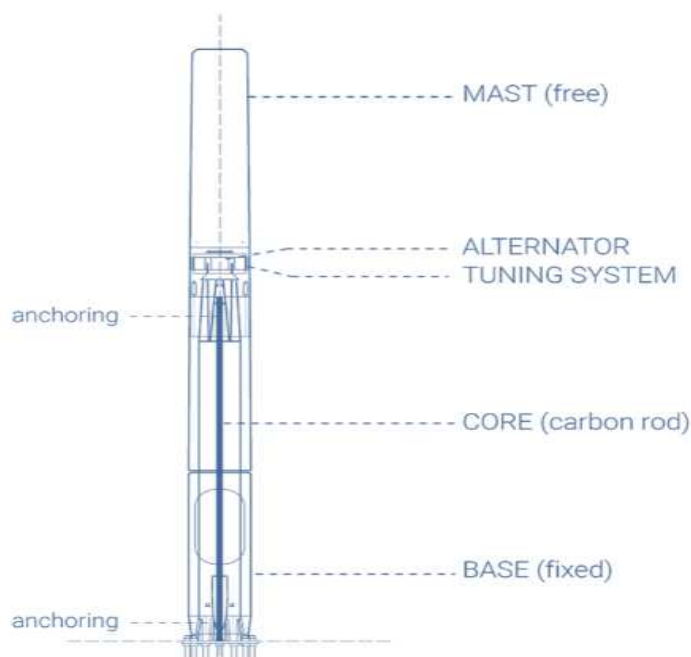
Vortex Bladeless é uma startup de tecnologia. Estamos desenvolvendo um gerador eólico ambientalmente amigável que não necessita de pás. Neste estágio, estamos projetando essa tecnologia para geração de energia eólica em pequena escala no local e energia distribuída em áreas residenciais, especialmente pensado para operar conectado à rede ou fora da rede, juntamente com outras unidades Vortex ou painéis solares convencionais (VORTEX BLADELESS, 2019, p. 2, tradução da autora).

A empresa desenvolveu aerogeradores sem pás, que oferecem soluções com maior eficiência e uma base ecologicamente responsável, o grande diferencial da Vortex está em sua missão de transformar a forma como a energia eólica é gerada, adotando um design que reduz o impacto ambiental, diminui os custos de manutenção e aprimora a eficiência dos sistemas. Com o apoio de instituições renomadas, como o Banco Europeu de Investimento, o Centro de Supercomputação de Barcelona e a Universidade de Salamanca, a tecnologia Vortex reforça seu compromisso com a pesquisa e o desenvolvimento de energia eólica sustentável sem pás.

A *startup*, localizada na Espanha situada em Ávila, está há pelo menos uma década no desenvolvimento e produção de uma tecnologia inovadora que promete revolucionar o setor de energia eólica. Com um compromisso forte com o meio ambiente, a Vortex trabalha para diminuir qualquer impacto negativo sobre a natureza. Seus aerogeradores foram cuidadosamente planejados para reduzir os riscos para a fauna local, com especial atenção às aves, um problema comum nas turbinas tradicionais.

Como mostrado na Figura 10, o funcionamento de um aerogerador depende de uma série de componentes que trabalham juntos de forma sinérgica. O mastro oscila com o vento, captando a energia cinética e gerando movimento. Esse movimento é então transformado em eletricidade por meio do alternador, que converte a energia mecânica em energia elétrica. O núcleo de carbono é uma parte crucial da estrutura, oferecendo resistência e leveza, características fundamentais para o desempenho do aerogerador. Em seguida, uma base que serve para fixar o aerogerador ao solo, fornecendo a estabilidade necessária para que o sistema opere de forma eficiente e segura.

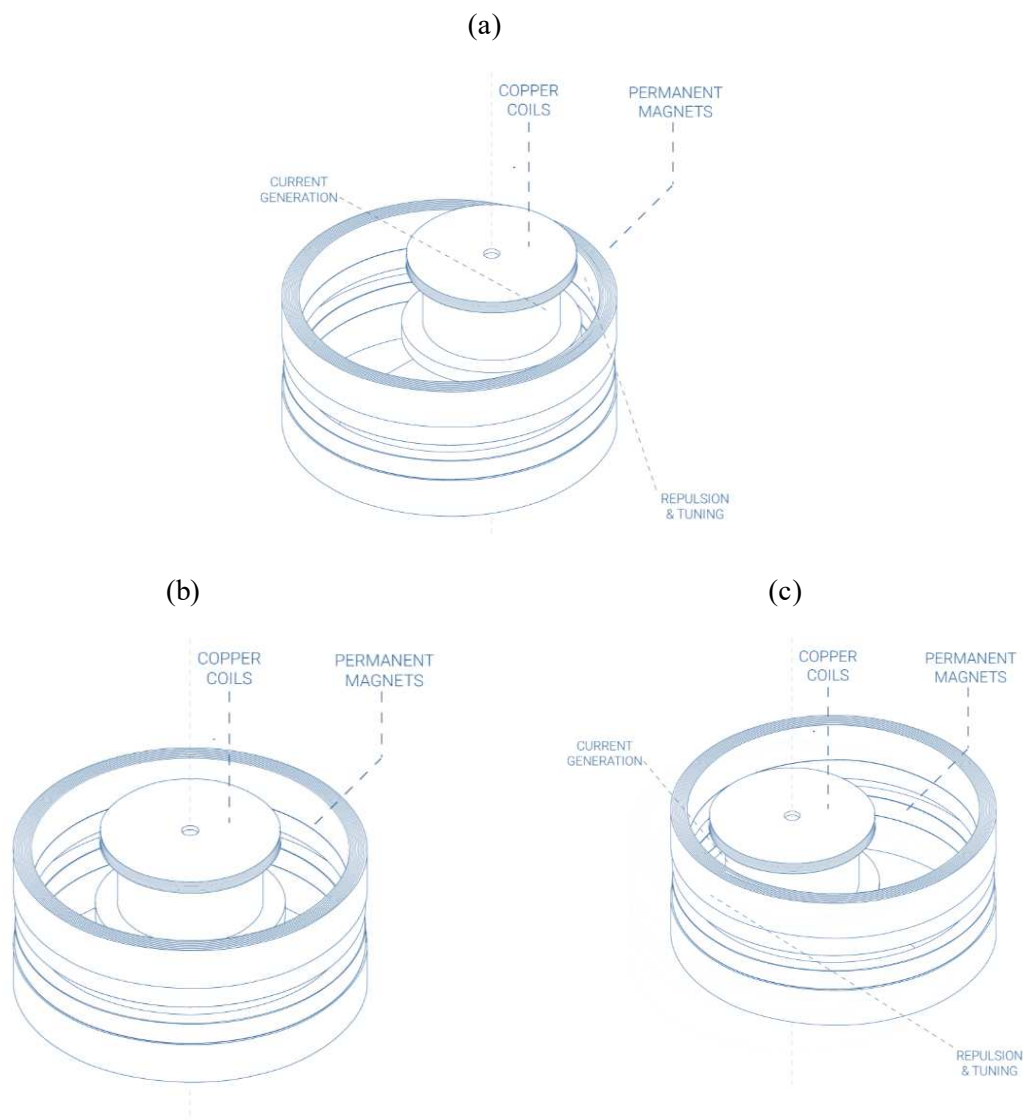
Figura 10 - Ilustração da estrutura de um aerogerador da empresa Vortex Bladeless.



Fonte: Vortex Bladeless (2025).

Na figura 11, os movimentos (a), (b) e (c) representam diferentes fases de conversão de energia na estrutura de um aerogerador. No movimento (a), a interação entre bobinas e campos magnéticos gera eletricidade por indução eletromagnética, sem depender da rotação tradicional. No movimento (a), a interação entre as bobinas de cobre (copper coils) e os ímãs permanentes (permanent magnets) gera eletricidade através do fenômeno de indução eletromagnética, eliminando a necessidade de rotação mecânica tradicional. O movimento (b) demonstra uma fase intermediária onde a repulsão e atração magnética (repulsion & tuning) são otimizadas para maximizar a eficiência energética. Já no movimento (c), o sistema alcança uma fase de geração de corrente (current generation) estável, onde a energia cinética é continuamente convertida em energia elétrica, mantendo um fluxo constante e eficiente.

Figura 11- Visão da Tecnologia de Geração de Energia com Ímãs Permanentes: Movimento (a), Movimento (b) e Movimento (c).



Fonte: Vortex Bladeless (2025).

O design inovador não só reduz custos de fabricação e manutenção, mas também minimiza o impacto ambiental, protegendo aves e morcegos. Feitos com materiais duráveis, como fibra de carbono, são leves, eficientes e adaptáveis a diversos locais, ocupando pouco espaço e respondendo rapidamente às mudanças de vento. A Vortex oferece uma solução inteligente, sustentável e acessível para o futuro da energia eólica, desde pequenas instalações até projetos em larga escala. A figura 12 ilustra uma cidade com aerogeradores sem pás da empresa Vortex® Bladeless, destacando a combinação de tecnologia e sustentabilidade.

Figura 12 - Representação de uma cidade com aerogeradores da empresa Vortex Bladeless.



Fonte: Vortex Bladeless (2023).

Ao eliminar as pás do design, o sistema reduz os riscos que as lâminas das turbinas eólicas convencionais impõem à fauna, especialmente às aves. Junto a isso, a Vortex se compromete com a eficiência energética, sempre buscando melhorar seu desempenho. A empresa investe em pesquisa e desenvolvimento para criar soluções de energia eólica potentes e acessíveis, atendendo desde residências até grandes empresas. Na Figura 12, é possível observar que alguns aerogeradores estão localizados entre as casas, demonstrando a adaptação desses sistemas em áreas urbanas, onde o impacto visual e os riscos para a fauna são minimizados.

Com foco em inovação e custo-benefício, a empresa oferece um serviço completo, incluindo fabricação, instalação e suporte pós-venda, garantindo suporte contínuo e diferenciando-se no mercado. Vortex Bladeless (2020) detalha que:

Seu design simples e leve permite o uso muito eficiente de matérias-primas. Não necessita de transferências nem gera resíduos durante o funcionamento, interrompendo a manutenção. Diferente da tecnologia de energia eólica convencional baseada em rotação, espera-se que o Vortex seja silencioso. Como adicionar, os componentes do Vortex praticamente não interferem nos sinais de rádio (VORTEX BLADELESS, 2020, p. 6, tradução da autora).

Usando um design simples e eficiente, essa tecnologia opera de forma silenciosa, sem gerar resíduos, trazendo uma solução prática e sustentável para gerar energia limpa de maneira harmoniosa com o meio ambiente e o dia a dia das pessoas. Além disso, estudos experimentais e testes de campo realizados por especialistas em energia eólica comprovam essa eficiência, Javier (2019) reflete sobre isso, observando que:

Foi comprovado por meio de experimentos que manter uma distância entre os dispositivos Vortex correspondente à metade de sua altura não provoca nenhuma alteração significativa no desempenho e no funcionamento do gerador (JAVIER, 2019 p. 33, tradução da autora).

Com isso a tecnologia destaca-se ser viável até mesmo em espaços menores, onde a instalação de equipamentos compactos é essencial. Os aerogeradores da Vortex produzem energia de forma consistente, mesmo com ventos variáveis, garantindo eficiência e confiabilidade. Apesar de seu desenvolvimento gradual, essa tecnologia tem ganhado destaque no mercado eólico como uma alternativa promissora, capaz de atender necessidades específicas e superar modelos tradicionais em certas aplicações.

A tecnologia Vortex, que funciona com movimentos suaves e aproveita a ressonância aeroelástica, gera energia sem a necessidade de pás, o que representa uma grande inovação no setor. Ao eliminar as lâminas tradicionais, o sistema não apenas reduz significativamente os impactos visuais e sonoros, mas também minimiza os riscos para a fauna local, especialmente as aves. É uma solução perfeita para áreas urbanas, já que quase não exige manutenção e causa pouquíssimas interferências no ambiente, tornando-a uma opção prática e sustentável para o futuro (Vortex Bladeless, 2020). Como ilustrado na figura 13, a indústria eólica e as aves podem coexistir harmoniosamente, compartilhando o mesmo vento.

Figura 13 - Indústria eólica e pássaros podem compartilhar o mesmo vento.



Fonte: Vortex Media Kit (2024).

Um dos seus maiores diferenciais é o custo de produção significativamente menor, tornando-a mais acessível e prática para diversos usos. O design simplificado, que utiliza menos materiais e dispensa processos industriais complexos, é um dos responsáveis por essa economia. Essa abordagem não só reduz gastos iniciais, mas também agiliza a produção, atendendo à crescente demanda por soluções energéticas sustentáveis. Os aerogeradores sem pás trazem benefícios ambientais significativos, superando os modelos tradicionais em diversos aspectos. Eles reduzem o impacto visual e sonoro, sendo ideais para áreas urbanas e ecologicamente sensíveis, onde turbinas convencionais podem causar problemas.

Além disso, eliminam o risco de colisões com aves e morcegos, protegendo a biodiversidade e reforçando a energia eólica como uma fonte limpa e ética. Sua fabricação é mais eficiente, utilizando menos recursos e reduzindo resíduos, o que alinha a tecnologia às preocupações ambientais atuais. Ao viabilizar a geração de energia em locais antes considerados impróprios, como áreas rurais e remotas, os aerogeradores sem pás ampliam o acesso à energia renovável.

Embora a tecnologia da Vortex seja inovadora e significativa no campo da energia eólica, a tecnologia ainda enfrenta alguns desafios. Em primeiro lugar, a dependência de ventos constantes pode comprometer sua eficiência em determinadas regiões, limitando suas previsões em áreas com menor intensidade ou variabilidade do vento. Além disso, o custo associado à instalação e manutenção dos aerogeradores em locais de difícil acesso pode representar uma dificuldade, mesmo considerando a redução nos custos de produção.

O mercado também necessita de um período de adaptação para adaptar-se a esta nova tecnologia, o que pode retardar sua adoção em larga escala. A eficácia da tecnologia em regiões com alta demanda de produção de energia continua sendo uma questão em aberto. Contudo, apesar desses desafios, a Vortex ainda se configura como uma solução promissora, especialmente ao considerar os benefícios ambientais, como a redução do impacto visual, a proteção da fauna local e a contribuição para a sustentabilidade, tornando-se uma alternativa inovadora para o futuro da geração de energia renovável.

5 METODOLOGIA

A pesquisa foi conduzida por meio de uma revisão bibliográfica, com foco nas tecnologias, especialmente os modelos sem pás, analisando seu desempenho em regiões com clima e padrões de vento característicos do Semiárido. O estudo buscou características técnicas dos aerogeradores sem pás, comparando-os a outras fontes de energia renovável já presentes no campus da UFERSA, como as usinas solares, em termos de eficiência energética, adaptação às condições climáticas locais e área necessária para instalação.

Para embasar a análise, foram coletados dados específicos sobre as condições de vento no campus e a demanda ativa de energia da instituição. Esses dados foram correlacionados com as especificações técnicas dos aerogeradores sem pás, possibilitando uma estimativa do potencial de geração energética dessa tecnologia no local. A abordagem combinou aspectos qualitativos, como a revisão teórica e a avaliação das características técnicas, e quantitativos, como a análise dos dados de vento e consumo energético, contribuindo para uma discussão fundamentada sobre a diversificação da matriz energética do campus em alinhamento com a sustentabilidade e eficiência energética da energia da UFERSA.

Além disso, a análise das condições climáticas foi aprofundada para considerar variações sazonais nos padrões de vento ao longo do ano. Essa perspectiva permitiu avaliar a estabilidade e a confiabilidade da geração de energia pelos aerogeradores sem pás em um contexto de possíveis mudanças climáticas, identificando os períodos de maior e menor viabilidade para a produção de energia eólica. Os resultados obtidos foram utilizados para projetar um planejamento, indicando a viabilidade técnica e operacional da implementação dessa tecnologia no campus.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na análise dos arranjos de aerogeradores da empresa Vortex, foram estudados dois modelos: o Tacoma, com 100 W de potência, e o Atlantis, capaz de gerar 1 kW. Essa distância entre os aerogeradores é crucial para evitar que os vórtices gerados por um aerogerador afetem o desempenho dos demais, garantindo que todos funcionem de forma eficiente e harmoniosa. O modelo Tacoma tem uma altura de 2,75 metros, com uma distância mínima recomendada de 1,37 metros entre os aerogeradores, o equivalente à metade da altura do dispositivo, já o modelo Atlantis tem altura de 9,0 metros, e distância mínima recomendada de 4,5 metros. O modelo Tacoma, se destaca como uma opção mais eficiente e compacta na geração de energia em pequena escala.

A área foi calculada da seguinte forma: considerando a distância d entre dois aerogeradores vizinhos como sendo a metade de sua altura H , e N o número de aerogeradores (o qual considera-se, por fim de simplicidade na análise, um quadrado perfeito, ou seja, possui raiz quadrada inteira), faz-se o seguinte cálculo usando-se a equação 1.

$$A = [(\sqrt{N} - 1) \times d]^2 \quad (1)$$

onde:

A = área do arranjo;

N = número de aerogeradores (considerando um quadrado perfeito);

d = distância mínima entre aerogeradores.

A Tabela 1 apresenta a potência nominal, a área necessária e o lado do quadrado formado pelos arranjos de aerogeradores Tacoma. Lembrando que a potência nominal total segue uma relação proporcional com a quantidade de aerogeradores empregados. No entanto, para a quantidade de aerogeradores considerada, a área necessária cresce em uma relação não linear conforme o número de aerogeradores. Isso fica claro quando vemos que, com 4 aerogeradores, a área é pouco menos que 2 m², enquanto que, com 16 aerogeradores, a área chega a aproximadamente 16,9 m². Além disso, o lado da malha aumenta conforme a raiz quadrada da área, indo de aproximadamente 1,37 m para 4 aerogeradores até 12,33 m para cerca de 100 aerogeradores.

Tabela 1 - Potência nominal e área de arranjo de aerogeradores Tacoma com altura 2,75 m.

Quantidade	Potência Nominal	Área	Lado
1	100 W	0,00 m ²	0,00 m
4 (2x2)	400 W	1,88 m ²	1,37 m
9 (3x3)	900 W	7,51 m ²	2,74 m
16 (4x4)	1600 W	16,89 m ²	4,11 m
25 (5x5)	2500 W	30,03 m ²	5,48 m
64 (8x8)	6400 W	91,97 m ²	9,59 m
100 (10x10)	10000 W	152,03 m ²	12,33 m

Fonte: elaborado pelo(a) autor(a) (2025) - retirado da empresa Vortex.

A Tabela 2 apresenta a potência nominal, a área necessária e o lado do quadrado formado pelos arranjos de aerogeradores Atlantis.

Tabela 2 - Potência nominal e área de configurações de aerogeradores Atlantis com altura 9 m.

Quantidade	Potência Nominal	Área	Lado
1	1,0 kW	0,00 m ²	0,00 m
4 (2x2)	4,0 kW	20,25 m ²	4,5 m
9 (3x3)	9,0 kW	81,00 m ²	9,0 m
16 (4x4)	16,0 kW	182,25 m ²	13,5 m
25 (5x5)	25,0 kW	324,00 m ²	18,0 m
64 (8x8)	64,0 kW	992,25 m ²	31,5 m
100 (10x10)	100,0 kW	1640,25 m ²	40,5 m

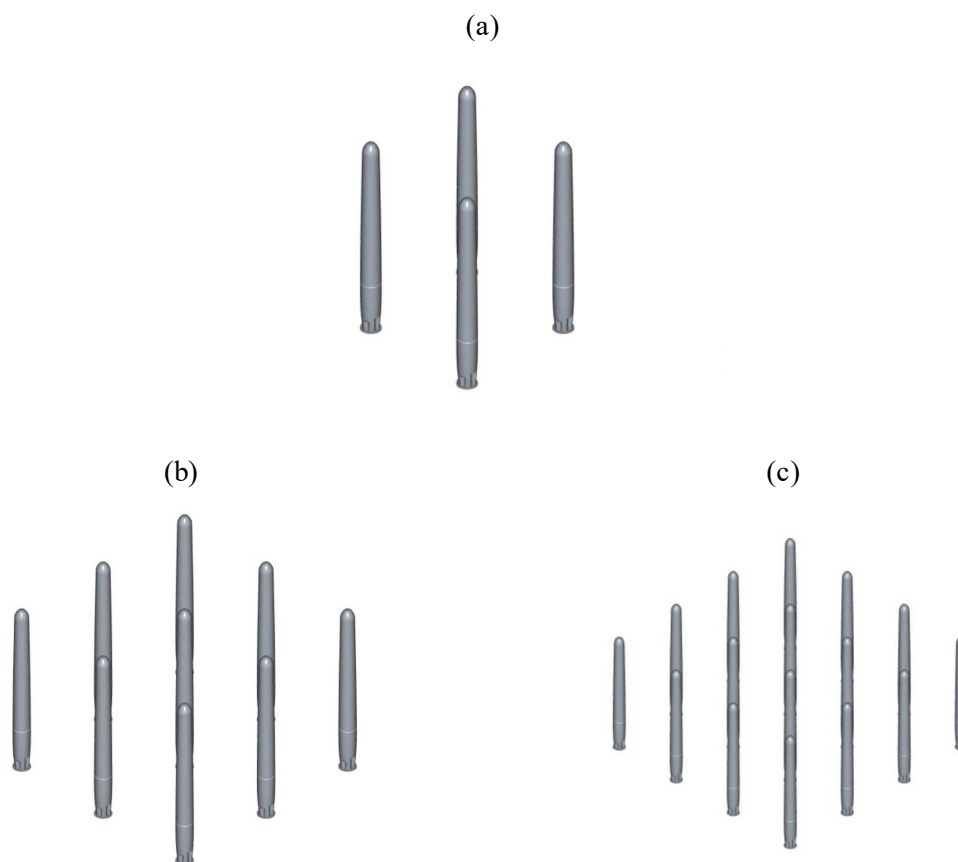
Fonte: elaborado pelo(a) autor(a) (2025) - retirado da empresa Vortex.

O modelo Atlantis é um pouco maior, com altura variando entre 9 e 13 metros. Para garantir que funcione direito, a distância mínima entre os aerogeradores deve ser de 4,5 metros, metade da altura do dispositivo. Com uma potência de 1 kW, ele é uma ótima opção para quem precisa de mais energia, sendo ideal para projetos de média escala. A Tabela 2 apresenta os dados para o modelo Atlantis, seguindo a mesma metodologia de cálculo.

A figura 14 exibe diferentes arranjos de aerogeradores modelados no *software FreeCAD*, demonstrando configurações possíveis para a implementação dessa tecnologia no campus da

UFERSA. Os modelos exploram *layouts* que consideram a eficiência energética, a distância entre turbinas e a orientação em relação aos ventos, auxiliando no planejamento de uma instalação viável e otimizada.

Figura 14 - Exposição dos arranjos 4 - 2x2 (a), 9 - 3x3 (b), 16 - 4x4 (c), de Aerogeradores.



Fonte: elaborado pelo(a) autor(a) usando o software FreeCAD (2025).

Os arranjos seguem um formato modular em grade quadrada, variando em densidade e disposição. O primeiro, um modelo 2x2 com quatro aerogeradores (a), é uma configuração mais compacta, ideal para áreas menores ou testes iniciais de viabilidade. Já o arranjo 3x3, composto por nove aerogeradores (b), representa uma distribuição intermediária, permitindo uma análise mais detalhada sobre o impacto da proximidade entre os dispositivos na eficiência energética. Por fim, o modelo 4x4, com dezesseis aerogeradores (c), simula um cenário de maior densidade, possibilitando estudar como múltiplos aerogeradores se influenciam mutuamente e qual seria o espaçamento ideal para minimizar perdas devido a turbulências e efeitos de sombreamento aerodinâmico.

Para contextualizar os resultados, foram analisados os dados das usinas solares instaladas na UFERSA campus de Angicos, disponíveis no site da Usina Solar da UFERSA. Como demonstrado na Tabela 3.

Tabela 3 - Dados gerais das usinas solares do campus Angicos da UFERSA.

Usina	Potência	Tipo	Local	Módulos	Área
Angicos 01	62,70 kWp	Solo	Campus	190	372,4 m ²
Angicos 02	38,25 kWp	Telhado	Central de Aulas I	85	187,4 m ²
Angicos 03	38,25 kWp	Telhado	Central de Aulas II	85	187,4 m ²
Angicos 04	80,04 kWp	Telhado	Bloco de Docentes I	174	375,5 m ²
Angicos 05	80,04 kWp	Telhado	Bloco de Docentes II	174	375,5 m ²

Fonte: Usina Solar da UFERSA (2023).

As placas solares são uma das tecnologias mais utilizadas para geração de energia limpa e renovável. Sua capacidade de converter luz solar diretamente em energia elétrica as torna uma opção versátil e eficiente para diferentes necessidades. Na figura 15, apresentamos imagens que ilustram a instalação e o funcionamento da usina solar do Campus Angicos.

Figura 15 - Fotografias do arranjo de placas solares da usina de solo do Campus Angicos.



Fonte: Viana (2025) – Utilizado com autorização.

O arranjo fotovoltaico da figura 15, instalado na UFERSA Campus Angicos, é composto por 190 módulos solares no solo. Além disso, nos telhados, há 85 módulos no Central de Aulas I e Central de Aulas II, e 174 módulos no Bloco de Docentes I e Bloco de Docentes II. A disposição otimiza a captação da radiação solar, garantindo uma melhor eficiência na geração de energia para o campus. Essa disposição estratégica foi pensada para aproveitar ao máximo a radiação solar, garantindo que a captação de energia seja eficiente e capaz de atender às demandas do campus.

Figura 16 - Esboço da área de 100 aerogeradores Atlantis no Campus de Angicos.



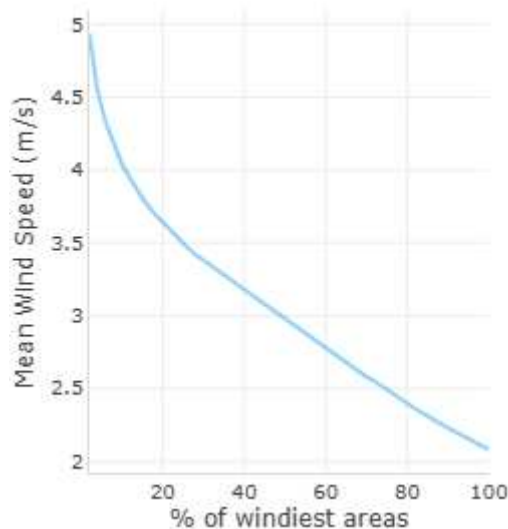
Fonte: elaborado pelo(a) autor(a) usando o *Calcmaps* (2025).

A Figura 16 apresenta uma simulação realizada no *Calcmaps*, mostrando uma área aproximada onde poderiam ser implantados 100 aerogeradores do modelo Atlantis, dispostos em uma configuração 10x10. A área necessária para a instalação seria de aproximadamente 1.640,25 m², ajustada na simulação para o valor mais próximo sendo 1.640,00 m², o valor mais próximo que o software conseguiu atingir. O local escolhido para a simulação é o mesmo onde atualmente estão instaladas as placas solares, o que sugere uma possível integração entre as duas fontes de energia renovável na UFERSA Campus Angicos.

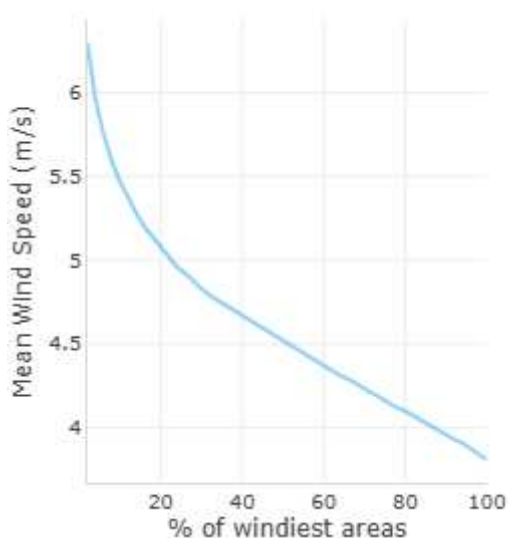
No Gráfico 2 são exibidas as velocidades médias do vento medidas a uma altitude de 10 m, comparando três escalas geográficas distintas: o Brasil (a) como um todo, o estado do Rio Grande do Norte (RN) (b) e a cidade de Angicos (c). Essa comparação permite uma análise detalhada do potencial eólico dessas localidades, destacando as diferenças regionais e a viabilidade da geração de energia a partir dos ventos.

Gráfico 2 -Velocidades médias do vento a 10 metros de altura: Brasil (a), Rio Grande do Norte (b) e Angicos (c).

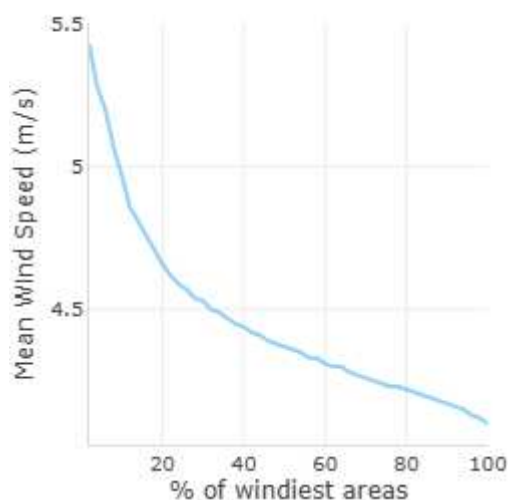
(a)



(b)



(c)



Fonte: *Global Wind Atlas* (2025).

O Gráfico 2 mostra como o vento se comporta a 10 metros de altura no Brasil, no Rio Grande do Norte e em Angicos. No geral, o Brasil (a), tem ventos mais fortes no Nordeste, especialmente no Rio Grande do Norte (b), onde a velocidade média é ideal para gerar energia eólica. Já Angicos (c), uma cidade do interior do RN. Isso mostra que, enquanto o país tem regiões muito variadas, o Nordeste se destaca como o lugar perfeito para investir em parques eólicos.

Esses dados são essenciais porque ajudam a identificar onde a energia eólica pode ser mais eficiente e viável. O Rio Grande do Norte (b), por exemplo, já é um dos líderes nacionais nesse fonte de energia, e cidades como Angicos (c) têm potencial para projetos de menor escala. Os

dados apresentados foram encontrados no *Global Wind Atlas*, uma plataforma amplamente utilizada para a avaliação do potencial eólico em diferentes regiões do mundo. Com essas informações, é possível planejar melhor a instalação de turbinas eólicas, contribuindo para um futuro mais sustentável e reduzindo a dependência de fontes de energia poluentes.

A Tabela 4 apresenta os dados médios da demanda ativa de energia elétrica consumida no Campus Angicos ao longo do ano de 2024. A demanda ativa, medida em quilowatts (kW), reflete o consumo efetivo de energia necessário para manter as operações do campus.

Tabela 4 - Dados médios da demanda ativa no Campus Angicos em 2024 (exceto dezembro).

Meses de 2024	Demanda Ativa
Janeiro	362,04 kW
Fevereiro	318,36 kW
Março	294,00 kW
Abril	299,88 kW
Maiο	227,64 kW
Junho	278,88 kW
Julho	304,92 kW
Agosto	307,44 kW
Setembro	341,88 kW
Outubro	300,72 kW
Novembro	258,72 kW
Média Anual	299,49 kW

Fonte: elaborado pelo(a) autor(a) (2025).

A demanda ativa é a quantidade de energia elétrica efetivamente consumida para realizar tarefas, como iluminação, aquecimento ou funcionamento de máquinas, medida em quilowatts (kW). Esse parâmetro representa a potência real utilizada em um sistema ou unidade consumidora, sendo fundamental para dimensionar infraestruturas, planejar a geração e distribuição de energia, e gerenciar custos operacionais. Os dados de dezembro não foram coletados, pois ainda não existiam no momento da análise. No entanto, a média anual já permite uma avaliação consistente do consumo energético do campus.

No contexto da geração de energia renovável, é relevante comparar esses dados com soluções alternativas, como o uso de aerogeradores sem pás. Com, três configurações de 100

(10x10) do modelo Atlantis têm capacidade para suprir um terço da demanda energética do Campus Angicos. Sua implementação representa uma contribuição significativa para a transição energética do campus, promovendo o uso de fontes limpas e renováveis.

A energia renovável é essencial para criar um futuro mais sustentável e eficiente. Este estudo compara duas formas de gerar energia limpa: os aerogeradores sem pás, como os modelos Tacoma e Atlantis, e os painéis solares, usando como exemplo a usina Solar de Angicos 01. Os aerogeradores Tacoma, que têm 2,75 metros de altura, produzem energia de forma eficiente em pouco espaço. Um grupo pequeno de 4 (2x2) com aerogeradores do modelo Atlantis, com área de 20,25 m², gera 4,0 kW de potência nominal, enquanto uma configuração maior, com 100 (10x10), ocupa a área de 1640,25 m² e chega a gerar 100,0 kW de potência nominal. Já a usina Solar de Angicos 01 gera 62.700 W (ou 62,70 kWp), mas precisa de 372,4 m². Isso mostra que os aerogeradores conseguem gerar uma boa quantidade de energia em uma área total menor, sendo mais compactos nesse sentido, enquanto os painéis solares consomem mais energia por metro quadrado, mas bloqueiam mais terrenos.

Uma das principais vantagens dos aerogeradores sem pás está na sua capacidade de reduzir impactos visuais e ambientais, especialmente no que se refere à projeção de sombras. Enquanto os painéis solares podem restringir a luz solar e afetar negativamente o desenvolvimento da vegetação, os aerogeradores sem pás preservam a exposição natural ao sol, promovendo um impacto ambiental reduzido e favorecendo o equilíbrio ecológico. Além disso, o impacto sobre a fauna é reduzido devido à sua relativa importância para as aves e os morcegos, pois esses animais são frequentemente afetados pelo ruído e pelo impacto das pás das turbinas eólicas quando se movem.

A ausência de partes móveis de grande porte também contribui para uma menor interferência no ecossistema, reforçando a compatibilidade dessa tecnologia com a preservação ambiental. Por serem leves e possuírem uma estrutura menor e menos complexa, os aerogeradores sem pás exigem menos recursos para instalação e manutenção, o que resulta em menor gasto financeiro. Mesmo assim, esses aerogeradores precisam de um espaço bem planejado para serem instalados, o que pode ser difícil em cidades ou lugares apertados. Apesar disso, os benefícios para o meio ambiente e a harmonia com plantas, animais e a sociedade fazem esse uso do espaço valer a pena. No campus de Angicos, onde o consumo médio de energia é de 299,59 kW por ano, os aerogeradores poderiam atender cerca de um terço disso, dependendo de quantos foram usados. Isso mostra que eles podem trabalhar junto com os painéis solares para suprir a necessidade de energia.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo avaliou a viabilidade da implementação de aerogeradores sem pás no Semiárido Nordeste, com foco especial na área do Campus Angicos da UFRSA. Os resultados demonstraram que essa tecnologia inovadora pode oferecer opções significativas para diversificação da matriz energética, especialmente em regiões com características climáticas desafiadoras. A eficácia da tecnologia dos aerogeradores sem pás foi analisada com base em critérios técnicos, econômicos e ambientais. Os resultados indicam que, apesar das limitações impostas pela baixa velocidade dos ventos na região, os modelos estudados apresentaram um desempenho satisfatório.

As análises comparativas entre os aerogeradores Tacoma e Atlantis e a usina solar Angicos 01 revelaram que, enquanto os painéis solares oferecem maior eficiência por metro quadrado, os aerogeradores sem pás conseguem gerar uma boa quantidade de energia em uma área significativamente menor (10.000 W em 152,03 m² para Tacoma, comparado aos 62.700 W em 372,4 m² da usina solar). Isso demonstra o potencial dessa tecnologia como uma alternativa viável para complementar a geração de energia em espaços limitados.

A viabilidade da integração com sistemas fotovoltaicos também foi analisada. Observou-se que a combinação das duas fontes pode aumentar a estabilidade do fornecimento de energia para o campus, uma vez que a energia solar e a energia eólica apresentam perfis complementares de geração. Contudo, é essencial considerar o espaçamento adequado entre os aerogeradores e os painéis solares para evitar sombreamento e perdas na captação de energia fotovoltaica.

Os impactos ambientais da implementação dos aerogeradores sem pás foram igualmente investigados. Um dos principais benefícios identificados foi a redução de ruídos e a mínima interferência na fauna local, o que é particularmente relevante em um ecossistema tão frágil quanto o Semiárido. Além disso, a ausência de pás elimina riscos para aves e morcegos, comuns em turbinas eólicas convencionais. No entanto, os desafios associados às condições climáticas regionais, como as variações extremas de temperatura, exigem ajustes técnicos, incluindo o uso de materiais mais resistentes para garantir a durabilidade dos equipamentos.

Além disso, estudos sobre o impacto econômico e social da adoção de aerogeradores sem pás no Semiárido podem fortalecer a viabilidade desse modelo em outras localidades com condições semelhantes. Dessa forma, a pesquisa contribui para o avanço das fontes renováveis em regiões com restrições climáticas, promovendo soluções energéticas mais sustentáveis e adaptadas às necessidades locais.

REFERÊNCIAS

- ABEEÓLICA. **Ranking mundial de capacidade eólica instalada onshore em 2022**. Disponível em: <https://abeeolica.org.br/>. Acesso em: 3 jan. 2025.
- ALVES, José Jakson Amancio. **Análise regional da energia eólica no Brasil**. Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional, v. 1, 2010.
- AMORIM, Luís Felipe Carrari de. **Políticas de incentivo à energia eólica: um estudo de caso sobre os processos de implementação e os motivos para a expansão da fonte eólica no setor elétrico brasileiro no período de 2001 a 2018**. 2021. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo.
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. Sistema de informações de geração da ANEEL - SIGA. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/>. Acesso em: 22 dez. 2024.
- ARAÚJO, Wanicleide Rosa de. **Energia eólica: panorama do setor no mundo, no Brasil e na região Nordeste no período de 2008 a 2018**. 2018. Monografia. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/16781/1/WRA11022020.pdf>. Acesso em: 21 dez. 2024.
- AVELLA RUIZ, Jorge Mario. **Aspectos técnicos, econômicos e ambientais da implementação de energia eólica e solar fotovoltaica em edifícios**. 2016. Monografia. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/dd7fcc1d-b26d-40d1-a491-f52230e8e493/content>. Acesso em: 20 dez. 2024.
- BARDAKJIAN, Antranig; MANDADAKIS, Paul; TINGLE, Amy. **Comparação de eficiência de turbinas eólicas de eixo horizontal e turbinas sem pás**. Revisão PAM, [SI], jun. 2017.
- BEZERRA, Francisco Diniz. **Energia eólica no Nordeste**. 2019. Artigo. Disponível em: https://bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/1192/1/2019_CDS_66.pdf. Acesso em: 22 dez. 2024.
- BREDA, A; LIMA, V M R. **Estudio de caso sobre el análisis didáctico realizado en un trabajo final de un máster para profesores de matemáticas en servicio**. *REDIMAT - Journal of Research in Mathematics Education*, v. 5, n. 1, p. 74-103, 2016. DOI: 10.4471/redimat.2016.1955
- CALCMAPS. Simulação de área: [captura de tela]. 2025. Disponível em: <https://www.calcmaps.com/pt/>. Acesso em: 24 fev. 2025. Captura realizada pelo autor.
- CARVALHO, Itaiara Felix et al. **Energia eólica offshore: potencial e desafios de implantação**. 2017. Monografia. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/xmlui/handle/riufcg/18771>. Acesso em: 22 dez. 2024.

COELHO, Rodrigo Nicodemos. **Estudo dos principais modelos de aerogeradores**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

DANTAS, José Carlos. **A Expansão dos Parques Eólicos no Semiárido Brasileiro e os Conflitos Territoriais**. 2021.

DIAS, Reinaldo. **O papel das energias renováveis no cumprimento dos ODS: oportunidades e desafios**. RECIMA21 - Revista Científica Multidisciplinar, v. 1, pág. e514845, 2024.

DUTRA, Ricardo Marques; SZKLO, Alexandre Salem. **A energia eólica no Brasil: PROINFA e o novo modelo do setor elétrico**. In: Anais do XI Congresso Brasileiro de Energia-CBE. 2006. p. 842-868.

ESTEVES, Simão Sena. **Análise Causa-efeito da Força Magnus**. 2019. Monografia. Disponível em: <<https://repositorio-cientifico.uatlantica.pt/handle/10884/1421>>. Acesso em: 13 mar. 2025.

FERREIRA, Daniel Viana. **Desafios para o crescimento sustentável e integração da energia eólica no Brasil**. 2014. Monografia. Disponível em: <<https://pantheon.ufrj.br/handle/11422/1529>>. Acesso em: 13 mar. 2025.

FERREIRA, Lorena Martins. **Perspectiva da geração de energia eólica offshore no Brasil**. 2019. Monografia. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/26840>>. Acesso em: 13 mar. 2025.

FIGUEIREDO, Mariana Menegueti. **Análise da viabilidade técnica do aerogerador sem pás: um estudo de caso na Universidade Positivo**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Energia), Escola Politécnica da Universidade Positivo, Universidade Positivo. 2020.

FREIRE, AP; ILHA, A.; COLAÇO, MJ (ed.). **Turbulência**. Rio de Janeiro: ABCM. 2006. v. 5, tomo 1, cap. 2.

FREECAD. Manta de aerogeradores sem pás: [imagens geradas em software]. 2025. 3 imagens, color., modeladas em FreeCAD. Software disponível em: <https://www.freecad.org/>. Acesso em: 21 jan. 2025. Imagens produzidas pelo autor.

GONZÁLEZ, Javier García. **Simulação de aproveitamento do recurso eólico urbano com tecnologia Vortex Bladeless**. 2019. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Térmica e de Fluidos, Escuela Politécnica Superior, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid.

HIDALGO, Miguel Ángel Sánchez; PASCUAL, Ricardo Atienza. **Novo conceito de geração eólica: aerogerador sem pás por vorticidade**. 2017. Disponível em: https://revistas.uax.es/index.php/tec_des/article/view/1182. Acesso em: 18 jan. 2025.

INATOMI, Thais Aya Hassan; UDAETA, Miguel Edgar Morales. **Análise dos impactos ambientais na produção de energia dentro do planejamento integrado de recursos**. Brasil Japão. Trabalhos, p. 189-205, 2005.

LEITE, Laura Maria Martins. **Reciclagem de pás de rotor de aerogeradores eólicos: desafios e oportunidades**. 2020. Dissertação (Mestrado) - Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal.

LIMA, Carolina Carneiro; DE OLIVEIRA, Márcio Luís. **Energia eólica: por uma revisão das bases energéticas e incentivo à economia de baixo carbono**. Revista Eletrônica do Curso de Direito da UFSM , v. 2, pág. 619-645, 2015.

LOPES, Ricardo Aldabó. **Energia eólica**. São Paulo: Artliber, 2002.

LOPES, Ricardo Aldabó. **Energia eólica**. 2. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2012.

NYGAARD, Stig. **Boattrip 2009**: [Imagem], 2009. Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Boattrip_2009.jpg. Acesso em: 10 jan. 2025.

OLIVEIRA, Aline de Melo. **Estudo Sobre a Geração de Energia Eólica no Nordeste Brasileiro**. 2017. Monografia. Disponível em: <https://repositorio.pgsscogna.com.br/bitstream/123456789/26547/1/ALINE%20MELO%20OLIVEIRA_1767031_assignsubmission_file_TCC%20ALINE%20COMPLETO%20.1.pdf>. Acesso em: 12 mar. 2025.

ORDOÑEZ, Orlando; DUKE, A Reyes. **Avaliação de recursos eólicos: análise das características do Vortex Bladeless em Puerto Cortés, Honduras**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FUTURE ENVIRONMENT AND ENERGY, 11., 2021, [SI]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, [SI]: IOP Publishing, 2021. v. 801, 012019.

PEXELS. **Moinho de vento de madeira durante o dia**. Disponível em: <https://pxhere.com/pt/photo/638288>. Acesso em: 25 dez. 2024.

PINHAS, Marco Antônio Moreira et al. **Análise técnica de aerogeradores**. 2023.

RAMOS, Mariana M.; CARGNELUTTI, Jocelaine. **Análise dinâmica da Ponte de Tacoma: aplicações de EDO na Engenharia Civil**. Série de Atas da Sociedade Brasileira de Matemática Computacional e Aplicada , v. 1, pág. 1-2, 2025.

RIBEIRO, Luiza Bastos. **Um estudo sobre energia eólica no Brasil**. 2017.

RINGER, Naya Jayme . **Desafios do setor de energia eólica no Brasil: uma abordagem sistêmica**. 2014. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo.

SEO BIRDLIFE. **Estudio comparativo de los impactos ambientales producidos por los aerogeneradores con palas vs.** Disponível em: <https://seo.org>. [S:sn], 2015. 17 p.

SILVA, Giovanni Rêgo. **Estudo e panorama geral da energia eólica no Brasil**. 2016.

SIMAS, Moana Silva. **Energia eólica e desenvolvimento sustentável no Brasil: estimativa da geração de empregos por meio de uma matriz insumo-produto ampliada**. 2012. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SOARES, Leonardo Jordão. **Energia eólica: inserção na Matriz Energética Brasileira**. 2015.

TECHNICAL UNIVERSITY OF DENMARK. Global Wind Atlas: [gráficos online]. [2025]. 3 gráficos, color., velocidade média do vento a 10 m de altura. Disponível em: <https://globalwindatlas.info/>. Acesso em: 24 fev. 2025.

TEDESCO, Henrique Tasca. **Estudo de diferentes direcionadores de escoamento na otimização da potência convertida de uma turbina eólica de eixo vertical**. 2015.

UFERSA . **Usina solar da UFERSA**. 2017. Disponível em: <https://usinasolar.ufersa.edu.br/>. Acesso em: 20 jan. 2025.

VIANA, Lucas de Araújo Leal. Placas solares no solo do campus Angicos - UFERSA: [fotografia]. 2025. 2 fotografias, color., aéreas, capturadas por drone. Não publicadas. Disponíveis com autorização do autor.

VILLARREAL, David Jesús Yáñez. **Geradores eólicos ressonantes VIV**. 2018. Disponível em: www.vortexbladeless.com. Acesso em: 15 out. 2024.

VORTEX SEM LÂMINA. **Vortex bladeless: um gerador eólico sem pás**. 2019. Disponível em: https://drive.google.com/file/d/1smo9QuZVorGiR6Frqb-wDhFimjuink-i/view?usp=drive__lin. Acesso em: 18 nov. 2024.

VORTEX BLADELESS. Kit de mídia: [Imagem de Vortex Bladeless, 2019]. Disponível em: <https://vortexbladeless.com/media-kit/>. Acesso em: 22 jan. 2025.

VORTEX BLADELESS. **Vortex bladeless: um gerador eólico sem pás**. 2020. Disponível em: https://drive.google.com/drive/folders/1-ojSuouuFzT_Td1NPidCjgsdOTJtH8nC. Acesso em: 19 nov. 2024.

VORTEX BLADELESS. Kit de mídia: [Imagem de Vortex Bladeless, 2023]. Disponível em: <https://vortexbladeless.com/media-kit/>. Acesso em: 10 jan. 2025.

VORTEX BLADELESS. Kit de mídia. [Sl: sn], 2023. Disponível em: <https://vortexbladeless.com/media-kit/>. Acesso em: 19 nov. 2024.

WSDOT. **Vista aérea da ponte do canal de navios I-5 em construção**. 2016. 1 fotografia colorida. Disponível em: <https://www.flickr.com/photos/wsdot/25232634854>. Acesso em: 10 nov. 2024.